

ISSN 1226-0207(Print) / 3058-2024(Online)

한국연구재단 등재 학술지

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

한국포장학회지

Vol. 32 No. 2
2026. 8



한국포장학회

KOREA SOCIETY OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY



한국포장학회지

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

2026년도 학회 임원명단

명 예 회 장	김종경(한국건설생활환경시험연구원)		
회 장	유하경(소프트팩㈜)		
수석부회장	박수일(연세대학교)	오재영(한국건설생활환경시험연구원)	
부 회 장 (가나다순)	고성혁(연세대학교)	김준태(경희대학교)	박종민(부산대학교)
	서종철(연세대학교)	손수경(백제예술대학교)	신준섭(용인예술과학대학교)
	윤찬식(㈜에버캠텍)	임병규(연세대학교) [정경대학교우무과정총동문회]	정현모(경북과학대학교)
	조영진(한국식품연구원)	하상도(중앙대학교)	
감 사	민세철(서울여자대학교)	박상희(한국생산기술연구원)	
수 석 이 사	한재준(고려대학교)		
총 무 이 사	유승란(세계김치연구소)		
재 무 이 사	주민정(한국건설생활환경시험연구원)		
편 집 이 사	김기석(서울대학교)	김도완(강릉원주대학교)	안덕순(경남대학교)
	황성욱(계명대학교)		
학 술 이 사	강동호(한국생산기술연구원)	김도영(전남대학교)	김수현(한국컨테이너폴(주))
	도한솔(이화여자대학교)	박지훈(이화여자대학교)	박태훈(한국재료연구원)
	이지현(서울대학교)	정영훈(경북대학교)	
정 보 이 사	안재환(한국식품연구원)	장윤지(국민대학교)	정성근(주아모레퍼시픽)
	허준(한국식품산업클러스터진흥원)		
홍 보 이 사	김길수(주경연전람)	김나영(인하공업전문대학)	김미연(주투유에이치앤비)
	박주하(롯데중앙연구소)	이진경(주씨피알에스앤티)	
사 업 이 사	권혁찬(한국순환자원유통지원센터)	김연동(주BMTS)	김인수(주가성팩)
	김재경(CJ프레시웨이 R&D센터)	문병근(한국건설생활환경시험연구원)	백소라(세종사이버대학교)
	백인길(한솔제지(주))	안덕준(주SPC PACK)	이재정(한국포장재활용사업공제조합)
	장욱(한국플라스틱포장용기협회)	전재호(주유진로지스틱스)	정해원(주아모레퍼시픽)
	최창휴(케미코첨단소재)		
국 제 이 사	김영택(Virginia Polytechnic Institute & State Univ. USA)	노유래(Michigan State Univ. USA)	박종훈(Toronto Metropolitan Univ. Canada)
	신종민(California Polytechnic State Univ. USA)	오상원(한솔제지, USA)	이의학(Michigan State Univ. USA)

편 집 위 원 회

위 원 장	김준태(경희대학교)		
부 위 원 장	김기석(서울대학교)	김도완(강릉원주대학교)	안덕순(경남대학교)
	황성욱(계명대학교)		
편집위원회 (가나다순)	강동호(한국생산기술연구원)	박수일(연세대학교)	박종민(부산대학교)
	박태훈(한국재료연구원)	서종철(연세대학교)	

한국포장학회지 제32권 제2호

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
Vol. 32. No.2, 2026

발행처: (사)한국포장학회
서울특별시 서초구 강남대로 441(서산빌딩),
9층 007호 (사)한국포장학회
우) 06612
TEL : 02-6257-9477
E-mail : kopast2021@gmail.com
Web site : www.kopast.or.kr

Published by: KOREA SOCIETY OF
PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY
#007, 9F, 441, Gangnam-daero, Seocho-gu, Seoul, 06612,
Republic of Korea
TEL : 82-2-6257-9477
E-mail : kopast2021@gmail.com
Web site : www.kopast.or.kr

발행일: 2026년 8월 31일

Published Date: 2026. 8. 31.

편집처: 한림원(주)
TEL: 02-2273-4201
FAX: 02-2273-4240
E-mail: hanrim@hanrimwon.co.kr

Designed by : Hanrimwon Co. Ltd
TEL : 82-2-2273-4201
FAX : 82-2-2273-4240
E-mail: hanrim@hanrimwon.co.kr



한국포장학회지

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

제32권 제2호

연구논문

2026년 8월

- 포장 필름 종류에 따른 신선 꽃송이버섯의 상온 저장 중 품질 변화 및 상품성 유지 효과
..... 최지원 · 권나영 · 허병수 · 장민선 · 조재한 79
- Effects of Starch Acetylation on Application of Thermoplastic Starch as Packaging Material:
Degree of substitution, Gelatinization and Biodegradability
..... Guyoon Kwon and Seonghyuk Ko 89
- 카제인나트륨/커피찌꺼기 코팅 기반 이산화염소 방출형 항균 및 향진균 종이 사쇄 제조 및 특성 분석
..... 강기영 · 이우상 · 김시현 · 최해리 · 김도완 97
- 포장재 개선 사례를 통해 본 제품 등의 순환이용성 평가제도의 성과와 ESPR 대응 과제
..... 조성문 107
- COMSOL-Based Placement Design of Printed Piezoelectric Sensor Labels for
Shock Monitoring in Transport Packaging
..... Omkar Y. Pawar, Siyoung Yang and Sooman Lim 117
- 글로벌 유통포장 정책 변화에 대응한 국내 유통포장 관리체계의 방향성 고찰
..... 김승돈 · 권용재 125
- 커피 찌꺼기 강화 전분 복합재료: 다중 스케일 섬유 협동 효과 및 응용 설계 연구
..... 왕효동 · 장중식 137
- 오이 재배방법에 따른 과실 생육과 수확후 필름포장에 의한 품질 비교: 수확전 재배환경과
수확후 포장 처리에 따른 영향 분석 및 조절된 매개 모형을 이용한 모델링
..... 이정수 157



한국포장학회지

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

Vol. 32, No. 2

Research Papers

August 2026

Effects of Packaging Films on Quality Changes and Marketability of Fresh *Sparassis Latifolia* During Ambient Storage

.....Ji Weon Choi, Nayeong Kwon, Byong-Soo Heo, Min-Sun Chang, and Jae-Han Cho 79

Effects of Starch Acetylation on Application of Thermoplastic Starch as Packaging Material: Degree of substitution, Gelatinization and Biodegradability

.....Guyoon Kwon and Seonghyuk Ko 89

Preparation and Characterization of Chlorine Dioxide-releasing Antimicrobial and Antifungal Paper-based Sachet Coated with Sodium Caseinate and Spent Coffee Grounds

.....Kiyoun Kang, Woosang Lee, Sihyun Kim, Haeri Choi, and Dowan Kim 97

Performance of Korea's Assessment of Circular Usability of Products and Policy Implications for ESPR Compliance: Evidence from Packaging Improvement Cases

.....Seong Moon Cho 107

COMSOL-Based Placement Design of Printed Piezoelectric Sensor Labels for Shock Monitoring in Transport Packaging

.....Omkar Y. Pawar, Siyoung Yang and Sooman Lim 117

A Review of the Directions for the Korean Distribution Packaging Management System in Response to Global Distribution Packaging Policy Changes

.....Seung Don Kim and Yong Chai Kwon 125

Coffee Grounds Reinforced Starch Composites: Multi-scale Fiber Synergistic Effects and Application Design

.....Wang Xiaodong and Jang Jung-sik 137

Growth and Postharvest Quality Characteristics of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) as Affected by Cultivation Method and Postharvest Film Packaging : Analysis of Preharvest and Postharvest Factors and Modeling via a Moderated Mediation Model

.....Jung-Soo Lee 157

포장 필름 종류에 따른 신선 꽃송이버섯의 상온 저장 중 품질 변화 및 상품성 유지 효과

최지원^{1*} · 권나영¹ · 허병수² · 장민선¹ · 조재한¹

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 저장유통과

²전북특별자치도농업기술원

Effects of Packaging Films on Quality Changes and Marketability of Fresh *Sparassis Latifolia* During Ambient Storage

Ji Weon Choi^{1*}, Nayeong Kwon¹, Byong-Soo Heo², Min-Sun Chang¹, and Jae-Han Cho¹

¹Postharvest Technology Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea

²Jeonbuk State Agricultural Research & Extension Services, Iksan 54591, Republic of Korea

Abstract This study evaluated the effects of different packaging films on quality changes and shelf life of fresh *Sparassis latifolia* during ambient storage. Mushrooms were packaged with PET, OPP, MPP5, and perforated OPP films and stored for 8 days under ambient conditions. Changes in package headspace gas composition (O₂ and CO₂), weight loss, physicochemical properties, and quality indices were analyzed. OPP and MPP5 films rapidly established O₂ concentrations close to 0% and high CO₂ (~16–17%) conditions, while perforated OPP maintained near-atmospheric conditions. These differences significantly affected quality changes. MPP5 showed the lowest weight loss and maintained overall quality, whereas perforated OPP exhibited rapid deterioration after 4 days. Browning and aroma were identified as key factors influencing overall quality ($r = -0.876$ and 0.866 , respectively), and overall quality was negatively correlated with O₂ and positively correlated with CO₂. These results indicate that MPP5 is the most effective packaging film for maintaining quality and extending the shelf life of *Sparassis latifolia* under ambient storage conditions.

Keywords *Sparassis latifolia*, packaging film, ambient storage, quality change, shelf life

서 론

꽃송이버섯(*Sparassis latifolia*)은 β -glucan을 비롯한 다양한 생리활성 물질을 고함량으로 함유한 기능성 식용버섯으로, 면역조절, 항산화 및 항암 효과 등으로 인해 고부가가치 농산물로 인식되고 있다. 최근에는 신선 상태로의 소비뿐만 아니라 가공 및 기능성 식품 소재로의 활용이 증가하면서 저장 및 유통 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 그러나 꽃송이버섯은 높은 수분 함량과 연약한 조직 구조를 가지는 특성으로 인해 수확 후 저장 및 유통 과정에서

품질 저하가 빠르게 진행되는 한계를 가진다¹⁾.

신선 버섯류는 일반적으로 높은 호흡률과 활성 대사 작용을 나타내며, 저장 중 갈변(browning), 시들음(wilting), 조직 연화(softening), 수분 손실 및 이취(off-odor) 발생과 같은 품질 열화가 복합적으로 나타난다²⁾. 특히 품질 저하의 주요 원인인 갈변(browning)은 polyphenol oxidase 활성 증가와 세포막 손상에 따른 페놀 화합물의 산화 반응에 의해 발생하며, 이는 상품 가치를 결정짓는 외관 품질에 치명적인 영향을 미친다³⁾. 또한 버섯류는 수분 함량이 높아 저장 중 증산에 의한 수분 손실이 빠르게 진행되며, 이는 조직 위축과 시들음을 유발하여 상품성을 저하시킨다⁴⁾.

이러한 품질 저하를 억제하기 위한 방법으로 포장 기술이 널리 활용되고 있으며, 특히 포장 필름은 기체 투과도와 수분 투과 특성에 따라 포장 내부의 미세환경을 수동적으로 조절하는 modified atmosphere(MA) 시스템으로 작용한다⁴⁾. 필름의 기체 투과 특성에 의해 내부 산소(O₂) 및 이

*Corresponding Author: Ji Weon Choi
National Institute of Horticultural and Herbal Science, RDA, Wanju 55365, Republic of Korea
Tel: +82-63-238-6521
Fax: +82-63-238-6505
E-mail: jwcnpri@korea.kr

Table 1. Characteristics of passive modified atmosphere (MA) packaging films used in this study

Film	Material type	Thickness (μm)	Oxygen permeability ($\text{mL}/\text{m}^2\cdot\text{day}\cdot\text{atm}$)	Water vapor transmission rate ($\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$)	Perforation characteristics
PET	Polyethylene terephthalate	380	10,930.264	8.546	None
OPP	Oriented polypropylene	30	1,386.490	4.469	None
MPP5	Modified polypropylene film	30	5680.231	4.935	None
Perforated OPP	Oriented polypropylene	30	> 31,585	120.594	Pinholes at 6mm intervals

산화탄소(CO_2) 농도가 변화하며, 이러한 기체 조성은 농산물의 호흡률 및 대사 활동에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다^{4,13,14}). 특히 저산소 및 고이산화탄소 조건은 호흡 억제 및 효소 활성 감소를 유도하여 저장 중 품질 유지에 중요한 역할을 한다¹).

신선 버섯류의 저장성 향상을 위하여 다양한 포장 기술이 적용되어 왔다. 양송이버섯(*Agaricus bisporus*)과 표고버섯(*Lentinula edodes*)에서는 미세천공 필름을 이용한 수동형 MA 포장(passive modified atmosphere packaging), 에틸렌 제어 기반 능동 포장(active packaging), 지능형 포장(intelligent packaging) 및 나노복합 포장(nanocomposite packaging) 등이 보고되어 있으며, 이러한 기술은 갈변 억제, 향기 유지, 수분 손실 감소 및 저장수명 연장에 효과적인 것으로 알려져 있다⁵⁻¹⁵). 특히 버섯류에서는 저산소 및 고이산화탄소 조건에서 polyphenol oxidase 활성 억제에 따른 갈변 지연 및 품질 유지 효과가 나타나는 것으로 보고되었으며^{6-9,15}), 반대로 기체 교환이 활발한 조건에서는 품질 저하가 빠르게 진행되는 경향이 확인되었다⁶⁻¹³).

그러나 꽃송이버섯은 비교적 최근에 유통이 확대된 품목으로, 수확 후 저장 및 유통 과정에서의 품질 변화에 대한 연구뿐만 아니라 포장기술 적용에 관한 연구도 매우 제한적인 실정이다¹⁴). 특히 상온 유통 조건에서 포장재의 기체 투과 특성에 따른 내부 기체 조성 변화와 품질 간의 정량적 관계를 규명한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

따라서 본 연구에서는 다양한 포장 필름(PET, OPP, MPP5, perforated OPP)을 적용한 꽃송이버섯을 대상으로 상온 저장 중 품질 변화 및 기체 조성 변화를 분석하고, 총괄품질과 개별 품질 인자 간 상관관계를 규명함으로써 상품성 유지에 적합한 포장 조건을 도출하고자 하였다. 본 연구 결과는 꽃송이버섯의 상온 유통 및 저장 기술 개발을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

재료 및 방법

1. 실험재료

본 실험에 사용된 꽃송이버섯(*Sparassis latifolia*)은 2026

년 1월, 경기도 평택시 팽성읍에서 재배된 ‘바글’ 품종으로 신선 시료를 수확 직후 선별하여 사용하였다. 시료는 외관상 손상이 없고 균일한 크기와 형태를 가진 개체만을 선별하였다.

2. 포장 처리 및 저장 조건

포장 처리는 PET(JEILPACK, Ansung, Korea), OPP(RISEN P&M, Busan, Korea), MPP5(RISEN P&M, Busan, Korea) 및 perforated OPP(RISEN P&M, Busan, Korea) 필름을 이용하여 수행하였다(Table 1). 각 처리구는 한 송이씩 소포장한 후, 상온 저장을 실시하였으며, 저장 기간 중 온도는 $18.0 \pm 1.15^\circ\text{C}$, 상대습도는 $23.3 \pm 4.09\%$ 로 유지되었다. 저장 기간은 총 8일로 설정하였으며, 분석은 저장 0, 2, 4, 6 및 8일에 실시하였다.

3. 포장내부 공기조성 조사

포장 내부의 산소(O_2) 및 이산화탄소(CO_2) 농도는 저장 기간 동안 headspace gas analyzer (CheckMate 3, AMETEK MOCON, Denmark)를 이용하여 측정하였다. 각 처리구별 포장 내부의 기체는 밀폐된 상태에서 가스 샘플링을 통해 채취하였으며, 측정 시에는 포장재를 개봉하지 않고 주사침을 이용하여 내부 기체를 직접 분석하였다. 산소 및 이산화탄소 농도는 각각의 센서를 통해 동시에 측정하였으며, 결과는 부피 백분율(%)로 나타내었다. 측정은 저장 0, 2, 4, 6 및 8일에 수행하였으며, 각 처리구별로 3반복 측정 후 평균값으로 산출하였다.

4. 품질 특성 조사

꽃송이버섯의 저장 중 품질 특성은 표고버섯을 대상으로 수행된 Cho 등¹³)의 방법을 일부 수정하여 조사하였다. 중량감소율은 저장 초기 중량 대비 감소량을 백분율로 환산하여 산출하였다. 경도는 처리구별로 9반복을 texture analyzer(TA-XT2, Stable Micro Systems, Surrey, UK)를 이용하여 지름 2 mm probe를 3.0 mm/s의 속력으로 5 mm 관입시켜 최대 힘을 측정하였고, N으로 표시하였다. 가용성 고형물 함량은 처리구별로 3반복을 굴절당도계를 이용하여

측정하였다. 시료는 갓(pileus) 조직을 채취하여 전체를 착즙한 후 여과지로 불순물을 제거한 착즙액을 분석에 사용하였고, 결과는 °Bx로 표시하였다. 꽃송이버섯의 색도는 자실체를 갓(pileus)과 대(stipe)로 구분하여 측정하였다. 갓은 상부의 엽상 구조를, 대는 기부 조직을 의미한다. 색도는 색차계(CR-400, Konica Minolta Corp., Tokyo, Japan)를 이용하여 Hunter L*, a*, b* 값을 측정하였으며, 측정 전 백판으로 영점을 보정하였다. 각 측정값은 평균값 $\pm$ 표준오차(standard error, SE)로 나타내었다.

외관품질 평가는 Choi 등¹³⁾의 방법을 이용하여, 저장 기간 동안의 색 변화, 갈변 정도, 시들음 정도, 이취 발생, 고유의 향 및 총괄품질을 종합적으로 고려하여 점수화하였다. 갈변은 갓 표면의 갈변 면적 비율에 따라 0(발생 없음), 1(10% 미만), 2(10-20%), 3(20-40%), 4(40% 이상)로 평가하였다. 시들음은 갓과 대의 탈수 및 조직 수축 정도를 기준으로 0(정상), 1(갓 선단부 0-2 cm 고사), 2(갓 선단부 2-4 cm 고사), 3(갓 선단부 5-10 cm 고사 및 대 10 cm 이상 고사)로 구분하여 평가하였다. 이취는 냄새의 강도를 기준으로 1(무취), 3(약함), 5(보통), 7(강함), 9(매우 강함)으로 평가하였다. 전반적 품질은 갈변, 시들음, 이취 및 외관 상태를 종합적으로 고려하여 1(매우 나쁨)에서 9(매우 우수)까지의 점수로 평가하였다. 모든 측정은 처리구별로 6반복으로 실시하였으며, 결과는 평균값으로 산출하였다.

5. 통계 분석

본 실험은 완전임의배치법(completely randomized design)에 따라 3반복으로, 저장기간 경과에 따른 품질 특성 변화는 조사항목에 따라 3반복, 6반복 또는 9반복으로 측정하였고, 측정값은 평균값 표준오차(standard error, SE)로 나타내었다.

처리구 간 유의성 검정은 통계분석 프로그램(IBM SPSS Statistics, ver. 30.0, IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 이용하여 분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 실시한 후, Duncan의 다중범위검정(Duncan's multiple range test)을 통해 평균 간 유의차를 검정하였다($p < 0.05$).

또한, 품질 인자 간 상관관계를 분석하기 위하여 Pearson 상관분석을 수행하였으며, 이를 기반으로 주요 품질 요인이 총괄품질에 미치는 영향을 평가하였다.

결과 및 고찰

1. 포장 내부 기체 조성 변화

저장 기간 동안 꽃송이버섯 포장 내부의 산소(O_2) 및 이산화탄소(CO_2) 농도는 처리구 및 저장 기간에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었다(Fig. 1).

산소(O_2) 농도는 저장 기간에 따라 처리구별로 상이한 변화를 보였다. 저장 2일째부터 처리구 간 유의적인 차이가 나타났으며($p < 0.05$), perforated OPP 처리구에서 가장 높은 값을 나타내었다. 해당 처리구는 저장 2일 이후 약 20% 이상의 높은 산소 농도를 지속적으로 유지하였다. 반면, OPP 및 MPP5 처리구에서는 저장 2일 이후 급격히 감소하여 거의 0%에 근접한 수준까지 낮아졌으며, 이후 저장 기간 동안 낮은 수준을 유지하였다. PET 처리구는 초기 감소 이후 저장 4일째 약 10% 수준으로 증가하였다가, 이후 다소 변동하는 경향을 나타내었다.

이산화탄소(CO_2) 농도는 산소 농도와 반대되는 경향을 나타내었다. OPP 및 MPP5 처리구에서는 저장 2일째 약 16~17% 수준까지 증가한 후 저장 기간 동안 유사한 수준을 유지하였다. PET 처리구에서는 저장 2일째 약 20% 이상으로 가장 높은 값을 나타낸 후, 저장 4일째 감소하였다

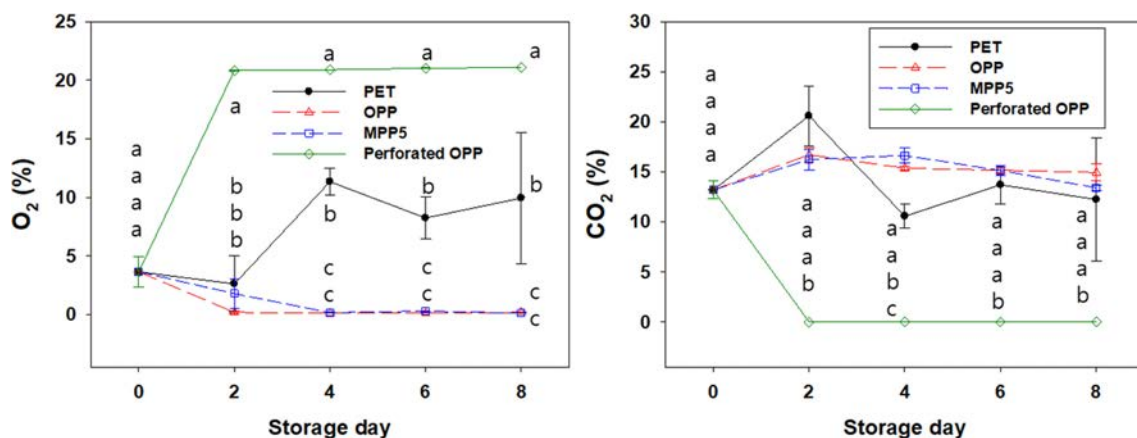


Fig. 1. Changes in package headspace O_2 and CO_2 concentrations of *Sparassia latifolia* under different packaging films during ambient storage. Values are expressed as mean $\pm$ standard error (SE). Different letters indicate significant differences among treatments at each storage day ($p < 0.05$), while the same letters indicate no significant difference.

가 이후 다시 증가하는 경향을 보였다. 반면, perforated OPP 처리구에서는 저장 2일째 이후 CO₂ 농도가 급격히 감소하여 거의 0% 수준을 유지하였다.

저장 초기(0일)에는 모든 처리구에서 O₂ 및 CO₂ 농도에 유의적인 차이가 나타나지 않았으나(ns), 저장 2일 이후부터는 처리구 간 차이가 뚜렷하게 나타났으며, 저장 기간 동안 이러한 경향이 지속되었다($p < 0.05$).

2. 중량감소율 변화

저장 기간이 경과함에 따라 모든 처리구에서 중량감소율이 점진적으로 증가하였으며, 특히 포장재의 투과 특성에 따라 뚜렷한 차이를 나타내었다(Fig. 2). 가장 큰 변화를 보

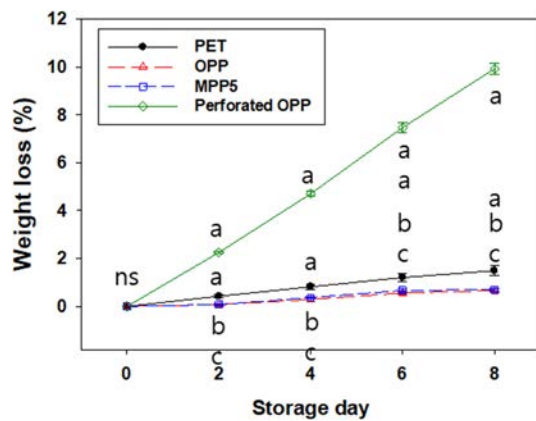


Fig. 2. Changes in weight loss of *Sparassis latifolia* under different packaging films during ambient storage. Values are expressed as mean $\pm$ standard error (SE). Different letters indicate significant differences among treatments at each storage day ($p < 0.05$), while the same letters indicate no significant difference.

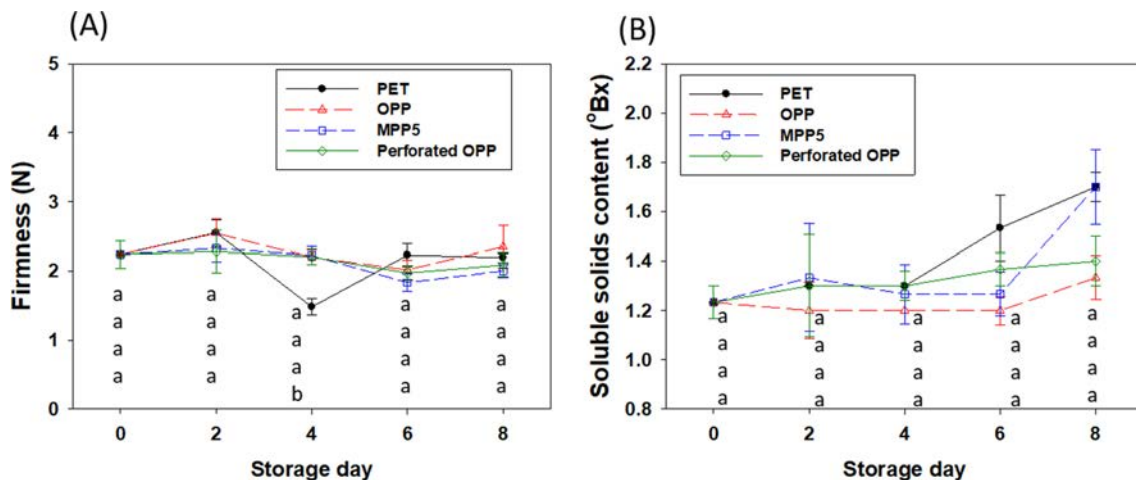


Fig. 3. Changes in firmness (A) and soluble solids content (B) of *Sparassis latifolia* under different packaging films during ambient storage. Values are expressed as mean $\pm$ standard error (SE). Different letters indicate significant differences among treatments at each storage day ($p < 0.05$), while the same letters indicate no significant difference.

인 perforated OPP 처리구의 경우, 저장 2일째 2.25%에서 시작하여 8일째에는 9.92%까지 급격히 상승하며 다른 처리구 대비 압도적으로 높은 수분 손실을 기록하였다. 반면, MPP5 처리구는 저장 8일째에도 0.70% 미만의 매우 낮은 감소율을 유지하여 수분 보존 효과가 가장 우수하였고, OPP 처리구 역시 0.67% 수준으로 유사하게 낮은 수치를 나타내었다. PET 처리구는 저장 8일째 1.49%를 기록하며 MPP5 및 OPP보다는 높지만, perforated OPP보다는 현저히 낮은 수준을 보였다.

이러한 결과는 포장재의 구조적 차이에서 기인한다. 천공 구조를 가진 perforated OPP는 내부 수분이 외부로 빠르게 방출된 반면, 적절한 차단성을 가진 MPP5와 OPP 필름은 내부 습도를 효과적으로 유지한 것으로 판단된다. 따라서 상온 저장 시 수분 손실에 따른 상품성 저하를 막기 위해서는 과도한 기체 투과보다는 적정 수준의 차단력을 갖춘 필름 선택이 필수적이다.

3. 경도 및 가용성 고형물 함량 변화

저장 기간 동안 꽃송이버섯의 경도(firmness)는 모든 처리구에서 전반적으로 유사한 수준을 유지하였으며, 처리구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다(Fig. 3). 경도 값은 저장 기간 동안 약 2.0~2.5 N 범위에서 유지되었으며, 필름 종류에 따른 뚜렷한 변화는 확인되지 않았다.

저장 4일째 PET 처리구에서 일시적으로 낮은 값을 나타내어 다른 처리구와 차이가 관찰되었으나($p < 0.05$), 이후 저장 6일 및 8일째에는 다시 유사한 수준을 나타내었다. 이러한 변화는 개체 간 변이에 따른 일시적 차이로 판단된다.

가용성 고형물(soluble solids content, SSC)은 저장 기간 동안 소폭 증가하는 경향을 나타내었으나, 전반적으로 처리구

간 유의적인 차이는 나타나지 않았다. 저장 초기 약 1.2°Bx 수준에서 시작하여 저장 후기에는 일부 처리구에서 1.6~1.7 °Bx까지 증가하는 경향이 관찰되었으나, 처리구 간 일관된 차이는 확인되지 않았다.

4. 색도 변화

꽃송이버섯의 색도 변화는 갓(pileus)과 대(stipe) 부위별

로 상이한 경향을 나타내었다(Fig. 4).

4.1. 갓(pileus)의 색도 변화

갓의 명도(L*) 값은 저장 기간 동안 큰 변화 없이 비교적 일정한 수준을 유지하였으며, 처리구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다(ns). 저장 기간 전반에 걸쳐 약 68~72 범위 내에서 유지되는 경향을 보였다.

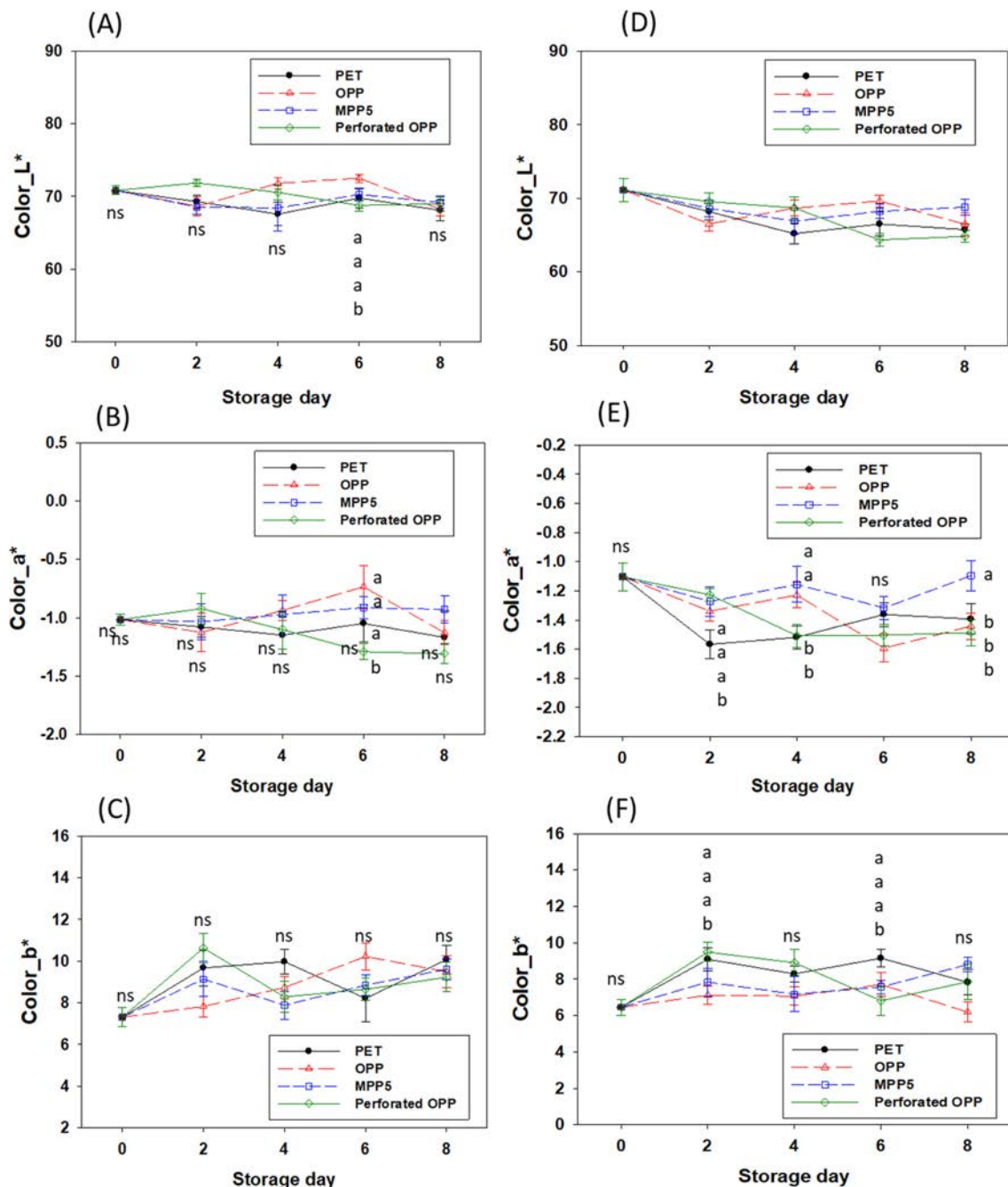


Fig. 4. Changes in color parameters (Hunter L*, a*, and b*) of pileus (A–C) and stipe (D–F) of *Sparassis latifolia* under different packaging films during ambient storage. Values are expressed as mean $\pm$ standard error (SE). Different letters indicate significant differences among treatments at each storage day ($p < 0.05$), while the same letters or ns indicate no significant difference.

a* 값은 저장 기간 동안 뚜렷한 변화 없이 유사한 수준을 나타내었으며, 대부분의 저장 기간에서 처리구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다(ns). 다만 저장 6일째 perforated OPP 처리구에서 상대적으로 낮은 값을 나타내어 유의적인 차이가 나타났다($p < 0.05$).

b* 값은 저장 기간 동안 소폭 증가하는 경향을 보였으나, 처리구 간 유의적인 차이는 대부분 나타나지 않았다(ns). 저장 2일째 perforated OPP 처리구에서 일시적으로 높은 값을 나타내었으나 이후 저장 기간 동안 처리구 간 차이는 감소하는 경향을 보였다.

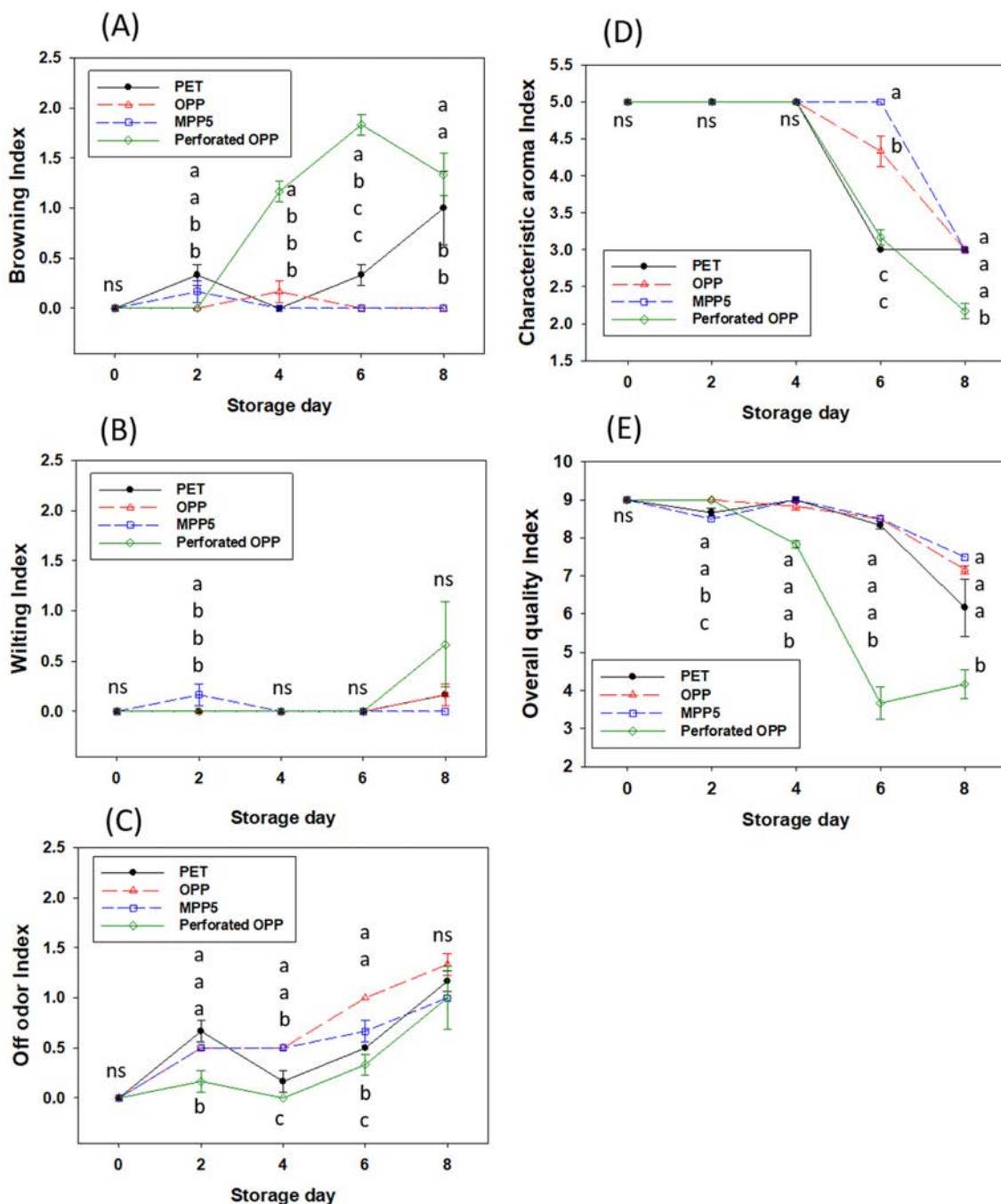


Fig. 5. Changes in browning index (A), wilting index (B), off-odor index (C), characteristic aroma index (D), and overall quality index (E) of *Sparassis latifolia* under different packaging films during ambient storage. Values are expressed as mean $\pm$ standard error (SE). Different letters indicate significant differences among treatments at each storage day ($p < 0.05$), while the same letters or ns indicate no significant difference.

4.2. 대(stipe)의 색도 변화

대의 명도(L*) 값은 저장 기간 동안 감소하는 경향을 나타내었으나, 대부분의 저장 기간에서 처리구 간 유의적인 차이는 나타나지 않았다(ns). 저장 후기에는 일부 처리구에서 낮은 값을 나타내는 경향이 관찰되었다.

a* 값은 저장 기간 동안 감소하는 경향을 보였으며, 처리구 간 차이가 일부 구간에서 나타났다. 특히 저장 2일 및 4일째 PET 및 perforated OPP 처리구에서 상대적으로 낮은 값을 나타내었으며($p < 0.05$), 이후 저장 후기에는 처리구 간 차이가 감소하는 경향을 보였다.

b* 값은 저장 기간 동안 증가하는 경향을 나타내었으며, 저장 2일째 처리구 간 유의적인 차이가 나타났다($p < 0.05$). Perforated OPP 처리구에서 상대적으로 높은 값을 나타내었으며, 이후 저장 기간 동안 처리구 간 차이는 점차 감소하였다.

5. 이취, 고유 향기, 갈변, 시들음 및 총괄품질 변화

이취(off-odor index)는 저장 기간이 경과함에 따라 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 5). 저장 초기에는 처리구 간 유의적인 차이가 나타나지 않았으나, 저장 2일 이후부터 처리구 간 차이가 발생하였다. 저장 8일째에는 OPP 처리구에서 가장 높은 값을 나타내었으며, MPP5 및 PET 처리구는 상대적으로 낮은 수준을 유지하였다. Perforated OPP 처리구는 저장 초기에는 낮은 값을 보였으나 저장 후기에는 증가하는 경향을 나타내었다($p < 0.05$).

향기(characteristic aroma index)는 저장 기간 동안 감소하는 경향을 나타내었다. 저장 4일까지는 처리구 간 유의적인 차이가 나타나지 않았으나, 저장 6일 이후부터 차이가

발생하였다. 특히 perforated OPP 처리구에서 감소 폭이 크게 나타나 저장 8일째 가장 낮은 값을 보였으며, MPP5 처리구는 상대적으로 높은 값을 유지하였다($p < 0.05$).

갈변지수(browning index)는 저장 기간 증가에 따라 처리구별로 상이한 변화를 나타내었다. Perforated OPP 처리구에서 저장 6일 이후 급격한 증가가 나타났으며, 저장 8일째에도 높은 값을 유지하였다. 반면, MPP5 처리구는 전 저장 기간 동안 낮은 수준을 유지하였다. OPP 및 PET 처리구는 중간 수준의 값을 나타내었으며, 저장 후기에는 처리구 간 유의적인 차이가 나타났다($p < 0.05$).

시들음지수(wilting index)는 저장 후기에서 처리구 간 차이가 나타났다. 저장 6일까지는 처리구 간 유의적인 차이가 나타나지 않았으나, 저장 8일째 perforated OPP 처리구에서 급격한 증가가 확인되었으며, 다른 처리구에 비해 유의적으로 높은 값을 나타내었다($p < 0.05$).

총괄품질은 저장 기간 동안 감소하는 경향을 나타내었다. 저장 4일까지는 처리구 간 유의적인 차이가 나타나지 않았으나, 저장 6일 이후부터 차이가 발생하였다. Perforated OPP 처리구에서 가장 낮은 값을 나타내었으며, MPP5 처리구는 저장 기간 동안 가장 높은 값을 유지하였다. OPP 및 PET 처리구는 그 사이의 값을 나타내었다($p < 0.05$).

6. 품질 인자와 총괄품질 간 상관관계 분석

꽃송이버섯의 저장 중 품질 인자와 총괄품질 간의 상관관계를 분석한 결과, 주요 품질 인자 간 뚜렷한 상관성이 확인되었다(Table 2).

갈변지수(browning index)는 총괄품질과 매우 강한 음의 상관관계($r = -0.876$)를 나타내어, 갈변이 진행될수록 총괄품질

Table 2. Pearson's correlation coefficients between overall quality and quality factors of *Sparassis latifolia* during ambient storage

Quality factor	r value	Interpretation
Browning	-0.876	Very strong negative correlation
Aroma	0.866	Very strong positive correlation
Storage day	-0.772	Quality decreases over time
O ₂	-0.768	Lower O ₂ associated with better quality
CO ₂	0.747	Higher CO ₂ associated with better quality
Off-odor	-0.671	Increase in off-odor leads to quality deterioration
Wilting	-0.614	Increase in wilting leads to quality deterioration
b* (stipe)	-0.535	Moderate correlation
b* (pileus)	-0.435	Moderate correlation
SSC	-0.399	Weak to moderate correlation
L* (stipe)	0.272	Weak correlation
a* (stipe)	0.216	Weak correlation
L* (pileus)	0.197	Weak correlation
a* (pileus)	0.159	Weak correlation
Firmness	0.087	Negligible correlation

질이 크게 저하되는 것으로 확인되었다. 반면, 향기(aroma)는 총괄품질과 매우 강한 정의 상관관계($r=0.866$)를 나타내어, 향기 유지가 품질 유지에 중요한 요소로 작용함을 확인하였다.

저장 기간(storage day)은 총괄품질과 음의 상관관계($r=-0.772$)를 나타내어 저장 기간이 경과함에 따라 품질이 감소하는 경향을 보였다. 또한 산소(O_2) 농도는 총괄품질과 음의 상관관계($r=-0.768$)를 나타낸 반면, 이산화탄소(CO_2) 농도는 정의 상관관계($r=0.747$)를 나타내어, 저산소 및 고이산화탄소 조건이 품질 유지에 유리한 환경임을 시사하였다.

이취(off-odor)와 시들음(wilting) 또한 각각 총괄품질과 음의 상관관계($r=-0.671$, -0.614)를 나타내어, 관능적 품질 저하 요인으로 작용하는 것으로 확인되었다.

색도 관련 인자에서는 b^* 값이 총괄품질과 중간 수준의 음의 상관관계를 나타내었으며(b_{stipe} : $r=-0.535$, b_{pileus} : $r=-0.435$), 명도(L^*)와 적색도(a^*)는 상대적으로 낮은 상관관계를 나타내었다.

반면, 가용성 고형물(SSC)과 경도(firmness)는 총괄품질과 낮거나 거의 무관한 상관관계를 나타내어($r=-0.399$, 0.087), 본 연구 조건에서는 주요 품질 결정 요인으로 작용하지 않는 것으로 확인되었다.

7. 품질 인자 간 상관관계 분석

상온 저장 조건에서 꽃송이버섯의 품질 인자 간 상관관계를 분석한 결과, 각 인자 간 뚜렷한 상관 구조가 확인되었다(Fig. 6).

총괄품질(overall quality)은 갈변(browning), 이취(off-odor), 시들음(wilting) 및 중량감소(weight loss)와 음의 상관관계를 나타낸 반면, 향기(aroma) 및 이산화탄소(CO_2)와는 정의 상관관계를 나타내었다. 특히 갈변과 향기는 총괄품질과 높은 상관성을 보이는 주요 인자로 확인되었다.

기체 조성 인자에서는 산소(O_2)와 이산화탄소(CO_2)가 상호 반대 경향을 나타내었으며, O_2 는 갈변, 이취 및 중량감소와 정의 상관관계를 보인 반면, CO_2 는 이들 인자와 반대되는 경향을 나타내었다.

관능적 품질 인자 간에도 뚜렷한 상관성이 확인되었다. 갈변, 시들음 및 이취는 서로 정의 상관관계를 나타내었으며, 향기는 이들 인자와 음의 상관관계를 나타내었다.

색도 인자(L^* , a^* , b^*)는 상대적으로 낮은 상관성을 나타내었으며, 갓(pileus)과 대(stipe)의 색도 변수 간에는 정의 상관관계가 확인되었으나 총괄품질과의 직접적인 연관성은 제한적으로 나타났다. 또한 경도(firmness)와 가용성 고형물(SSC)은 다른 품질 인자와의 상관성이 낮게 나타났다.

8. 포장 필름에 따른 품질 유지 기작 및 저장성 평가

본 연구에서 포장 필름의 종류는 저장 중 꽃송이버섯의 품질 변화를 결정짓는 핵심 요인으로 작용하였다. 차단성이 높은 OPP 및 MPP5 처리구에서는 포장 내부의 산소(O_2) 농도가 거의 0%에 근접한 수준으로 급격히 감소하고 이산화탄소(CO_2) 농도가 빠르게 상승하여 변조대기(MA) 환경이 형성되었다. 이러한 가스 조성의 변화는 선행 연구^{1,17)}에서 보고된 바와 같이, 버섯의 호흡률을 억제하고 대사 활

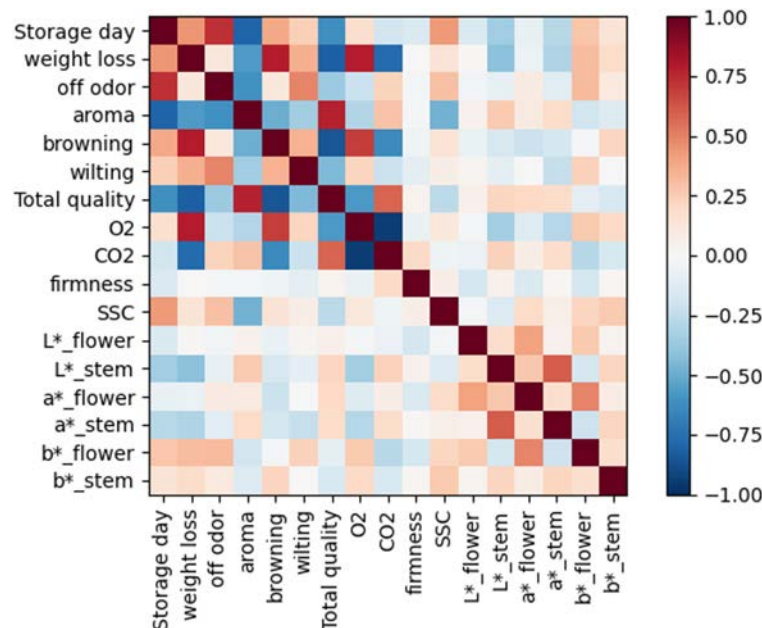


Fig. 6. Correlation matrix of quality attributes of *Sparassia latifolia* under ambient storage conditions. Red and blue colors indicate positive and negative correlations, respectively.

동을 둔화시킴으로써 가용성 고형물의 소모를 줄이고 조직 연화를 지연시키는 핵심 기작으로 작용하였다. 특히 적정 수준의 CO₂ 농도 유지는 수확 후 산물의 생리적 열화를 방지하는 데 필수적이며¹⁸⁾, 이는 꽃송이버섯의 영양성분 보존에도 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다⁶⁾.

반면, 천공 구조를 가진 perforated OPP 처리구는 대기 농도와 유사한 가스 환경을 유지하였으나, 이로 인해 높은 호흡 활성이 지속되면서 중량 감소가 가속화되고 갈변이 빠르게 진행되었다. 이는 포장재의 높은 기체 투과성이 오히려 수분 손실을 유도하여 품질 열화를 앞당길 수 있다는 결과¹³⁾와 일치하며, 버섯류의 증산 작용과 온도 및 습도 간의 상관관계⁶⁻⁹⁾를 고려할 때 상온 저장 시 천공 포장의 한계를 보여준다.

품질 지표 간의 상관관계 분석 결과, 전체적인 상품성은 갈변도 및 이취 발생과 매우 밀접한 연관이 있는 것으로 나타났으며^{4,18)}, 이는 신선 버섯의 저장 수명을 결정짓는 주요 변수임을 시사한다. 결론적으로, 신선 꽃송이버섯의 상온 저장 시 상품성을 유지하기 위해서는 단순한 통기성 확보보다는 대상 작물의 생리적 특성에 최적화된 가스 투과도를 가진 필름을 선택하여 내부 대사 환경을 정밀하게 제어하는 것이 필수적이다¹⁴⁾.

본 연구 결과는 실제 산업 현장에서 꽃송이버섯의 상온 유통 시 ‘골든 타임’을 설정하고 재고 관리를 효율화하는 데 중요한 근거를 제공한다. 실험 데이터에 따르면, perforated OPP는 저장 4일 이후 품질이 급격히 저하되어 단거리 유통이나 즉시 소진용으로 제한적 사용이 권장되는 반면, MPP5 및 OPP 포장재는 상온에서도 6~8일까지 상품성을 안정적으로 유지하여 중거리 유통 및 전략적 재고 관리가 가능함을 확인하였다. 따라서 저온 물류 시스템(cold-chain)이 완벽하지 않은 환경에서는 포장재별로 차별화된 최대 유통 가능 기간(shelf-life)을 설정함으로써 유통 중 발생하는 손실률을 최소화하고 상품 가치를 극대화할 수 있을 것으로 기대된다.

요 약

본 연구는 상온 저장 중 포장 필름 종류에 따른 꽃송이버섯(*Sparassis latifolia*)의 품질 변화 및 저장성에 미치는 영향을 평가하기 위해 수행하였다. 꽃송이버섯을 PET, OPP, MPP5 및 미세천공 OPP 필름으로 포장한 후 상온에서 8일간 저장하며 포장 내부 기체 조성(O₂ 및 CO₂), 중량감소, 이화학적 특성 및 품질 지표의 변화를 분석하였다. OPP 및 MPP5 필름은 저장 초기 저산소(0%에 근접) 및 고이산화탄소(약 16-17%) 환경을 빠르게 형성한 반면, 미세천공 OPP는 대기와 유사한 조건을 유지하였다. 이러한 기체 조성 차이는 품질 변화에 유의한 영향을 미쳤으며,

MPP5 처리구는 중량감소가 가장 적고 전반적인 품질을 안정적으로 유지하였다. 반면, 미세천공 OPP 처리구는 저장 4일 이후 급격한 품질 저하를 나타내었다. 갈변($r = -0.876$)과 향기($r = 0.866$)는 총괄품질에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 나타났으며, 총괄품질은 산소 농도와 음의 상관, 이산화탄소 농도와 정의 상관을 나타내었다. 이상의 결과로부터 MPP5 필름은 상온 저장 조건에서 꽃송이버섯의 품질 유지 및 저장 기간 연장에 가장 효과적인 포장재로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01733402)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Kader, A.A. 2002. Postharvest technology of horticultural crops. 3rd ed. Univ. Calif. Agric. Nat. Resour., Davis, CA, USA, pp. 532-534.
- Innocent, K. and Matenda, R. 2018. Postharvest technology and value addition of watermelons (*Citrullus lanatus*): An overview. J. Postharvest Technol. 6:75-83.
- Mao, L., Karakurt, Y. and Huber, D.J. 2004. Incidence of water-soaking and phospholipid catabolism in ripe watermelon fruit: induction by ethylene and prophylactic effects of 1-methylcyclopropene. Postharvest Biol. Technol. 33:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2003.12.007>
- Linke, M. and Geyer, M. 2013. Condensation dynamics in plastic film packaging of fruit and vegetables. J. Food Eng. 116:144-154. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.11.025>
- Choi, J.W., Kwon, N., Cho, J.H., Heo, B.S., An, G.H., Chang, M.S. and Lim, J.G. 2025. A comprehensive review of quality preservation and processing utilization techniques for fresh *Sparassis latifolia* during storage and distribution. J. Korea Soc. Packag. Sci. Technol. 31(2):141-155. <https://doi.org/10.20909/kopast.2025.31.2.141>
- Lei, M., Guo, L., Zhang, Y., Yan, X., Jiang, F. and Sun, B. 2024. Effectiveness of anaerobic treatment combined with microperforated film packaging in reducing *Agaricus bisporus* postharvest browning. Postharvest Biol. Technol. 211:112833. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112833>
- Cheng, Y., Wei, Y., Zhang, M. and Wang, H. 2022. Effect of micro-perforated film packing on physicochemical quality and volatile profile of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during postharvest shelf-life. J. Food Process. Preserv. 46:e16648. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16648>
- Zhang, P., Fang, D., Pei, F., Wang, C., Jiang, W. and Hu, Q. 2022. Nanocomposite packaging materials delay the browning of *Agaricus bisporus* by modulating the melanin pathway. Postharvest Biol. Technol. 192:112014. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.112014>
- Wang, B., Yun, J., Ye, C., Xu, S., Guo, W. and Zhao, F.

2024. A novel polyethylene nanopackaging combined with ozone fumigation delayed the browning and softening of *Agaricus bisporus* during postharvest storage. *Postharvest Biol. Technol.* 210:112771. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112771>
10. Ni, X., Yu, J., Shao, P., Yu, J., Chen, H. and Gao, H. 2021. Preservation of *Agaricus bisporus* freshness with innovative ethylene-manipulating active packaging paper. *Food Chem.* 345:128757. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128757>
 11. Wu, W., Ni, X., Shao, P. and Gao, H. 2021. Novel packaging film for humidity-controlled manipulating of ethylene for shelf-life extension of *Agaricus bisporus*. *LWT* 145:111331. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111331>
 12. Wu, W., Wu, Y., Lin, Y. and Shao, P. 2022. Facile fabrication of multifunctional citrus pectin aerogel fortified with cellulose nanofiber as controlled packaging of edible fungi. *Food Chem.* 374:131763. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131763>
 13. Cho, M.A., Choi, J.W., Lee, C.M. and Park, J.C. 2025. Changes in quality characteristics of shiitake mushrooms after UV-C treatment and the inhibitory effect of their ethanol extract on lung cancer cell proliferation. *Food Sci. Preserv.* 32(4):733-744. <https://doi.org/10.11002/fsp.2025.32.4.733>
 14. Kader, A.A. 2013. Modified and controlled atmospheres for the storage, transportation, and packaging of horticultural commodities. In: *Postharvest technology of horticultural crops*. 3rd ed. Kader, A.A. (ed.), Univ. Calif. Agric. Nat. Resour., Davis, CA, USA, pp. 135-170.
 15. Mahajan, P.V., Oliveira, F.A.R. and Macedo, I. 2008. Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of mushrooms. *Postharvest Biol. Technol.* 48:219-225. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2007.09.019>
 16. Roy, S., Anantheswaran, R.C. and Beelman, R.B. 1996. Fresh mushroom quality affected by modified atmosphere packaging. *J. Food Sci.* 61:391-396. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb14188.x>
 17. Mahajan, P.V., Caleb, O.J., Singh, Z., Watkins, C.B. and Geyer, M. 2014. Postharvest treatments of fresh produce. *Philos. Trans. R. Soc. A* 372:20130309. <https://doi.org/10.1098/rsta.2013.0309>
 18. An, D.S., Lee, J.H., Lee, H.L. and Lee, D.S. 2014. Application of master packaging system to fresh shiitake mushroom supply chain on semi-commercial scale. *J. Korea Soc. Packag. Sci. Technol.* 20(3):71-76.
 19. Choi, J.W., Kim, S.H., Hong, S.I., Jeong, M.C., Park, H.W. and Kim, D.M. 2022. Development of improved vacuum packaging film and machine for extending the shelf life of enoki mushroom (*Flammulina velutipes*). *J. Korea Soc. Packag. Sci. Technol.* 28(1):1-10. <https://doi.org/10.20909/kopast.2022.28.1.1>

투고: 2026.04.21 / 심사완료: 2026.07.15 / 게재확정: 2026.07.30

Effects of Starch Acetylation on Application of Thermoplastic Starch as Packaging Material: Degree of substitution, Gelatinization and Biodegradability

Guyoon Kwon and Seonghyuk Ko*

Department of Packaging, Yonsei University, Wonju 26493, Republic of Korea

Abstract Thermoplastic starch (TPS), despite its environmental advantages, suffers from brittleness and poor processability due to extensive hydrogen bonding in native starch. This study aimed to characterize the relationship between gelatinization behavior and plasticization of acetylated starch and to evaluate the biodegradability of acetylated-TPS (A-TPS). Native corn starch was acetylated to three different degrees of substitution (DS = 0.020, 0.087, 0.117). FT-IR spectra confirmed successful acetylation with the appearance of C=O stretching peaks at 1726 cm^{-1} , and XRD patterns showed decreased crystallinity as DS increased. Water solubility and swelling power increased from 4.985% and 4.935 g/g (Native starch) to 10.054% and 9.983 g/g (DS 0.117) respectively, indicating enhanced water accessibility. Differential scanning calorimetry revealed a reduction in gelatinization temperature from 71.49°C to 64.80°C and gelatinization enthalpy from 2.925 J/g to 1.777 J/g . These changes suggest improved plasticizer penetration during thermal processing. In disintegration tests under home composting conditions, A-TPS (AS 0.117) film showed greatly faster degradation rate than that of TPS and reached over 90% of degradation within one week. The results indicate that starch acetylation effectively enhances the plasticization level of A-TPS, and its improved biodegradability confirms the potential to broaden the applicability of A-TPS in sustainable packaging materials.

Keywords Acetylated starch, Thermoplastic starch, Degree of substitution, Gelatinization, Biodegradable plastic

Introduction

Bioplastics are emerging as essential materials for achieving carbon neutrality in the packaging industry due to their use of renewable resources, low carbon footprint, and high energy efficiency¹⁾. With the increasing interest in bioplastics, starch is particularly gaining attention as a key resource in the packaging industry due to its abundance and renewability. Thermoplastic starch (TPS) is a representative starch-based material produced by adding plasticizers and heat to starch. During this process, amylose and amylopectin are separated, and plasticizers penetrate between polymer chains, increasing amorphous regions through gelatinization, resulting in a semi-crystalline thermoplastic material²⁾. TPS is being spotlighted as a sustainable packaging material due to its high biomass content, economic viability, and rapid biodegradation rate, which has been reported to fully degrade within two weeks

under typical soil conditions (25°C , 55% RH)³⁾. Thanks to these advantages, TPS is commonly blended with other biodegradable polymers in the form of composites. Palai et al.⁴⁾ and Pokhrel et al.⁵⁾ demonstrated that blending TPS with polycaprolactone (PCL) or poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), enhanced the overall biodegradability by more than eight times. Nonetheless, due to the abundance of hydroxyl groups in starch, TPS tends to exhibit strong hydrogen bonding, making it difficult for plasticizers to fully penetrate. As a result, TPS exhibits poor mechanical strength and high brittleness, and tendency for self-aggregation and incompatibility within composite materials causing serious deterioration in the overall mechanical properties of the composites.

To address these limitations, chemically modified starches—such as octenyl succinylated, hydroxypropylated, and acetylated starch—have been explored, in which hydroxyl groups are substituted with other functional groups. Among them, acetylated starch is one of the most commonly used esterified starches, widely applied in the biomedical, textile, and food industries. It can be synthesized using acetic anhydride, acetic acid, or vinyl acetate, typically in the presence of alkaline catalysts such as NaOH, KOH, or $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ^{6,7)}. Notably, acetylation reactions can use not only organic solvents like pyridine

*Corresponding Author: Seonghyuk Ko
Department of Packaging, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil,
Wonju, Gangwon, 26493, Republic of Korea
Tel: +82-33-760-2299
E-mail: s.ko@yonsei.ac.kr

or dimethyl sulfoxide but also water, making the process environmentally friendly. The physicochemical properties of acetylated starch, including solubility, water absorption, and swelling power, vary depending on the degree of substitution (DS). The reduction in hydroxyl groups weakens hydrogen bonding between amylose and amylopectin chains, while the introduction of acetyl groups increases the intermolecular distance within the structure. Consequently, starch granules swell more readily, and amylose leaches out more easily, resulting in enhanced solubility. The reduction in crystallinity also increases the amorphous region, allowing greater water uptake⁸⁾. Trela et al.⁹⁾ reported that when cassava starch was acetylated with varied DS values, the swelling power at 70°C—within the gelatinization range—increased with DS up to 0.2. Such changes can improve the plasticization efficiency during TPS processing by promoting plasticizer penetration, thus reducing brittleness and aggregation, and enhancing the usability of TPS in packaging applications.

In this study, physicochemical properties, gelatinization behavior and the plasticization effects of acetylated starches with varying DS were investigated, focusing primarily on starch-level characterization to establish fundamental structural mechanisms. Acetylated-TPS (A-TPS) films were prepared to examine how chemical modification of starch molecules influences the degradation performance. Ultimately, these findings demonstrate the great potential of acetylated starch to overcome the limitations of conventional starch-based materials and enhance its applicability as an eco-friendly packaging material.

Materials & Methods

1. Materials

Food-grade starch was provided by Samyang Corporation (Corn starch, Seoul, Republic of Korea). Acetic anhydride (ACS reagent, 98.0+%) was purchased from Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA). Phenolphthalein (2% solution in 95% ethanol), sodium hydroxide pellets (98%), sodium hydroxide solution (0.5N standardize solution), hydrochloric acid solution (0.5N standardize solution), glycerol (ACS reagent, 99.5+%), and other reagents used for characterization were obtained from Thermo Fisher Scientific (Waltham, MA, USA).

2. Starch acetylation

The starch suspension was prepared by stirring 100 g of corn starch in 225 mL of DI water at 600 rpm for 30 minutes. While maintaining stirring at the same speed, the pH of the suspension was adjusted to 8.0 by adding 3.0% (w/w) NaOH solution. Acetic anhydride was then added dropwise in amounts of 2 g, 10 g, and 20 g at constant pH range of 8.0–8.4. After the complete addition of acetic anhydride, the mix-

ture was stirred for an additional 30 minutes, and the reaction was terminated by adjusting the pH to 4.5 using 0.5N HCl solution. The suspension was then centrifuged at 2,000 rpm for 30 minutes to separate the precipitate from the supernatant. The recovered precipitate was sequentially washed with water and 94–96% ethanol followed by centrifugation to remove the washing solution. The purified precipitate was then dried at 40°C in dry oven and subsequently ground to obtain acetylated starch powder. The acetyl content and DS of the acetylated starch were determined by titration analysis. 1.0 g of as-prepared acetylated starch was mixed with 25 mL of 0.5N NaOH solution and stirred at 200 rpm for 72 hours. After adding 3–5 drops of 2% phenolphthalein, the mixture was back-titrated to the endpoint using 0.5N HCl solution, and the acetyl content and DS were calculated using the following Equations (1) and (2):

$$\text{Acetyl content (A)} = \frac{(V_1 - V_2) \times 10^{-3} \times N \times 43}{W} \times 100(\%) \quad (1)$$

$$\text{Degree of substitution (DS)} = \frac{162A}{[43 \times 100 - (43 - 1) \times A]} \quad (2)$$

where V_1 represents the volume of HCl solution used for the titration of native starch, V_2 represents the volume of HCl solution used for the titration of acetylated starch, N denotes the normality of the HCl solution, and W refers to the mass of acetylated starch mixed with the NaOH solution. The acetyl content and DS for each sample are summarized in Table 1, where four types of samples were prepared: native starch (NS), acetylated starch (AS) with DS values of 0.020, 0.087, and 0.117.

3. Characterization of acetylated starch

The chemical structures of native and acetylated starch were analyzed using a Fourier-transform infrared spectrometer (FT-IR) (Spectrum 65, PerkinElmer, Inc., MA, USA). The FT-IR spectra were measured in attenuated total reflectance (ATR) mode, with each spectrum obtained by 64 scans in the wavenumber range of 400–4000 cm^{-1} at a resolution of 2 cm^{-1} .

X-ray diffraction patterns were examined using an X-ray

Table 1. Acetyl content and degree of substitution of as-prepared acetylated starch

Samples	Acetic anhydride (g/100 g starch)	Acetyl content (%)	Degree of substitution
NS	0	0	0
AS 0.020	2	0.54	0.020
AS 0.087	10	2.26	0.087
AS 0.117	20	3.01	0.117

diffractometer (Smart Lab SE, Rigaku, Tokyo, Japan) used a Cu K α source ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) at 2°/min of scanning speed within a diffraction angle range of $2\theta = 5\text{--}35^\circ$ in room temperature.

To evaluate the accessibility of plasticizers to starch chains during the preparation of A-TPS from acetylated starch, water solubility and swelling power were measured. The analysis was conducted at 70°C, which is the typical gelatinization temperature of corn starch. The water solubility and swelling power of the acetylated starch were measured with slight modifications to the method proposed by Colussi et al.¹⁰⁾. The mixture of 1.0 g of acetylated starch and 50 mL of DI water was prepared in a conical tube and heated in a 70°C water bath for 30 minutes. The conical tube was then cooled to room temperature and centrifuged at 4,000 rpm for 30 minutes to separate the precipitate and supernatant. The precipitate was collected, and the supernatant was dried at 103°C until a constant weight was reached. The weights of both the precipitate after centrifugation and the dried supernatant were then measured. Water solubility and swelling power were calculated using the following Equations (3) and (4):

$$\text{Water solubility (WS)} = \frac{W_d}{W_i} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$\text{Swelling power (SP)} = \frac{W_p}{W_i - W_d} \quad (4)$$

where W_i represents the mass of acetylated starch mixed with DI water, W_d refers to the mass of the dried supernatant, and W_p denotes the mass of the precipitate after centrifugation.

The thermal behaviors of acetylated starch during the gelatinization were assessed using a differential scanning calorimetry (DSC) (Q20, TA Instruments, New Castle, USA). The mixture of acetylated starch and DI water at a 3:7 ratio (11–12 mg) was sealed in an aluminum pan and stabilized for 1 hour. The analysis was conducted under a nitrogen atmosphere (50 mL/min), with the temperature range set from 20°C to 100°C with a heating rate of 10°C/min. The peak temperature (T_{gel}) and enthalpy (ΔH_{gel}) of gelatinization were determined from the DSC thermogram.

4. Assessment of disintegration behavior of acetylated-TPS

To investigate the effect of acetylated starch on the disintegration properties of A-TPS, casting films of native and acetylated starch were prepared as follows; The casting solution was prepared by adding 8.0 g of acetylated starch and 2.4 g of glycerol to 200 mL of DI water, followed by mixing at 500 rpm for 10 minutes. The solution was heated at 85°C in water bath with stirring at 600 rpm using a mechanical stirrer for 30 minutes. Subsequently, the solution was sonicated for 1 minute using an ultrasonic processor (750 W, 20 kHz), completing the preparation of the casting solution. The casting solution was cast onto 150 mm diameter petri dishes (55 g per

dish) and dried in an incubator at 45°C with constant relative humidity (RH) kept at 50%.

The disintegration of TPS casting films in home compost was conducted according to ISO 20200:2015 with minor modification. The synthetic waste was composed of 40% sawdust (Oak tree sawdust, Jaehyeong Energy Corp., Sejong, Republic of Korea), 30% alfalfa hay (>14% of protein content, <20% of cellulose content, Petco, Incheon, Republic of Korea), 10% starch (Corn starch, Samyang Corp., Seoul, Republic of Korea), 5% sucrose (ACS reagent, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA), 4% corn-seed oil (CJ Cheiljedang, Incheon, Republic of Korea), and 1% urea (ACS reagent, 99.0–100.5%, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). Each material was sieved to ensure a particle size of <5 mm and dried in a 60°C dry oven for over 12 hours before being mixed. Distilled water was added to the synthetic waste to achieve a moisture content of 55%, and any water loss during the experiment was replenished according to the standard requirements. The composting container (Polypropylene, 305 mm $\times$ 234 mm $\times$ 134 mm) with a lid was used for this study, and circular holes with diameter of 5 mm were drilled on both side walls of the container, 65 mm above the bottom. TPS film samples, cut into 25 mm $\times$ 25 mm pieces, were fixed in stainless steel mesh and buried in the prepared synthetic waste. The degradation was carried out in a humidity chamber at 25°C, 50% RH for 4 weeks. Each week, samples were retrieved, and their appearances were assessed visually and taken photos.

Results & Discussion

1. Chemical structure

Figure 1 shows the FT-IR spectra of native and acetylated starch with varying DS. Compared to native starch, acetylated starch exhibits the transformation of hydroxyl groups linked to carbon rings into acetyl groups. The FT-IR spectra of acetylated starch reveal the emergence of a new peak at 1726 cm^{-1} , attributed to the C=O bonds present in the acetyl groups. The intensity of this peak increases with higher DS, and the peak around 1240 cm^{-1} , corresponding to the C–O stretching vibrations, is also observed. Meanwhile, the intensity of the peak at 3294 cm^{-1} corresponding to the O–H stretching vibrations decreased due to the lower hydroxyl group content in A-TPS. Similarly, the peak at 1640 cm^{-1} associated with the O–H bending vibrations of water molecules also reduced^{9,11)}. Diop et al.¹²⁾ stated that this peak originates from tightly bound water. It is inferred that the substitution of hydroxyl groups with acetyl groups in acetylated starch reduces the opportunity for water molecules to interact with the starch structure.

2. Crystalline structure

Figure 2. XRD spectra of native and acetylated starch.

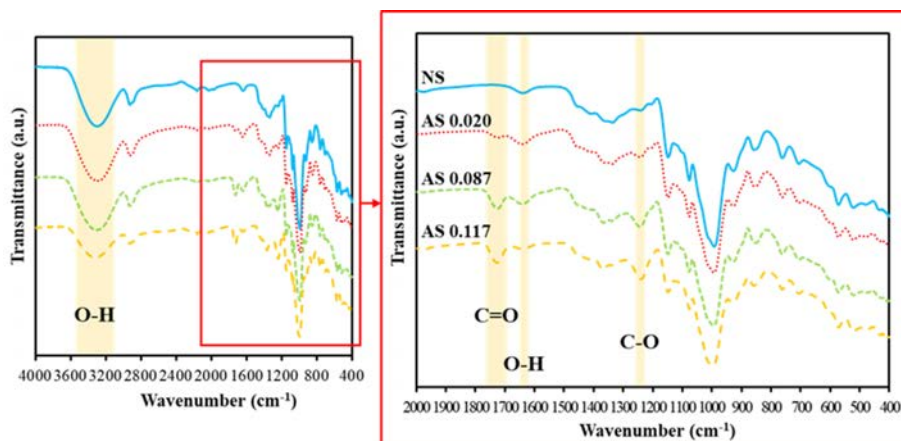


Fig. 1. FT-IR spectra of native and acetylated starch.

The changes in the crystalline structure of starch molecules with acetylation were analyzed using the XRD technique, and the diffraction peaks of native and acetylated starch are shown in Figure 2. Starch granules are semi-crystalline structure comprising crystalline and amorphous regions. The crystalline region is formed by the double helices of amylopectin, while amylose chains and branched segments of amylopectin constitute the amorphous region. Crystalline structure of starch is classified into the A-type (left-handed parallel-stranded double helices packed in a monoclinic unit cell) and B-type (left-handed parallel-stranded double helices packed in a hexagonal unit cell) depending on the configuration of the double helices. These structures are typical of cereal (e.g. corn, wheat) starch and fruit or tuber (e.g. potato, banana) starch, respectively^{13,14}. The XRD pattern of native starch exhibited characteristic diffraction peaks at 2θ around 15.2° , 17.2° , 18° , and 23.2° , which are indicative of the A-type crystalline structure. Acetylated starch shows a diffraction pattern in which the intensity of the corresponding peak slightly decreased as the

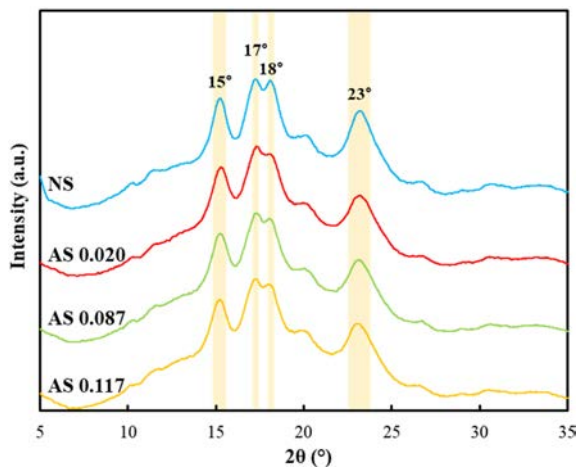


Fig. 2. XRD spectra of native and acetylated starch.

DS increased. Several studies have explained that the acetylation of starch reduces the number of hydroxyl groups and weakens the hydrogen bonding between starch molecules due to the steric hindrance of bulky acetyl groups, leading to a relative decrease in crystallinity^{15,16,17}. On the other hand, Liu et al.¹⁸) demonstrated that the A-type crystalline structure exhibits strong crystallinity, making it resistant to the penetration of acetic anhydride. As a result, acetylation occurs primarily in the amorphous regions, and no significant changes in diffraction peaks are observed at low DS.

3. Water solubility and swelling power

Water solubility and swelling power of starch reflect the interactions between molecular chains in the crystalline and amorphous regions of starch granules¹⁹. These properties were used to explain changes in molecular interactions of acetylated starch. Figure 3 presents water solubility and swelling power of native and as-prepared acetylated starch. As DS increased, both properties exhibited a distinct upward trend with water solubility and swelling power rising from 4.985% to 10.054% and from 4.935 g/g to 9.983 g/g, respectively,

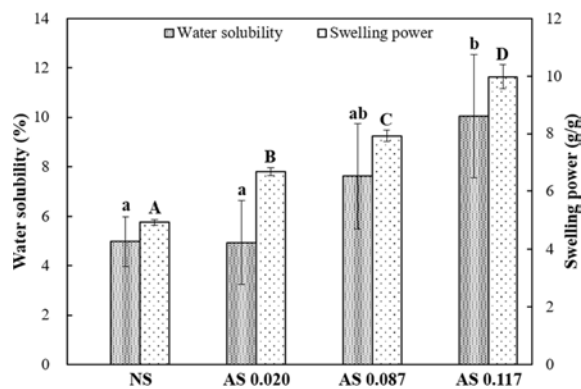


Fig. 3. Water solubility and swelling power of native and acetylated starch at 70°C .

indicating enhanced water accessibility of the acetylated starch. For swelling power, a statistically significant increase was observed across all samples. In the case of water solubility, AS 0.117 was significantly higher than NS and AS 0.020, demonstrating an overall increasing trend as DS increased. Meanwhile, under the 70°C condition, the samples with higher DS are speculated to exhibit larger standard deviations due to their high structural sensitivity. Ayucitra et al.²⁰⁾ reported that the substitution of hydroxyl groups with acetyl groups induces structural reorganization, which can weaken the granular structure of starch. Therefore, water permeation into amorphous regions of the granules is facilitated, and the leaching of amylose becomes easier, leading to increased swelling power and water solubility. This behavior is deeply tied to the inherent amylose/amylopectin ratio of the corn starch. Although acetylation initially targets the accessible amorphous regions as established in Figure 2, the resulting cumulative steric hindrance gradually destabilizes the adjacent crystalline domains, thereby promoting the leaching of amylose chains. This structural transition aligns with recent literature emphasizing that the amylose/amylopectin ratio fundamentally dictates the crystalline disruption and macromolecular behavior of starch-based materials²¹⁾. These findings show that the reduction in intermolecular forces between starch molecules and the increase in amorphous regions lower the energy required to disrupt the strong crystallinity of starch.

4. Thermal properties

Table 2 presents the gelatinization peak temperature (T_{gel}) and enthalpy of gelatinization (ΔH_{gel}) for native starch and acetylated starch. T_{gel} of native starch was observed at 71.49°C, while it decreased to 67.97°C for AS 0.087 and further to 64.80°C for AS 0.117. Similarly, ΔH_{gel} showed a decreasing trend with an increase in the DS, declining from 2.925 J/g to 1.777 J/g, as illustrated in Figure 4. Wang et al.²²⁾ explained the starch gelatinization process in two major stages: from 20°C to 60°C, water reversibly binds to starch molecules while maintaining the molecular structure. Subsequently, between 60°C and 90°C, hydrogen bonds between starch molecules are disrupted, allowing water molecules to bind directly with starch molecules, leading to the destruction of starch granules. Swelling power of starch and intermolecular forces between them are critical factors determining the gelatinization temperature and enthalpy^{23,24)}. As shown in Figure 3, the acetylation of starch reduces intermolecular

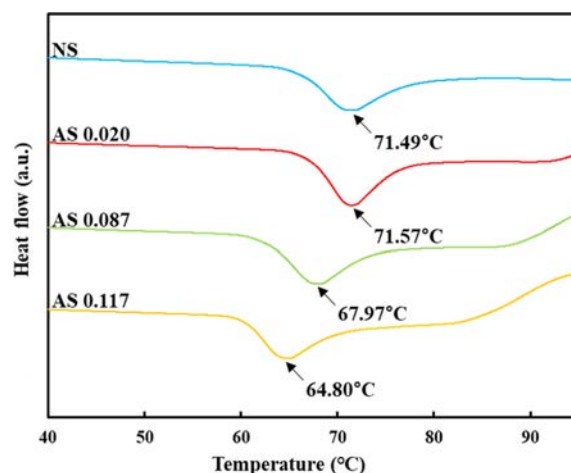


Fig. 4. DSC curves of native and acetylated starch during gelatinization.

forces and increases amorphous regions, which supports the reduction in thermal energy required for starch gelatinization. From a processing perspective, this lower thermal energy requirement allows for reduced temperatures during extrusion or compounding, thereby minimizing the risk of starch thermal degradation and offering distinct advantages in production. This suggests that the reduced intermolecular force of acetylated starch allows easier penetration of plasticizers between molecular chains, potentially resulting in a higher plasticization effect during A-TPS production. A-TPS with a high level of plasticization exhibits reduced brittleness, resulting in improved flexibility and alleviated aggregation. Therefore, the effect of acetylation is expected to overcome the critical drawbacks of conventional TPS.

5. Disintegration of A-TPS casting films in home composting condition

The chemical modification of starch should not adversely affect the inherent biodegradability of TPS. According to ISO 20200:2015, fragments smaller than 2 mm are considered completely disintegrated, and Figure 5 shows disintegration of the samples over a 4-week period. Although all films were initially clean and transparent, they became increasingly opaque as degradation progressed. Similar changes during degradation were also reported by Yap et al.²⁵⁾, such as surface dulling and color shifts. TPS and A-TPS (AS 0.020) exhibited similar disintegration trends, with only small fragments remaining

Table 2. Gelatinization behavior of as-prepared acetylated starch

	NS	AS 0.020	AS 0.087	AS 0.117
T_{gel} (°C)	71.49 ± 0.213 ^A	71.57 ± 0.095 ^A	67.97 ± 0.053 ^B	64.80 ± 0.112 ^C
ΔH_{gel} (J/g)	2.925 ± 0.119 ^a	2.745 ± 0.110 ^{ab}	2.625 ± 0.123 ^b	1.777 ± 0.058 ^c

* Values with different superscripts within the same row are significantly different by Duncan's multiple range test ($p < 0.05$).

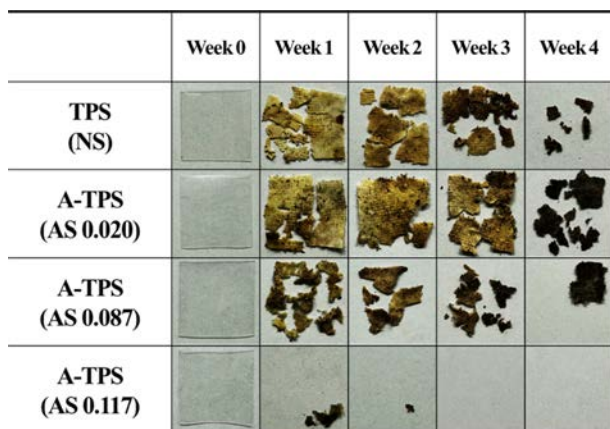


Fig. 5. Visual characteristics of TPS and A-TPS casting films during degradation.

after four weeks. In contrast, A-TPS (AS 0.087) and A-TPS (AS 0.117), showed a faster disintegration rate. Notably, A-TPS (AS 0.117) exhibited the most rapid degradation, as a result, majority of the film disintegrated within just one week. This behavior is likely attributed to the crystallinity of A-TPS, which decreases as the DS increases. According to Díaz et al.²⁶⁾, polymer chains with lower crystallinity allow enzymes easier access to their active sites, thereby enhancing biodegradation. These results indicate that acetylation does not compromise the inherent biodegradability of conventional TPS. On the contrary, the reduced intermolecular forces caused by the introduction of acetyl groups may positively influence biodegradation, suggesting the potential for developing highly biodegradable packaging materials.

Conclusions

This study explored the effect of acetylation on the physicochemical properties of starch for TPS applications. Acetylation was processed by native corn starch and different amounts of acetic anhydride (2, 10, and 20 g) were reacted resulting in DS of 0.020, 0.087, and 0.117. FT-IR analysis confirmed the successful incorporation of acetyl groups into the starch molecules. X-ray diffraction patterns revealed a slight decrease in crystallinity with increasing DS, indicating that the substitution of hydroxyl groups with bulky acetyl groups reduced intermolecular interactions. However, since acetylation occurs primarily in the amorphous regions, no marked changes in the diffraction peaks were observed. At 70°C, water solubility increased from 4.99% (Native starch) to 10.05% (DS 0.117), and swelling power rose from 4.94 g/g to 9.98 g/g, indicating enhanced water accessibility into the starch granules. Differential scanning calorimetry revealed a decline in the gelatinization temperature from 71.49°C to 64.80°C and a reduction in gelatinization enthalpy from 2.93 J/g to 1.78 J/g with increasing DS. These changes demon-

strate that acetylation weakens the hydrogen bonding between starch chains and facilitates plasticizer penetration, thereby improving plasticization efficiency during A-TPS formation.

To evaluate the effect of acetylation on the disintegration behavior of A-TPS, casting films were prepared and subjected to a four-week home composting test. While the TPS (NS) and A-TPS (AS 0.020) films showed gradual disintegration over 3 to 4 weeks, A-TPS films with a AS 0.087 or higher exhibited accelerated degradation. In particular, the A-TPS film with a DS of 0.117 showed nearly complete disintegration within just one week, which is likely attributed to the increased amorphous regions and reduced crystallinity, facilitating faster hydrolysis and improved enzyme accessibility.

Overall, this study demonstrates that acetylation of starch not only enhances its plasticization behavior by modifying its thermal and water interaction properties but also improves its degradation performance. Furthermore, the substituted acetyl groups, even at low levels, are expected to enhance the interfacial compatibility of TPS when blended with other commercial hydrophobic biodegradable polymers, such as PCL or PBAT, which is a key factor for manufacturing flexible composite packaging films. These findings suggest that the application of acetylated starch with a controlled DS contributes to the broader utilization of starch in biodegradable plastics, and that it is a promising material for sustainable packaging.

Acknowledgement

This work was supported by the 2024 Joint R&D Program, Korea Institute for Food Industry Cluster, Republic of Korea.

References

1. Iwata, T. 2015. Biodegradable and bio-based polymers: future prospects of eco-friendly plastics. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 54(11): 3210-3215.
2. Zhang, Y., Rempel, C. and Liu, Q. 2014. Thermoplastic starch processing and characteristics—a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54(10): 1353-1370.
3. Julinová, M., Vaňharová, L., Jurča, M., Minařík, A., Duchek, P., Kavečková, J., Rouchalová, D. and Skácelík, P. 2020. Effect of different fillers on the biodegradation rate of thermoplastic starch in water and soil environments. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(2): 566-583.
4. Palai, B., Mohanty, S. and Nayak, S. K. 2021. A comparison on biodegradation behaviour of polylactic acid (PLA) based blown films by incorporating thermoplasticized starch (TPS) and poly (butylene succinate-co-adipate)(PBSA) biopolymer in soil. *Journal of Polymers and the Environment*, 29(9): 2772–2788.
5. Pokhrel, S., Sigdel, A., Lach, R., Slouf, M., Sirc, J., Katiyar, V., Bhattarai, D. R. and Adhikari, R. 2021. Starch-based biodegradable film with poly (butylene adipate-co-terephthal-

- ate): Preparation, morphology, thermal and biodegradation properties. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 58(9): 610-621.
6. Aćkar, Đ., Babić, J., Jozinović, A., Miličević, B., Jokić, S., Miličević, R., Rajić, M. and Šubarić, D. 2015. Starch modification by organic acids and their derivatives: A review. *Molecules*, 20(10): 19554-19570.
 7. Singh, N., Chawla, D. and Singh, J. 2004. Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch. *Food Chemistry*, 86(4): 601-608.
 8. Ojogbo, E., Ogunsona, E. O. and Mekonnen, T. H. 2020. Chemical and physical modifications of starch for renewable polymeric materials. *Materials today sustainability*, 7: 100028.
 9. Trela, V. D., Ramallo, A. L. and Albani, O. A. 2020. Synthesis and characterization of acetylated cassava starch with different degrees of substitution. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 63: e20180292.
 10. Colussi, R., Pinto, V. Z., El Halal, S. L. M., Vanier, N. L., Villanova, F. A., e Silva, R. M., da Rosa Zavareze, E. and Dias, A. R. G. 2014. Structural, morphological, and physicochemical properties of acetylated high-, medium-, and low-amylose rice starches. *Carbohydrate Polymers*, 103: 405-413.
 11. Bumbudsanpharoke, N., Harnkarnsujarit, N., Chongcharoenyanon, B., Kwon, S. and Ko, S. 2023. Enhanced properties of PBAT/TPS biopolymer blend with CuO nanoparticles for promising active packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 37: 101072.
 12. Diop, C. I. K., Li, H. L., Xie, B. J. and Shi, J. 2011. Effects of acetic acid/acetic anhydride ratios on the properties of corn starch acetates. *Food chemistry*, 126(4): 1662-1669.
 13. Dome, K., Podgorbunskikh, E., Bychkov, A. and Lomovsky, O. 2020. Changes in the crystallinity degree of starch having different types of crystal structure after mechanical pretreatment. *Polymers*, 12(3): 641.
 14. Bertoft, E. 2017. Understanding starch structure: Recent progress. *Agronomy*, 7(3): 56.
 15. Chi, H., Xu, K., Wu, X., Chen, Q., Xue, D., Song, C., Zhang, W. and Wang, P. 2008. Effect of acetylation on the properties of corn starch. *Food chemistry*, 106(3): 923-928.
 16. Sindhu, R., Devi, A. and Khatkar, B. 2021. Morphology, structure and functionality of acetylated, oxidized and heat moisture treated amaranth starches. *Food Hydrocolloids*, 118: 106800.
 17. El Halal, S. L. M., Colussi, R., Pinto, V. Z., Bartz, J., Radunz, M., Carreño, N. L. V., Dias, A. R. G. and da Rosa Zavareze, E. 2015. Structure, morphology and functionality of acetylated and oxidised barley starches. *Food chemistry*, 168: 247-256.
 18. Liu, C., Yan, H., Liu, S. and Chang, X. 2022. Influence of phosphorylation and acetylation on structural, physicochemical and functional properties of chestnut starch. *Polymers*, 14(1): 172.
 19. Sandhu, K. S. and Singh, N. 2007. Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food chemistry*, 101(4): 1499-1507.
 20. Ayucitra, A. 2012. Preparation and characterisation of acetylated corn starches. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 3(3): 156.
 21. Han, J. H., Lee, J., Kim, S. K., Kang, D., Park, H. B. and Shim, J. K. 2023. Impact of the amylose/amylopectin ratio of starch-based foams on foaming behavior, mechanical properties, and thermal insulation performance. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(7): 2968-2977.
 22. Wang, B., Gao, W., Kang, X., Dong, Y., Liu, P., Yan, S., Yu, B., Guo, L., Cui, B. and Abd El-Aty, A. 2021. Structural changes in corn starch granules treated at different temperatures. *Food Hydrocolloids*, 118: 106760.
 23. Colussi, R., El Halal, S. L. M., Pinto, V. Z., Bartz, J., Gutkoski, L. C., da Rosa Zavareze, E. and Dias, A. R. G. 2015. Acetylation of rice starch in an aqueous medium for use in food. *LWT-Food Science and Technology*, 62(2): 1076-1082.
 24. Han, F., Gao, C., Liu, M., Huang, F. and Zhang, B. 2013. Synthesis, optimization and characterization of acetylated corn starch with the high degree of substitution. *International Journal of Biological Macromolecules*, 59: 372-376.
 25. Yap, S. Y., Sreekantan, S., Hassan, M., Sudesh, K. and Ong, M. T. 2020. Characterization and biodegradability of rice husk-filled polymer composites. *Polymers*, 13(1): 104.
 26. Díaz, A., Katsarava, R. and Puiggalí, J. 2014. Synthesis, properties and applications of biodegradable polymers derived from diols and dicarboxylic acids: from polyesters to poly (ester amide) s. *International journal of molecular sciences*, 15(5): 7064-7123.

투고: 2026.05.14 / 심사완료: 2026.06.16 / 게재확정: 2026.07.09

카제이나트륨/커피찌꺼기 코팅 기반 이산화염소 방출형 항균 및 항진균 종이 사체 제조 및 특성 분석

강기영¹ · 이우상¹ · 김시현³ · 최해리^{1,2} · 김도완^{1,2,3,4*}

¹국립강릉원주대학교, 생명과학대학, 해양바이오식품학과

²강원대학교, 생명과학대학, 해양융합학과

³강원대학교, 생명과학대학, 식품가공유통학과

⁴강원대학교, 해람제빵연구소

Preparation and Characterization of Chlorine Dioxide-releasing Antimicrobial and Antifungal Paper-based Sachet Coated with Sodium Caseinate and Spent Coffee Grounds

Kiyoung Kang¹, Woosang Lee¹, Sihyun Kim³, Haeri Choi^{1,2}, and Dowan Kim^{1,2,3,4*}

¹Department of Marine Bio Food Science, College of Life Science, Gangneung-Wonju National University, 25457, Republic of Korea

²Department of Marine Convergence Science, College of Life Science, Kangwon National University, 25457, Republic of Korea

³Department of Food Processing & Distribution, College of Life Science, Kangwon National University, 25457, Republic of Korea

⁴Haeram Institute of Bakery Science, Kangwon National University

Abstract Chlorine dioxide (ClO₂) is widely used for the surface sterilization of fresh foods due to its strong oxidative capacity and high solubility. In this study, active sachets capable of releasing ClO₂ were prepared by coating paper with TEMPO (2,2,6,6-Tetramethylpiperidin-1-oxyl) oxidized spent coffee grounds (TOSCGs) and sodium caseinate (CasNa). The moisture adsorption properties, chemical structure, morphological properties, and water vapor barrier properties were evaluated. The result showed that increasing the TOSCGs content strengthened intermolecular interactions, decreased water vapor permeability and enhanced moisture adsorption capacity under high humidity conditions. Sachet containing sodium chlorite and citric acid showed effective antibacterial and antifungal activity against *E. coli*, *S. aureus*, and *A. niger* under both contact and non-contact conditions, and the effect of inhibiting spoilage and extending storage life was confirmed in actual fresh fruit storage experiments. Therefore, the sachet developed in this study is an eco-friendly active packaging material using food by-products and will be able to contribute to maintaining the quality of fresh food through continuous antibacterial function.

Keywords Chlorine dioxide, Active packaging, Paper based packaging, Antimicrobial and antifungal properties

서 론

최근 기후 위기 대응을 위한 글로벌 환경규제가 강화됨에 따라, 식품포장 산업 내 석유계 플라스틱 포장재 사용을 감소시키기 위한 노력이 가속화되고 있다. 특히 COVID-19

이후 비대면 소비의 급증은 일회용 플라스틱 폐기물 문제를 심화시켰으며, 이에 따라 생분해성 및 재활용성이 우수한 지속 가능한 포장소재 개발에 관한 연구를 가속화하고 있다¹⁾. 식품포장 분야 또한 소비자의 안전성과 편의성 요구에 따라 지속적으로 성장하고 있으며, 특히, 신선식품의 품질유지와 안전성확보를 위한 활성포장소재 (Active packaging material) 개발의 중요성이 강조되고 있다²⁾. 그중 신선과일은 수확 후 호흡 및 증산작용으로 포장재 내 수분을 방출하여 미생물 및 곰팡이증식에 유리한 환경을 조성하고 이는 품질에 부정적인 영향을 미친다^{3,4)}.

*Corresponding Author: Dowan Kim
Department of Marine Convergence Science, College of Life Science, Kangwon National University,
Tel : +82-33-640-2337
E-mail : dowankim@kangwon.ac.kr

이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 살균제 처리 기술이 주목받고 있다. 현재 국내에서는 차아염소산나트륨(NaClO), 이산화염소(ClO_2)와 같은 염소계 살균제 뿐만 아니라 과산화수소(H_2O_2), 과산화초산(CH_3COOOH)과 같은 과산화물계 살균제, 및 오존수(O_3)가 식품용 살균제로 사용되고 있다⁵⁾. 특히 이산화염소는 높은 산화력으로 품질 유지, 유통기한 연장에 효과적이며 트리할로메탄(Trihalomethane, THMs)과 같은 유해 부산물을 형성하지 않고 물에 대한 용해도 및 pH 안전성이 높다는 장점을 가지지만⁶⁻¹⁰⁾, 비점이 낮아 상온에서 쉽게 휘발되어, 장기적이고 지속적인 신선도 유지에 한계가 있다⁸⁾.

이를 보완하기 위해 포장재 내부에서 활성물질을 지속적으로 방출하여 미생물 및 곰팡이의 증식을 억제하는 활성 방출포장시스템(Active releasing packaging system)에 대한 관심이 증가하고 있다¹¹⁻¹²⁾. Lee 등의 연구에서는, PEBAX/PEG-CA복합필름 사체(Sachet)에 아염소산나트륨 분말을 포함하여 이산화염소가 방출되는 시스템을 구현하였다¹³⁾. 그러나, 기존의 사체는 주로 석유계 플라스틱기반 다층필름으로 제조되고 있어 사용 후 폐기시 환경적 부담을 유발시킬 수 있다. 비록 사체는 전체 포장재 시장에서 차지하는 비중은 크지 않지만, 식품부산물 및 천연유래소재를 활용하여 이를 대체할 경우 석유계 플라스틱 사용량을 저감하고 자원순환을 촉진함으로써 지속가능한 포장시스템 구축에 기여할 수 있다¹⁴⁾.

따라서, 본 연구에서는 지속가능한 포장시스템 구축을 위해 종이, 식품부산물인 커피찌꺼기 및 천연고분자인 카제인 나트륨을 활용하여 수분흡착기능을 갖는 코팅지를 제조하고, 이를 활용하여 이산화염소가 지속 방출되는 종이 기반 항균 및 향진균 포장재를 개발하고자 하였다. 종이는 셀룰로오스 기반 천연 고분자 소재로 하이드록시기($-\text{OH}$)를 가지고 있어 생분해성과 기계적 강도가 우수하지만¹⁸⁾, 친수성과 다공성 구조로 인해 외부 오염물질의 침투가 용이하며 접착강도가 낮다는 단점이 있다¹⁵⁻¹⁸⁾. 이를 개선하기 위해 필름성형능력과 기계차단성이 우수한 카제인 나트륨(Sodium caseinate, CasNa)과의 복합화 시도가 되고 있으나, CasNa 역시 높은 친수성과 건조 시 취성으로 인한 물성 저하 문제가 발생한다¹⁷⁻²²⁾. 이에 본 연구에서는 버려지는 자원인 커피찌꺼기(Spent coffee grounds, SCGs)에 주목하였다. SCGs는 셀룰로오스(Cellulose), 헤미셀룰로오스(Hemicellulose), 리그닌(Lignin)과 같은 섬유질과 생리활성 물질이 함유되어 있지만 대부분 폐기된다²³⁾. SCGs 유래 셀룰로오스는 다수의 하이드록실기를 보유하고 있어 다른 고분자와 수소결합을 형성할 수 있으며, 화학적 개질을 통해 CasNa와 상호작용을 향상시킬 수 있다. 또한, 우수한 수분흡착 특성을 나타내어 기능성 포장소재로의 활용가능성이 보고되고 있다²³⁻²⁵⁾. 하지만, SCGs 자체는 포장재로 직접 활용하기 어렵고

수계 코팅제 내 분산성이 제하적이기 때문에 단독으로 포장소재에 적용하기에는 한계가 있다. 따라서, 이러한 한계를 극복하고 코팅소재로서의 활용성을 향상시키기 위해 SCGs의 화학적 개질이 필요하다. 본 연구에서는 SCGs 표면의 하이드록실기($-\text{OH}$)를 선택적으로 카르복실기($-\text{COOH}$)로 전환하여 친수성 및 분산성을 향상시키고, CasNa와의 분자간 상호작용을 개선시키기 위해 TEMPO산화공정을 적용하여 TOSCGs분말(TEMPO oxidized spent coffee grounds)을 제조하고 코팅소재로 활용하였다.

이를 위해, TOSCGs 함량을 달리한 5종의 코팅제를 종이에 코팅하여, 코팅지의 형태학적 특성, 수증기차단성, 표면특성을 분석하였다. 또한, 최적화된 코팅지에 아염소산나트륨과 구연산 분말을 첨가한 뒤 열접착 밀봉하여 종이 기반 이산화염소 방출형 항균 및 향진균 사체를 제조하였다. 제조한 사체의 살균 포장재로서의 적용성을 파악하기 위해 항균 및 향진균 특성을 분석하고, 이를 바탕으로 신선 식품 포장재로서의 실제 적용가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 재료

본 연구에서 사용한 재료와 시약은 다음과 같다. 코팅 기재인 원지(base paper)는 평량 80 g/m^2 의 신장지((주)오피아이, 대한민국)를 구입하여 사용하였다. 코팅층 형성을 위한 CasNa는 ES식품원료(대한민국) 제품을 사용하였으며, 식품부산물인 커피찌꺼기는 예가체프를 사용하였다. 커피찌꺼기의 탈지 및 셀룰로오스 추출, TEMPO(2,2,6,6-Tetramethylpiperidin-1-oxyl)산화공정에 사용된 시약은 다음과 같다. 수산화나트륨(0.1 N, 대정화금, 대한민국), 차아염소산나트륨(5%, 대정화금, 대한민국), 무수에탄올(99.9%, 대정화금, 대한민국), TEMPO(시그마알드리치코리아(유), 대한민국), 염산(10%, 대정화금, 대한민국), n-hexane(96%, 대정화금, 대한민국), NaBr(99%, JUNSEI, 일본)를 구입하여 사용하였다. 활성물질로서 아염소산나트륨(대정화금, 대한민국)과 구연산(대정화금, 대한민국) 분말을 구입하여 사용하였다.

2. 방법

2.1. TEMPO산화 커피찌꺼기(TOSCGs) 제조

TOSCGs 제조방법은 탈지와 TEMPO산화의 두 단계로 진행되었다. 40°C , 24시간 동안 열풍건조기(OF-22GW, 제이오텍, 대한민국)에서 열풍건조 한 SCGs 50 g에 n-hexane 125 mL를 혼합하였다. 이후, 자력교반기(JSHS-18D, JSR, 대한민국)를 이용하여 상온(23°C), 300 rpm으로 3시간 동안 교반하였다. 교반된 SCGs는 감압여과법을 이용하여 고형분과 지방 성분을 각각 회수하였다. SCGs 고형분은 에탄올 100 mL와 증류수 100 mL를 사용하여 세척하였고, 40°C ,

Table 1. Compositions used for the preparation of (a) TOSCGs powder and (b) pristine CasNa and CasNa/TOSCGs coated papers.

Sample Code	(a) Compositions (g)					
	SCGs	D.I Water	TEMPO	NaBr	NaClO	Ethanol
TOSCGs	3	100	0.06	0.3	180	30
Sample Code	(b) Compositions (g)					
	CasNa	TOSCGs	D.I Water			
Base paper	0	0	0			
Pristine CasNa	10	0	90			
CasNa/TOSCGs 0.1%	10	0.1	90			
CasNa/TOSCGs 0.3%	10	0.3	90			
CasNa/TOSCGs 0.5%	10	0.5	90			
CasNa/TOSCGs 1.0%	10	1.0	90			
CasNa/TOSCGs 1.5%	10	1.5	90			

24시간 동안 열풍 건조하였다.

탈지된 SCGs는 Table 1 (a)의 조성으로 1 L 삼각플라스크에 SCGs, TEMPO, NaBr 및 D.I Water를 넣어 자력교반기를 이용하여 상온(23°C), 200 rpm으로 20분 동안 교반하였다. 이후 산화제인 NaClO를 넣어 자력교반기를 이용하여 23°C, 400 rpm, 4시간 동안 반응시켰다. 반응 중 pH는 0.1 N NaOH와 10% HCl을 사용하여 10-10.5로 일정하게 유지하였다. 에탄올 30 mL 첨가하여 반응을 종결시킨 후 자력교반기를 이용하여 상온 23°C, 300 rpm으로 10분 동안 교반하였다. 감압여과법을 통해 여과한 후 ethanol 100 mL와 증류수 100 mL를 사용하여 세척한 다음 여과액은 원심분리기(CN/DT5-2B, Beijing era beili centrifuge Co. Ltd., 중국)를 이용하여 4,000 rpm에서 30분간 분리하였다. 최종적으로 회수된 TOSCGs는 열풍건조기에 40°C, 24시간 동안 열풍건조하여 사용하였다.

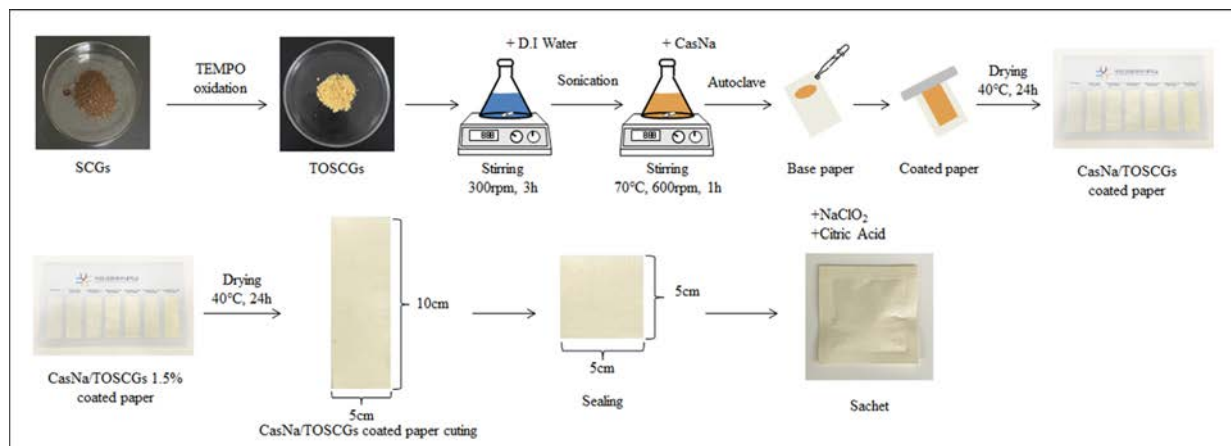
2.2. CasNa/TOSCGs 코팅지 제조 및 사썬 제조

본 연구의 CasNa/TOSCGs 코팅액은 Table 1(b)의 조성으

로 구성하였고, 제조방법은 Fig. 1에 나타내었다. TOSCGs에 증류수를 넣은 다음 자력교반기를 이용하여 23°C, 300 rpm으로 3시간 동안 교반하여 분산시켰다. 이후 초음파과쇄기 (Sonics and materials, US/VC505, 500, 미국)를 이용하여 Amplitude 60% 조건에서 15분씩 총 5회 균질화를 수행하였다. 초음파 처리 과정에서 발생하는 온도상승을 최소화하기 위해서 각 처리사이에 5분간의 휴지시간을 두었으며, 총 초음파처리는 75분간 수행하였다. 분산액에 CasNa를 첨가하고 자력교반기를 이용하여 70°C, 600 rpm으로 1시간 동안 교반한 후, 고압멸균기(Autoclave, 글로벌 사이언스, 대한민국)를 이용하여 121°C, 15분간 열처리함으로써 단백질의 변성 및 소재간 물리적 결합력을 유도하였다.

코팅용 원지 (25 cm × 34 cm)를 건조한 후 메이어 바 (Meyer bar 70호, 대한민국)를 이용하여 제조된 코팅액을 원지표면에 코팅하였다. 1차코팅 및 건조 후 2차코팅을 수행하는 더블코팅 방식으로 진행하였다. 최종 CasNa/TOSCGs코팅지는 40°C에서 24시간 동안 건조하였다.

TOSCGs는 우수한 수분흡착 특성을 보유하고 있으며,

**Fig. 1.** Schematic illustration of the preparation of TOSCGs powders, CasNa/TOSCGs-coated papers, and sachet.

TOSCGs 함량이 가장 높은 CasNa/TOSCGs 1.5% 조성인 수분을 효과적으로 흡착하여 아염소산나트륨과 구연산 간 반응을 촉진하고, 이산화염소 방출효율을 향상시킬 것으로 판단하여 사체 제조에 적용하였다. CasNa/TOSCGs 1.5% 코팅지를 5 cm × 10 cm 크기로 절단하고 3면을 접착한 후, 내부에 ClO₂발생을 위한 전구체인 아염소산나트륨 0.1 g과 활성제인 구연산 2 g 분말을 첨가한 후, 나머지 한 면을 열접착 밀봉하여 최종적으로 ClO₂방출형 활성사체를 제작하였다.

2.3. TOSCGs, Pristine CasNa 및 CasNa/TOSCGs 코팅지 물성분석

2.3.1. 수분흡착특성

TOSCGs의 수분흡착특성(Dynamic vapor sorption)을 DVS Intrinsic PLUS analyzer (Surface measurement systems Ltd., London, UK)를 사용한다. 식품포장 분야에서 습도 조절 및 선도유지를 위해 널리 사용되는 활성포장소재인 제올라이트(Zeolite)와 실리카겔(Silica gel)을 대조군으로 선정하여 TOSCGs의 수분흡착특성을 비교분석을 실시하였다. 이때, 상대습도 (relative humidity, RH)는 10%, 50% 및 98%로 설정하였다. 이때, 각 단계에서 시료의 질량변화가 10분이상 동안 0.002 wt%미만이 될 때까지 해당 상대습도 조건을 유지하여 평형상태에 도달하도록 하였다. 수분흡착 과정 동안 온도는 25 °C로 일정하게 유지하였다.

2.3.2. 화학적 특성

원지, Pristine CasNa 및 CasNa/TOSCGs 코팅지의 화학적 구조를 확인하기 위해서 Spectrum 65 FTIR spectrometer (Perkin Elmer Co. Ltd, USA)를 사용하여 ATR모드에서 4000-600 cm⁻¹ 범위의 스펙트럼을 분석하였다.

2.3.3. 형태학적 특성

원지, Pristine CasNa와 CasNa/TOSCGs 코팅지의 형태학적 특성을 확인하기 위해서 전계방사형 주사전자현미경(Field emission scanning electron microscope, SEM, Jeol IT700, Jeol, USA)를 사용하여 이미지를 확인하였다.

2.3.4. 수증기투과도 분석

제조된 Pristine CasNa와 CasNa/TOSCGs 코팅지의 수증기에 대한 차단성을 확인하기 위해서 Water vapor transmittance rate (Permatran-W Model 3/34, Mocon Inc., 미국)를 사용하였고, 25°C, RH 50% 조건에서 수행되었다.

2.4. 이산화염소 방출형 항균 및 항진균 사체의 항균 특성 평가

제조된 사체의 항균 특성을 평가하기 위해 *E. coli*와 *S.*

*aureus*균주를 대상으로 평가하였다. 각 균주는 단일 Colony를 취하여 액체배지(Nutrient broth)에 접종한 후, 37.8°C에서 24시간 배양하여 활성화하였다. 이후, 활성화된 균주를 액체배지와 혼합하여 600 nm에서의 흡광도가 0.1이 되도록 희석하여 시험균액을 준비하였다. 준비된 시험균액을 표준천배지(Plate count agar, PCA)에 접종하고 스프레더를 이용하여 균일하게 도말하였다. 접촉조건에서는 사체를 균이 도말된 PCA배지 표면에 직접 부착한 후, 덮개를 덮어 24시간 및 48시간 동안 배양하였다. ClO₂가스에 의한 방출 항균효과를 확인하기 위해, 사체를 PCA배지의 덮개 안쪽에 부착하여, 배지표면과 사체가 직접 접촉하지 않도록 비접촉조건에서 시험을 진행하였다. 또한, 아염소산나트륨, 구연산, 그리고 두 물질의 혼합물을 실험 대조군으로 사용하였으며, 24시간 및 48시간 배양 후 형성된 억제영역을 확인하였다.

2.5. 이산화염소 방출형 항균 및 항진균 사체의 항진균 특성 평가

제조한 사체의 항진균 특성은 *A. niger* 균주를 대상으로 평가하였으며, 접촉 및 비접촉 조건에서 디스크 확산법을 적용하여 억제영역을 확인하였다. *A. niger* 균주의 단일 Colony를 취하여 Potato dextrose broth (PDB)에 접종한 후, 30°C에서 72시간 동안 배양하여 균사 및 포자를 활성화하였다. 이후, 활성화된 균사 및 포자를 상기 제조한 PDB배지와 혼합하여 600 nm에서의 흡광도가 0.1이 되도록 조정하였다. Potato dextrose agar (PDA)에 균을 접종하고 스프레더를 이용하여 균일하게 도말 한 후, 항균실험과 동일한 접촉 및 비접촉방식으로 1-7일간 배양하며 진균증식 억제정도를 관찰하였다. 또한, 표준규격방법인 AATCC 30에 따라 항진균활성을 추가 검증하였다²⁶⁾.

2.6. 신선식품에 대한 사체 적용성 평가

제조된 사체의 실제 식품 보존효능을 검증하기 위해 대추방울토마토(Date cherry tomato, *Solanum lycopersicum*)와 거봉포도(Kyoho grape, *Vitis vinifera* × *Vitis labrusca*)를 대상으로 저장실험을 수행하였다. 실험에 사용된 과일은 강원도 강릉시 농산물도매시장에서 당일 새벽에 수확되어 입고된 것을 구매하였으며, 외관 상태가 균일하고 상처가 없는 과일을 선별하여 실험에 사용하였다. PET트레이에 대추방울토마토와 사체를 함께 투입한 후 23°C, 상대습도 65 ± 3% 조건에서 20일 동안 저장하였다. PET파우치에 거봉과 사체를 함께 투입한 후 동일한 온·습도조건에서 7일 동안 저장하였다. 부패율 (Decay rate %)은 육안관찰을 통해 곰팡이 발생이 뚜렷하게 나타나는 부패과실의 개수를 파악한후, 이를 전체 과실개수에 대한 백분율로 환산하여 표기하였다.

결과 및 고찰

1. TOSCGs의 수분 흡착특성

TOSCGs의 수분흡착거동을 평가하기 위하여 DVS 분석을 실시하였고, 대표적인 수분제거제인 제올라이트 및 실리카겔과 비교한 결과를 Table 2에 나타내었다. TOSCGs의 경우 저습조건 (50% RH)에서는 제올라이트 및 실리카겔과 비교하였을 때 상대적으로 낮은 수분 흡착량을 나타내었다. 이는 다공성 구조 내 물리적 흡착이 지배적인 기존 흡습제와 달리, TOSCGs는 화학적 상호작용에 의한 흡착이 높기 때문으로 판단된다. 하지만, 고습조건 (98% RH)에서는 제올라이트 및 실리카겔과 비교하였을 때 상대적으로 높은 수분 흡착능을 나타냈다. 이는 TEMPO산화공정을 통해 TOSCGs표면에 도입된 수산기 및 카르복실산나트륨기가 수분과 강한 수소결합을 형성함으로써 수분 흡착을 촉진하였기 때문으로 판단된다. 특히, 카르복실산나트륨기는 이온성 작용기로서 강력한 수화능력을 보유하고 있어, 물분자를 효과적으로 포집할 수 있다. 따라서, TOSCGs는 고습환경에 노출되기 쉬운 신선식품 포장내부에서 수분을 효과적으로 흡착 및 제거할 수 있는 활성포장소재로서 높은 응용가능성을 지고 있음을 확인하였다.

2. 코팅지의 화학적 특성

조된 코팅지 표면의 화학적 구조와 CasNa와 TOSCGs 간 상호작용, 원지와 CasNa/TOSCGs간 상호작용을 확인하기 위하여 FTIR 분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 원지에서 나타나는 셀룰로오스의 특성을 반영하는 $3,300\text{ cm}^{-1}$ 부근의 -OH 피크와 2900 cm^{-1} 부근의 C-H 피크가 나타났으며, $1,050\text{ cm}^{-1}$ 부근에서는 C-O-C 피크가 관찰되었다. Pristine CasNa 코팅지에서는 단백질의 특성을 반영하는 Amide 결합이 나타났는데, $1,650\text{ cm}^{-1}$ 부근의 Amide I과 $1,540\text{ cm}^{-1}$ 부근의 Amide II 피크가 관찰되었다²⁷⁾. CasNa/TOSCGs 코팅지에서는 TOSCGs의 셀룰로오스 피크가 확인되었다. $1,730\text{ cm}^{-1}$ 부근에서는 산화 처리된 셀룰로오스의 카르보닐기(C=O) 피크가 관찰되었으며, 이는 TEMPO 산화 과정에서 셀룰로오스의 C6 위치에 존재하는 알코올기가 산화되어 알데하이드 중간체를 형성한 후, 산화 반응을 통해 카르복실기로 전환되기 때문으로

보고되고 있다²⁸⁾. 또한, TOSCGs 함량이 증가할수록 피크 세기가 증가하는 것을 확인하였다. $1,240\text{ cm}^{-1}$ 과 $1,150\text{ cm}^{-1}$ 부근의 피크는 C-O 그룹을 나타내며, CasNa과 TOSCGs 간의 수소결합 또는 이온성 상호작용 형성을 뒷받침한다²⁹⁾. $3,300\text{ cm}^{-1}$ 부근의 -OH 피크는 TOSCGs 함량이 증가할수록 세기가 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 CasNa의 -NH기와 TOSCGs의 -OH 및 -COOH기가 수소결합을 형성에 따른 강도변화로 판단된다³⁰⁾. 이러한 결과는 CasNa의 단백질 구조와 TOSCGs의 다당류가 강한 물리적 상호작용을 형성함으로써 코팅지의 물리적 특성에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3. 형태학적 특성

원지, Pristine CasNa 및 CasNa/TOSCGs 코팅지 표면의 형태학적 특성을 확인하기 위해 SEM분석을 실시하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 원지는 셀룰로오스 섬유에서는 불규칙하게 배열되는 다공성 섬유구조가 확인되었다. Pristine CasNa 코팅지에서는 표면에 단백질 코팅층이 형성되어 다공성 구조가 일부 충전되었으나, 표면에 미세 기공이 형성되어 코팅층이 균일하게 형성되지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 CasNa 수용액의 침투와 건조 과정 중 기포 또는 수분이 제거됨으로 코팅지 표면에 기공이 형성된 것으로 판단된다¹⁹⁾. TOSCGs가 도입된 코팅지에서도 TOSCGs의 함량이 증가함에 따라 표면의 미세기공 수와 크기는 유사한 수준으로 확인되었다. 이는 첨가한 TOSCGs의 함량 범위 내에서는 CasNa 매트릭스의 기본적인 필름형성 메커니즘 또는 건조 시 발생하는 물리적 기공 형성거동을 완전히 변화시키지는 않았음을 의미한다. 하지만, TOSCGs

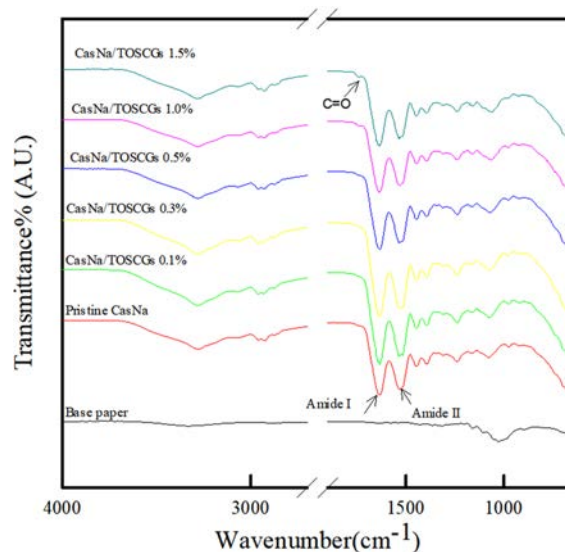


Fig. 2. FTIR spectra of the base paper and pristine CasNa and CasNa/TOSCGs coated papers.

Table 2. Moisture sorption capacity of TOSCGs compared to commercial desiccants at different relative humidity level (25°C).

Sample code	Moisture sorption (%)		
	10% RH	50% RH	98% RH
Zeolite	2.4	5.0	8.3
Silica gel	4.7	23.7	31.8
TOSCGs	0.1	2.8	37.7

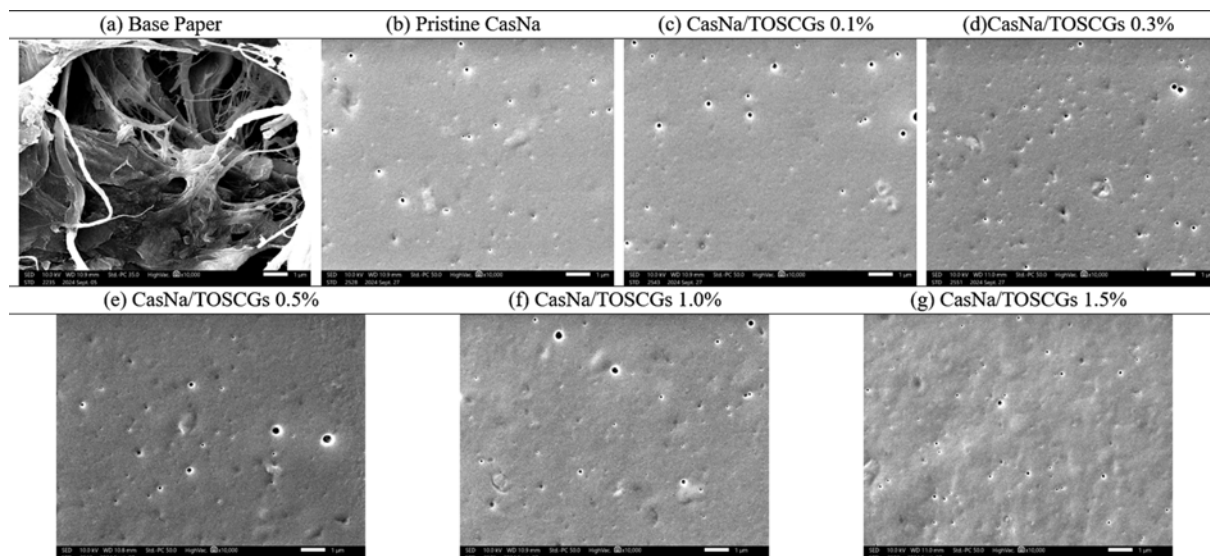


Fig. 3. SEM images of the surface morphology : (a) base paper, (b) pristine CasNa and (c)-(g) CasNa/TOSCGs coated papers with increasing TOSCGs content.

함량에 증가함에 따라 기공의 크기가 확대되거나 표면 거칠기가 급격히 증가하는 등의 구조적 결함이 관찰되지 않았다. 이는 TOSCGs가 CasNa 매트릭스 내에 어느정도 균일하게 분산되어 안정적인 코팅층을 형성하고 있음을 시사한다.

4. 수증기 차단성

본 연구에서는 Pristine CasNa와 CasNa/TOSCGs 코팅지의 수증기 차단성을 측정하였고 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Pristine CasNa의 수증기 투과도는 $87.5 \text{ g/m}^2\cdot\text{day}$

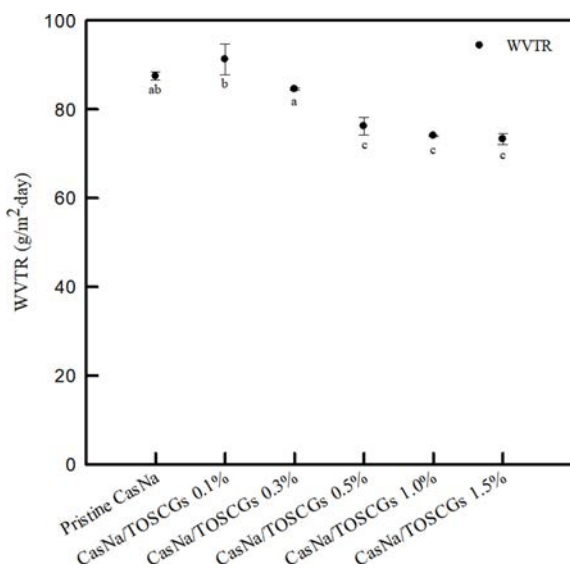


Fig. 4. WVTR of pristine CasNa and CasNa/TOSCGs coated papers.

임을 확인하였고, TOSCGs 0.1% 코팅지의 경우 수증기 투과도가 $91.3 \text{ g/m}^2\cdot\text{day}$ 으로 높아졌으나, TOSCGs 함량이 증가할수록 수증기 투과도가 낮아지는 것으로 확인하였다. 이는 Fig. 2의 FTIR 결과에서 확인된 바와 같이 TEMPO 산화 처리로 도입된 카르복실기($-\text{COOH}$)와 노출된 카르보닐기(C=O)가 수소결합에 기여한 것으로 판단되며, 이러한 분자간 상호작용은 매트릭스 내부의 자유부피를 감소시키고 수분의 이동을 억제한 것으로 판단된다. 또한 Fig. 3의 형태학적 특성 분석결과, TOSCGs의 함량이 증가함에도 미세기공의 수와 크기는 유사하였으나, TOSCGs가 매트릭스 내부의 필러(filler)로서 작용하여 수분이 이동경로를 복잡하게 함으로 수증기 차단성이 개선된 것으로 판단된다³¹⁾.

5. 항균 및 항진균 특성 평가

제조된 사체의 항균 및 항진균 특성을 평가하기 위해 3종의 표준 미생물을 배양한 후 디스크 확산법을 이용하여 항균 및 항진균 활성을 확인하였으며, 그 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 접촉 및 비접촉 조건에서 수행한 실험 결과, 제조된 사체는 모든 균주에 대해 모두 억제 영역을 형성하는 것으로 확인되었다.

*E. coli*의 경우, 대조군으로 사용된 단독 처리군인 아염소산나트륨과 구연산은 각각 일정수준의 억제 영역을 형성하였으나, 두 성분을 혼합한 처리군과 제조한 포장재의 접촉 및 비접촉 조건에서는 배지 내 균이 검출되지 않았다(Fig. 5). 이는 아염소산나트륨과 구연산이 개별적으로 항균 활성을 가지면서, 두 성분이 결합할 때 이산화염소가 방출되면서 항균 활성이 더욱 증가한 것으로 판단된다³¹⁾. 이산화염소는 아염소산나트륨과 산의 반응을 통해 방출되며, 상기

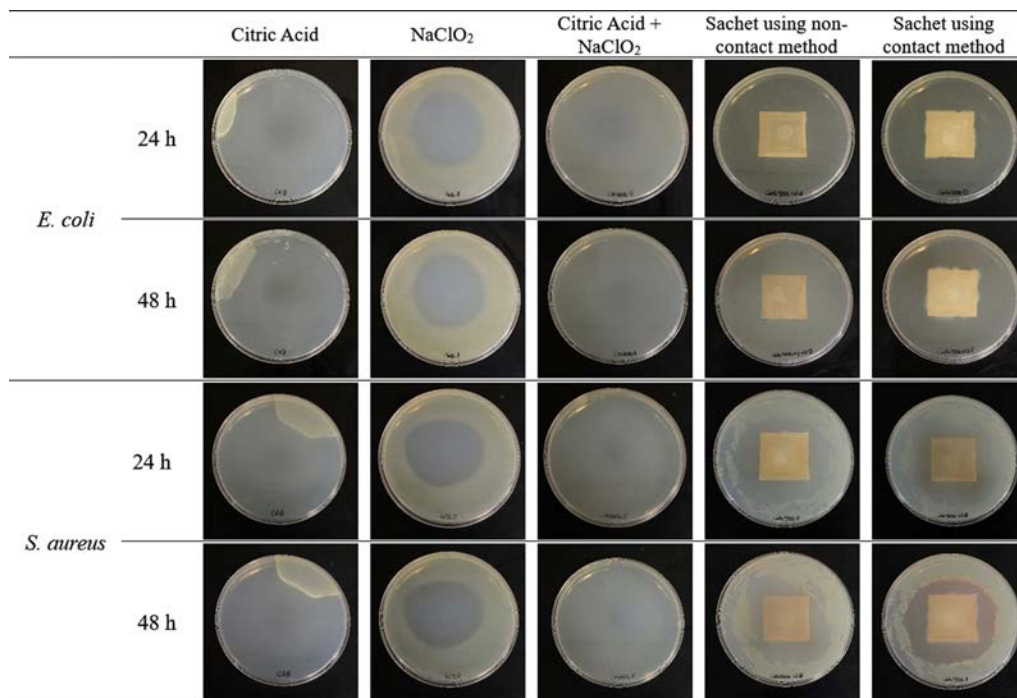


Fig. 5. Antimicrobial activities of CasNa/TOSCGs coated paper-based sachets against *E. coli* and *S. aureus* under contact and non-contact conditions after 24 and 48 hours.

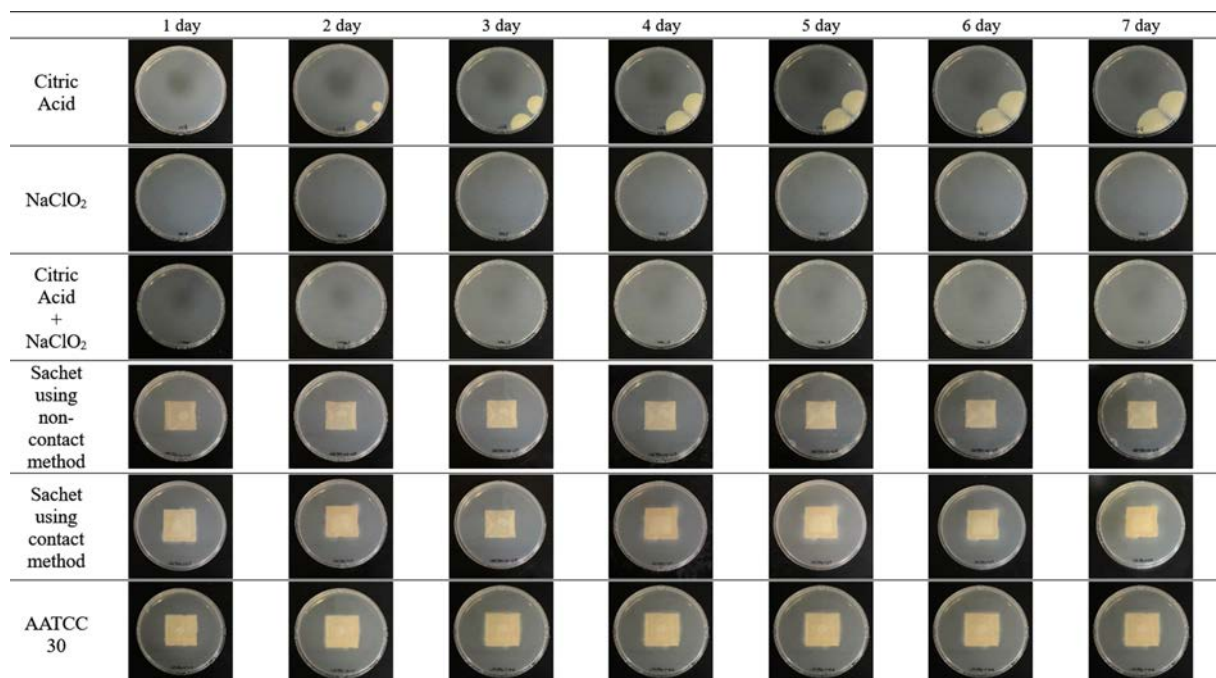


Fig. 6. Antifungal activities of CasNa/TOSCGs coated paper-based sachets against *A. niger* under contact, non-contact and AATCC 30 conditions for 7 days.

반응에서 염산(HCl)은 미국 식품의약국(Food and drug administration, FDA)에서 GRAS(Generally recognized as safe)로 허가받은 식품 첨가물인 구연산으로 대체 가능하다³²⁾.

*S. aureus*에 대한 항균 활성 평가에서도 *E. coli*와 유사한 경향이 관찰되었다(Fig. 5). 대조군의 단독 처리군에서는 배지 내 균이 검출되었으나 억제 영역이 형성되었다. 제조한

포장재의 접촉 및 비접촉 조건에서는 배지 내 균이 검출되었으나, 포장재 주변으로 뚜렷한 억제 영역이 확인되어 포장재의 항균 활성을 입증하였다.

*A. niger*의 항진균 활성 평가 결과, 단독 처리군인 구연산에서는 일부 균이 검출되었으나 억제영역이 형성되었고, 그 외 조건에서는 균이 검출되지 않았다(Fig. 6). 곰팡이는 일반세균보다 환경저항성이 강함에도 불구하고, 본 연구의 사체가 7일간의 저장환경에서도 강력한 억제영역을 형성한 것은 제조한 사체로부터 ClO_2 의 방출이 효과적으로 이루어졌음을 시사한다.

이는 TOSCGs가 포함된 코팅층은 수분을 효과적으로 흡수할 수 있는 구조적 특징을 지니게 되어, 저장 중 발생한 응축수가 TOSCGs 코팅층에 흡착되면서 구연산이 수분과 반응하여 H^+ 를 방출하고, 방출된 H^+ 가 NaClO_2 에서 해리된 ClO_2^- 이온과 반응하여 ClO_2 가스를 형성함으로써 살균 효과가 지속되는 메커니즘을 구현한 것으로 해석된다^{28,33}). 따라서 제조된 사체는 저장환경 내 존재하는 수분을 효과적으로 흡착하여 지속적으로 이산화염소를 방출하며, 유통과정 중 발생할 수 있는 미생물증식을 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다.

6. 신선식품에 대한 사체 적용성 평가

신선식품 시장에서 시각적 외관은 신선도를 판단하는 척도이자 소비자의 구매 결정을 유도하는 핵심적인 품질지표이다. 본 연구에서는 제조된 사체의 실제 현장 적용성을 평가하기 위해 대추방울토마토와 거봉 포도를 대상으로 저장 실험을 실시하였다. 품질저하의 정량적 지표로서 저장기간 중 과실 표면의 곰팡이 발생여부를 육안으로 판별하여 부패율을 평가하였으며, 이를 통해 ClO_2 방출사체가 실제 식품 저장환경에서 효과적으로 발현하는지에 대하여 확인하였다.

Fig. 7 (a)에서와 같이 대추방울토마토를 20일간 저장한 결과, 대조군과 제조한 사체처리군의 부패율은 57.8%와 54.2%를 각각 나타냈다. 최종 부패율의 수치적 차이는 크지 않았으나, 제조한 사체를 적용한 시료는 미생물 및 곰팡이의 생장이 억제되어 부패진행속도가 지연되는 경향을 보였다. 그 결과 대조군 대비 약 3일간의 저장수명 연장 효과가 확인되었다. 또한 저장 기간이 경과함에 따라 부패율 증가 속도가 대조군보다 현저히 완만하게 유지되는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 아염소산나트륨과 구연산의 상호작용에 의한 살균 효과뿐만 아니라, 저장 중 과일의 호흡 및 증산작용으로 발생하는 수분(H_2O)과 이산화탄소(CO_2)에 기인한다. 밀폐된 포장 내부에서 발생한 이산화탄소는 수분에 용해되어 탄산(H_2CO_3)을 형성하며, 포장재 내의 아염소산나트륨과 반응하여 이산화염소가 지속적으로 방출된 결과로 해석된다³⁴).

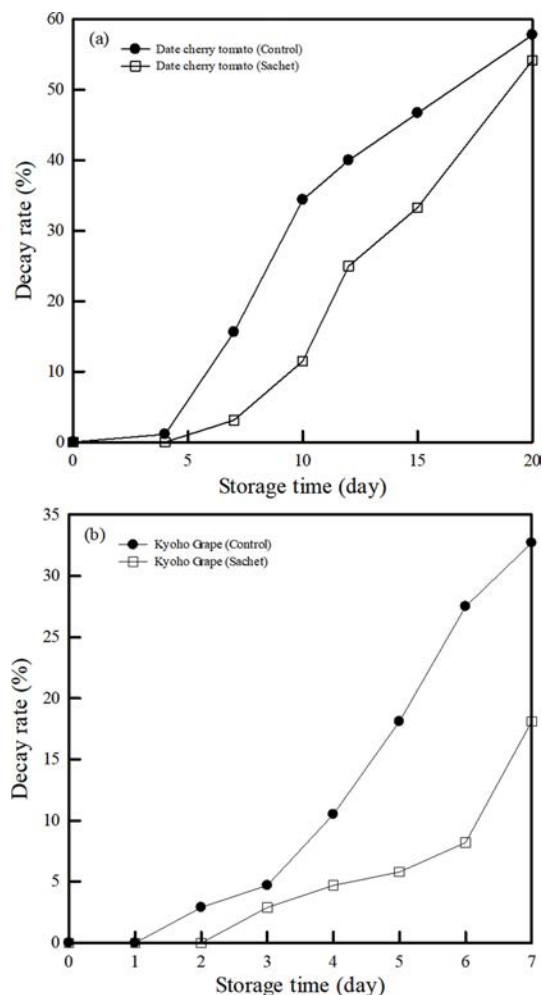


Fig. 7. Decay rate of fresh produce during storage: (a) Date cherry tomatoes for 20 days and (b) Kyoho grapes for 7 days.

거봉 포도의 경우 저장 7일 경과 후 대조군의 부패율은 32.7%, 제조한 사체를 적용한 시료는 18.1%로 나타났다(Fig. 7 (b)). 제조한 포장재를 적용한 시료는 대조군 대비 약 1일의 보관 수명 연장 효과를 보였으며, 저장기간이 증가함에 따라 부패율 증가 속도가 완만하게 유지되는 경향을 보였다. 또한 저장 7일차 제조한 포장재를 적용한 시료에서는 과실의 탈립 현상이 상대적으로 적게 관찰되었다. 이는 사체에서 방출된 이산화염소가 표면 미생물 증식을 억제하고, 미생물 유래 세포벽 분해효소의 활성화를 지연시켜 조직의 연화를 효과적으로 억제했기 때문으로 판단된다³⁵).

이와 같은 결과는 대추방울토마토와 포도 모두에서 제조한 사체포장재가 저장 중 지속적으로 이산화염소를 헤드스페이스로 방출함으로써 미생물의 증식을 효과적으로 억제하고, 결과적으로 식품의 미생물학적 안전성을 향상시킴을 시사한다. 따라서 본 연구에서 개발한 종이 기반 이산화염소 방출형 항균 및 항진균 사체포장재는 외부 환경 요인에

의존하지 않고, 과일의 자연적인 생리적 작용을 매개로 자가 반응 기반의 지속적인 살균 효과를 제공할 수 있는 메커니즘을 제시한다.

요 약

본 연구에서는 CasNa와 TOSCGs를 혼합하여 5종의 CasNa/TOSCGs 코팅액을 제조하였고 이를 종이 표면에 코팅하여 CasNa/TOSCGs 코팅지를 제조하였다. 제조된 코팅지는 TOSCGs 함량에 따른 화학적, 형태학적, 수분흡착 및 수증기투과특성을 분석하였으며 항균 및 항진균 특성 평가와 신선식품 사체로서의 적용 가능성을 평가하였다. DVS 분석 결과, TOSCGs는 고습 조건에서 우수한 수분 흡착성을 나타냈으며 이는 TEMPO 산화로 도입된 작용기에 의한 수소결합 및 수화작용에 기인한다. FTIR 분석 결과, TOSCGs 함량이 증가함에 따라 카르보닐기 피크의 생성과 -OH기의 감소가 관찰되었으며 이는 CasNa와 TOSCGs 간 수소결합 증가 및 화학적 구조 변화에 의한 것으로 판단하였다. 또한, SEM분석에서는 TOSCGs 도입에도 미세기공의 수와 크기는 유사하게 유지되었으며 구조적 결함 없이 균일한 분산을 통해 안정적인 코팅층이 형성되었음을 확인하였다. 수증기 차단 특성은 TOSCGs 함량 증가에 따라 수증기 투과도가 감소하여 차단성이 향상되었으며 이는 수소결합에 의한 자유부피 감소와 필러 효과에 따른 것으로 판단하였다. 항균 및 항진균 특성 분석 결과, *E. coli*, *S. aureus*, *A. niger*에 대해 모두 억제 영역이 형성되어 효과적인 항균 및 항진균 활성을 확인하였다. 신선식품 적용성 평가 결과, CasNa/TOSCGs 기반 이산화염소 방출형 항균 및 항진균 사체는 저장 기간 동안 과일의 증산작용으로 발생하는 수분을 흡착하여 지속적으로 이산화염소를 방출함으로써 미생물 및 곰팡이의 생장을 효과적으로 억제하였고, 그 결과 부패율 증가 속도를 감소시키고 보관 수명을 연장하는 것으로 확인하였다. 따라서, 본 사체는 대표적인 식중독균인 *E. coli*와 *S. aureus*뿐만 아니라 신선식품 표면 부패를 유발하는 *A. niger*에 대해서도 효과적인 항균 및 항진균 활성을 나타내며 저장성이 요구되는 신선식품의 품질 유지 및 미생물학적 안전성 향상에 기여할 수 있는 사체로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgements

본 과제(결과물)는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 고부가가치식품기술개발사업의 지원(RS-2026-25510647)과 2026년도 교육부 및 강원특별자치도의 재원으로 강원엔지니어링의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다(2026-ANCHOR-10-004).

References

- Kim, S.M., Choi, Y.H., Kim, T.I., Lee, C.R., Chae, D.W., Jeon, J.W., Choi, J.W., Shin, B.S., Kim, M.H. and Park, W.H. 2024. Preparation and characterization of poly(vinyl alcohol)/tannin blend film for active food packaging. Polym. Korea. 48(5): 536-542.
- Oh, Y.N., Park, K.T. and Seo, J.C. 2023. Application of PLA/PBAT composite films containing calcined oyster shell powder for antimicrobial packaging. Korean J. Packag. Sci. Tech. 29(2): 79-86.
- Lee, Y.S. and Kim, J.N. 2006. Review of quality changes of postharvest fruits and packaging applications to extend their shelf life. Korean J. Food Sci. Technol. 12: 109-115.
- Lee, D.H., Ryu, J.I., Park, S.Y., Roh, E.J., Oh, C.S., Jung, K.S., Yoon, J.C. and Heu, S.G. 2011. Changes of bacterial diversity depend on the spoilage of fresh vegetables. Res. Plant Dis. 17: 38-43.
- Ministry of Food and Drug Safety. 2022. Guidelines for food sanitizer site. Ministry of Food and Drug Safety, Korea.
- Kim, H.M. and Hwang, S.J. 2019. Changes in marketability of strawberry 'Maehyang' for export as affected by concentration of gaseous chlorine dioxide treatment. J. Bio-Env. Con. 28: 166-171.
- Sun, X.X., Zhou, B.N., Luo, Y.G., Ference, C.P., Baldwin, E.A., Harrison, K.N. and Bai, J.H. 2017. Effect of controlled-release chlorine dioxide on the quality and safety of cherry/grape tomatoes. Food Control. 82: 26-30.
- Choi, W.S., Ahn, B.J., Kim, Y.S., Kang, H.M., Lee, J.S. and Lee, Y.S. 2013. Quality changes of cherry tomato with different chlorine dioxide (ClO₂) gas treatments during storage. Korean J. Packag. Sci. Tech. 19(1): 17-27.
- Kim, Y.J., Kim, M.H. and Song, K.B. 2009. Efficacy of aqueous chlorine dioxide and fumaric acid for inactivating pre-existing microorganisms and Escherichia coli O157:H7, Salmonella Typhimurium, and Listeria monocytogenes on broccoli sprouts. Food Control. 20: 1002-1005.
- Hong, Y.H., Kim, M.K. and Song, K.B. 2008. Effects of aqueous chlorine dioxide treatment on microbial safety and quality of samgae chicken. Korean J. Food Preserv. 15: 769-773.
- Kim, D.W., Oh, J.M., Lee, S.H., Kim, H.A., Hwang, J.B. and Ko, S.H. 2022. Current status of legal regulations regarding gas- and moisture-removing active packaging for food: a review. Korean J. Packag. Sci. Tech. 28: 31-38.
- Vermeiren, L., Devlieghere, F., Van Beest, M., De Kruif, N. and Devere, J. 1999. Developments in the active packaging of foods. Trends Food Sci. Technol. 10: 77-86.
- Lee, J.S., Shin, H.J., Sadeghi, K. and Seo, J.C. 2023. Preparation and characterization of ClO₂ self-releasing smart sachet. Korean J. Packag. Sci. Tech. 29: 1-7.
- Kim, D.H., Han, M.H., Kim, N.H., Kim, J.H. and Jung, S.H. 2024. Waste plastic pyrolysis industry: current status and prospects. J. Korean Soc. Environ. Eng. 46: 395-407.

15. Aghajani-Memar, S., Mohammadkazemi, F., Kermanian, H. and Hamed, S. 2022. Synergistic effect of bacterial cellulose and halloysite nanotubes on the properties of the sodium caseinate-based nanobiocomposites. *Appl. Clay Sci.* 222: 106493.
16. Liu, K., Xu, X., Liu, H., Liu, Z., Zhao, K., Ma, Y. and Zhang, K. 2021. Mechanical properties and water sensitivity of soybean protein isolate film improved by incorporation of sodium caseinate and transglutaminase. *Prog. Org. Coat.* 153: 106154.
17. Lim, D.G., Park, N.Y., Lee, Y.J., Yun, J.H. and Kim, H.J. 2021. Characterization of the paper coated with polyhydroxybutyrate/ethyl cellulose blends. *J. Korea TAPPI.* 53(4): 41-52.
18. Hwang, J.H. and Kim, D.W. 2022. Preparation and characterization of sodium caseinate (CasNa)/transglutaminase (TG)-coated papers for packaging. *Korean J. Packag. Sci. Tech.* 28: 81-87.
19. Kim, S.H., Kwon, Y.J., Sharma, Y., Shon, M.Y., Cho, S., Baek, K.Y. and Cho, K.Y. 2023. Nanocellulose-based polymer composites with their properties and applications. *Appl. Chem. Eng.* 34(3): 221-225.
20. Lin, H.C., Wang, B.J. and Weng, Y.M. 2020. Development and characterization of sodium caseinate edible films cross-linked with genipin. *LWT-Food Sci. Technol.* 118: 108813.
21. Park, M.A., Choi, K.H. and Cho, B.U. 2020. Effects of gas grafting treatment with different amounts of palmitoyl chloride on properties of CNF-coated paper. *J. Korea TAPPI.* 52(1): 55-65.
22. Belyamani, I., Prochazka, F. and Assezat, G. 2014. Production and characterization of sodium caseinate edible films made by blown-film extrusion. *J. Food Eng.* 121: 39-47.
23. Jang, J.S., Hong, M.S. and Seo, H.J. 2016. Impacts of efficacy and side effect on awareness and consumption pattern about coffee among college students. *Korean J. Food Nutr.* 29(2): 275-282.
24. Kim, M.S., Koo, N. and Kim, J.G. 2012. Characteristics and recycling of spent coffee grounds. *Life Sci. Nat. Resour. Res.* 20: 59-69.
25. Jo, Y.J., Cho, H.J., Chun, S.J. and Lee, S.Y. 2015. Mechanical and thermal properties of hydroxypropyl cellulose/TEMPO-oxidized cellulose nanofibril composite films. *J. Korean Wood Sci. Technol.* 43(6): 740-745.
26. Gregory, K.W., Harrison, A.B. and Betts, W.B. 1999. A modified AATCC 30-1993 method to test fungicide treated fabrics against dermatophytes. *Mycol. Res.* 103(1): 88-90.
27. Hwang, J.H. and Kim, D.W. 2023. Preparation and characterization of sodium caseinate-coated papers based on glycerol and sorbitol contents for packaging application. *Foods.* 12: 940.
28. Tang, Z., Li, W., Lin, X., Xiao, H., Miao, Q., Huang, L., Chen, L. and Wu, H. 2017. TEMPO-oxidized cellulose with high degree of oxidation. *Polymers.* 9: 421.
29. Bealer, E.J., Onissema-Karimu, S., Rivera-Galletti, A., Francis, M., Wilkowski, J., Salas-de la Cruz, D. and Hu, X. 2020. Protein-polysaccharide composite materials: fabrication and applications. *Polymers.* 12: 464.
30. Hubbe, M.A., Ferrer, A., Tyagi, P., Yin, Y., Salas, C., Pal, L. and Rojas, O.J. 2017. Nanocellulose in thin films, coatings, and plies for packaging applications: a review. *BioResources.* 12(1): 2143-2233.
31. Sadeghi, K., Kasi, G., Ketsuk, P., Thanakkasaranee, S., Khan, S.B. and Seo, J. 2020. A polymeric chlorine dioxide self-releasing sheet to prolong postharvest life of cherry tomatoes. *Postharvest Biol. Technol.* 161: 111040.
32. Fiume, M.M., Heldreth, B.A., Bergfeld, W.F., Belsito, D.V., Hill, R.A., Klaassen, C.D., Liebler, D.C., Marks, J.G. Jr., Shank, R.C., Slaga, T.J., Snyder, P.W. and Andersen, F.A. 2014. Safety assessment of citric acid, inorganic citrate salts, and alkyl citrate esters as used in cosmetics. *Int. J. Toxicol.* 33: 16S-46S.
33. Lee, J.S., Shin, H.J., Sadeghi, K. and Seo, J.C. 2025. Chlorine dioxide (ClO₂)-releasing sachet for preservation of cherry tomatoes. *Molecules.* 30.
34. Jeoung, J.Y., Min, K.J. and Chae, H.K. 2010. Analysis of high school science textual descriptions of scientifically debatable compounds according to the experimental results by MBL: a case study of carbonic acid in water and aqueous solution of carbon dioxide. *J. Korean Chem. Soc.* 54.
35. Wu, B., Li, X., Hu, H., Liu, A. and Chen, W. 2011. Effect of chlorine dioxide on the control of postharvest diseases and quality of litchi fruit. *Afr. J. Biotechnol.* 10(32): 6030-6039.

투고: 2026.05.15 / 심사완료: 2026.06.05 / 게재확정: 2026.06.22

포장재 개선 사례를 통해 본 제품 등의 순환이용성 평가제도의 성과와 ESPR 대응 과제

조성문*

한국환경산업기술원

Performance of Korea's Assessment of Circular Usability of Products and Policy Implications for ESPR Compliance: Evidence from Packaging Improvement Cases

Seong Moon Cho*

Korea Environmental Industry and Technology Institute

Abstract This study aimed to analyze the operational performance of Korea's assessment of circular usability by examining original operational data on packaging improvement cases accumulated between 2018 and 2025 and to propose future directions for improving the program in response to the European Union's Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR). To this end, recommendations for improvement and product information before and after redesign were analyzed to identify major packaging improvement patterns and their effects on enhancing recyclability. The analysis covered various packaging categories, including PET beverage and food containers, PET detergent containers, single-material containers made of PP, PE, and PS, aseptic paper cartons, PSP food trays, and PVC wraps. The results showed that improvements such as the application of water-soluble adhesives, label-free packaging, conversion to colorless containers, adoption of single-material packaging, reduction of metal and heterogeneous materials, and lightweighting significantly improved recycling efficiency and facilitated the production of high-quality recycled materials. The findings also demonstrate that the Korea's assessment of circular usability functions not merely as an evaluation scheme but as an effective policy instrument that encourages voluntary ecodesign and improves resource circularity. Meanwhile, the ESPR adopts a life-cycle approach by addressing not only recyclability but also durability, repairability, reusability, recycled content, and the Digital Product Passport (DPP). Accordingly, Korea's assessment of circular usability should evolve beyond a recyclability-oriented framework by strengthening its legal effectiveness, expanding information disclosure, establishing a DPP-based information management system, enhancing alignment with the ESPR and the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR), and harmonizing its assessment framework with international standards.

Keywords Recyclability Assessment, Circular Economy, Packaging, Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR), Ecodesign

서론

최근 기후변화, 자원 고갈, 에너지 위기 등 다양한 환경문제가 전 세계적으로 심화되면서 지속가능한 경제·사회 시스템

구축의 필요성이 더욱 커지고 있다. 이에 따라 기존의 대량생산-대량소비-대량폐기 중심의 선형경제(linear economy)에서 벗어나 자원의 효율적 이용과 폐기물 발생 최소화를 지향하는 순환경제(circular economy)로의 전환이 국제사회의 핵심 정책과제로 부상하고 있다.¹⁾

순환경제는 제품의 지속가능성을 높이고 버려지는 자원의 순환망을 구축하여 투입되는 자원과 에너지를 최소화하는 친환경 경제 체계이다.¹⁰⁾ 국제사회는 순환경제를 주요 정책과제로 채택하고 있으며, 제품 설계 단계부터 자원순환

Corresponding Author: Seong Moon Cho
Korea Environmental Industry and Technology Institute, 215, Jinheung-ro, Eunpyeong-gu, Seoul, 03367, Korea
Tel: +82-2-2284-1940
E-mail: smcho@keiti.re.kr

성을 확보하기 위한 다양한 정책수단을 도입하고 있다.²⁾

우리나라도 「순환경제사회 전환 촉진법」 제정을 통해 순환경제 사회로의 전환을 추진하고 있으며, 특히 제품의 설계 단계부터 순환성을 고려하는 정책체계를 구축하고 있다.³⁾ 기존 자원순환 정책이 폐기물의 적정 처리와 재활용 확대에 중점을 두었다면, 최근의 정책 패러다임은 제품이 시장에 출시되기 이전 단계에서부터 재사용·재제조·재활용이 용이하도록 설계하는 방향으로 변화하고 있다. 이러한 변화는 제품의 환경성을 사후적으로 관리하는 방식에서 벗어나 설계 단계에서부터 순환성을 내재화하는 접근의 중요성을 반영한다.

이러한 순환경제 실현을 위한 대표적인 정책수단 중 하나가 ‘제품 등의 순환이용성 평가제도(이하 “순환이용성 평가제도”)’이다. 기후에너지환경부와 한국환경산업기술원은 제품의 순환성을 체계적으로 평가하고 개선을 유도하기 위하여 순환이용성 평가제도를 운영하고 있다. 순환이용성 평가제도는 제품 또는 포장재의 재질 구성, 구조적 특성, 분해·분리 용이성 및 재활용 가능성 등을 종합적으로 평가하여 제품 설계 단계에서 자원순환성을 고려한 설계를 유도하는 것을 목적으로 한다.⁹⁾ 특히 기업이 자발적으로 제품 개선을 추진할 수 있도록 평가 결과와 개선 권고를 제공함으로써 제품 설계 혁신과 자원순환성 향상을 촉진하는 역할을 수행하고 있다. 이러한 점에서 순환이용성 평가제도는 기존의 규제 중심 정책수단과 차별화되는 순환경제형 설계 지원 정책으로서 의의를 가진다.

그동안 순환이용성 평가제도는 다양한 제품군을 대상으로 운영되어 왔으며, 특히 포장재 분야에서는 재질 단순화, 복합재질 사용 저감, 분리배출 용이성 향상 및 포장재 감량 등 다양한 개선 사례가 축적되어 왔다. 이러한 사례들은 순환이용성 평가가 단순한 평가행위에 그치는 것이 아니라 실제 기업의 제품 설계 및 포장재 개선을 유도하는 정책수단으로 기능하고 있음을 보여준다. 그러나 현재까지의 연구는 제도의 운영 현황과 평가기준을 소개하거나 제도적 특성을 설명하는 수준에 머물러 있다. 순환이용성 평가를 통해 축적된 개선 사례에 대한 원자료를 기반으로 제도의 성과를 실증적으로 검증한 연구는 아직 이루어지지 않았다. 또한 국내 제도의 운영 현황을 최근 시행된 EU의 「지속가능제품을 위한 에코디자인 규정(Ecodesign for Sustainable Products Regulation, 이하 “ESPR”）」의 정책 방향과 연계하여 분석한 선행연구 역시 아직 이루어지지 않았다.

이에 본 연구는 한국환경산업기술원이 보유한 2018년부터 2025년까지의 순환이용성 평가제도 운영 원자료를 활용하여, 포장재 개선 사례의 특성과 성과를 실증적으로 분석하였다. 구체적으로 평가 과정에서 도출된 개선 권고사항과 개선 전·후 제품 정보를 바탕으로 주요 개선 유형과 순환이용성 향상 효과를 분석하고, 이를 통해 제도가 기업의 제

품 설계 및 포장재 순환성 향상에 미친 영향을 고찰하였다. 또한 국내 순환이용성 평가제도가 EU ESPR이 지향하는 재활용성, 자원 효율성 및 순환설계의 정책 방향과 어떠한 정합성을 갖는지를 비교·분석하고, 분석 결과를 바탕으로 제도의 개선 및 발전 방향을 제시하였다.

본 연구의 차별성은 다음과 같다. 첫째, 순환이용성 평가제도 시행 이후 축적된 평가 원자료를 활용하여 제도의 실질적인 개선 성과를 최초로 실증 분석하였다. 둘째, 개별 포장재 개선 사례를 단순히 소개하는 데 그치지 않고 개선 유형과 순환이용성 향상 효과를 체계적으로 분석함으로써 제도의 정책적 효과를 검증하였다. 셋째, 최근 시행된 EU ESPR의 요구사항과 국내 순환이용성 평가제도를 연계하여 국내 제도의 국제적 정합성과 향후 발전 방향을 제시하였다. 이를 통해 학술적 의의뿐만 아니라 국내 순환경제 정책의 발전에 기여할 수 있는 정책적 시사점을 제시하였다는 데 의의가 있다.

제품 등의 순환이용성 평가 제도

1. 제도 개요

순환이용성 평가제도는 제품 등이 재질이나 구조 등의 이유로 순환이용되지 못하고 사용 후 전체가 폐기되어 자원이 낭비되는 것을 방지하기 위해 도입된 제도이다. 제품의 순환이용을 저해하는 요소를 평가하고, 제조자 등이 제품 생산 단계에서 이를 개선하도록 유도함으로써 자원의 순환이용을 촉진하는 것을 목적으로 하며, 2018년부터 시행되고 있다.⁹⁾

기존의 자원순환 정책이 사용 후 발생한 폐기물의 재활용 및 적정 처리에 중점을 두었다면, 본 제도는 제품이 생산·유통되기 이전 단계에서 재질 및 구조를 개선하여 재사용·재제조·재활용이 용이하도록 유도하는 사전 예방적 정책 수단이라는 점에서 차별성을 가진다. 즉, 제품 설계 단계에서부터 순환이용 저해요인을 제거하고 자원의 효율적 이용과 순환성을 확보하도록 유도함으로써 폐기물 발생 자체를 줄이고 자원 낭비를 예방하는 데 중점을 두고 있다.

순환경제로의 전환이 국제적 정책 기조로 확산되면서, 제품 설계 단계에서 재활용 가능성, 자원 회수 효율성, 재생원료 생산성 등을 확보하기 위한 정책의 중요성이 더욱 커지고 있다. 특히 제품의 재질 구성, 결합 방식, 분해 및 분리 용이성 등 설계 단계의 요소들은 사용 후 재활용 공정의 효율성과 재생원료의 품질을 결정하는 핵심 요인으로 작용한다. 이에 따라 제품 설계 단계에서부터 순환성을 고려하는 정책의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다.¹⁾

순환이용성 평가제도는 이러한 정책적 요구를 반영하여 「순환경제사회 전환 촉진법」 제18조(제품 등의 순환이용성 평가)에 근거하여 운영되고 있다. 제도의 목적은 제품의

순환이용성을 객관적으로 평가하고 개선이 필요한 요소를 제시함으로써 기업의 자발적인 제품 개선을 유도하고 자원의 순환이용을 촉진하는 데 있다. 이를 통해 제품 생산 단계에서부터 재활용이 용이한 구조와 재질을 적용하도록 유도하여 폐기물 발생을 최소화하고 고품질 재생원료 생산 기반을 확대하는 것을 목표로 한다.⁹⁾

순환이용성 평가는 제품의 재질 특성, 구조적 설계, 분리 및 해체 용이성, 재활용 가능성 등을 종합적으로 검토하여 수행된다. 평가 결과는 기업에게 제품 개선 방향을 제시하는 자료로 활용되며, 기업은 평가 과정에서 도출된 개선사항을 제품 설계에 반영함으로써 순환성을 향상시킬 수 있다. 특히 포장재를 포함한 다양한 제품군에서 재질 단순화, 복합재질 사용 저감, 분리배출 용이성 향상, 포장재 감량 등의 개선 사례가 나타나고 있으며, 이는 제도가 단순한 평가에 그치지 않고 실제 제품 설계 개선을 유도하는 정책수단으로 기능하고 있음을 보여준다.

2. 평가대상 제품군

순환이용성 평가제도는 제품의 사용 후 발생하는 폐기물의 재활용 가능성과 자원순환성을 높이기 위해 다양한 제품군을 대상으로 운영되고 있다. 평가대상은 국내에서 생산·가공·수입·판매되는 제품 등이며, 구체적인 평가대상 제품군은 기후에너지환경부장관이 5년마다 수립하는 「제품 등의 순환이용성 평가에 관한 계획」에 따라 선정된다. 이를 통해 자원순환 효과, 폐기물 발생량, 재활용 여건, 산업적 파급효과 등을 종합적으로 고려하여 평가대상 제품군을 체계적으로 관리하고 있다.

제도 시행 초기에는 재활용 과정에서 개선 효과가 크고 국민 생활과 밀접한 관련이 있는 제품을 중심으로 평가를 실시하였으며, 이후 대상 제품군을 점진적으로 확대하여 다양한 산업 분야의 제품에 적용하고 있다.

2018년 제도 시행 이후 평가대상 제품군은 포장재를 시작으로 생활용품과 전기·전자제품으로 단계적으로 확대되었으며, 연도별 대상 제품군은 Table 1과 같다. 포장재 분야에서는 플라스틱 음료 용기, 세정제 용기, 식품용 트레이, PVC 랩, 멸균종이팩 등 일상생활에서 대량으로 사용되고 단기간에 폐기되는 제품들이 주요 평가대상으로 선정되었다.⁹⁾ 이러한 제품은 폐기물 발생량이 많아 재질 및 구조 개선을 통한 자원순환 효과가 클 것으로 판단되기 때문이다.

생활용품 분야에서는 비데, 자전거 등 다양한 소재와 부품으로 구성된 제품을 대상으로 제품의 분해·해체 용이성, 재질 구성의 단순화 및 재활용 가능 소재의 적용 여부 등을 중점적으로 평가하였다. 또한 전기·전자제품 분야에서는 냉장고, 토너카트리지 등 회수 및 재활용 체계가 구축된 제품을 대상으로 평가를 실시하여 제품 설계 단계에서부터 자원순환성을 고려하도록 유도하였다. 이를 통해 제품군별 특

Table 1. 순환이용성 평가제도 대상 제품군
(Source : 한국환경산업기술원 홈페이지⁹⁾)

연도	제품군
2018	PET 음료용기, PET 세정제, PP.PE.PS 등 기타 단일재질 음료용기
2019	멸균 종이팩, 냉장고, 토너 카트리지
2020	비데, 자동차 부품
2021	음료용 플라스틱 용기, 전기밥솥, 에어 프라이어
2022	식품용 플라스틱 용기, 사무용 의자, 자전거
2023	기타 플라스틱 용기, 정수기, 안마의자
2024	의류 건조기, 의류관리기, 식기세척기
2025	냉난방기, 시스템에어컨, 복합기

성을 반영한 순환이용성 평가를 실시하고, 순환이용 저해요인을 개선하여 순환경제 실현에 기여할 수 있는 제품 설계를 촉진하고 있다.

3. 평가 항목

순환이용성 평가제도는 「순환경제사회 전환 촉진법 시행령」 [별표 1]에 따라 평가대상 제품의 순환경제 기여도와 자원순환성을 종합적으로 검토한다. 평가는 제품별 특성과 기술 수준을 고려하여 수행되며, 제품의 생산·유통·소비·처분 전 과정에서의 순환이용 가능성과 환경적 영향을 종합적으로 분석하는 것을 원칙으로 한다.

평가 항목은 ▲순환원료 또는 친환경 소재·공법 사용 ▲내구성 및 수리의 용이성 ▲전 과정에서의 순환이용 가능성 ▲전 과정에서의 탄소배출 영향 ▲폐기물로 되는 경우 적정 처분의 가능성 ▲폐기물로 되는 경우 중량·부피 및 재질·성분 등 총 6개 분야로 구성된다.⁷⁾

평가 과정에서는 평가대상 제품의 재질 및 구조, 순환원료 사용 현황, 재활용 가능성, 탄소배출 영향 등을 종합적으로 검토하며, 평가 결과를 바탕으로 순환이용성 향상을 위한 개선사항을 도출한다. 이후 평가대상자에 대한 의견수렴 절차를 거쳐 순환이용성 개선 권고사항을 확정·통보하게 된다.

제조사 등이 개선 권고를 이행할 경우 제품의 재질 구성 개선, 분해·해체 용이성 향상, 순환원료 사용 확대 등을 통해 제품의 순환이용성을 제고할 수 있다. 반면, 정당한 사유 없이 개선 권고를 이행하지 않는 경우에는 관련 법령에 따라 평가 결과가 인터넷 및 언론매체 등을 통해 공개될 수 있다.

포장재 개선 사례

포장재는 순환이용성 평가제도에서 가장 활발한 개선 성과가 나타난 분야 중 하나이다. 포장재는 사용 후 단기간 내 폐기되는 특성을 가지고 있으며, 생활폐기물에서 차지하

Table 2. 순환이용성 평가제도 평가 항목(Source : 「순환경제사회 전환 촉진법 시행령」 [별표1])

평가 항목	세부내용
순환원료 또는 친환경 소재·공법	•제품등의 전체 또는 부속품등에 사용된 순환원료의 종류 및 양 •제품등의 전체 또는 부속품등에 대한 순환원료 사용 가능성 •제품등의 전체 또는 부속품등에 사용된 친환경 소재의 종류 및 양 •제품등의 전체 또는 부속품등에 대한 친환경 소재 사용 가능성
내구성(耐久性) 및 수리의 용이성	•내용연수(耐用年數)와 부품 보유기간 등이 「소비자기본법」 제16조제2항에 따른 소비자분쟁해결기준에 부합하는지 여부 •재질·구조 등이 부속품등의 교체·수리에 용이한지 여부
전 과정에서 순환이용 가능성	•제품등의 전체 또는 부속품등 중 순환이용되는 비율 •제품등의 전체 또는 부속품등별 순환이용할 수 있는 방법 •순환이용되지 않고 처분되는 경우의 사유 및 개선 가능성
전 과정에서의 탄소배출 영향	•생산·유통·소비·처분 등 단계별 투입물 및 산출물의 물질 수지에 기반하여 산정 •생산·유통·소비·처분 등 단계별 탄소배출량 적정 산정 여부를 확인하고 개선 가능성
폐기물로 되는 경우 그 적정 처분의 가능성	•제품등의 전체 또는 부속품 등별 적정 처분방법 •폐기물 처분과정에서 유해물질 발생 등으로 인하여 사람의 건강이나 환경에 미치는 영향
폐기물로 되는 경우 그 중량·부피 및 재질·성분	•순환이용되는 부분 및 폐기물로 처분되는 부분의 명칭, 구조, 구성 성분, 중량·부피, 재질·성질 등

는 비중이 높아 재질 구성과 구조에 따라 재활용 효율이 크게 달라진다. 이에 따라 순환이용성 평가 과정에서는 재질 단순화, 복합재질 사용 저감, 분리배출 용이성 향상 및 포장재 감량 등의 개선이 비교적 용이하게 이루어질 수 있으며, 실제로 다양한 개선 사례가 축적되어 왔다.

본 연구는 한국환경산업기술원이 보유한 순환이용성 평가 원자료(2018~2025)를 활용하여 포장재 개선 사례를 분석하였다. 구체적으로 평가 과정에서 제시된 개선 권고사항과 개선 전·후 제품 정보를 비교분석하여 포장재의 재질 및 구조 변화 양상을 파악하고, 주요 개선 유형과 순환이용성 향상 효과를 도출하였다. 또한 이를 바탕으로 순환이용성 평가제도가 기업의 제품 설계 개선과 자원순환성 제고에 미친 영향을 분석하였다.

2018년부터 2025년까지 순환이용성 평가를 통해 개선이 이루어진 포장재 사례는 총 86개 기업, 239개 제품으로 나타났다(Table 3). 유형별로는 PET 음료 및 식품용기가 146개 제품(61.1%)으로 가장 높은 비중을 차지하였으며, PP·PE·PS 등 기타 단일재질 음료 및 식품·기타용기는 49개 제품(20.5%), 기타 포장재는 35개 제품(14.6%), PET 세정제 용기는 9개 제품(3.8%)으로 나타났다. 이는 국내에서 사용량이 많은 PET 용기를 중심으로 재질 단순화, 라벨 개선, 접착방식 개선 등 재활용성을 고려한 설계 개선이 활발하게 이루어졌음을 보여준다. 또한 다양한 포장재 유형에서 개선 사례가 확인된 것은 순환이용성 평가제도가 특정 품목에 국한되지 않고 포장재 전반의 친환경 설계와 자원순환성 향상을 유도하는 정책수단으로 기능하고 있음을 보여준다.

포장재는 순환이용성 평가제도 시행 이후 가장 다양한 개선 사례가 축적된 분야로, 재질 및 구조 개선에 따른 순환

Table 3. 순환이용성 평가제도 포장재 개선 사례 통계(자료: 한국환경산업기술원, 순환이용성 평가 원자료(2018~2025), 내부자료)

유형	기업(수)	제품(수)
계	86	239 (100.0%)
PET 음료 및 식품용기	64	146 (61.1%)
PET 세정제	3	9 (3.8%)
PP/PE/PS 등 기타 단일재질 음료 및 식품·기타용기	14	49 (20.5%)
기타 포장재	5	35 (14.6%)

이용성 향상 효과를 비교적 명확하게 확인할 수 있다는 점에서 본 연구의 주요 분석 대상으로 선정하였다. 특히 본 연구는 2018년부터 2025년까지 한국환경산업기술원에 축적된 순환이용성 평가 원자료를 체계적으로 분석함으로써, 순환이용성 평가제도의 실질적인 운영성과와 정책적 효과를 실증적으로 검토하였다는 점에서 의의를 가진다.

1. PET 음료 및 식품용기

PET 음료 및 식품용기는 순환이용성 평가를 통해 가장 다양한 개선이 이루어진 제품군 중 하나이다. 주요 개선사항은 수분리성 접착제 적용, 라벨 분리 용이 구조 도입, 무라벨 제품 확대, 용기 무색화, 경량화 및 단일재질화 등이며, 이를 통해 재활용 공정의 선별 효율을 높이고 고품질 재생원료 생산 기반을 강화하였다.

기존에는 비수분리성 접착제를 사용한 라벨이 세척 공정에서 원활하게 분리되지 않아 접착제 잔류물이 발생하고 재생원료의 품질을 저하시키는 문제가 있었다. 이를 해결하기

위해 수분리성 접착제를 적용함으로써 세척 과정에서 라벨이 쉽게 분리되도록 개선하였다.

또한 종이 라벨은 재활용 공정에서 해리되어 세척수 배출구의 폐색 등을 유발함으로써 공정 효율을 저해하는 요인으로 작용하였다. 이러한 문제를 해결하고 재활용 공정의 효율성을 높이기 위해 종이 라벨 대신 비중 1 미만의 합성수지 라벨 사용을 확대하였으며, 소비자가 손쉽게 제거할 수 있는 분리 용이 구조를 도입하였다.

용기 몸체의 무색화도 대표적인 개선 사례로 확인되었다. 유색 또는 잡색 용기가 재활용 공정에 혼입될 경우 재생원료의 색상 품질이 저하되어 고품질 재활용 제품 생산에 제약이 발생한다. 이에 따라 염료 사용을 최소화하거나 배제하여 무색 용기로 전환함으로써 재생원료의 활용성을 높였다.

이와 함께 무라벨 제품 확대와 용기 경량화를 통해 자원 사용량과 폐기물 발생량을 줄이고 환경부하 저감에도 기여하였다. 또한 이중재질 사용을 최소화하고 단일재질 PET 구조를 적용함으로써 재활용 공정의 효율성과 자원순환성을 향상시켰다. Table 4에서 보는 바와 같이 PET 음료 및 식품용기는 재질 단순화와 라벨 구조 개선을 중심으로 개선이 이루어졌으며, 포장재 개선 사례 가운데 가장 다양한 개선 유형이 확인되었다.

2. PET 세정제 용기

PET 세정제 용기는 금속부품 제거와 라벨 구조 개선을 중심으로 순환이용성이 향상된 사례로 평가된다. 주요 개선

내용으로는 라벨의 단일재질화, 수분리성 접착제 적용, 절취선 도입을 통한 박리 용이성 향상 및 리드 구조 개선 등이 있으며, 이를 통해 재활용 과정에서의 이물질 발생을 줄이고 재생원료 품질 향상에 기여하였다.

일부 제품에 사용된 금속 디스펜서는 선별 및 재활용 공정에서 이물질로 작용하여 재활용 효율을 저해하고 재생원료 품질 저하를 유발할 우려가 있었다. 이에 따라 금속부품 사용을 최소화하도록 권고하였으며, 기능상 금속 사용이 불가피한 경우에는 몸체 재질을 PP 또는 PE 등 비중 1 미만의 소재로 변경하여 비중분리 공정에서 효과적으로 제거될 수 있도록 개선하였다.

라벨 부착 방식 역시 주요 개선 대상이었다. 비수분리성 접착제를 사용할 경우 세척 공정에서 라벨 분리가 원활하지 않아 접착제 잔류물이 발생할 수 있었다. 이에 따라 열알칼리성 수분리 접착제를 적용하여 라벨이 쉽게 분리되도록 개선함으로써 재활용 공정의 효율을 향상시켰다.

용기의 무색화 또한 중요한 개선 사례로 나타났다. 유색 용기의 혼입은 재생원료의 품질 저하를 초래할 수 있으므로 무색 용기로 전환함으로써 재생원료의 활용 범위를 확대하였다. Table 5에서 보는 바와 같이 PET 세정제 용기는 금속부품 제거와 수분리성 라벨 적용이 대표적인 개선 유형으로 확인되었다.

3. PP/PE/PS 등 기타 단일재질 음료 및 식품·기타용기

기타 단일재질 음료 및 식품·기타용기는 몸체와 라벨의

Table 4. 순환이용성 평가제도 PET 음료 및 식품용기 개선 사례

(자료 : 한국환경산업기술원, 순환이용성 평가 원자료(2018~2025), 내부자료)

구분	개선 전(前)	개선 후(後)	개선내용
A기업	(몸체) 유색 불투명	(몸체) 무색 투명	•PET 몸통에 염료물질 사용금지
	(라벨) PP(도포면적 10%)	(라벨) 무라벨	•무라벨 제품 도입 (병마개 부착 라벨만 사용)
B기업	(몸체) 하늘색 투명	(몸체) 무색 투명	•PET 몸통에 염료물질 사용금지
	(라벨) 라벨 절취선 없음	(라벨) 라벨 절취선 도입	•라벨이 잘 떨어지도록 개선 (소비자 안내 문구 표시 병행)
C기업	(라벨) 종이/일반접착제 사용	(라벨) 비중 1미만의 합성수지(PP)/열알칼리성 분리 접착제 사용	•라벨이 잘 떨어지도록 개선

Table 5. 순환이용성 평가제도 PET 세정제 개선 사례(자료 : 한국환경산업기술원, 순환이용성 평가 원자료(2018~2025), 내부자료)

구분	개선 전(前)	개선 후(後)	개선내용
D기업	(마개) PP, PE, SUS	(마개) PP, PE	•펌프의 금속재질 제거
E기업	(마개) PP 외(금속스프링)	(마개) PP 외(금속스프링 제외)	•펌프의 금속재질 제거 (비중 1 미만의 합성수지 재질로 금속스프링 대체)
	(라벨) 일반접착제 사용	(라벨) 열알칼리성 분리 접착제 사용	•라벨이 잘 떨어지도록 개선
F기업	(몸체) 유색 투명	(몸체) 무색 투명	•PET 몸통에 염료물질 사용금지
	(라벨) 일반접착제 사용	(라벨) 열알칼리성 분리 접착제 사용	•라벨이 잘 떨어지도록 개선

재질 일치 및 박리 용이성 확보를 중심으로 개선이 이루어졌다. 주요 개선 내용으로는 라벨의 단일재질화, 수분리성 접착제 적용, 절취선 부여를 통한 박리 용이성 향상, 리드 구조 개선 등이 있으며, 이를 통해 이중재질 혼입을 줄이고 재활용 공정의 선별 효율을 향상시켰다.

기존에는 몸체 재질과 비중이 유사한 이중재질 라벨이나 비수분리성 접착제를 사용하는 경우 파쇄 후 선별 공정에서 몸체와 적절히 분리되지 않아 재생원료 품질 저하를 초래하였다. 이를 개선하기 위해 라벨용 접착제를 수분리성 소재로 변경하고, 라벨에 절취선을 적용하여 소비자가 쉽게 제거할 수 있도록 하였다.

또한 몸체와 동일한 재질의 라벨 사용을 확대하고, 기존 종이라벨을 용기와 동일한 재질의 합성수지 라벨로 전환함으로써 이중재질 혼입을 최소화하고 선별 효율을 높였다.

리드 구조의 개선 또한 순환성 향상에 기여한 주요 사례로 확인되었다. 기존에는 리드에 부착된 종이라벨이 재활용 공정에서 이물질로 작용할 수 있었으나, 불필요한 종이라벨을 제거함으로써 이중재질 혼입을 줄이고 재활용 공정의 효율성과 재생원료 품질 향상에 기여하였다. Table 6에서 보는 바와 같이 기타 단일재질 용기는 몸체와 동일한 재질의 라벨 적용과 수분리성 접착제 사용이 대표적인 개선 유형으로 나타났다.

4. 기타 포장재

기타 포장재에서는 제품별 특성에 따라 재질 개선과 사용량 저감을 중심으로 순환이용성이 향상된 사례가 확인되었다.

PSP 식품 트레이의 경우 유색 제품에 사용된 염료가 재생원료의 품질을 저하시켜 고품질 재활용 제품 생산을 어렵게 하는 요인으로 작용하였다. 이에 유색 트레이를 무염료 흰색 트레이로 전환하여 재생원료 품질을 개선하고 재활용 활용 범위를 확대하였다.

멸균종이팩 분야에서는 부속재질 개선을 통해 재활용성을 높였다. 기존 플라스틱 빨대와 뚜껑은 재활용 과정에서 이중재질로 작용할 수 있는 요소로 지적되었다. 이에 따라 종이 빨대 적용을 확대하고 뚜껑 소재를 개선함으로써 이중재질 사용을 줄이고 자원순환성을 향상시켰다.

PVC 랩은 재활용이 어렵고 폐기 시 환경부하가 크다는

특성을 고려하여 사용량 감축을 중심으로 개선이 이루어졌다. PVC 랩 사용을 줄이고 대체 가능한 포장재 적용을 확대함으로써 자원 사용량과 폐기물 발생량 저감에 기여하였다. 이와 같이 기타 포장재는 제품별 특성에 맞는 차별화된 개선이 이루어졌으며, 재질 개선과 사용량 저감이 공통적인 개선 방향으로 확인되었다.

ESPR 도입에 따른 시사점

1. ESPR 주요 내용

유럽연합(EU)은 2024년 「지속가능제품을 위한 에코디자인 규정(Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR)」을 마련·발효함으로써 순환경제 전환을 위한 제품 정책체계를 강화하고 있다.⁴⁾

기존 제품 환경정책이 주로 에너지 효율 향상에 초점을 두었다면, ESPR은 재활용 가능성뿐만 아니라 재사용 가능성, 수리 가능성, 내구성, 업그레이드 가능성 및 재활용원료 함유율 등 제품의 순환성을 종합적으로 고려한다는 점에서 차별성을 가진다. 이를 통해 제품 수명을 연장하고 자원 소비를 줄이며, 사용 이후에도 자원의 가치를 최대한 유지하는 순환경제 체계를 구축하고자 한다.

ESPR의 적용대상은 EU 시장에 유통되는 대부분의 물리적 제품이다. 다만 식품, 사료, 의약품, 수의약품, 식물, 동물 및 일부 생물학적 제품은 적용 제외 대상에 해당한다.⁸⁾

또한 모든 제품군에 동일한 기준을 적용하는 것이 아니라 EU 집행위원회가 수립하는 작업계획(Working Plan)에 따라 우선순위 제품군을 선정하고, 품목별 위임법령(Delegated Act)을 통해 세부 요구사항을 단계적으로 마련하고 있다.

ESPR의 핵심은 제품별 에코디자인 요구사항(Ecodesign Requirements) 도입에 있다. EU는 제품군의 특성을 고려하여 내구성, 수리 가능성, 재활용 가능성, 자원 효율성 및 환경영향 등에 관한 기준을 설정할 수 있으며, 기업은 이를 충족하는 제품만 EU 시장에 출시할 수 있다.

또한 ESPR은 디지털 제품 여권(Digital Product Passport, 이하 “DPP”)을 도입하였다. DPP는 제품에 사용된 소재, 재생원료 함유율, 수리 정보, 분해 방법 및 환경성 정보 등을 디지털 형태로 제공하는 체계로, 제품 전 생애주기에 걸

Table 6. 순환이용성 평가제도 PP/PE/PS 등 기타 단일재질 음료 및 식품·기타용기 개선 사례
(자료 : 한국환경산업기술원, 순환이용성 평가 원자료(2018~2025), 내부자료)

구분	개선 전(前)	개선 후(後)	개선내용
G기업	(몸체) PE (라벨) PP	(몸체) PE (라벨) PE	• 몸체와 동일한 재질의 라벨 사용
	(마개) HDPE(종이라벨 부착)	(마개) HDPE(종이라벨 제거)	• 마개의 종이라벨 제거
H기업	(몸체) PS (라벨) PET	(몸체) PS (라벨) PS	• 몸체와 동일한 재질의 라벨 사용
I기업	(라벨) PS /비수분리성 접착제	(라벨) PS(절취선 부여)/수분리성 접착제	• 라벨이 잘 떨어지도록 개선
J기업	(몸체) PE (라벨) 종이	(몸체) PE (라벨) PE	• 몸체와 동일한 재질의 라벨 사용

Table 7. ESPR 에코디자인 요구사항 (source : Regulation (EU) 2024/1781)⁸⁾

구분	요구사항
1	내구성(Durability)
2	신뢰성(Reliability)
3	재사용 가능성(Reusability)
4	업그레이드 가능성(Upgradability)
5	수리 가능성(Repairability)
6	유지보수 및 리퍼비시 가능성(Maintenance and Refurbishment)
7	우려물질 함유(Presence of Substances of Concern)
8	에너지 사용 및 효율성(Energy Use and Energy Efficiency)
9	물 사용 및 효율성(Water Use and Water Efficiency)
10	자원 사용 및 자원 효율성(Resource Use and Resource Efficiency)
11	재활용원료 함유율(Recycled Content)
12	재제조 가능성(Remanufacturing)
13	재활용 가능성(Recyclability)
14	자원회수 가능성(Recovery of Materials)
15	환경영향(탄소발자국 포함)(Environmental Impacts including Carbon Footprint)
16	예상 폐기물 발생(Expected Generation of Waste)

친 정보의 투명성과 추적성을 확보하는 것을 목적으로 한다. 이를 통해 제조사, 유통업체, 수리업체, 재활용업체 및 소비자 등 다양한 이해관계자가 제품 정보를 효율적으로 활용할 수 있도록 지원한다.

아울러 ESPR은 제품 라벨링과 정보 공개를 의무화하여 제품의 환경성과 순환성 정보를 시장에 투명하게 제공하도록 하고 있다. 특히 DPP와 연계된 QR코드 기반 정보 제공 체계를 통해 소비자가 제품의 내구성, 수리 가능성, 재생원료 사용 현황 및 환경영향 정보를 쉽게 확인할 수 있도록 하고 있다.

한편 ESPR은 권고 수준의 정책이 아니라 강력한 규제 체계를 기반으로 운영된다. 기업이 제품별 요구사항을 충족하지 못할 경우 해당 제품의 EU 시장 판매가 제한될 수 있으며, 시장감시기관을 통한 감독과 제재가 이루어진다. 따라서 ESPR은 제품 설계 단계에서부터 순환성과 지속가능성을 확보하도록 유도하는 대표적인 순환경제 규제로 평가된다.⁵⁾

2. 국내 제도와의 비교

순환이용성 평가제도와 EU의 ESPR은 모두 제품 설계 단계에서 순환성을 확보하고 자원효율성을 향상시키기 위한 정책수단이라는 공통점을 가진다. 두 제도 모두 제품의 환경성을 사후적으로 관리하는 방식에서 벗어나 설계 단계부터 자원순환 요소를 반영하도록 유도함으로써 순환경제 전환을 촉진하고 있다는 점에서 정책적 방향성을 공유한다. 그러나 적용 범위, 운영체계, 요구 수준 및 정보 관리 방식

에서는 상당한 차이를 보인다.

국내 순환이용성 평가제도는 제품과 포장재의 재질 구성, 구조적 특성, 분해·분리 용이성 및 재활용 가능성을 중심으로 평가를 수행하고 있다. 특히 재활용 과정에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 진단하고 개선방안을 제시함으로써 기업의 자발적인 제품 개선을 유도하는 데 중점을 두고 있다. 실제로 포장재 분야에서는 재질 단순화, 복합재질 사용 저감, 분리배출 용이성 향상 및 포장재 감량 등의 성과가 확인되고 있으며, 이는 제품 설계 단계에서 자원순환성을 고려하도록 유도하는 정책수단으로서 일정한 효과를 거두고 있음을 보여준다.

운영 측면에서 국내 제도는 정부 주도의 평가와 개선 권고를 중심으로 이루어지며, 기업과 전문가의 의견수렴을 통해 개선방안을 도출하는 거버넌스 기반 방식을 채택하고 있다. 또한 자원순환성 개선 효과가 크거나 재활용 과정에서 문제를 유발할 가능성이 높은 제품군을 중심으로 평가대상을 선정하는 위험기반 접근방식을 적용하고 있다.⁹⁾ 다만 제도는 개선 권고 중심으로 운영되고 있어 기업의 자발적 참여에 상당 부분 의존하고 있으며, 인센티브와 제재수단 역시 제한적인 수준에 머물러 있다.

반면 ESPR은 재활용성을 넘어 제품의 전 생애주기에 걸친 순환성을 관리 대상으로 설정하고 있다. 재활용성뿐만 아니라 내구성, 수리성, 재사용성, 업그레이드 가능성 및 재생원료 함량 등을 포괄적으로 고려하며, 사용단계에서의 수명연장과 사용 후 자원회수까지 정책 범위에 포함하고 있다.

운영체계 역시 규제 중심이라는 점에서 차이가 있다.

Table 8. 순환이용성 평가제도와 ESPR 비교

구분	순환이용성 평가제도	ESPR
제도 목적	제품 설계 단계에서 순환이용 저해요인 개선 및 재활용성 향상	제품 전 생애주기 관점의 지속가능성 및 순환성 확보
법적 성격	평가 및 개선 권고 중심	법적 의무 규제
적용 대상	평가계획에 따라 선정된 특정 제품군	EU 시장에 유통되는 대부분의 물리적 제품
정보 제공 체계	평가 결과 중심, 제한적 공개	DPP 및 라벨링을 통한 정보 공개 의무화
정보 관리 방식	별도 디지털 정보체계 없음	디지털 제품 여권(DPP) 운영
운영 방식	정부 평가 및 개선 권고	최소 요구 기준 설정 및 시장감시
이행 확보 수단	개선 권고, 결과 공개	시장 출시 제한, 판매 금지, 제재 부과
국제 표준 연계	제한적	ISO·EN 등 국제표준 적극 활용

Table 9. 순환이용성 평가제도와 EU ESPR 평가(요구)사항 비교

구분	ESPR	순환이용성 평가제도
1	내구성(Durability)	②내구성 및 수리의 용이성
2	신뢰성(Reliability)	-
3	재사용 가능성(Reusability)	-
4	업그레이드 가능성(Upgradability)	-
5	수리 가능성(Repairability)	②내구성 및 수리의 용이성
6	유지보수 및 리퍼비시 가능성(Maintenance and Refurbishment)	-
7	우려물질 함유(Presence of Substances of Concern)	-
8	에너지 사용 및 효율성(Energy Use and Energy Efficiency)	-
9	물 사용 및 효율성(Water Use and Water Efficiency)	-
10	자원 사용 및 자원 효율성(Resource Use and Resource Efficiency)	-
11	재활용원료 함유율(Recycled Content)	①순환원료 또는 친환경 소재·공법
12	재제조 가능성(Remanufacturing)	③전 과정에서 순환이용 가능성
13	재활용 가능성(Recyclability)	③전 과정에서 순환이용 가능성
14	자원회수 가능성(Recovery of Materials)	⑥폐기물로 되는 경우 그 중량·부피 및 재질·성분
15	환경영향(탄소발자국 포함)(Environmental Impacts including Carbon Footprint)	④전 과정에서의 탄소배출 영향
16	예상 폐기물 발생(Expected Generation of Waste)	⑤폐기물로 되는 경우 그 적정 처분의 가능성 ⑥폐기물로 되는 경우 그 중량·부피 및 재질·성분

ESPR은 EU 단일시장 차원의 통일된 기준을 적용하고 시장 감시기관을 통해 엄격한 감독과 집행을 수행한다. 특히 성능과 정보에 관한 최소 요구 기준(Minimum Requirements)을 설정하여 이를 충족하지 못하는 제품의 시장 출시를 제한할 수 있다. 또한 DPP와 제품 라벨링 제도를 통해 제품 정보를 공급망 전반에서 활용할 수 있도록 하고 있으며, 소비자에게도 다양한 환경성과 순환성 정보를 제공하고 있다.

3. 국내 제도 개선 방향

국내 순환이용성 평가제도는 제품 설계 단계에서 재활용성과 자원순환성을 고려하도록 유도하는 정책수단으로 일

정한 성과를 거두고 있다. 본 연구에서 분석한 2018년부터 2025년까지 86개 기업, 239개 제품의 포장재 개선 사례에서도 재질 단순화, 복합재질 저감, 분리배출 용이성 향상 등 기업의 실제 제품 설계 개선이 확인되어, 순환이용성 평가제도가 기업의 자발적인 친환경 설계를 유도하는 정책수단으로 기능하고 있음을 확인하였다. 그러나 ESPR과 비교할 때 법적 구속력, 정보 공개 체계 및 국제 정합성 측면에서는 추가적인 보완이 필요한 것으로 판단된다.

첫째, 개선 권고 중심의 운영 방식에서 벗어나 제도의 실효성을 단계적으로 강화할 필요가 있다. 현행 제도는 기업이 개선 권고를 이행하지 않더라도 실질적인 제재수단이 제

한적이어서 자발적 참여에 의존하는 한계가 있다. 따라서 단기적으로는 개선 권고 이행 여부에 대한 사후관리와 결과 공개를 강화하고, 중장기적으로는 주요 평가항목에 대한 최소 기준을 설정하여 행정처분, 과태료 또는 공공조달 제한 등 단계적 제재수단 도입을 검토할 필요가 있다.

둘째, 순환이용성 정보의 공개와 활용을 확대하기 위해 순환이용성 라벨링 제도와 DPP 도입을 추진할 필요가 있다. 현재 평가 결과는 주로 행정적 활용에 머물러 있어 소비자가 제품의 순환이용성을 쉽게 확인하기 어렵다. 향후에는 재활용 용이성, 재생원료 사용 여부, 분리배출 방법 및 수리 가능성 등의 정보를 소비자에게 제공할 수 있는 순환이용성 라벨링 체계를 마련하고, 중장기적으로는 QR코드 기반 DPP를 구축하여 공급망 전반에서 정보를 공유할 수 있도록 해야 한다.

셋째, 국내 순환이용성 평가제도를 ESPR 대응 기반 제도로 발전시킬 필요가 있다. ESPR은 향후 다양한 제품군에 대해 위임법령을 통해 세부 요구사항이 확대될 예정이며, 우리나라 수출기업은 이에 대응하기 위한 제품 설계 및 정보 관리 역량을 확보해야 한다. 따라서 정부는 순환이용성 평가제도를 ESPR의 에코디자인 요구사항과 단계적으로 연계하여 기업이 국내 제도를 통해 국제 규제에 선제적으로 대응할 수 있도록 지원할 필요가 있다.

넷째, 포장재는 ESPR과 별도로 「포장재 및 포장폐기물 규정(Packaging and Packaging Waste Regulation, PPWR)」의 적용을 받는다는 점을 고려할 필요가 있다. PPWR은 포장재의 재활용 성능 등급 평가, 재생원료 함량 및 안전성 검증, 포장 최적화 등 포장재에 특화된 요구사항을 규정하고 있다.⁶⁾ 따라서 국내 순환이용성 평가제도 역시 포장재 평가기준을 PPWR의 주요 요구사항과 연계하여 개선함으로써 EU 시장에 진출하는 국내 기업의 규제 대응을 지원할 필요가 있다. 특히 본 연구에서 확인된 재질 단순화, 분리용이성 확보, 재생원료 사용 확대 및 포장재 감량 등의 개선 유형은 PPWR의 정책 방향과 높은 정합성을 보이는 만큼, 향후 평가기준 개편 시 이를 적극 반영할 필요가 있다.

다섯째, 국제 표준과의 연계를 강화하여 국내 평가 결과의 활용성과 국제적 신뢰성을 높일 필요가 있다. 현재 평가 기준은 국내 재활용 여건을 중심으로 운영되고 있어 국제 표준과의 연계성이 충분하지 않은 측면이 있다. 향후 ISO, IEC, EN 등 평가체계를 국제표준과 지속적으로 정합화하고, 주요 수출 품목을 중심으로 해외 제도와의 상호인정 또는 연계 방안을 마련함으로써 국내 제도의 국제적 수용성을 제고할 필요가 있다.

종합적으로 국내 순환이용성 평가제도는 재활용성 중심의 평가에서 나아가 법적 실효성, 정보 공개성 및 국제 정합성을 강화하는 방향으로 발전할 필요가 있다. 특히 ESPR 등 국제 에코디자인 규제체계와의 연계를 강화하여 국내 기

업의 글로벌 시장 대응을 지원하고, 제품 설계 단계부터 국제 수준의 순환성과 지속가능성을 확보할 수 있는 제도적 기반을 마련해야 한다.

또한 본 연구는 2018년부터 2025년까지 축적된 순환이용성 평가 원자료를 활용하여 제도의 운영 성과를 최초로 실증 분석하고, 이를 바탕으로 EU ESPR과 연계한 국내 제도의 발전 방향을 제시하였다는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다. 향후에는 포장재뿐만 아니라 전기·전자제품, 건설자재 등 다양한 제품군으로 분석 대상을 확대하여 순환이용성 평가제도의 정책 효과를 종합적으로 검증하는 후속 연구가 이루어질 필요가 있다.

요 약

본 연구는 2018년부터 2025년까지 축적된 제품 등의 순환이용성 평가제도 운영 원자료를 활용하여 포장재 개선 사례를 실증적으로 분석하고, 제도의 운영 성과를 평가하는 한편 유럽연합(EU)의 지속가능제품을 위한 에코디자인 규정(Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR)에 대응하기 위한 국내 제도의 발전 방향을 제시하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 순환이용성 평가 과정에서 도출된 개선 권고사항과 개선 전·후 제품 정보를 분석하여 포장재의 주요 개선 유형과 순환이용성 향상 효과를 검토하였다.

분석 대상은 PET 음료 및 식품용기, PET 세정제 용기, PP·PE·PS 등 단일재질 용기, 멸균종이팩, PSP 식품 트레이 및 PVC 랩 등 다양한 포장재 제품군으로 구성하였다. 분석 결과, 수분리성 접착제 적용, 무라벨화, 무색 용기 전환, 단일재질화, 금속 및 이종재질 사용 저감, 경량화 등의 개선이 이루어졌으며, 이를 통해 재활용 공정 효율 향상과 고품질 재생원료 생산 기반 확대에 기여한 것으로 나타났다. 또한 순환이용성 평가제도는 단순한 평가를 넘어 기업의 자발적인 제품 설계 개선과 자원순환성 향상을 유도하는 정책수단으로 기능하고 있음을 확인하였다.

한편 ESPR은 재활용 가능성뿐만 아니라 내구성, 수리성, 재사용 가능성, 재활용원료 함유율 및 디지털 제품 여권(DPP) 등 제품 전 생애주기 관점의 순환성을 요구하고 있다. 이에 따라 국내 순환이용성 평가제도 역시 재활용성 중심의 평가에서 나아가 법적 실효성 강화, 순환이용성 정보 공개 확대 및 DPP 기반 정보 관리 체계 구축, ESPR 및 포장재·포장폐기물 규정(PPWR)과의 정합성 확보, 국제 표준과의 연계 강화를 통해 제품 전 생애주기의 순환성을 평가·관리하는 제도로 발전할 필요가 있다.

참고문헌

1. Cheong, J.K. and Kim, D.W. 2025. Improvement of the Circular Usability Evaluation System to Promote the Circular

- Economy. *Journal of Environmental Policy and Administration*. 33(1): 1-21.
 2. Chae, Y.G. 2026. A Study on EU Circular Economy Legislation - Focused on the Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR) -. *Korean Journal of Administrative Law*. 30: 311-357.
 3. Chae, Y.G. 2022. A Study on the Legislation for Transformation from the Linear Economy to the Circular Economy. *InHa Law Review*. 25(1): 105-140.
 4. Lee, H.Y. 2025. Corporate Response Strategies and Implications of EU Ecodesign and Energy Labeling Regulations: A Global Perspective. *Journal of European Union Studies*. 74: 99-132.
 5. Song, J.W., Yong, D.Y. and Kwak, Y.H. 2025. Enhancing the Effectiveness of 「Act on Promotion of Transition to a Circular Economy and Society」: An Analysis Based on the EU's ESPR and DPP - Focusing on the Expansion of Producer Responsibility and Information Circulation. *Environmental Law Review*. 47(3): 339-378.
 6. Kim, M.K. and Kim, J.K. 2026. A Study on Building a Sustainable Packaging Ecosystem in Response to the EU PPWR Regulation. *Korea Journal of Packaging Science and Technology*. 32(1): 7-15.
 7. 순환경제사회 전환 촉진법 시행령(대통령령)(제36161호)(20260303).
 8. Ecodesign for Sustainable Products Regulation(ESPR) (Regulation (EU) 2024/1781)(20240628).
 9. 한국환경산업기술원 홈페이지. <https://www.keiti.re.kr> (접속일: 2026.06.06.).
 10. 순환경제사회 전환 촉진법(법률)(제21381호)(20260219).
- 투고: 2026.06.06 / 심사완료: 2026.07.06 / 게재확정: 2026.07.20

COMSOL-Based Placement Design of Printed Piezoelectric Sensor Labels for Shock Monitoring in Transport Packaging

Omkar Y. Pawar¹, Siyoung Yang^{2*} and Sooman Lim^{1*}

¹Graduate School of Flexible and Printable Electronics, LANL-JBNU Engineering Institute-Korea, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

²Department of Mineral Resources and Energy Engineering, Research Institute of Energy and Mineral Resources Development, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

Abstract Printed piezoelectric sensor labels can convert package deformation into electrical signals, but their response depends strongly on where the label is attached to the package surface. In this study, a static-equivalent top-impact placement-screening method was constructed for printed PVDF/carbon nitride nanotube (CNNT) piezoelectric sensor labels on a corrugated transport package. A 200 mm × 120 mm × 100 mm package model was used, and four label regions were compared: central-edge, adjacent, side, and impact-reference positions, using the domain-averaged von Mises stress. The directly impacted label served only as a normalization reference, and results were reported as stress-transfer factors and reference-normalized voltage-equivalent indices rather than measured dynamic voltages. At 40 N, the central-edge, adjacent, and side positions reached stress-transfer factors of 0.6953, 0.6034, and 0.2434, respectively. These factors identify the central-edge region as the most suitable off-impact placement. The framework provides a reproducible way to screen sensor-label positions before dynamic drop testing and full package validation.

Keywords Printed piezoelectric sensor; PVDF/CNNT; Transport packaging; Static-equivalent analysis; Sensor placement

Introduction

Transport packaging is designed to reduce mechanical damage during stacking, sorting, loading, delivery, and storage.¹⁻⁵⁾ In parcel delivery, local impact or compression may occur at only a small region of a package, while the damaged product can remain visually hidden inside the box. This limitation has increased interest in smart packaging systems that can record or indicate handling history. Existing visual indicators and electronic loggers can provide useful information, but they may require separate batteries, bulky modules, or additional attachment processes. Thin printed sensor labels offer a different route because they can be integrated onto the package surface with limited changes to the package form factor.⁶⁾

Piezoelectric polymer sensors are attractive for such sensor-label concepts because they can generate an electrical response from mechanical deformation without an external power source.^{7,8)} Poly(vinylidene fluoride), abbreviated as PVDF, and its composites have been widely studied because their flexible film geometry is compatible with printed, laminated, or label-type devices.⁹⁻¹³⁾ The piezoelectric response of a PVDF-based label, however, is not determined by d_{33} or beta-phase fraction alone. In package-scale use, the local stress field at the attachment position also controls the mechanical input delivered to the sensor. Therefore, a material with good piezoelectric output can still produce a weak package-level signal if the label is attached to a low-stress region.

For corrugated transport boxes, sensor placement is not straightforward.¹⁴⁻¹⁷⁾ A directly impacted region gives a high signal, but the actual impact point is not known before distribution. A side-wall label may be easy to attach and read, but it may receive only a small portion of top-impact stress. A workable sensor-label design therefore needs a screening method that compares candidate positions using the same package geometry and loading condition. Finite-element analysis is useful for this purpose because it can compare stress transfer at multiple positions before fabrication and drop test-

*Corresponding Author: Siyoung Yang and Sooman Lim
Graduate School of Flexible and Printable Electronics, LANL-JBNU Engineering Institute-Korea, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea
Department of Mineral Resources and Energy Engineering, Research Institute of Energy and Mineral Resources Development, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea
Tel: +82-01-063-270-4259
E-mail: smlim@jbnu.ac.kr (S. Lim); yangsy@jbnu.ac.kr (S. Yang).

ing.^{18,19)} However, finite-element stress should not be directly reported as measured voltage unless the dynamic loading, adhesive transfer, sensor layer thickness, electrode geometry, and time-domain output are validated experimentally.

This study proposes a conservative static-equivalent placement-screening framework for a printed PVDF/carbon nitride nanotube (CNNT) piezoelectric sensor label on a corrugated transport package. The sensor material basis was taken from a previously reported PVDF/CNNT film prepared by direct ink writing,⁶⁾ while the package-scale analysis was newly organized around four label positions: central-edge, adjacent, side, and impact-reference domains. The impact-reference domain was not treated as a recommended attachment position; it was used as an internal reference for normalization. The main output of the present work is therefore not a dynamic shock voltage, but a reference-normalized voltage-equivalent index derived from domain-averaged von Mises stress. This framing allows the simulation data to support placement design while avoiding claims that require dynamic drop-test evidence.

Materials and Methods

1. Sensor-material basis and calibration separation

The printed sensor label was defined using a PVDF/CNNT composite film previously reported for piezoelectric energy conversion.⁶⁾ In that material system, the CNNT content was used to tune the phase structure and piezoelectric output of PVDF. The 7.5 wt% PVDF/CNNT composition was used as the material basis in the present placement study because it provided a higher d_{33} value than pristine PVDF and a usable flexible-film form for attachment to package surfaces.

The printed sensor labels were fabricated by the direct ink writing process reported for the same PVDF/CNNT system.⁶⁾ The CNNT filler was first obtained by thermal polycondensation of a nitrogen-rich precursor, followed by a structural transformation of graphitic carbon nitride from a two-dimensional sheet architecture to a one-dimensional nanotube architecture. A printable composite ink was then prepared by dissolving PVDF in N,N-dimethylformamide and dispersing the CNNT filler at 7.5 wt% under stirring and sonication until a homogeneous ink was obtained. The ink was extruded through a fine nozzle and deposited layer by layer onto the substrate by direct ink writing, and the shear flow during extrusion promoted beta-phase formation and dipole alignment so that a separate strong poling step was not required. After solvent evaporation and mild drying, electrodes were applied to both faces of the printed film, which was then cut and packaged into a thin flexible label suitable for attachment to a package surface. In the present placement study this fabricated PVDF/CNNT label was used only as the sensor-material basis, while the package-scale response at each candidate position was evaluated with the static-equivalent COMSOL

Table 1. Sensor-material information and calibration usage. The published dynamic output and the static-equivalent package-scale index are separated to avoid overinterpretation.

Item	Value	Unit
Pristine PVDF d_{33}	5.2	pC/N
PVDF/CNNT 7.5 wt% d_{33}	18.4	pC/N
PVDF/CNNT 7.5 wt% beta-phase	35.9	%
Published dynamic output under 40 N	ca. 12	V
Reconstructed force-voltage slope	0.2033	V/N
Reconstructed force-voltage intercept	0.2469	V
Fabricated sensor film size	30 × 30	mm
Fabricated sensor film thickness	0.06	mm

model.

The fabricated PVDF/CNNT sensor film used for label preparation had dimensions of 30 mm × 30 mm and a thickness of 0.06 mm. This dimension is reported as the fabricated film size and should be distinguished from the package-scale sensor-domain definition used in the static-equivalent COMSOL model.

The sensor-material values and package-scale indices were separated in this study. The published dynamic output of ca. 12 V under 40 N was retained as a published sensor-material output, but it was not used as the static package-scale voltage. Instead, the present package simulation used the reconstructed force-voltage relationship only to express a voltage-equivalent index after stress normalization. This separation is necessary because the finite-element result in this study is a static-equivalent stress field, whereas the published voltage was obtained from a dynamic sensor test. These sensor-material values and their calibration usage are summarized in Table 1.

2. Package geometry and sensor-position design

A corrugated transport package with external dimensions of 200 mm × 120 mm × 100 mm was used as the model geometry. The package was simplified as an equivalent continuum body in order to focus on package-level stress transfer rather than flute-scale local buckling.¹⁴⁻¹⁷⁾ The top face was loaded through a square impact pad, and four label regions were defined on the package surface. The central-edge label was placed on the top face near the central edge region, the adjacent label was placed on the top face away from the direct impact point, the side label was placed on the side wall, and the impact-reference label was placed under or near the direct loading path.

The impact-reference label was included to define the internal reference level of the package model. This position is expected to receive the highest local mechanical input under top loading, but it is not an ordinary placement candidate because the actual impact point cannot be selected in advance during parcel distribution. The off-impact positions were

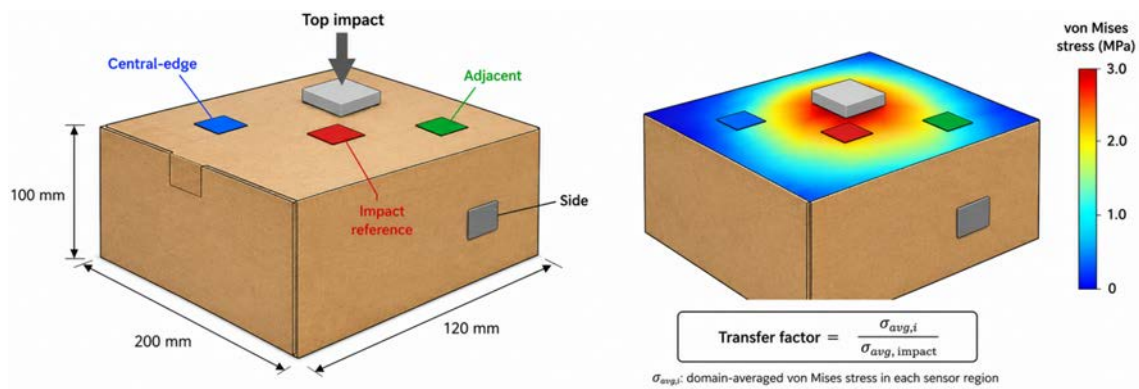


Fig. 1. Static-equivalent top-impact placement-screening framework for printed piezoelectric sensor labels on a 200 mm × 120 mm × 100 mm corrugated transport package. The central-edge, adjacent, side, and impact-reference label domains are compared using the domain-averaged von Mises stress. The impact-reference sensor is used only as a direct-stress reference.

therefore evaluated against the reference position using a stress-transfer factor. Fig. 1 illustrates the package dimensions, label locations, top-impact pad, and normalization concept.

3. Static-equivalent structural model and mesh

The structural model was built as a quasi-static top-impact problem.^{18,20)} A vertical load was applied to the top impact pad and transferred to the package surface. The lower package support was constrained to prevent rigid-body motion. The label regions were defined as surface or thin-domain regions for extracting local domain-averaged stress. The present model does not include impact duration, acceleration history, rebound, damping, adhesive viscoelasticity, or nonlinear crushing of the corrugated board. These assumptions define the work as a static-equivalent placement-screening study rather than a complete drop-impact prediction.

Mesh refinement was applied around the impact pad and label domains because these regions determine the extracted stress values. The model was used as a structured placement-screening model, not as an isolated point-stress reading. The package dimensions, equivalent wall thickness, impact pad

size, package-scale sensor-domain size, boundary condition, load condition, mesh strategy, and extracted quantity are summarized in Table 2. The retained model geometry and mesh distribution are shown in Fig. 2.

4. Domain-averaged stress and voltage-equivalent index

The mechanical response at each sensor position was summarized using the domain-averaged von Mises stress.¹⁸⁾ For the *i*-th label domain, the average stress was defined as the mean of the von Mises stress over the label region. This approach avoids the sensitivity of a single point value to mesh density or local geometric singularities.

The stress-transfer factor was calculated as the ratio of the domain-averaged stress at a label position to the domain-averaged stress at the impact-reference domain. At a load of 40 N, the effective load index was calculated as this factor multiplied by 40 N. The voltage-equivalent index was then calculated as 0.2033 times the effective load index plus 0.2469. This index should be read as a reference-normalized signal index, not as a measured voltage under package drop impact.

Table 2. Static-equivalent package model information used in the placement study

Model item	Value
Package dimensions	200 mm × 120 mm × 100 mm
Equivalent model representation	Equivalent corrugated-board continuum
Equivalent wall thickness	2 mm
Impact pad	30 mm × 30 mm square top pad; area = 900 mm
Package-scale sensor domain	20 mm × 20 mm × 0.1 mm thin domain; area = 400 mm
Fabricated sensor film/label size	30 mm × 30 mm × 0.06 mm
Sensor domains	Central-edge, adjacent, side, and impact-reference domains
Boundary condition	Lower support constrained to suppress rigid-body motion
Load condition	Static-equivalent top load of 5, 10, 20, 30, 40, and 45 N
Mesh strategy	Refined around the top pad and sensor domains
Main extracted quantity	Domain-averaged von Mises stress

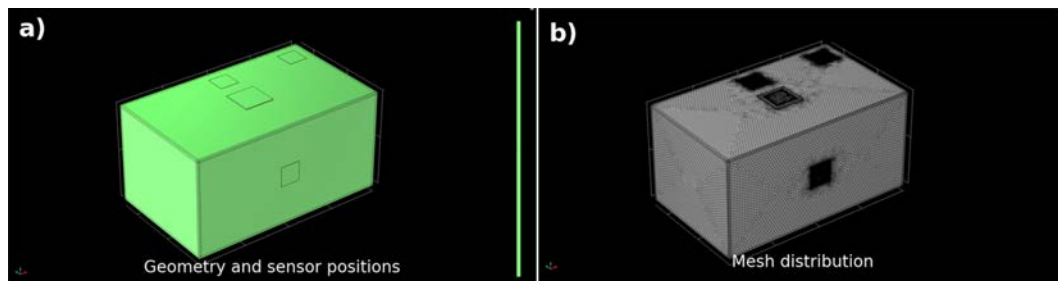


Fig. 2. COMSOL model configuration retained for reproducibility: (a) package geometry and sensor-domain positions, and (b) mesh distribution refined around the label domains and impact region. The image documents the geometry and mesh basis of the static-equivalent placement-screening model.

The index allows different label positions to be compared under one controlled structural model.

Results and Discussion

1. Placement concept and Fig. 1

Fig. 1 presents the placement-screening concept for the printed sensor labels on the transport package. The package dimensions are 200 mm in length, 120 mm in depth, and 100 mm in height, and the figure uses the domain-averaged von Mises stress as its graphical basis, consistent with the data-extraction method applied in the Results section.

The figure-driven layout is intentionally simple. The left panel shows where the four label domains are attached, while the right panel presents the stress-map concept and the reference-normalized transfer factor. This organization separates the physical package geometry from the data-reduction method. It also clarifies that the impact-reference label is not proposed as the main product sensor, but is used as the reference denominator for stress transfer.

2. Load-dependent domain-averaged stress response

The full load-dependent dataset is listed in Table 3 and plotted in Fig. 3. All four sensor regions exhibited nearly proportional increases in domain-averaged von Mises stress as the applied top load increased from 5 N to 45 N. A linear fit to each region in Fig. 3 gave a coefficient of determination of $R^2 = 1.0000$, confirming that the simulated response remained in a linear range under the present static-equivalent conditions.

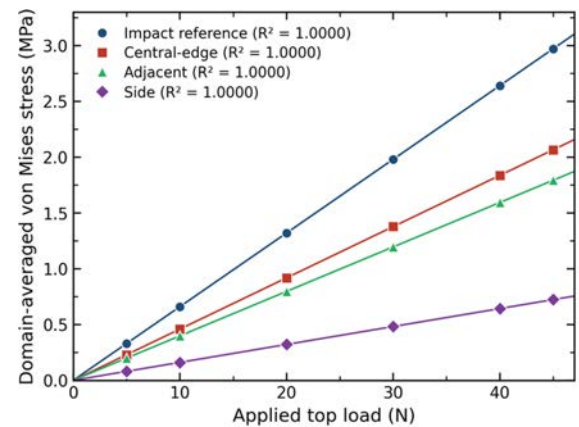


Fig. 3. Load-dependent domain-averaged von Mises stress for the central-edge, adjacent, side, and impact-reference sensor-label regions under static-equivalent top loading. Symbols are the values extracted from Table 3 and the solid lines are linear fits, giving $R^2 = 1.0000$ for all four regions.

because the same package geometry and mesh strategy were used for all label domains, the relative order of the stress response can be compared directly.

The impact-reference label carried the largest stress at every load level. At 40 N, the impact-reference domain reached 2.6407 MPa. Among the off-impact candidates, the central-edge domain recorded the largest value, 1.8362 MPa, followed by the adjacent domain at 1.5934 MPa and the side domain at 0.6428 MPa. The side label therefore received only a small portion of the top-load stress field, which is consistent

Table 3. Full domain-averaged von Mises stress dataset extracted from each sensor-label region

Load (N)	Central-edge (MPa)	Adjacent (MPa)	Side (MPa)	Impact reference (MPa)
5	0.2295	0.1992	0.0804	0.3301
10	0.4591	0.3984	0.1607	0.6602
20	0.9181	0.7967	0.3214	1.3204
30	1.3772	1.1951	0.4821	1.9805
40	1.8362	1.5934	0.6428	2.6407
45	2.0658	1.7926	0.7232	2.9708

with its position away from the loaded top surface.

3. Reference-normalized response at 40 N

The 40 N load condition was selected for direct comparison because it corresponds to the force level used in the reconstructed sensor calibration. Table 4 and Fig. 4 summarize the stress-transfer factor, effective load index, and voltage-equivalent index at this condition. The central-edge sensor had a stress-transfer factor of 0.6953, which corresponds to an effective load index of 27.81 N and a voltage-equivalent index of

5.90 V. The adjacent sensor had a stress-transfer factor of 0.6034, corresponding to 24.14 N and 5.15 V. The side sensor had a much lower transfer factor of 0.2434, corresponding to 9.74 N and 2.23 V.

The impact-reference position produced 8.38 V as a voltage-equivalent index under the same formula. The package-scale index is lower than the published dynamic output of approximately 12 V at 40 N because the two values have different meanings. The 12 V value is a dynamic sensor-material output from the original film test, whereas 8.38 V is a static-

Table 4. Reference-normalized stress transfer and voltage-equivalent index at 40 N. The impact-reference sensor is retained as a reference and is not treated as an ordinary candidate position.

Position	Avg stress at 40 N (MPa)	Transfer factor	Effective load index (N)	Voltage-equivalent index (V)	Role
Central-edge sensor	1.8362	0.6953	27.81	5.90	Best off-impact candidate
Adjacent sensor	1.5934	0.6034	24.14	5.15	Secondary off-impact candidate
Side sensor	0.6428	0.2434	9.74	2.23	Low-response side position
Impact-reference sensor	2.6407	1.0000	40.00	8.38	Direct-stress reference only

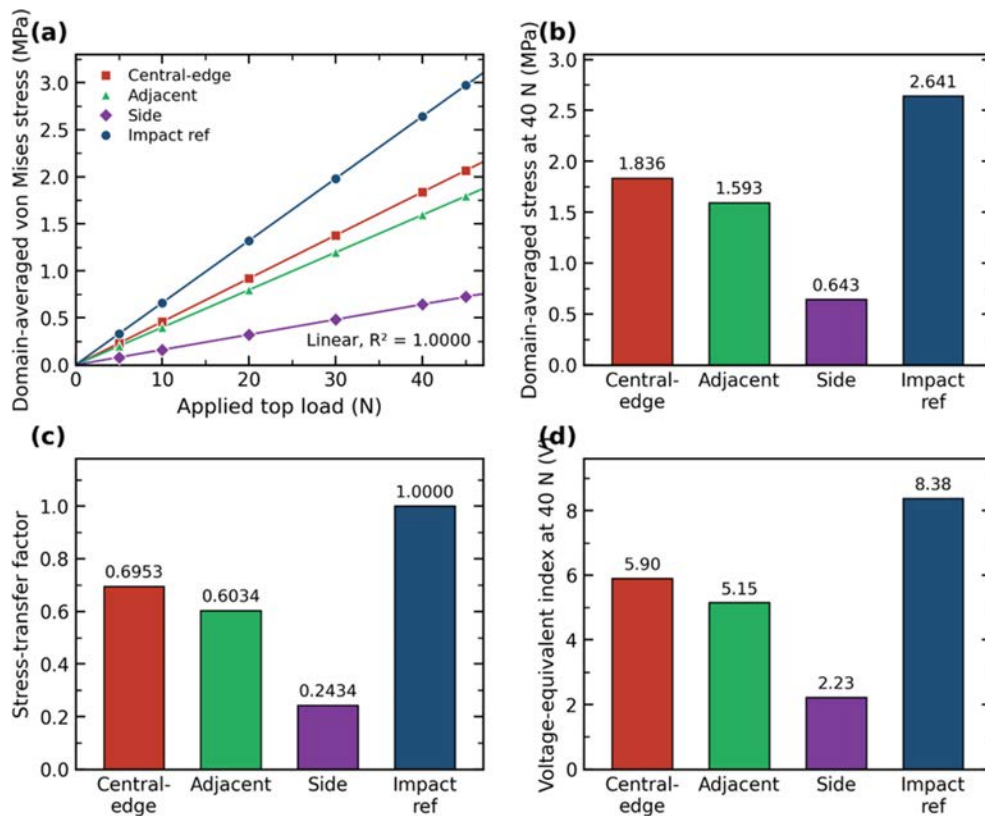


Fig. 4. Domain-averaged sensor-label response under static-equivalent top loading: (a) average von Mises stress versus applied load, (b) average stress at 40 N, (c) stress-transfer factor relative to the impact-reference domain, and (d) voltage-equivalent index calculated from the reconstructed force-voltage relation.

equivalent package-scale index reconstructed through the reference-normalized stress pathway. This study therefore avoids the term predicted voltage and uses voltage-equivalent index to reduce the risk of misinterpretation.

4. Sensor-placement implications for transport packaging

The central-edge position is the most suitable off-impact candidate under the present model. It is not directly under the impact pad, yet it retains about 69.5% of the impact-reference stress at 40 N. This position is useful for label attachment because it balances mechanical sensitivity and practical placement. The adjacent top-surface position also retains a meaningful portion of the stress field, about 60.3% of the reference value, and may be used when the central-edge region is not available because of printing, sealing, barcode, or handling requirements.

By contrast, the side position is less favorable for detecting top-impact events because its stress-transfer factor is only about 24.3% at 40 N. This does not mean that a side-mounted sensor is useless in every distribution environment. Side-wall labels may still be suitable for side compression, lateral impact, or stacking-related deformation. For the specific top-impact scenario analyzed here, however, the side wall is mechanically separated from the main top-surface stress field. A side sensor would therefore require either higher material sensitivity, a different electrode design, or placement closer to a structural edge that carries more load.

The results also explain why a direct impact-reference label should not be interpreted as the recommended sensor position. The directly loaded region gives the largest response, but parcel impacts are spatially uncertain. A real product label must be attached where it can detect likely deformation events without knowing the exact impact point in advance. For this reason, the reference position is used as a normalization standard, and the off-impact positions are evaluated as practical candidates. This interpretation gives the paper a clear design output: central-edge first, adjacent second, and side only for different loading scenarios or secondary monitoring.

5. Scope and limits of the static-equivalent index

The proposed index is intentionally limited. It does not model the time-domain waveform of a package drop, the acceleration history of a transported product, or the voltage generated by a complete sensor circuit.^{19,20} It also does not include local crushing of the corrugated flute, adhesive-layer shear lag, electrode resistance, or contact changes between the product and package wall. These factors can change the absolute voltage measured in a dynamic experiment. The voltage-equivalent index should therefore be used only to compare candidate label positions under identical model assumptions.

Even with these limits, the static-equivalent method is use-

ful at the early design stage. Dynamic drop testing of every label position is costly and time-consuming.¹⁸ A finite-element screening map can reduce the test matrix by selecting a smaller number of high-probability positions before sensor fabrication and packaging trials. For packaging research, this approach also connects printed electronics to a practical packaging problem: where a sensor label should be attached on a transport package to obtain a measurable mechanical response.

Conclusions

A static-equivalent top-impact placement-screening framework was prepared for printed PVDF/CNNT piezoelectric sensor labels on a corrugated transport package. The package dimensions were fixed at 200 mm × 120 mm × 100 mm, and four label regions were compared using domain-averaged von Mises stress. Fig. 1 and the retained COMSOL geometry and mesh image document the model geometry and data-extraction basis.

At 40 N, the central-edge, adjacent, and side positions reached stress-transfer factors of 0.6953, 0.6034, and 0.2434 relative to the impact-reference domain. The corresponding voltage-equivalent indices were 5.90, 5.15, and 2.23 V. The central-edge position was therefore selected as the best off-impact candidate for top-impact placement screening, with the adjacent top-surface position as a secondary candidate. The side position gave a lower top-impact response and should be reserved for other loading directions or secondary monitoring functions.

The present index is not a substitute for dynamic drop-test voltage measurement. It is a reproducible screening metric that can reduce the number of experimental label positions before full package validation.¹⁸ Future work should combine this static-equivalent placement result with instrumented drop tests, real printed sensor labels, adhesive-layer characterization, and package-product interaction analysis.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Government of Korea (NRF-RS-2024-00336593).

References

1. Yam, K.L. 2009. The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology. 3rd Ed. John Wiley & Sons, Hoboken, USA.
2. Soroka, W. 2014. Fundamentals of Packaging Technology. 5th Ed. Institute of Packaging Professionals, Naperville, USA.
3. Twede, D. and Selke, S.E.M. 2005. Cartons, Crates and Corrugated Board: Handbook of Paper and Wood Packaging

- Technology. DEStech Publications, Lancaster, USA.
4. Hanlon, J.F., Kelsey, R.J. and Forcinio, H. 1998. Handbook of Package Engineering. 3rd Ed. CRC Press, Boca Raton, USA.
 5. Singh, S.P., Singh, J. and Saha, K. 2015. Packaging and distribution environment considerations for e-commerce shipping. Packag. Technol. Sci. 28(8): 731-741.
 6. Pawar, O.Y., Li, H., Patil, O.A., Xu, J., Dongale, T.D., Lu, B. and Lim, S. 2025. Structural transformation of graphitic carbon nitride from 2D to 1D architectures for enhanced piezoelectric performance. Chem. Eng. J. 519: 165069.
 7. Priya, S. and Inman, D.J. 2009. Energy Harvesting Technologies. Springer, New York, USA.
 8. Wang, Z.L. and Song, J. 2006. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays. Science 312(5771): 242-246.
 9. Nalwa, H.S. 1995. Ferroelectric Polymers: Chemistry, Physics, and Applications. Marcel Dekker, New York, USA.
 10. Lovinger, A.J. 1983. Ferroelectric polymers. Science 220 (4602): 1115-1121.
 11. Martins, P., Lopes, A.C. and Lanceros-Mendez, S. 2014. Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): determination, processing and applications. Prog. Polym. Sci. 39(4): 683-706.
 12. Wu, Z., Ding, X., Chen, X., Chen, J., Chang, X., Liu, Z., Song, L., Huang, J. and Zhu, Y. 2025. Recent progress of polymer-based piezoelectric nanogenerators. Adv. Compos. Hybrid Mater. 8: 225.
 13. Ramadan, K.S., Sameoto, D. and Evoy, S. 2014. A review of piezoelectric polymers as functional materials for electro-mechanical transducers. Smart Mater. Struct. 23(3): 033001.
 14. Aboura, Z., Talbi, N., Allaoui, S. and Benzeggagh, M.L. 2004. Elastic behavior of corrugated cardboard: experiments and modeling. Compos. Struct. 63(1): 53-62.
 15. Biancolini, M.E. and Brutti, C. 2003. Numerical and experimental investigation of the strength of corrugated board packages. Packag. Technol. Sci. 16(2): 47-60.
 16. Fitas, R., Schaffrath, H.J. and Schabel, S. 2025. On the design of corrugated boards: a new FEM modeling and experimental validation. arXiv:2507.02189.
 17. FEFCO. 2024. What is corrugated? European Federation of Corrugated Board Manufacturers, Brussels, Belgium.
 18. COMSOL AB. 2024. Structural Mechanics Module User's Guide. COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
 19. ASTM International. 2019. ASTM D4169-16: Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems. ASTM International, West Conshohocken, USA.
 20. Stronge, W.J. 2000. Impact Mechanics. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

투고: 2026.06.19 / 심사완료: 2026.07.06 / 게재확정: 2026.07.09

글로벌 유통포장 정책 변화에 대응한 국내 유통포장 관리체계의 방향성 고찰

김승돈 · 권용재^{1*}

서울과학기술대학교 국방융합과학대학원 에너지환경공학과

¹서울과학기술대학교 화공생명공학과

A Review of the Directions for the Korean Distribution Packaging Management System in Response to Global Distribution Packaging Policy Changes

Seung Don Kim and Yong Chai Kwon^{1*}

*Department of Energy and Environmental Engineering, The Graduate School of National Defense Convergence Science,
Seoul National University of Science & Technology*

¹Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Abstract The rapid growth of e-commerce has increased the use of distribution packaging and diversified packaging types throughout the logistics process. However, the current Korean packaging management system primarily focuses on product packaging and has limitations in reflecting recent changes in distribution environments. This study reviewed recent changes in global distribution packaging policies and examined future directions for the domestic distribution packaging management system. Packaging policies in Korea, the European Union, the United States, and China were compared in terms of management scope, evaluation criteria, measurement methods, and management systems. The results indicate that global packaging policies are expanding from product packaging to distribution and transport packaging while emphasizing supply chain-based management, packaging optimization, reuse, and circular economy. In contrast, the Korean packaging management system remains primarily product-oriented and has limitations in accommodating diverse distribution packaging types and changes in the distribution environment. Based on these findings, this study discusses future directions for the domestic distribution packaging management system, including the expansion of the management scope to distribution packaging, the incorporation of distribution packaging characteristics into evaluation criteria and measurement methods, and the adoption of a supply chain-based management approach. This study provides fundamental information for establishing future distribution packaging policies and management strategies in Korea.

Keywords Distribution Packaging, Packaging Management System, E-commerce, Supply Chain, PPWR

서 론

1. 연구배경

전자상거래 확대와 비대면 소비 증가에 따라 물류 시스

템은 기존 오프라인 중심 구조에서 온라인 기반 배송 중심 구조로 빠르게 변화하고 있다.¹⁾ 아울러 전자상거래 기반 유통 환경에서는 배송 과정에서 제품 보호, 복수 상품 합포장 등 소비자 니즈 대응과 작업 공정 및 물류 효율 등을 위하여 다양한 형태의 유통 포장재가 사용되고 있으며, 이에 따라 배송 포장 폐기물 증가 및 과대포장 문제가 지속적으로 제기되고 있다.^{2,3)} 국내 과대포장 관리제도는 제품 포장을 중심으로 포장 공간 비율 및 포장 횟수 기준을 적용하여 포장재 원천 감량을 해왔다. 그러나 최근 전자상거래 환경에서는 제품 자체 포장 외에도 연성 포장, 복합 포장 및

*Corresponding Author: Yong Chai Kwon
Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea
Tel : +82-02-970-6805
E-mail : kwonyc@seoultech.ac.kr

다층 구조 포장 등 다양한 형태로 구성되며, 동일한 평가 기준 적용 시 공간 측정, 체적 산정, 재현성 확보 및 측정 방법 표준화 측면에서 기술적 어려움이 발생할 수 있다. 실제 유통 환경에서는 포장 형태에 따라 동일 공간 비율 기준 적용이 어려운 사례가 발생하고 있으며, 이는 기존 제품 포장 중심 규제가 유통 포장 영역으로 확장되는 과정에서 기술적 검토가 필요한 요소로 판단된다.⁴⁾ 최근 해외 주요국은 제품 포장 중심 규제에서 벗어나 유통 및 물류 단계까지 포함하는 포장 관리체제로 규제 범위를 확장하고 있다. 유럽은 포장 최소화, 공간 최적화, 재사용 및 재활용성을 중심으로 포장 규제를 강화하고 있으며, 미국은 주(state) 단위 EPR 제도의 적용을 통해 생산자의 포장 관리 책임을 강화하고 전자상거래 배송 포장을 관리 범위에 포함하는 방향으로 제도를 운영하고 있다. 또한, 중국은 전자상거래 플랫폼과 택배 기업을 중심으로 과대포장 저감, 친환경 포장재 보급, 순환 배송 포장 및 회수체계 구축을 추진하면서 유통 포장 관리체계를 공급망 중심으로 확장하고 있다. 이러한 변화는 과거 개별 제품의 포장재 재질이나 재활용성에 국한되던 관리 방식에서 벗어나, 제품의 생산부터 운송, 배송, 회수에 이르는 공급망 전 과정과 물류 환경 전반을 통합적으로 규제·관리하는 체계로 전환되고 있음을 의미한다. 이에 따라 국내 유통 포장 관리체계의 현황과 한계를 분석하고, EU, 미국 및 중국의 유통 포장 정책 변화와 관리 특성을 고찰하여 국내 유통 포장 관리체계의 방향을 제시하고자 하였다.

2. 연구방법

본 연구에서는 우리나라와 EU, 미국 및 중국의 유통포장 관련 규제와 정책을 대상으로 관리 범위, 평가 기준, 측정 방법 및 관리 주체의 네 가지 관점에서 제도적 특성과 관리 방식을 검토하였다. 분석 대상은 국내 과대포장 관리제도와 EU, 미국 및 중국의 유통포장 관련 규제 및 정책 사

례로 선정하였다. 이를 바탕으로 최근 전자상거래 확대와 배송 환경 변화에 따른 유통포장 관리체계의 전환 방향을 살펴보았다. 또한 각 국가의 유통포장 관리체계를 관리 범위, 평가 기준 및 측정 방법을 중심으로 검토하고, 유통포장 형태별 특성과 적용 가능성은 관련 선행연구를 바탕으로 보완적으로 고찰하였다. 아울러 정책 운영 주체와 관리 대상의 변화 양상을 함께 파악하여 제품포장 중심 관리체계와 유통 환경 기반 관리체계의 차이를 도출하였다. 이를 바탕으로 국내 유통포장 관리체계의 현황과 한계를 살펴보고, 해외 주요국의 정책 동향과 특성을 검토하여 향후 국내 유통포장 관리체계의 개선 방향을 제시하고자 하였다.

본 론

1. 국내 유통포장재 관리정책 현황 및 한계

1.1. 국내 포장폐기물 및 유통포장 관리체계

본 연구에서 유통 포장은 제품 생산 이후 최종 소비자에게 전달되는 전체 유통 과정에서 발생하는 포장을 의미한다. 이에 따라, 유통 포장의 범위를 제품을 판매 단위로 구성하는 제품 포장(product packaging), 물류 과정에서 적용되는 운송 포장(transport packaging), 전자상거래 등에서 소비자에게 배송하기 위해 추가되는 배송 포장(delivery packaging)을 포함하는 개념으로 정의하였다. 최근 전자상거래 확대와 공급망 변화로 포장 관리의 대상이 제품 자체에서 유통 및 배송 단계까지 다양화되고 있으며, 유통 포장에 대한 관리 필요성 또한 지속적으로 증가하고 있다. 국내 포장 폐기물 관리 정책 초기에는 폐기물 처리와 적정 처분에 중점을 두었으나, 포장 폐기물 발생량 증가와 자원 순환의 필요성이 대두되면서 발생 억제와 재활용을 포함하는 자원 순환 중심의 관리체제로 발전해 왔다.⁵⁻⁷⁾ 포장 폐기물은 사용 후 단기간 내 폐기되는 특성이 있으며, 생활 폐기물 증가와 함께 포장 폐기물 관리 필요성 역시 지속적으로 증

Table 1. Major Changes in Packaging Waste Management Policies in Korea⁵⁻⁷⁾

Year	Major Legislation/Policy	Main Contents	Policy Implications
1986	Waste Control Act	Establishment of the legal framework for waste reduction and proper waste management	Foundation of waste management policy
1992	Act on the Promotion of Saving and Recycling of Resources	Establishment of the legal framework for resource conservation and recycling	Introduction of the resource circulation policy
1993	Regulation on Standards for Packaging Materials and Packaging Methods	Introduction of packaging space ratio and number of packaging layers regulations	Prevention of excessive packaging
2003	Extended Producer Responsibility (EPR)	Introduction of producer responsibility for recycling of packaging waste	Expansion of producer responsibility
2024	Standards for Single-use Transport Packaging	Introduction of management criteria for packaging space ratio and number of packaging layers for transport packaging	Expansion of packaging management to transport packaging

가하여 왔다. 그러나 포장은 단순히 폐기물 발생원으로서만 보기 어려운 특성을 가지고 있다. 포장은 제품 보호뿐만 아니라 소비자 편의성을 제공하고, 유통 과정에서는 제품 손상을 방지하고 물류 효율성을 확보하기 위한 역할을 수행한다.¹⁾ 따라서 포장 정책은 단순한 감량만을 목적으로 하기보다 발생 억제, 재사용, 재활용 및 적정 처분을 포괄하는 자원 순환 기반의 관리체계에 기반하여 추진되고 있다. 국내 포장 폐기물 관리 정책의 주요 변화는 Table 1과 같이 정리된다.

국내 유통 포장 관련 규제는 제품 포장 단계의 과대포장을 억제하기 위해 발전해 왔으며, 주요 관리 기준으로 포장 공간 비율과 포장 횟수 기준을 적용하고 있다. 최근에는 전자상거래 배송에 사용되는 일회용 수송 포장에도 해당 기준이 도입되어 관리 대상이 일부 확대되었다. 그러나 현행 관리체계는 여전히 제품 포장을 중심으로 설계되어 있어 다양한 유통 환경과 산업별 특성을 충분히 반영하는 데 한계가 있다. 최근 시행된 「순환경제사회전환촉진법」은 자원의 효율적 이용과 순환경제사회 구현을 위해 제품의 설계, 생산, 유통, 사용 및 회수 전 과정에서 순환이용성을 높이는 것을 기본 방향으로 제시하고 있다. 이는 사용 후 재활용 중심의 기존 관리 방식에서 나아가 제품 설계 단계부터 내구성, 수리 용이성, 재사용성, 분해 용이성 및 재활용성을 고려하는 순환경제 기반 설계 개념을 반영한 것이다. 이러한 정책 변화는 포장 역시 폐기 후 재활용뿐 아니라 설계 단계부터 순환이용성을 고려해야 하는 관리 대상으로 전환되고 있음을 보여준다. 따라서 향후 유통포장 관리체계 역시 공급망을 반영한 순환경제 관점에서 검토될 필요가 있으며, 제품 전 생애주기를 고려한 관리체제로 전환되어야 한다. 국내 포장 폐기물 관리의 주요 제도는 Table 2와 같다.

1.2. 국내 유통 포장 관리체계의 구조적 한계

국내 포장 관리체계는 포장 폐기물 발생 억제 및 재활용 촉진 측면에서 일정 수준의 성과를 거두어 왔으나, 최근 전자상거래 기반 유통 환경을 충분히 반영하기에는 구조적인 한계가 지적되고 있다.^{2,4)} 첫째, 제품 포장 중심으로 설계되어 있어 유통 과정에서 발생하는 포장 증가 문제를 충분히 반영하기 어렵다.^{2,3)} 현재 국내 과대포장 규제는 「제품의 포장 재질·포장 방법에 관한 기준 등에 관한 규칙」을 기반으로 운영되고 있으며, 포장 공간 비율 및 포장 횟수 기준 역시 제품 포장을 중심으로 설정되어 있다.^{6,7)} 반면 최근 온라인 기반 유통 구조가 정착되면서 제품 판매 이후 배송 과정에서 추가적으로 발생하는 유통 포장이 증가하고 있으며, 소비자에게 직접 배송되는 거래 형태 또한 증가하고 있다.¹⁻³⁾ 둘째, 포장 공간 비율 및 포장 횟수 중심으로 운영되고 있으나, 실제 유통 환경에서는 제품 보호, 물류 효율성 및 유통 특성을 함께 고려할 필요가 있다. Oh 등의 선행연구²⁾인 택배 유통 포장 폐기물 감량화 방안 연구에서 온라인 구매 제품 131개 중 64개 제품이 포장 공간 비율 50%를 초과하는 것으로 나타났으며, 최근 증가하고 있는 연성 포장의 경우 제품 형상 및 압축 상태에 따라 공간 비율 측정 결과가 달라질 수 있어 기존 정형 포장 중심 평가 방식 적용에는 한계가 존재한다.⁴⁾ 셋째, 배송 중심 유통 환경 정착으로 유통 포장 비중이 증가하고 있음에도 불구하고, 현재 관리체계는 제조자를 중심으로 제품 생산 단계에서 적용되는 제품 포장을 관리하는 구조로 운영되고 있어, 추가적으로 발생하는 운송 포장과 배송 포장 등 유통 포장의 특성을 충분히 반영하는 데 한계가 있다. Oh 등^{2,3)}은 전자상거래 확대에 따라 유통 과정에서 발생하는 포장의 특성과 적정 유통 포장 관리의 필요성을 제시한 바 있다. 그

Table 2. Major Management Systems for Packaging Waste in Korea⁵⁻⁸⁾

Policy Area	Major System	Legal Basis	Main Management Criteria
Waste Reduction	Excessive Packaging Regulation	Resource Recycling Act; Packaging Standards Regulation	Packaging space ratio, Number of packaging layers
Reuse	Deposit Refund System for Reusable Containers	Resource Recycling Act	Promotion of reusable containers
Recycling	Extended Producer Responsibility (EPR)	Resource Recycling Act	Producer responsibility for recycling
Information Provision	Packaging Material Identification System	Resource Recycling Act	Mandatory labeling
Material Recyclability	Packaging Material and Structure Evaluation	Resource Recycling Act	Recyclability assessment
Transport Packaging	Standards for Single-use Transport Packaging	Packaging Standards Regulation	Packaging space ratio, Number of packaging layers
Circular Economy	Circular Economy Policy	Circular Economy Act	Product Circularity

Note: Resource Recycling Act = Act on the Promotion of Saving and Recycling of Resources, Packaging Standards Regulation = Regulation on Standards for Packaging Materials and Packaging Methods, Circular Economy Act = Act on Promotion of Transition to a Circular Economy Society

Table 3. Limitations of Korea's Packaging Management System¹⁻⁷⁾

Category	Current Management System	Changes in Distribution Environment	Major Limitations
Scope of Regulation	Product packaging-oriented regulation	Growth of e-commerce and transport packaging	Limited consideration of the distribution process
Evaluation Criteria	Packaging space ratio and number of packaging layers	Diversification of packaging types	Limitations of existing evaluation methods
Management Structure	Producer-oriented management system	Expansion of distribution and logistics processes	Insufficient supply chain-based management
Policy Framework	Waste reduction and recycling-oriented policy	Expansion of management areas	Limited integration of policy measures
Policy Objective	Focus on waste reduction and recycling	Increasing demand for reuse and packaging optimization	Limited circular economy approach

러나 전자상거래 기반 유통 환경에서는 제품 생산 이후 포장, 보관, 배송 및 소비자 전달 과정에서 추가적인 포장이 발생하며, 실제 유통 포장 문제는 생산 단계에 국한되지 않고 유통 및 배송을 포함한 공급망 전반과 밀접하게 연관되어 있다. 넷째, 현재 포장 정책은 발생 억제, 재활용 및 재질 관리 등을 중심으로 운영되고 있어 공급망 전반을 고려한 통합적인 관리체계로 발전하는 데에는 한계가 있다.⁵⁻⁷⁾ 따라서 향후 국내 유통 포장 정책은 기존 제품 중심 관리체계에서 벗어나 유통 환경 변화와 유통 과정에서 발생하는 포장 특성을 반영할 필요가 있으며, 제품 생산 단계뿐 아니라 유통 및 배송 과정을 포함하는 공급망 관점에서 관리체계를 검토할 필요가 있다. 최근 Oh 등²⁾의 택배 유통 포장 폐기물 감량화 방안 연구에서도 택배 유통 포장 폐기물 발생을 최소화하기 위한 가이드라인을 제시하고 있다. 현행 국내 포장 관리체계의 한계는 Table 3과 같이 요약된다.

우리나라는 「자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률」을 기반으로 포장 공간 비율 및 포장 횟수 관리제도를 운영하고 있으며, 제품 포장 단계의 과대포장 억제를 위한 관리체계를 구축하고 있다. 특히 제품군별 포장 공간 비율 기준을 설정하고 정기적인 점검 및 단속을 실시하고 있다. 제품 포장에 대한 정량적 기준과 상시 관리체계를 갖추고 있다는 점은 국내 제도의 강점이다. 다만, 현행 관리체계는 제조 단계의 제품 포장을 중심으로 운영되고 있어 판매, 물류 및 배송 과정에서 추가적으로 발생하는 유통 포장을 충분히 관리하는 데에는 한계가 있다. 유통 포장은 제품 생산 단계뿐 아니라 물류·배송 과정에서도 발생하므로, 이를 효과적으로 관리하기 위해서는 생산과 유통·배송을 함께 고려하는 공급망 관점의 접근이 필요하다. 반면 EU PPWR은 제품 포장뿐만 아니라 유통 포장, 운송 포장 및 재사용 포장까지 관리 대상에 포함하고 있으며, 공급망 전반을 고려한 포장 최적화를 지향한다는 점에서 차이가 있다. 이에 따라 해외 주요국의 유통 포장 정책과 관리체계를 검토하여 향후 국내 유통 포장 관리체계의 방향을 제시하고자 한다.

2. 글로벌 유통포장 정책 변화 동향

2.1. 글로벌 유통포장 정책 변화의 특징

글로벌 포장 정책은 기존의 제품 포장 중심 관리에서 벗어나 공급망 전반을 고려하는 관리체계로 전환되고 있으며, 관리 대상 역시 운송 포장, 전자상거래 포장 및 배송 포장을 포함하는 방향으로 적용되고 있다.⁹⁾ 이와 함께 정책의 관리 방식도 단순한 포장재 감량에서 벗어나 포장 최적화, 재사용 확대, 공급망 기반 관리 및 데이터 기반 운영체계 구축을 중심으로 변화하고 있다.¹⁰⁻¹³⁾

2.2. EU 유통포장 정책 변화

EU는 포장 및 포장 폐기물 규정(Packaging and Packaging Waste Regulation, PPWR)을 중심으로 기존 포장 관리체계를 전면적으로 개편하고 있다.¹⁰⁾ 기존 EU 포장 정책은 「포장 및 포장 폐기물 지침(Packaging and Packaging Waste Directive, PPWD)」을 기반으로 운영되어 왔으나, 회원국별 상이한 규제 적용과 재활용 성과 차이 등으로 인해 통합적 관리 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 이에 따라 EU는 기존 지침(Directive) 기반 체계에서 규정(Regulation) 기반 관리체계로 전환하고 회원국 간 일관된 관리체계를 구축하고 있다. 이러한 변화는 단순 규제 강화보다 회원국 간 상이한 관리체계를 최소화하고 포장 설계부터 생산, 유통 및 폐기 단계까지 보다 통합적으로 관리하려는 변화로 볼 수 있다.^{10,13)} EU 포장 정책 변화에서 가장 주목할 점은 관리 대상과 범위가 제품 중심에서 포장 전 주기 관리체계로 다양화되고 있다는 점이다. 기존 포장 정책이 폐기물 발생 억제와 재활용 확대를 중심으로 운영되어 왔다면, PPWR은 포장 설계부터 생산, 유통, 소비 및 폐기에 이르는 전 주기를 관리 대상으로 설정하고 있다.^{9,10)} 이러한 변화는 제품 자체뿐 아니라 유통 과정에서 발생하는 환경 영향을 함께 고려하는 방향으로 정책 범위를 강화하였음을 의미한다. 이에 따라 PPWR은 포장 최소화(packaging minimization)를 핵심 원칙으로 제시하고, 불필요한 포장의 제한, 과도한 빈 공간(empty space)의 최소화 및 운송 포장 최적

Table 4. Changes in the EU Packaging Management System Based on PPWR¹⁰⁻¹³⁾

Category	PPWD-based Management System	PPWR-based Management System	Major Changes
Policy Objective	Waste reduction and recycling	Circular economy-based packaging optimization	From waste reduction to life-cycle optimization
Scope of Management	Product packaging	Product packaging → Distribution packaging	Expansion of distribution packaging management
Management Stage	Production and disposal	Design-Production-Distribution -Consumption-Disposal	Expansion of life-cycle management
Management Approach	Overpackaging control and recycling	Packaging minimization and Empty space management	Strengthened design-stage management
Reuse Management	Limited application	Expansion of reuse targets and reuse systems	Expansion of reuse management
Recycling Management	Recycling-oriented	Expansion of recyclability and PCR	Strengthened recycling quality management
Information Management	Limited information provision	DPP-based information management and traceability	Data-driven management
Management Entity	Producer-oriented	Expansion of supply chain participation	Expansion of supply chain-based management

화를 통해 포장 설계 단계에서부터 자원 사용을 최소화하도록 규정하고 있다.¹⁰⁾ 아울러 EU는 단순한 재활용 확대를 넘어 재활용성(recyclability), 재사용(reuse), 재생 원료(Post-Consumer Recycled, PCR) 사용 확대를 함께 추진하고 있으며, 디지털 제품 여권(Digital Product Passport, DPP)을 기반으로 포장 정보의 관리와 공급망 전반의 추적성을 강화하고 있다.¹⁰⁾ 이러한 정책 변화는 생산자 중심의 폐기물 관리에서 벗어나 포장 전 주기의 자원 순환과 공급망 참여를 강화하는 관리체제로 전환되고 있음을 보여준다.^{9,10)} 결과적으로 최근 EU 포장 정책은 포장 전 주기에서 발생하는 환경 영향을 최소화하고, 포장 최적화와 순환경제 구현을 중심으로 발전하고 있다. 또한 재사용 확대, 재활용성 향상, PCR 사용 및 DPP를 활용한 정보 관리체계를 구축함으로써 지속 가능한 포장 생태계 조성을 추진하고 있다.^{9,12)} 이러한 변화는 국내 포장 산업 역시 재활용성 향상, 재생 원료 활용 및 순환경제 기반의 포장 관리체계 구축에 대응할 필요가 있음을 시사하며, 최근 국내에서도 PPWR에 대응하기 위한 지속 가능한 포장 생태계 구축의 필요성이 제기되고 있다.⁹⁾ PPWR을 중심으로 한 EU 포장 관리체계의 주요 변화는 Table 4와 같다.

2.3. 미국 유통포장 정책 변화

미국의 포장 정책은 EU와 같이 연방 차원의 단일 포장 규제를 중심으로 운영되기보다 연방정부, 주정부 및 민간 시장이 함께 관리체계를 형성하는 구조를 가지고 있다. 따라서 미국 포장 정책 변화는 단일 규제 강화보다 생산자 책임 강화와 유통 환경 변화에 대응하기 위한 관리체계 변

화로 이해할 필요가 있다. 미국 연방정부 차원에서는 EU와 같은 통합 포장 규제 체계가 운영되고 있지 않으며, 포장 관련 제도는 주정부 단위의 생산자 책임 재활용 제도(Extended Producer Responsibility, EPR)를 중심으로 운영되고 있다. 한편 전자상거래 확대와 함께 배송 포장 사용량이 증가함에 따라 민간 플랫폼을 중심으로 포장 관리 활동도 강화되고 있다. 대표적으로 Amazon은 Frustration-Free Packaging(FFP) 프로그램을 통하여 제품 보호 수준을 유지하면서 배송 포장 감축과 공급망 효율화를 추진하고 있다.¹⁴⁾ 한편 일부 주정부에서는 포장재 및 종이제품 생산자에게 재활용 시스템 운영 비용 부담, 데이터 보고 및 프로그램 참여 의무를 부여하고 있으며, 생산자는 생산자책임기구(Producer Responsibility Organization, PRO)를 통하여 프로그램 운영에 참여하도록 하고 있다. 대표적으로 콜로라도 주의 「HB22-1355 (Producer Responsibility Program for Statewide Recycling Act)」, 캘리포니아의 「SB54 (Plastic Pollution Prevention and Packaging Producer Responsibility Act)」 및 오리건주의 「SB582 (Recycling Modernization Act)」는 생산자의 책임 범위를 회수·선별·재활용 단계까지 적용하며 재활용 시스템 운영과 비용 부담을 강화하는 것을 주요 내용으로 하고 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 이러한 변화는 미국 포장 정책이 단순한 포장재 관리에서 벗어나 생산자 책임 강화와 공급망 중심의 포장 관리를 강화하는 방향으로 발전하고 있으며, 전자상거래 기반 유통 환경 변화에 대응하고 있음을 보여준다. 결과적으로 미국 포장 정책은 제품 중심의 포장 관리에서 생산자 책임을 강화하고 공급망 전반으로 관리 범위를 확장하는 방향으로 변화하고 있으며, 이는 전자

Table 5. Major Characteristics of Packaging Policy Changes in the United States¹⁴⁻¹⁷⁾

Category	Conventional Approach	Recent Changes	Related Regulations and Cases
Management System	Waste reduction and recycling	Expansion of producer responsibility-based management	Colorado HB22-1355, California SB54
Management Target	Waste-oriented management	Expansion to packaging and paper products	Colorado HB22-1355
Cost Responsibility	Government and local authority responsibility	Expansion of producer cost responsibility	Colorado HB22-1355, Oregon SB582
Management Scope	Collection and recycling	Expansion to collection–sorting–recycling stages	EPR programs
Distribution Packaging Management	Limited management	Packaging optimization and delivery efficiency improvement	Amazon FFP
Supply Chain Perspective	Limited application	Expansion of distribution and delivery stage management	Amazon FFP

상거래 기반 유통 환경에 대응하는 대표적인 정책 방향으로 평가된다. 미국 포장 정책 변화의 주요 특징은 Table 5와 같이 정리된다.

2.4. 중국 유통포장 정책 변화

중국은 세계 최대 규모의 온라인 소비시장을 형성하고 있으며, 2024년 전국 온라인 소매액은 약 15조 5,225억 위안으로 전년 대비 7.2% 증가하였다. 이 가운데 실물상품 온라인 소매액은 약 13조 816억 위안으로 전체 사회소비품 소매총액의 26.8%를 차지하였다.¹⁸⁾ 같은 해 중국의 택배 업무량은 약 1,745억 건, 택배 업무 수입은 약 1.4조 위안으로 각각 전년 대비 21%와 13% 증가하였다.¹⁹⁾ 이러한 시장 변화는 전자상거래 기반 유통 포장과 택배 포장이 기존 제품 포장과는 다른 관리체계를 요구하는 배경으로 작용하고 있다. 특히 중국의 전자상거래는 단순한 온라인 판매를 넘어 제조, 판매, 물류 및 배송이 플랫폼을 중심으로 유기적으로 연계되는 특징을 보인다. 최근에는 라이브 커머스 and 콘텐츠 기반 커머스가 빠르게 성장하고 있으며, 2024년 기준 중국의 라이브 커머스 이용자는 약 8억 3,300만 명에 달하는 것으로 나타났다.²⁰⁾ Douyin(抖音)과 같은 콘텐츠 기반 전자상거래의 성장과 함께 글로벌 직배송 기반 유통이 빠르게 확산되면서 중국에서 생산된 제품이 해외 소비자에게 직접 배송되는 유통 방식도 보편화되고 있다. 이에 따라 제품 생산 단계뿐 아니라 주문, 집하, 분류, 운송 및 최종 배송에 이르는 전 과정에서 유통 포장 사용이 증가하고 있으며, 중국의 포장 정책도 이러한 변화에 대응하는 방향으로 발전하고 있다. 이러한 변화에 대응하여 중국은 제품 포장 중심 관리에서 택배 포장 및 전자상거래 포장 관리로 정책 범위를 전환하고 있으며, 「邮件快件包装管理办法(택배 포장 관리 방법)」²¹⁾은 택배 포장 감량, 친

환경 포장 보급 및 포장 표준화를 주요 정책 방향으로 제시하고 있다. 이와 함께 SB/T 11266-2026 「电子商务绿色包装技术和管理要求(전자상거래 녹색 포장 기술 및 관리 요구사항)」²²⁾는 전자상거래 분야의 녹색 포장 기술과 관리 요구사항을 제시함으로써 전자상거래 기반 유통 포장 관리 체계를 구체화하고 있다. 아울러 중국은 순환경제 정책과 연계하여 순환 포장 보급도 적극 추진하고 있다. 「“十四五”循环经济发展规划(14차 5개년 순환경제 발전계획)」²³⁾은 자원 순환 체계 구축과 순환 포장 활성화를 주요 정책 방향으로 제시하고 있으며, GB/T 43283-2023 「快递循环包装箱(택배 순환 포장상자)」²⁴⁾는 반복 사용이 가능한 택배 순환 포장 상자의 기술적 요구사항을 표준화하고 있다. 한편 중국 포장 정책의 또 다른 특징은 정부의 제도적 관리와 전자상거래 플랫폼 중심의 실행체계가 연계되어 운영된다는 점이다. 중국의 전자상거래는 플랫폼을 중심으로 유통 구조가 형성되어 있어 포장 감량과 순환 포장 활성화는 정부의 제도만으로 추진하기 어렵고, 주요 전자상거래 및 물류 기업의 참여가 필수적이다. 이에 따라 주요 전자상거래 및 물류 기업들은 포장 감량, 친환경 포장 및 순환 포장 활성화를 운영체계에 반영하고 있으며, 정책과 산업계가 협력하는 유통 포장 관리체계를 구축하고 있다. 결과적으로 중국 포장 정책은 제품 중심 관리에서 택배 및 유통 단계 관리로 범위를 확장하고, 순환경제 정책과 플랫폼 중심 운영체계를 결합한 관리 방식을 운영하고 있다는 점에서 다른 국가와 차별화된다. 이는 국내 유통 포장 관리체계 개선에 중요한 시사점을 제공한다. 중국 포장 정책 변화의 구조적 특징은 Table 6과 같다.

2.5. 글로벌 유통포장 규제 비교 분석

Table 7과 같이 각국은 운영 방식과 제도적 기반에는 차

Table 6. Structural Characteristics of Changes in China's Packaging Policy¹⁸⁻²⁵⁾

Category	Conventional Structure	Recent Changes	Related Regulations and Cases
Management Target	Product packaging	Expansion to parcel and e-commerce packaging	Measures for the Administration of Mail and Express Packaging
Management Scope	Production and disposal	Expansion to distribution and delivery stages	Parcel packaging management system
Distribution Structure	Conventional distribution channels	Expansion of platform-based distribution	Douyin, cross-border e-commerce
Packaging Management Approach	Packaging reduction	Expansion of parcel packaging reduction and standardization	Measures for the Administration of Mail and Express Packaging
Circular Economy System	Recycling-oriented	Expansion of reusable and returnable packaging	14th Five-Year Plan for Circular Economy Development, GB/T 43283-2023
Policy Implementation Structure	Government regulation-oriented	Expansion of government policy and supply chain operation	Reusable packaging programs by logistics companies
Policy Direction	Product-oriented management	Expansion of supply chain-based management	Circular economy policy and e-commerce packaging standards

Table 7. Comparison of Major Characteristics of Global Distribution Packaging Policy¹⁰⁻²⁵⁾

Category	Korea	EU	United States	China
Policy Background	Excessive packaging regulation	Circular economy regulation	Producer responsibility expansion	E-commerce market growth
Management Scope	Product packaging	Life-cycle packaging	Producer responsibility	Distribution packaging
Distribution Packaging Management	Outside management scope	Transport packaging management	Platform-based optimization	Parcel packaging management
Supply Chain Perspective	Producer-centered	Supply chain-based	Producer responsibility	Platform participation
Circular Economy System	Recycling-focused	Reuse and recycling	Recycling-focused	Reusable packaging
Operational Structure	Regulatory management	Regulatory management	EPR-based management	Government–platform cooperation
Major Characteristics	Packaging standards and inspection	Life-cycle optimization	Producer responsibility and market mechanisms	E-commerce-based packaging management

이를 보이지만, 관리 범위·평가 기준·관리 주체 측면에서 유사한 방향의 변화를 보인다. EU는 PPWR을 중심으로 포장 전 주기 관리체계를 구축하고 있으며, 미국은 주정부 단위의 EPR 제도와 시장 기반 운영을 통해 생산자 책임을 강화하고 있다. 또한 중국은 택배 포장 관리제도, 순환경제 정책 및 플랫폼 기반 운영체계를 중심으로 전자상거래 확대와 유통 구조 변화에 대응하고 있다. 이러한 정책 변화는 포장 관리의 범위가 제품 단계에서 유통 및 공급망 전반으로 확장되고 있음을 보여준다. 이와 함께 Table 8은 주요 국가별 유통 포장 정책을 적용 범위, 관리 기준, 포장 형태 및 공급망 관점에서 비교한 결과를 제시한다. 비교 결과, 국가별 제도 운영 방식과 정책 수단에는 차이가 있으나, 최근 글로벌 유통 포장 정책은 공통적으로 유통 및 배송 단계를 고려한 포장 최적화와 순환 관리체계 구축을 강화하

고 있는 것으로 나타났다.

유통 포장 사용이 제품 생산 단계뿐 아니라 유통 및 배송 과정 전반에서 증가함에 따라, 주요 국가는 운송 포장·배송 포장·전자상거래 포장을 관리 범위에 포함하고 있다. 또한 포장 정책은 단순한 포장재 감량과 재활용 중심 관리에서 벗어나 포장 최적화, 재사용 확대 및 순환경제 기반 관리체계를 강화하는 방향으로 발전하고 있다.

2.6. 국내 유통포장 관리체계에 대한 시사점

이러한 국제적 흐름은 국내 유통 포장 정책에도 유통 환경과 공급망 구조를 반영한 재검토가 필요함을 시사한다. 전자상거래의 확산과 국가 간 직구, 글로벌 플랫폼 기반 판매 및 해외 직접 배송의 증가로 소비자는 국가와 관계없이 제품을 구매하고 배송 받는 환경으로 이동하고 있다. 이에

Table 8. Comparison of Management Approaches for Global Distribution Packaging Policies⁵⁻²⁵⁾

Category	EU	United States	China	Implications for Korea
Management Target	Product packaging, transport packaging, and e-commerce packaging	Packaging, delivery packaging, and producer responsibility packaging	Parcel packaging, e-commerce packaging, and reusable packaging	Expansion of management scope to distribution and delivery packaging
Policy Objective	Packaging minimization and circular economy	Expansion of producer responsibility and logistics efficiency	E-commerce adaptation and parcel packaging reduction	Review of the product-oriented management system
Management Criteria	Packaging minimization and empty space limitation	Packaging efficiency and recycling	Packaging reduction and standardization	Review of the applicability of space ratio-based criteria
Major Packaging Types	Transport packaging, grouped packaging, and reusable packaging	Delivery packaging	Parcel packaging and reusable packaging	Reflection of diverse distribution packaging types
Evaluation and Management Approach	Design optimization and life-cycle management	Supply chain efficiency and operational management	Standard-based management and platform operation	Development of evaluation methods reflecting distribution packaging characteristics
Supply Chain Perspective	Life-cycle management from production to disposal	Producer responsibility-based operation	Expanded participation of platforms and logistics companies	Expansion of supply chain-based management
Circular Economy System	Expansion of reuse and PCR	Recycling-oriented operation	Expansion of reusable and returnable packaging	Review of reuse systems

따라 포장은 제품 생산 단계뿐 아니라 유통·배송 전 과정에서 이루어지고 있어, 제품 중심의 기존 관리체계만으로는 유통 포장의 특성을 충분히 반영하기 어렵다. 반면 글로벌 포장 정책은 단순 감량을 넘어 포장 최적화와 재사용 확대, 순환경제 기반 관리로 발전하면서 다양한 포장 형태와 공급망 운영 환경을 포괄하고 있으며, 관리 주체 또한 생산자에서 플랫폼·유통 사업자·물류 기업 등 공급망 참여 주체로 확대되고 있다. 따라서 향후 국내 유통 포장 정책은 제품 중심 관리에서 벗어나 관리 범위, 평가 기준 및 측정 방법을 유통 환경과 공급망 구조에 맞추어 재정비할 필요가 있다. 이 과정에서 공급망 참여 주체의 역할을 함께 반영하고 포장 최적화와 재사용을 포함한 순환경제 기반 관리 방안을 마련한다면, 유통 포장의 특성을 실질적으로 반영하는 관리체계를 구축할 수 있을 것이다.

3. 유통환경 변화에 따른 국내 유통포장 관리 방향

3.1. 유통환경 변화를 반영한 관리 범위 검토

온라인 기반 유통 환경이 다양화되면서 유통 구조는 제품 생산과 판매 중심에서 주문, 집하, 운송, 배송 및 최종 소비자 전달까지 포함하는 공급망 중심으로 변화하고 있다.

전자상거래 기반 유통 환경에서는 제품 보호를 위한 제품 포장뿐 아니라 운송 및 배송 과정에서 추가 유통 포장이 발생하고 있다. 최근에는 다중 포장, 택배 포장, 연성 포장 및 배송용 외포장 등 다양한 유통 포장이 증가하고 있으며, 실제 포장 사용은 제품 생산 단계보다 유통 및 배송 과정에서 더 크게 나타나는 경향이 있다.^{2,3)} 그러나 현재 국내 포장 관리체계는 제품 판매 단계에서 발생하는 제품 포장을 중심으로 운영되고 있어 유통 과정에서 발생하는 택배 포장, 배송 포장 및 다중 포장 등에 대한 관리 범위는 제한적이다.⁵⁻⁷⁾ 전자상거래 기반 유통 환경에서는 동일 제품이라도 판매 채널, 배송 방식 및 물류 구조에 따라 실제 포장 형태와 사용량이 달라질 수 있으며, 유통 및 배송 과정에서 추가 포장 역시 증가하고 있다.¹⁻³⁾ 이는 기존 제품 중심 관리체계만으로는 변화하는 유통 환경에서 발생하는 유통 포장 특성을 충분히 반영하기 어렵다는 점을 보여준다. 더불어 글로벌 유통 포장 정책은 기존 제품 중심 관리에서 유통 및 공급망 기반 관리로 확장되고 있으며, 실제 포장 사용과 환경 영향도 제품 생산 단계보다 유통 및 배송 단계에서 더욱 중요하게 고려되고 있다.⁹⁾ EU는 운송 포장 및 전자상거래 포장까지 관리 범위에 포함하고 있으며,^{9,10)} 미국은 플랫폼 기반 배송 포장 최적화와 생산자 책

임 강화로 변화하고 있다.^{14,17)} 또한 중국은 택배 포장 및 전자상거래 포장 관리를 적용하고, 순환경제 정책과 전자상거래 포장 표준을 지속적으로 보완하고 있다.^{18,19,21-24)} 이는 유통 포장 관리가 제품 자체보다 실제 포장 사용이 발생하는 과정과 구조를 함께 고려하는 방향으로 변화하고 있음을 보여준다. 앞서 2장에서 살펴본 바와 같이 EU·미국·중국 등 주요국의 포장 정책 또한 관리 대상을 제품 단계에서 유통 및 배송 단계로 확장하고 있어, 유통 포장 관리가 실제 포장 사용이 발생하는 과정과 구조를 함께 고려하는 방향으로 변화하고 있다. 그러나 연성 포장은 제품 형상, 압축 상태 및 포장 구조에 따라 공간 측정 결과가 달라질 수 있어, 정형 제품 포장을 전제로 한 기존 기준을 동일하게 적용할 경우 측정 재현성과 적용 가능성 측면에서 한계가 발생할 수 있다.⁴⁾ 따라서 향후 국내 유통 포장 관리체계는 유통 환경과 다양한 유통 포장 형태를 반영할 수 있도록 관리 범위, 평가 기준 및 측정 방법을 함께 검토할 필요가 있다. 또한 실제 포장 사용이 발생하는 유통 및 배송 단계를 고려하는 관리체계로 전환할 필요가 있다.

3.2. 유통포장 형태를 고려한 평가기준 및 측정방법 검토

유통 환경 변화와 함께 유통 포장 형태도 다양해지고 있어 기존 제품 포장 중심의 관리 기준만으로는 변화한 물류 및 배송 구조를 충분히 반영하기 어렵다. 최근 전자상거래 기반 배송 구조에서는 연성 포장, 배송 포장, 복합 포장 및 전자상거래 포장 등 다양한 유통 포장이 증가하고 있으며, 동일 제품이라도 유통 구조와 배송 방식에 따라 실제 포장 형태와 사용량이 달라질 수 있다. 국내 포장 관리체계는 포장 공간 비율과 포장 횟수를 중심으로 운영되어 왔으며, 평가 기준도 상대적으로 정형화된 제품 포장을 대상으로 구축되었다.⁵⁻⁷⁾ 그러나 연성 포장, 배송 포장 및 복합 포장은

포장 구조와 측정 조건에 따라 평가 결과가 달라질 수 있어 기존 평가 기준을 적용하는 데 한계가 있다. 연성 포장은 형태 변화와 압축 상태에 따라 공간 산정 결과가 달라질 수 있으며, 배송 포장과 복합 포장은 제품 포장 외 추가 포장을 포함하므로 실제 유통 환경을 충분히 반영하기 어렵다.⁴⁾ Suh & Oh 등의 선행연구¹⁻⁴⁾에서도 전자상거래 확대에 따른 유통 포장 사용 증가, 포장 형태의 다양화 및 기존 제품 포장 중심 평가 기준의 한계가 지속적으로 제기되었다. 이에 따라 실제 유통 환경을 반영한 Field-to-Lab 기반 평가와 운송 시험 기반 평가 방법의 적용 필요성이 제시되고 있다.²⁶⁾ 또한 최근 연구에서는 전자상거래 기반 재사용 순환 물류 포장의 적용 가능성도 논의되고 있다.²⁷⁾ Table 9는 유통 포장 형태별 특성과 기존 평가 기준의 적용 가능성을 비교한 결과를 제시한다. 정형 포장은 기존 평가 기준의 적용 가능성이 상대적으로 높았으나, 연성 포장, 배송 포장 및 복합 포장은 포장 구조와 측정 조건에 따라 평가 결과가 달라질 수 있어 측정 방법과 평가 기준의 개선이 필요한 것으로 나타났다.

EU는 Packaging minimization 및 Empty space 관리를 중심으로 운송포장 및 전자상거래 포장 관리 범위를 포함하고 있으며¹⁰⁾, 미국은 배송 효율 및 공급망 운영 효율 중심으로 접근하고 있다.^{14,17)} 또한 중국은 택배포장 표준화 및 순환포장 적용을 추진하고 있으며^{23,24)}, 이는 유통포장 관리가 단순 감량 중심 접근보다 실제 유통환경과 포장 사용 특성을 함께 고려하는 방향으로 변화하고 있음을 보여준다. 따라서 향후 국내 유통포장 관리기준 역시 기존 제품 포장 중심 평가기준을 기반으로 하되, 유통환경과 다양한 포장 구조를 반영할 수 있는 방향으로 검토될 필요가 있다. 향후 유통포장 관리체계는 단순 포장재 감량뿐 아니라 실제 유통환경에서의 포장 사용 특성, 물류 효율 및 측정 재

Table 9. Applicability of Evaluation Criteria and Measurement Methods for Different Types of Distribution Packaging^{4, 26, 27)}

Category	Major Characteristics	Applicability of Evaluation Criteria	Measurement Considerations	Implications
Rigid Packaging	Fixed shape and volume	High	Easy measurement of volume and packaging space	Existing criteria applicable
Flexible Packaging	Deformable and compressible	Limited	Consider compression conditions and shape deformation	Review of measurement reproducibility required
Delivery Packaging	Includes transportation and delivery processes	Limited	Consider additional packaging and logistics environment	Reflection of distribution environment required
Composite Packaging	Multi-layer and multi-package structure	Difficult	Complex packaging configuration and volume measurement	Review of evaluation methods required
E-commerce Packaging	Associated with delivery and supply chain characteristics	Limited	Consider delivery structure and packaging use characteristics	Supply chain-based approach required

Note: Applicability of evaluation criteria refers to the applicability of the current product packaging-oriented management criteria.

Table 10. Proposed Directions for Improving the Domestic Distribution Packaging Management System

Category	Current Product-oriented Management System	Changes in the Distribution Environment	Proposed Management Direction
Management Scope	Production and sales	Expansion of distribution and delivery	Expansion of management scope to transport and delivery packaging
Packaging Type	Rigid packaging	Expansion of flexible and composite packaging	Reflection of diverse distribution packaging characteristics
Evaluation System	Packaging space ratio and number of packaging layers	Diversification of packaging structures	Development of evaluation criteria and measurement methods reflecting distribution packaging
Management Entity	Producer-oriented	Expansion of supply chain participation	Establishment of a supply chain-based collaborative management system
Operational Structure	Product-oriented operation	Expansion of platformbased distribution	Integration of platform and logistics management
Policy Objective	Packaging reduction	Circular economy and logistics efficiency	Implementation of a circular economy-oriented distribution packaging management system

Note: Distribution packaging includes transport packaging, delivery packaging, and e-commerce packaging.

현성을 함께 고려할 수 있는 평가기준과 측정방법 마련이 필요할 것으로 판단된다.

3.3. 유통포장 관리주체 검토

배송 중심의 유통구조가 반영되면서 실제 유통환경에서는 생산자뿐 아니라 판매자, 플랫폼 및 물류기업도 포장 사용과 운영에 직접 관여하고 있다. 또한 플랫폼 기반 유통의 확산으로 포장 선정, 포장 구성 및 배송 방식은 공급망 참여자의 역할에 따라 달라질 수 있으며, 유통포장의 상당 부분은 생산 이후 유통 및 배송 과정에서 결정·운영되는 특성을 가진다. 글로벌 유통포장 정책 역시 생산자 중심 관리에서 유통 전 과정 참여를 반영하는 관리체계로 변화하고 있으며, 일부 국가는 플랫폼과 물류기업의 역할을 포함한 운영체계를 구축하고 있다. 이는 유통포장 관리에서도 실제 포장 사용이 이루어지는 공급망 구조와 운영 주체를 함께 고려할 필요가 있음을 시사한다. 따라서 향후 국내 유통포장 관리체계는 기존 생산자 중심 관리체계를 유지하되, 유통환경 변화와 공급망 참여자의 역할을 함께 반영하는 방향으로 발전할 필요가 있다.

3.4. 유통환경 변화에 따른 유통포장 관리체계 방향

앞서 검토한 관리범위, 평가기준 및 측정방법, 관리주체는 서로 독립적으로 작동하지 않으며, 유통환경 변화에 실효적으로 대응하기 위해서는 이 세 축을 연계한 통합적 관리가 요구된다. 전자상거래 확대로 실제 포장 사용은 생산 단계뿐 아니라 유통 및 배송 전 과정에서 이루어지고 있으며, 동일 제품이라도 유통구조와 배송방식에 따라 포장 형태와 포장 사용량이 달라질 수 있다. 이에 따라 유통포장 관리는 관리범위, 평가기준 및 측정방법, 관리주체를 개별적으로 운영하기보다 상호 연계된 관리체계로 운영될 필요

가 있으며, 글로벌 유통포장 정책도 이러한 방향으로 발전하고 있다. 연성포장, 배송포장 및 복합포장 등 다양한 유통포장이 증가함에 따라 기존 제품 중심 관리체계만으로는 실제 유통환경을 충분히 반영하는 데 한계가 있는 것으로 판단된다.^{26,27)}

Table 10과 같이 향후 국내 유통포장 관리체계는 기존 제품포장 관리체계를 유통포장으로 단순 확대하는 접근에서 벗어나, 유통환경의 변화에 능동적으로 대응할 수 있는 독립적 관리체계로 발전할 필요가 있다. 이를 위해 관리범위는 제품포장 중심에서 운송포장과 배송포장을 포괄하는 공급망 기반 체계로 확대되어야 하며, 평가기준 또한 다양한 유통포장 형태를 반영할 수 있도록 개선되어야 한다. 아울러 관리주체는 제조자 중심에서 벗어나 플랫폼, 유통사업자 및 물류기업이 함께 참여하는 협력체계로 전환함으로써, 실제 유통환경에서 발생하는 포장 문제를 효과적으로 관리할 수 있어야 한다. 이러한 전환을 토대로 향후 관리정책은 단순한 포장재 감량을 넘어 포장 최적화, 재사용 확대, 테이터 기반 관리 및 공급망 효율화를 통합적으로 고려하는 방향으로 발전하여야 한다. 특히 제품 설계 단계부터 유통·회수에 이르는 전 과정을 연계하는 순환경제 기반 관리체계를 구축함으로써, 환경성과 산업 경쟁력을 동시에 확보하는 정책으로 나아갈 필요가 있다. 이를 통해 국내 유통포장 관리체계는 단순 포장재 감량을 넘어 실제 유통환경과 포장 사용 특성을 반영하는 실효적 관리체계로 전환될 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 전자상거래 확대와 유통환경 변화에 따라 기존 제품 중심 포장관리 체계가 지닌 한계를 분석하고, 글로벌

별 포장정책과 국내 유통환경 특성을 바탕으로 향후 국내 유통포장 관리 방향을 검토하였다. 분석 결과, Table 7에서 제시한 바와 같이 EU·미국·중국은 제도 운영 방식에 차이가 있으나, 공통적으로 유통단계와 공급망을 반영하는 방향으로 정책을 발전시키고 있는 것으로 확인되었다. 이러한 글로벌 포장정책은 관리범위 다양화, 공급망 기반 관리, 순환경제 강화 및 공급망 참여주체 연계를 중심으로 전개되고 있으며, 이는 실제 포장 사용 구조가 유통환경 변화에 따라 달라지고 있음을 시사한다. 또한 Table 8과 Table 10의 분석 결과에서도 관리범위, 평가기준 및 측정방법, 관리주체와 운영구조 측면에서 기존 관리체계의 한계가 확인되었다. 특히 연성포장과 다양한 형태의 유통포장이 증가하면서 기존 평가기준의 적용에 제약이 있었으며, 연성포장은 형태 변화와 압축 상태에 따라 측정 결과가 달라질 수 있어 제품포장 중심 평가기준을 그대로 적용하기 어려운 것으로 분석되었다.^{4,26)} 이상의 결과는 국내 유통포장 관리체계 또한 기존 제품포장 관리의 기반 위에서 실제 포장 사용 특성과 유통·공급망 구조를 함께 반영하는 방향으로 발전할 필요가 있음을 보여준다. 나아가 국내 유통포장 정책은 해외 제도를 단순히 도입하기보다, 국내 산업구조와 유통환경을 고려한 한국형 관리체계로 발전할 필요가 있다. 이를 위해 전자상거래와 플랫폼 기반 유통 확대에 대응하여 공급망 참여주체 간 역할을 명확히 하고, 유통포장 특성을 반영한 평가기준과 관리제도를 마련하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 본 연구는 글로벌 유통포장 정책 변화를 체계적으로 비교·분석하고, 이를 바탕으로 제품포장 중심 관리체계에서 공급망 기반 관리체계로의 전환 필요성과 함께 유통포장 특성을 반영한 관리범위·평가기준·관리주체의 개선 방향을 제시하였다는 점에서 정책적 의의를 가진다. 다만 본 연구는 글로벌 포장정책과 국내 제도 분석을 중심으로 수행되어 실제 유통포장 평가방법의 적용과 정량적 검증을 포함하지 못한 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 연성포장, 배송포장 및 복합포장을 대상으로 실제 유통환경 기반의 평가체계를 구축하고, 이를 Field-to-Lab 기반 실증을 통해 검증함으로써 적용 가능성을 확인할 필요가 있다. 이를 통해 유통포장 특성을 반영한 평가기준과 측정방법을 마련하고, 국내 유통포장 관리체계의 실효성을 높여 나갈 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Suh, S.U., Lim, M.J., and Oh, J.Y. 2017. Analysis on the Distribution Environmental Loads of the Parcel Packaging Delivered by Means of E-Commerce in Korea. *Kor. J. Packaging Sci. Tech.* Vol. 23, No. 2: 103-108.
2. Oh, J.Y., Jo, H.J., Suh, S.U., and Lee, G.E. 2019. A Study on the Waste Reduction of Parcel Delivery Packaging. *Kor. J. Packaging Sci. Tech.* Vol. 25, No. 2: 1-7.
3. 환경부. 2019. 과대포장 방지를 위한 실태조사 및 적정기준 마련 연구. 한국건설생활환경시험연구원.
4. Oh, J.Y., Kim, H.R., Yu, C.J., and Kim, S.D. 2026. A Study on Alternative Approaches of Packaging Space Ratio in Flexible Transport Packaging for Environmental Load Reduction. *Kor. J. Packaging Sci. Tech.* Vol. 32, No. 1: 27-34.
5. 기후에너지환경부. 2025. 자원의 절약과 재활용촉진에 관한 법률. 법률 제21128호.
6. 기후에너지환경부. 2026. 제품의 포장재질·포장방법에 관한 기준 등에 관한 규칙. 기후에너지환경부령 제42호.
7. 기후에너지환경부. 2026. 제품의 포장재질 및 포장방법에 대한 간이측정방법. 기후에너지환경부고시 제2026-101호.
8. 기후에너지환경부. 2026. 순환경제사회전환촉진법. 법률 제21381호, 2026. 2. 19.
9. Kim, M.K. and Kim, J.K. 2026. A Study on Building a Sustainable Packaging Ecosystem in Response to the EU PPWR Regulation. *Kor. J. Packaging Sci. Tech.* Vol. 32, No. 1: 7-15.
10. European Union. 2025. Regulation (EU) 2025/40 of the European Parliament and of the Council of 19 December 2024 on Packaging and Packaging Waste (PPWR), Amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and Repealing Directive 94/62/EC. *Official Journal of the European Union*, L 40, 22 January 2025.
11. European Commission. 2019. The European Green Deal. COM(2019) 640 final. Brussels, Belgium.
12. European Commission. 2020. A New Circular Economy Action Plan: For a Cleaner and More Competitive Europe. COM(2020) 98 final. Brussels, Belgium.
13. European Parliament. 2024. Legislative Resolution on the Proposal for a Regulation on Packaging and Packaging Waste.
14. Amazon.com, Inc. 2024. Ships in Product Packaging (SIPP) and Frustration-Free Packaging (FFP): Program Requirements and Technical Guidelines.
15. Colorado General Assembly. 2022. HB22-1355: Producer Responsibility Program for Statewide Recycling Act.
16. California Legislature. 2022. Senate Bill No. 54: Plastic Pollution Prevention and Packaging Producer Responsibility Act.
17. Oregon Legislature. 2021. Senate Bill 582: Recycling Modernization Act.
18. National Bureau of Statistics of China. 2025. Statistical Communiqué of the People's Republic of China on the 2024 National Economic and Social Development.
19. State Post Bureau of China. 2025. 2024 Postal Industry Development Statistical Bulletin.
20. China Internet Network Information Center (CNNIC). 2025. The 55th Statistical Report on China's Internet Development.
21. Ministry of Transport of the People's Republic of China. 2021. 《邮件快件包装管理办法》 [Measures for the Administration of Packaging of Mail and Express Items].
22. Ministry of Commerce of the People's Republic of China.

2026. SB/T 11266-2026, 《电子商务绿色包装技术和管理要求》 [Green Packaging Technology and Management Requirements for E-commerce].
23. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. 2021. NDRC Document No. 969 [2021], 《“十四五”循环经济发展规划》 [The 14th Five-Year Plan for Circular Economy Development].
24. State Administration for Market Regulation and Standardization Administration of China. 2023. GB/T 43283-2023, 《快递循环包装箱》 [Circulating Packaging Box for Express].
25. National Development and Reform Commission and Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2020. NDRC Document No. 80 [2020], 《关于进一步加强塑料污染治理的意见》 [Opinions on Further Strengthening Plastic Pollution Control].
26. Oh, J.Y., Suh, S.U., and Lim, M.J. 2022. A Study on Field-to-Lab Test Method for the Safe Transport and Optimum Packaging Design of the Parcel Delivery in Korea. Kor. J. Packaging Sci. Tech. Vol. 28, No. 2: 127-132.
27. Oh, J.Y., Lim, M.J., Kim, K.B., Kim, S.H., Suh, S.U., and Lee, G.E. 2020. Study on Adaptability of Returnable Transport Packagings in the Parcel Delivery Service by e-commerce. Kor. J. Packaging Sci. Tech. Vol. 26, No. 2: 99-103.

투고: 2026.07.03 / 심사완료: 2026.07.15 / 게재확정: 2026.08.06

커피 찌꺼기 강화 전분 복합재료: 다중 스케일 섬유 협동 효과 및 응용 설계 연구

왕효동 · 장종식*

국민대학교 일반대학원 혁신소재리뉴어블디자인학과

Coffee Grounds Reinforced Starch Composites: Multi-scale Fiber Synergistic Effects and Application Design

Wang Xiaodong and Jang Jung-sik

Department of Innovative Materials Renewable Design, Kookmin University, Seoul, Korea

Abstract This study developed biodegradable starch-based composites from urban organic waste—spent coffee grounds, waste paper, waste textile fiber, and bamboo fiber—comparing direct use of spent coffee grounds (B3) with carbonized biochar (C2) within a single composite system. Six sample groups were prepared; density and water absorption were measured across all groups, and core specimens were further analyzed by FT-IR, FE-SEM/EDS, TGA/DTG, and water contact angle (WCA). Density was highest for B3 (0.80 g/cm³) versus 0.68 g/cm³ for C2, reflecting biochar porosity. FE-SEM/EDS showed B3 formed a dense particle-packing structure, while C2 exhibited mechanical interlocking from biochar's rough, porous surface. FT-IR identified protein-derived Amide II peaks (1539, 1576 cm⁻¹) in B3 that disappeared in C2, where an aromatic carbon peak (1335 cm⁻¹) emerged, confirming carbonization-induced structural change. C2 outperformed B3 in all measured mechanical properties, including flexural strength (2.21 vs. 1.24 MPa), tensile strength (1.20 vs. 0.40 MPa), and surface hardness (Shore A 84.0 vs. 55.0). B3's tensile strength (0.40 MPa) was even lower than the unfilled reference (A2, 0.57 MPa), indicating limited reinforcement from weak interfacial adhesion. The materials suit packaging boxes, cup sleeve/coaster sets, and storage boxes, via a low-technology, reproducible forming process using household-scale equipment, with biochar carbonization as a separate high-temperature pre-treatment.

Keywords Starch-based composite, Spent coffee grounds, Biochar, Multi-scale fiber, Biodegradable packaging design

서 론

1. 연구 배경

전 세계적으로 플라스틱 오염이 심각한 환경 문제로 대두되고 있다. 생분해성 고분자와 천연섬유를 결합한 바이오 복합재료는 친환경 대체 소재로 주목받고 있다¹⁾. 전분 기반 생분해성 재료는 Mater-Bi 등 상용 제품으로 이미 실용화되어 있다²⁾. Geyer 등(2017)에 따르면, 2015년 전 세계 플라스틱 생산량은 3억 8,100만 톤에 달했으며, 이 중 9%만이 재활용되고 79%는 매립지나 자연환경에 축적되었다³⁾. 유럽연합

은 2021년부터 일회용 플라스틱 빨대·식기 등 특정 품목의 시장 출시를 금지하였으며, 한국 정부도 2022년부터 플라스틱 사용 감축 정책을 시행하고 있다⁴⁾.

한국은 1인당 커피 소비량이 세계 평균을 크게 상회하는 주요 커피 소비국이며, 매년 약 15만 톤의 커피 찌꺼기(커피 피박)가 발생하는 것으로 보고되고 있다(농수산식품유통공사, 2023)⁵⁾. 커피 찌꺼기는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스, 리그닌 등 리그노셀룰로오스 성분과 잔류 카페인·지질을 함유하여 복합재료 충전재로서의 잠재력이 높다(Ballesteros 등, 2014)⁶⁾. 그러나 대부분이 폐기물로 처리되고 있어, 이를 고부가가치 재료로 활용하기 위한 연구의 필요성이 높다.

2. 기존 연구 현황 및 연구 간극

Avérous(2004)는 열가소성 전분의 가소화 메커니즘과 생분해 특성을 규명하였으며⁷⁾, Müller 등(2008)은 가소제 농

*Corresponding Author: Jang, Jung-sik
Department of Innovative Materials Renewable Design, Kookmin University, Seoul, Korea
Tel: +82.02.910.4943, 4944, Fax: +82.02.910.4609
E-mail: f2025404@kookmin.ac.kr

도가 전분 필름의 수분 투과 특성에 미치는 영향을 분석하였다⁸⁾. Moustafa 등(2017)과 Campos-Vega 등(2015)은 커피 찌꺼기의 자원화 가능성을 검토하였다^{9,10)}.

그러나 기존 연구들에는 명확한 공백이 있다. 첫째, 커피 찌꺼기 직접 사용과 탄화 처리 방식을 동일한 복합재료 시스템 내에서 체계적으로 비교한 연구는 현재까지 없으며, 바이오차 기반 복합재료에 대한 연구에서 Das 등(2016) 및 Lehmann과 Joseph(2015)은 바이오차의 기계적 특성 개선 효과를 보고하였다^{11,12)}. 둘째, 천연섬유 강화 복합재료에 관한 연구는 지난 10년간 활발히 진행되었으며(Faruk 등, 2012)¹³⁾, 섬유의 종류와 스케일에 따라 강화 효과가 달라지는 것으로 보고되었다. 대부분의 연구가 단일 스케일의 섬유만을 사용하여 다중 스케일 섬유의 협동 효과에 대한 연구가 부족하다. 셋째, 고가의 전문 장비를 필요로 하여 재현성과 실용성이 제한적이다. Abdul Khalil 등(2012)은 지속가능한 나노섬유 기반 복합재료의 가능성을 검토하였다¹⁴⁾.

3. 연구 목적 및 의의

본 연구는 다음을 목적으로 한다. 첫째, 커피 찌꺼기 직접 사용(B3)과 탄화 처리(C2)를 동일 시스템 내에서 비교 분석한다. 둘째, 나노(CNF: 계면 강화 및 미세균열 억제)-마이크로(종이 펄프: 섬유 네트워크 연결)-밀리미터(대나무, 폐섬유: 하중 지지 골격) 스케일 다중 섬유의 협동 효과를 검토한

다. 셋째, 복합재료 성형 단계를 가정용 장비 수준에서 재현 가능한 저기술 제조 방법으로 제시한다(바이오차는 별도의 탄화 전처리를 적용).

실 험

1. 재료

본 연구에 사용된 재료는 Table 1에 요약되어 있다.

2. 시료 제조

2.1. 실험 설계 및 배합표

총 6개 그룹의 시료를 제작하였으며, 각 그룹의 배합은 Table 2와 같다.

섬유 및 충전재 함량이 높은 그룹은 농업 폐기물 충전재의 수분 흡수 특성을 고려하여 물 첨가량을 110-120 mL로 증가시켰으며, A2 그룹의 90-95 mL보다 높게 설정하였다¹⁶⁾. 총 고형분(수분 제외) 함량은 그룹별 118.5-123.7 g 범위 내에서 유지되도록 설계하였으며, 전분(29.3-31.8 g)·글리세롤·레스틴 함량은 대체로 일정하게 유지한 반면, 섬유·충진재(대나무, 폐섬유, 커피 찌꺼기, 바이오차)가 추가됨에 따라 종이 펄프 함량을 상대적으로 감소시켜 총 고형분을 보상하는 방식으로 배합하였다. 즉, 전분 함량 자체가 실험 변수로 설계된 것이 아니라, 종이 펄프가 신규 충전재 도입에 따른 고형분 보상재 역할을 하였다.

Table 1. Experimental materials and specifications

Material	Specification/Treatment	Function
옥수수 전분	식품급, 순도 >98%	기재 (Matrix)
Glycerol	순도 >99%	가소제 (Plasticizer)
대두 레시틴	식품등급 분말	소수화제
폐지 펄프	수작업 분쇄, 습윤 중량 기준	마이크로 강화재 (섬유 네트워크 연결)
대나무 섬유	4% NaOH 알칼리 처리 24h	밀리 강화재 (하중 지지 골격)
폐섬유 (면)	1-2 cm 절단, 60°C 건조	밀리 강화재 (하중 지지 골격)
커피 찌꺼기	60°C 건조, 40메시 체질	충진재 (직접)
Biochar	450°C, 2시간 탄화 처리	충진재 (탄화)
CNF 분산액	2 wt%, 직경 4-10 nm	나노 강화재 (계면 강화 및 미세균열 억제)

Table 2. Sample formulation (unit: g; paper pulp in wet weight)

Group	Starch	Glycerol	Lecithin	Paper pulp	Bamboo	Waste fiber	Coffee gr.	Biochar	CNF분산액	Water (mL)
A2	30.15	20.25	2.1	71.2	-	-	-	-	-	95
B2	30.98	20.65	2.1	56.3	10	-	-	-	-	95
B3	30.63	20.17	2.11	57.8	-	-	10	-	-	110
B4	30	20	2.27	51.5	5	5	5	-	-	110
C2	31.8	22.28	2.23	47.1	5	5	5	5	-	120
C1	29.3	21.56	2.4	50.2	5	5	5	-	100g	90

주: A2 = 기준 시료, B2 = 종이+대나무, B3 = 종이+커피찌꺼기 직접(핵심 그룹), B4 = 4종 섬유 혼합, C2 = B4+바이오차(핵심 비교 그룹), C1 = B4+CNF(탐색 그룹). CNF는 높은 중형비와 비표면적으로 인해 복합재료의 기계적 특성을 향상시키는 것으로 보고되었다¹⁵⁾.

2.2. 제조 공정 (8단계 SOP)

시료 제조는 다음의 8단계 공정으로 수행하였다. 복합재료 성형 공정(혼합·성형·건조)은 가정용 전기밥솥과 오븐으로 재현 가능하며, 바이오차는 사전에 별도의 고온 탄화(450°C, 2시간) 전처리를 거쳐 준비하였다.

Phase 1 – 전분 호화 (85-90°C, 15-20분): 옥수수 전분과 물을 혼합하여 85-90°C에서 15-20분간 가열하며 지속적으로 교반하였다. 불투명 슬러리에서 반투명 젤로 전환되면 호화 완료로 판단하였다.

Phase 2 – 가소화 (75-85°C, 10분): 글리세롤(20 g)을 첨가하여 10분간 혼합하였다.

Phase 3 – 소수화 처리 (70-80°C, 5분): 레시틴(2 g)을 첨가하여 5분간 혼합하였다. 레시틴은 친수성 머리카락과 소수성 알킬사슬을 동시에 지닌 인지질 계열의 양친매성(amphiphilic) 소수화제(hydrophobizing agent)로, 소수성 사슬이 기재(Matrix) 표면으로 배향되어 표면 자유에너지를 낮춤으로써 흡수율을 감소시킨다.

Phase 4 – 섬유 혼합 (60-70°C, 10-15분): 예비 혼합한 건조 섬유를 천천히 첨가하며 혼합하였다. B4와 C2 그룹은 모든 건조 섬유를 미리 2-3분간 균일 혼합하였다. C1 그룹은 CNF 분산액을 5회에 나누어 각 20 g씩 첨가하며 각 5분간 교반하였다(총 100 g, 40분).

Phase 5 – 성형 (Molding): 혼합물을 20 × 20 cm 금형에 붓고 평탄화하였다.

Phase 6 – 압축 (Pressing): 유리판으로 덮고 추를 올려 2-3시간 압축하였다.

Phase 7 – 1단계 건조 (60°C, 12시간): 60°C에서 12시간 건조하였다.

Phase 8 – 2단계 건조 (80°C, 6시간): 80°C에서 6시간 추가 건조하였다. 20 × 20 cm 금형 기준으로 성형하였으나, 건조 과정에서의 수축으로 최종 시료 크기는 약 12-15 cm × 12-15 cm, 두께 4.9-7.9 mm로 측정되었다(그룹별 실측값은 Table 3 참조).

3. 특성 분석 (Characterization)

3.1. 밀도 측정 (Density Measurement)

ASTM D792를 참고하되, 시편이 불균일 판재 형상인 점을 고려하여 부력법이 아닌 질량-체적법(길이×너비×두께 기반)으로 측정하였다. 시료의 질량은 정밀도 0.01 g의 전자저울을 사용하여 측정하였다. 시료의 치수는 정밀도 0.01 mm의 버니어 캘리퍼스를 사용하여 측정하였다(Fig. 1). 각 시료에 대해 길이는 좌·중·우 3개 지점에서, 너비는 상·중·하 3개 지점에서, 두께는 8개 지점(좌상·좌중·좌하·중상·중하·우상·우중·우하)에서 측정하여 평균값을 사용하였다.

$$\rho = M / (L \times W \times H) \quad (1)$$

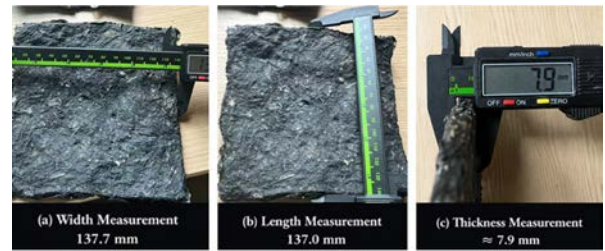


Fig. 1. Measurement of specimen dimensions using a digital caliper: (a) width, (b) length, and (c) thickness.

여기서 ρ 는 밀도(g/cm^3), M 은 질량(g), L 은 평균 길이(cm), W 는 평균 너비(cm), H 는 평균 두께(cm)이다.

3.2. 흡수율 측정 (Water Absorption Test)

흡수율은 ASTM D570을 참고한 수정 방법으로 측정하였다. 각 시료에서 5 × 5 cm 크기의 시편을 절단하고 실외 햇빛 건조 후 질량을 측정하여 건조 중량(W_0)으로 하였다. 시편을 상온(20-25°C)의 증류수에 완전히 침지하여 24시간 방치한 후 꺼내어 표면의 물을 여과지로 가볍게 흡수하고 즉시 질량을 측정하였다. 이 측정값에서 시편에 부착된 식별 라벨의 흡수에 의한 오차(0.2 g)를 보정하여 최종 습윤 중량(W_1)으로 하였다.

$$WA(\%) = (W_1 - W_0) / W_0 \times 100 \quad (2)$$

3.3. 기계적 특성 측정 (Mechanical Properties)

기계적 특성은 굽힘(Flexural), 인장(Tensile), 표면 경도(Hardness) 세 가지로 구분하여 측정하였다. 측정 시료는 A2(기준), B3-2(커피찌꺼기 직접), C2-2(바이오차)의 3그룹으로 하였으며, 시험은 표면 평탄도 제약으로 인해 중국 소재 시험 기관에 의뢰하였다.

굽힘 강도와 굽힘 모듈러스는 ASTM D790-2007을 참고하여 3점 굽힘 시험(지지 스패 52 mm)으로 측정하였다. A2 시료는 유연성이 높아 굽힘 시험 지그에 안정적으로 거치할 수 없어 측정에서 제외하였으며, B3-2와 C2-2에 대해 각 3개의 시편($n=3$)을 시험하였다.

인장 특성(최대하중, 인장강도, 인장모듈러스, 연신율)은 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 게이지 길이 25 mm 조건에서 측정하였다. A2, B3-2, C2-2 세 그룹 모두에 대해 각각 5개, 5개, 6개의 시편을 시험하였으며, 인장강도는 최대하중을 시편 단면적으로 나누어 산출하였다.

표면 경도는 Shore A 듀로미터를 사용하여 A2, B3-2, C2-2 세 그룹에 대해 각 5개소를 측정한 후 평균 ± 표준편차를 산출하였다(ASTM D2240 측정 원리 적용).

3.4. 미세구조 분석 (Microstructure Analysis – FE-SEM)

미세구조는 전계 방출 주사전자현미경(FE-SEM, Hitachi SU8700)을 사용하여 관찰하였다. 시편은 비전도성 유기물 이므로 백금(Pt) 코팅 처리 후 가속 전압 3.0 kV, 작동 거리 7.2-7.9 mm 조건에서 UD(+LD) 검출기를 사용하여 $\times 100$, $\times 500$, $\times 2,000$, $\times 5,000$ 배율로 관찰하였다. 또한 입자와 기재의 화학 조성을 분석하기 위해 에너지 분산형 X선 분광법(EDS)으로 면분석(Map sum spectrum) 및 점분석(Point analysis)을 병행하였다. B3 시료에서는 커피 찌꺼기 입자의 분산 상태와 계면 결합을, C2 시료에서는 바이오차의 다공성 구조와 기계적 잠금 효과를 중점 관찰하였다.

3.5. 적외선 분광 분석 (FT-IR)

화학 구조 분석을 위해 외부 공인시험기관(한국화학융합시험연구원, KTR)에 의뢰하여 FT-IR(푸리에변환적외선분광기) 측정을 수행하였다(시험방법: KS M 0024: 2017). 시료는 절단 없이 소재 원편(bulk piece) 형태로 시험기관에 의뢰하였으며, ATR(Attenuated Total Reflectance)법으로 측정하였다. 측정 범위는 약 $4000\text{--}650\text{ cm}^{-1}$ 였다. 측정 시료는 B3와 C2(바이오차) 2개로 하였다. 비용 제약으로 인해 가장 대비가 명확한 직접 첨가 시료와 바이오차 시료를 선정하였다.

3.6. 열중량 분석 (Thermogravimetric Analysis, TGA)

열중량 분석은 TA Instruments TGA Q5000(V3.17 Build

265)을 이용하였다. A2, B3-2, C2-2 시료 각 6-9 mg을 백금 팬에 담아 질소(N_2) 분위기(샘플 가스 30 mL/min, 밸런스 가스 20 mL/min)하에서 승온 속도 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 상온($\sim 33^\circ\text{C}$)에서 410°C 까지 측정하였다. 미분열중량(DTG, $\%/\text{C}$)을 동시에 기록하여 각 분해 단계의 최대 분해 속도 온도를 확인하였다.

3.7. 접촉각 측정 (Water Contact Angle Measurement)

표면 소수성 평가를 위해 정적 접촉각(Water Contact Angle, WCA)을 광학식 접촉각 측정기를 이용한 세션방울법(sessile drop method)으로 측정하였다. 각 시료 표면에 탈이온수(약 $3\text{--}5\text{ }\mu\text{L}$)를 적하하여 즉시 좌·우 접촉각을 자동 산출하고 평균값을 해당 측정점의 WCA로 하였다. 각 시료에 대해 4회 이상 측정하여 평균 $\pm$ 표준편차를 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 외관 및 형태

제작된 시료의 외관은 Fig. 2와 같다. 시료들은 배합에 따라 뚜렷한 색상 차이를 나타냈다.

A2 기준 시료는 연한 회색을 띠었으며, B2는 대나무 섬유로 인해 카키색을 나타냈다. 주목할 점은 B3와 C2의 명확한 시각적 차이이다. B3는 커피 찌꺼기로 인한 갈색을 띠는 반면, C2는 바이오차로 인해 짙은 회색에서 검은색을 나타냈다. 이러한 색상 차이는 직접 사용과 탄화 처리의 물리



Fig. 2. Appearance of fabricated composite specimens for each sample group.

Table 3. Density measurement results of composite specimens

Sample	Mass M (g)	Length L (cm)	Width W (cm)	Thickness H (cm)	Volume V (cm ³)	Density ρ (g/cm ³)
A2	52.73	12.19	12.38	0.49	73.56	0.72
B2	64.08	14.76	14.83	0.58	126.98	0.50
B3-1	90.85	12.38	11.85	0.75	109.31	0.83
B3-2	77.38	12.63	12.50	0.64	101.21	0.76
B4	85.34	14.13	13.79	0.66	129.20	0.66
C2-1	97.97	13.60	13.73	0.79	148.27	0.66
C2-2	98.78	13.67	13.62	0.77	144.05	0.69
C1	90.28	13.35	13.51	0.72	129.22	0.70

주: 길이·너비는 3점, 두께는 8점 측정 평균값. 밀도 범위: 0.50-0.83 g/cm³ (섬유 강화 전분 복합재료의 전형적 범위 0.5-1.2 g/cm³에 해당)^{9,16)}.

적 차이를 시각적으로 보여주는 명확한 증거이다. B4는 다중 섬유로 인한 갈색을, C1은 CNF의 특성으로 인해 상대적으로 밝은 회색을 나타냈다.

모든 시료는 건조 후 약 10-15%의 수축을 보였으며, 최종 크기는 약 13-17 cm × 13-17 cm, 두께는 5-9 mm 범위였다. B3와 C2 그룹은 각각 2개씩 제작하여 재현성을 직접 검증하였으며, 두 시료 모두 일관된 외관과 질감을 나타내어 제조 공정의 재현성이 검증되었다.

2. 밀도 특성 (Density Properties)

Table 3은 ASTM D792를 참고한 질량-체적법으로 측정된 각 시료의 밀도 결과를 나타낸다.

A2 기준 시료는 0.72 g/cm³의 밀도를 보였다. B2 그룹은 0.50 g/cm³로 가장 낮은 밀도를 나타냈는데, 이는 대나무 섬유와 종이 펄프의 다공성 구조에 기인하는 것으로 보인다. 주목할 점은 B3 그룹이다. B3-1과 B3-2는 각각 0.83과 0.76 g/cm³로, 평균 0.80 g/cm³의 밀도를 보여 전체 시료 중 가장 높은 밀도를 나타냈다. 이는 커피 찌꺼기가 섬유 사이의 공극을 효과적으로 충전하여 복합재료를 치밀화시킨 것으로 해석된다. 반면 C2 그룹은 평균 0.68 g/cm³로 B3보다 다소 낮은 밀도를 보였다. 이는 바이오차의 다공성 구조에 기인한 것으

로, 탄화 과정에서 형성된 미세 기공이 전체 밀도를 감소시킨 것으로 보인다. 그러나 이러한 다공성 구조는 후술하는 바와 같이 흡수율 감소와 기계적 특성 향상에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다(흡수율 결과 참조). B4 그룹은 0.66 g/cm³, C1 그룹은 0.70 g/cm³로 중간 수준의 밀도를 나타냈다. 전체적으로 섬유 종류와 함량에 따라 밀도가 변화하는 경향을 확인할 수 있었으며, 특히 충전재의 특성 (직접 사용 vs 탄화 처리)이 복합재료의 밀도에 유의미한 영향을 미치는 것을 확인하였다.

3. 흡수율 특성 (Water Absorption Properties)

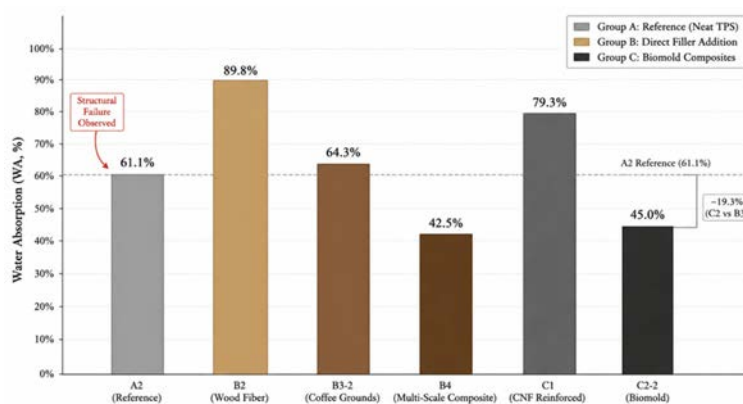
Table 4에 각 시료의 흡수율 측정 결과를 정리하였다(Fig. 3 참조). Fig. 4는 침지 전후 외관 변화를 나타낸 것이다. 라벨에 의한 흡수 오차(0.2 g)를 보정한 결과, 흡수율은 B2(89.8%)>C1(79.3%)>B3-2(64.3%)>A2(61.1%)>C2-2(45.0%)>B4(42.5%)의 순서로 나타났다.

A2 기준군은 61.1%의 흡수율을 나타냈으며, 24시간 침지 후 시편의 심각한 형태 변형 및 부분 파쇄가 관찰되어 순수 열가소성 전분(TPS)의 낮은 내수성이 확인되었다. B2 (대나무 섬유 단독 첨가)는 89.8%로 전체 시료 중 최고 흡수율을 나타냈다. 이는 대나무 섬유의 친수성 표면과 섬유

Table 4. Water absorption measurement results of composite specimens

Sample	Dry weight W ₀ (g)	Wet weight W ₁ (g)	WA (%)
A2	7.92	12.76	61.1
B2	6.98	13.25	89.8
B3-1	—	—	—
B3-2	11.22	18.43	64.3
B4	12.14	17.30	42.5
C2-1	—	—	—
C2-2	15.26	22.12	45.0
C1	12.04	21.59	79.3

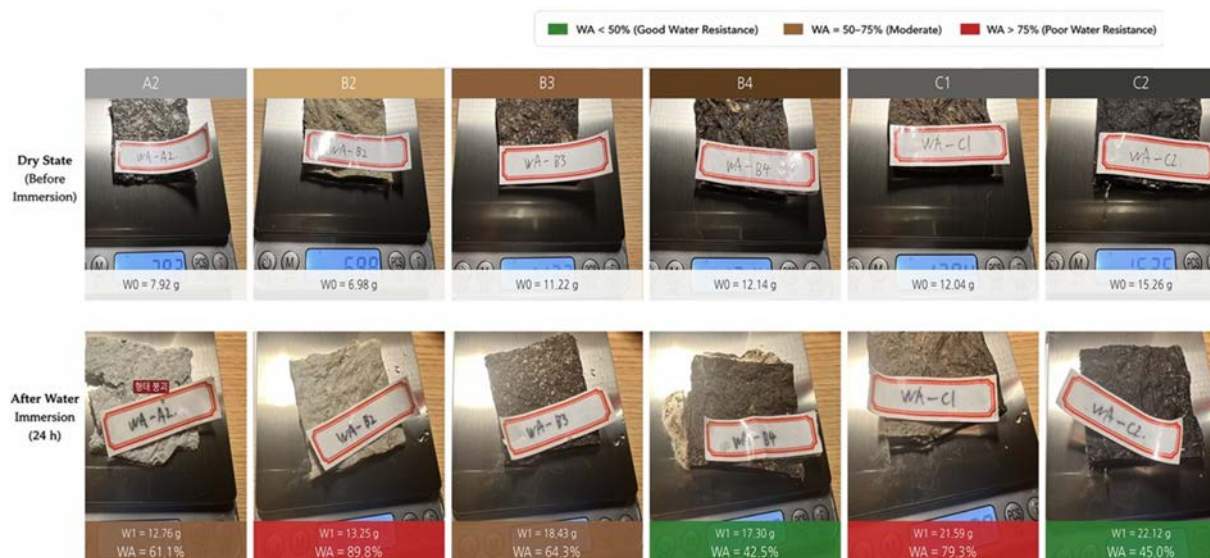
주: B3-2 및 C2-2 배합 그룹에서 만든 패널에서 흡수율 시편과 별도로 굽힘·인장 시험용 시편을 함께 절단하여 사용하였다. B3-1 및 C2-1은 제조 재현성 검증(밀도 비교)용으로만 제작되었으며 흡수율 측정에는 포함되지 않았다.



Comparison of water absorption after 24 h of water immersion.

The contribution of the identification label to water uptake (0.2 g) was corrected for all specimens ($n = 1$ per group). Specimens B3-1 and C2-1 were excluded due to failure in flexural strength tests.

Fig. 3. Water absorption rates (WA, %) of composite specimens (modified ASTM D570): A2 61.1%, B2 89.8%, B3-2 64.3%, B4 42.5%, C1 79.3%, C2-2 45.0%.



Comparison of Specimen Appearance Before and After Water Absorption Test (ASTM D570, 24 h Water Immersion) ASTM D570 water absorption test after 24 h of complete immersion.

The water absorbed by the identification label (0.2 g) was corrected for all specimens.

WO denotes the initial dry mass, W1 the mass after immersion, and WA the water absorption percentage.

Fig. 4. Appearance of B3-2 and C2-2 specimens before and after 24-hour immersion.

기재 계면에 형성된 공극이 수분 흡수 채널로 작용한 결과로 해석된다¹³⁾.

B3-2(커피 찌꺼기 직접 첨가)의 흡수율은 64.3%로, A2(61.1%) 대비 약간 높게 나타났다. 이는 커피 찌꺼기의 리그노셀룰로오스 성분의 친수성이 기재의 수분 흡수를 부분적으로 촉진한 결과로 판단된다⁶⁾. 반면 C2-2(바이오차 첨가)의 흡수율은 45.0%로 B3-2 대비 19.3%p 낮았다. 이는 바이오차의 탄화 과정에서 형성된 소수성 방향족 탄소 구조¹²⁾가 기재와의 계면에서 수분 침투를 억제하기 때문으로

판단된다. C2 시편은 침지 후 육안 관찰에서도 형태 변형이 가장 적고 표면 경도를 유지하였다.

B4(다중 스케일 섬유 복합재료)는 42.5%로 전체 시료 중 최저 흡수율을 나타냈다. 나노(CNF)·마이크로(종이 펄프)·밀리(대나무)·입자(커피찌꺼기) 규모의 섬유가 상호 보완적으로 공극을 충전함으로써 복합재료 내 수분 침투 경로가 차단된 것으로 해석된다^{1,13)}. C1(CNF 탄소섬유)은 79.3%의 높은 흡수율을 나타냈으며, 최적화되지 않은 CNF 분산 상태가 수분 차단 효율을 저하시킨 것으로 추정된다. 전분 기

반 복합재료의 흡수율은 충전재 종류와 함량에 크게 의존하는 것으로 알려져 있으며¹⁷⁾, 본 연구에서도 배합 설계에 따른 명확한 흡수율 차이가 관찰되었다.

4. 기계적 특성 (Mechanical Properties)

본 연구에서는 핵심 비교군인 A2(기준군), B3-2(커피찌꺼기 직접 첨가), C2-2(바이오차 첨가)를 대상으로 굽힘 특성(ASTM D790), 인장 특성, 표면 경도(Shore A)를 측정하였다. 다만 A2 시편은 유연성이 높아 3점 굽힘 시험 지그에 안정적으로 거치하기 어려워 굽힘 시험에서는 제외하고 인장 시험만 실시하였으며, 이에 따라 굽힘 시험은 B3-2와 C2-2 두 그룹에 대해서만 수행되었다.

4.1. 굽힘 특성 (Flexural Properties)

굽힘 특성은 ASTM D790-2007을 참고하여 3점 굽힘 시험(지지 스패 52 mm)으로 측정하였다. 각 시료당 3개의 시편(n=3)을 시험하였으며, 시험은 중국 소재 시험 기관에 의뢰하였다(시편 제작: 동일 배합 패널에서 절단). 측정 결과는 Table 5(a)에 정리하였다.

A2는 시편 유연성으로 인해 굽힘 시험 거치가 불가능하여 제외. †B3-2 시편 #1은 하중-변위 곡선에서 탄성 구간이 식별되지 않아 EB 산출 불능; 시편 #3·#4는 EB 산출 가능(4.42, 8.03 MPa) — n=2 평균 6.22 ± 2.55 MPa.

B3-2의 굽힘강도(σ_f) 평균은 1.24 ± 0.11 MPa(n=3), C2-2는 2.21 ± 0.43 MPa(n=3)로 측정되어, C2-2가 B3-2보다 평균 78.2% 높은 굽힘강도를 나타내었다. 굽힘 모듈러스(EB)의 경우 C2-2는 평균 24.11 ± 9.99 MPa(n=3)로 산출되었으며, B3-2는 3개 시편 중 시편 #1에서 탄성 구간이 식별되지 않아 해당 시편의 EB 산출이 불가능하였고, 나머지 시편 #3·#4에서만 EB를 산출하여 평균 6.22 ± 2.55 MPa(n=2)를 얻었다. C2-2 시편 간 굽힘강도 변동(σ_f : 1.95~2.70 MPa)이 상대적으로 큰 것은 시험에 사용된 시편이 2개의 다른 패널(Spec1: d=4.92 mm; Spec2,3: d=5.41 mm)에서 채취되었기 때문이며, 동일 패널(Spec2,⁷⁾ 내

에서는 표준편차 0.01 MPa로 매우 일관된 결과를 보였다(Fig. 6(a),(b) 참조).

이러한 거동 차이는 두 충전재의 보강 메커니즘 차이에 기인한다. 바이오차(C2)는 탄화 과정에서 형성된 다공성 방향족 탄소 구조로 인해 기재와의 계면에서 기계적 잠금(mechanical interlocking; 기재 수지가 충전재 표면의 기공·요철 구조 내부로 침투·경화되어 물리적으로 맞물리는 효과) 효과를 발휘하며, 이는 앞선 FE-SEM 관찰에서 확인된 C2의 거친 다공성 표면 구조(3.6절 참조)와 일치하는 결과이다. 이를 통해 하중을 보다 넓은 변형 구간에 걸쳐 분산시켜 더 큰 변위까지 하중을 지탱할 수 있게 한다. 반면 커피 찌꺼기를 직접 첨가한 B3-2는 입자와 기재 간 계면 접착력이 상대적으로 약해 응력집중점으로 작용하며, 결과적으로 더 작은 변형에서 초기에 균열이 발생·전파되어 낮은 굽힘강도와 불명확한 탄성 거동을 보이는 것으로 해석된다.

4.2. 인장 특성 (Tensile Properties)

인장 특성은 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 측정하였으며, 게이지 길이 25 mm 조건에서 A2 5개, B3-2 5개, C2-2 6개의 시편을 시험하였다. 인장강도는 최대하중을 시편 단면적으로 나누어 산출하였다(시험기관 보고서에 표준 규격 번호는 별도로 명시되지 않았으나, 산출 방식은 ASTM D638 계열의 일반적인 플라스틱 인장응력 산출법과 동일함). 측정 결과는 Table 5(b)에 정리하였다.

평균 인장강도는 A2 0.57 ± 0.15 MPa, B3-2 0.40 ± 0.15 MPa, C2-2 1.20 ± 0.48 MPa로 나타났다. 당초 예상과 달리 B3-2는 A2 대비 29.8% 낮은 인장강도를 보였으며, 이는 커피 찌꺼기 입자가 기재와의 계면 결합력 부족으로 인해 보강재가 아닌 응력집중점으로 작용하였음을 시사한다. 이는 3.3절 흡수율 결과(B3-2의 계면 공극 존재)와 3.6절 FE-SEM 관찰 결과와도 부합한다. 반면 C2-2는 A2 대비 110.5%, B3-2 대비 200% 높은 인장강도를 나타내어, 바이오차의 탄화된 다공성 구조가 기재와 강한 기계적 잠금을

Table 5(a). Bending test results (ASTM D790-2007, span 52 mm, n=3)

Sample	단면 폭×두께 (mm)	최대굽힘력 PfM (N)	굽힘강도 σ_f (MPa)	굽힘모듈러스 EB (MPa)
A2	—	—	—	—
B3-2	#1: 10.46 × 6.08 / #3,4: 10.72 × 5.43	6.05 (평균, n=3)	1.24 ± 0.11	6.22 ± 2.55 (n=2)
C2-2	#1: 10.25 × 4.92 / #2,3: 10.77 × 5.41	8.13 (평균, n=3)	2.21 ± 0.43	24.11 ± 9.99

Table 5(b). Tensile test results (mean ± standard deviation)

Sample	n	최대하중 (N)	인장강도 (MPa)	인장모듈러스 (MPa)	연신율 (%)
A2	5	17.14 ± 2.69	0.57 ± 0.15	18.0 ± 4.0	32 ± 7
B3-2	5	21.92 ± 8.51	0.40 ± 0.15	20.0 ± 13.0	37 ± 10
C2-2	6	64.11 ± 16.31	1.20 ± 0.48	24.0 ± 12.0	42 ± 6

형성함으로써 인장 특성을 크게 향상시켰음을 확인하였다.

인장 모듈러스는 A2 18.0 ± 4.0 MPa, B3-2 20.0 ± 13.0 MPa, C2-2 24.0 ± 12.0 MPa로 측정되어, 인장강도 경향과 동일하게 C2-2가 가장 높은 강성을 나타냈다. 다만 B3-2와 C2-2는 표준편차가 상대적으로 커 시편 간 편차가 존재하며, 이는 충전재 분포의 국부적 불균일에 기인하는 것으로 판단된다.

이러한 결과는 천연섬유가 일반적으로 열가소성 전분의 인장 및 굽힘 특성을 향상시킨다고 보고한 기존 연구¹⁸⁾와는 다소 다른 양상이다. 이는 동일한 유기성 폐기물(커피 찌꺼기)이라도 직접 첨가 시에는 계면 접착 문제로 보강 효과가 제한적이며, 탄화 처리를 통해 비로소 효과적인 보강재로 작용할 수 있음을 보여주는 것으로, 본 연구의 핵심 비교 목적(직접 사용 vs 탄화 처리)을 뒷받침하는 중요한 실증적 근거가 된다.

4.3. 표면 경도 (Surface Hardness, Shore A)

표면 경도는 Shore A 듀로미터를 사용하여 각 시료의 5

개소를 측정된 평균값을 사용하였다(ASTM D2240 측정 원리 적용). 측정 결과는 Table 5(c)에 나타난 바와 같이 A2 38.0 ± 2.3 , B3-2 55.0 ± 3.3 , C2-2 84.0 ± 5.1 (Shore A)로, A2 < B3-2 < C2-2 순으로 경도가 증가하는 경향을 보였다.

경도 순서(A2 < B3-2 < C2-2)는 인장강도 순서(B3-2 < A2 < C2-2)와 일치하지 않는다. 인장강도에서 B3-2(0.40 MPa)가 A2(0.57 MPa)보다 낮은 반면, 표면 경도는 B3-2(55.0)가 A2(38.0)보다 높게 나타났다. 이는 커피 찌꺼기 입자가 계면 접착력 부족으로 인장 시 응력집중점으로 작용하면서도, 입자 자체의 충전 효과로 인해 시편 표면의 국부적 압입 저항성은 오히려 증가시키기 때문이다. 즉 표면 경도는 국소적인 압입 저항을, 인장·굽힘강도는 시편 전체의 하중 지지 능력을 반영하는 서로 다른 물성으로, 두 결과가 반드시 동일한 경향을 보일 필요는 없다. C2-2는 84.0 ± 5.1 (Shore A)로 세 군 중 가장 높은 경도를 보여, 탄화된 바이오차의 단단한 입자가 표면 강성을 크게 향상시켰음을 확인하였다. 다만 C2-2에서 93의 이상값(outlier)이 1개 관찰되어 표준편차(± 5.1)가 다소 크게 산출되었으며, 이

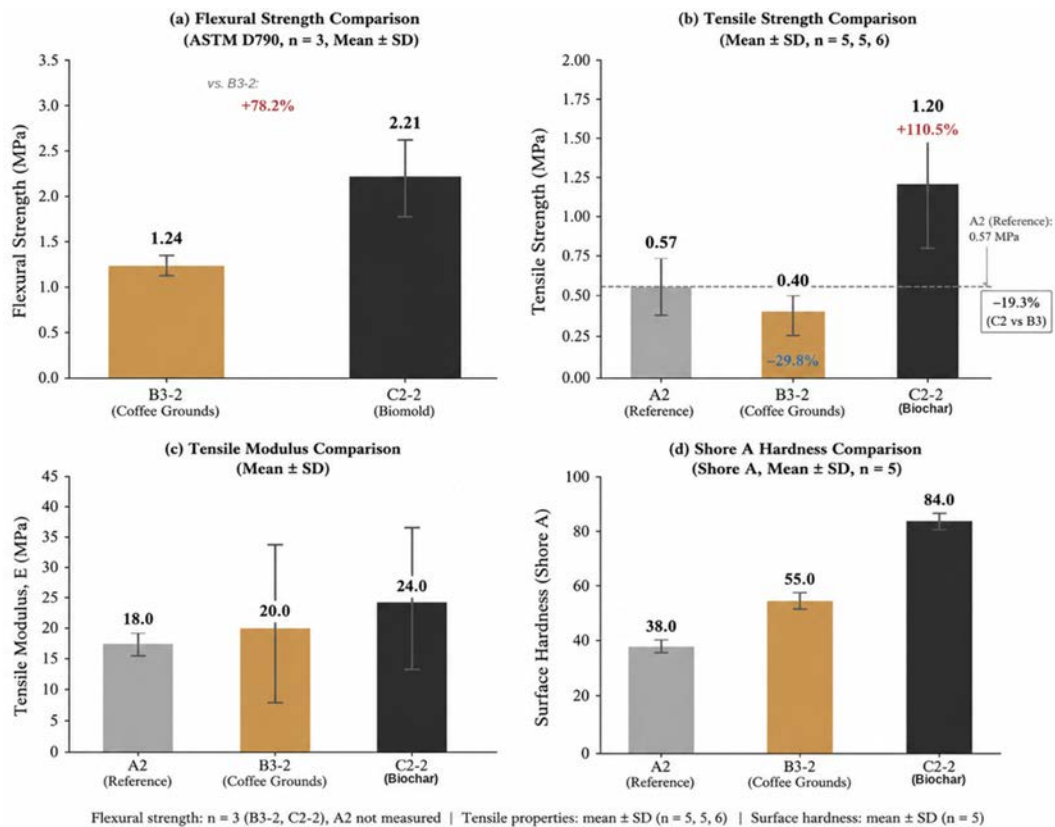


Fig. 5. Comprehensive comparison of mechanical properties and surface hardness.

Table 5(c). Surface hardness measurement results (Shore A, mean $\pm$ SD)

Sample	A2 (기준군)	B3-2 (커피찌꺼기)	C2-2 (바이오차)
경도 (Shore A)	38.0 ± 2.3 (n=5)	55.0 ± 3.3 (n=5)	84.0 ± 5.1 (n=5)

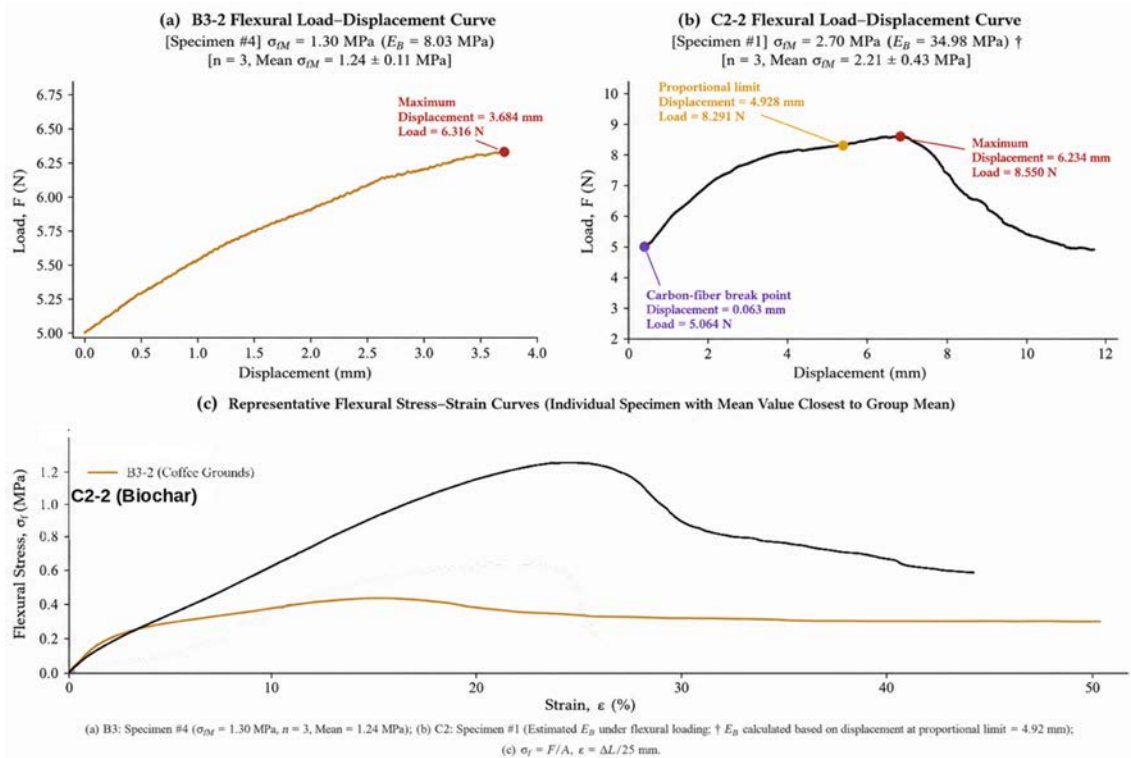


Fig. 6. Load-deformation curves from bending and tensile tests.

는 측정 위치에 따른 바이오차 입자 분포 불균일에 기인하는 것으로 판단된다.

C2-2는 측정된 모든 역학 지표에서 가장 우수한 성능을 보였다(Fig. 5). 굽힘강도는 B3-2 대비 높았고(A2는 시편 유연성으로 굽힘 시험에서 제외됨), 인장강도와 표면 경도는 A2·B3-2를 모두 상회하였으며, 탄화 과정에서 형성된 다공성 방향족 탄소 구조의 기계적 잠금 효과가 일관된 보강 메커니즘임이 확인되었다. 반면 B3-2는 인장강도에서 A2보다도 낮은 값을 보여, 계면 접착 개선 없이 커피 찌꺼기 직접 첨가만으로는 기계적 보강에 한계가 있음이 밝혀졌다.

5. 화학 구조 분석 (FT-IR Analysis)

B3 및 C2 시료에 대한 FT-IR 스펙트럼을 Fig. 7에 나타내었다. 두 시료 모두 열가소성 전분(TPS) 기재의 특성 흡수 피크를 공통적으로 나타냈다. 3289 cm^{-1} 부근의 넓고 강한 흡수 피크는 전분 수산기(-OH) 및 글리세롤 가소제의 O-H 신축 진동에 해당하며, $2921\sim 2925\text{ cm}^{-1}$ 의 흡수는 메틸렌기(-CH₂-)의 C-H 신축 진동을 나타낸다. 1743 cm^{-1} 에서 관찰된 피크는 레시틴의 에스터 결합(C=O)에 기인하며, 지문 영역($1200\sim 950\text{ cm}^{-1}$)의 1150 , 1103 , 1077 , 1018 cm^{-1} 피크군은 전분 특유의 글리코사이드 결합(C-O-C) 및 C-O 신축 진동을 나타낸다^{7,16}. B3 시료에서는 1539.1 cm^{-1} 및

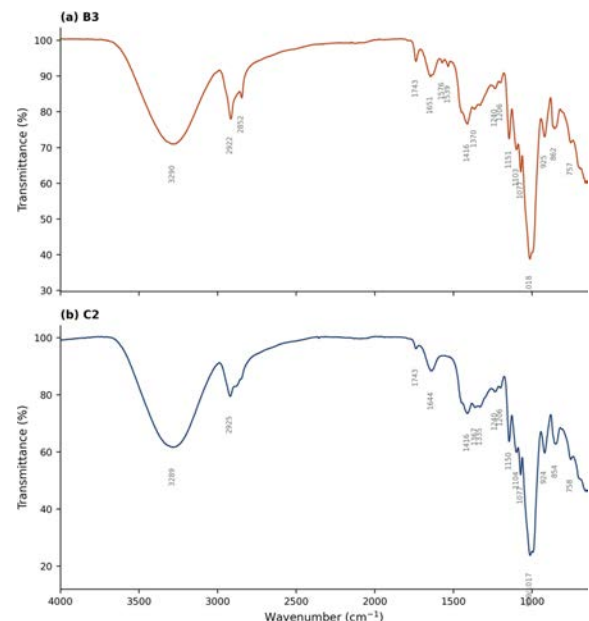


Fig. 7. FT-IR spectra of B3 and C2 composite specimens (spectral curves digitized from raw instrument data; peak positions per KTR Test Report No. TBK-2026-006263/006264, KS M 0024:2017).

576.1 cm^{-1} 에서 Amide II 및 C=N 관련 흡수가 추가로 관찰되었다. 이는 커피 찌꺼기에 잔존하는 단백질 및 아미

Table 6. Comparison of Major FT-IR Peaks between B3-1 and C2-1 (KTR Analysis, KS M 0024:2017)

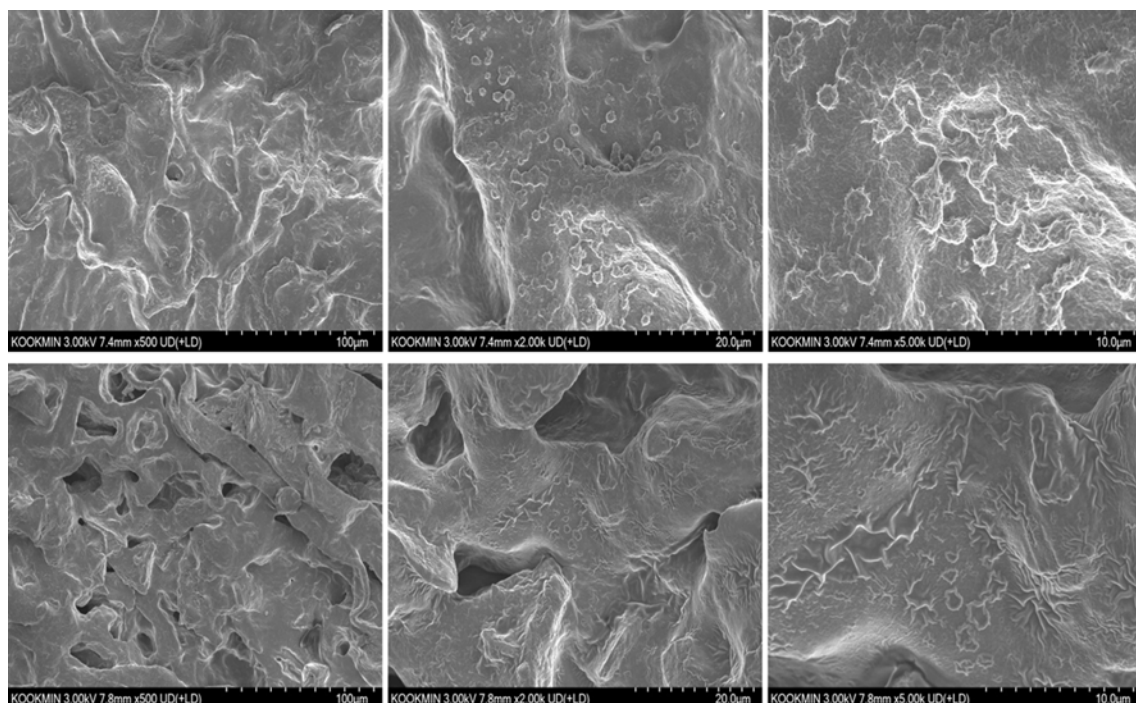
Wavenumber (cm ⁻¹)	B3 Transmittance (%)	C2 Transmittance (%)	Peak Assignment	Interpretation
3289–3290	~71%	~62%	O–H stretching vibration	Hydroxyl groups from starch and glycerol
2921–2925	~75%	~74%	C–H stretching vibration	Methylene groups
2851.8	~80%	—	Saturated C–H stretching	★ Characteristic peak of B3: fatty acid chains
1743.0	~91%	~90%	C=O stretching (ester)	Ester bonds derived from lecithin
1651 / 1644	~92%	~85%	O–H bending / absorbed H ₂ O / C=O	Bound water and carbonyl absorption
1576.1	~92%	—	Amide II / C=N vibration	★ Characteristic peak of B3: protein-related structure
1539.1	~87%	—	Amide II (N–H bending)	★ Characteristic peak of B3: protein-related structure
1335.3	—	~72%	Aromatic C–H in-plane bending	◆ Characteristic peak of C2: biochar carbon structure
1240–1416	Medium	Medium	C–H bending / C–O–C vibration	Starch backbone
1150	~73%	~60%	C–O–C stretching (glycosidic linkage)	Starch fingerprint region (stronger in C2)
1103	~65%	~50%	C–O–C stretching	Starch fingerprint region
1077	~48%	~40%	C–O–H bending / C–O stretching	Starch fingerprint region
1018 / 1017	~35%	~17%	C–O stretching (major peak)	Principal starch absorption (more pronounced in C2)
999.2	—	~20%	C–O vibration (ether linkage)	◆ Characteristic peak of C2: carbonized mineral structure
924	~75%	~66%	C–O–C bending	α-1,4-glycosidic linkage
757–862	Medium	Medium	C–H out-of-plane bending	Skeletal vibration

★ B3-specific peak (coffee grounds characteristic)

◆ C2-specific peak (biochar characteristic)

노산 성분의 N-H 굽힘 진동에 해당하며⁶⁾, 커피 찌꺼기가 직접 첨가된 B3의 화학적 특성을 확인하는 근거가 된다. 또한 2851.8 cm⁻¹의 추가 C-H 흡수는 커피 찌꺼기 지질

성분의 포화 지방산 사슬에 기인하는 것으로 보인다. C2 시료에서는 1539/1576 cm⁻¹의 단백질 관련 피크가 소멸되었으며, 대신 1335.3 cm⁻¹에서 바이오차 특유의 방향족 탄

**Fig. 8.** FE-SEM images of B3 specimen: (a) ×500, (b) ×2,000, (c) ×5,000.

소(aromatic C-H) 면내 변형 진동이 새롭게 나타났다^{11,12)}. 또한 999.2 cm^{-1} 의 추가 흡수는 바이오차의 광물질 성분 또는 탄화 과정에서 형성된 이형 C-O 결합에 기인하는 것으로 해석된다. C2는 B3에 비해 지문 영역 전반에서 흡수 강도가 증가(최저 투과율: C2 ~15% vs B3 ~35%)하였으며, 이는 바이오차의 균일한 분산에 의한 기재-충진재 계면 상호작용 강화를 반영하는 것으로 판단된다. 탄화 처리에 의해 커피 찌꺼기 내 유기 질소 화합물이 제거되고 방향족 탄소 골격이 형성된 것은 C2의 낮은 흡수율(45.0%)과 상관관계를 가지는 것으로 분석된다.

6. 미세구조 분석 (FE-SEM Analysis)

B3 시료의 저배율($\times 100$ - $\times 500$) 관찰 결과(Fig. 8, 10), 종이 펄프 섬유와 커피 찌꺼기 입자가 전분 기재 내에 서로 얽혀 분포된 섬유 네트워크 구조가 확인되었으며, 파단 면에는 섬유 인발(fiber pull-out)에 의한 공동과 불규칙한 기복이 다수 관찰되었다. $\times 2,000$ 배율에서는 기재가 비교적 치밀하게 충전되어 있었으며 표면에 수 μm 크기의 미세 입자와 기공이 분산되어 있었다. $\times 5,000$ 배율에서는 커피 찌꺼기 입자가 전분 기재에 부분적으로 매립되어 비교적 연속적인 계면을 형성한 것을 확인할 수 있었다. 이는 B3 그룹이 전체 시료 중 가장 높은 밀도(평균 0.80 g/cm^3)를 나

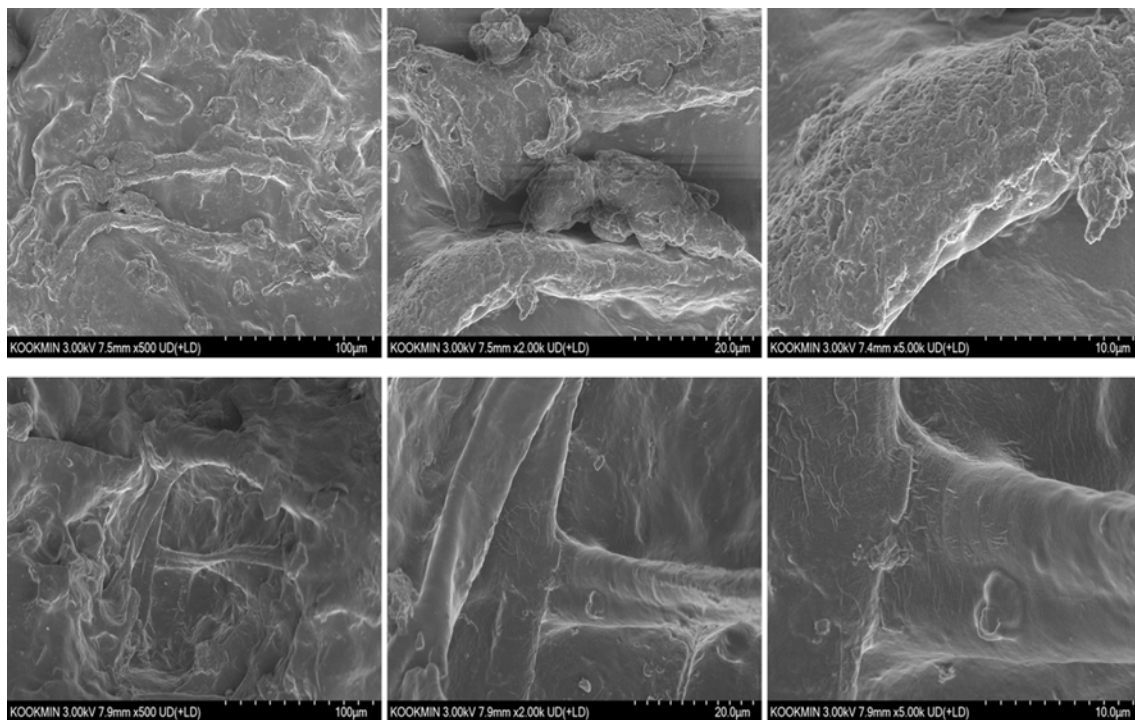


Fig. 9. FE-SEM images of C2 specimen: (a) $\times 500$, (b) $\times 2,000$, (c) $\times 5,000$.

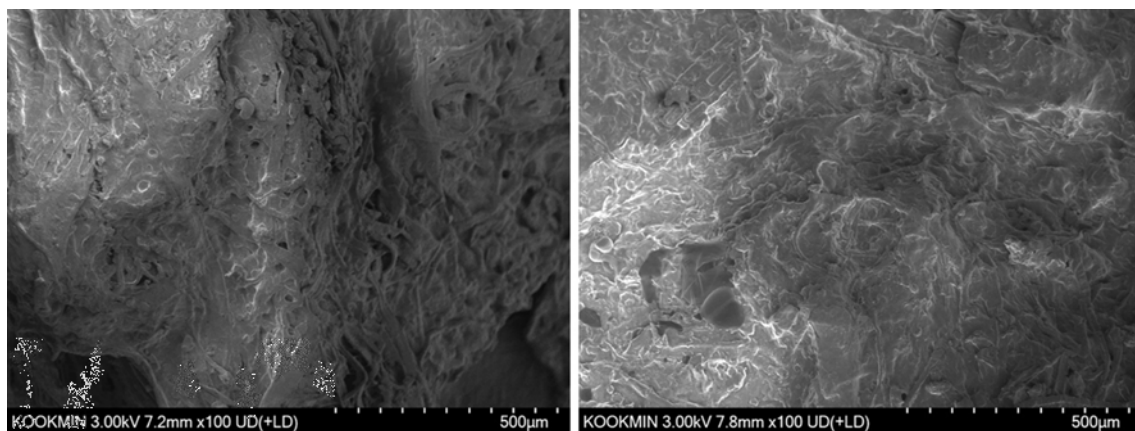


Fig. 10. Overview FE-SEM images of B3 (left) and C2 (right) specimens at $\times 100$.

타낸 결과와 일치하며, 커피 찌꺼기가 섬유 사이 공극을 효과적으로 충전하여 복합재료를 치밀화시켰음을 미시적으로 뒷받침한다.

C2 시료에서는 B3와 뚜렷이 구별되는 미세구조가 관찰되었다(Fig. 9). $\times 500$ 배율에서 바이오차에서 유래한 장섬유상 탄화 구조가 기재를 가로질러 분포하였으며, $\times 2,000$ 배율에서는 불규칙한 형상의 바이오차 입자 응집체가 기재 표면에 돌출되어 거친 표면을 형성하였다. 특히 $\times 5,000$ 배율에서 바이오차 입자 표면은 탄화 과정에서 형성된 다공성·거친 표면 구조를 나타냈으며, 전분 기재가 이 거친 표면에 침투하여 기계적 잠금(mechanical interlocking) 효과를 형성한 것이 관찰되었다. 이러한 바이오차의 다공성 거친 표면 구조는 C2 그룹이 B3보다 낮은 밀도(평균 0.68 g/cm^3)를 보인 원인이며, 후속 흡수율 및 기계적 특성 시험에서 우수한 성능을 나타낼 것으로 예상되는 미시적 근거가 된다.

EDS 분석을 통해 시료의 원소 조성을 정량적으로 평가하였다. Table 7는 각 시료의 면분석(Map sum spectrum) 결과이며, Table 8는 입자 및 기재 영역의 점분석 결과이다.

점분석 결과, B3의 커피 입자(Spec2)에서는 Ca 5.88 wt%, Si 2.72 wt% 등 커피 찌꺼기 유래 무기 성분이 검출되었으며, C2의 바이오차 입자(Spec6)에서는 탄소 함량

Table 7. EDS area analysis results (map sum spectrum) of B3 and C2 specimens

Sample	C (Wt%)	O (Wt%)	Si (Wt%)	Ca / K (Wt%)
B3 면분석	50.22	47.45	0.28	Ca 2.05
C2 면분석	48.92	49.44	0.31	Ca 1.09 / K 0.24

주: B3는 Ca 2.05 wt%, C2는 Ca 1.09 wt% 및 K 0.24 wt% 검출. 면분석상 두 시료의 C/O 비는 각각 1.06, 0.99로 유사하였다.

Table 8. EDS point analysis results (Wt%) of B3 and C2 specimens

Meas. point	Region	C	O	Others
B3-Spec2	커피 입자	60.33	30.73	Si 2.72, Ca 5.88 In 0.33
B3-Spec3	기재	67.02	29.98	Mg 0.63, K 0.73, Ca 1.29, Si 0.24, Na 0.11
B3-Spec4	기재	65.07	32.72	Ca 2.21
C2-Spec5	기재	63.57	35.62	K 0.22, Ca 0.59
C2-Spec6	바이오차 입자	73.42	25.70	K 0.48, Ca 0.41
C2-Spec7	무기 회분 입자	36.62	38.34	Si 13.64, Al 5.59, K 4.59, Fe 0.35, Ca 0.48, Na 0.22, Mg 0.17

Table 9. Key TGA/DTG parameters of A2, B3-2, and C2-2 specimens

Parameter	A2	B3-2	C2-2
T ₅ % (°C)	129.7	128.7	134.2
T ₁₀ % (°C)	161.6	153.9	157.2
T ₅₀ % (°C)	284.0	290.3	289.2
DTG peak(s) (°C)	186, 286	178, 291, 336	179, 284, 330
Residue at 409°C (%)	16.81	18.29	23.12
W at 100°C (%)	97.2	96.3	96.8

이 73.42 wt%로 가장 높고 산소 함량이 25.70 wt%로 가장 낮게 나타났다. 이는 탄화 과정에서 탈수·탈산소 반응에 의해 바이오차 입자 자체에 탄소가 농축되었음을 정량적으로 입증한다. 한편 C2의 일부 영역(Spec7)에서는 Si 13.64 wt%, Al 5.59 wt%, K 4.59 wt% 등 무기 성분이 다량 검출되었는데, 이는 바이오차 탄화 시 원료 내 무기물이 회분(ash) 형태로 농축된 결과로 판단된다. 면분석에서 두 시료의 평균 조성이 유사한 것은 측정 영역이 입자와 기재를 모두 포함하기 때문이며, 입자 단위 점분석에서 비로소 직접 사용(B3)과 탄화 처리(C2)의 본질적 화학 조성 차이가 드러났다.

종합하면, B3는 커피 찌꺼기 입자의 충진에 의한 치밀한 구조를, C2는 바이오차의 다공성 거친 표면에 의한 기계적 잠금 구조와 탄소 농축·무기 회분 형성을 나타내어, 직접 사용과 탄화 처리가 복합재료의 미세구조와 화학 조성에 본질적으로 다른 영향을 미침을 직접적으로 확인하였다.

7. 열중량 분석 (TGA/DTG Analysis)

세 시료의 TGA/DTG 곡선을 Fig. 11에, 주요 열분해 파라미터를 Table 9에 정리하였다. 모든 시료는 질소 분위기에서 두 단계의 열분해 거동을 공통적으로 나타냈다. 1단계($\sim 100\text{--}220^\circ\text{C}$)는 잔류 수분 및 글리세롤 가소제의 증발·분해에 해당하며, 2단계($\sim 230\text{--}380^\circ\text{C}$)는 전분 기재의 주요 열분해에 해당한다⁷⁾.

A2 기준군은 285.6°C 에서 단일 주요 DTG 피크($0.72\%/\text{C}$)를 나타내어, 전형적인 열가소성 전분의 분해 거동을 보였다⁷⁾. 100°C 에서의 잔류 중량(97.2%)이 세 시료 중 가장 높아 초기 열 안정성이 우수하였다.

B3-2(커피 찌꺼기 직접 첨가)는 177.6°C 에서 첫 번째

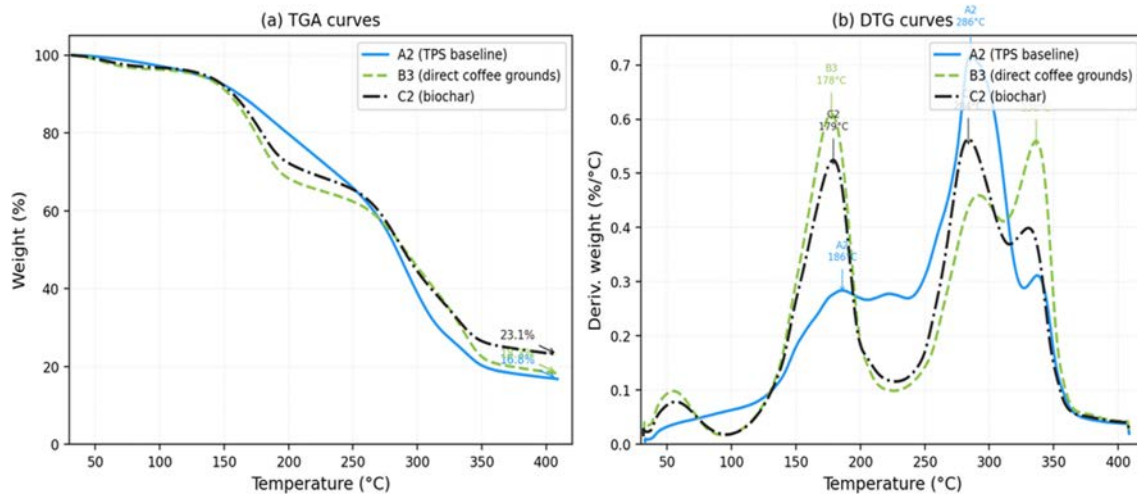


Fig. 11. TGA and DTG curves of A2, B3-2, and C2-2 specimens (TGA Q5000, 10°C/min, N₂ atmosphere).

DTG 피크(0.61%/°C)가 관찰되었다. 이는 커피 찌꺼기 내 잔류 지질·단백질 등 저온 분해성 유기 성분의 존재를 반영하며⁶⁾, 이들이 기재-충진재 계면 접착을 악화시키는 요인 중 하나임을 시사한다. 291°C 부근의 주 분해 피크는 A2의 주피크(285.6°C)와 유사하게 전분 기재의 주요 열분해에 해당하며, 추가로 336.4°C에서 나타난 고온 피크는 A2(285.6°C)보다 약 51°C 높아 커피 찌꺼기의 리그노셀룰로오스 성분이 고온 분해 단계에 기여하는 것으로 보인다.

C2-2(바이오차 첨가)에서는 179.1°C 부근의 초기 DTG 피크가 0.52%/°C로, B3-2(0.61%/°C) 대비 감소하였다. 이는 탄화 처리(450°C, 2시간)에 의해 열불안정 유기 성분이 이미 제거되었음을 뒷받침한다¹²⁾. 두 번째 주요 피크(283.8°C)는 A2의 주피크(285.6°C)와 거의 일치하여, 바이오차가 전분 기재의 주요 분해 거동 자체에는 큰 변화를 주지 않음을 시사한다. 한편 330°C 부근의 추가 고온 피크는 배합에 포함된 천연섬유 성분의 고온 분해에 기인하는 것으로 판단된다.

409°C에서 C2-2의 잔류량은 23.12%로, B3-2(18.29%) 및 A2(16.81%)를 모두 상회한다. 이는 3.6절 EDS 분석에서 확인된 바이오차의 무기 회분(Si 13.64%, Al 5.59%, K 4.59%)과 탄화된 방향족 탄소 구조가 이 온도 범위에서 분해되지 않고 잔류하기 때문이며, C2가 B3 및 A2보다 우수한 내열성을 갖춤을 정량적으로 입증한다.

실용적 관점에서, 세 시료 모두 100°C에서 96% 이상의

중량을 유지하여 (A2 97.2%, B3-2 96.3%, C2-2 96.8%), 컵 슬리브 사용 환경(70-80°C)에서 모두 열적으로 안정함이 확인되었다.

8. 접촉각 분석 (Water Contact Angle Analysis)

세 시료의 대표 접촉각 이미지를 Fig. 12에, 주요 측정 결과를 Table 10에 나타내었다. A2(n=4), B3-2(n=8), C2-2(n=7) 세 시료 모두 측정이 완료되었다.

A2 기준군의 WCA는 $66.8 \pm 14.4^\circ$ (n=4)로 친수성 표면(WCA < 90°)임이 확인되었다. 개별 측정값은 49.4-81.6° 범위로 분포하며, 큰 표준편차(14.4°)는 복합재료 표면의 거친 조직에 기인한다.

B3-2(커피 찌꺼기 직접 첨가)의 WCA는 $91.2 \pm 11.2^\circ$ (n=8)로, A2(66.8°) 대비 24.4° 높아 경계 소수성 표면(WCA ≈ 90°)을 나타냈다. 주목할 점은 B3-2가 A2보다 높은 흡수율(64.3% vs 61.1%)을 보이면서도 표면 접촉각이 더 높다는 것이다. 이는 커피 찌꺼기 내 지질 성분(FT-IR 2851.8 cm⁻¹, C-H 신축 진동)이 복합재료 표면에 집중되어 표면 소수화에 기여하는 반면, 벌크 흡수는 커피 찌꺼기 입자의 모세관 흡수와 리그노셀룰로오스 성분의 친수성에 의해 증가한 결과로 해석된다⁶⁾. 표면 소수성(WCA)과 벌크 흡수율(WA)은 서로 다른 물성 측면을 반영하므로 경향이 다를 수 있다. C2-2(바이오차 첨가)의 WCA는 $76.7 \pm 14.4^\circ$ (n=7)로, A2(66.8°)보다는 높고 B3-2(91.2°)보다는 낮은 중간 수준이

Table 10. Water contact angle (WCA) of composite specimens (sessile drop, n≥4)

Sample	n	WCA Left (°)	WCA Right (°)	WCA mean (°)
A2	4	68.7 ± 15.6	64.9 ± 13.2	66.8 ± 14.4
B3-2	8	90.3 ± 11.7	92.1 ± 11.0	91.2 ± 11.2
C2-2	7	76.9 ± 15.1	76.5 ± 14.2	76.7 ± 14.4

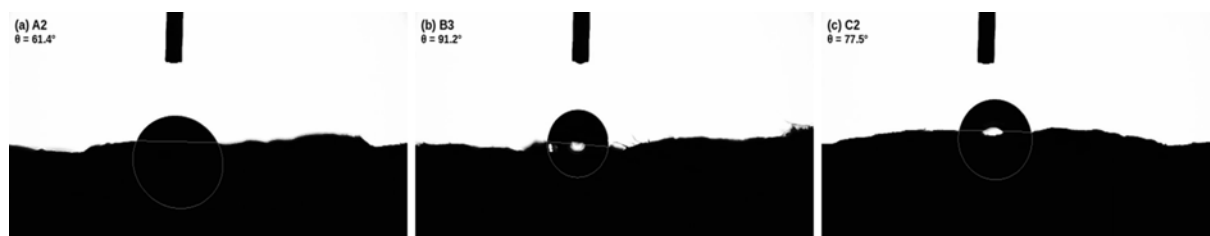


Fig. 12. Representative water contact angle (WCA) images of composite specimens: (a) A2, (b) B3-2, (c) C2-2. For each group, the individual measurement closest to the group mean was selected as representative (A2: 61.4° of mean 66.8° ± 14.4°, n = 4; B3-2: 91.2° of mean 91.2° ± 11.2°, n = 8; C2-2: 77.5° of mean 76.7° ± 14.4°, n = 7).

다. C2-2의 큰 표준편차(14.4°)는 바이오차 표면이 소수성 방향족 탄소 영역¹²⁾과 친수성 무기 회분 영역(Si, Al, K 확인, 3.6절)이 혼재하는 불균질 특성을 반영한다. 세 시료의 WCA 순서는 B3-2(91.2°) > C2-2(76.7°) > A2(66.8°)로 나타났으며, 이는 흡수율 순서 C2(45.0%) < A2(61.1%) < B3(64.3%)와 상이하다.

9. 종합 고찰

본 연구에서 설정한 핵심 비교 가설, 즉 동일 유기성 폐기물이라도 직접 사용(B3)과 탄화 처리(C2)에 따라 복합재료 특성이 크게 달라질 수 있다는 전제가 모든 분석 지표에서 실증적으로 확인되었다. C2(바이오차)는 흡수율(45.0%), 굽힘강도(2.21 MPa), 인장강도(1.20 MPa), 표면 경도(Shore A 84.0), TGA 잔류량(23.12% at 409°C) 등 구조적 내구성 지표 전반에서 우위를 보였다. FT-IR(방향족 탄소 1335 cm⁻¹)^{11,12)}, FE-SEM(다공성 기계적 잠금 구조), EDS(무기 회분 Si·Al·K)(3.6절)의 분석 결과가 C2의 낮은 흡수율·높은 강도·내열성을 복합적으로 뒷받침한다. 반면 B3는 최고 밀도(0.80 g/cm³)와 경계 소수성 표면(WCA 91.2°)이라는 고유 특성을 지니며, 커피 찌꺼기 유래 지질 성분(FT-IR 2851.8 cm⁻¹)의 표면 집적이 소수화 원인으로 분석된다. 다만 계면 접착력 부족으로 인장강도(0.40 MPa)가 기준군 A2(0.57 MPa)에 미치지 못해, 보강 효과를 확보하려면 커플링 에이전트 적용 등 계면 개선이 필요하다.

10. 제품 설계 및 응용

10.1. 설계 개념 및 재료-제품 매칭

개발 복합재료의 특성을 기반으로 세 가지 제품 응용 방

안을 제시한다. 설계 원칙은 재료 물성과 제품 요구사항의 직접적 매칭, 생분해성 강조, 상업화 가능성 고려이다. 각 제품의 3차원 형상은 Rhino(NURBS 서피스 모델링)와 Blender(폴리곤 모델링 및 렌더링)를 사용하여 설계·모델링하였으며, 인공지능 이미지 생성이 아닌 치수 기반 3D CAD 모델링을 통해 제작되었다. 벽 두께, 구조 부재 치수(예: C2 박스 7mm 단일벽, B4 샌드위치 패널 2-3mm 외피)는 3.2절(밀도) 및 3.4절(굽힘강도·표면 경도)에서 보고된 각 배합의 실측값을 참고하여 설정하였다.

제시된 개념 설계의 구조적 타당성을 정성적 물성 매칭(Table 11)에 더해 정량적으로 검증하기 위해, 세 제품 모두에 대해 Autodesk Fusion 360의 정적 응력(Static Stress) 시뮬레이션을 수행하였다. 각 해석은 3.2절(밀도)과 3.4절(굽힘·인장·경도)에서 보고된 실측 기계적 물성을 재료 입력값(밀도, 인장모듈러스, 항복강도로 환산한 굽힘강도, 극한강도로 환산한 인장강도)으로 직접 사용하였으며, 각 제품의 예상 사용 하중(적재, 파지, 수납물 하중)을 경계조건으로 부여하였다. 해석 결과는 Table 12에 요약하였으며, 제품별 상세 결과와 응력 분포는 3.10.2-3.10.4절에서 그림과 함께 설명한다. 본 해석은 선형 정적 하중 조건에 한정되며, 낙하·반복·크리프 등 동적 및 시간 의존적 거동은 포함하지 않는다.

10.2. 제품 1: 커피 브랜드 포장 박스 (C2 기반)

커피 찌꺼기로 커피 제품을 포장하는 순환 경제 모델을 구현한 제품이다. 세 시료 중 실측 역학 데이터가 가장 충분하고 기계적 성능이 가장 우수한 C2 배합을 기반으로 한다. C2의 높은 굽힘강도(2.21 MPa, n=3)와 표면 경도(Shore

Table 11. Material property-product matching analysis

Formulation	Key properties	Suitable product	Core advantages
B3	High density 0.80 g/cm ³ (excellent packing)	Cup sleeve & coaster set	Low cost, coffee-brown aesthetic
C2	Low WA (45.0%), highest flexural/tensile/hardness	Packaging/gift box	High strength, self-supporting single layer, premium matte black
B4	Lowest WA (42.5%); B4 skin + recycled corrugated core composite	Modular storage box	Lightweight stiff sandwich, low WA, circular economy

Table 12. Static structural (FEA) validation summary of the three product designs (Autodesk Fusion 360, Static Stress)

Product	Material input (measured)	Load case	Min. SF	Max. stress (MPa)	Max. disp. (mm)
Packaging box (C2)	$\rho=0.68 \text{ g/cm}^3$, $E=24 \text{ MPa}$, $\sigma_y=2.21 \text{ MPa}$, $UTS=1.20 \text{ MPa}$	39 N vertical (lid, stacking)	15.0	0.145	3.10
Cup sleeve + coaster (B3)	$\rho=0.76 \text{ g/cm}^3$, $E=20 \text{ MPa}$, $\sigma_y=1.24 \text{ MPa}$, $UTS=0.40 \text{ MPa}$	Gravity + 15 N grip + 5 N weight	3.23	0.384	0.99
Storage box (B4 design; B3 property proxy [†])	$\rho=0.76 \text{ g/cm}^3$, $E=20 \text{ MPa}$, $\sigma_y=1.24 \text{ MPa}$, $UTS=0.40 \text{ MPa}$	25 N vertical (stored content)	104.6	0.012	0.011

[†]B4 배합은 다중 스케일 섬유 강화 구조로 인해 B3보다 낮은 흡수율(42.5% vs 64.3%)을 보이므로 실제 강성은 이보다 높을 것으로 예상되며, 따라서 본 해석은 보수적(안전측) 추정에 해당한다. SF: Safety Factor. 상세 논의는 3.10.4절 참조.

A 84.0)는 별도의 심재 없이 단일층(벽 두께 7 mm)만으로 자립 가능한 견고한 구조를 가능하게 하며, 낮은 흡수율(45.0%)은 포장 환경에서의 형태 안정성을 뒷받침한다. 단, 제시된 벽 두께(7 mm)는 3.4절의 굽힘강도 실측값($n=3$)에 기반한 예비 설계값이며, 실제 적재·낙하 충격에 대한 정량적 안전성은 시제품 제작 후 낙하시험 등을 통한 후속 검증이 필요하다. 외부 치수는 $25 \times 20 \times 8 \text{ cm}$, 내부는 3 mm 두께 칸막이로 구획하고, 슬라이딩 분리형 덮개(높이 15 mm)를 적용하였다(Fig. 13, 14). 바이오차 특유의 매트 블랙 외관이 프리미엄 패키지 미감을 제공하며, 표면에 핫프레스로 압인이 가능하다. 전 구성요소가 생분해 가능하여 순환경제 내러티브가 완결된다. 예상 제조 원가는 약 ₩150-250/개이며, 프리미엄 소매가 ₩5,000-10,000 수준이 가능

하다.

설계 하중 하에서의 구조적 타당성을 정량적으로 검증하기 위해, Autodesk Fusion 360의 정적 응력(Static Stress) 시뮬레이션을 수행하였다. 재료 물성은 C2의 실측값(밀도 0.68 g/cm^3 , 인장모듈러스 24 MPa, 굽힘강도 2.21 MPa를 항복강도로, 인장강도 1.20 MPa를 극한강도로 적용)을 그대로 입력하였으며, 몸체와 덮개를 결합(bonded contact)한 조립체 모델에 적재·운송 중 상부 압축을 가정한 39 N의 수직 하중을 덮개 상면에 부여하고 저면을 고정 조건으로 설정하였다(파라볼릭 요소, 11,275절점, 5,660요소). 해석 결과 최소 안전계수는 15.0으로 항복 기준을 충분히 상회하였으며, 최대 Mises 등효응력은 0.145 MPa로 C2의 항복강도(2.21 MPa) 대비 약 15분의 1 수준에 그쳤고, 최대 변

**Fig. 13.** Packaging/gift box (C2 formulation) rendering: open state showing the single-layer body and internal compartment divider.

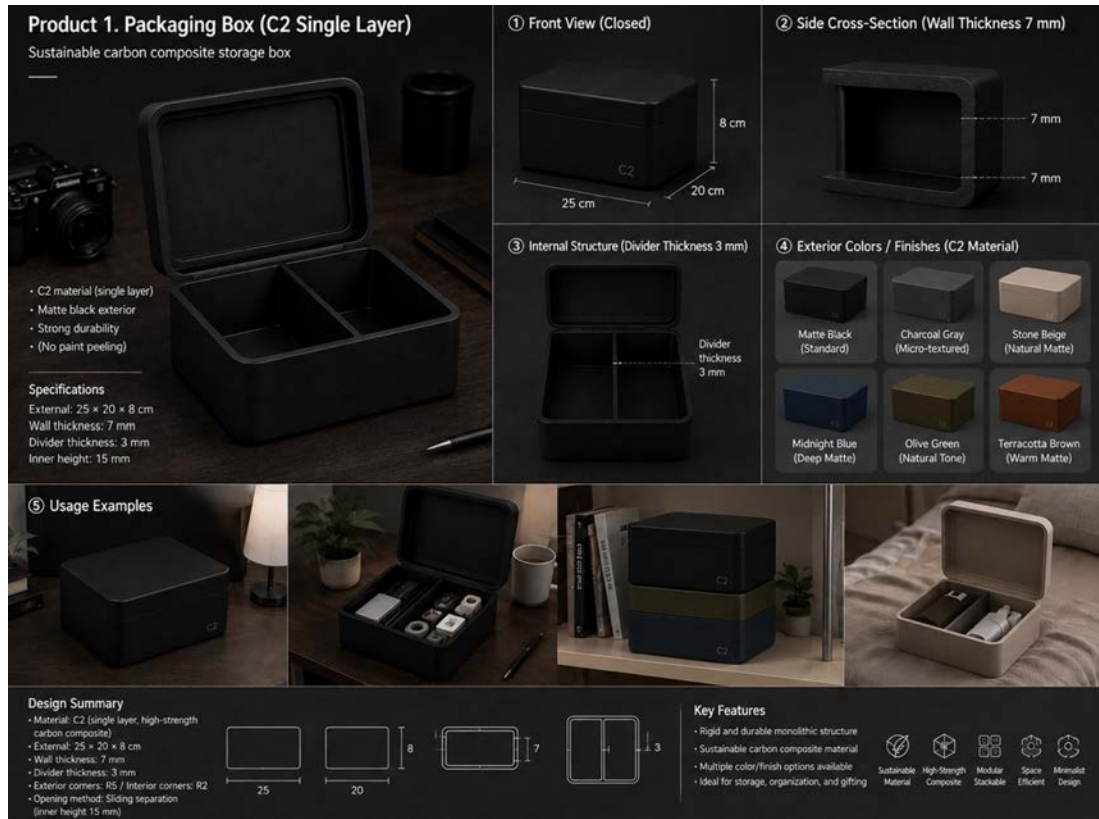


Fig. 14. Packaging box (C2) design specifications: closed front view, side cross-section (7 mm wall thickness), internal layout (3 mm divider), exterior color and texture options, and application scenarios.

위는 덮개 중앙부에서 3.10 mm로 산출되었다(Fig. 15). 이는 39 N 하중 조건에서 설계 형상이 구조적으로 충분한 여유를 가짐을 정량적으로 뒷받침한다. 다만 본 해석은 정적 하중만을 다루므로, 실제 유통 과정의 낙하·충격에 대한 검증은 시제품 낙하시험 등 후속 실험적 연구가 필요하다.

10.3. 제품 2: 생분해성 컵 슬리브·받침 세트 (B3 기반)

B3 배합의 높은 충전 밀도(0.80 g/cm^3)와 커피 갈색 자연 미감을 활용한다. 슬리브(전개 높이 8 cm, 두께 2.5-3 mm)는 착용 시 컵 외벽이 주 하중을 지지하므로 B3의 낮은 인장 강도(0.40 MPa)가 실용 기능에 미치는 영향이 제한적이며, 코스터(직경 9-10 cm, 두께 4-5 mm)는 정적 분산 하중 조

건에서 충분한 성능을 발휘한다(Fig. 16,17). 다만 반복 사용에 따른 마모·피로 특성은 본 연구에서 평가되지 않았으므로, 실사용 전 내구성 검증이 필요하다. 기존 평판 성형 공정(SOP Phase 1-8)을 그대로 적용하여 사다리꼴·원형 재단만으로 제작 가능하며, 사용 후 가정 퇴비화가 가능한 것으로 기대된다(분해 기간은 전분계 소재 문헌을 참고한 추정치로, 본 연구에서 실측하지 않음). 본 연구에서 시뮬레이션하여 설계한 생분해성 컵 슬리브 받침 세트의 경제성 분석을 10.5에 제시한 원재료 원가를 기준으로 실시한 결과, 예상 제조원가 ₩25-40/세트와 소매가 ₩1,000-1,500으로 각각 산출되었다.

구조적 타당성을 검증하기 위해 B3-2의 실측 물성(밀도

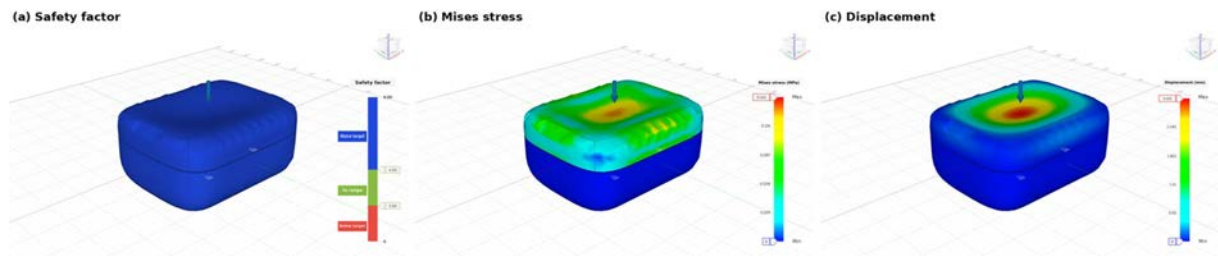


Fig. 15. Static structural FEA of the packaging box (C2), 39 N stacking load on the closed lid, bonded box-lid assembly: (a) safety factor, (b) Mises equivalent stress, (c) displacement.



Fig. 16. Cup sleeve and coaster set (B3 formulation) design: sleeve flat pattern (24 × 8 cm), coaster (Ø 10 cm), and coaster cross-section detail.



Fig. 17. Cup sleeve and coaster set (B3) usage scenario: sleeve fitted on a cup with the coaster in use.

0.76 g/cm³, 인장모듈러스 20 MPa, 굽힘강도 1.24 MPa를 항복 강도로, 인장강도 0.40 MPa를 극한강도로 적용) 을 입력하여 정적 응력 해석을 수행하였다. 슬리브가 컵에 장착되고 받침 위에 놓인 상태를 하나의 연속 셀 형상으로 근사하고, 컵과 내용물의 자중(중력 가속도 9.807 m/s²), 손으로 감싸 쥐는 파지력(15 N, 경사 방향), 수직 하중(5 N)을 동시에 부여하였다(51,988절점, 27,967요소). 해석 결과 최소 안전 계수는 3.23으로 안전 범위 내에 있었으나, 최대 Mises 등효응력(0.384 MPa)이 B3의 실측 인장강도(0.40 MPa)에 근접하여(Fig. 18), 3.4절에서 확인된 B3의 계면 접착력 부족 및 낮은 인장강도가 실사용 하중 조건에서도 상대적으로 낮

은 여유도로 이어짐을 정량적으로 확인하였다. 최대 변위는 슬리브 상단 테두리에서 0.99 mm로 산출되었다. 이 결과는 10.5절 한계에서 논의한 바와 같이 커플링 에이전트 등을 통한 계면 개선이 이루어질 경우 설계 여유도가 추가로 향상될 수 있음을 시사한다.

10.4. 제품 3: 모듈형 수납 박스 (B4 기반)

전체 시료 중 가장 낮은 흡수율(42.5%)과 다중 스케일 섬유 복합 특성을 지닌 B4 배합을 기반으로 한 물성 기반 개념 설계이다. B4 단일 배합의 독립적 역학 데이터가 아직 확보되지 않은 점을 고려하여, B4 외장층(2-3 mm)과 재

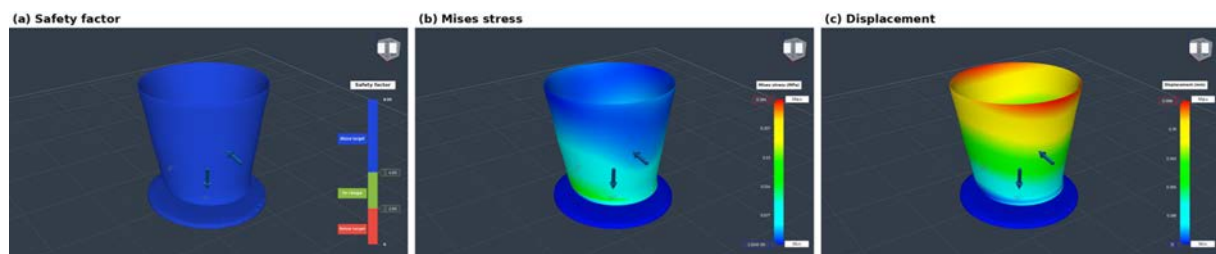


Fig. 18. Static structural FEA of the cup sleeve and coaster (B3), combined gravity + 15 N grip force + 5 N vertical load: (a) safety factor, (b) Mises equivalent stress, (c) displacement.

생 골판지 심재(3-4 mm)를 전분계 수성 접착제로 접합한 복합 층(샌드위치) 구조를 채택하여 큰 패널에서도 충분한 휨 강성을 확보하였다. 내벽에는 45° 교차 격자 리브를 두어 좌굴을 억제하였다. 소형($12 \times 12 \times 8$ cm), 중형($15 \times 15 \times 10$ cm), 대형($18 \times 18 \times 12$ cm)의 세 모듈로 구성되며, 4귀통이 3 mm 돌기-홈 적층 연결부로 공간 효율을 극대화한다(Fig. 19). B4의 낮은 흡수율(42.5%)과 샌드위치 구조의 높은 비강성이 일반 실내 환경(습도 40-60% RH)에서의 내구성을 뒷받침한다. 단, B4 단일 배합의 실측 역학 데이터가 미확보된 상태이므로 실용 설계 시 안전율 2-3배 적용이 권장되며, 시제품 제작 후 적재 시험으로 검증이 필요하다. 커피 갈색의 자연스러운 텍스처로 사무·생활 공간에 적합하며, 폐기 후 생분해 처리가 가능할 것으로 기대된다(분

해 기간은 추정치로 후속 연구의 실측이 필요하다). 본 연구에서 시뮬레이션하여 설계한 모듈형 수납박스의 경제성 분석을 3.10.5에 제시한 원재료 원가를 기준으로 실시한 결과, 예상 제조원가 ₩80-120/개(소형)와 소매가 ₩800-2,000으로 각각 산출되었다.

B4 배합 자체의 독립적 기계적 물성은 아직 측정되지 않았으므로, 동일 다중섬유 계열 중 실측값이 있는 B3-2의 물성(밀도 0.76 g/cm^3 , 인장모듈러스 20 MPa, 굽힘강도 1.24 MPa를 항복강도로, 인장강도 0.40 MPa를 극한강도로 적용)을 보수적 근사치로 적용하여 정적 응력 해석을 수행하였다. B4는 나노·마이크로·밀리 스케일 섬유가 모두 포함된 다중 스케일 복합 구조이며 B3보다 흡수율이 낮으므로(42.5% vs 64.3%), 실제 강성은 본 해석값보다 높을 것으로 예상된다.



Fig. 19. Modular storage box (B4 composite formulation) design: three-module set (S/M/L), 45° internal lattice ribs, and composite cross-section (B4 skin 2-3 mm + recycled corrugated core 3-4 mm).

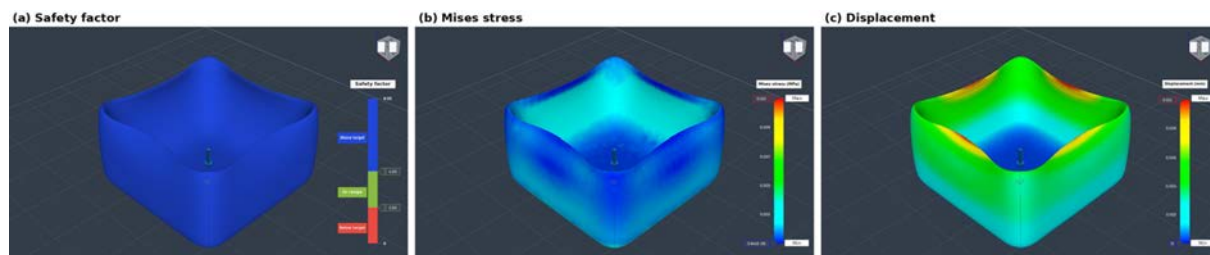


Fig. 20. Static structural FEA of the modular storage box (B4 design; B3 measured properties applied as a conservative proxy), 25 N load on the interior base: (a) safety factor, (b) Mises equivalent stress, (c) displacement.

모듈 저면 중앙에 수납물 하중을 가정한 25 N의 수직 하중을 부여하고 저면을 고정 조건으로 설정하였다(23,072절점, 12,634요소). 해석 결과 최소 안전계수는 104.6으로 매우 큰 여유를 보였으며, 최대 Mises 등효응력은 0.012 MPa, 최대 변위는 0.011 mm에 불과하여(Fig. 20), 일반적인 수납 용도 하중 범위에서 구조적으로 과설계 (over-designed) 수준의 안전성을 갖는 것으로 나타났다. 다만 이는 B3 물성을 이용한 보수적 근사 해석이며, B4 고유의 실측 물성 확보 후 재검증이 필요하다는 점에서, 실용 설계 시 안전을 2-3배 적용 권장 및 적재 시험을 통한 검증이라는 기존 방침을 유지한다.

10.5. 경제성 분석

원재료 총 비용은 약 ₩1,000/kg(옥수수 전분 ₩1,500, 글리세롤 ₩2,000, 레시틴 ₩5,000, 섬유류 ₩0-100/kg 기준). 각 제품의 예상 원가 및 소매가는 Table 11 매칭 분석에 제시한 범위와 같으며(원재료 단가에 기반한 예비 추정치로 실제 양산 원가와 차이가 있을 수 있음), 스페셜티 커피 시장과 ESG 트렌드에 따른 친환경 포장 수요 확대와 함께 상업화 가능성이 높은 것으로 보인다.

요 약

본 연구에서는 커피 찌꺼기 강화 전분 기반 복합재료를 제작하고, 동일 복합재료 시스템 내에서 직접 사용(B3)과 탄화 처리(C2)를 체계적으로 비교하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

첫째, 밀도 측정 결과 B3 그룹이 평균 0.80 g/cm^3 로 가장 높은 충전 효과를 나타냈으며, C2 그룹은 평균 0.68 g/cm^3 로 바이오차의 다공성 구조를 반영하였다.

둘째, 흡수율 측면에서 C2(45.0%)가 B3(64.3%) 대비 현저히 낮았으며, B4(42.5%)가 전체 시료 중 최저를 기록하였다. 바이오차의 소수성 탄화 구조가 C2의 낮은 흡수율의 주요 원인이며, FE-SEM에서 미시적으로 확인되었다.

셋째, 복합재료 성형 공정에 한해 가정용 전기밥솥과 오븐만으로 저기술 환경에서 재현 가능함을 확인하였다(단,

바이오차는 별도의 고온 탄화 전처리를 거쳐 사용). B3와 C2 그룹을 각각 2개씩 제작하여 제조 공정의 재현성을 직접 검증하였다.

넷째, 개발된 재료의 특성에 기반하여 포장 박스(C2), 컵 슬리브·반침 세트(B3), 수납 박스(B4)의 세 가지 제품 응용 방안을 제시하였다. 특히 커피 찌꺼기로 커피 제품을 포장하는 완전한 순환 경제 모델은 환경적·상업적 가치를 동시에 실현한다.

다섯째, C2는 굽힘강도(2.21 vs 1.24 MPa, $n=3$), 인장강도(1.20 vs 0.40 MPa), 표면 경도(Shore A 84.0 vs 55.0) 모든 지표에서 B3를 상회하였다. 특히 B3의 인장강도(0.40 MPa)가 무첨가 기준군 A2(0.57 MPa)에도 미치지 못한 것은 계면 접착력 부족의 직접적 결과로, 커피 찌꺼기 직접 첨가 방식의 보강 한계를 실증한다. 탄화 처리(C2)는 다공성 방향족 탄소 구조의 기계적 잠금 효과로 강도와 경도를 동시에 향상시켜, 동일 유기성 폐기물이라도 처리 방식에 따라 기계적 성능이 크게 달라짐을 보여주었다.

여섯째, TGA/DTG 분석 결과 C2-2의 409°C 잔류량(23.12%)이 B3-2(18.29%) 및 A2(16.81%)를 상회하여, 바이오차의 탄화 구조 및 무기 회분에 의한 우수한 내열성이 확인되었다. 세 시료 모두 100°C 에서 96% 이상의 중량을 유지하여 컵 슬리브 적용 온도 범위($70\text{--}80^\circ\text{C}$)에서의 열안정성도 검증되었다.

일곱째, 접촉각 분석 결과 세 시료의 WCA는 B3-2 ($91.2 \pm 11.2^\circ$) > C2-2($76.7 \pm 14.4^\circ$) > A2($66.8 \pm 14.4^\circ$) 순으로 나타났다. B3-2의 높은 WCA는 커피 찌꺼기 지질 성분의 표면 집적에 기인하며, C2-2의 중간 WCA는 바이오차의 방향족 탄소(소수성)와 무기 회분(친수성)의 혼재를 반영한다. WCA 순서(A2 < C2 < B3)가 흡수율 순서(C2 < A2 < B3)와 일치하지 않음은, 표면 소수성과 벌크 흡수율이 각각 표면 에너지와 다공성·모세관 흡수 구조를 반영하는 서로 다른 물성임을 보여준다.

향후 연구 과제: (1) 장기 내구성 및 생분해 속도 정량 평가, (2) 대규모 생산 공정 최적화, (3) 다양한 형상의 제품 개발 및 실제 사용 환경 검증, (4) 전과정 평가(LCA)를 통한 환경 영향 정량화, (5) 커피 찌꺼기 공급원 및 탄

화 조건이 바이오차 특성에 미치는 영향 연구, (6) ASTM D790이 권고하는 반복 시험($n \geq 5$) 확보를 통한 굽힘 특성의 통계적 검증 및 A2 굽힘 데이터 보완, (7) 커플링 에이전트 처리를 통한 B3의 계면 접착력 개선 및 표면 소수성·기계적 특성 동시 향상 연구. 또한 본 연구의 B3/C2 비교는 단일 변수 대조가 아니라 실제 적용 가능한 배합 체계 수준의 비교이며, 탄화에 의한 화학 구조 변화는 FT-IR 분석으로 독립적으로 뒷받침된다. (Amide II 소실 + 방향족 탄소 피크 발생)

본 연구는 커피 찌꺼기의 동일한 복합재료 시스템 내에서 직접 사용과 탄화 처리를 체계적으로 비교하고, 다중 스케일 섬유의 복합 적용 효과를 검토하였다. 제시된 저기술 제조 방법과 제품 응용 방안은 순환 경제 실현과 지속가능한 소재 개발에 실질적으로 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구를 지도해 주신 지도교수님께 깊이 감사드립니다. 실험 지원과 조언을 아끼지 않은 연구실 동료들에게도 감사의 말씀을 전한다.

References

- Mohanty, A.K., Misra, M. and Hinrichsen, G. 2000. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromol. Mater. Eng.* 276-277(1): 1-24.
- Bastoli, C. 1998. Properties and applications of Mater-Bi starch-based materials. *Polym. Degrad. Stab.* 59(1-3): 263-272.
- Geyer, R., Jambeck, J.R. and Law, K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3(7): e1700782.
- Ministry of Environment of Korea. 2022. Comprehensive measures for reducing plastic use and promoting recycling. Ministry of Environment, Seoul.
- Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation (aT). 2023. Coffee, Processed Food Segment Market Status Report. aT Food Information Statistics (aT FIS), Naju, Korea.
- Ballesteros, L.F., Teixeira, J.A. and Mussatto, S.I. 2014. Chemical, functional, and structural properties of spent coffee grounds and coffee silverskin. *Food Bioprocess Technol.* 7(12): 3493-3503.
- Avérous, L. 2004. Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review. *J. Macromol. Sci. Polym. Rev.* 44(3): 231-274.
- Müller, C.M.O., Yamashita, F. and Laurindo, J.B. 2008. Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films. *Carbohydr. Polym.* 72(1): 82-87.
- Moustafa, H., Guizani, C., Dupont, C. et al. 2017. Utilization of torrefied coffee grounds as reinforcing agent to produce high-quality biodegradable PBAT composites. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 5(2): 1906-1916.
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H.A. et al. 2015. Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends Food Sci. Technol.* 45(1): 24-36.
- Das, O., Bhattacharyya, D., Hui, D. et al. 2016. Mechanical and flammability characterisations of biochar/polypolypropylene biocomposites. *Composites Part B* 106: 120-128.
- Lehmann, J. and Joseph, S. 2015. *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd Ed., Routledge, New York.
- Faruk, O., Bledzki, A.K., Fink, H.P. et al. 2012. Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Prog. Polym. Sci.* 37(11): 1552-1596.
- Abdul Khalil, H.P.S., Bhat, A.H. and Ireana Yusra, A.F. 2012. Green composites from sustainable cellulose nanofibrils: A review. *Carbohydr. Polym.* 87(2): 963-979.
- Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A.P. et al. 2010. Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactic acid (PLA) prepared by twin screw extrusion. *Compos. Sci. Technol.* 70(12): 1742-1747.
- López, O.V., Versino, F., Villar, M.A. et al. 2015. Agro-industrial residue from starch extraction of *Pachyrhizus ahipa* as filler of thermoplastic corn starch films. *Carbohydr. Polym.* 134: 324-332.
- Versino, F., López, O.V. and García, M.A. 2015. Sustainable use of cassava (*Manihot esculenta*) roots as raw material for biocomposites development. *Ind. Crops Prod.* 65: 79-89.
- Ma, X., Yu, J. and Kennedy, J.F. 2005. Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites. *Carbohydr. Polym.* 62(1): 19-24.

투고: 2026.07.10 / 심사완료: 2026.08.05 / 게재확정: 2026.08.20

오이 재배방법에 따른 과실 생육과 수확후 필름포장에 의한 품질 비교: 수확전 재배환경과 수확후 포장 처리에 따른 영향 분석 및 조절된 매개 모형을 이용한 모델링

이정수*

국립원예특작과학원

Growth and Postharvest Quality Characteristics of Cucumber (*Cucumis sativus* L.) as Affected by Cultivation Method and Postharvest Film Packaging: Analysis of Preharvest and Postharvest Factors and Modeling via a Moderated Mediation Model

Jung-Soo Lee*

National Institute of Horticultural & Herbal Science, Rural Development Administration, WanJu, 58500, Korea

Abstract This study investigated the effects of cultivation method (open-field vs. greenhouse cultivation) and post-harvest film packaging on quality changes in cucumbers during storage at 10°C. At harvest, open-field-grown cucumbers had greater fruit weight and length, as well as higher firmness and chlorophyll content, whereas greenhouse-grown cucumbers had higher flesh moisture content. These results indicated that preharvest cultivation conditions affected fruit growth and initial quality characteristics. During storage, the effects of cultivation method on firmness and chlorophyll content persisted to some extent, whereas fresh weight loss was more strongly affected by film packaging, indicating that postharvest treatment could modify quality characteristics formed before harvest. Similarly, changes in moisture content during storage were more strongly affected by film packaging than by cultivation method, with greater changes observed in non-packaged cucumbers. Moderated mediation analysis showed that postharvest film packaging (P) moderated the pathway through which initial quality characteristics (H), formed by preharvest cultivation method (C), affected cumulative quality changes (Y, AUC) during storage. Based on these findings, this study proposes the concept of “Variation in quality and morphology across pre- and post-harvest stages,” termed SuHyoung Variation, to describe the continuous changes in quality characteristics initially formed before harvest as they are subsequently modified by postharvest factors such as packaging and storage conditions. In conclusion, these results demonstrate the importance of linking preharvest cultivation conditions with postharvest management to maintain cucumber quality and marketability during storage.

Keywords Cucumber, Storage temperature, Film packaging, Marketability

서 론

원예작물의 재배방법 등 수확전 요인을 고려한 수확후 처리에 의한 품질관리에 대한 검토가 요구되고 있다¹⁾. 오이는 노지재배뿐만 아니라 비닐하우스와 같은 시설재배로 통해

연중 생산되고 있으며²⁾, 국내에서는 수확후 상온에서 유통 관리되어 소비자에게 공급되고 있다³⁾. 오이의 유통은 수확 후 신선상태로 온도 관리 없이 출하되고 있어 수확후의 품질관리가 부족하여 상품성 저하에 대한 우려가 있을 뿐만 아니라⁴⁾ 수확전 요인에 따른 고려가 전무한 실정이다. 오이는 불량한 저장·유통 환경 하에서 과피의 색택 변화와 같은 품질 저하로 인해 문제가 발생되어 유통 중에 약 20% 정도 감모가 발생하는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 오이를 10~12°C에서 저장하는 것이 품질 유지에 효과적인 것으로 알려져 있으며²⁾, Park과 Kim⁵⁾은 MA 필름포장이 오이의 품질 유

*Corresponding Author: Jung-Soo Lee
National Institute of Horticultural & Herbal Science, Rural Development Administration, WanJu, 55365, Korea
Tel: +82-63-5346-6420
E-mail: ljs808@korea.kr

지에 효과적이라고 보고하였고, Lee 등⁶⁾은 원예작물 저장 시 포장의 효과에 따라 수확후 상품성이 따라 달라질 수 있다고 하였다. 오이는 다른 원예산물과 마찬가지로 수확후 관리 요건뿐 만 아니라 수확전 요인과 같은 다양한 요소에 의해 영향을 받을 수 있지만⁷⁾, 이에 대한 연구가 미비한 실정이다. 따라서 수확전 재배요인에 의해 형성된 품질 차이를 파악하고, 품질 특성이 수확 후 관리에 따라 변화 정도를 분석하여 수확 전·후 요인이 품질 변화에 미치는 관계를 규명할 필요가 있어, 재배방법에 의해 형성된 수확 시 품질 특성이 수확후 필름포장에 따라 저장 중 변화를 조사하고, 조절된 매개모형을 적용하여 수확 전·후 요인이 품질 변화에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구를 통해 수확 전 재배환경이 수확후 저장 품질 간에 미치는 인과관계를 구명함으로써, 향후 원예산물의 수확후 품질 유지 기술 개발을 위한 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

재료 및 방법

1. 재배와 저장 방법

오이의 재배방식에 따른 생육 특성을 검토하고자, 실험 재료는 '베테랑'(해오름종묘, 한국)을 이용하였으며, 재배방법은 노지재배와 비닐하우스를 이용한 시설재배로 구분하였

다. Fig. 1과 같은 형태로 노지재배 오이는 홍천에서, 시설재배 오이는 천안의 비닐하우스에서 두께 0.15 mm의 PO (polyolefin) 필름으로 피복한 '농가보급형 온실 1-2W형' 연동형에서 같은 시기에 재배하여 수확한 것을 이용하였다. 수확한 오이는 저온 저장 중 필름 포장 여부에 따른 선도 유지 효과를 검토하고자, Fig. 2와 같이 플라스틱 용기(53 × 35 × 9 cm)에 4 kg을 선별하여 담았으며, 포장 방법은 필름 포장 여부에 따라 무포장과 유공 PE(Polyethylene, 두께: 20 μ m, 편향간격: 1 × 1 cm, Φ = 1 mm, 70 × 60 cm) 필름(숨쉬는 저장비닐, 탑프레쉬, 한국)으로 구분하였다. 수확후 저장은 일반 매장에서 사용되는 쇼케이스형 냉장고(Zikor, Samsun Inc., Korea)에서 10 ± 1°C에서 하였다. 품질 변화의 시기별 기술을 위해 수확 직후(0일)를 초기, 7~14일을 중기, 21~28일을 후기로 구분하였다.

2. 생육조사

오이 과실 생육 조사는 농촌진흥청 조사기준표⁸⁾에 따라 과중·과고·과폭 등을 측정하였다.

3. 생체중량 변화

입고 시 초기 중량과 1주 간격으로 측정된 생체중량의 차이를 계산하여 생체중량 감소 정도를 백분율로 산출하였다.



Fig. 1. 'Veteran' cucumber grown under differnt cultural methods in Korea. (A) 'Veteran' cucumber on open field culture; (B) 'Veteran' cucumber on plastic house culture.



Fig. 2. Different packaging types of cucumber in plastic box with or without inner PE(polyethylene) film. (C) 'Veteran' cucumber in unpackaged plastic box; (D) 'Veteran' cucumber in plastic box with PE film packaging.

4. 경도

경도는 Lee 등⁹⁾의 방법을 참고하여 물성측정기(Texture analyzer TA.XT2, SMS, Godalming, UK)를 이용하였다. 오이 과피와 과육의 경도는 탐침법(probing)으로 직경 5 mm의 plunger를 이용하여 depression limit 25 mm, test speed 2 mm·sec⁻¹ 조건에서 측정하였다.

5. 수분 함량

오이를 1주 간격으로 과육 부분을 샘플링하여, 농촌진흥청 조사기준표⁸⁾에 따라 105°C 건조법에 의해 생체중과 건물중을 측정하여 수분함량을 백분율로 환산하여 나타내었다.

6. 가용성고형물(Solid soluble contents)

가용성고형물(SSC)은 농촌진흥청 조사기준표⁸⁾에 따라 과육 부위를 채취한 후 착즙하여 디지털당도계(PAL-1, Atago Co. LTD, Tokyo, Japan)로 측정하였다.

7. 색상 변화

색차계(CR-300, Minolta, Japan)를 이용하여 오이 꼭지쪽의 상단 부위에서 색상차를 조사하였다. McGuire¹⁰⁾와 Cho 등¹¹⁾의 보고에 따라 색상차는 lightness*(명도), hunter a*(red-green)와 b*(yellow-blue)값을 측정하였으며, 측정된 값으로부터 hunter a*와 b*값을 이용하여 hue angle(°)값을 환산하였다. 계산 시에 $a^* > 0$ 이고 $b^* > 0$ 일 때 hue angle(°) = $\tan^{-1}(b^*/a^*)$ 식을, $a^* < 0$ 이고 $b^* > 0$ 일 때 hue angle(°) = $180 + \tan^{-1}(b^*/a^*)$ 식을 적용하여 산출하였다.

8. 총 엽록소 함량(Total chlorophyll Content)

Nagata¹²⁾의 방법을 참고하여, 시료 5 g을 80% 아세톤으로 추출 후 원심분리하여 spectrophotometer(Du-650, Bio Tek Instrument Inc., USA)를 이용하여 645 nm와 663 nm에서 흡광도를 측정하고, 총 엽록소 함량을 산출하였다.

9. 선도 및 외관의 변화

Jeong 등¹³⁾의 방법을 참고로 하여 외관의 선도 변화에 의한 상품성 지수를 5명의 평가원들이 1주 간격으로 오이의 색, 형태 변화, 신선도 등을 상등급에서 하등급까지 5단계를 두어 조사하였다. 평가 기준은 4점 = 매우 신선, 수확 당시와 유사; 3점 = 선도 약간 저하, 광택 비슷, 시장판매 가능; 2점 = 선도저하, 변색, 시장성 상실; 1점 = 연화 시작, 짓무름 및 부패시작; 0점 = 식용불가로 설정하였다. 상품성 평가와 함께 외관 변화를 촬영하였다.

10. 통계분석 및 모델링

재배와 수확후 저장 실험 처리 분석은 완전임의 5반복으로 통계 처리하였다. 재배방법에 따른 생육 특성 분석은 T-

test로 실시하였고, 수확후 특성은 분산분석(ANOVA)을 수행하였으며, 평균 간의 유의차 검증은 Duncan's multiple range test를 이용하여 유의수준 $p < 0.05$ 에서 분석하였으며, 통계분석은 SAS(ver.9.2, SAS Inc., USA)를 이용하였다. 모델링을 위한 통계 기법과 분석은 수확전 재배환경이 수확시 초기 품질 특성을 경유하여 저장 중 누적 품질 변화량에 미치는 인과 경로를 구명하고, 수확후 포장 처리에 의한 저장 중의 선도유지 조절효과를 검증하고자 Hayes¹⁴⁾가 제안한 PROCESS Macro에 기반한 조절된 매개모형(Moderated Mediation Model)을 적용하였다. 실험 요인은 수확전 요인인 재배방법 2수준[노지재배(독립변수 C = 1), 시설재배(C = 0)]과 수확후 요인인 포장처리 2수준[필름포장 여부(조절변수 P = 1), 무포장(P = 0)]으로 설정하였다. 본 연구는 다수의 품질지표를 하나의 모형에 동시에 포함하는 복잡한 다중 지표 구조 대신에 선별된 주요 품질 지표(생체중량 감소율, 과피 경도, 총 엽록소 함량)별로 개별적으로 매개 분석을 수행하여 해석의 명확성을 확보하고자 하였다. 매개변수(H)는 포장 처리 전 수확 시점에서 측정한 품질 특성의 측정치로 설정하였으며, 종속변수(Y)는 28일간의 저장 기간 동안 발생하는 각 품질지표에서 나타난 변화 추이를 통합하여 정량화한 곡선하면적(Area Under the Curve, AUC)을 적용하여 산출하였다.

결과 및 고찰

1. 생육

오이 재배방법에 따라 수확한 과실 생육 등에서 차이가 나타났다. 오이는 재배방식에 따라 과실의 생육뿐만 아니라 내부 품질 특성에서도 차이를 보여, 시설재배와 노지재배 간에 과중, 과고와 같은 외형적으로 보이는 형태적인 생육량 차이뿐만 아니라, 경도·수분함량·엽록소 함량 등 내부 조직 구성과 관련된 품질 특성에서도 차이를 확인할 수 있었다. 오이의 시설 또는 노지와 같이 재배방법을 달리하여 수확한 오이 생육은 Table 1과 같이 과중·과고 등의 외형적 생육과 경도나 수분함량 등의 조직 구성에서 유의차이를 보였다. ‘베테랑’ 오이의 생육에서 과중은 노지재배에서 247.9 g으로 시설재배의 194.8 g 보다 무거웠으며, 과고는 노지재배에서 25.1 cm로 시설재배의 22.5 cm보다 길게 나타나, 노지재배가 더 큰 것으로 나타났다. 생육 특성 외에도 내부 품질 지표인 경도, 수분함량, 엽록소 함량에서 유의차이를 보였다. 과피 경도뿐만 아니라 과육 경도에서도 유의적인 차이를 보였는데, 과피에서 노지재배 오이가 40.4 N인데 반해 시설은 33.7 N이었고, 과육은 노지재배 오이가 24.6 N으로 시설재배 오이의 22.2 N에 비해 높게 나타나, 노지재배 방식의 오이 과실 조직이 더 단단한 경향을 보였다. 과실의 표면 색도를 나타내는 L*, a* 및 b*값에서 재배방식 간에 통계

Table 1. Growth parameters of ‘Veteran’ cucumber as affected by cultural methods

Cultural method ¹⁾	Fruit			Soluble solids content (°Brix)	Fruit firmness (N)		Moisture content (%)	Fruit color			Hue angle (°)	Total chlorophyll (µg·mL ⁻¹)
	weight (g)	height (cm)	width (cm)		skin	flesh		L*	a*	b*		
Open field culture	247.9	25.1	37.1	2.9	40.4	24.6	95.8	59.2	-16.2	30.4	118.1	23.5
Plastic house culture	194.8	22.5	34.3	2.9	33.7	22.2	96.6	64.7	-15.7	29.4	117.6	11.4
T-test	*	**	NS	NS	*	*	*	NS	NS	NS	NS	*

¹⁾Refer to Fig. 1 for cultural method.

적인 유의차가 인정되지 않았는데, 명도를 나타내는 L*값은 노지재배가 59.2이고 시설재배가 64.7이었으며, 적색도를 나타내는 a*은 각각 -16.2와 -15.7, 황색도를 나타내는 b*은 각각 30.4와 29.4로 조사되었으며, hue angle에서 노지재배가 118.1°와 시설재배가 117.6°로 나타나, 재배방식 간에 색상에 따른 유의차이는 인정되지 않는 것으로 보였다. 총 엽록소 함량은 노지가 23.5 µg·mL⁻¹이었고 시설오이가 11.4 µg·mL⁻¹이며, 수분함량은 노지가 95.8%인데 시설이 96.6%으로, 수분함량을 제외한 정도, 총 엽록소 함량 등은 노지재배와 같은 생산 방식에서 높게 나타났다. 본 결과에서 재배방식에 따라 오이의 생육은 시설재배보다 노지재배가 다소 양적으로 크고 총 엽록소 함량 등이 높아, 과실 크기와 같은 외관적인 성상이 달라져 보였다. 본 연구에서 ‘베테랑’ 오이가 동일 품종임에도 불구하고 생육 및 품질 특성의 차이를 보인 것은 재배 환경의 차이에 따른 결과로 판단된다. Park¹⁵⁾, Ku 등¹⁶⁾, Kim 등¹⁷⁾, Lee 등¹⁸⁾과 Choi 등¹⁹⁾의 연구에 따르면, 시설재배는 노지에 비해 주간온도가 높은 반면에 노지재배는 시설보다 광환경이 약 30~40% 높은 것으로 보고되어 있어, Lee 등¹⁸⁾이 시설 조건에 따라 작물이 재배되는 환경에 따라 생육차이가 발생할 수 있음을 보여준 결과와 같이 재배 시 수확전 환경과 같은 가변적 요인 차이가 오이와 같은 원예작물의 생육과 품질 특성 형성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

2. 생체중량

수확후 저장 중의 오이 생체중량 감소율은 수확후 포장 여부에 따라 차이를 보였다. ‘베테랑’ 오이의 저장 중 생체중량 감소율은 저장 초기는 재배방법에 따른 영향이 일부 확인되었으나, 저장 기간이 경과함에 따라 수확후 포장처리의 영향이 더 크게 작용하는 것으로 나타났다. Fig. 3에서 ‘베테랑’ 오이를 10°C 저장 시, 생체중량 변화에서 수확후 저장 7일째 무포장한 시설재배 오이가 4.3%이고, 노지재배 오이가 2.8%의 생체중량 감소를 보였으며, 필름포장 처리에서 노지·시설재배 처리 간 차이가 거의 나타나지 않으며 약 0.3% 수준으로 유지되었다. Lee 등⁴⁾의 보고와 같이 수확후

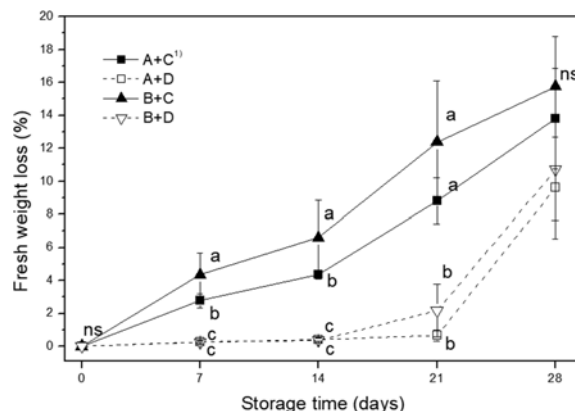


Fig. 3. Change in fresh weight loss of cucumber cultivar, ‘Veteran’ as affected by cultural method and film packaging at 10°C. a-cSmall letters mean values with different superscript letters within storage times are significantly different by Duncan’s multiple range test at $p < 0.05$. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. 1) Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

필름포장이 수분 증산을 억제하여 생체중량 변화를 감소시키는 효과가 있는 것으로 보이며, 수확전 재배방법에 따른 효과는 포장에 의해 더 크게 영향을 받아서 상쇄하는 것으로 보인다. ‘베테랑’ 오이 저장 21일째에 무포장 처리에서 8.8~12.4%의 생체중량 감소가 나타난 반면, 필름포장 처리에서 0.7~2.2% 수준으로 낮은 감소율을 보였으나, 저장 28일째에는 개체 간의 변이가 커져서 처리에 따른 일정한 경향을 명확히 판단하기 어려웠다. 오이 수확전 재배방법에 의해 형성된 특성이 저장 초기에도 영향을 미치지만, 포장과 같은 수확후 처리 요인이 저장이 진행될수록 품질 변화에 더 큰 영향을 미쳐 생체중량에 변화를 가져온 것으로 보인다. 농산물 저장 중의 생체중량 변화는 저장고 내 유니트쿨

리(unit cooler)에서 발생하는 공기의 증기압차로 인해 제습되면서 저장된 농산물의 수분손실로 인하여, 저장된 농산물의 생체중량 감소가 발생하는 것으로 알려져 있다^{20,21)}. 본 연구에서 생체중량 변화는 수확전 재배방법에 따른 초기 차이가 수확후 필름 포장처리로 인하여 수분손실을 억제하여 수확전 차이가 상쇄되어서, 수확후 품질 변화에 의한 차이를 막아주고 저장성을 개선하는 것으로 나타났다. 또한 생체중량 변화는 수확전 재배방법과 수확후 포장 여부에 따라 영향을 받았으나, 필름포장 처리는 재배방법에 관계없이 저장 초기 생체중량 감소율이 낮은 수준으로 유지되었으며, 저장 21일째에 무포장보다 생체중량 감소가 억제되어서, 저장 중 생체중량 변화는 수확전 재배방법보다 수확후 필름포장의 영향이 상대적으로 크게 작용한 것으로 판단된다. 오이의 수확전 재배방법은 수확 시 생체중을 결정하는 주요 요인이지만, 수확후 포장 처리에 의해 생체중 감소율이 크게 영향을 받는 것으로 확인할 수 있었다. 이는 수확 시에 형성된 품질 특성이 수확후 포장과 같은 처리를 통해 저장 중 영향을 받아 변화될 수 있는 것을 보여주어 수확 전·후 관리기술을 연계하는 것이 저장 효율과 상품성을 유지하는 데 효과적인 것으로 판단된다.

3. 과피 경도

오이 과피의 경도는 수확전 재배방법의 영향이 저장 중 일정 기간 유지되는 것으로 나타났다. ‘베테랑’ 오이 과피 경도는 수확전 재배 환경에 의한 영향이 저장 초기부터 중기까지 유의미하게 유지되는 것으로 나타났으나, 경도는 필름 포장 여부에 따라 수확후에 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 본 연구 조사에서 ‘베테랑’ 오이 과피의 경도는 재배방법에 따라 다른 것으로 나타났으며, 수확후 저장 중에도 수확전 영향이 지속되고 있었다. Fig. 4에서 ‘베테랑’ 오이의 과피 경도는 재배방법에 따라 노지재배 오이가 수확 직후 40.4 N으로 시설재배의 33.7 N보다 높게 나타났으며, 저장 기간이 경과함에 따라 노지재배 오이는 저장 7일째에 포장과 무포장 처리가 39.6~37.7 N으로 감소하며 점진적으로 하락하는 경향을 보인 반면, 시설재배 오이는 포장과 무포장 처리가 32.4~32.5 N으로 수확 직후와 비슷한 수준을 나타내며, 개체 간 변동 속에 저장 초기에 대비하여 미미하게 상승하거나 일정 수준을 유지하는 양상을 보였다. 작물 정도 변화는 식물의 조직에서 과피 표면 수분의 증발로 생체중이 감소하고, 작물 내의 밀도 증가와 세포 간의 응집과 결합이 약해지면서 단단한 정도나 질감과 같은 특성이 변화하는 것으로 알려져 있다²²⁾. 본 조사를 통해 오이의 과피 경도는 수확후 포장 여부보다 수확전 재배방법에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타나서, 저장 기간 중 노지재배 ‘베테랑’ 오이는 과피 경도가 점진적으로 감소하는 경향을 보인 반면에, 시설재배 오이는 개체 간 변동은 있으나 저장

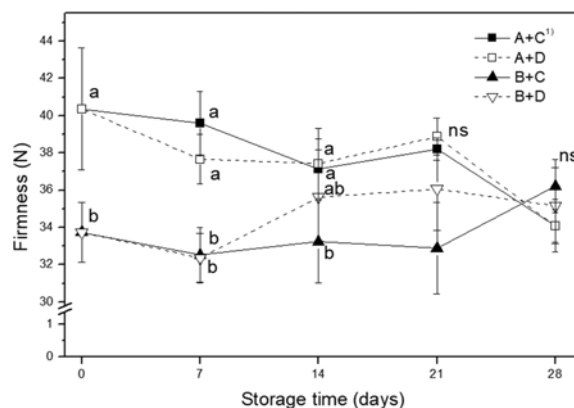


Fig. 4. Change in pericarp firmness of cucumber cultivar, ‘Veteran’ as affected by cultural method and film packaging at 10°C. ^{a-b}Small letters mean values with different superscript letters within storage times are significantly different by Duncan’s multiple range test at $p < 0.05$. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

초기와 유사한 수준을 유지하거나 일부 증가하는 상반된 양상을 보였는데, 수확후 포장 여부에 따른 정도 변화는 뚜렷한 차이가 없이 필름포장과 무포장 처리 모두 저장 중 유사한 변화 흐름을 나타냈다. 본 연구에서 ‘베테랑’ 오이의 과피 경도는 수확후 처리보다 수확전 재배환경에 의해 형성된 조직 특성의 영향을 더 크게 받는 것으로 보이며, 오이의 과피 경도는 수확전 재배환경에 의해 형성된 조직 특성 영향이 수확후에도 지속적으로 영향을 받아 품질 특성을 유지되는 것으로 생각되며, 수확후 포장 처리에 의한 영향은 다소 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다.

4. 과육 경도

오이 과육의 경도는 저장 중 감소하나, 저장 초에는 재배방법에 따라 차이를 다소 보였다. ‘베테랑’ 오이의 과육 경도는 수확 직후 노지재배에서 시설재배보다 높았으며, 저장 이 진행됨에 따라 노지재배 오이는 경도가 감소한 반면에 시설재배 오이는 상대적으로 유사한 수준을 유지하는 경향을 보여, 재배방법에 따라 저장 중 정도 변화 양상이 다르게 나타났다. Fig. 5에서 저장 동안 ‘베테랑’ 오이 과육의 경도는 재배방법별 무포장에서 노지재배 오이는 감소하고, 시설의 것은 비슷하게 유지되는 것으로 나타났으며, 수확후 필름 포장 여부에 따라 포장한 오이의 경우에 무포장보다 더 무른 것으로 보이며, 노지재배 오이의 경우에는 무포장보다

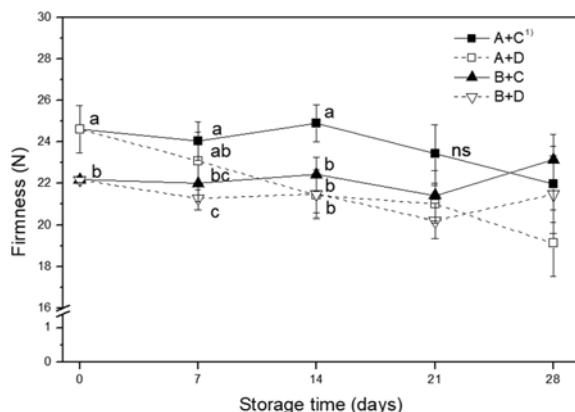


Fig. 5. Change in flesh firmness of the cucumber cultivar, 'Veteran' as affected by cultural method and film packaging at 10°C. ^{a-b} Small letters mean values with different superscript letters within storage times are significantly different by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

필름포장에서 과육 경도 감소 폭이 다소 컸다. '베테랑' 오이 과육 경도는 수확 시 노지재배 오이가 24.6 N이며 시설재배 오이가 22.2 N으로 재배방법에 따른 저장 초기에 차이를 보였으며, 저장 7일째에는 노지재배 무포장 24.0 N이고 노지 포장 23.1 N, 시설 무포장 22.0 N, 시설 포장처리가 약 21~22 N 수준으로 감소하는 경향을 보여서, '베테랑' 오이 저장 기간이 경과함에 따라 개체 간 변이가 확대되며, 포장처리에서는 재배방법에 따른 초기 경도 차이가 점차 줄어들면서 수확전의 영향력이 약화되는 경향을 보였다. 일반적으로 필름포장은 내부의 높은 상대습도를 유지하여 증산을 억제하고 생체중 변화를 감소시키지만, 필름포장에 의해 형성되는 높은 상대습도와 변화된 가스 조성은 과실의 호흡과 에틸렌 대사뿐만 아니라 세포벽 분해효소 활성화에도 영향을 줄 수 있으며, 저장 중 조직의 연화 양상이 달라질 수 있는데^{23,24,25}, 본 연구에서는 필름포장에 의해 형성된 저장환경이 조직의 연화에 영향을 미쳐 경도 감소가 상대적으로 크게 나타나, 오이 포장 시 필름 기체투과 특성뿐만 아니라 저장 중 내부 습도 및 품종 특성 등에 의해 차이가 기인한 것으로 판단되며, 추가적인 생리적 기작에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다. 본 연구 조사에서 오이 과육의 경도는 수확전 재배방법에 의해 결정된 조직 치밀도가 영향을 미치지만, 수확후 필름 포장 여부에 의해서 저장시 포장과 같은 농산물의 미세환경이 과육 연화에 변수로 작용하는 것을 확인하였다. 오이 과육의 경도는 재배 특성에 따른 차이가 저

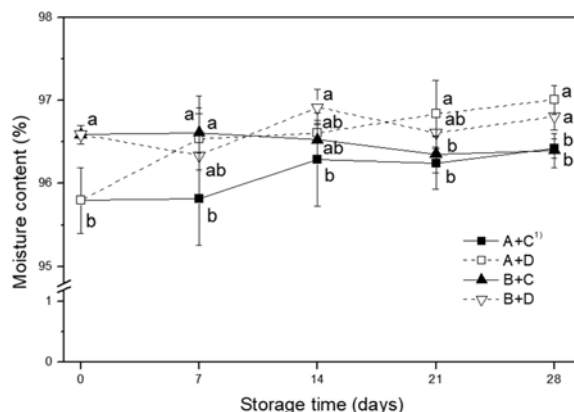


Fig. 6. Change in moisture content of cucumber cultivar, 'Veteran' as affected by cultural method and film packaging at 10°C. ^{a-b} Small letters mean values with different superscript letters within storage times are significantly different by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

장이 진행 될수록 개체 간 변이가 확대되면서 수확전 영향력이 약화되는 경향을 나타냈다. 본 연구에서 오이 과피 경도는 수확전 재배환경에 의해 형성된 조직 특성이 수확후에도 유지되며, 주로 재배환경의 영향을 반영한 반면에 과육의 경도는 수확후 포장과 같은 저장환경의 영향을 상대적으로 크게 받아서 두 조직 간 저장 중 특성 변화 양상이 상이하게 나타나는 것으로 사료된다.

5. 수분 함량

오이는 재배 방법에 따른 수분함량이 저장 중 포장으로 인해 변화했다. '베테랑' 오이의 수분 함량은 수확 직후 재배 방법에 따라 차이를 보였으나, 저장 기간이 경과 중에 수확후 포장 처리가 수확전 요인보다 더 지배적인 영향을 미치며 초기 차이를 완화시키는 것으로 나타났다. Fig. 6에 나타난 바와 같이, 수확 직후 '베테랑' 오이의 수분 함량은 시설재배가 96.6%로 노지재배의 95.8%에 비해 높게 나타났으나, 저장이 진행됨에 따라 필름포장 처리에서는 수분함량이 비교적 높은 수준으로 유지되거나 소폭 증가하는 경향을 보인 반면에 무포장 처리에서는 상대적으로 낮은 수준을 유지하거나 감소하는 경향을 나타냈으며, 저장 28일째에는 필름포장 처리의 수분함량이 약 96.8~97.0%로 무포장 처리의 96.4%보다 높게 나타나서, 저장 후기로 갈수록 포장 여부에 따른 차이가 재배방법보다 더 크게 보였다. 오이 저장 시 수분 함량이 초기보다 높아지는 현상은 실제 물이 생기

는 것이 아니라 상대적인 비율 변화로 보이며, 수분함량 변화는 재배방법에 의해 형성된 초기 함량이 저장 중에는 포장여부에 의한 수분손실 억제 효과가 작용하여 더 큰 영향을 미쳐 함수량과 같은 가변적 성질 양상이 달라지는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 농산물의 품질이 수확 전 재배 조건에 의해 형성되는 초기 특성과 저장·유통 과정에서 수확 후 관리 요인이 복합적으로 작용하면서 지속적으로 변화함을 보여준다. 이에 본 연구에서 품질 변화 과정을 ‘수확 전·후 특성 형태 변화(Variation in Quality and Morphology across Pre- and Post-harvest Stages; 이하 수형변화)’라는 새로운 개념으로 제안하고자 한다. ‘수형변화’란 수확 전 요인(재배방법 등)에 의해 형성된 초기 품질 특성이 수확 후 요인(포장 처리 및 저장환경 등)의 영향을 받아 외형, 수분 상태, 대사활성 및 성분 변화가 연속적으로 진행되는 일련의 품질 변화 과정을 의미한다. 본 연구에서 수확 직후 시설재배와 노지재배 간 수분함량 차이가 재배방법의 영향을 반영하였으나, 저장 후기로 갈수록 필름포장이 수분손실을 억제하면서, 초기 차이가 점차 완화되는 현상이 대표적인 수형변화의 사례로 생각된다. 결과적으로 농산물의 최종 상품성은 수확전 형성된 품질에 의해 고정되는 것이 아니라, 수확후 관리기술과의 상호작용을 통해 지속적으로 변화하고 재형성되는 동적인 특성으로 이해할 필요가 있다. Lee²⁰⁾는 원예작물의 수확 시 수분 함량은 재배방법과 같이 수확전 요인에 의해서 차이가 나타난다는 보고와 같이, 본 연구에서도 오이는 수확후 포장을 통해 증산을 억제하여 생체중량 변화를 감소시키고, 과실 내 수분함량의 변화 양상이 달라지는 결과를 확인할 수 있었다.

6. 가용성고형물 (Soluble solid contents)

오이의 가용성고형물 함량은 수확 시 차이가 없었으나, 포장 여부에 따라 변화가 발생하였다. ‘베테랑’ 오이는 수확 시 재배방법에 따른 가용성고형물 함량의 차이가 나타나지 않았으나, 저장 기간이 경과함에 따라 감소하면서 수확후 포장 여부에 의해 변화 정도에 차이를 보였다. Fig. 7에서 오이 수확 시 가용성 고형물 함량이 노지와 시설 모두 2.9 °Brix로 재배방법에 따른 함량에 차이가 없었으나, 저장 7일째에 무포장구는 시설 2.0 °Brix 노지 2.1 °Brix로 감소한 반면에 필름 포장처리구는 시설 3.9 °Brix, 노지 3.3 °Brix로 상대적으로 높게 유지되어, 포장 여부에 따라 가용성고형물의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 가용성고형물의 함량이 저장 중 감소하는 것에 대해서 Choi 등²⁶⁾은 호흡과 같은 대사작용으로 인해 소모되어 감소하는 것으로 보았으며, Park와 Yoon²⁷⁾ 및 Choi 등²⁶⁾은 과일의 경우에 저장 후 전분의 당화현상으로 당도가 증가하여 가용성고형물의 함량이 높아지는 것으로 보았다. 오이는 비급등형 과채류로 분류되는데²⁸⁾, 저장 중 전분의 당화에 의한 당도 상승이 일어나지 않아,

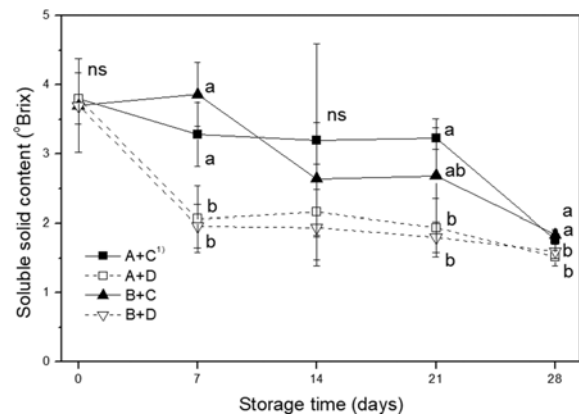


Fig. 7. Change in SSC(soluble solid content) of cucumber cultivar, ‘Veteran’ as affected by cultural method and film packaging at 10°C. ^{a-b}Small letters mean values with different superscript letters within storage times are significantly different by Duncan’s multiple range test at $p < 0.05$. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

오이와 같은 원예작물은 다른 변화 양상을 보이는 것으로 판단된다. 오이는 수확후 포장을 통한 호흡 억제와 수분 유지가 가용성고형물(SSC)을 보존하는데, 중요한 요인으로 작용하는 것으로 생각된다. 일부 과일에서 저장 중 전분 당화에 의해 당도가 증가하면서 가용성고형물 함량이 증가할 수 있다고 보고한 반면에, 비급등형 과채류인 오이²⁸⁾는 저장 중 당도 상승보다는 감소하는 것으로 나타나, 오이와 같은 원예작물은 저장 중 전분의 당화에 의한 당도 상승이 일어나지 않고, 다른 변화 양상을 대사 작용을 보이는 것으로 판단된다. 본 연구에서 저장 중 가용성고형물 함량이 감소하는 경향이 필름포장 처리에서 무포장 처리보다 상대적으로 높은 수준으로 유지되어, 수확후 포장에 의한 호흡 억제와 수분 유지가 가용성고형물 변화 정도에 영향을 미쳐 작용하는 것으로 생각된다. 이상의 결과에서 오이의 가용성 고형물 함량은 수확전 요인에 의한 영향보다 수확후 포장 여부에 의한 대사 지연 효과에 의해 유의미하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

7. 색상 변화

오이 저장 중 색상변화로 색도(hue angle)가 감소하고 포장 여부로 차이가 나타났다. 오이 저장 중 표면 색상 변화는 L^* , a^* , b^* 값을 측정하고, a^* 와 b^* 값으로부터 산출한 hue angle을 지표로 평가하였는데, 색도(hue angle)은 저장 기간이 경과함에 따라 모든 처리에서 감소하는 경향을 보여

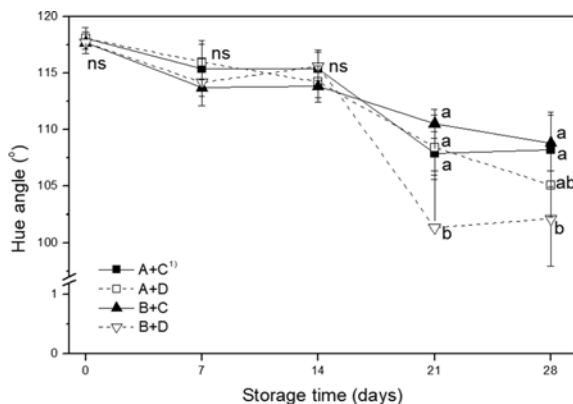


Fig. 8. Change in hue angle of cucumber cultivar, 'Veteran' as affected by cultural method and film packaging at 10°C. ^{a-b} Small letters mean values with different superscript letters within storage times are significantly different by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

서, 저장 초기에는 재배방법 및 포장 여부에 따른 유의적인 차이가 나타나지 않았으나, 저장 후기에는 포장 처리에서 무포장 처리보다 색도(hue angle)이 낮게 나타나, 포장 여부에 따른 색상 변화의 차이가 뚜렷해졌는데, 이는 저장 후기로 갈수록 포장 처리에서 녹색도가 상대적으로 더 감소하고 황화가 더 진행되었음을 보였다. Cho 등¹¹⁾은 색도(hue angle) 값이 오이와 같은 원예작물에서 녹색 및 황화 정도를 나타내는 지표로, 높은 색도(hue angle) 값은 녹색에 가까운 색상을 나타내며, 값이 감소할수록 황화에 따른 색상변화가 진행되는 것으로 보고하였다. Fig. 8에서 '베테랑' 오이 색도(hue angle)는 저장 0~14일의 초기 및 중기까지는 재배방법 및 포장 여부에 따라 유의한 차이를 보이지 않았으나, 저장 21일인 저장 후기부터 포장 여부에 따라 처리 간 차이가 나타나서, 무포장의 시설오이가 110.5°, 노지는 107.9°이었고, 포장한 노지오이가 108.4°에 시설이 101.4°으로, 무포장 처리가 포장 처리보다 높은 hue angle 값을 보였으며, 저장 28일째에 무포장한 시설오이가 108.8°, 노지가 108.2°이었고, 포장은 시설이 102.1°에 노지가 105.1°으로 수확 전 재배방법보다는 수확 후 포장여부에 따라 무포장이 포장보다 높은 경향을 보였으며, 저장 28일째에 저장 21일과 동일한 경향을 보여서, 포장 처리가 hue angle 값이 더 낮아서 황화 진행이 상대적으로 빠른 것으로 나타났다. 오이 저장 중 색도 변화는 감소하나, 저장 후기에 색도(hue angle)는 포장 여부에 따라 차이를 보여서, 포장 처리가 hue angle 값이

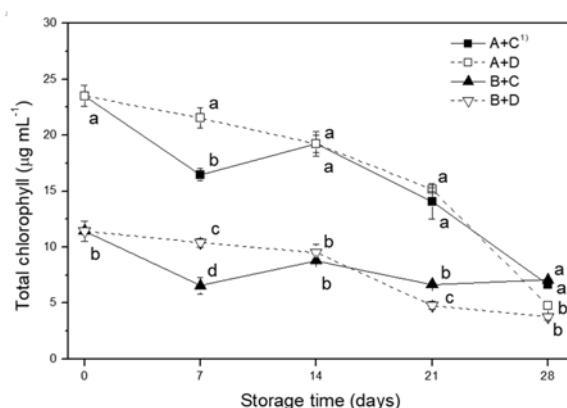


Fig. 9. Change in total chlorophyll content of cucumber cultivar, 'Veteran' as affected by cultural method and film packaging at 10°C. ^{a-b} Small letters mean values with different superscript letters within storage times are significantly different by Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

더 낮으며 색상변화의 진행이 상대적으로 빠르게 나타난 것으로 보여서, 수확 후 포장에 의해 색상변화에 의한 황화가 더욱 상대적으로 빠르게 진행된 것으로 보인다. Fig. 9에서 '베테랑' 오이의 hue angle은 저장 0~14일까지 재배방법 및 포장 여부에 따른 유의한 차이를 보이지 않았으나, 저장 21일부터 포장 여부에 따른 차이가 나타나서, 저장 21일째 hue angle은 무포장 처리에서 시설재배 110.5°, 노지재배 107.9°였으며, 포장 처리에서는 각각 101.4°와 108.4°로 나타났다, 저장 28일째에 무포장 처리에서 시설재배 108.8°, 노지재배 108.2°로, 포장 처리의 102.1°와 105.1°보다 높은 경향을 보였다. 따라서 저장 후기의 hue angle 변화는 재배방법보다 수확 후 포장 여부에 따른 차이가 크게 나타났으며, 포장 처리에서 상대적으로 낮은 hue angle을 보여 황화가 더 빠르게 진행되는 경향을 보였다.

8. 총 엽록소 함량(Total chlorophyll content)

오이 저장 중 총 엽록소(total chlorophyll) 함량은 주로 수확 전 재배 방법에 영향을 받았다. 오이 저장 중 총 엽록소 함량은 전반적으로 감소하는 경향을 보였으며, 수확 직후에는 재배방법에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났으나, 총 엽록소 함량 감소 정도에서 차이를 보이면서 저장 종료 시에는 포장 여부에 따라 영향을 받는 것으로 나타났다. Fig. 9에서 '베테랑' 오이의 수확 직후 총 엽록소 함량은 노지가 23.5 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 이고 시설이 11.4 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 이어서, 재배 방법에

따라 차이가 현저하였으나, 오이가 10°C에서 저장 동안하는 동안 총 엽록소 함량이 변화하는데, 저장 중 노지 재배는 시설 재배에 비해 엽록소 함량 감소 정도가 크게 나타나서, 저장 14일에 오이의 총 엽록소 함량은 노지의 포장 처리한 오이가 $21.5 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 으로 가장 높고, 무포장이 $16.5 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 이었으며, 시설의 포장 처리가 $10.4 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 이고, 무포장이 $6.5 \mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 인 것으로 나타났으며, 저장 후기로 갈수록 재배 방법에 따른 초기 함량 격차는 점차 감소하는 경향을 보여 저장 종료 시점인 28일에는 재배 방법보다 포장 여부에 따라 차이를 보였다. Cho 등¹¹⁾은 필름포장이 작물의 chlorophyll 분해를 억제하여 색도 유지에 효과적이라고 보고하였다. 그러나 본 연구에서는 저장 초기 및 중기에는 일부 필름포장 처리에서 무포장 처리보다 총 엽록소 함량이 높게 유지되는 경향을 보였으나, 저장 후기로 갈수록 이러한 차이가 감소하였으며, 저장 종료 시점에는 오히려 필름포장 처리에서 무포장 처리보다 총 엽록소 함량이 낮게 나타났다. 따라서 본 연구에서 필름포장이 chlorophyll 분해를 지속적으로 억제하였다고 보기 어려우며, 총 엽록소 함량에 대한 포장 효과는 저장기간에 따라 다르게 나타난 것으로 판단된다. 오이 저장 중 색도(hue angle) 감소는 엽록소 함량 감소와 연관된 척도로^{29, 30)}, 본 연구 결과에서는 저장 후기로 갈수록 필름포장 처리에서 무포장 처리보다 총 엽록소 함량이 낮게 나타나 엽록소 분해가 상대적으로 더 진행된 것으로 판단된다. 이러한 경향은 필름포장 처리에서 hue angle 역시 무포장 처리보다 낮게 나타난 결과와 일치하며, 포장 처리에서 엽록소 감소와 함께 황화가 상대적으로 빠르게 진행되었음을 보여준다. 본 연구에서 오이 저장 중 총 엽록소(total chlorophyll) 함량은 저장 초기에는 노지와 시설재배와 같은 재배방법에 따른 차이가 컸지만, 저장 후기로 갈수록 노지 재배한 오이의 급격한 감소로 인해 재배 방법 간 격차는 줄어들고 포장 여부에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다.

9. 선도 및 외관의 변화

오이 저장기간에 따른 외관의 측정 지수는 감소하는데, 수확전 요인과 수확후 처리에 따른 유의차이는 보이지 않았다. 다만 재배방법에 따라서는 시설에서 재배한 오이가 노지보다, 포장여부에 따라서는 필름 포장한 것이 무포장보다 다소 높은 수치를 갖는 경향을 보였다. Fig. 10에서 오이 저장 7일까지는 수확전 재배방법이나 수확후 포장여부에 따른 차이를 확인할 수 없었으며, 저장 14일에 시설재배한 필름 포장 처리에서 지수가 3.6, 노지 포장이 3.2, 시설의 무포장이 2.8, 노지 무포장이 2.6으로 나타났지만, 처리 간 유의차이를 보이지는 않았다. 재배방법이나 포장 여부에 따른 저장 시 유의차이는 없었지만 외관 지수 3점을 상품성이 있는 것으로 간주하였을 때, 시설이나 노지 처리에서 필름으로 포장한 것이 상대적으로 높은 외관 지수를 유지하면서

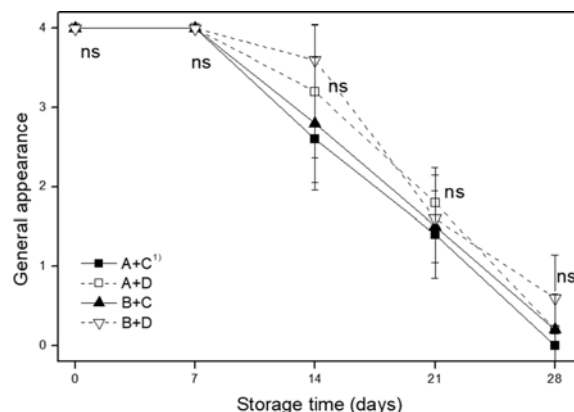


Fig. 10. Change in general appearance of cucumber cultivar, 'Veteran' as affected by cultural method and film packaging at 10°C. ns, not significant at $P \geq 0.05$. Data represent the mean $\pm$ SD of 5 replications. Some bars are not shown when masked by symbol. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

상품성 한계치인 3.0 이상을 유지한 반면에 무포장은 3.0 미만으로 하락하여, 유공 PE 필름포장은 저장 중 상품성을 유지하는데 유리한 것으로 판단되었다. Fig. 11에서와 같이 오이 저장 시 14일에 노지나 시설오이 무포장은 표면의 수분증발로 인해 표면이 주글거리며 마르는 건조 현상을 보여 포장 유무에 따른 외관상 차이가 가시화되었으며, 저장 21일에는 무포장 오이는 표면이 더욱 마르고 포장 경우의 노지오이는 표면에 과피반점(oedema)이 발생하고 끝부분에 짓무름 증상이 발생하였고 시설오이는 표면이 하얗게 변색이 되고 하부에 반점이 생겼으며, 28일에는 오이에서 곰팡이 발생으로 인한 부패와 함께 이전에 발생한 증상이 더욱 심화되는 것으로 나타났다. 오이 재배 방법에 따라 수확 시 과실 생육과 외관에서 차이를 보이며, 경도나 엽록소 함량 등은 수확후 지속적으로 영향을 미치나, 필름 포장 여부에 따라 생체중량, 수분함량, 가용성 고형물 함량(SSC) 등은 재배방법과 같은 수확전 요인이 상쇄하고 저장 시 수확후 처리에 따라 영향을 받아 차이를 나타냈는데, 오이 저장 중 선도 변화는 수확전 재배방법에 의해 형성된 초기 품질 상태를 기반으로 하지만, 저장 과정에서는 포장과 같은 수확후 관리기술이 수분 손실, 대사 활성 및 색 변화 등에 영향을 미쳐 품질 유지와 상품성에 기여하는 것으로 보인다. 본 연구에서 오이의 생체중량, 수분함량 등 물성 성분을 정량적으로 측정한 품질 지표에서는 유의한 차이가 나타났으나, 선도에 따른 외관 지수에서 유의차를 확인하지 못하였는데, 생체중량·수분함량·SSC 등의 조사 지표들은 독립적인 개별



Fig. 11. Outside appearance of 'Veteran' by cultural method and film packaging at 10°C. ¹⁾Refer to Fig. 1 and Fig.2 for cultural method and film packaging types. ¹⁾Treatment combinations based on the cultural methods and film packaging types shown in Figs. 1 and 2 are as follows: A+C, open-field cultivation without film packaging; A+D, open-field cultivation with PE film packaging; B+C, greenhouse cultivation without film packaging; and B+D, greenhouse cultivation with PE film packaging.

변수들을 정량적으로 측정할 수 있지만, 외관 지수는 색상, 형태 변화, 신선도 등을 종합적으로 평가하는 주관적인 평가 지표로 평가원들이 주로 시각 판단에 기반해 점수를 부여하는 방식으로 일부 측정할 물리적 지표가 약화되어도, 다른 지표가 양호하면 전체 판단 지수가 상쇄되는 포괄적 특성을 가지는 것으로 판단되었다. 이번 연구에서 선도변화에 따른 외관 지수의 통계적인 유의차가 나타나지 않았다는 결과는 단순히 처리 간 차이가 없음을 의미하기보다는 평가 방법의 특성상 측정 방식을 고려하여 시각적 품질 변화를 종합적으로 반영한 결과로 해석하는 것이 타당하다고 본다. 따라서 오이 저장 중 선도 변화는 수확전 재배방법에 의해 형성된 초기 품질 상태를 기반으로 하되, 저장 과정에서는 포장과 같은 수확후 처리 요인이 수분 손실, 대사 활성 및 색 변화 등에 영향을 미쳐 품질 유지 및 상품성에 결정적인 역할을 하는 것으로 생각된다. 오이의 재배환경에 의해 결정된 수확전 품질 특성은 고정되거나 영속적인 것이 아니며, 수확후 유통 및 저장 기간의 경과에 따라 지속적으로 변화하는 동적인 것으로, 오이의 수확후 품질 변화는 개별 저장 시점의 단편적인 수치로 분리되는 것이 아니라, 이전 시점의 품질 상태가 다음 시점으로 연속적으로 연결되어 전이되고 유기적으로 누적되는 과정을 갖는 것으로 판단된다. 저장 과정에서 발생하는 외관 품질과 같은 시각적 변화와 내부 특성의 변화는 상호 작용하며 진행되는데, 이러한 내·외부 품질 지표 간의 상충 또는 보완 작용을 거쳐 상품성 변화로 표출되는 것으로 보인다. 본 연구에서 동일 품종의 작물에서도 재배방법에 따라 수확 시 형성되는 품질 특성과 저장 중 변화 양상이 서로 다르게 나타났다. 따라서 수확후 품질관리를 일률적으로 적용하기보다는 재배환경에 의해 형성된 초기 품질 특성을 고려한 맞춤형 관리 전략이 필요하다. 연구결과, 수확후 필름 포장과 같은 관리를 통해 수확전 재배적 요인에 의해 형성된 품질 차이를 개선하고 저장성을 유지할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 수확전

생산기술 시스템과 수확후 관리기술을 연계한 통합적이고 일관적인 품질관리 체계 구축의 필요성을 시사하였다. 따라서 원예작물의 체계적인 품질관리와 선도유지를 위해서 수확 전·후 요인의 상호작용과 복합적 관계를 고려한 관리방안을 지속적으로 모색할 필요가 있다.

10. AUC 기반 조절된 매개모형 분석

조절된 매개모형(Moderated Mediation Model)을 통한 오이의 재배방법 및 수확후 유공필름 포장이 저장 중 누적된 품질 변화(Area under the curve, AUC)에 미치는 복합적인 영향을 검증하고자 하였다. 본 연구에서 조절된 매개효과 모형을 적용하여 수확전 재배환경이 오이의 수확 시 품질 특성을 거쳐 저장 중 누적된 품질 변화량(AUC)에 미치는 인과적인 경로를 파악하고, 수확후 필름포장 여부가 유통과 저장 과정에서 생체중량, 경도, 엽록소 함량의 저하를 효과적으로 차단·제어하는 조절효과를 입증하고자 하였다. 기존 연구에서 주로 수확전 요인이 수확후 품질에 미치는 영향을 각 요인에 대해 상관분석이나 회귀식을 이용해 왔다^{31,32)}. 그러나 본 연구에서는 재배 방법이 수확 시 품질에 미치는 효과를 파악하고, 수확 시 품질이 포장처리에 따라 저장성에 미치는 영향 정도를 매개모형으로 분석하였다. Hayes¹⁴⁾가 보고한 매개모형(moderated mediation model)을 이용하여, 재배방법을 독립변수(independent variable), 포장처리 전에 측정한 수확 시 주요 품질특성을 매개변수(mediator), 저장기간별 품질 변화량을 통합한 곡선하면적(AUC)을 종속변수(dependent variable), 수확후 필름 포장 여부를 조절변수(moderator)로 설정하여, 재배방법에 따른 수확 시 품질특성이 저장 중 변화에 미치는 영향을 평가하고, 필름 포장여부가 저장 중 누적되는 품질 변화 특성으로 이어지는 조절효과를 검토하고자 하였다. 연구 모형의 전체적인 논리 구조는 재배방법(C) → 수확 시 주요 품질지표(H) → 저장 중 누적 품질 변화(Y, AUC)로 설정하여 영향을 파악하고자 하였다.

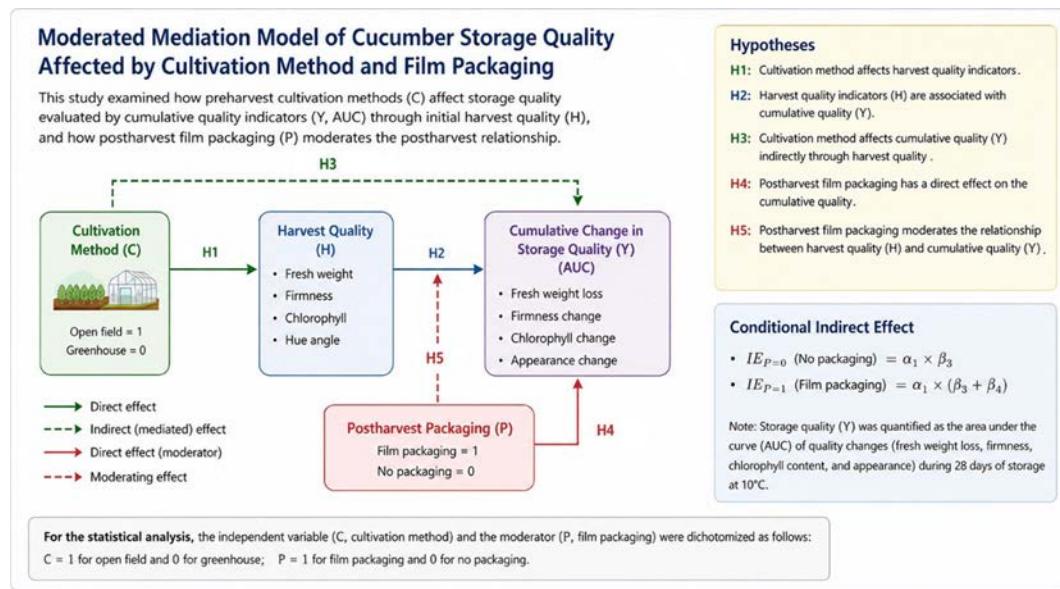


Fig. 12. Proposed moderated mediation model illustrating the relationships among cultivation method, harvest quality, postharvest film packaging, and cumulative storage quality expressed as area under the curve (AUC).

The following hypotheses guide the model:

H1: Cultivation method has a significant effect on the major indicators of harvest quality (α_1).

H2: Major indicators of harvest quality (H) are significantly associated with the cumulative quality change during storage (β_3).

H3: Cultivation method indirectly affects the cumulative quality change during storage (Y, AUC) through the major indicators of harvest quality ($\alpha_1 \times \beta_3$).

H4: Postharvest film packaging has a direct effect on the cumulative quality change during storage (β_2).

H5: Postharvest film packaging moderates the relationship between initial harvest quality (H) and cumulative quality change during storage (β_4).

Fig. 12에 나타난 바와 같이, 본 연구에서는 재배방법을 독립변수(C), 수확 시 주요 품질 특성을 매개변수(H), 저장 중 누적된 품질 변화량(AUC)을 종속변수(Y)로 논리 구조에 따라 설정하였다. 재배방법이 수확 시 선도를 경유하여 저장 중 누적 품질 저하에 미치는 매개경로(H1, H2, H3)를 검증하고, 수확후 필름포장 여부(P)가 미치는 저장 중 누적 품질변화(H4)에 대한 효과 및 수확 시 품질이 저장성에 미치는 영향을 제어하는 조절효과(H5)를 검증하고자 하였다.

이를 위하여 설정한 연구가설은 다음과 같다.

H1. 재배방법은 수확 시 주요 품질 특성(H)에 유의한 영향을 미친다(α_1).

H2. 수확후 주요 품질 특성(H)은 저장 중 해당 항목의 누적 품질 변화량(Y, AUC)에 영향을 미친다(β_3).

H3. 재배방법은 수확 시 주요 품질 특성(H)을 경유하여 저장 중 누적 품질 변화량(Y, AUC)에 간접적 효과를 가진다($\alpha_1 \times \beta_3$).

H4. 수확후 필름포장은 저장 중 누적 품질 변화(Y)에 직접적 효과를 가진다(β_2).

H5. 수확후 필름포장은 품질 특성(H)과 저장 중 누적 품질 변화량(Y)에 미치는 관계를 조절한다(β_4).

본 연구에서는 재배방법과 포장에 저장 중에 품질에까지

미치는 효과를 평가하기 위한 매개모형을 검증하기 위하여 Hayes (2013)의 PROCESS Macro에 기반한 조절된 매개모형(moderated mediation model)을 적용하였다. 사용된 모델식 모형은 선별된 주요한 품질 지표(생체중, 과피 경도, 총 엽록소 함량)로 개별적인 매개 분석을 수행하여, 수확 시 품질 특성이 저장 중 누적 품질 변화(AUC)에 미치는 영향이 수확 후 필름포장 여부에 따라 달라지는지를 평가하기 위해 Hayes(2013)의 PROCESS Macro Model을 적용하여, 복잡한 다중 지표의 상호 연관된 구조 모형 대신에 해석의 명확성을 확보하고, 포장 조건에 따른 조건부 간접효과를 검증하고자 하였다. 모형에서 매개경로의 후반부인 수확 시 품질 특성(H)에서 저장 중 누적 품질 변화량(Y, AUC)으로 이어지는 경로가 필름포장 여부(P)에 의해 조절되는 것으로 설정하였다. 모형에서 독립변수인 재배방법(C)은 노지재배(= 1), 시설재배(= 0)로 이분변수화하였고, 조절변수인 필름포장 여부(P)는 유공필름포장(= 1), 무포장(= 0)으로 설정하였다. 매개변수는 포장 처리 전 측정된 수확 시 주요 품질 특성에서 초기값을 H로 설정하였으며, 종속변수는 저장 기간 전체의 선도 저하 및 품질 변동 추이를 통합하여 정량화한 곡선하면적(Y, AUC)으로 설정하였다.

가설 H1(매개변수 형성)을 검증하고자, 재배방법이 수확

시 오이 품질 특성에 미치는 영향을 검정하기 위하여 다음과 같은 모형을 적용하였다.

$$H = \alpha_0 + \alpha_1 C + \varepsilon_1$$

여기서,

H: 수확 시 품질 특성을 나타내는 초기 측정값

C: 재배방법

α_1 : 재배방법이 초기 품질에 미치는 효과

이어서 가설 H2, H4, H5를 동시에 검증함으로써 재배방법, 수확 시 초기 품질과 수확후 포장처리가 저장 중 누적 품질 변화에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 저장 중 누적된 품질 변화량(Y, AUC)을 예측하고 수확후 유공필름에 의한 포장(P)의 직접적인 선도 유지 효과 및 조절효과를 검증하는 구조 모형식은 다음과 같다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 C + \beta_2 P + \beta_3 H + \beta_4 (H \times P) + \varepsilon_2$$

여기서,

Y: 저장 중 누적 품질 변화량(AUC),

P: 필름포장 여부

β_1 : 재배방법의 직접효과

β_2 : 포장처리의 직접효과

β_3 : 수확 시 품질이 저장 중 누적되는 품질 변화에 미치는 주효과

β_4 : 수확 시 품질과 포장처리 간 상호작용인 조절효과를 의미한다.

또한 가설 H3 검증(매개효과)으로 포장 처리에 따른 효과 및 조건부 간접효과 산출하고자, 수확후 유통 및 저장 과정에서 포장(P)의 적용 여부에 따라 재배방법이 최종 저장 품질(AUC)로 이어지는 매개 경로의 크기가 변화하는지 파악하고자 조건부 간접효과(conditional indirect effect)를 도출하였다.

$$\text{Conditional Indirect Effect} = \alpha_1 [\beta_3 + \beta_4 P]$$

여기서,

P=0: 무포장

P=1: 필름포장

따라서 각 포장여부의 조건(P)에 따른 간접효과는 다음과 같이 추정할 수 있다.

무포장 조건(P=0 대입):

$$\text{Indirect Effect}_{\text{No Packaging}} = \alpha_1 \times \beta_3$$

필름포장 조건(P=1 대입):

$$\text{Indirect Effect}_{\text{Film Packaging}} = \alpha_1 \times [\beta_3 + \beta_4]$$

본 조건부 간접효과와 비교를 통해, 수확전 재배환경(노지 및 시설)에 의해 형성된 오이의 초기 품질 특성이 수확 후 필름포장이라는 관리 기술의 도입 여부에 따라 저장 시 품질 특성(누적 품질 변화 궤적)에 미치는 파급 효과의 변화를 유추할 수 있다.

본 연구의 주요 품질 지표인 생체중량 감소율에 대한 조절된 매개모형을 분석한 결과, 반복측정으로 인한 오차의 상관성 문제를 각 개체별 28일간의 누적 곡선하면적(Y, AUC)으로 변환하여 모형의 통계적 적합성을 확보하고자 하였다. 재배방법에 따른 생체중량 감소율의 분석 결과, 수확 시 품질 특성(H)의 차이를 확인한 후, 수확후 포장 여부(P)에 따른 저장 중 생체중량 감소율의 누적 변화(AUC)를 검토하였다. 포장(P=1)을 적용한 조건에서의 간접효과($\alpha_1 \times [\beta_3 + \beta_4]$)는 무포장 조건(P=0, $\alpha_1 \times \beta_3$)에 비해 최종 누적된 생체중량 감소율(AUC)을 유의하게 감소시키는 것으로 나타났다. Fig. 3에서 저장 시점별 생체중량 감소율을 누적 품질 변화량(AUC)은 포장 여부에 따라 저장기간 동안 축적되는 생체중량 감소 정도에 뚜렷한 차이가 나타나서, 무포장 조건에서는 저장 초기부터 생체중량 감소가 지속적으로 누적된 반면에, 필름포장 조건에서는 저장 7~21일 동안 생체중량 감소 정도가 억제되어 전체 저장기간의 누적 품질 변화량이 상대적으로 작게 나타났는데, 이러한 차이는 개별 저장 시점에서 나타난 생체중량 감소율의 차이를 저장기간 전체에 걸쳐 누적하여 평가한 결과로, 필름포장 여부(P)가 수확 시 형성된 품질 특성(H)과 저장 중 누적 품질 변화(Y, AUC) 간의 관계에 영향을 미쳤음을 보여주었다. 오이 재배방법별 포장 여부에 따른 생체중량 감소율의 누적 변화(AUC)를 보면, 저장 28일 종료 시점에 노지재배 후 무포장 처리는 145.5이고, 시설재배 후 무포장은 220.6인데, 노지재배 후 필름포장처리는 42.8이고, 시설재배 후 필름 포장은 74.7로 재배방법의 차이보다는 포장에 의한 효과로 누적 품질 저하 곡선의 아래쪽 면적(AUC)을 대폭 축소시키는 원인이 되었다. 따라서 분석 결과, 수확전 재배방법(C)이 수확 시 초기 품질 특성(H)을 거쳐 저장 중 누적 품질 저하(Y)로 이어지는 경로에 수확후 필름포장(P) 처리가 저장기간(7~21일)에서 조절하는 것으로 나타나 가설 H5(조절효과) 및 조절된 매개효과를 지지하는 것으로 나타났다.

재배 및 수확후 저장 중 오이 표면의 경도 변화를 평가하고자, 필름포장 여부(P)에 따른 저장 28일간의 경도 누적 변화량(Y, AUC)을 분석하고자 하였다. 유공필름 포장을 적용한 조건(P=1, $\alpha_1 \times [\beta_3 + \beta_4]$)은 대조구인 무포장(P=0, α_1

$\times \beta_3$)과 비교하면, 저장기간 전반에 걸친 경도 저하(조직 연화)에 의한 누적 변화량(AUC)을 유의미하게 제어하는 것으로 확인할 수 있었다. Fig. 4의 저장 시점별 과피 경도 변화를 살펴보면, 수확 시에는 수확전 재배환경에 따라 노지재배 오이의 경도가 높게 나타났으나 저장기간이 경과함에 따라 처리별 경도 변화 양상이 서로 다르게 나타나서, 재배 환경에 따른 차이가 수확후 포장 여부의 영향을 받는 경향을 보였다. 저장 중 무포장 처리는 저장이 진행됨에 따라 전반적으로 경도가 저하되어 조직 연화가 누적되는 경향을 보인 반면, 필름포장은 수확 시의 경도가 비교적 유지되어 조직 연화의 진행이 억제되는 경향을 나타냈다. 저장 시 포장 여부에 따른 경도 변화는 저장기간 동안의 누적 품질 변화 면적(AUC)에 반영되어 필름포장은 경도 저하에 따른 누적 변화 면적을 축소시키는 요인으로 작용하였다. 포장한 오이에서 나타난 경도 유지 효과는 포장재에 의한 수분 증발 억제 및 가스 환경 조절에 기인한 것으로 판단된다. 저장 종료 시점인 28일에는 수확전 재배요인과 수확후 포장요인이 복합적으로 작용하면서 처리 간 경도 차이가 감소하여 유의적인 차이를 보이지 않았다. 따라서 저장기간 동안 나타난 경도 변화의 누적 양상은 수확 시 형성된 초기 경도 특성(H)이 저장 중 누적 품질 변화(Y, AUC)로 이어지는 과정에서 수확후 필름포장 여부(P)의 영향을 함께 고려할 필요가 있음을 보여주었다. 오이 재배방법별 포장 여부에 따른 표피 경도의 누적 변화(AUC)를 보면, 저장 28일 종료 시점 기준 노지재배 후 무포장 처리는 1065.1인 반면에 시설재배 후 무포장은 1005.3으로 나타났으며, 노지재배 후 필름 포장처리는 1058.4, 시설재배 후 필름 포장은 969.5를 보였으며, 무포장 상태에서 수분 증발로 인해 표피가 질겨지고 수축되는 현상을 나타내었으며, 포장 처리가 오이 고유의 조직감의 변화를 안정화하는 주요 요인으로 보인다. 따라서 포장에 의한 조건부 간접효과 검정은 단순히 저장 종료일(28일)의 단편적인 수치 비교에 국한되지 않고, 가설 5(조절효과) 및 조절된 매개모형을 입증하는 것으로 판단된다.

오이 저장 중 선도 저하의 주요 시각적 지표인 황화 현상을 평가하기 위하여, 포장 여부(P)에 따른 저장 28일간의 총 엽록소 함량 누적 변화량(Y, AUC)을 분석하였다. 조건부 간접효과를 검정한 결과, 포장을 적용한 조건($P=1, \alpha_1 \times [\beta_3 + \beta_4]$)은 무포장의 대조처리($P=0, \alpha_1 \times \beta_3$)에 비해 저장 과정에서 발생하는 엽록소 분해 및 감소에 따른 누적 변화량(AUC)을 유의미하게 억제하는 것으로 나타났다. Fig. 10의 저장 시점별 총 엽록소 함량 변화를 살펴보면, 수확 시에는 수확전 재배환경에 따라 노지재배 오이의 엽록소 함량이 시설재배보다 높게 나타났으며, 저장이 진행됨에 따라 모든 처리에서 전반적으로 엽록소 함량이 감소하는 경향을 보였으나, 변화 정도는 재배방법과 포장 여부에 따라 다르게 나타났다. 저장 초기에는 노지재배와 시설재배 모두 처

리에 따라 엽록소 함량의 감소 정도가 다르게 나타나서, 저장 중기까지는 노지재배 오이가 시설재배 오이보다 전반적으로 높은 엽록소 함량을 유지하였으며, 포장 여부에 따른 변화에서는 저장 초기부터 중기까지 필름포장 처리가 무포장 처리에 비해 엽록소 함량의 감소를 완화하는 경향을 보였으나, 변화 정도는 재배방법과 저장기간에 따라 다르게 나타났다. 저장 후기에는 모든 처리에서 엽록소 함량이 감소하면서 처리 간 격차가 전반적으로 좁아져서, 저장 종료 시점에도 처리 간에는 유의적인 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 오이 재배방법별 포장 여부에 따른 엽록소 함량의 누적 변화(AUC)를 살펴보면, 저장 28일 종료 시점 기준 노지재배 후 무포장 처리는 454.2인 반면 시설재배 후 무포장은 218.8로 나타났으며, 노지재배 후 필름 포장처리는 490.6, 시설재배 후 필름 포장은 226.4를 보였다. 따라서 시설재배 오이는 포장의 기여도가 제한적이었던 반면에 노지오이에서는 포장 처리가 황화 현상을 억제하고 고유의 초록색을 보존하여 품질 유지 곡선의 아래쪽 면적(AUC)을 유의미하게 확장시킨 것으로 보여진다. Barth 등³³⁾과 Wang 등³⁴⁾은 포장재가 구축한 가스 조성(Modified Atmosphere)이 호흡률을 낮추고 엽록소 파괴 효소의 활성을 제어한다고 하였는데, 본 논문에서도 포장재가 엽록소에 대한 감소 곡선의 하단 누적 면적(AUC)을 축소시킨 요인으로 판단된다.

본 연구에서 적용한 조절된 매개모형 분석은 단일 저장 시점의 단편적 수치 비교를 넘어, 오이의 수확전 재배환경(C)에 의해 형성된 초기 품질 특성(H)이 저장 중 누적 품질 변화(Y, AUC)에 미치는 영향이 수확후 필름포장(P)에 의해 조절되었으며, 효과가 품질지표의 저장기간에 따라 다르게 나타났다. 오이 저장 7~21일 동안 필름포장에 의해 생체중량 변화를 억제하고 일부 경도 및 엽록소 함량의 변화를 조절하여 무포장보다 품질 변화가 적어, 오이 상품성은 수확전 재배환경과 수확후 관리의 상호작용의 연속적인 관계에 대해 고찰할 필요가 있을 보여주었다. 본 연구결과로 오이와 같은 원예작물에서 수확전 재배환경과 수확후 포장에 따른 영향을 조절된 매개효과 분석에 의해 상품성 유지를 설명할 수 있는 근거를 마련할 수 있었다.

요 약

오이 재배방법에 따라 저장 시 필름 포장의 영향을 규명하였다. 오이의 재배방법(노지 및 시설재배)에 따른 생육 특성과 수확후 필름 포장여부에 따라 저장(10°C) 시 생체중량이나 외관 등의 변화 특성을 조사하였다. 오이 수확 시 생육은 노지재배가 과중·과고에서 더 크고, 경도 및 엽록소 함량이 더 높은 것으로 나타났으며, 시설재배는 과육 내 수분 함량이 더 높았다. 오이 노지재배는 과중에서는 양적 생육이 더 큰 것을 이용하는 것으로 나타났으며, 외부 자연 환

경에 노출되어 재배됨에 따라 엽록소 함량이 높고 과피의 경도와 같은 내부구조가 더 단단한 것으로 나타났다. 이에 반해 시설재배는 수분함량이 높고 경도가 낮아 노지재배보다 다소 연약한 특성을 보였다. 오이 저장 중 경도나 엽록소 함량 등은 수확전 요인이 수확후에도 영향을 받아 지속적으로 노지재배의 것이 높은 것으로 나타났다. 그러나 생체중량 변화는 오이 저장 중에 재배방법에 의해 저장 시 차이를 보였지만 필름 포장에 따라 생체중 변화가 급감하여, 수확전 요인이 수확후 처리에 따라 영향을 받아 저장 특성이 달라짐을 관찰할 수 있었다. 수분함량에서도 수확 시 시설오이가 노지보다 높았으나 저장 후에는 재배방법보다는 필름에 의한 포장 여부에 차이를 보여서, 무포장이 높은 것으로 나타나, 수확전 요인이 상쇄하고 수확후 처리가 보다 영향을 미치는 것으로 판단된다. 그러나 경도나 엽록소 함량 등은 저장 시에도 재배방법에 따라 차이를 보여 수확전 요인이 지속적으로 영향을 미치는 것으로 보였다. 오이 재배방법에 따라 일부 측정 항목에서 영향이 저장 동안 차이가 나타나 수확전 요인이 저장까지 영향을 검토하였을 뿐만 아니라, 수확후 필름 포장을 통해 저장특성이 달라질 수 있음을 확인하여, 수확전 성질이 수확후 처리를 통해 특성을 개선할 수 있음을 규명하였다. 조절된 매개모형 분석을 통해 수확전 재배방법(C)이 형성한 품질(H)이 저장 중 누적 품질 저하(Y, AUC)로 이어지는 과정에서 수확후 포장(P) 처리가 효과적으로 제어·조절하여 상품성 유지에 효과적임을 입증하고자 하였다. 본 연구를 통해 수확전 요인이 수확후 처리를 통해 저장 특성이 변화하므로 향후 원예작물 저장에서 포장을 포함한 적극적인 수확후 관리를 통해 상품성 개선이 필요성을 밝혔다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 국립원예특작과학원의 연구 사업인 ‘오이 등 과채류 대용량 active modified atmosphere 포장에 의한 선도 유지 기술 개발(PJ01387602)’의 일환으로 이루어졌다. 본 연구에 많은 지원과 협력을 해준 김지강 님, 호재조 님, 박종근 님에게 감사사를 드립니다.

참고문헌

- Lee, J.S., Choi, J.W., Chung, D.S., Lim, C.I., Seo, T.C., Do, G.L. and Chun, C. 2005. Effects of lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars and cultivation methods on growth, quality and shelf-life. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 23(1):12-18.
- RDA. 2021. Cucumber. Rural Development Administration, Waju, Korea.
- RDA. 2013. Postharvest management of horticultural crops. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Lee, J.S., Kim, G., Kim, H., Jeong, D., Choi, D.K., Chae, Y.R., Park, M.H., Jang, M.S. and Hong, Y.P. 2021. The effect of packaging and storage temperature on quality changes of ‘White Dadagi’ cucumber. *J. Korea Soc. Packag. Sci. & Tech.* 27(2): 115-121.
- Park, H.W. and Kim, D.M. 2000. Effect of packaging films on quality of ‘Chuichung’ cucumbers during storage. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 29(2):248-251.
- Lee, J.S., Chung, D.S., Choi, J.W., Cho, M.A., Lee, Y.S. and Chun, C.H. 2006. Effect of storage temperature and packaging treatment on the quality of leaf lettuce. *Korean J. Food Preserv.* 13(1):8-12.
- Park, K.W., Kang, H.M., Chiang, M.H. and Kwon, Y.S. 1995. Effects of soil moisture content according to irrigation methods in culture on storability of cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruit. *J. Bio-Environ. Control* 4(1):74-79.
- RDA. 2003. Manual for agricultural investigation. Rural Development Administration, Suwon, Korea.
- Lee, J.S., Chang, M.S. and Jeong, C.S. 2019. Changes in quality factors of ‘Honey One’ melon during storage at different temperature. *Hortic. Sci. Technol.* 38(2):249-262.
- McGuire, R.G. 1992. Reporting of objective color measurements. *HortScience* 27(12):1254-1255.
- Cho, M.A., Hong, Y.P., Choi, J.W., Won, Y.B. and Bae, D.H. 2009. Effect of packaging film and storage temperature on quality maintenance of broccoli. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27(1):128-139.
- Nagata, M. 2009. A simple spectrophotometric method for the estimation of β -carotene content in spinach acetone extract. *Bull. Natl. Inst. Veg. Tea Sci.* 8: 1-5.
- Jeong, J.C., Woo, P.K. and Yoon, Y.Y. 1990. Influence of packaging with high-density polyethylene film on the quality of leaf lettuce during low temperature storage. *J. Korean Soc. Hort. Sci.* 31(3):219-225.
- Hayes, A.F. 2022. Introduction to mediation, moderation, and conditional process analysis: A regression-based approach. Guilford Press, New York, USA.
- Park, G.C. 1993. Standard model and characteristics of modernized greenhouse. *Protected Hortic.* 12(1):10-27.
- Ku, K.H., Song, J.G. and Park, G.S. 1998. Characteristics on distribution of air temperature for watermelon cultivation in tunnel type greenhouse. *Protected Hortic.* 11(1):8-17.
- Kim, H.C., Choi, J.H., Lee, S.W., Lee, J.H. and Bae, J.H. 2010. Change of internal temperature and humidity according to kind of covering materials in sweet pepper greenhouse. *J. Bio-Environ. Control* 19(1):1-5.
- Lee, H.W., Kim, Y.S., Sim, S.Y., Lee, J.W. and Diop, S. 2013. Estimation of heat insulation and light transmission performance according to covering methods of plastic greenhouses. *J. Bio-Environ. Control* 22(3):270-278.
- Choi, M.K., Yun, S.W., Kim, H.T., Lee, S.Y. and Yoon, Y.C. 2014. Field survey on the maintenance status of greenhouses in Korea. *Protected Hortic. Plant Fact.* 23(2):148-157.
- Lee, J.S. 2021. Effect of cultivation method on growth and storage characteristics of kimchi cabbage cultivar ‘Chun

- Gwang' grown on semi-highland in summer. *J. Korea Soc. Packag. Sci. & Technol.* 27(1):25-33.
21. Kim, B.S., Kim, M.J., Kim, O.W. and Kim, G.H. 2001. Quality changes of winter Chinese cabbage by different packing and loading during cold storage. *J. Korean Soc. Postharvest Sci. Technol. Agric. Prod.* 8(1):30-36.
 22. Choi, S.G. and Rhee, C. 1995. Effects of freezing rate and storage temperature on the degree of retrogradation, texture and microstructure of cooked rice. *Korean J. Food Sci. Technol.* 27(5):783-788.
 23. Lazan, H., Alid, Z.M. and Selamat, M.K. 1992. The underlying biochemistry of the effect of modified atmosphere and storage temperature on firmness decrease in papaya. *Physiological Basis of Postharvest Technologies.* 343: 141-147.
 24. Chang, E.H., Lee, J.S. and Kim, J.G. 2017. Cell wall degrading enzymes activity is altered by high carbon dioxide treatment in postharvest 'Mihong' peach fruit. *Sci. Hortic.* 225:399-407.
 25. Wang, F., Mi, S., Chitrakar, B., Li, J. and Wang, X. 2022. Effect of cold shock pretreatment combined with perforation-mediated passive modified atmosphere packaging on storage quality of cucumbers. *Foods* 11(9):1267.
 26. Choi, J.H., Lim, J.H., Jeong, M.C. and Kim, D.M. 2005. Effect of high CO₂ pre-treatment on quality of 'HiKawa Hakuho' peach fruit. *Korean J. Food Preserv.* 12(6):540-545.
 27. Park, Y.M. and Yoon, T.M. 2012. Postharvest 1-MCP treatment, storage method and shelf temperature on quality change of 'Gamhong' apples during export simulation. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 30(6):725-733.
 28. Wang, Y., Wang, Y., Ji, K., Dai, S., Hu, Y., Sun, L., Li, Q., Chen, P., Sun, Y., Duan, C., Wu, Y., Luo, H., Zhang, D., Guo, Y. and Leng, P. 2013. The role of abscisic acid in regulating cucumber fruit development and ripening and its transcriptional regulation. *Plant Physiol. Biochem.* 64:70-79.
 29. Tian, M.S., Downs, C.G., Lill, R.E. and King, G.A. 1994. A role for ethylene in broccoli senescence after harvest. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 119(2):276-281.
 30. Cai, J.H., Cheng, S.C., Luo, F., Zhao, Y.B., Wei, B.D., Zhou, Q., Zhou, X. and Ji, S.J. 2019. Influence of ethylene on morphology and pigment changes in harvested broccoli. *Food Bioprocess Technol.* 12(5):883-897.
 31. Klieber, A., Lin, W.C. and Joliffe, P.A. 1993. Training systems affect canopy light exposure and shelf life of long English cucumber. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 118(6):786-790.
 32. Koukounaras, A., Bantis, F., Karatolos, N., Melissas, C. and Vezyroglou, A. 2020. Influence of pre-harvest factors on postharvest quality of fresh-cut and baby leafy vegetables. *Agronomy* 10(2):172.
 33. Barth, M.M., Kerbel, E.L., Perry, A.K. and Schmidt, S.J. 1993. Modified atmosphere packaging affects ascorbic acid, enzyme activity and market quality of broccoli. *J. Food Sci.* 58(1): 140-143.
 34. Wang, H.W., Makino, Y., Inoue, J., Maejima, K., Funayama-Noguchi, S., Yamada, T. and Noguchi, K. 2017. Influence of a Modified Atmosphere on the Induction and Activity of Respiratory Enzymes in Broccoli Florets during the Early Stage of Postharvest Storage. *J. Agric. Food Chem.* 65(39): 8538-8543.

투고: 2026.07.21 / 심사완료: 2026.08.10 / 게재확정: 2026.08.20

한국포장학회지 투고규정 및 원고작성 요령

2005년 4월 1일 제정

2007년 8월 17일 개정

2008년 11월 25일 개정

1. 한국포장학회지(이하 본지)에의 투고는 한국포장학회 회원에 한한다. 비회원의 투고는 본회 회원과의 공동 연구인 경우에만 허용한다. 단, 국제 심포지엄이나 세미나에서 발표된 논문 혹은 자료 등 초청원고는 예외로 한다.
2. 본지에의 투고원고는 다른 학술지에 원본으로서 발표되지 아니한 것이어야 한다. 단, 초청원고는 예외로 한다.
3. 논문의 투고 일자(논문이 본회에 도착한 날)를 접수일로 하고 최종심사 종료일을 채택일로 한다.
4. 투고 시에는 원고가 포함된 워드프로세스 파일(한글 또는 MS word)을 인터넷 웹 또는 이메일을 통해서 접수시킬 수 있다(아래 제 14항 참조).
5. 투고 원고는 포장과학 및 기술에 관한 연구논문, 연구노트, 총설 및 자료 등으로 한다. 다만, 포장과학 및 기술의 확산과 전파에 도움이 되는 특별한 필요가 있는 경우에, 편집위원회에서 다른 형식의 원고를 접수하여 게재를 검토할 수 있다.
6. 논문은 국문, 국한문 혹은 영문으로 작성한다. 영문원고의 경우에는 모든 내용이 영문으로 작성되어야 하며 국문 사용은 금한다. 원고는 한글 건너서(double space) 워드프로세스(한글 또는 MS word)로 작성한 파일로 투고한다.
7. 항목별 작성방법은 다음과 같다.

(1) 제목, 저자명, 연구기관 및 주소

- 원고 겉표지에 제목, 저자명, 연구기관을 국문과 영문 순으로 표시한다. 중단과 하단에 소제목과 연락처를 표기한다. 주저자와 소속이 다른 저자의 경우에는 저자명 다음에 위첨자 숫자로 구별되도록 한다.
- 교신저자(corresponding author)의 이름 우측에 위첨자로 *를 표시하고 페이지 하단에 소속기관, 주소, 전화번호, fax번호 및 E-mail 주소를 영문으로 표기한다.
- 연구기관 및 주소는 저자명 순으로 표기하고, 여러 다른 저자의 소속 연구기관이 있는 경우 해당 저자 소속 연구기관 이름 왼쪽 상단에 저자에 해당하는 위첨자 숫자로 구별되도록 한다.
- 10단어 이내의 단축제목(running head)을 교신저자란 위에 한글논문은 한글로, 영어논문은 영어로 제시한다.

(2) 요약

- 국문논문일 경우 영문초록(Abstract)을 수록하고 국문 요약을 본문에 수록한다. 영문 초록은 200단어 내외로

한다. 5개 이내의 영문 색인어(Key words)를 영문초록 다음에 적는다.

(3) 본문

- 논문의 본문이 국문인 경우에는 Abstract(영문), 서론, 재료 및 방법, 결과 및 고찰, 요약, 참고문헌 순으로 작성하는 것을 원칙으로 하며, 논문의 특성에 따라 달리할 수 있다. 영문논문인 경우에는 Abstract, Introduction, Materials & Methods, Results & Discussion, Conclusions, References 순에 따르는 것을 원칙으로 한다. 감사의 글(Acknowledgement)이 있는 경우에는 참고문헌 앞에 수록한다.
- 원고는 다음과 같이 분류 포인트 시스템으로 기술한다.

서론

재료 및 방법

1.

2.

결과 및 고찰

1.

2.

요약

참고문헌

(4) 참고문헌(References)

- 인용된 문헌들은 본문에 인용된 순서대로 해당 문구의 알맞은 곳에 오른쪽 반괄호 속의 아라비아 숫자로 일련번호를 부여하고 위첨자로 표시하여야 한다. 수학적식의 경우에는 대괄호 속의 아라비아 숫자로 일련번호를 부여하고 대괄호는 우측정렬한다.

예) 국문원고 - Kim과 Lee¹⁾는... Kim 등²⁾에..., 이와 박³⁾은..., ...이루어진 바 있다⁴⁾.

영문원고 - Paine and Shin¹⁾ reported..., Park et al.²⁾ stated.. ...has been developed³⁾.

- 참고문헌이 학술잡지의 경우는 저자명, 출판년도, 논문명, 잡지명, 권수(호수), 쪽수 순으로, 단행본이나 편집서의 경우는 저자, 출판년도, 책명, 편집자, 권수, 출판사명, 출판사 소재지, 쪽수의 순으로 명기하여야 한다. 단, 없는 항목은 생략할 수 있다. 저자명은 성, 이름 순으로 명기한다. 잡지명의 약기 방식은 ISI 잡지 약어(ISI Journal Abbreviation)에서 채택한 것을 사용하여야 한다. 한국포장학회지를 비롯한 국문 학

술지에 게재된 논문도 영문으로 인용한다. 참고문헌의 기재방식은 다음 예를 따라 작성한다.

예)

- 정기간행물

1. Lee, M.H. and Park, J.M. 2000. Experimental investigation for flexural stiffness of paperboard-stacked structure, Korean J. Packag. Sci. Tech. 7(1): 9-15.

- 단행본 저서

2. Twede, D. and Goddard, R. 1998. Packaging Materials. Pira International, Leatherhead, UK, pp. 193-203.

- 편집서

3. DeLassus, P.T., Brown, W.E. and Howell, B.A. 1997. Vinylidene chloride copolymers. In: The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology. 2nd Ed. Brody A.L. and Marsh K.S. (eds.), John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 958-961.

- 학술대회 발표논문집

4. Choi, Y.W., Lee, S.Y. and Kim, J.N. 2008. Development of the functional films coated with nano-TiO₂ particles for application in food packaging. Proceeding of 16th IAPRI World Conference on Packaging (International Association of Packaging Research Institutes), Bangkok, Thailand, pp. 143.

- 학위논문

5. Song, Y.S. 1995. Modeling respiration and transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry and moisture absorbent. Ph.D. Dissertation, Rutgers University, New Brunswick, USA.

- 특허

6. Lee, D.S. and Jeong, S.K. 1998. Container for storing kimchi. US Patent 5766660.

(5) 표

- 모든 표는 명료하게 작성하고 표 내의 긴 단어는 적당한 약어로 대체한 후 아래에 약어를 정의하여야 한다. 모든 표는 아라비아 숫자로 일련 번호를 부여하여야 한다. (예 : Table 1.)

(6) 그림

- 그림의 원본은 인쇄시 가로 길이가 6.9 cm 또는 14.8 cm가 된다는 것을 염두에 두고 깨끗이 작성하여야 한다. 모든 그림은 아라비아 숫자로 일련번호를 부여해야 한다. (예 : Fig. 1.)

- 모든 표와 그림의 설명은 영어로 하여야 한다. 모

든 표와 그림은 각각 별도의 쪽에 작성하며 그림과 떨어진 하단에 그림 일련번호를 표기한다. 그림의 설명은 별지에 모아 작성하여야 한다.

(7) 기타 사항

- 모든 단위는 SI 단위를 사용함을 원칙으로 하나 일반화된 단위를 사용할 수도 있다. (예: 평량 g/m², 초지속도 m/mm 등). 온도(°C)와 농도(%)를 제외한 모든 단위는 한 칸 띄워 쓰기를 한다.
 - 본문 그림 및 표에 사용된 약어, 시료명, 기호 등은 그것이 처음 사용된 곳에서 한번만 정의해 주어야 한다.
 - 투고된 논문은 저자 체크리스트의 모든 사항을 만족시킬 경우에 한하여 출판에 들어간다.
8. 논문 게재 확정시에는 인쇄 페이지당 소정의 게재료를 납부하여야 한다. 천연색 사진을 사용한 경우에는 실비를 추가로 납부해야 한다. 편집위원회에서 정하는 특정 조건에 한해서 게재료 납부를 면제할 수 있다.
 9. 별쇄본은 30부를 증정하며 그 이상은 자비 부담으로 한다.
 10. 게재원고는 반환하지 않으나, 사진과 그림은 투고 시 요구할 경우에 한하여 반환한다.
 11. 저자교정은 초교에 한하며, 이때는 인쇄상의 오식에 대해서만 수정할 수 있고, 개편 또는 추가를 원할 때에는 편집위원회의 승인을 얻어야 한다.
 12. 채택되어 저자교정이 끝난 원고에 대해서는 출판 및 인용색인 데이터베이스작업 등을 위해 저작권 이전동의서 제출, 저자의 필요한 인적사항정보 제공 등을 요청할 수 있고, 저자는 이에 협조하여야 한다.
 13. 저자교정이 끝난 원고는 등기속달 또는 전자메일을 이용하여 한국포장학회 사무국에 명시된 기한 내에 도착하도록 송부해야 한다. 부득이하여 저자교정 마감기간을 지키지 못할 경우에는 전화, 팩스 또는 전자메일로 마감기일 전까지 연락하여야 한다. 편집위원장은 저자교정 마감일을 지키지 못한 원고의 게재를 다음 호로 연기할 수 있다.
 14. 한국포장학회지 논문 투고는 아래의 두 방법을 통해 이루어질 수 있다.
 - (1) 학회홈페이지로 접속하여 '논문투고'의 하위 폴더상에 업로드하거나,
 - (2) 혹은 E-mail(editor@kopast.or.kr)

Guideline for Authors

Original manuscripts containing new significant results in the fields of science and technology for packaging, and not published or not scheduled for publication elsewhere will be considered for publication of Korean Journal of Packaging Science and Technology published by Korea Society of Packaging Science and Technology. Reviews and manuscripts based on preprints from conferences may also be accepted. The copyright of the published article belongs to the author(s). All manuscripts will be refereed by two or more members of the KOPAST Editorial Board who make a critical appraisal of the substance and structure of the paper and recommend whether it should be published taking into consideration what is already published in the literature on the subject concerned.

Manuscript Preparation

The manuscript should preferably be submitted by e-mail or by other electronic copy. Figures and tables should be supplied on separate pages. KOPAST is published in black and white, but only if asked by related authors, the relevant papers may be published in color with the payment of actual expenses.

English Language

The manuscripts must be written by MS words in good English, linguistically revised. The font style should be Time New Roman. Either American or British spelling may be used, but consistency is desired.

Title, authors and headings

The title must be short but shall contain essential information. It should not contain abbreviations. Authors' names and affiliation follow the title.

Headings, sub headings and sub-sub headings should be written as follows;

Introduction

Materials and Methods

1.

...

Abstract

The summary at the beginning of the paper should be informative, not merely indicative. It should state briefly the purpose of the work, the significant results and conclusions.

It should be no more than 200 words. Abbreviations and acronyms should be avoided.

Keywords

Keywords should be given to help abstracting services to classify the paper.

Address(es) of the author(s)

Addresses (including corresponding author's e-mail) at the time of the publication are given for each author in a footnote.

Introduction

State scope of the problem investigated, review of pertinent literature, method of investigation, and the aim of the work.

Materials and Methods

Give full details of all the experiments, so that they can be repeated. Results should not be reported here.

Results and Discussion

Representative data shall be presented. Methods shall not be described here. Discuss principles and relationships, pointing out exceptions. Show agreement with published research work. The significance of the work or conclusions should be presented in the end of the discussion or in a separate section.

Mathematics

The SI system (metric system) shall be used throughout. Each equation should be set on the separate line and numbered with square brackets 'Eq. [X]'. Use arabic numerals. All mathematical symbols must be explained.

Tables

Wherever tables are mentioned, write 'Table X'. A short heading should be provided for each table. Tables should be consecutively numbered with arabic numerals like 'Table X'. Units should preferably be given in column headings. Use capital letters sparingly.

Illustrations

Wherever figures are mentioned, write 'Fig(s). X'. Figures should be consecutively numbered with arabic numerals with a short heading. The lines of the figures, on separate sheets, must be sufficiently heavy to be readily legible and the letters and symbols sufficiently large. The minimum resolution of pictures must be 300

dpi (10 cm width). Units should be given on the axes. Photographs must have good contrast when printed. Magnification of photomicrographs must be indicated e.g., with a scale line.

Conclusions

The conclusions of the work should be clearly stated in a separate section.

Acknowledgement and Appendix

Special thanks and information can be given as an Acknowledgement and Appendix.

References

References should not include unpublished works. They should be indicated in the text by numbers in parentheses and the order of the numbers must be the order in which they appear in the text. They list must be in numerical order. They style to be used is exemplified by the following :

- Periodicals

1. Lee, M.H. and Park, J.M. 2000. Experimental investigation for flexural stiffness of paperboard-stacked structure. Korean J. Packag. Sci. Tech. 7(1): 9-15.

- Book

2. Twede, D. and Goddard, R. 1998. Packaging Materials. Pira International, Leatherhead, UK, pp. 193-203.

- Edited book

3. DeLassus, P.T., Brown, W.E. and Howell, B.A. 1997. Vinylidene chloride copolymers. In: The Wiley Encyclopedia of Packaging Technology 2nd Ed. Brody A.L. and Marsh K.S. (eds.), John Wiley & Sons, New York, USA, pp. 958-961.

- Conference proceeding

4. Choi, Y.W., Lee, S.Y. and Kim, J.N. 2008. Development of the functional films coated with nano-TiO₂ particles for application in food packaging. Proceeding of 16th IAPRI World Conference on Packaging (International Association of Packaging Research Institutes), Bangkok, Thailand, pp. 143.

- Thesis

5. Song, Y.S. 1995. Modeling respiration and transpiration in a modified atmosphere packaging system containing blueberry and moisture absorbent. Ph.D. Dissertation, Rutgers University, New Brunswick, USA.

- Patent

6. Lee, D.S. and Jeong, S.K. 1998. Container for storing kimchi. US Patent 5766660.

Submission of paper

Papers may be submitted directly to the society office as follows :

Korea Society of Packaging Science & Technology
#007, 9F, 441, Gangnam-daero, Seocho-gu, Seoul, 06612, Republic of Korea
TEL : 82-2-6257-9477
E-mail: editor@kopast.or.kr

(사)한국포장학회 소식

1. 학회안내

1.1 학회홈페이지 안내: <https://www.kopast.or.kr>

학회홈페이지를 많이 이용해 주시기 바랍니다. 아직 홈페이지를 통해 회원등록을 하지 않으신 회원 여러분은 회원 명단의 전산화를 위해 반드시 회원등록을 다시 해주시기를 부탁드립니다.

1.2 학회 연회비 안내

종 신 회 원	500,000원	정 회 원	50,000원
법 인 회 원	2,000,000원 이상~	학 생 회 원	20,000원

※ 종신회원은 이사회의 승인 후 가입이 가능합니다.

※ 계좌번호: 국민은행 302501-04-266761(예금주: 한국포장학회)

2. 학회 소식

1) 주 제: (가제) 디지털 전환 시대의 패키징 혁신: AI, 지속가능 패키징과 순환경제

(Packaging Innovation in the Era of Digital Transformation: AI, Sustainable Packaging, and the Circular Economy)

2) 일 시: 2026. 12. 02(수), 13:00~12. 04(금), 12:00

3) 장 소: 제주도 오리엔탈호텔

4) 주 최: (사)한국포장학회

5) 프 로 그 램 :

※ 12/02 (Wed)

13:00~17:30	등록 (Registration)		
14:00~14:10	개회사		
장 소	한라홀	일출홀	사라홀 (포스터)
14:10~16:10	Young Scientist 세션	Graduate Student Oral Competition	Poster Session
16:30~17:30	Poster Session 심사		

※ 12/03 (Thu)

08:30~20:00	등록 (Registration)		
09:00~09:20	개회식 (Opening Ceremony) (한라홀)		
09:20~10:50	Plenary Lecture 세션 (한라홀)		
11:00~12:00	특별 세션 (한라홀) 해외 연사		
장소	한라홀	일출홀	사라홀
13:00~14:20	Session A-1: 재생원료 사용의무제도 이행 현황 (후원: 한국포장재재활용공제사업)	Session B-1: (업데이트 예정) (후원: 한국식품산업클러스터진흥원)	Session C-1: 생성형 AI를 통한 디자인 기능성의 확장: 패키지 및 브랜드 개발 (후원: 디자인·융합분과)
14:30~15:50	Session A-2: PPWR 대응 필라스틱 폐기물 재활용 기반 재생원료 및 포장재 개발 (후원: 한서씨앤에프)	Session B-2: 일본의 친환경 패키징 혁신: 소재·기술의 최신 동향과 전망 (후원: 패키징산업분과I)	Session C-2: 지속가능한 포장을 위한 바이오베이스 플라스틱 기술과 산업 전망 (후원: 에버캠텍)
16:00~17:20	Session A-3: 지속가능 패키징의 새로운 기준: 소재 혁신에서 브랜드 적용까지 (후원: 한솔제지)	Session B-3: 대한민국 패키징 기업의 현실과 미래 (후원: 패키징산업분과II)	Session C-3: PPWR 대응을 위한 지속가능 패키징 규제·평가 및 기술전환 (후원: 한국건설생활환경연구소)
17:20~18:20	(사)한국포장학회 정기총회 (사라홀)		
18:20~20:00	시상식 및 만찬 (한라홀)		

※ 12/04 (Fri)

09:00~12:00	등록 (Registration)		
장소	한라홀	일출홀	사라홀
09:00~10:20	Session A-4: 순환경제 실현을 위한 차세대 친환경 포장소재 (후원: 소재환경분과I)	Session B-4: (업데이트 예정) (후원: 로지스올)	Session C-4: 다층 페플라스틱의 분리·전환·고순도 회수 기술 동향 (후원: 생산기술연구원)
10:30~11:30	Session A-5: 식품 및 의약품 포장의 미래 혁신: 순환형 소재와 지능형 포장에서 퍼지컬 AI 및 디지털 추적성까지 (후원: 식·의약품분과)	Session B-5: (업데이트 예정) (후원: 물류유통분과)	(업데이트 예정)
11:30~12:00	폐회식 (Closing Ceremony)		

3. 임원회의

3.1. 임시총회

- ◎ 일 시 : 2026. 04. 01(수), 17시 30분~18시
- ◎ 장 소 : 킨텍스 제1전시장 212호
- ◎ 안 건 : 정관 개정 여부, 차기 회장 및 수석부회장 추천, 기타 안건 등.

3.2. 제 4차 정기 이사회

- ◎ 일 시 : 2026. 05. 22(금), 17~18시
- ◎ 장 소 : 토즈 강남컨퍼런스점 및 온라인(Zoom)
- ◎ 안 건 : 학술지 진행 사항, 춘계학술대회 결과보고, 26년 사업계획 및 예산(안), 기타 사업 현황 및 운영 방안 논의.

3.3. 제 5차 정기 이사회

- ◎ 일 시 : 2026. 06. 25(목), 17~18시
- ◎ 장 소 : 토즈 강남컨퍼런스점 및 온라인(Zoom)
- ◎ 안 건 : 학술지 진행 사항, 차기 회장 및 수석부회장 선출, 춘계학술대회 개최 진행사항, 기타 학회 발전 및 운영 방안 논의

3.4. 제 6차 정기 이사회

- ◎ 일 시 : 2026. 07. 20(월), 17~18시
- ◎ 장 소 : 토즈 강남컨퍼런스점 및 온라인(Zoom)
- ◎ 안 건 : 학술지 진행 사항, 차기 회장 및 수석부회장 선출, 춘계학술대회 개최 진행사항, 기타 학회 발전 및 운영 방안 논의.

3.5. 제 7차 정기 이사회

- ◎ 일 시 : 2026. 08. 11(화), 17~18시
- ◎ 장 소 : 토즈 강남컨퍼런스점 및 온라인(Zoom)
- ◎ 안 건 : 학술지 진행 사항, 차기 회장 및 수석부회장 선출, 춘계학술대회 개최 진행사항, 기타 학회 발전 및 운영 방안 논의.

4. 2026년 한국포장학회 법인회원

- ◎ (주)대진화학, 엔피씨(주), (주)세림, (주)알엔에프케미칼, 주식회사 윌로그, 한솔제지(주), SIG Korea, 연세패키징기술경영최고위과정 총동문회, 쿠라레트레딩 주식회사. (주)에버캡텍

5. 포장학회 논문 투고안내

- ◎ 한국포장학회지는 포장과학 및 기술에 관련된 다양한 주제를 다룬 연구논문, 연구노트, 총설 등의 논문을 심사를 거쳐 게재하고 있습니다. 논문투고는 학회 홈페이지(<https://www.kopast.or.kr>)의 [논문투고/온라인논문투고] 메뉴에서 업로드하시면 가능합니다

◎ 문 의

E-mail: kopast2021@gmail.com

Tel: 02)6257-9477



한국포장학회지

2026. 8 Vol. 32 No. 2

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY