



한국포장학회지

2026. 4 Vol. 32 No. 1

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

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

한국연구재단 등재 학술지

한국포장학회지

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

한국포장학회지

Vol. 32 No. 1
2026. 4

Vol. 32 No. 1 2026. 4



한국포장학회지



한국포장학회

KOREA SOCIETY OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY





한국포장학회지

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

2026년도 학회 임원명단

명예회장	김종경(한국건설생활환경시험연구원)		
회장	유하경(소프트팩㈜)		
수석부회장	박수일(연세대학교)	오재영(한국건설생활환경시험연구원)	
부회장 (가나다순)	고성혁(연세대학교)	김준태(경희대학교)	김영선(㈜진우아이엔피)
	박종민(부산대학교)	서종철(연세대학교)	손수경(백제예술대학교)
	신준섭(웅인예술과학대학교)	윤찬식(㈜에버캡텍)	정현모(경북과학대학교)
	조영진(한국식품연구원)	허상도(중앙대학교)	
감사	민세철(서울여자대학교)	박상희(한국생산기술연구원)	
수석이사	한재준(고려대학교)		
총무이사	유승란(세계김치연구소)		
재무이사	주민정(한국건설생활환경시험연구원)		
편집이사	김기석(서울대학교)	김도완(강릉원주대학교)	안덕순(경남대학교)
	황성욱(계명대학교)		
학술이사	강동호(한국생산기술연구원)	김도영(전남대학교)	김수현(한국컨테이너폴(주))
	도한솔(이화여자대학교)	박지훈(이화여자대학교)	박태훈(한국재료연구원)
	이지현(서울대학교)	정영훈(경북대학교)	
정보이사	안재환(한국식품연구원)	장윤지(국민대학교)	정성균(㈜아모레퍼시픽)
	허준(한국식품산업클러스터진흥원)		
홍보이사	김길수(㈜경연전람)	김나영(인하공업전문대학)	김미연(㈜투유에이치앤비)
	김재영(CJ프레시웨이 R&D센터)	박주하(롯데중앙연구소)	이진경(㈜씨피알에스앤티)
사업이사	강호상(㈜한국폴리네트론)	권대현(올촌화학)	권혁찬(한국순환자원유통지원센터)
	김경원(㈜LG생활건강)	김금탑(Dspack(주))	김연동(㈜BMTS)
	김인수(㈜가성팩)	류진형(동조케미칼)	문병근(한국건설생활환경시험연구원)
	박동일(㈜알앤에프케미칼)	박영철(한국중량물포장)	박정훈(㈜세롬)
	백소라(세종사이버대학교)	백인걸(한솔제지(주))	서도찬(로지스올(주))
	서원태(삼성전자(주))	안덕준(㈜SPC PACK)	유정권(팩티브코리아)
	윤승일(핀테크그리)	이보영(㈜네고팩)	이재정(한국포장재활용사업공제조합)
	이청일(CJ비오솔)	이혁진(㈜하벤)	이현철(㈜서일)
	이해성(㈜태림포장)	장욱(한국플라스틱포장용기협회)	전재호(㈜유진로지스틱스)
	조현준(한국인삼공사)	정성태(한양사이버대학교)	정준재(한국식품산업클러스터진흥원)
	정해원(㈜아모레퍼시픽)	진영석(㈜유한팩)	최민수(㈜팩플러스)
	최석(㈜써모랩코리아)		
국제이사	김영택(Virginia Polytechnic Institute & State Univ. USA)	노유래(Michigan State Univ. USA)	박종훈(Toronto Metropolitan Univ. Canada)
	신중민(California Polytechnic State Univ. USA)	오상원(한솔제지, USA)	이의학(Michigan State Univ. USA)

편집위원회

위원장	김준태(경희대학교)		
부위원장	김기석(서울대학교)	김도완(강릉원주대학교)	안덕순(경남대학교)
	황성욱(계명대학교)		
편집의원 (가나다순)	강동호(한국생산기술연구원)	박수일(연세대학교)	박종민(부산대학교)
	박태훈(한국재료연구원)	서종철(연세대학교)	

한국포장학회지 제32권 제1호

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY Vol. 32. No.1, 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 4월 30일

Published Date: 2026. 4. 30.

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 제1호

연구논문

2026년 4월

인공지능을 활용한 밀키트 포장 방법 및 재질 분류 모델 개발
..... 김태형 · 권기현 · 김아나 1

EU PPWR 규정에 따른 지속가능한 패키징 생태계 구축을 위한 고찰
..... 김미경 · 김종경 7

포장재 표시사항을 중심으로 한 국내 그린워싱 실태 분석 연구
..... 조성문 17

환경부하 저감을 위한 택배 수송용 연성포장의 포장공간비율 대체 방안 연구
..... 오재영 · 김혜림 · 유찬중 · 김승돈 27

The Role of Palladium Carbon Quantum Dots on UV-Blocking and Antibacterial Properties
of PVA Nanocomposite Films for Food Packaging
..... Mohammadreza Jozaghkar, Sehyun Jin, Jamilur R. Ansari, and Jongchul Seo 35

생강 껍질 유래 아연 도핑 탄소점을 함유한 카라기난 필름의 비교 연구
..... 정윤 · 안효진 · 김준태 45

식품용 대용량 기구 · 용기의 용출 시험법 개선 연구
..... 이정훈 · 이진규 · 안혜정 · 김준호 · 김준태 53

Recent Advances in High-Barrier Food Packaging Based on Mono-material and Natural
Materials
..... Youngjin Cho 61



한국포장학회지

KOREAN JOURNAL OF PACKAGING SCIENCE & TECHNOLOGY

Vol. 32, No. 1

Research Papers

April 2026

- Artificial Intelligence Based Meal-kit Packaging Method and Material Classification Model
 Tae Hyong Kim, Kihyun Kwon, and Ah-Na Kim 1
- A Study on Building a Sustainable Packaging Ecosystem in Response to the EU PPWR Regulation
 MeeKyung Kim and Jongkyoung Kim 7
- An Analysis of Domestic Greenwashing Practices Focusing on Packaging Labels
 Seong Moon Cho 17
- A Study on Alternative Approaches of Packaging Space Ratio in Flexible Transport Packaging
 for Environmental Load Reduction
 Jae Young Oh, Hye Rim Kim, Chan Jong Yu, and Seung Don Kim 27
- The Role of Palladium Carbon Quantum Dots on UV-Blocking and Antibacterial Properties
 of PVA Nanocomposite Films for Food Packaging
 Mohammadreza Jozaghkar, Sehyun Jin, Jamilur R. Ansari, and Jongchul Seo 35
- Comparative Study on Carrageenan-Based Films Incorporating Zinc-Doped Carbon Dots
 Derived from Ginger Peel
 Yoon Jeong, Hyo Jin An, and Jun Tae Kim 45
- Research on Improving the Migration Test Method for Large-capacity Food Equipment and
 Containers
 Jung Hoon Lee, Jin Gyu Lee, Hye Jeong Ahn, Jun Ho Kim, and Jun Tae Kim 53
- Recent Advances in High-Barrier Food Packaging Based on Mono-material and Natural Materials
 Youngjin Cho 61

인공지능을 활용한 밀키트 포장 방법 및 재질 분류 모델 개발

김태형 · 권기현 · 김아나*

한국식품연구원 스마트제조연구단

Artificial Intelligence Based Meal-kit Packaging Method and Material Classification Model

Tae Hyong Kim, Kihyun Kwon, and Ah-Na Kim*

Smart Manufacturing Research Group, Korea Food Research Institute, Wanju 55365, Jeonbuk-do, Republic of Korea

Abstract This study proposes an artificial intelligence (AI)-based multi-output artificial neural network (ANN) classification model capable of automatically predicting optimal packaging methods and materials based on product characteristics. A total of 51 commercial meal-kit products distributed under ambient, chilled, and frozen conditions were analyzed to construct a comprehensive dataset comprising 19 packaging-related parameters such as distribution type, cooking requirement, packaging material, and sealing type. Of these, 17 parameters were used as input features, and two—packaging method and packaging material—served as output targets. The initial ANN model included an input layer of 17 nodes, two hidden layers with 128 neurons each (tanh activation), and two softmax output layers (nine and eight nodes for method and material classification, respectively). To optimize performance, Bayesian optimization was applied to five key hyperparameters: neuron count, learning rate, activation function, neuron division ratio, and optimizer type. The optimized model with four hidden layers and 1,024 neurons achieved classification accuracies of 85.8% for packaging method and 93.9% for packaging material, with corresponding F1-scores of 84.4% and 90.9%, respectively. Compared to the baseline, this represents a 22-44% improvement across metrics. The findings demonstrate the potential of AI-driven systems for intelligent, standardized, and sustainable packaging design, contributing to the advancement of smart manufacturing and eco-efficient food packaging automation.

Keywords Artificial intelligence, Neural network, Meal-kit, Packaging, Automation

서론

국내 밀키트 산업은 최근 몇 년간 빠르게 성장하며 주요 식품 소비 트렌드로 자리잡고 있다. 1인 가구와 맞벌이 가정 증가, 건강하고 간편한 식사에 대한 수요가 늘어나면서 밀키트 시장은 꾸준히 확대되고 있다¹⁾. 국내 밀키트 시장은 2020년 이후 급성장하고 있으며, 최근 한식, 양식, 아시아 음식, 프리미엄 요리까지 다양한 메뉴가 포함된 밀키트가 출시되고 있다. 밀키트는 대형마트, 편의점뿐만 아니라 온라인 유통 플랫폼을 통해 쉽게 구매가 가능하게 됨에 따

라 빠르고 간편하게 밀키트를 구매할 수 있어 소비자 접근성이 높아졌다²⁾.

신선한 재료가 포함된 밀키트의 특성상 제조 및 유통 과정에서 온도관리와 신선도 유지가 중요하다. 이를 위해 콜드체인 시스템 강화를 통한 품질 관리를 고도화하고 있다³⁾. 최근, 밀키트의 수요가 증가함에 따라 대량생산 시스템과 자동화의 도입을 통해 생산의 효율성을 높이고 있으나, 이에 따라 제품의 평균 가격이 높아지는 문제점으로 인하여 중장기적 소비자 확대를 위한 공급망 효율화와 자동화 비용 절감 등에 대한 연구가 필요하다⁴⁾. 또한, 프리미엄 밀키트 등 다양한 개별 제품이 포함된 밀키트가 출시되고 있으나, 이는 개별 제품을 각기 포장해야하는 문제점으로 인한 과도한 플라스틱 사용 등 환경적 문제가 발생하고 있으며, 이를 위한 친환경적 포장재 또는 재활용 가능한 종이 포장 등에 대한 방법에 대한 연구가 수행되고 있다⁵⁻⁶⁾.

*Corresponding Author: Ah-Na Kim
Smart Manufacturing Research Group, Korea Food Research Institute, Wanju 55365, Jeonbuk-do, Republic of Korea
Tel: +82-63-219-9494
E-mail: kimahna@kfri.re.kr

국내 밀키트 제품은 크게 상온, 냉장, 냉동 유통으로 구분되며, 각 유통 방법에 따라 포장 형태, 기법, 재질이 다양하며, 제품의 신선도 연장, 살균 여부, 가열 여부, 원재료 또는 식품 특성을 고려하여 선정된다⁷⁾. 예를 들어, 생육, 육 제품, 치즈 등과 같이 탈기 후에도 형태 유지성이 좋은 식품의 경우 진공포장을 적용하지만, 형태가 불균일하거나 분말 제품 또는 빵류와 같은 제품은 진공 포장 방법이 부적절하다. 한편, 채소, 과일 및 곡류 등의 밀키트 제품의 경우 신선도를 유지하기 위해서 산소 농도가 1~5% 정도로 유지되어야 하므로 가스치환 포장 방법이 유리하다⁸⁾.

밀키트 포장 방법 외에도 포장 재질에 대한 고려도 필수적이다. 밀키트 포장 재질은 제품의 특성과 구성, 포장 기법, 유통 방법, 포장 자동화 방법 등으로 인하여 다양한 재질을 활용한다. 밀키트 구성품이 면류일 때 유통 또는 포장 과정에서 파손 방지를 위하여 트레이를 사용하며, HIPS 재질의 경우 성형성과 강도적인 측면에서 PP 재질 대비 우수하지만, 냉동 상태에서는 파손이 되기 쉬운 특성이 있어 상온 유통용 밀키트에 적용된다⁹⁾. 또한, 조리 과정 후 레트로트 살균 또는 열탕 살균에 따라 PET 또는 NY 재질의 외포장을 진행한다¹⁰⁾.

이러한 문제점들을 개선하기 위하여 밀키트 제품에 대한 포장 방식, 주요 소재, 형태 등을 고려한 포장 규격화 또는 표준화를 위한 방법론 개발이 필수적이다. 또한, 새롭게 개발하는 밀키트에 대한 포장 방법, 형태, 재질 등에 대한 정보가 부족하고, 과포장 등을 방지하기 위하여 포장 방식을 추천 할 수 있는 시스템 구축이 시급하다¹¹⁾.

최근 식품 및 포장 산업에서는 복잡한 제품 특성과 다변화된 포장 조건을 효율적으로 분류·판별하기 위하여 인공지능 기반 분석 기법의 적용이 확대되고 있다. 특히, 컴퓨터 비전과 딥러닝 기술은 식품 포장재의 외형, 재질 특성, 구조적 차이를 학습하여 자동 분류 및 선별에 활용되고 있으며, 이는 기존의 규칙 기반 또는 수작업 분류 방식의 한계를 보완할 수 있는 대안으로 보고되고 있다¹²⁾. 또한, 다층 구조를 갖는 플라스틱 포장재나 오염도가 상이한 포장재를 대상으로 한 연구에서도 인공지능 모델을 활용한 재질 판별의 가능성이 제시되고 있다¹³⁾. 최근에는 영상 정보 뿐만 아니라 센서 데이터와 결합한 인공지능 기반 분류 시스템이 제안되며, 포장 자동화 및 표준화 공정에서의 적용 가능성이 확대되고 있다¹⁴⁾. 그러나 기존 연구들은 주로 단일 포장재 또는 폐기물 분류를 중심으로 수행되어, 다양한 유통 조건과 조리 특성을 동시에 고려해야 하는 밀키트 제품에 대한 포장 방법 및 포장 재질 판별 연구는 여전히 제한적인 실정이다.

이를 위해 본 연구에서는 밀키트의 개별 제품에 대한 원물 형태, 유통 방법, 포장 방법, 조리 방법 등에 대한 제품 분석을 통하여 밀키트 및 개별 구성품에 대한 인공지능 기

반 포장 방법 및 포장 재질을 판별 시스템을 개발하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

국내 판매 중인 밀키트 제품 중 냉장, 냉동 그리고 실온 유통 보관인 51종의 밀키트 제품을 구매하여, 해당 제품에 대한 최종 제품 및 내부의 개별 제품 포장 방법, 포장 재질 등에 대한 분석을 수행하였다.

2. 밀키트 제품 분석을 위한 파라미터 정의

판매 중인 최종 밀키트 제품에 대한 규격 (무게, 크기), 포장 방법, 포장 재질, 인분, 유통 기한, 유통 형태, 금액, 포장의 인쇄도, 포장 기법, 품목 개수, 제품 형태, 품질 유지 제품 여부 등 총 19가지의 파라미터를 분석한 후, 최종 밀키트 제품 내 포함되어 있는 개별 제품들에 대하여 동일한 파라미터를 분석하였다. 본 연구에서 분석한 파라미터는 Table 1에 나타나 있다.

각 분석 파라미터에는 여러 변수들이 포함되어 있는데, 예를 들어 조리 여부 파라미터의 경우, 최종 밀키트 제품이 조리가 된 상태에서 판매되는지 또는 구매자가 밀키트 제품을 직접 조리해야 하는지 여부를 분석하였다. 또한, 포장 방법 파라미터의 경우 총 9가지의 타입으로 분류되었는데, 진공 포장, 스탠딩 파우치, 필로우 포장, 셀링, 폼필셀타입, 로켓/가제트 포장, 열수축, 이지필, 트레이 그리고 슬리브 포장 방법으로 구성되어 있었다. Tabel 2에서 정리한 바와



B사 밀키트 제품



Fig. 1. Example of Meal-kit sample for packaging analysis.

Table 1. Parameters for analysis of meal-kit packaging

Parameter for analysis of meal-kit packaging		
Cooked or not (Ex: Not cooked)	Meal-kit distribution method (Ex: cold chain)	Inner or Outer packaging (EX:Inner packaging)
Final or individual product (Ex: Final meal kit)	Number of individual product (Ex: 4ea)	Weight (Ex: 300g)
Packaging method (Ex: Vacuum sealing)	Types of meal-kit (Ex: sauce)	Packaging printing (Ex: 3)
Packaging technique (Ex: Standing pouch)	Number of each products (Ex: 4ea)	Quality maintenance product (Ex: Antioxidants)
Packaging components (Ex: Vinly)	Size (Ex: 90×150mm)	Price (Ex: 9800won)
Packaging materials (Ex: OPP)	Serving size (Ex: 2)	Shelf life (Ex: 6 months)
Number of outer packaging		

Table 2. Types of meal-kit materials

Types of meal-kit packaging materials		
Oriented/Cast Polypropylene	Oriented/Cast Nylon	Low-density/High-density Polyethylene
Polyethylene terephthalate/Aluminum film	Polyethylene terephthalate film	Aluminum tray
SC Molded Pulp/Kraft paper	Polyethylene terephthalate tray	Polypropylene tray

같이 포장 재질의 경우 8가지 재질들로 나타났으며, OPP, NY, LDPE/HDPE, AL, PP, PET, SC 등으로 나타났다.

2.3. 인공지능 기반 밀키트 포장 재질 및 방법 분류 모델

2.3.1. 밀키트 분석 파라미터 이산화/카테고리화

이산화란 연속적인 것을 연속적인 변수나 데이터를 여러

개의 범주나 구간으로 나누어 표현하는 방법이다¹²⁾. 이를 위해, 분석한 19개의 파라미터들에 대하여 이산화, 카테고리화 그리고 정수 형태로 변환 과정을 수행하였다. 예를 들어, 밀키트 제품의 포장 재질은 9가지로 분석되었으며, 이를 0부터 8까지 정수로 변환하는 과정을 수행하였으며, 중량의 경우 0~10, 10~25, 25~50, 50~100, 100~250, 250~500, 500~750 그리고 750~1000g의 구간을 0에서 7까지의 정수로 변환하였다. 따라서, 본 연구에서 분석한 밀키트 제품의 19개 파라미터에 중 17개의 파라미터는 인공지능 분류 모델의 입력 변수로 활용하였으며, 2개의 파라미터 (밀키트 포장 방법 및 재질)은 인공지능 분류 모델의 출력 변수로 활용하였다 (Fig. 3).

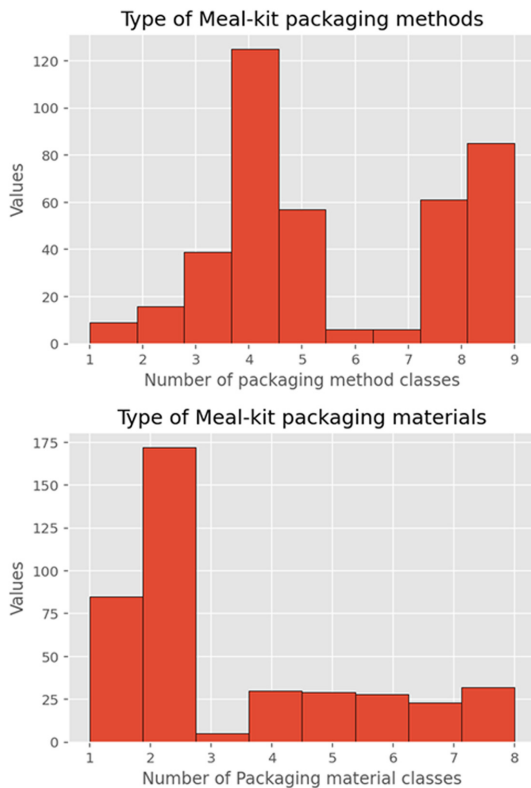


Fig. 2. Histogram of number of samples for each type of packaging materials and methods.

Input variables		Output variables
Cooked or not	Serving size	Packaging Method
Final or individual product	Inner or Outer packaging	
Packaging method	Weight	
Packaging components	Packaging printing	
Meal-kit distribution method	Quality maintenance product	Packaging Materials
Number of individual product	Price	
Types of meal-kit	Shelf life	
Number of each products	Number of outer packaging	
Size		

Fig. 3. Input and output variables for multi-output artificial neural network classification model.

2.3.2. 멀티 출력 인공신경망 분류 모델

밀키트 포장 방법 및 재질 분류를 위하여 본 연구에서는 ANN 모델을 기초 backbone으로 구성하였다. ANN 모델의 입력 layer는 17개의 input variable로 설정하였으며, 2개의 hidden layers와 2개의 output layer로 구성하였다. 2개의 hidden layers의 unit 개수는 128개로 설정하였으며, activation 함수로는 tanh로 설정하였다. 또한, 2개의 output layer의 dense 개수는 밀키트 포장 방법 타입 개수인 9와 재질 타입 개수인 8로 설정하였으며, activation 함수로는 softmax를 적용하였다. Multi-output ANN 분류 모델에 대한 학습 성능평가는 정확도와 F1-score로 설정하였으며, 학습 epochs는 100, 초기 학습률은 0.01로 설정하였다.

2.3.3. 인공신경망 분류 모델 최적화

본 연구에서는 multi-output ANN 분류 모델의 성능 향상을 위하여 베이지안 최적화 모델을 적용하였다. 일반적인 grid search 또는 random search와 같은 알고리즘의 경우 최적화 결과 도출 시간이 오래 걸리며, 정확도가 다소 낮게 나타나는 반면, 베이지안 최적화는 사전 정보를 최적값에 탐색하여 반영하는 방법론으로 보다 효율적으로 최적값을 찾아내는 장점이 있다¹⁴⁾. 일반적으로 인공신경망의 layer 또는 뉴런의 개수, 학습률 등이 영향을 미친다고 보고되어 있다. 따라서, 분류 모델의 성능 향상을 위하여 총 5가지의 hyperparameter를 설정하였으며, 설정된 hyperparameter와 최적화 design variable의 범위는 표 3에 나타나 있다. 본 연구에서 최적화의 목적 함수는 두 개의 밀키트 제품 포장 방법과 재질을 동시에 분류하여야 하는 인공신경망 모델로 구축되어 있기에 두 개의 출력 loss 값을 합산한 final loss 값을 최소화할 수 있도록 커스텀 함수를 구현하였다.

2.3.4. 다중 출력 인공신경망 분류 모델 성능 평가 방법

본 연구에서 분석한 최종 및 개별 밀키트 제품의 포장 분석 데이터는 총 404개이며, 밀키트 제품의 포장 방법과 재질을 동시에 분류하는 Multi-output ANN 모델의 분류 성능을 평가하기 위하여 학습(training), 검증(validation), 평가(test) 세트를 75%, 12.5%, 12.5%로 구분하였다. 추가적으로 학습, 검증, 평가 데이터셋에 모든 포장 방법과 재질

의 분류 class가 포함되도록 stratify기법을 적용하였다. Multi-output ANN 분류 모델과 분류 모델의 성능 향상을 위한 최적화를 위하여 Python 3.9 version, tensorflow 2.10 프로그램을 활용하였으며, Intel(R) Core(TM) i7-10700 (2.90 GHz), DDR4(128 GB) RAM, GPU인 Nvidia A4000 GPU(32 GB)를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 밀키트 제품 포장 방법 및 재질 분류 결과

본 연구에서는 밀키트 제품들의 포장 방법 및 포장지의 재질을 자동으로 분석하기 위한 방법으로 인공지능 모델을 적용하였다. 보다 자세하게는 포장 방법과 포장지의 재질을 동시에 분류하기 위하여 인공신경망의 architecture를 재구성하였다. 구축한 다중 출력 인공신경망으로부터 학습 및 검증을 통하여 아래 표와 같은 성능을 도출하였다. 그 결과 밀키트의 포장 방법의 분류 정확도는 약 70.3%로 나타났으며, F1-score의 경우 58.6%로 낮게 나타났다 (Table 4). 그림 4A에서의 confusion matrix에서 나타난 바와 같이 포장 방법 분류 결과의 경우 3번 class인 쉘링 포장 방법이 가장 오분류가 많이 나타났으며, 진공 포장 방법(Class 0)의 경우 검증 데이터셋에서 진공 포장 방법을 분류하지 못하였다. 이로 인하여 재현율과 정밀도가 낮게 나타났다.

추가적으로, 밀키트의 포장 재질에 대한 다중 출력 인공신경망의 분류 정확도는 약 80.2%로 포장 방법의 분류 결과보다는 높게 나타났으며, F1-score의 경우 64.1%로 나타났다 (Table 5). 그림 4B에서의 confusion matrix에서 나타난 바와 같이 포장 재질 분류 결과 NY class가 오분류율이 높게 나타났으며, LYPE/HDPE (Class 2)에 대한 분류는 0으로 나타났다. 이는 학습 및 검증 데이터 셋의 수가 부족하여 분류율이 낮게 나타난 것으로 파악된다¹⁵⁾.

2. 다중 출력 인공신경망 구조 최적화 결과

본 연구에서 다중 출력 인공신경망 분류 모델의 성능을 향상 시키기 위한 방법으로 베이지안 최적화 모델을 적용하였으며, 이를 위해 설정한 각 5가지의 design variables의 최적 값은 1024(number of neurons), 0.01(학습률), tanh(activation function), 1(neuron division rate) 그리고 sgd

Table 3. List of multi-output artificial neural network optimization design variables

Multi-output artificial neural network hyperparameters	
Number of neurons	[256, 1024, step : 128]
Learning rates	[0.01, 0.001, 0.0001]
Activation functions	['relu', 'tanh', 'sigmoid']
Neuron division	[1, 2, 4]
Optimizer	['adam', 'sgd']

Table 4. Representative classification result of meal-kit packaging method

	Before Optimization	After Optimization
Accuracy (%)	70.3 ± 0.1	85.8 ± 0.1
Recall (%)	62.1 ± 0.2	87.1 ± 0.1
Precision (%)	55.4 ± 0.1	81.9 ± 0.2
F1-score (%)	58.6 ± 0.1	84.4 ± 0.1

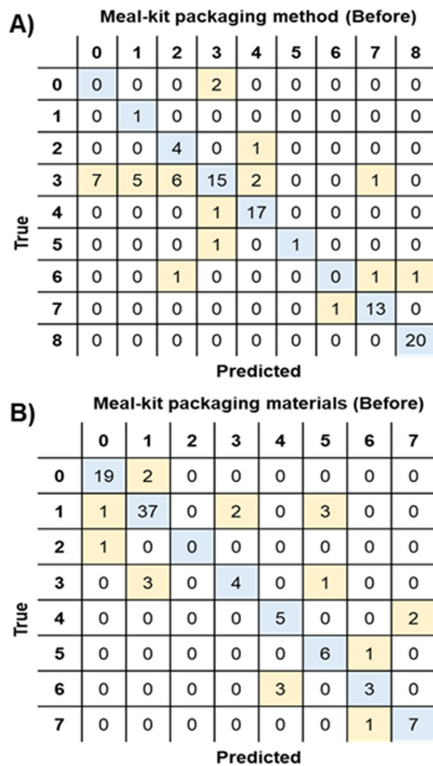


Fig. 4. Representative confusion matrix for classification result of meal-kit packaging (A) method and (B) materials before optimization

(optimizer)로 선정되었다. 도출된 최적 값을 바탕으로 인공 신경망을 재학습한 결과 최적화를 진행하기 전보다 포장 방법 분류의 정확도, 재현율, 정밀도 그리고 F1-score가 각각 22%, 40%, 48% 그리고 44% 향상되었음을 확인하였다 (Table 4). 추가적으로, 밀키트의 포장 재질의 분류 정확도, 재현율, 정밀도 그리고 F1-score가 17%, 39%, 44% 그리고 42% 향상되었다 (Table 5). 이는, 그림 5의 confusion matrix에서 나타난 바와 같이, 모든 class에 대한 오분류가 없어졌기에, 재현율, 정밀도가 크게 향상되었다. 이러한 개선은 베이지안 최적화가 단순 탐색 기반 알고리즘(grid search, random search)에 비해 탐색 공간의 효율적 축소 및 사전 확률(prior) 기반의 최적화 경로 선택이 가능하기 때문으로 분석된다¹⁷⁾. 베이지안 최적화 모델을 적용하여 다중 출력 인공신경망의 구조의 변화는 아래 그림 6에서 나

Table 5. Representative classification result of meal-kit packaging materials

	Before Optimization	After Optimization
Accuracy (%)	80.2 ± 0.1	93.9 ± 0.1
Recall (%)	65.1 ± 0.1	90.9 ± 0.2
Precision (%)	63.2 ± 0.1	90.9 ± 0.1
F1-score (%)	64.1 ± 0.1	90.9 ± 0.1

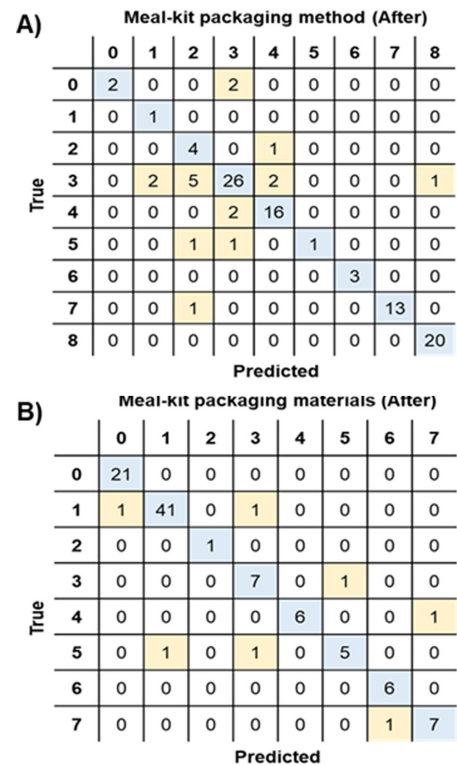


Fig. 5. Representative confusion matrix for classification result of meal-kit packaging (A) method and (B) materials after optimization

타난 바와 같이, hidden layer의 개수가 2개에서 4개로 증가하였으며, hidden layer의 neuron 개수도 256에서 1,024개로 증가하였다. 즉, 모델의 표현력(capacity)이 향상되었고, 결과적으로 클래스 간 결정 경계(decision boundary)의 명확성이 개선된 것으로 판단된다¹⁸⁾. 따라서, 인공지능 기반 포장 방법-재질 판별 모델의 성능은 데이터 수의 확충뿐 아니라, 하이퍼파라미터 최적화 접근법을 적용함으로써 효과적으로 개선될 수 있음을 확인하였다.

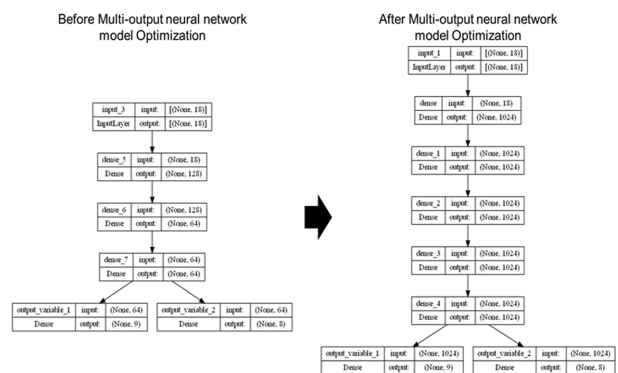


Fig. 6. Multi-output artificial neural network architecture for before and after optimization process.

요 약

국내 밀키트 산업은 1인 가구와 맞벌이 증가, 간편하면서 건강식에 대한 수요 확대를 기반으로 2020년 이후 빠르게 성장함에 따라 대량생산 및 자동화 시스템 도입이 시급하지만, 다양한 제품화로 인한 개별 포장 증가 등으로 인한 플라스틱 사용 등 환경적 문제 등이 유발되고 있다. 밀키트 제품의 특성 상 상온, 냉장, 냉동 유통 방식으로 구분되며, 이에 따른 다양한 포장 기법 그리고 포장 재질이 활용되고 있으며, 추가적으로 제품의 형태, 조리 및 살균 방식 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 51종의 밀키트 제품 및 개별 제품들에 대한 제품 분석을 통하여 포장 방법, 재질 등에 대하여 파라미터화를 실시하였으나, 향후 연구에서는 다양한 상용 밀키트 제품들을 추가적으로 분석하여 데이터 수의 불균일성 등에 대한 보완 및 고도화된 인공지능 모델을 적용함으로써 포장 방법 및 재질 분류 모델의 성능을 향상시키기 위한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다. 향후 밀키트 산업의 지속적인 성장을 위해서는 과포장, 일관성이 없는 포장 규격, 품질에 영향을 야기하는 포장 방법 등에 대한 문제점 개선을 위하여 재사용 여부, 포장 규격화 및 표준화가 필요하며, 이에 대한 사전 연구로 인공지능을 활용한 포장 방법 및 재질 판별 시스템 개발하였고, 이를 통해 효율적이고 친환경적인 산업 생태계 구축이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(한국산업기술기획평가원) 로봇산업기술개발(RS-2024-00508387)과 농림축산식품부(농림식품기술기획평가원) 고부가가치식품기술개발사업(RS-2024-00413186)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

참고문헌

1. Yoon, S., Gao, Z., and House, L. 2022. Do efforts to reduce packaging waste impact preferences for meal kits? *Food Qual. Prefer.*, 96: 104410.
2. Romagnoli, F., Salimbeni, A., and Neri, E. 2019. Comparison of life cycle environmental impacts from meal kits and grocery store meals. *Resour. Conserv. Recycl.*, 147: 189-200.
3. Heard, B.R., Bandekar, M., Vassar, B., and Miller, S.A. 2019. Comparison of life cycle environmental impacts from meal kits and grocery store meals. *Resour. Conserv. Recycl.*, 147: 189-200.
4. Kim, T.H., Gu, B.I., Kwon, K.H., and Kim, A.N. 2025. A framework for 3D plant simulation of meal-kit-packaging robot automation system. *Appl. Sci.*, 15(8): 4116.
5. Hussain, S., Akhter, R., and Makedar, S.S. 2024. Advancements in sustainable food packaging: from eco-friendly materials to innovative technologies. *Sustain. Food Technol.*, 2: 1297-1364.
6. Kan, M., and Miller, S.A. 2022. Environmental impacts of plastic packaging of food products. *Resour. Conserv. Recycl.*, 180: 106156.
7. Hemachandra, S., Hadjikakou, M., and Pettigrew, S. 2024. A scoping review of food packaging life cycle assessments that account for packaging-related food waste. *Int. J. Life Cycle Assess.*, 29(10): 1899-1915.
8. Robertson, G.L. 2016. *Food Packaging: Principles and Practice*. CRC Press, Boca Raton, USA.
9. Marsh, K. and Bugusu, B. 2007. Food packaging—Roles, materials, and environmental issues. *J. Food Sci.*, 72(3): R39-R55.
10. Niaounakis, M. 2015. *Biopolymers: Applications and Trends*. William Andrew/Elsevier, Oxford, UK.
11. Grunert, K.G. 2011. Sustainability in the food sector: A consumer behaviour perspective. *Int. J. Food Syst. Dyn.*, 2(3): 1-12.
12. McShane, B.B., Preacher, K.J., and Rucker, D.D. 2015. A researcher's guide to regression, discretization, and median splits of continuous variables. *J. Consum. Psychol.*, 25(4): 666-678.
13. Lu, W., and Chen, J. 2022. Computer vision for solid waste sorting: A critical review of academic research. *Waste Manag.*, 142: 29-43.
14. Pučnik, R., Dokl, M., Fan, Y.V., Varbanov, P.S., and Klemeš, J.J. 2024. A waste separation system based on sensor technology and deep learning: A simple approach applied to a case study of plastic packaging waste. *J. Clean. Prod.*, 450: 141762.
15. Mittal, G., Yagnik, K.B., Garg, M., and Krishnan, N.C. 2016. SpotGarbage: Smartphone app to detect garbage using deep learning. *Proc. ACM Int. Joint Conf. Pervasive Ubiquitous Comput.*, 2016: 940-945.
16. Bischl, B., Binder, M., Lang, M., Pielok, T., Richter, J., Coors, S., Thomas, J., Ullmann, T., Becker, M., Boulesteix, A-L., Deng, D., and Lindauer, M. 2021. *Hyperparameter Optimization: Foundations, Algorithms, Best Practices and Open Challenges*. WIREs Data Mining Knowl. Discover., 13(2): e1484.
17. Martinez-Hernandez, U., West, G., and Assaf, T. 2024. Low-cost recognition of plastic waste using deep learning and a multi-spectral NIR sensor. *Sensors*, 24(9): 2821.
18. Snoek, J., Larochelle, H., and Adams, R.P. 2012. Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms. *Adv. Neural Inf. Process. Syst.*, 25: 2951-2959.
19. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A., and Bengio, Y. 2016. *Deep Learning*. MIT Press, Cambridge, USA.

투고: 2025.11.10 / 심사완료: 2025.12.10 / 게재확정: 2025.12.29

EU PPWR 규정에 따른 지속가능한 패키징 생태계 구축을 위한 고찰

김미경¹ · 김종경^{2*}

¹대한민국 친환경패키징포럼위원회

²한국건설생활환경시험연구원

A Study on Building a Sustainable Packaging Ecosystem in Response to the EU PPWR Regulation

MeeKyung Kim¹ and Jongkyoung Kim^{2*}

¹Korea Sustainable Packaging Forum Committee

²Korea Conformity Laboratories

Abstract The European Union (EU) Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) significantly impacts global enterprises supplying products to the EU market. Requirements such as modifying packaging designs, securing recycled materials, restructuring supply chains, and establishing labeling systems directly influence corporate cost structures and competitive strategies. From a policy perspective, the PPWR holds significant importance as it functions not merely as a waste management regulation, but as a comprehensive circular economy policy instrument encompassing the entire life-cycle of production, consumption, and recycling. This study defines the EU PPWR as a prerequisite for market entry rather than a simple environmental regulation, and examines strategies for establishing a Korean-model circular economy in response. Specifically, it presents a practical roadmap for corporate action, including Design for Recycling (DfR), securing Post-Consumer Recycled (PCR) materials, and introducing reuse systems. Furthermore, the study emphasizes that preemptive technological innovation, supported by government agencies and grounded in collaboration among industry, academia, and research institutions, is critically important for industrial survival and sustainable growth.

Keywords EU Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR), Design for Recycling (DfR), Circular economy, Environmental regulation, Sustainable growth

서 론

현대 글로벌 공급망 관리(Supply Chain Management, SCM) 체계에서 포장재는 제품의 보호, 유통기한 연장, 물류 효율화, 정보 전달 및 브랜드 커뮤니케이션이라는 핵심적인 기능을 수행한다. 그러나 “채취-생산-소비-폐기(Take-Make-Consume-Dispose)”로 이어지는 기존의 선형경제(Linear Economy) 모델 기반 포장 시스템은 자원 고갈과 폐기물 급증, 그리고 환경 오염이라는 심각한 부작용을 초래하고 있다¹⁾. 지난 수십 년간 전 세계 플라스틱 생산량의 급증과 맞물

려, 전체 생산량의 상당 비중을 차지하는 포장재는 자원 소비와 환경 영향의 핵심 요인으로 지목되고 있다. 이에 따라 주요 선진국들은 신규 플라스틱 수요 감축, 수거 및 선별 시스템 고도화, 고품질 재활용 촉진 등을 핵심 전략으로 하는 순환경제(Circular Economy)로의 전환을 가속화하고 있다.

특히 일회용 플라스틱(Single-use Plastics)에 과도하게 의존해 온 관행은 연간 3억 톤 이상의 플라스틱 폐기물 발생과 약 800만 톤의 해양 유입이라는 전 지구적 환경 위기를 야기하였다^{2,3)}. 탄소 중립과 자원 안보에 대한 위기의식이 고조됨에 따라, 제품 수명주기(Product Life Cycle) 전과정에 걸쳐 환경 부하를 최소화하도록 설계된 ‘지속가능한 포장(Sustainable Packaging)’은 이제 선택이 아닌 기업 생존을 위한 전략적 필수 요소로 인식되고 있다.

단순한 폐기 대신 재사용(Reuse), 재활용(Recycle), 퇴비화(Compostable) 등 순환 가능한 자원 구조를 확립하기 위해서

*Corresponding Author: Jongkyoung Kim
199 Gasandigital 1-ro, Korea Conformity Laboratories. Seoul, Korea
Tel: +82-10-9397-5344
E-mail: logiscodi@naver.com

는, ① 소재 및 디자인의 기술적 혁신, ② 표준화와 책임 강화를 위한 강력한 규제 체계, ③ 정부·산업계·시민사회를 아우르는 밸류체인(Value Chain) 간 협력이라는 다각적인 접근이 필요하다^{4,5)}. 국내 패키징 산업 또한 정부의 자원순환 정책 강화와 기업의 ESG(Environmental, Social, and Governance) 경영 확대를 통해 이러한 변화에 대응하고 있다.

그러나 양적인 재활용률 지표의 상승에도 불구하고, 수거된 폐플라스틱이 실제로 얼마나 고부가가치 용도로 재순환(Closed-loop recycling)되고 있는지에 대한 질적 평가는 미흡한 실정이다. 특히 유럽연합(European Union, EU)을 중심으로 강화되고 있는 식품 용기 등급(Food-grade)의 소비자 사용 후 재생원료(Post-Consumer Recycled, PCR)의 무 사용 규제에 대응하기 위한 국내 산업계의 준비 수준과 데이터 기반의 정보 공유는 여전히 부족하다. 이러한 상황에도 불구하고, 최근 가장 강력한 규제 변화인 EU의 ‘포장 및 포장폐기물 규정(Packaging and Packaging Waste Regulation, PPWR)’의 영향과 대응방안을 분석한 국내외 학술 연구는 많지 않다. Yang (2025) 등⁶⁾은 소비자 및 기업 행태에 대한 감성 분석을 다중 에이전트 기반 모델과 결합하여, PPWR 도입 하에서 플라스틱 포장 재활용률, 정책 시나리오별 환경 성과 및 규제 효과를 정량적으로 시뮬레이션하여, 재활용성 등급 제도와 생산자책임재활용제도(Extended Producer Responsibility, EPR) 강화가 재활용률 제고에 미치는 실질적 효과를 평가하고, 정책 효과 극대화를 위한 보완적 제도 설계 방향을 제시하였다.

PPWR 도입에 따른 정책적 영향에 대해서는 Bokor (2025)⁷⁾가 PPWR과 일회용 플라스틱 지침(Single-Use Plastics Directive)을 비교·분석하여, 포장 부문에서의 재사용 및 재활용 의무 강화, EPR의 확대, 시장 구조 변화에 미치는 영향을 법·제도적 관점에서 체계적으로 평가하였다. 한편, Wimmer와 Tacker (2023)⁸⁾, MacLeod (2025) 등⁹⁾은 PPWR의 핵심 원칙인 재활용을 고려한 설계(Design for Recycling, DfR)에 주목하여, 이에 대한 산업계의 대응 양상과 함께 포장 설계 전략, 소재 선택, 비용 구조 변화 등을 중심으로 분석하였다.

PPWR에 대한 관심은 정부뿐만 아니라 국내 기업들 사이에서도 증가하고 있으나, 국내에서는 아직 이를 체계적으로 다룬 연구가 부족하다. 이에 본 논문은 PPWR의 추진 현황을 심층적으로 분석하고, 지속가능한 포장 솔루션과 관련하여 국내 산업의 대응 전략과 정책적 시사점을 도출하는 데 목적을 둔다.

본 론

1. EU PPWR의 제정 배경

EU는 순환경제 전환과 탄소중립 목표 달성을 위해 포장

및 포장폐기물 관리 체계를 전면적으로 개편하고 있다. 2019년 「유럽 그린딜(European Green Deal)」과 2020년 「순환경제 행동계획(Circular Economy Action Plan)」을 통해 EU는 자원 효율성 제고와 폐기물 발생 최소화를 핵심 정책 목표로 설정하였다. 포장재는 EU 전체 폐기물 발생에서 상당한 비중을 차지하며, 특히 1인당 포장폐기물 발생량이 지속적으로 증가하고 있다.

지난 수십 년간 EU의 포장폐기물 관리 정책의 핵심 기반은 1994년 채택된 ‘포장 및 포장폐기물 지침(Packaging and Packaging Waste Directive, PPWD, 94/62/EC)’이었다. 그러나 해당 지침은 세부 이행을 각 회원국의 재량에 위임하는 구조적 특성으로 인해, 규제의 비일관성과 회원국 간 성과 격차를 야기한다는 한계가 지속적으로 제기되어 왔다.

이에 따라 2025년 2월, EU는 기존의 PPWD를 대체하는 보다 강력하고 일관된 규제 수단으로서 PPWR을 제정하였다. PPWR의 주요 목표는 회원국 간 규제 격차를 해소하고, 포장재의 설계, 생산, 유통, 폐기 등 전 과정에 걸친 통합적 관리 체계를 구축하는 데 있다^{10,11)}.

2. EU PPWR의 주요 목표와 내용

PPWR은 2018년을 기준으로 1인당 포장폐기물 발생량을 단계적으로 감축할 것을 요구한다. 구체적으로 2030년까지 5%, 2035년까지 10%, 2040년까지 15%의 감축 목표가 설정되어 있으며, 이는 단순 재활용 확대를 넘어 포장 자체의 최소화를 강조하는 정책적 방향을 반영한다. 또한 PPWR은 모든 포장이 2030년까지 재활용 가능하도록 설계될 것을 규정하고 있다.

플라스틱 포장재의 경우, 일정 비율 이상의 재활용 소재 사용이 의무화되어 있으며, 이는 재활용 원료 시장 활성화와 자원 순환성 강화라는 목적을 갖는다. 아울러, 운송포장, 전자상거래 포장, 외식·음료 포장 등 특정 분야에서는 재사용 포장의 비율 목표가 별도로 설정되어 있다.

아울러 불필요한 이중 포장이나 과도한 빈 공간을 포함한 포장은 제한 또는 금지되며, 이에 따라 포장 설계 단계에서의 효율성이 중요한 규제 요소로 부각된다. 특히 식품 접촉 포장재(Food Contact Materials)를 중심으로 과불화화합물(Perfluoroalkyl Substances, PFAS) 등 유해화학물질 사용이 엄격히 제한되며, 소비자가 분리배출 및 재활용 방식을 명확히 인지할 수 있도록 표준화된 라벨링과 정보 제공 의무가 도입된다. 또한 PPWR은 생산자, 수입자, 유통업체가 포장폐기물의 수거·처리·재활용 비용을 부담하도록 하는 EPR 제도를 강화하여, 폐기물 관리 비용의 내부화를 유도하고 친환경 포장 설계에 대한 경제적 인센티브를 제공한다.

PPWR은 2025년 2월 공식 발표되었으며, 2026년 8월 12일부터 본격적으로 적용될 예정이다(Table 1). 이후 2030년, 2035년, 2040년을 기점으로 단계적 목표가 순차적으로 시행

Table 1. PPWR key dates and milestones

Phase	Date/Year	Key Events
1. Legal publication	Jan. – Feb. 2025	- January: Publication in the EU Official Journal - February: Official publication of the Regulation (Entry into Force)
2. Transition period	~ Aug. 2026	- Preparation of internal company systems - Preparation for transition from existing Directive to new Regulation
3. Full implementation	12 Aug. 2026	- Full application of PPWR obligations - December: Finalization of detailed calculation and verification methods
4. Infrastructure set-up	2028 – 2029	- Introduction of harmonized EU labelling (separate collection, QR, etc.) - Initial setting of reuse systems
5. First targets	2030	- 5% Reduction of packaging waste (vs 2018) - Design for recycling: requirements applied to all packaging categories - Recycled content: at least 10% obligation for plastic packaging - Reuse: start of mandatory targets for beverage and transport packaging
6. Second targets	2035	- 10% Reduction of packaging waste (vs 2018) - Separate collection: upgrade of collection and sorting systems - Recycling performance: significant strengthening of performance criteria
7. Final targets	2040	- 15% Reduction of packaging waste (vs 2018) - Recycled content: increase up to 65% maximum - Reuse: establishment of closed-loop systems and full-scale reuse of packaging

되며, 세부 기준은 위임법(Delegated Acts)과 이행법(Implementing Acts)을 통해 지속적으로 구체화될 전망이다.

3. EU PPWR의 주요 특징

국가별 입법 절차를 필요로 하는 기존 지침과 달리, PPWR은 모든 회원국에 직접적인 법적 구속력을 부여하여 조화롭고 일관된 표준을 보장한다. PPWR의 핵심 내용은 다음 세 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 2030년까지 시장에 출시되는 모든 포장재는 재활용 또는 재사용이 가능하도록 설계되어야 한다. 둘째, 플라스틱 포장재에 대한 소비자 후생원료 사용 의무비율을 도입하여, 2030년 및 2040년까지 단계적 목표를 달성하도록 한다. 셋째, 생산자책임재활용제도를 강화하여, 생산자가 포장재의 전체 수명 주기에 대한 책임을 부담하도록 한다.

4. EU PPWR 대응을 위한 핵심 점검 항목

EU PPWR의 발효는 포장재 규제가 단순한 권고 수준을 넘어, 기업의 법적 책임(Legal Liability)과 시장 진입(Market Access)을 결정하는 강제적 규제로 전환됨을 의미한다. 이에 따라 기업은 사후 대응 중심이 아니라, 제품 기획 단계에서부터 공급망 전반을 아우르는 선제적이고 체계적인 감사(Audit) 프로세스를 수립해야 한다. 기업이 우선적으로 검토해야 할 핵심 점검 항목은 ① 제품 및 설계 적합성, ② 데이터 투명성 및 문서화, ③ 공급망 검증 및 시스템 고도화 등의 세 가지 차원에서 살펴볼 수 있다.

4.1. 제품 및 설계 적합성(Product & Design Compliance)

우선적인 점검 대상은 포장재 자체의 물리적 특성이 규

제 요구사항인 재활용 설계(DfR) 기준에 부합하는지 여부이다. 첫째, 재활용 성능 등급(Performance Grade) 평가가 핵심적이다. 각 등급은 포장재 중량 대비 재활용 가능한 성분의 비율에 따라 결정되며, 2030년부터 모든 포장재는 재활용 가능성에 따라 A, B, C 등급을 획득해야 시장에 출시될 수 있다. 따라서 현재 사용 중인 복합 재질(Multi-material) 구조는 재활용이 용이한 단일 소재(Mono-material) 구조로 전환하거나, 분리 배출을 저해하는 설계 요소를 제거하는 변경이 필수적이다. 다만, 일부 포장재(의료용, 접촉 민감성 포장, 위험물 포장, 특정 분해성 포장, 플라스틱 함량 5% 미만의 포장 시스템 등)는 규제 시행 시점이 다르거나 면제될 수 있으며, 향후 산업계 논의와 하위법령 제정에 따라 기준이 변경될 여지가 있다.

Table 2에 재활용 성능 등급 기준과 규제시행 일정을 체계적으로 정리하였다¹²⁻¹⁶.

둘째, 재생원료 함량 및 안전성 검증이다. 플라스틱 포장재의 경우, 2030년 및 2040년 목표치(예: 음료병 $\geq 30\%$, 기타 접촉 민감 포장재 $\geq 10\%$ 등)를 충족하는 PCR 사용 계획을 수립해야 한다^{17,18}. 특히 식품 접촉 포장재의 경우, PFAS 등 우려 물질(Substances of Concern)의 비사용을 과학적으로 입증하고, 사용된 재생원료가 식품 등급의 안전 기준을 충족하는지에 대한 체계적이고 정밀한 검증이 필요하다. 셋째, 포장 최적화(Packaging Minimization)이다. 제품 보호를 위해 필요한 최소한의 포장 중량과 부피가 유지되고 있는지 점검해야 하며, 특히 과대포장 규제에 대응하여 포장 내 빈 공간 비율(Empty Space Ratio)이 허용 기준(최대 40%) 이내로 관리되고 있는지에 대한 확인이 필요하다.

Table 2. Recyclability performance grade based on PPWR

Grade	Recyclability by weight (per packaging unit)	Market access / Time schedule
Grade A (Best Performance)	≥ 95% recyclable	Allowed without time limit from 1 Jan. 2030 onward. Qualifies for the lowest Extended Producer Responsibility (EPR) fees
Grade B	≥ 80% to < 95% recyclable	Allowed without time limit from 1 Jan. 2030 onward.
Grade C (Minimum Standard)	≥ 70% to < 80% recyclable	Allowed from 1 Jan. 2030, but only until 31 Dec. 2037; banned from 1 Jan. 2038. Manufacturers pay higher Extended Producer Responsibility (EPR) fees.
Grade D / E (Non-Compliant)	< 70% recyclable	Considered technically non-recyclable; banned from 1 Jan. 2030 (no market access).

*Note: All packaging placed on the EU market must achieve at least grade C (≥ 70%) from 2030, and at least grade B (≥ 80%) from 2038, with detailed DfR criteria and grading methodology to be set by delegated acts by 1 January 2028.

4.2. 데이터 투명성 및 문서화(Data Integrity & Documentation)

PPWR은 규제 준수의 증명 책임을 전적으로 제조사에 부여하고 있으므로, 기술 문서(Technical Documentation)의 디지털화와 데이터 무결성 확보가 핵심 과제로 부각된다. 첫째, 기술 문서의 체계적 관리이다. 각 포장 단위(SKU)별로 재질 구성, 중량, 재활용 가능성 평가 결과 등을 포함한 상세 기술 문서를 구축해야 한다. 이러한 문서는 향후 도입될 디지털 제품 여권(Digital Product Passport, DPP)의 기초 데이터로 활용되므로, 전사적자원관리(Enterprise Resource Planning, ERP) 또는 제품수명주기관리(Product Lifecycle Management, PLM) 시스템과 연동하여 실시간 데이터 집계 가능하도록 관리 체계를 구축해야 한다. 둘째, 조화된 라벨링(Harmonized Labeling)의 적용이다. EU 전역에서 통용되는 분리배출 표기 기준을 준수하고, 소비자가 재질 정보와 재사용/재활용 가능 여부를 용이하게 확인할 수 있도록 QR 코드 등 디지털 정보 제공 체계를 마련해야 한다.

4.3. 공급망 검증 및 시스템 고도화(Supply Chain Validation & Systems)

내부 역량만으로는 규제 준수에 한계가 있으므로, 원료의 신뢰성을 확보하고 재사용 체계를 구축하기 위해 공급망(Upstream)과의 협력적 접근이 필요하다. 첫째, 공급망 감사(Supply Chain Audit) 및 인증 체계 확보가 중요하다. 최종 포장재의 환경적 지속가능성을 입증하기 위해, 원료 공급업체(Supplier)로부터 재생 원료의 출처(Origin), 탄소 발자국(Carbon Footprint), 물질 수지(Mass Balance) 등 관련 데이터를 투명하게 제공받아야 한다. 이를 위해 공급 계약서 상에 PPWR 준수 의무를 명시하고, 국제 지속가능성 및 탄소 인증(International Sustainability & Carbon Certification PLUS, ISCC PLUS) 등 제3자 인증서를 필수 제출 요건으로 설정하는 등 공급망 관리 기준을 강화하는 것이 필요하다. 둘째, 재사용(Reuse) 및 리필(Refill) 시스템의 도입이다. PPWR은 일회용 포장재의 사용 저감뿐만

아니라, 특정 제품군(예: 음료, 테이크아웃 식품, 운송 포장재)에 대한 재사용 목표를 명시하고 있다. 이에 따라 기업은 단순한 포장재 교체를 넘어, 회수 및 세척 인프라를 포함한 재사용 비즈니스 모델의 타당성을 평가하고, 단계적 도입을 위한 전략적 로드맵을 수립할 필요가 있다.

이에 따라 PPWR 대응을 위한 핵심 점검 항목은 다음과 같이 요약될 수 있다.

- 기술 문서의 디지털화: 모든 포장 형식에 대해 재질 구성, 중량, 재활용 가능성을 증명하는 상세 데이터를 수집하고 디지털 시스템으로 관리.
 - DfR 평가: 2030년까지 모든 포장재는 재활용 가능 등급(A, B, C 등급 이상)을 획득해야 하며, 이를 위한 설계 가이드라인 준수 여부를 점검.
 - PCR 함량 검증: 플라스틱 포장재의 경우 2030년 목표치(예: 음료병 30% 이상) 달성을 위한 공급망 내 PCR 원료의 추적성을 확인.
 - 유해 물질 제한: 특히 식품 접촉 포장재에서 PFAS 등 금지 물질이 사용되지 않았음을 인증서로 확인.
 - 조화된 라벨링: 분리배출을 돕기 위해 EU 전역에서 통용되는 표준화된 라벨 및 QR 코드 부착 여부를 확인.
- 단계별 핵심 점검 항목은 Table 3에 요약하여 제시하였다.

고찰 및 결론

1. 규제 패러다임의 변화와 선제적 혁신의 필요성

본 연구를 통해 살펴본 바와 같이, PPWR은 EU 규정이지만 그 영향력은 전 세계적으로 확대되고 있는 것으로 나타났다. EU 내에서 제품을 제조하거나 수출하는 기업은 해당 규정을 준수해야 하며, 이는 유사한 글로벌 표준의 채택을 촉진하는 요인으로 작용하고 있다. 또한, 여러 국가 및 지역의 규제 기관들은 이러한 규제 프레임워크를 면밀히 모니터링하며, 경우에 따라서는 이를 벤치마킹하기도 한다.

예를 들어, 최근 수년간 환경 비용의 내재화, 재활용 가

Table 3. Key inspection areas and audit checklists for EU PPWR compliance

Stage (Timeline)	Key Inspection Areas	Detailed Audit Checklists	Key Preparations & Action Plans
Phase 1: Foundation Building (~ 2026)	Data Governance & Status Diagnosis	1. Technical Documentation Availability <ul style="list-style-type: none"> • Are material, weight, and volume data for all SKUs digitized? • Do detailed Bill of Materials (BOM) exist for each packaging component? 2. Regulatory Gap Analysis <ul style="list-style-type: none"> • Does the current portfolio contain any PWR-prohibited items (e.g., single-use hotel toiletries)? • What is the gap between the current recyclability status and the 2030 target grades? 	<ul style="list-style-type: none"> • ERP/PLM System Upgrade: Establish real-time data aggregation and tracking systems. • Cross-functional Task Force (TF): Operate a response team involving R&D, Procurement, QA, and Legal. • Supply Chain Data Request: Notify suppliers of the obligation to provide PPWR-related data. • Check if it applies to your product/service
Phase 2: Early Implementation (2027 ~)	Hazardous Substances & Optimization	1. Verification of Substances of Concern <ul style="list-style-type: none"> • Are certificates (e.g., RoHS/REACH) secured to prove the absence of restricted substances like PFAS in food contact materials? 2. Minimization & Empty Space Ratio <ul style="list-style-type: none"> • Is the empty space ratio maintained at $\leq 40\%$? • Have unnecessary layers (e.g., double packaging) been eliminated? 3. Harmonized Labeling <ul style="list-style-type: none"> • Are EU-standard sorting labels and material identification QR codes applied? 	<ul style="list-style-type: none"> • Material Substitution: Adopt PFAS-free coatings and alternative eco-friendly materials. • Design Renewal: Implement "On-demand packaging" (right-sizing) to minimize void space. • Labeling Standardization: Establish labeling guidelines tailored for specific export countries and EU standards.
Phase 3: Core Compliance (2030 ~)	Design for Recycling (DfR) & PCR Mandates	1. Recyclability Performance Grade <ul style="list-style-type: none"> • Has the packaging achieved at least 'Grade C' ($\geq 70\%$ recyclability) based on DfR assessment? • Has the structure been converted from multi-material to mono-material? 2. PCR Content Compliance <ul style="list-style-type: none"> • Are the PCR targets met (e.g., 30% for beverage bottles, 35% for others)? • Are quality and safety certifications (e.g., Food-grade) for the used PCR secured? 	<ul style="list-style-type: none"> • Full Eco-design Adoption: Prioritize recyclability from the initial design phase. • Securing PCR Supply Chain: Sign long-term Off-take Agreements with high-quality PCR suppliers. • Third-party Certification: Obtain internationally recognized certifications (e.g., RecyClass) to prove performance grades.
Phase 4: System Advancement (2040 ~)	Reuse Systems & Circular Ecosystem	1. Achievement of Reuse Targets <ul style="list-style-type: none"> • Are the reuse targets for transport packaging and specific consumer goods met? 2. Closed-loop Verification <ul style="list-style-type: none"> • Is there traceable data on the recovery rate and the actual input ratio into recycling processes? 	<ul style="list-style-type: none"> • Reuse Infrastructure: Invest in Reverse Logistics for collection, washing, and redistribution. • Chemical Recycling: Expand technologies to recycle materials that are difficult to process mechanically. • Digital Product Passport (DPP): Ensure full transparency of lifecycle information.

능력 촉진, 책임의 상위 단계 이전을 목표로 하는 정책 수단으로서, 포장재를 포함한 EPR 제도의 채택이 국가 및 지방 단위에서 증가하는 추세가 관찰된다. 이러한 변화는 국내 기업들에게 기존의 사후 처리 중심(End-of-Pipe) 접근에서 벗어나, 제품 기획 및 설계 단계부터 환경성을 최우선으로 고려하는 전 과정 평가(Life Cycle Assessment, LCA) 기반의 에코 디자인(Eco-design)으로의 근본적인 패러다임 전환을 요구하고 있다.

이러한 전환은 패키징 산업에 있어 단순한 정책 변화가 아닌, 근본적인 산업적 충격으로 작용한다. 과거의 자발적 감축 노력이 기업의 이미지 제고를 위한 선택이었다면, PPWR 하에서의 규제 준수는 EU 시장 진입을 위한 필수 불가결한 전제 조건이 되기 때문이다. 특히 재활용성 등급제(Performance Grading)와 재생원료 의무사용비율(PCR Content Mandate)은 제품의 기획 및 설계 단계부터 혁신을 강제하며, 이를 충족하지 못할 경우 실질적인 비판세 장벽으로 작용하게 될 것이다.

아울러 현대의 패키징 기술은 단순한 보호 기능을 넘어 재사용 및 리필 시스템 촉진, 일회용 포장 감축, 그리고 라벨링을 통한 소비자 정보 제공 강화를 지향하고 있다. 또한 식품 접촉 포장재에서 PFAS 등 유해 물질 사용을 제한함으로써 인체 건강과 환경 보호를 강화하는 추세이다. 이러한 규제적·기술적 변화는 재료의 선택부터 설계 관행, 공급망 물류, 그리고 폐기물 처리에 이르기까지 유럽 패키징 산업 전반에 근본적인 변혁을 가져올 것으로 전망된다.

2. 국내 기업의 PPWR 대응 전략 로드맵

EU PPWR은 단순한 환경 규제가 아닌 기업의 생존을 결정짓는 강력한 시장 접근 조건(Market Access Condition)으로 작용한다. 따라서 한국 기업에게 PPWR 대응은 사후적 조치가 아닌, 제품의 설계부터 소재 선정, 비즈니스 모델에 이르는 전사적 구조의 근본적 전환을 의미한다. 특히 EU 수출용과 내수용 포장을 이원화하는 것은 생산 효율성을 저해하므로, EU의 엄격한 기준을 글로벌 표준으로 상향 설정하여 통합 관리함으로써 중장기적 비용 절감과 경쟁력을 확보하는 전략이 요구된다.

이에 식품, 화장품, 생활용품, 전자 등 국내 주요 산업군이 공통적으로 적용 가능한 핵심 대응 전략을 다음과 같이 제시한다.

2.1. 재활용 설계(Design for Recycling, DfR) 대응 전략

2030년까지 모든 포장재는 기술적으로 재활용 가능(Recyclable)해야 하며, 재활용 성능 등급 평가에서 최소 Grade C 이상을 획득해야 한다(Grade D 이하는 시장 퇴출). 이를 위해 설계 단계에서부터 선별, 세척, 재활용 공정

의 적합성을 고려한 다음과 같은 실행 과제가 요구된다.

- 포장 구조의 단순화 및 단일 소재화: 이중 재질 복합(예: PET+PE) 구조를 단일 소재(예: Mono-PET, Mono-PP)로 전환하여 재활용 순도를 높여야 한다. 또한, 마케팅을 위한 과도한 장식, 코팅, 불필요한 복합 레이어를 제거하여 필수 기능 중심의 미니멀리즘 설계를 구현해야 한다.
- 분리 용이성(Separability) 확보: 소비자가 배출하거나 재활용 공정 투입 시 라벨, 캡, 펌프 등이 본체와 쉽게 분리되도록 설계해야 한다. 이를 위해 슬리브 라벨의 크기를 축소하거나 수용성 접착제를 적용하고, 부속품을 본체와 동일한 소재로 통일하거나 물리적 분리가 쉬운 구조로 개선해야 한다.
- 내부 검증 프로세스 구축: 기업 내부에 EU DfR 가이드라인에 기반한 재활용성 평가 체크리스트를 도입해야 한다. 신제품 개발 단계의 게이트 리뷰(Gate Review) 항목에 PPWR 적합성을 필수 요건으로 포함하여, 부적합 제품의 출시를 원천 차단하는 시스템을 갖추어야 한다.

2.2. 재생원료(PCR) 확보 및 적용 전략

2030년부터 플라스틱 포장재에 대한 최소 PCR 사용의 의무화에 따라, 식품 접촉 민감 포장(Food Contact Sensitive Packaging)인 PET는 $\geq 30\%$, 기타 플라스틱은 10~35%의 PCR을 함유해야 하며, 이는 2040년까지 단계적으로 상향될 예정이다.

- PCR 적용 로드맵 수립: 포장 유형(병, 트레이, 필름, 파우치 등)별로 기술적 PCR 적용 가능성을 분석하고, 2026~2028년 시험적용기간을 거쳐 2030년 의무화 시점에 맞춘 단계적 확대 계획을 수립해야 한다.
- 안정적 공급망 확보: 고품질 PCR의 수요 급증에 대비하여 국내외 재활용업체 및 소재사와의 장기 공급 계약(Off-take Agreement)을 추진해야 한다. 특히 식품 및 화장품 용기는 EU 식품안전청(EFSA) 기준을 충족하는 식품 등급의 PCR 확보가 최우선 과제이다.
- 품질 및 안전성 검증 표준화: PCR 사용 시 발생할 수 있는 색상, 냄새, 기계적 물성 저하에 대한 내부 허용 기준을 재정립하고, 안전성 입증을 위한 데이터(Migration Test 등)를 체계적으로 확보해야 한다.

2.3. 재사용·리필(Reuse & Refill) 전략

2030년 이후 운송 포장, 음료, 테이크아웃 등 특정 포장군에 대한 재사용 목표가 설정됨에 따라, 일회용 포장 중심의 사업 모델을 다회용 순환 모델로 전환하는 준비가 필요하다.

- 재사용 적합 포장군 선별: B2B 물류용 박스, 팔레트 스트랩 등 회수가 용이한 운송 포장과 화장품, 세제 등

리필이 가능한 소비재 품목을 우선 선별하여 대응한다.

- **비즈니스 모델 실증(Proof of Concept, PoC):** 전면적인 전환에 앞서, EU 현지 유통사와의 파트너십을 통해 회수·세척·재투입으로 이어지는 역물류(Reverse Logistics) 시스템을 시범 운영하고 경제성을 검증해야 한다.
- **단계적 도입(Phasing-in) 전략:** 모든 제품이 아닌 주력 SKU 또는 특정 국가/도시부터 재사용 모델을 부분적으로 도입하여 리스크를 관리하며 점진적으로 확대하는 전략이 유효하다.

2.4. 라벨링 및 정보 공개 체계 대응 전략

소비자의 분리배출을 돕고 제품의 추적성을 강화하기 위해 조화된 라벨링과 디지털 기술의 접목이 필수적이다.

- **EU 통합 라벨링 대응:** 회원국별로 상이한 라벨 규정을 EU 단일 포맷으로 통합하여 관리 복잡성을 줄여야 한다. 다국어 텍스트 사용을 최소화하고, 직관적 이해가 가능한 픽토그램(Pictogram) 중심의 라벨 디자인을 채택하여 범용성을 확보해야 한다.
- **DPP 준비:** QR코드 등을 활용한 DPP 도입에 대비하여 포장재의 재질 구성, PCR 함량, 재활용 가이드 등의 데이터를 디지털화해야 한다. 이는 향후 규제 준수 여부를 증명하는 핵심 수단이 될 것이므로 IT 및 데이터 관리 구조를 선제적으로 구축해야 한다.

2.5. 규제·조직·공급망 거버넌스 전략

규제 준수 선언(DoC) 및 EPR제도 강화에 대응하기 위해 조직 차원의 거버넌스 재정립이 필요하다.

- **전사적 대응 조직(TF) 구성:** R&D, 구매, 품질, 법무, 해외영업 등 관련 부서가 통합된 PPWR 전담 태스크포스를 운영하여 포장재를 단순 부자재가 아닌 규제 대응을 위한 핵심 자산으로 인식하고 관리해야 한다.
- **공급망 협력 강화:** 포장재 제조사와의 공동 R&D를 통해 규제 적합 소재를 개발하고, EU 현지 바이어와는 설계 검증 단계부터 협업하여 시장 진입 리스크를 최소화해야 한다.
- **성과 지표(Key Performance Indicator, KPI) 연동 및 내부 역량 강화:** 포장 개발 및 구매 담당자의 KPI에 재활용성 등급 달성률, PCR 적용 비율 등을 반영하여 실행력을 높이고, 지속적인 내부 교육을 통해 규제 대응 역량을 내재화해야 한다.

3. 지속가능한 포장재 혁신을 통한 순환경제 달성 방안

지속가능한 포장 생태계 구축을 위해서는 본문에서 제시한 바와 같이 물리적 재활용이 용이한 단일 소재 구조로의 전환, 불필요한 포장 공간의 최소화, 유해 물질의 원천적 배제가 선행되어야 한다. 이러한 설계 단계에서의 혁신은

향후 발생할 환경 부담금 및 규제 대응 비용을 절감하는 가장 비용 효율적인 전략임이 확인되었다. 순환경제 달성을 위한 기술적 접근은 재활용성 극대화과 대체 소재 개발이라는 두 가지 축을 중심으로 전개되어야 하며, 이를 통해 소재 다양화와 기술 통합을 동시에 추구할 수 있다.

첫째, PCR 소재의 품질 확보 및 적용 확대는 더 이상 선택적 전략이 아니라 기업의 지속가능성과 경쟁력 확보를 위한 필수적 요건이다. 특히, 식품용 포장재에 적용 가능한 고순도 재생원료 확보 기술과 이를 지원하는 화학적 재활용(Chemical Recycling) 인프라의 상호 보완적 발전이 시급히 요구된다.

둘째, 바이오 기반 소재와 생분해성 플라스틱은 만능 해결책으로 간주될 수 없으며, 기존 플라스틱의 한계를 보완하는 기능적 대안으로 접근해야 한다. 특히, 음식물 오염이 빈번한 포장재 등 특정 용도에 최적화된 소재 적용 전략이 필요하며, 스마트 포장 기술과의 융합을 통해 유통기한 연장 및 폐기물 감축이라는 부가가치를 창출할 수 있다.

또한, 데이터 투명성 확보와 공급망 전반의 협력은 규제 대응의 핵심이 단순한 제품 제조를 넘어 정보의 투명성에 있음을 시사한다. DPP 도입과 공급망 역추적성(Traceability) 확보는 기업의 책임 범위를 원료 채취부터 폐기까지 확장시키며, 이에 따라 기업은 ERP 및 PLM 시스템을 고도화하여 기술 문서와 재활용 데이터를 디지털 자산으로 관리할 필요가 있다.

본 연구는 순환경제의 달성이 개별 기업의 노력만으로는 한계가 있음을 재확인하였다. 이에 따라 소재 기업, 제조업체, 브랜드사, 유통업체, 재활용업체가 참여하는 전주 기적 협력 클러스터의 구축이 요구되며, 이러한 협력 체계를 통해 폐자원의 안정적 확보와 고품질 재생원료 기반의 순환 고리(Closed-loop recycling)를 구현할 수 있을 것이다.

한국형 순환경제 모델의 안착을 위해서는 정부 차원의 제도적 지원이 필수적이다. 이를 위해 현행 EPR 제도를 고도화하여 실질 재활용성에 따른 부담금 차등화(Eco-modulation)를 강화하고, 재생원료 의무 사용에 대한 단계적 로드맵과 인센티브를 제공함으로써 시장의 예측 가능성을 제고해야 한다. 또한, 재사용 및 리필 인프라 구축을 위한 공공 투자를 확대하여 역방향 물류 시스템의 경제성을 확보할 필요가 있다.

끝으로, 본 연구에서 제안한 핵심 점검 항목과 대응 전략이 국내 패키징 산업계가 EU PPWR이라는 글로벌 규제 환경을 기회로 전환하여, 친환경 시장을 선도하는 기반으로 활용되기를 기대한다. 향후 연구에서는 특정 제품군별 LCA 분석을 통한 정량적 환경 개선 효과 검증과 국내의 재활용 인프라 현실을 반영한 구체적인 한국형 대응 가이드라인 개발이 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

4. 전략적 제언

본 연구의 고찰 결과, EU의 PPWR 전환은 단순한 환경 규제 강화의 차원을 넘어 글로벌 무역 장벽의 성격을 띠고 있으며, 이는 수출 의존도가 높은 국내 패키징 산업에 근본적인 체질 개선을 요구하고 있다. 지속가능한 포장재 혁신을 통한 순환경제 달성을 위해 본 연구는 다음과 같이 세 가지 전략적 방향을 제언한다.

첫째, 설계 중심(Design-first)의 패러다임 전환이다. 사후 폐기물 관리에 집중되었던 기존 관행에서 벗어나, 제품 개발 초기 단계부터 재활용 용이성과 단일 소재화를 적용하는 에코 디자인 프로세스가 정착되어야 한다. 이는 PPWR의 핵심 요구사항인 재활용 성능 등급을 충족하기 위한 선결 과제이다.

둘째, 고품질 재생원료(PCR) 공급망의 안정화이다. 2030년부터 의무화되는 PCR 사용 비율을 준수하기 위해서는, 저급 재활용에 머물러 있는 국내 폐플라스틱 순환 체계를 식품 용기 등급 수준의 고품질 재활용 체계로 고도화해야 한다. 이를 위해 물리적 재활용 기술의 개선뿐만 아니라 화학적 재활용 인프라 확충에 대한 투자가 시급하다.

셋째, 벨류체인 전반의 데이터 투명성 확보 및 협력이다. 규제 대응의 핵심은 '입증'에 있다. 원료부터 폐기까지의 전 과정을 추적할 수 있는 데이터 시스템을 구축하고, 소재 기업부터 최종 브랜드사, 그리고 재활용업체가 유기적으로 연결된 협업 생태계 조성이 필요하다.

결론적으로, 지속가능한 포장은 더 이상 환경보호 차원의 윤리적 선택이 아니라 기업의 생존과 직결된 경영 전략이다. 국내 패키징 산업이 EU PPWR이라는 거대한 파도를 넘어 글로벌 시장에서의 경쟁 우위를 확보하기 위해서는, 정부의 제도적 지원과 산업계의 기술적 혁신이 결합된 '한국형 순환 포장 생태계' 구축에 총력을 기울여야 할 것이다.

이와 더불어, 글로벌 규제 강화 기조에 발맞춘 민간 주도의 대응 협의체와 산업 생태계 조성의 역할 또한 강조되어야 한다. 전 세계적으로 가속화되는 환경 규제 흐름 속에서, 지난 2025년 11월 '대한민국 친환경패키징포럼위원회'가 개최한 '2025 대한민국 친환경패키징포럼(Korea Sustainable Packaging Forum)'은 국내 패키징 산업이 나아가야 할 이정표를 제시하였다는 점에서 큰 시사점을 준다¹⁹⁾. "지속 가능한 패키징 솔루션: 순환경제를 위한 혁신, 규제 및 협력"을 주제로 한 이 포럼에서는 국내 산업이 단순히 규제를 추종하는 수준을 넘어, 글로벌 변화에 선제적으로 대응할 수 있는 독자적인 국가 역량을 구축해야 할 시점임을 강력히 제언하였다. 특히 주목해야 할 점은 "제품 및 포장 디자인의 혁신은 규제가 발효되기를 기다린 후가 아니라, 설계 단계에서 사전에 이루어져야 한다"는 패러다임의 전환을 촉구했다는 것이다. 이는 본 연구에서 지속적으로 강조한 바와 같이, 2030년 이후의 규정 준수 여부가 단순한 벌

금 부과 차원을 넘어, EU 등 주요 선진 시장으로의 진입 가능성과 산업의 생존을 결정짓는 핵심 척도가 될 것이라는 현실 인식에 기반한다.

따라서 대한민국 친환경패키징포럼위원회와 같은 정부·산업·학계·연구기관 간의 협력 플랫폼을 중심으로 축적된 기술 정보와 규제 대응 전략이 개별 기업 및 산업 전반으로 신속하고 체계적으로 확산될 때, 국내 패키징 산업은 지속가능성과 국제 경쟁력을 동시에 강화할 수 있을 것으로 판단된다.

요 약

포장 및 포장폐기물 규정(PPWR)은 EU 시장에 제품을 공급하는 글로벌 기업 전반에 중대한 영향을 미치는 규제 체계로 평가된다. 포장 설계 변경, 재활용 소재 확보, 공급망 재편, 라벨링 시스템 구축 등은 기업의 비용 구조와 경쟁 전략에 직접적인 영향을 미친다. 정책적으로 PPWR은 단순한 폐기물 관리 규제를 넘어, 생산·소비·재활용 전 주기를 포괄하는 순환경제 정책 도구로서 기능한다는 점에서 중요한 의미를 가진다.

본 연구는 EU PPWR을 단순 환경 규제가 아닌 시장 진입의 필수 조건으로 규정하고, 이에 대응하기 위한 한국형 순환경제 구축 방안을 고찰하였다. 세부적으로는 재활용 최적화 설계(DfR), 재생원료(PCR) 확보, 재사용 시스템 도입 등 기업의 실천적 로드맵을 제시하였으며, 정부기관의 지원 및 산업·학계·연구기관 간의 협력을 기반으로 한 선제적 기술 혁신이 산업 생존과 지속가능한 성장의 핵심임을 강조하였다.

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 디자인산업기술개발사업의 일환임.(RS-2025-02634519)

참고문헌

1. Sukopová, D., and Vyrostková, L. 2025. Comparison of linear and circular economy and their impact on the product life cycle. *Waste Forum*. issue 3: 178-194.
2. Jambeck, J.R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T.R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., and Law, K.L. 2015. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223): 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.
3. UNESCO/UNEP. 2017. Marine plastics litter and microplastics - Foresight Brief No. 002. United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/22313>.
4. Provensi, T., Sehnem, S., and Chiappetta Jabbour, C.J. 2024.

- Circular economy and disruption in the value chain: The role of stakeholders and networks in startups. *Journal of Environmental Management*, 371: 123117. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123117>.
5. Eelager, M.P., Dalbanjan, N.P., Madihalli, S., Madar, M., Agadi, N.P., Korganokar, K., and Kiran, B.K. 2025. Pathways to a sustainable future: Exploring the synergy between sustainability and circular economy. *Sustainable Futures*, 10: 101208. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2025.101208>.
 6. Yang, S., et al. 2025. How to promote sustainable recycling of plastic packaging under the EU PPWR. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 112, *Environmental Impact Assessment Review (ScienceDirect)*.
 7. Bokor, B. 2025. Legal analysis of the EU regulatory framework on circular economy and sustainability principles in plastic food packaging. *Cleaner Waste Systems*, Vol. 12, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.chwas.2025.100412>.
 8. Wimmer, W. and Tacker, M. 2023. Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR) – Challenges & Summary. *Strategies for a transition to circular economy*. Circular Analytics, Vienna, Austria. pp. 1-34.
 9. MacLeod, R., Stuart, G. J., Esteve, I., & Cots, E. 2025. New challenges for the supply chain – The new Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR). *Baker McKenzie – Global Supply Chain Compliance (Brussels, Belgium)*, pp. 1-10.
 10. LC Packaging. 2024. Summary of the Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR). LC Packaging, The Netherlands, Version 2.0, pp. 1-16.
 11. European Commission. 2025. Regulation (EU) 2025/40 of the European parliament and of the Council of 19 December 2024 on packaging and packaging waste. *Official Journal of the European Union*. no. L 327, pp. 1-214.
 12. Väänänen, H. 2025. New PPWR: overview of testing requirements. *MeasurLabs Blog*. <https://measurlabs.com> (accessed 2026.01.08.).
 13. Nyländén, N. 2024. How the PPWR is reshaping packaging—and why recyclability matters. *Sulapac Blog*. <https://www.sulapac.com> (accessed 2026.01.08.).
 14. Kivo. 2025. Recyclability of packaging under the PPWR (Article 6). *Kivo Knowledge Base*. <https://www.kivo.nl> (accessed 2026.01.08.).
 15. Buzeti, Z., and Tian, D. 2025. Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR). *Circularise Insights*. <https://www.circularise.com> (accessed 2026.01.08.).
 16. HSF Kramer. 2024. EU's Packaging and Packaging Waste Regulation – the essentials. *HSF Kramer Notes*. <https://www.hsfkramer.com> (accessed 2026.01.08.).
 17. European Recycling Platform (ERP). 2025. Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR). *ERP Guide*, Brussels, Belgium, pp. 1-24.
 18. EUROOPEN. 2025. PPWR – Survival Guide (January 2025 update). *EUROOPEN*, Brussels, Belgium, pp. 1-36.
 19. 대한민국 친환경패키징포럼위원회, 2025, 지속 가능한 패키징 솔루션: 순환경제를 위한 혁신, 규제 및 협력, 2025 대한민국 친환경패키징 포럼 자료집, pp. 10-45.

투고: 2026.01.09 / 심사완료: 2026.01.26 / 게재확정: 2026.02.09

포장재 표시사항을 중심으로 한 국내 그린워싱 실태 분석 연구

조성문*

한국환경산업기술원

An Analysis of Domestic Greenwashing Practices Focusing on Packaging Labels

Seong Moon Cho*

Korea Environmental Industry and Technology Institute

Abstract As environmental, social, and governance(ESG) management has become a central corporate strategy, consumers increasingly rely on environmental information when making purchasing decisions. Packaging labels, as the most immediate point of contact between products and consumers, play a critical role in shaping perceptions of environmental performance. This study analyzes the current state and structural characteristics of greenwashing practices in South Korea, focusing on environmental claims presented on product packaging. Using documented domestic cases, the study examines five major types of environmental claims frequently associated with greenwashing: environmental certification marks, “free-of” claims, carbon emission-related statements, recycled content declarations and biodegradability claims. The analysis reveals that many packaging labels rely on ambiguous criteria, selective disclosure, or partial improvements, which are often generalized to imply comprehensive environmental superiority. Although the claims may be factually accurate in isolation, insufficient explanation of their scope, conditions, and limitations increases the likelihood of consumer misinterpretation. The findings suggest that greenwashing in packaging labels is not limited to false information but is closely linked to how environmental attributes are framed and simplified within constrained communication spaces. To address this issue, companies should establish internal guidelines that clearly define the applicability, verification basis, and boundaries of environmental claims. Transparent and precise labeling practices are essential for enhancing consumer trust, preventing misleading environmental communication, and supporting the development of sustainable consumption patterns.

Keywords Greenwashing, Packaging Labels, Environmental Claims, Consumer Trust, Sustainable Consumption

서론

최근 ESG 경영이 기업 경영의 핵심 전략 요소로 부상함에 따라 환경문제에 대한 사회적 관심이 지속적으로 확대되고 있다. 이에 따라 소비자들 역시 제품 선택 과정에서 환경적 가치를 중요한 판단 기준으로 고려하는 경향을 보이고 있으며, 친환경 제품에 대한 수요 또한 점진적으로 증가하고 있다.^{1,2)} 이러한 사회적 변화에 대응하여 기업들은 제품의 기능적 특성뿐만 아니라 유통 및 판매 단계 전반에

서 친환경 이미지를 강조한 마케팅 전략을 적극적으로 활용하고 있다.³⁾ 특히 소비자와의 접점에 위치한 포장재는 제품의 환경적 특성을 전달하는 핵심적인 매개 수단으로 인식되며, 환경성 정보를 시각적·언어적으로 전달하는 주요 수단으로 활용되고 있다.

그러나 친환경에 대한 사회적 관심이 높아질수록, 실제 환경 개선 효과와는 무관하게 친환경성을 과장하거나 왜곡하여 소비자를 오도하는 사례 또한 증가하고 있다. 이러한 행위는 일반적으로 ‘그린워싱(Greenwashing)’으로 정의되며, 특히 제품 포장재의 표시사항은 소비자가 제품을 접하는 과정에서 가장 직접적으로 인식하는 정보라는 점에서 그린워싱이 빈번하게 나타나는 영역이다. 포장재에 사용되는 ‘친환경’, ‘재활용 가능’, ‘자연 친화적’ 등의 표현은 명확한 기준이나 객관적인 검증 근거가 제시되지 않을 경우, 소비자

*Corresponding Author: Seong Moon Cho
Korea Environmental Industry and Technology Institute
Tel: +82-2-2284-1940
E-mail: smcho@keiti.re.kr

로 하여금 해당 제품이 실제보다 환경적으로 우수한 것으로 인식하도록 유도할 가능성이 크다.

소비자 인식 측면에서도 환경성 정보의 영향력은 뚜렷하게 나타난다. 한국소비자원이 실시한 친환경 제품 구매 의향 조사(2025년)⁴⁾에 따르면, 응답자의 86.7%가 친환경 제품을 구매할 의사가 있다고 응답하였으며, 이 중 95.0%는 가격이 다소 높더라도 친환경 제품을 선택하겠다고 답한 것으로 나타났다. 이는 소비자들이 가격 요소보다 환경적 가치를 중시하는 소비 성향을 보이고 있음을 시사하는 동시에, 제품 및 포장재에 제시된 환경성 정보가 구매 의사 결정 과정에서 결정적인 영향을 미치고 있음을 보여준다. 따라서 포장재 표시사항에 포함된 환경성 정보는 단순한 보조 정보가 아니라, 소비자의 인식 형성과 선택을 좌우하는 핵심 요소로 평가할 수 있다.

그린워싱은 단순한 정보 왜곡에 그치지 않고, 환경적·사회적·경제적 측면에서 다양한 부정적 파급효과를 발생시킨다. 환경적 측면에서는, 기업이 형식적인 친환경 주장에만 집중함으로써 실질적인 환경 개선 노력이 저해될 수 있으며, 이를 통해 장기적으로 기업의 지속가능한 생산 활동이 약화될 가능성이 있다.⁵⁾ 사회적 측면에서는, 그린워싱이 소비자의 신뢰를 훼손함으로써 친환경 제품에 대한 전반적인 신뢰도와 선택 의지가 감소할 수 있으며, 이는 소비자 주도의 지속 가능한 시장 형성을 방해한다.^{6,7)} 경제적 측면에서도 문제가 발생한다. 과장된 환경성 표시에 의존하는 기업이 상대적으로 경쟁 우위를 점할 경우, 실제 환경적 성과를 달성한 기업의 시장 경쟁력이 저하되며, 공정한 시장 질서가 훼손될 우려가 존재한다. 나아가 그린워싱이 광범위하게 발생하면 소비자는 환경 정보의 진위 판단에 혼란을 겪게 되며, 장기적으로 친환경 소비에 대한 회의적 인식이 확산될 수 있다.⁸⁾ 이와 같이 그린워싱은 단순히 소비자 오인이

라는 개별 문제를 넘어, 기업의 사회적 책임 실현과 지속 가능한 소비·생산 체계 전반에 영향을 미치는 구조적 문제로 이해될 수 있다.

이러한 문제의식에 기반하여 본 연구는 제품 포장재의 표시사항을 중심으로 국내에서 실제로 확인된 그린워싱 사례를 분석하고, 환경성 관련 마크, 무함유 표시, 탄소배출, 재활용 원료 사용, 분해성 등 주요 환경성 표시 영역에서 나타나는 구체적인 문제 양상을 체계적으로 검토하고자 한다. 나아가 본 연구는 소비자 오인을 유발하는 포장재 표시의 구조적 특성을 규명하고, 신뢰할 수 있는 환경성 정보 제공을 위한 표시 개선 방안을 제시하는 것을 목표로 한다.

본 론

1. 국내 그린워싱 제도 및 현황

그린워싱은 정책적·법률적으로 '부당한 제품의 환경성 표시·광고'로 정의된다. 이때 '제품의 환경성'이란 재료와 제품을 제조·소비·폐기하는 전 과정에서 발생하는 오염물질이나 온실가스의 배출 정도, 자원과 에너지의 소비 수준 등 환경에 미치는 영향력의 정도를 의미한다. 즉, 환경성은 단일 요소가 아닌 제품의 전 생애주기를 고려한 종합적인 개념으로 이해될 필요가 있다.

우리나라에서는 「환경기술 및 환경산업 지원법」을 근거로 2014년부터 그린워싱 행위에 대한 관리와 규제를 본격적으로 시행해 왔으며, 이를 통해 환경성 표시·광고에 대한 법적 기준과 관리 체계를 단계적으로 마련해 왔다. 해당 법은 환경성과 관련된 정보가 소비자에게 부정확하거나 과장되게 전달되는 것을 방지하고, 소비자의 합리적인 선택을 저해할 우려가 있는 환경성 표시·광고를 제한하는 데 중점을 두고 있다. 이를 통해 기업이 자사 제품의 환경적 특성

Table 1. 국내 그린워싱 제도 개요

구분	내용	
적용범위	제조업자, 제조판매업자 또는 판매자	
관련고시	환경성 표시·광고 관리제도에 관한 고시	
그린워싱 금지행위	<ul style="list-style-type: none"> 포괄적 환경성 표현 환경성 관련 마크 인용 및 증언에 관한 표현 무함유 등의 표시·광고 물질 등의 감축에 관한 표시·광고 	<ul style="list-style-type: none"> 에너지에 관한 표시·광고 재활용 등의 표시·광고 분해성에 관한 표시·광고 오존층에 관한 표시·광고
실증방법	시험 결과, 조사 결과	
처벌	시정조치, 과징금, 벌칙(2년 이하의 징역 또는 2천만원 이하의 벌금)	
표시·광고 사전검토	제조업자 등의 환경성 표시·광고 행위 전에 위반 여부의 검토 요청	
위반행위 신고	국민(신고포상금제도) (위반사실을 신고 또는 제보하고 이를 입증할 수 있는 증거자료를 제출한 자)	
제도운영	기후에너지환경부 / 한국환경산업기술원	

Table 2. 그린워싱 행위의 구분

구분	내용
거짓·과장의 표시·광고	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 사실과 다르게 표시·광고하는 행위 ◦ 사실을 지나치게 부풀려 표시·광고하는 행위
기만적인 표시·광고	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 사실을 은폐하거나 축소하는 등의 방법으로 표시·광고하는 행위 ◦ 어느 한 부분에 해당하는 내용을 다른 부분에도 해당하는 것처럼 표시·광고하는 행위 ◦ 제품의 환경성이 일정한 수준에 해당하지 않는데도 불구하고 그 수준에 해당하는 것처럼 표시·광고하는 행위
부당한 비교 표시·광고	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 비교 대상 및 기준을 분명하게 밝히지 않거나 객관적인 근거 없이 자기의 제품을 다른 제조업자 등의 제품과 비교하여 우량하거나 유리하다고 표시·광고하는 행위 ◦ 객관적인 근거 없이 배타성을 띤 절대적 표현(최대, 최고, 최초 또는 유일 등을 말한다)을 사용하여 표시·광고하는 행위
비방적인 표시·광고	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 다른 제조업자 등의 제품에 관하여 객관적인 근거가 없는 내용을 표시·광고하는 행위 ◦ 다른 제조업자 등의 제품에 관하여 불리한 사실만을 표시·광고하여 비방하는 행위

을 보다 정확하고 책임 있게 제공하도록 유도하는 것을 주요한 목적으로 한다.

현행 제도에 따르면 그린워싱 행위는 크게 네 가지로 구분된다. 첫째, 실제 사실과 다르게 환경성을 표현하거나 그 효과를 과장하는 거짓·과장의 표시·광고, 둘째, 소비자의 오인을 유발할 수 있는 중요한 정보를 누락하거나 일부 정보만을 제시하는 기만적인 표시·광고, 셋째, 객관적인 근거 없이 자사 제품의 환경적 우위를 주장하는 부당한 비교 표시·광고, 넷째, 객관적 근거 없이 경쟁 제품이나 타 기업을 비방하는 광고이다. 이러한 그린워싱 행위는 주로 제품 포장재에 사용되는 문구, 도안, 상징물 등의 형태로 소비자에게 전달되는 경우가 많으며, 일상적인 소비 과정에서 쉽게 인지되기 어렵다는 점에서 보다 면밀한 관리와 주의가 요구된다.

Table 3의 국내 그린워싱 적발 현황⁵⁾을 살펴보면, 2021년 272건에 불과하던 위반 건수가 2022년에는 4,558건으로 급증하였고, 2023년에는 4,935건으로 증가하여 3년 사이 약 17배 이상 확대된 것으로 나타났다. 이러한 급격한 증가 추세는 환경문제에 대한 소비자의 관심과 친환경 제품 수요 확대와 더불어, 국내 기업들의 그린워싱에 대한 인식 부족과 환경성 표시·광고 관련 법·제도에 대한 이해 미흡에서 비롯된 것으로 해석할 수 있다.¹⁶⁾ 특히 최근 몇 년간 친환경

경 소비 트렌드가 강화되면서, 기업들은 마케팅 과정에서 환경성을 강조하려는 경향이 강해졌고, 그 결과 포장재를 통한 과장된 환경성 표현이 빈번하게 나타난 것으로 판단된다. 아울러 제도적 관리·감독 강화로 인해 기존에는 드러나지 않았던 위반 사례가 적극적으로 적발되었을 가능성도 함께 고려해야 한다. 이러한 맥락에서, 단순한 건수 증가가 아니라 소비자 인식과 기업 전략, 제도적 환경이 상호 작용한 결과로 이해할 필요가 있다.

행위별 분석에서는 거짓·과장의 표시·광고가 전체 적발 사례에서 가장 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 다수 기업이 자사 제품의 환경 개선 효과를 객관적·과학적으로 입증할 충분한 근거 자료를 확보하지 못한 상태에서, 포장재 문구나 표시 방식에서 과장된 환경성을 주장하고 있음을 시사한다. 특히 ‘친환경’, ‘환경 보호’, ‘지속 가능’ 등 추상적 표현이 명확한 기준이나 검증 자료 없이 사용되는 사례가 빈번하며, 소비자가 이를 실제 환경 성과로 오인할 가능성이 크다. 이와 같은 행위는 소비자가 제품의 환경 성과를 실제보다 높게 인식하게 하여 합리적 판단을 저해할 수 있으며, 환경성 표시 전반에 대한 신뢰성을 약화시킬 수 있다.

2. 포장재 표시사항에 기반한 주요 그린워싱 행위 유형의 실태

본 연구에서는 포장재 표시사항을 중심으로 국내에서 반복적으로 확인되는 주요 그린워싱 행위를 유형별로 분석한다. 포장재는 소비자가 제품을 접하는 과정에서 가장 먼저 인식하는 정보 매체로서, 환경성 표시가 소비자의 인식 형성과 구매 판단에 직접적인 영향을 미치는 핵심적인 역할을 수행한다. 특히 환경성 관련 표현은 시각적 요소와 결합되어 직관적으로 전달되는 경우가 많아, 표시 내용의 정확성과 적정성에 대한 관리가 무엇보다 중요하다.

Table 3. 그린워싱 적발 현황(Source : 박필주·조성문(2025))

구분	2020	2021	2022	2023	2024
계	110	272	4,558	4,935	2,528
거짓·과장	107	183	4,243	4,931	2,465
거짓·과장/기만	-	1	294	3	54
기만	3	87	20	-	8
부당한 비교	-	1	1	1	1
비방	-	-	-	-	-

최근 그린워싱 적발 사례를 살펴보면, 포장재에 사용된 환경성 표현이 법적·제도적 기준을 충분히 반영하지 못한 채, 소비자의 오인을 유발할 소지가 있는 방식으로 사용되는 경향이 반복적으로 나타나고 있다. 이러한 문제는 특정 산업이나 제품군에 국한되지 않고, 환경성 관련 마크, 무함유 주장, 탄소배출, 재활용 원료, 분해성 등 다양한 표시 영역에서 공통적으로 확인되고 있으며, 환경성 정보 제공의 신뢰성을 구조적으로 저해하는 요인으로 작용하고 있다.

이에 본 연구에서는 실제 포장재 표시사항 조사 및 적발 사례를 바탕으로, 환경성 관련 마크, 무함유 표시, 탄소배출, 재활용 원료 사용, 분해성 등 주요 환경성 표시 영역에서 반복적으로 나타나는 그린워싱 행태를 유형별로 분석하고자 한다. 각 유형에 대해 표시의 개념적 특성과 사용 맥락을 검토하고, 실제 사례에서 나타나는 정보 전달의 한계와 소비자 오인 가능성을 중심으로 문제점을 분석한다. 나아가 이를 통해 포장재 환경성 정보의 신뢰성을 제고하고, 소비자가 정보를 보다 정확하게 해석할 수 있도록 하는 표시 개선 방향을 제시하고자 한다.

2.1. 환경성 관련 마크 표시

환경성 관련 마크는 법정인증마크, 업계자율마크, 기업자가마크로 구분할 수 있다. 이 가운데 법정인증마크와 업계자율마크는 제3자 인증마크에 해당하며, 국가 또는 관련 공공기관, 전문 단체와 같은 독립적인 인증 주체가 제품의 환경성을 평가한 후, 일정한 인증 절차와 기준을 충족한 경우에 한해 부여되는 마크를 의미한다. 이러한 제3자 인증마크는 객관성과 공신력을 기반으로 소비자에게 환경성에 대한 비교적 신뢰도 높은 정보를 제공하며, 환경성 정보의 신뢰성을 제도적으로 보장하는 기능을 수행한다.^{9,10,11)} 특히 인증 기준과 절차가 법령이나 공인된 운영 규정에 따라 관리된다는 점에서, 소비자가 환경성 정보를 판단하는 데 있어 중요한 참고 지표로 활용된다.

반면, 기업자가마크는 기업이 자사 제품의 환경적 특성이나 친환경 이미지를 강조하기 위해 자체적으로 개발·운영하는 표시로, 외부 기관에 의한 객관적인 검증 절차를 수반하지 않는다는 점에서 제3자 인증마크와 명확한 차이를 보인다. 이러한 자가마크는 기업 내부 기준에 따라 운영된다는 점에서 일정한 정보 제공 기능을 가질 수 있으나, 그 신뢰성은 인증 주체의 독립성과 검증 절차의 투명성에 한

계가 있다는 점을 고려할 필요가 있다.

실제 포장재 표시사항을 살펴보면, 기업자가마크임에도 이를 명확히 구분하지 않고 사용하는 그린워싱 행위가 확인된다. 즉, 기업자가마크를 국가 또는 공신력 있는 기관·단체로부터 부여받은 제3자 인증마크인 것처럼 표현하거나, 인증 주체 및 인증 방식에 대한 정보를 충분히 제시하지 않음으로써 소비자의 오인을 유발하는 경우를 말한다. 이러한 표시 행위는 소비자로부터 하여금 해당 제품이 객관적이고 엄격한 환경성 검증 절차를 거친 것으로 인식하게 할 가능성이 있으며, 결과적으로 환경성 표시 전반의 투명성과 신뢰성을 저해하는 요인으로 작용한다.¹²⁾

이에 따라 기업자가마크를 사용하는 경우에는 해당 마크가 기업이 자체적으로 운영하는 자가마크임을 명확히 구분하여 표시할 필요가 있다. 또한 자가마크의 적용 기준, 평가 방식, 적용 범위 및 표시 요건 등에 관한 정보를 제품포장, 사용 설명서 또는 기업의 공식 홈페이지 등 소비자가 접근 가능한 매체를 통해 구체적으로 제공함으로써, 환경성 정보 제공의 명확성과 신뢰성을 제고할 필요가 있다.

2.2. 무함유 표시

무함유 표시는 “~無”, “~ZERO”, “~FREE” 등과 같이 특정 물질이 포장재에 함유되어 있지 않거나 검출되지 않았음을 강조하는 표현으로, 소비자에게 포장재의 안전성 또는 환경적 우수성을 직관적으로 전달하는 수단으로 활용되고 있다. 이러한 표현은 환경성 정보 제공이라는 측면뿐만 아니라 인체 안전성과도 밀접하게 연관되어 있어, 소비자의 위험 인식과 구매 결정에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 특히 식품·생활용품 등과 직접 접촉하는 포장재의 특성상, 무함유 표시는 소비자에게 포장재의 신뢰도를 높이는 핵심 요소로 작용할 가능성이 크다. 따라서 무함유 주장은 단순한 마케팅 문구에 그쳐서는 안 되며, 과학적·객관적 근거에 기반하여 신중하고 엄격하게 사용될 필요가 있다. 특히 해당 표현을 사용할 경우에는 무함유를 주장하는 물질이 무엇인지 구체적으로 명시하고, 이를 입증할 수 있는 시험 결과나 검증 자료를 함께 제시함으로써 정보 제공의 명확성을 확보해야 한다.

그러나 실제 포장재 표시 사례를 살펴보면, 일부 포장재에서는 납, 카드뮴 등 제한된 수의 유해물질에 대해서만 불검출 시험 결과가 확인되었음에도 불구하고, 이를 근거로

Table 4. 환경성 관련 마크 종류¹³⁾

구분		정의	예시
제3자 인증마크	법정 인증마크	법적 근거에 따라 환경성을 인증하는 마크	환경표지, 환경성적표지 등
	업계 자율마크	업계에서 자체적으로 환경성을 인증하는 마크	한국표준협회의 로하스마크 등
기업자가마크		기업이 자기 제품의 우수성을 나타내기 위해 자체적으로 만들어 사용하는 마크	-

“유해성분 ZERO”, “유해성분 차단”과 같이 포괄적이고 절대적인 표현을 사용하는 사례가 다수 확인된다. 이러한 표시 행위는 시험 대상이 된 특정 물질의 미검출을 모든 유해 성분의 미검출로 일반화하는 것으로, 시험 범위, 분석 대상, 검출 한계 등 과학적 조건을 충분히 반영하지 않은 과장된 환경성 표시에 해당한다. 특히 시험 항목에 포함되지 않은 물질이나 법적 관리 대상이 아닌 성분에 대해서는 검증이 이루어지지 않았음에도, 전면적인 무해성을 암시하는 표현을 사용하는 것은 소비자의 합리적이고 정확한 판단을 저해할 가능성이 크다.

이와 같은 무함유 표시 행위는 소비자로 하여금 해당 포장재가 어떠한 유해 물질도 포함하지 않거나, 환경 및 인체에 전혀 위해가 없는 것으로 인식하도록 유도할 수 있다. 이는 환경성 정보의 정확성과 신뢰성을 저해할 뿐만 아니라, 포장재 표시 전반에 대한 소비자의 신뢰를 약화시키는 요인으로 작용한다. 특히 유해화학물질 검출시험 결과 중 일부 물질의 불검출 사실을 지나치게 강조하거나 확대 해석하여 모든 유해 물질이 없는 것처럼 표시하는 경우, 이는 환경성 표시·광고 관련 법령에서 금지하는 그린워싱에 해당할 소지가 크며, 규제 대상이 될 가능성 또한 존재한다.

이에 따라 무함유 표시를 활용하는 경우에는 시험 대상 물질, 시험 방법 및 시험 범위를 명확히 제시하고, 해당 표현이 의미하는 범위를 제한적으로 전달할 필요가 있다. 또한 소비자가 무함유 주장에 대해 과도한 기대나 오해를 형성하지 않도록, 포장재에 사용되는 문구의 표현 수준과 의미 해석 가능성을 종합적으로 고려해야 한다.

2.3. 탄소배출 표시

포장재 전 과정에 대한 과학적·계량적 근거에 기반하지 않은 탄소배출 표시는, 소비자에게 포장재가 환경에 미치는 영향을 최소화했다는 인상을 주기 위한 표현으로 활용된다. 이러한 표시는 포장재의 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 기준으로 하여 친환경성을 직관적으로 전달하는 주요 수단으로 기능하지만, 전 과정의 과학적·계량적 근거 없이 포괄적으로 사용될 경우, 소비자는 포장재의 실제 환경적 효과를 과대평가할 수 있다. 이는 포장재 환경성 정보



제공의 정확성과 신뢰성을 저해하고, 소비자의 합리적 판단을 방해하는 요인으로 작용할 수 있다.

실제 포장재 사례를 분석한 결과, 일부 포장재는 재활용 원료 사용, 두께 축소, 경량화 등 개별 공정 또는 요소의 부분적 개선 사항만을 근거로 “저탄소”, “탄소저감”, “환경부하 최소화”와 같은 포괄적 표현을 사용하는 것으로 확인된다. 그러나 이러한 개별 개선 조치는 제품 전 과정 전반에서의 온실가스 배출 저감을 직접적으로 증명하는 근거로 보기 어렵다. 특히 배출량 산정에 적용된 전 과정 범위가 제한적임에도 불구하고, 소비자로 하여금 포장재의 사용 및 폐기 단계까지 포함한 전 과정에서 탄소 저감 효과가 발생한 것처럼 오인하게 만드는 사례도 관찰된다. 이와 같은 표시 행위는 포장재 탄소배출 정보의 신뢰성을 훼손할 뿐만 아니라, 소비자의 합리적인 의사결정을 저해할 가능성을 높인다. 따라서 재활용 원료 사용, 경량화 등 개별 개선 조치를 근거로 탄소 저감을 주장하고자 하는 경우에는, 해당 변화가 실제로 제품 전 과정의 온실가스 배출량 감소로 이어졌는지를 계량적으로 입증한 저감 실적을 확보하고, 그 결과를 명확히 제시하여 표시할 필요가 있다.

한편, 포장재 탄소배출 표시와 관련된 새로운 유형의 그린워싱은 인증 단계에 대한 과장된 표현에서 나타난다. 환경성적표지 인증(1단계)은 포장재 전 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 이산화탄소 배출량으로 정량화하여 표시하는 단계임에도 불구하고, 일부 포장재에서는 해당 인증 단계를 명확히 밝히지 않은 채 단순히 ‘저탄소’라는 표현을 사용하고 있다. 이러한 표현은 소비자로 하여금 실제 온실가스 감축 효과를 과도하게 인식하게 할 우려가 있다. 따라서 ‘저탄소’라는 표현을 사용하기 위해서는 환경성적표지 인증의 다음 단계인 저탄소제품 인증(2단계)을 취득해야 한다.

따라서 포장재에 탄소배출 표시를 할 경우, 적용 범위와 인증 단계를 명확히 구분하고, 배출량 및 감축량에 대한 구체적인 수치와 산정 근거를 함께 제시하는 것이 필요하다. 이러한 투명한 정보 제공은 소비자가 포장재의 탄소배출 저감 효과를 실제 수준에 맞게 이해하도록 돕고, 과도한 확대 해석과 오인을 방지할 수 있다.

Table 5. 환경성적표지와 저탄소제품 제도 비교14)

구분	인증 도안	내용
환경성적표지 인증 (1단계)		제품 및 서비스의 원료 채취, 생산, 수송·유통, 사용, 폐기 등 전 과정에서 발생하는 환경성 정보(환경에 미치는 영향)를 계량화하여 표시하는 제도
저탄소제품 인증 (2단계)		환경성적표지 인증제품 중 연료·원료 대체나 공정·효율 개선 등을 통해 종전보다 온실가스 배출량을 감축하여 저탄소제품 인증기준을 충족한 제품

2.4. 재활용 원료 사용 표시

재활용 원료 사용 표시는 포장재가 재활용 원료를 사용하여 제작되었음을 강조함으로써 자원 순환 촉진과 유효자원 절약에 기여하는 환경적 이점을 전달하는 표현을 의미한다. 특히 식품을 포함한 생활 소비재 분야를 중심으로 포장재에 재활용 관련 표시가 광범위하게 활용되고 있으며, 이는 소비자에게 해당 제품이 환경적 책임성과 지속 가능성을 고려하여 설계·제작되었다는 인식을 직관적으로 제공하는 주요 수단으로 기능하고 있다. 이와 같은 재활용 원료 사용 표시는 소비자의 환경 인식 형성과 구매 판단에 직접적인 영향을 미친다는 점에서, 단순한 상업적 홍보를 넘어 환경성 정보로서 일정한 공적 성격을 지닌다고 볼 수 있다.¹⁵⁾ 따라서 재활용 원료 사용에 관한 표시는 실제 환경 개선 효과를 정확하고 균형 있게 전달하는 정보로서, 그 사용에 있어 신중한 접근이 요구된다.

재활용 원료 사용에 관한 환경성 주장은 실제로 개선된 환경적 효과의 수준을 과장하지 않아야 하며, 재활용 원료 사용이 환경 측면에서 갖는 의미와 한계에 대해 객관적이고 검증 가능한 근거를 제시할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 재생원료 함량이 기존 포장재 대비 또는 타사 유사 포장재 대비 어느 정도 증가하였는지, 현재 포장재에 적용된 재생원료의 함량률이 얼마인지를 구체적으로 명시하는 것이 바람직하다. 그러나 실제 포장재 표시 사례를 살펴보면, 재생원료를 사용하였다는 사실만을 강조하면서도 해당 함량, 비교 기준, 적용 범위 등에 대한 구체적인 정보는 제시하지 않거나, 환경성 개선의 정도를 명확히 설명하지 않는 표시가 다수 확인된다. 이러한 경우 소비자는 재활용 원료 사용의 실질적 수준이나 의미를 정확히 파악하기 어렵다.

특히 재활용 원료를 일부 사용하였다는 사실을 근거로 “친환경”, “환경 보호”, “지속 가능” 등과 같은 포괄적이고 종합적인 환경성 용어를 사용하는 사례가 빈번하게 나타나고 있다. 그러나 ‘친환경’이라는 표현은 재활용 여부뿐만 아니라 원료 채취, 제조 공정, 유통, 사용, 폐기 등 제품 전 과정에 걸친 환경 영향을 종합적으로 고려하는 개념에 해당한다. 따라서 포장재에 재활용 원료가 일부 적용되었다는 단일 요소만으로 이러한 용어를 사용하는 것은, 환경성 개선 효과를 실제보다 과도하게 확대 해석하는 결과를 초래할 수 있다. 이는 소비자로서 하여금 제품 전반이 환경적으로 우수한 것으로 인식하도록 유도할 가능성이 있으며, 결과적으로 그린워싱 행위에 해당할 소지가 크다.

또한 포장재 표시사항에서 반복적으로 확인되는 문제 사례로는, 포장지에 한해 재활용 원료를 사용하였음에도 불구하고 제품 전반에 대해 ‘재활용 소재 사용’, ‘재활용 제품’ 등으로 표시하는 경우를 들 수 있다. 이러한 표시 행위는 소비자로서 하여금 포장재뿐만 아니라 내용물 또는 제품 전체가 재활용 소재로 구성된 것으로 오인하게 만들 가능성

이 있다. 특히 재활용 원료가 적용된 범위가 포장재로 한정됨에도 불구하고, 그 범위를 명확히 구분하지 않고 포괄적으로 표현하는 것은 재활용 원료 사용 표시의 핵심 기능인 정확한 정보 전달을 저해할 우려가 있다. 이는 소비자의 합리적인 판단을 방해할 뿐만 아니라, 환경성 표시 전반에 대한 신뢰를 약화시키는 요인으로 작용할 수 있다.

따라서 재활용 원료 사용 표시를 활용하는 경우에는 재활용 원료가 적용된 대상이 포장재에 한정되는지 여부를 명확히 구분하여 표시하고, 재생원료 사용 비율과 비교 기준을 구체적으로 제시할 필요가 있다. 아울러 재활용 원료 사용이 의미하는 환경적 개선의 범위와 한계를 명확히 전달함으로써, 소비자가 표시 내용을 과도하게 확대 해석하거나 오인하지 않도록 하는 것이 중요하다.

2.5. 분해성에 관한 표시

분해성에 관한 표시는 포장재가 자연환경에서 분해될 수 있음을 강조함으로써 폐기 이후 환경 부담을 저감할 수 있다는 이미지를 전달하는 표현을 의미한다. 특히 생분해성, 자연분해, 친환경 분해 등과 같은 용어는 소비자에게 포장재가 환경에 미치는 부정적 영향을 최소화할 수 있을 것이라는 기대를 형성하게 한다. 이로 인해 분해성 관련 표시는 포장재의 환경성을 강조하는 핵심적인 수단으로 활용되고 있으나, 그 표현이 소비자의 오인을 초래하지 않도록 객관적이고 과학적인 근거에 기반하여 신중하게 사용될 필요가 있다.

분해성에 관한 환경성 주장은 해당 포장재가 어떠한 조건에서, 어느 정도의 기간 동안, 어느 수준까지 분해되는지를 객관적으로 입증할 수 있어야 하며, 단순한 원료 구성이나 일부 성분의 특성만으로 일반화되어서는 안 된다. 특히 생분해성 원료가 일부 포함되어 있다는 사실만으로 포장재 전체가 생분해되는 것처럼 표시하는 행위는, 실제 분해 조건과 성능을 충분히 반영하지 않은 과장된 환경성 주장에 해당할 수 있다. 분해성 여부는 포장재의 재질 구성, 첨가제, 두께, 사용 환경 등 다양한 요소에 의해 좌우되므로, 이를 종합적으로 고려한 실증 자료가 전제되어야 한다.

그러나 실제 포장재 표시 사례를 살펴보면, 생분해성 원료가 일부만 포함되어 있거나 관련 시험을 수행하지 않았음에도 불구하고 ‘생분해’, ‘자연분해’ 등의 표현을 사용하는 사례가 확인된다. 또한 포장재의 분해 조건, 분해 소요 시간, 분해율 등에 대한 구체적인 설명 없이 단순히 분해된다는 결과만을 강조하는 표시는 소비자로서 하여금 해당 포장재가 일반적인 자연환경에서 쉽게 분해되는 것으로 오인하게 할 우려가 크다.

구체적으로 일반 합성수지가 함유된 포장재를 생분해성 제품으로 표시하거나, 관련 법령 및 규정에서 정한 방법 또는 학계에서 일반적으로 인정되는 시험 방법에 따라 생분

Table 6. 환경표지 인증기준(EL724 : 2024. 생분해성수지제품)에서의 생분해도 시험방법 및 기준

구분	시험방법	인증기준
토양 생분해	KS M ISO 17556(플라스틱 — 폐쇄 호흡계에 의한 산소 소비량 또는 이산화탄소 발생량 측정에 의한 토양에서의 최종 호기성 생분해도 측정)	24개월 이내의 기간 동안 배양하여 측정된 시험 물질의 최종 생분해도 값이 표준물질의 최종 생분해도 값 대비 90 % 이상
해양 생분해	ISO 18830(Plastics — Determination of aerobic biodegradation of non-floating plastic materials in a seawater/sandy sediment interface — Method by measuring the oxygen demand in closed respirometer) 등	
일반 생분해 (퇴비화)	KS M ISO 14855-1(퇴비화 조건에서 플라스틱 재료의 호기성 생분해도의 측정 — 방출된 이산화탄소의 분석에 의한 방법 — 제1부: 일반적 방법)	180일 이내의 기간 동안 배양하여 측정된 시험 물질의 최종 생분해도 값이 표준물질의 최종 생분해도 값 대비 90 % 이상

해도를 객관적·과학적으로 실증하지 못한 상태에서 분해성을 주장하는 경우 역시 그린워싱에 해당할 수 있다. 포장재의 생분해성을 표시하기 위해서는 환경표지 인증기준(EL724 : 2024. 생분해성수지제품)에 적합한 인증을 취득하거나, 국제적으로 인정된 생분해 시험 기준에 따른 실증 자료를 확보하고, 해당 시험이 적용된 분해 조건과 환경을 구체적으로 제시하는 것이 바람직하다.

또한 실제 조사 과정에서는 퇴비화 조건에서 수행된 시험성적서를 근거로 자연분해를 주장하는 사례가 다수 확인되었으며, 이는 분해 조건에 대한 개념을 혼동하거나 이를 확대 해석한 결과로 볼 수 있다. 퇴비화 조건에서의 생분해는 해양 생분해 또는 토양 생분해와는 명확히 구분되는 개념으로, 이를 동일시하여 표시하는 행위는 명백한 그린워싱에 해당한다. 자연분해를 표시하고자 하는 경우에는 해양 생분해와 토양 생분해 조건에서의 생분해가 각각 확인되어야 하며, 각 조건별로 적용된 시험 기준과 시험 환경을 명확히 제시해야 한다.

따라서 분해성에 관한 표시를 하는 경우에는 ‘생분해’ 또는 ‘자연분해’라는 표현이 의미하는 조건과 범위를 명확히 구분하여 제시하고, 적용된 시험 기준과 시험 환경을 구체적으로 설명할 필요가 있다. 아울러 해당 포장재가 분해 가능한 환경과 그 한계를 명확히 전달함으로써, 소비자가 표시 내용을 과도하게 확대 해석하거나 오인하지 않도록 하는 것이 중요하다.

3. 포장재 표시사항을 중심으로 한 기업 환경성 표시 행위의 시사점

본 연구에서 분석한 포장재 표시 사례는, 기업의 환경성 표시 행위가 여전히 명확한 기준과 체계보다는 개별 환경 요소에 대한 부분적 개선 성과와 마케팅 전략에 크게 의존하고 있음을 보여준다. 특히 환경성 관련 마크, 무함유, 탄소배출, 재활용 원료, 분해성 등 다양한 환경성 요소가 각각 독립적인 맥락을 지님에도 불구하고, 실제 포장재 표시에서는 이러한 요소들이 충분히 구분되지 않은 채 종합적

인 환경적 우수성을 암시하는 방식으로 활용되는 경향이 반복적으로 확인되었다.

이러한 경향은 기업이 포장재 표시사항을 환경 정보 제공 수단이라기보다 소비자의 긍정적 인식을 유도하기 위한 커뮤니케이션 도구로 인식하고 있음을 시사한다. 즉, 환경적 특성이 성립하는 조건과 범위, 적용 대상에 대한 설명보다는, 소비자가 직관적으로 인식하기 쉬운 표현과 시각적 요소가 우선적으로 활용되는 구조가 형성되어 있다. 이 과정에서 환경성 표시가 갖는 공적 정보로서의 성격과 책임성은 상대적으로 충분히 고려되지 못하고 있다.

이에 따라 기업은 포장재 표시를 설계하는 단계에서, 개별 환경성 표현이 의미하는 구체적 내용과 한계를 내부적으로 명확히 정의할 필요가 있다. 재활용 원료 사용, 무함유, 분해성, 탄소 관련 특성 등은 각각 성립 조건과 평가 방식이 상이하므로, 이를 포괄적 환경성 주장으로 통합하기 보다는 적용 대상과 범위를 구분하여 전달하는 방식이 요구된다. 특히 ‘친환경’, ‘저탄소’, ‘생분해’와 같이 소비자의 전반적 인식을 좌우하는 용어를 사용할 경우, 해당 표현이 포장재의 어떤 요소에 근거한 것인지, 그리고 그 효과가 어느 범위까지 성립하는지를 명확히 제시하는 것이 중요하다.

또한 기업 내부적으로는 환경성 표시를 사전에 검토·관리하는 체계를 강화할 필요가 있다. 포장재에 적용된 환경적 특성, 시험 결과, 인증 단계, 개선 효과 등을 체계적으로 관리하고, 이를 기반으로 표시 문구를 설계함으로써 환경성 정보 제공과 마케팅 표현을 구분할 수 있어야 한다. 아울러 표시 문구가 소비자에게 어떻게 인식될 수 있는지를 검토하는 절차를 포함시킴으로써, 정보의 사실성뿐만 아니라 오인 가능성까지 고려한 관리가 이루어질 필요가 있다.

나아가 이러한 자율적 관리 체계는 기업의 환경성 표시 행위를 보다 책임 있는 방향으로 유도하는 기반으로 작용할 수 있다. 포장재 표시가 단기적인 이미지 제고 수단에 그치지 않고, 환경적 성과와 한계를 균형 있게 전달하는 정보 수단으로 기능할 때, 소비자의 신뢰를 유지하고 지속 가능한 소비 환경 형성에 기여할 수 있을 것이다. 이는 기업

의 환경 커뮤니케이션이 단순한 홍보 차원을 넘어, 사회적 책임을 수행하는 중요한 요소로 작동해야 함을 시사한다.

결론

본 연구는 제품 포장재 표시사항을 중심으로 국내에서 실제로 확인된 그린워싱 사례를 유형별로 분석함으로써, 환경성 정보가 소비자에게 전달되는 과정에서 반복적으로 나타나는 공통된 문제 구조를 규명하고자 하였다. 이를 위해 환경성 관련 마크, 무함유 표시, 탄소배출, 재활용 원료 사용, 분해성 등 포장재 표시에서 빈번하게 활용되는 다섯 가지 환경성 표현 유형을 중심으로, 그 표현 방식과 정보 구성의 특성을 종합적으로 검토하였다. 특히 각 유형별로 사용되는 용어의 모호성, 정보 제공 범위의 한계, 인증 및 검증 절차의 불명확성을 체계적으로 비교함으로써, 단편적인 사례 분석을 넘어 전체적인 구조적 문제를 도출하고자 하였다.

분석 결과, 개별 유형은 서로 다른 환경 요소를 다루고 있음에도 불구하고, 공통적으로 환경적 특성이 성립하는 조건, 범위, 적용 대상에 대한 정보가 충분히 제시되지 않은 채 표현이 사용되고 있다는 점이 확인되었다. 이러한 문제는 단순히 정보 누락에 그치지 않고, 인증 주체와 검증 방식의 불명확성, 시험 범위의 제한적 적용, 재생원료 사용 비율 및 적용 대상의 모호성, 특정 조건에서만 성립하는 분해성의 일반화, 인증 단계에 대한 혼동 등 다양한 형태로 나타났다. 결과적으로 이는 환경성 정보가 소비자에게 전달되는 과정에서 핵심 전제가 생략되거나 과도하게 단순화되는 구조적 특성을 공통적으로 보였다. 다시 말해, 소비자가 해당 정보를 해석할 때 전제 조건이나 한계가 충분히 고려되지 않은 상태로 인식될 위험이 존재한다는 점이 드러났다.

이러한 결과는 국내 포장재 표시사항에서 나타나는 그린워싱이 단순한 허위 정보 제공의 문제로 국한되지 않음을 시사한다. 오히려 이는 사실에 기반한 정보가 어떤 방식으로 선택, 강조, 축약되어 제시되는가, 그리고 그 과정에서 소비자가 정보의 범위와 조건을 정확히 이해할 수 있는가의 문제와 밀접하게 연관되어 있다. 즉, 표시된 내용이 개별적으로는 사실에 부합하더라도, 그 성립 조건과 한계가 충분히 설명되지 않을 경우 소비자는 해당 포장재 또는 제품 전반을 환경적으로 우수한 것으로 과대평가할 가능성이 존재한다. 이는 그린워싱 문제를 단순히 ‘거짓·과장’으로 정의하는 기존 논의의 한계를 넘어, 정보 해석과 인식 형성의 구조적 측면까지 확장하여 이해할 필요성을 보여준다.

아울러 포장재 표시사항의 특성 또한 이러한 문제를 심화시키는 요인으로 작용한다. 포장재는 제한된 공간과 간결한 표현을 전제로 하는 매체적 제약이 존재하며, 이는 환경성 정보가 제도적·과학적 맥락보다는 직관적 이미지 중심으로 소비자에게 해석될 가능성을 높인다. 이러한 매체적

특성은 환경성 표현이 소비자의 인식 형성에 미치는 영향력을 확대시킬 수 있으며, 정확성과 균형성을 확보하는 과정에서 구조적 제약으로 작용한다.

종합하면, 본 연구는 포장재 표시사항에서 확인되는 다양한 그린워싱 사례를 통해, 환경성 표시의 문제를 단순히 개별 표현의 적합성 여부를 넘어서 정보 전달 구조와 해석 가능성의 관점에서 조명하였다. 이를 통해 향후 환경성 표시를 검토하고 관리하는 과정에서는, 단순히 표시 내용의 사실성 여부를 확인하는 것에 그치지 않고, 정보가 소비자에게 어떤 방식으로 인식될 수 있는지를 함께 고려해야 함을 강조한다. 특히 기업이 환경성 정보를 제공할 때, 조건, 범위, 검증 절차, 적용 대상 등의 맥락적 정보를 충분히 포함시키는 전략이 필요함을 시사한다. 이러한 접근은 소비자의 오인 가능성을 최소화하고, 포장재를 통한 환경성 정보 전달의 신뢰성과 투명성을 확보하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

요약

ESG 경영의 중요성이 확대됨에 따라 소비자는 제품 선택 과정에서 환경성을 핵심 판단 기준으로 고려하고 있으며, 포장재 표시사항은 이러한 환경 정보를 전달하는 주요 수단으로 기능하고 있다. 본 연구는 국내 제품 포장재 표시사항을 중심으로 실제로 확인된 그린워싱 사례를 분석하여, 환경성 정보 전달 과정에서 나타나는 구조적 문제를 규명하고자 하였다. 이를 위해 환경성 관련 마크, 탄소배출, 무함유 표시, 재활용 원료 사용 표시, 분해성 관련 표시 등 포장재에서 빈번하게 활용되는 다섯 가지 환경성 표현 유형을 중심으로 그 특성과 문제 양상을 검토하였다.

분석 결과, 기업의 환경성 표시는 개별적으로는 사실에 부합하더라도, 적용 조건과 범위, 검증 방식에 대한 정보가 충분히 제시되지 않은 채 사용되는 경향이 공통적으로 확인되었다. 특히 제한적인 개선 성과나 특정 조건에서만 성립하는 환경적 속성이 포장재 전체 또는 제품 전반의 환경적 우수성으로 일반화되면서 소비자 오인을 유발할 가능성이 큰 것으로 나타났다. 이러한 그린워싱은 허위 정보 제공보다는 환경성 정보의 선택적 제시와 축약된 전달 방식에서 비롯되는 구조적 문제로 이해할 수 있다. 이에 본 연구는 기업이 포장재 표시 설계 단계에서 환경성 표현의 적용 범위와 한계를 명확히 규정하고, 소비자 인식을 고려한 책임 있는 정보 제공 체계를 구축할 필요가 있음을 시사한다.

참고문헌

1. Gu, W.J. and Yim, H.R. 2023. Greenwashing and Green Purchase Intention: The Mediating Role of Green Word of Mouth and Green Perceived Risk. *Asia-pacific Journal of*

- Convergent Research Interchange. 9(4): 45-56.
2. Lee, J.L. 2022. Proposal on the Problems and Solutions of Greenwashing in the Fashion Industry-Focusing on the Check and Regulatory Aspects. A Journal of Brand Design Association of Korea. 20(1): 67-80.
 3. Seo, C.S. 2024. News Big Data Analysis on Greenwashing in the ESG Era. The Journal of Social Convergence Studies. 8(4): 1-18.
 4. 한국소비자원 보도자료. 2025. “품질·가격 비교정보, 소비자의 제품 구매 결정에 끼치는 영향력 높아”.
 5. 박필주·조성문, 2025. 그린워싱(Green washing) 현황 및 기업의 대응 방안. 한국환경산업기술원 ESG ON focus.
 6. Ju, J.S. and Han, J.H. 2022. Effects of Agricultural Green Washing on Consumer Purchasing Behavior. Journal of Business Convergence. 7(1): 1-8.
 7. Kim, D.H. 2017. Effects to Credibility and Purchase Opinion of Green Goods by People's Taking Environmental Informations of Green Washing. Korean Journal of Environmental Education. 30(4): 378-393.
 8. Kim, S.E. and Lee, G.M. Structural Relationship between Greenwashing in The Food Industry and Green Product Purchasing Attitude ; Verification of The Mediating Effect of Green Cynicism and Psychological Contract Violation. Journal of Korea Service Management Society. 25(1): 203-243.
 9. Jang, W.S., Park, Y.S. and Lee, S.I. 2014. A Study on the Effects of Eco-friendly Certification Marks on Consumers' Attitudes towards Products and Purchase Intention: Focusing on the Moderating Effect of Environment Consciousness and Altruistic Tendency. Journal of Product Research. 32(4): 27-46.
 10. Moon, S.J. and Lee, S.H. 2013. Effects of Consumer's Eco-Mark Perception on Product Evaluation. Journal of Consumer Studies. 24(1): 99-123.
 11. Bae, S.M. and Song, Y.J. 2024. The Effect of Consumers' Environment Interest on the Environment Mark Perception and Behavior. Consumer Policy and Education Review. 13(3): 25-43.
 12. Yoo, H.J. and Song, Y.J. 2018. Consumers' Misconceptions and Reactions for Green Labels. Consumer Policy and Education Review. 14(2): 133-157.
 13. 환경부·한국환경산업기술원. 2025. 제품 환경성 표시·광고 길라잡이.
 14. 기후에너지환경부·한국환경산업기술원. 2025. 환경성적표지 인증안내서.
 15. Jung, H.M. and Kim, E.S. 2024. Effects of Recycling Availability Information and Anthropomorphic Cues on Consumer Recycling Behavior and Perceptions of Packaging Materials. Ewha Journal of Social Sciences. 40(1): 35-60.
 16. 대한상공회의소 보도자료. 2024. “그린워싱 피하려면? ESG 공시 법제화 리스크 대응 준비해야”.

투고: 2026.01.31 / 심사완료: 2026.02.19 / 게재확정: 2026.03.09

환경부하 저감을 위한 택배 수송용 연성포장의 포장공간비율 대체 방안 연구

오재영^{1,2,*} · 김혜림¹ · 유찬종¹ · 김승돈¹

¹한국건설생활환경시험연구원

²한국포장학회

A Study on Alternative Approaches of Packaging Space Ratio in Flexible Transport Packaging for Environmental Load Reduction

Jae Young Oh^{1,2,*}, Hye Rim Kim¹, Chan Jong Yu¹, and Seung Don Kim¹

¹Korea Conformity Laboratories

²Korea Society of Packaging Science & Technology

Abstract Due to the rapid transition from traditional cardboard boxes to disposable plastic film packaging in e-commerce parcel transportation and the corresponding increase in their use, a method for measuring the packaging space ratio of flexible packaging materials was prepared to prevent excessive packaging. However, due to the amorphousness of plastic film packaging, several problems arose in the measurement process, making policy implementation difficult. As a method to supplement and replace the existing method of measuring the ratio of packaging space in the plastic film packaging like plastic bag(PB), 'the method of limiting the size of enclosed products based on the PB packaging size' was proposed, and its potential for policy application was confirmed. The advantages of the proposed method are as follows: 1) maintaining regulatory consistency by using the existing packaging space ratio calculation formula and method, 2) preventing inevitable excessive packaging caused by the use of standardized packaging in the industry, and 3) ultimately contributing to logistics efficiency as well as inducing packaging standardization.

Keywords Plastic Bag(PB), Waste Reduction, Packaging Waste, Parcel Delivery, Packaging to Product Ratio

서 론

국가 온실가스 감축 목표(NDC) 및 상향안의 이행을 위해 전력, 산업, 건물, 수송, 농축수산, 폐기물 등 각 관리부문에서 국가 주도의 정책적 감량 목표를 설정하고 있다. 폐기물 부문에서도 생산·유통·소비 단계 폐기물 원천감량 및 재활용성 향상을 통해 2018년 대비 2030년까지 46.8% 감축(17.1백만톤CO₂eq/2018년 → 9.1백만톤CO₂eq/2030년)을 목표하고 있으며, 다회용 용기 확대 및 택배포장 과대포장 관리 개선 등 포장폐기물에 대한 감량 요소도 포함하고 있다.¹⁾ 특히, IoT 기반의 글로벌 이커머스(e-commerce) 시장의 폭발적 성장과 소비자 구매패턴의 변화는 국내를 비롯하여 전 세계적으로 택배 물동량의 지속적 증가와 동시에

유통·물류 산업의 성장을 견인하고 있다.²⁾ 국토교통부 및 한국통합물류협회의 생활물류 통계자료에 의하면, 2024년 국내 택배 물량은 약 59억 5천만 건으로 나타났으며, 이는 우리나라 국민 1인당 이용 건수로는 116.3회, 국내 경제활동인구 1인당은 204.3회로 조사되었다. 이는 2023년(51억 5천만 건) 대비 15.48% 성장한 것으로, 전년 대비 물동량 증가율은 '22년 16.05%, '23년 22.45%, '24년 15.48%로 지속적인 증가세를 보이고 있으며, 2019년(27억 8천만 건)에 비해 5년 만에 2.1배 늘었다.³⁾

반면에, 이러한 이커머스 시장의 성장은 택배유통 포장재 사용량의 급증과 동시에 포장폐기물 발생 등 환경 부담 증가를 야기하고 있으며, 국내외 정부 기관뿐만 아니라 다양한 유통물류 전문연구기관 및 관련단체, 산업계에서도 택배유통 포장폐기물 감량화 및 환경비용 경감을 위한 방안을 주요 의제로 삼아 고민하고 있다. 우리나라에서는 2019년 Oh 등^{4,5)}의 택배 유통포장 폐기물 감량화 방안 연구를 토대로, 2022년 환경부에서 일회용 수송포장의 원천감량을 위한 포장공간비율 및 포장횟수 규제안(포장공간비율 50% 이

*Corresponding Author: Jae Young Oh
Korea Conformity Laboratories, 199, 1st Gasan Digital Road, Gumi-cheon-gu, Seoul, 153-803 Korea
Tel : 02-2102-2605
E-mail : jyoungo@kcl.re.kr

하, 포장횟수 1차 이내)을 마련하였다.^{6,7)}

반면, 유통 산업계에서도 2018년 수도권 쓰레기 대란(2018년 4월 1일) 및 재활용 폐기물 종합관리 대책(2018년 5월 10일, 환경부)⁸⁾을 경험하면서 택배 포장폐기물 발생 최소화를 위한 필요성을 인식하고, 신선식품 배송용 재사용 포장(returnable packaging)의 도입이나 포장작업 효율성 및 유통 경제성 확보와 동시에 택배 유통포장재 감량화를 위한 노력의 일환으로 2018년 이후 골판지 상자에서 플라스틱 필름 포장재로의 전환을 지속적으로 확대 추진해 왔다. 실제로 우리나라 대표적인 풀필먼트 기업인 쿠팡의 경우에는 2024년 기준으로 택배용 플라스틱 필름 포장재 적용 비율이 전체 배송량의 약 70% 정도 차지하고 있는 것으로 파악되고 있다.

그런데, 환경부에서 정책적으로 규제하는 포장공간비율은 포장의 부피를 제한하는 방법으로, 골판지 상자 등 직육면체 형태의 정형화된 공간을 가지고 있는 포장에 대해서는 유용하지만, 비닐류 등 플라스틱 필름 포장과 같은 일정한 빈 공간을 가지지 않는 포장에 적용하기에는 측정방법의 합리성이나 명확성, 시험결과의 재현성 등 다소 많은 문제점이 잠재되어 있다. 이를 보완하기 위해 「제품의포장재질 및 포장방법에 대한 간이 측정방법(환경부 고시)」에서 Fig. 1와 같이 수송용 연성포장의 포장용적 산출방법⁹⁾을 제시하고 있으나, Table 1에 나타난 바와 같이 제품 및 포장재의 크기(가로, 세로, 높이의 합)가 동일하더라도 제품의 높이에 따라 포장공간비율 결과값의 가변성으로 인한 포장기준 적용의 합리성 문제와 산업계에서의 연성포장 규격화/표준화

요소 반영이 간과되고 있어 자동화 공정 도입의 애로 등 규제 의 합리성 및 실효성 문제가 지속적으로 제기되고 있다.

현행 ‘부피’ 개념을 기초로 한 포장공간비율 규제 방법 및 기준은 앞서 언급한 택배 유통포장재 감량화를 위한 산업계의 노력과 성과에 대한 반영이 미흡한 실정이며, 산업계 포장기술의 정책적 연계성 및 실효성을 나타내기에는 다소 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 일회용 택배 유통포장재 감량을 위해 산업계에서 적용하고 있는 택배용 플라스틱 필름 포장재에 ‘두께’ 및 ‘면적’, ‘길이’ 요소 및 ‘포장규격화’ 요소를 고려함으로써, 기존 ‘부피’ 개념의 포장공간비율의 문제점을 보완하여 산업과 정책 사이의 갈등을 줄이고 합리적 규제 적용 방안을 제시하고자 한다. 우선적으로 택배 유통용 비닐 포장재(PB, Plastic Bag)의 크기(치수)를 일정 간격에 따라 규격화하고, 환경적 관점 및 현행 포장 기준의 측면에서 과대포장이 유발되지 않도록 이 포장재에 담기는 제품 크기(치수)의 허용 범위를 제시함으로써 포장공간비율 대체 방안 제시하고자 하였으며, 이를 통해 궁극적으로 포장 표준화를 유도할 수 있고 물류 표준화에도 기여할 것으로 기대한다.

실험방법

1. 일회용 수송포장의 포장공간비율 산출을 위한 계산식⁹⁾

1.1. 제품체적 (V)

제품의 둘레에 외접하는 최소한의 육면체의 가로(*a*), 세로(*b*), 높이(*h*)의 곱

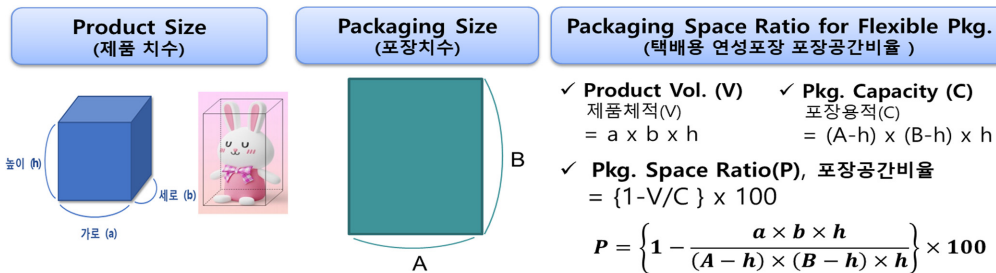


Fig. 1. Calculation method for the packaging space ratio in flexible transport packaging.

Table 1. Examples of variability in packaging space ratio results according to product dimension changes within the same packaging size

제품 치수 (mm)			제품 치수합 (l) (m)	제품체적 (V) (mm ³)	포장재 치수 (mm)		포장재 치수 합 (L) (mm)	포장재 면적 (S) (mm ²)	포장용적 (C) (mm ³)	포장공간비율 (P) (%)
a	b	h	a+b+c	axbxh	A	B	A+B	AxB	(A-h)x(B-h)xh	1-V/C
100	100	100	300	1,000,000	200	300	500	60,000	2,000,000	50.0%
110	110	80	300	968,000	200	300	500	60,000	2,112,000	54.2%
120	110	70	300	924,000	200	300	500	60,000	2,093,000	55.9%
140	100	60	300	840,000	200	300	500	60,000	2,016,000	58.3%
200	50	50	300	500,000	200	300	500	60,000	1,875,000	73.3%

$$V = a \times b \times h \quad (1)$$

1.2. 일회용 수송포장의 포장용적 (C)

1.2.1. 상자형 포장의 포장용적

상자의 내부치수를 기준으로 한 가로(A), 세로(B), 높이(H)의 곱 (mm³)

$$C = A \times B \times H \quad (2)$$

1.2.2. 연성포장의 포장용적 (C)

연성포장의 가로(A), 세로(B) 각 길이에서 제품의 높이(h)를 뺀 길이 (A-h), (B-h)와 제품의 높이(h)의 곱 (mm³)

$$C = (A - h) \times (B - h) \times h \quad (3)$$

1.3. 일회용 수송포장의 포장공간비율 (P)

식(1), (2), (3)으로부터 포장용적(C)에서 제품체적(V)를 제외한 빈 공간의 비율 (%)

$$P = \left(1 - \frac{V}{C}\right) \times 100 \quad (4)$$

2. 택배 유통용 플라스틱 필름 포장의 과대포장 방지 및 규격화 도입을 위한 설계조건

기준에 제시된 택배 유통용 플라스틱 필름 포장의 포장공간비율 측정방법 및 기준의 일관성을 유지하고, 산업계의 포장 규격화 및 자동화에 따른 합리적 규제 적용을 위해서 ‘포장 규격화’ 요소를 측정방법 과 기준 운영방안에 반영하고자 하였다. 이를 위해 현행 포장공간비율 측정방법을 기준으로 다음과 같은 고려사항 및 설계 방향을 제시하였다.

2.1. 제품 및 포장재에 대한 가변성을 배제하고, 가능한 불변값(최대값 또는 최소값) 활용

‘제품의 크기’를 표현하는 방법으로, 제품에 외접하는 육면체의 최소 체적 또는 육면체를 구성하는 세변의 길이의 합으로 나타낼 수도 있다. 그런데, 길이의 합은 일정할지라도 각 변의 길이의 변화에 따라 제품의 체적은 계속 달라지게 된다. 따라서, 본 연구에서는 포장 규격화 개념을 도

입하기 위해 ‘제품 크기’의 가변성을 배제하는 방안으로 세 변의 길이의 합을 활용하였다. 또한, 더 나아가 육면체에서 세 변의 길이의 합이 일정할 경우 이를 구성하는 체적의 최대값은 정육면체(V_{max})이고(Table 1 사례 참조), 사각형에서는 두 변의 길이가 일정할 경우 면적의 최대값은 정사각형이라는 점을 활용하였다.

2.2. 제품 크기별 최대 체적(=정육면체)에 대한 택배 포장기준을 만족하는 최소 포장 치수 도출

세 변 길이의 합을 기준으로 하는 ‘제품 크기’의 최대 체적(=정육면체)에 대하여, 택배 유통포장의 포장공간비율 기준(P=50%)을 만족하게 하는 포장재의 최소 면적 및 치수(두 변 길이의 합)는, A=B의 조건일 때(즉, 동일 치수에서 면적이 최대인 값) 이므로 이 값을 산출하기 위해 다음과 같이 식 (7) 및 식 (8)을 도출하였다.

즉, 식 (1), 식 (3)과 식 (4)로 부터 다음과 나타낼 수 있다.

$$P = \left(1 - \frac{a \times b \times h}{(A - h) \times (B - h) \times h}\right) \times 100 \quad (5)$$

B에 대해 정리하면,

$$B = \frac{a \times b}{(1 - 0.01P)(A - h)} + h \quad (6)$$

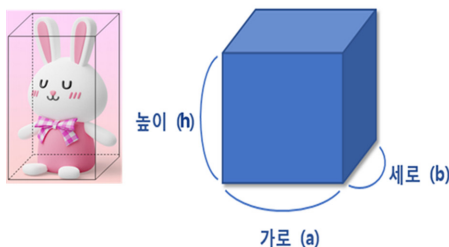
식 (6)에서 A=B를 적용하여, A 또는 B에 대해 정리하면 다음 식과 같다.

$$A = B = \sqrt{\frac{ab}{1 - 0.01P}} + h \quad (7)$$

여기서, P=50%를 적용하면 다음과 같다.

$$A = B = \sqrt{2ab} + h \quad (8)$$

따라서, 식 (7)로 부터 특정 제품 크기(a+b+h)에 대하여 포장공간비율 50% (P=50%)를 만족하는 최소 포장 크기(A+B)를 구할 수 있다. 즉, Table 2의 사례에 나타낸 바와 같이 포장 기준을 만족하는 필요 최소량의 포장재 크기는 가로와 세로의 길이가 동일한 정사각형일 때이며, 당연히



- ✓ **Sum of a hexahedron dimension**(직육면체 길이의 합)
= a + b + h
→ Constant results(계산값 일정)
- ✓ **Volume of a hexahedron**(직육면체의 부피)
= a x b x h
→ Variable results by dimension change(계산값 가변적)
→ Max. Vol.=Cubic → use V_{max} (최대값 활용)

Fig. 2. Methods for expressing product size.

Table 2. Calculation examples for the minimum packaging size satisfying a 50% packaging space ratio for a specific product size

포장공간비율 (P) (%)	제품체적 (V) (mm ³)	제품 치수합 (l) (mm)	제품 치수 (mm)			포장용적 (C) (mm ³)	포장재 치수 (mm)		포장재 치수 합 (L) (mm)	포장재 면적 (S) (mm ²)
			a	b	h		A	B		
1-V/C	axb ² h	a+b+c	a	b	h	(A-h)×(B-h)×h	A	B	A+B	A×B
50%	1,000,000	300	100	100	100	2,000,000	200.0	300.0	500.0	60,000
50%	1,000,000	300	100	100	100	2,000,000	220.0	266.7	486.7	58,667
50%	1,000,000	300	100	100	100	2,000,000	241.4	241.4	482.8	58,284
50%	1,000,000	300	100	100	100	2,000,000	260.0	225.0	485.0	58,500
50%	1,000,000	300	100	100	100	2,000,000	280.0	211.1	491.1	59,108

이 포장재의 치수 합(L) 및 포장재 면적(S) 또한 최소값임을 확인할 수 있다. 이러한 최소 포장 치수의 적용을 통해 포장재 감량화 요소를 반영하고자 하였다.

2.3. 현행 포장공간비율 측정 및 운영에서 ‘포장 표준화’ 개념 도입 및 반영 방안

서두에 언급한 바와 같이, 현행 포장규칙^{6,7)}에서의 포장공간비율은, 세 변의 합이 동일한 제품 크기에도 불구하고 각 변의 길이 변화에 따라 포장공간비율 산출 값이 달라져, 매번 택배용 PB포장재의 크기를 기준에 적합하게 조정 또는 변경해야 하는 불합리성이 존재하고 있다. 반면에 생산성과 물류효율화 등 경제성을 무시할 수 없는 산업계 현상

을 고려할 때, 표준화는 산업에서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 따라서, ‘과대포장 억제’와 ‘생산성 향상을 위한 포장 표준화’라는 두 가지 명제를 절충하는 방안을 제시할 필요가 있다. 이를 위해 식 (5) - 식 (8)의 현행 포장공간비율 측정방법과 기준에 기초하여, 특정 크기의 PB 포장재에 담을 수 있는 제품 크기의 허용 범위를 설정해 주는 방법을 제안하였다. 다만, 이 과정에서 특정 포장 크기(두 변의 합)에 대하여 일정 제품 크기(세 변의 합)의 허용 범위 지정에 따른 ① 하한 치수와 상한 치수에서 포장공간비율 차이 분석과 보완 방안을 검토하였으며, ② 동일 제품 크기(세 변의 합)에서 제품별 다양한 높이 변화에 의한 포장공간비율 산출값의 부득이한 상승 효과에 대해 포장 표준화 및 물류효

Table 3. Minimum Packaging dimensions satisfying packaging space ratios of P = 50%, 40%, and 30% for maximum volume (=Cube) by product size (A:B=1:1, R=1.0)

제품 크기별 최대 체적(=정육면체) 치수 합 (a + b + h, by a = b = h) (mm)	포장공간비율(P)에 대한 최소 포장 크기 (A + B, by A = B, R = 1.0) (mm)		
	P = 50%	P = 40%	P = 30%
300	482.8	458.2	439.0
330	531.1	504.0	483.0
360	579.4	549.8	526.9
390	627.7	595.7	570.8
420	676.0	641.5	614.7
450	724.3	687.3	658.6
480	772.5	733.1	702.5
525	845.0	801.8	768.3
570	917.4	870.6	834.2
600	965.7	916.4	878.1
645	1038.1	985.1	943.9
690	1110.5	1053.9	1009.8
735	1183.0	1122.6	1075.7
780	1255.4	1191.3	1141.5
840	1352.0	1283.0	1229.3
900	1448.5	1374.6	1317.1
990	1593.4	1512.1	1448.9
1080	1738.2	1649.5	1580.6
1170	1883.1	1787.0	1712.3
...

을화 관점에서 환경적 이득 및 상쇄 효과를 검토하였다.

연구 결과

1. 택배용 플라스틱 비닐의 포장공간비율 대체 및 과대 포장 방지를 위한 포장 규격화 방안

1.1 제품 크기별 최대 체적(=정육면체)에 대한 포장기준을 만족하는 최소 포장 치수(R = B/A = 1.0)

식 (7) 및 식 (8)을 활용하여, 제품 크기별 최대 체적(=정육면체)에 대한 택배 포장공간비율 기준 50, 40, 그리고 30%를 만족하는 최소 포장 크기(A+B)를 도출하여 Table 3에 나타내었고, 이 값들의 추세선을 통해 Fig. 3과 같이 추정 가능한 함수값을 도출하였다. 즉, 이 추정 함수를 통해 각 제품 크기 및 포장공간비율 기준에 대응하는 포장재 크기를 구할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 본 연구의 목적은 산업현장의 업무 특성을 고려하여 합리적 규제를 통한 제도의 실효성 확보 방안을 마련하는 것이므로, 산업계에서 사용하고 있는 특정 포장 규격에 대응할 수 있는 제품 크기의 범위를 설정함으로써 과대포장이 되지 않도록 유도하는 방법을 제시하고자 하였다. 이 과정에서 특정 포장재 크기에 대한 제품 크기의 범위에서 있어서 포장공간비율 기준을 50%(P = 50%)로 적용할 경우, 상위값에서는 P = 50% 기준을 만족하지만 하위값에서는 P = 60% 이상을 차지하게 되어 부득이하게 과대포장이 유발된다. 이를 보완하기 위해 포장공간비율 P = 40%를 만족하는 기준으로 제품크기의 상위값과 하위값 범위를 설정함으로써 상호 상쇄되도록 설계하였다. 다시말해, Fig. 3에서 포장공간비율 P = 40%를 만족하는 포장재 크기 및 제품 크기의 추세 함수인 $y = 1.5273x$ (무시 가능한 값으로 소수점 이하 생략)를 활용하여, 포장재 크기($y = A + B = 2A$)의 간격을 100 mm로 정하고 함수

에 대입하여 대응하는 제품 크기값($x = a + b + h = 3h$)을 구하였다. 여기서 포장재 크기의 간격을 정하는 것은 절대적인 것이 아니라 포장 표준화를 위해 필요한 간격을 사회적·정책적·산업적 협의에 의해 직관적으로 조정될 수 있는데, 간격이 넓으면 제품크기의 중·하위값에서 과대포장의 경향이 높아질 것이고, 반면 간격이 좁아지면 포장재 크기의 종류가 많아져 포장 표준화의 의미가 퇴색될 것이다. 본 연구에서는 포장전문가, 소비자, 산업계 등과 협의하여 포장재 크기별 간격을 100 mm로 산출하였고, 현행 포장규칙에서 포장재 크기(가로+세로+높이) 600 mm이하는 포장공간비율 적용 제외 규정 등을 반영하여, Table 4에 나타낸 바와 같이 특정 포장재 크기에 대한 적정 제품 크기의 범위 산출하였고 제품 크기의 상위값은 P = 40%, 하위값은 P = 60% 수준을 가지게 된다. 실제로 산업계에서 다루어지는 다수의 제품은 궁극적으로 중간값에 수렴할 것이므로 하위값에서의 다소 부득이한 과대포장은 상위값의 충만포장으로 상쇄될 것으로 판단된다. 또한, 이를 통해 산업계에서 원만한 포장 규격 활용과 동시에 포장 표준화 유도 및 과대포장 방지효과를 기대할 수 있다.

반면에, Table 4를 유도하는 과정 중에 과대포장 관점에서 간과된 부분이 있는데, 제품 크기(a + b + h)를 표현할 때 동일한 크기에 있어서 치수의 변동에 따른 체적 변화(Table 1에서의 제품체적 변화 참조)를 없애고 이론적 추정식을 도출하기 위해 최대값(=정육면체, a = b = h)을 기준으로 유도하였다. 그러나 실제로는 세 변의 합이 동일한 제품일지라도 치수의 변화에 따라 제품체적이 달라지므로, 직육면체 형태의 제품에서는 포장공간비율 더 상승되는 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제점은 앞서 서론 부분에서도 제기된 부분이므로, 이를 개선하는 방안으로 ‘포장 표준화’라는 거시적 관점에서 제품 크기의 다양한 변형 치수에 의한 체적 변화 및 포장공간비율 변화는 무시하는 것으로 제안하였다.

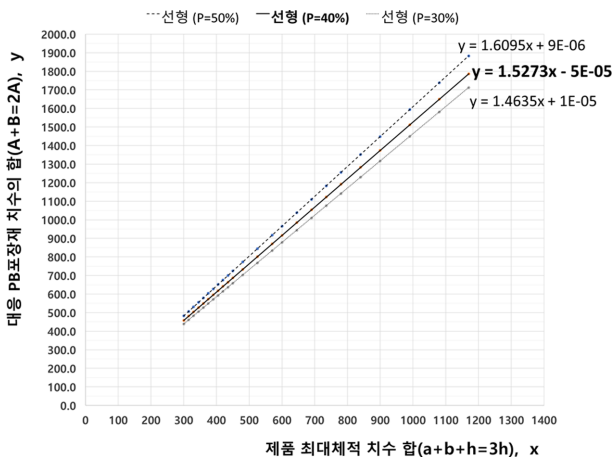


Fig. 3. Minimum PB packaging size estimation functions satisfying packaging space ratios of P = 50%, 40%, and 30% by product dimensions (a+b+h).

Table 4. Product size and optimal packaging size calculated based on a packaging space ratio of P = 40% (R = 1.0, y = 1.5273x)

제품크기(a + b + h) 범위 (mm)	PB 포장재 크기(A+B, R = 1.0) (mm)
400-460	700
460-530	800
530-590	900
590-660	1000
660-720	1100
720-790	1200
790-860	1300
860-920	1400
920-990	1500
...	...

다시말해, 포장 표준화 및 물류 표준화 등을 통해 얻을 수 있는 유통의 전과정에서의 환경적 이득을 고려해야 할 필요가 있기 때문이다.

1.2. 산출된 최소 포장 치수(P=40% R=1.0)를 R=1.3 포장재 치수에 대응한 제품 크기로의 변환

앞서 1.1항의 Table 4에서 산출된 제품 크기 수치는 포장재 가로 및 세로 치수 비율이 A:B=1:1, 즉 B/A=1 (R=1)일 기준으로 계산한 값이다. 그러나 실제 산업현장에서 사용하고 있는 연성 포장재 치수 비율은 R=1.3-1.6 사이에서 많이 사용되고 있다. 따라서, 실제 사용되고 있는 포장재의 치수 비율을 반영하여 제품 크기 범위를 재산출할 필요가 있으며, 이를 위해 여기서는 R=1.3을 적용하고자 한다. 왜냐하면, R값이 높을수록 동일한 포장기준 및 동일한 제품 크기에 대해 더 큰 포장재 사용이 가능하게 되므로, 폐기물 감량화를 고려하여 산업현장에서 쓰이는 연성 포장재 가로.세로 비율(R=A/B) 중 가급적 낮은 값을 적용하고자 하였다.

먼저, Table 3에 산출된 포장공간비율 P=40%에서의 제품 크기별 포장재 크기의 값들은 R=1.0으로 계산된 값들이므로 이 값들을 R=1.3 (A:B=1:1.3)로 적용하여 다시 포장공간비율을 산출하면, Table 5에 나타난 바와 같이 P'=36.6%(약 37%)가 된다. 이 경우 포장재 축소에 따른 제품의 봉입성 저하 등 산업계 현장 특성을 최대한 반영할 수 있도록 다시 P'=40%로 환산함으로써 정책과의 이해 충돌을 최소화하고자 하였다. 이를 위해 식 (5)로부터 포장공간비율 P=40%, A, B=1.3A, a=b=h 각각 대입하면 다음과 같다.

$$40 = \left(1 - \frac{h^3}{(A-h) \times (1.3A-h) \times h}\right) \times 100 \quad (9)$$

A 또는 h에 대해 정리하면,

$$0.75A^2 + 1.38hA - 0.4h^2 = 0 \quad (10)$$

이 방정식으로부터 근의 공식을 이용하여 다음과 같이 A 또는 h 값을 구할 수 있다.

$$A = \frac{-1.38h \pm \sqrt{(1.38h)^2 - 4 \times 0.78 \times (-0.4h^2)}}{2 \times 0.78} \quad (11)$$

$$h = \frac{-1.38A \pm \sqrt{(1.38A)^2 - 4 \times 0.4 \times (-0.78A^2)}}{2 \times 0.4} \quad (12)$$

여기서는 포장 표준화 도모를 위해 포장재 크기는 고정하고 제품의 크기를 조정하도록 식 (12)를 사용하였고, 포장재 가로.세로 비율 R=1.3 포장재를 적용하여 포장공간비율 P=40%를 만족하게 하는 최대 제품체적(=정육면체)의 치수 합(제품 크기, a'+b'+h'=3h')를 구하여 Table 6에 나타내었다.

Table 6에서 살펴보면, 포장재 치수 비율 R=1.0에서의 제품 크기(치수 합 = a + b + h = 3h)가 R=1.3에 대응하여 조정된 제품크기(a' + b' + h' = 3h')에 비해 약 1.5% 정도 감소되는 것을 확인 할 수 있고, 여기에 나타난 포장재 크기와 조정 산출된 최대 제품크기(a' + b' + h' = 3h') 값들로부터 추세선을 도출하여 Fig. 4와 같이 추정 가능한 조정 함수값을 도출하였다.

따라서, 최종적으로 이 추정 함수 즉, 제품 크기별(a + b + h) 포장공간비율 P=40%를 만족하는 최소 PB 포장재 (R=1.3) 크기 추정 함수 y=1.5508x (무시 가능한 값으로 소수점 이하 생략)를 활용하여, Table 7에 나타난 바와 같이 특정 포장재 크기에 대한 적정 제품 크기의 범위 산출하였다.

2. 기존 포장공간비율 측정방법과 대체 방법(PB포장재 크기별 봉입 제품크기 제한법)의 동등성 및 유효성 비교 분석

택배용 플라스틱 비닐 포장재의 현행 포장공간비율 측정 방법과 본 연구에서 제시한 포장 표준화를 고려한 'PB 포

Table 5. Packaging space ratio when applying a dimension ratio of R=1.3 to the minimum packaging size(with R=1.0) meeting P=40%

제품 크기별 최대 체적(=정육면체) 치수 합 (a+b+h, by a=b=h) (mm)	포장공간비율 P=40%에 대한 최소 포장 크기 (A+B, by A=B, R=1.0) (mm)	동일 포장 크기에 대한 R=1.3 포장재 치수 (mm)		R=1.3을 적용한 포장공간비율 (P') (%)
	A+B	A'	B' (=1.3A')	1-V/C
300	458.2	199.2	259.0	36.6
330	504.0	219.1	284.9	36.6
360	549.8	239.1	310.8	36.6
390	595.7	259.0	336.7	36.6
420	641.5	278.9	362.6	36.6
...

Table 6. Sum of dimensions ($a'+b'+h'=3h'$) of the maximum product volume (=cube) satisfying $P'=40%$ at the same packaging size with $R=1.3(A:B=1:1.3)$ based on the packaging space ratio $P=36.6%$ calculated by product size in Table 5

제품 크기별 최대 체적 (=정육면체) 치수 합 ($a+b+h$, by $a=b=h$) (mm)	R=1.0, P=40% 최소 포장재 크기 (A+B, by A=B, R=1.0) (mm)	동일 크기에 대한 R=1.3 포장재 치수 및 크기 (mm)			R=1.3, P'=40%를 만족하는 최대 제품 크기 ($a'+b'+h'$, by $a'=b'=h'$) (mm)
	A+B	A'	B' (=1.3A')	A'+B'	3×h'
300	458.2	199.2	259.0	458.2	295.5
330	504.0	219.1	284.9	504.0	325.0
360	549.8	239.1	310.8	549.8	354.6
390	595.7	259.0	336.7	595.7	384.1
420	641.5	278.9	362.6	641.5	413.6
450	687.3	298.8	388.5	687.3	443.2
480	733.1	318.7	414.4	733.1	472.7
525	801.8	348.6	453.2	801.8	517.1
570	870.6	378.5	492.1	870.6	561.4
600	916.4	398.4	518.0	916.4	590.9
645	985.1	428.3	556.8	985.1	635.2
690	1053.9	458.2	595.7	1053.9	679.6
735	1122.6	488.1	634.5	1122.6	723.9
780	1191.3	518.0	673.4	1191.3	768.2
840	1283.0	557.8	725.1	1283.0	827.3
900	1374.6	597.7	776.9	1374.6	886.4
990	1512.1	657.4	854.6	1512.1	975.0
1080	1649.5	717.2	932.3	1649.5	1063.7
1170	1787.0	776.9	1010.0	1787.0	1152.3
...

< 포장재 가로 : 세로 비율 R=1.3 적용 & P=40% 변환 >

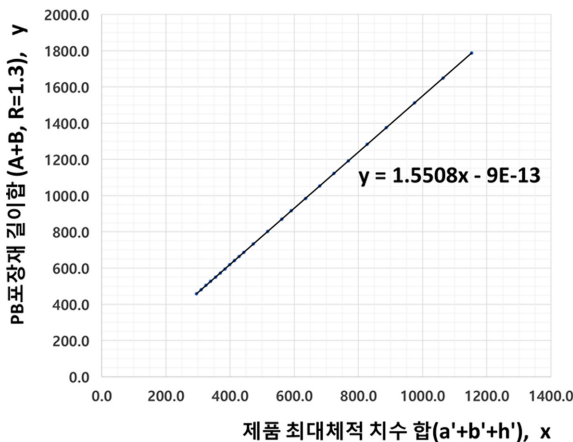


Fig. 4. Estimation function for the minimum PB packaging size (to R=1.3) satisfying a packaging space ratio of P = 40% by product dimensions ($a + b + h$).

장재 크기별 봉입 제품 크기 제한범' 사이의 동등성 분석을 통해 실제 정책적 활용의 유효성을 검증하고자 하였다. 실제 사용 사례를 가정하여, Table 7로부터 특정 PB 포장

Table 7. Product size and optimal packaging size calculated based on a packaging space ratio of P = 40% ($R = 1.3$, $y = 1.5508x$)

제품크기($a+b+h$) 범위 (mm)	PB 포장재 크기(A+B, R=1.3) (mm)
320 초과-390 이하	600 이하
390 초과-450 이하	700 이하
450 초과-520 이하	800 이하
520 초과-580 이하	900 이하
580 초과-650 이하	1000 이하
650 초과-710 이하	1100 이하
710 초과-780 이하	1200 이하
780 초과-840 이하	1300 이하
840 초과-900 이하	1400 이하
900 초과-970 이하	1500 이하
...	...

재 크기(800 mm, R = 1.3)에 대하여 제품 크기를 상위값(520 mm), 중간값(485 mm), 하위값(450 mm)으로 구분하고, 다시 3가지 유형에서 제품체적을 a, b, h의 치수 변화에

따라 대형(정육면체, $a=b=h$), 중형, 소형으로 구분한 후, 각각 수치를 대입하여 상호 포장공간비를 결과값을 확인함으로써 비교·분석하였다.

앞서 'PB 포장재 크기별 봉입 제품 크기 제한법'을 설계 시에 언급한 바와 같이 현행의 포장공간비율 기준 50%이하 준수를 원칙으로, 최대 제품 크기(대형)의 상위값은 $P=40\%$, 하위값은 $P=60\%$ 으로 산출하였기에 이들은 상호 상쇄되는 수준을 확인할 수 있었다. 더욱이 제품의 수가 많아 질수록 궁극적으로는 중간값에 수렴할 것이므로 이는 기준 $P=50\%$ 수준을 유지할 것으로 판단된다. 다만, 제품 크기의 범위에 있어서 상위값, 중간값, 하위값에 있는 각각의 제품들의 다양한 치수 변화(중형, 소형)에 따라 제품체적 감소 및 포장공간비를 산출값이 상승하여 현행 포장기준 ($P=50\%$)을 초과하는 결과를 보여주고 있다. 이는 기준에도 제기되었던 문제이며, 개선 방안 및 대체 방법 설계시 이미 '포장 표준화'를 통한 물류 효율화 및 환경부하 저감이라는 거시적 관점에서 제품 크기의 다양한 변형 치수에 의한 체적 변화 및 포장공간비율 변화는 무시하는 것으로 제안했던 사안이다. 그러므로, 제품크기 하위값에서의 소형 제품들이 현행 포장공간비율 기준을 초과할지라도, 궁극적으로는 포장 표준화 및 물류 표준화 등을 통해 실제 산업 현장에서 얻을 수 있는 유통의 전과정에서의 환경적 이득을 고려해야 할 필요가 있다.

추가적으로, Table 7은 앞서 언급했듯이 PB 포장재의 가로/세로 비율이 $R=1.3$ 을 기준으로 한 보수적 설계 및 산출값으로 대부분 $R=1.4$ 이상이 많이 사용되고 있는 실제 산업계 현실을 반영하면, $R=1.3$ 일 때 보다 포장재 면적이 작아지므로 실제로는 추가적인 감량화 효과가 있을 수 있다.

고 찰

택배용 플라스틱 필름 포장재(PB, Plastic Bag)에 대한 기존 포장공간비율 측정 방법을 보완하고 대체하는 방법으

로 'PB 포장재 크기별 봉입 제품 크기 제한법'을 제안 (Table 7)하였고, 정책적 활용 가능성을 확인하였다. 기존 포장공간비율 및 포장 기준 적용 대체 방법으로서의 장점은 1) 기존 포장공간비를 산출식과 방법을 그대로 활용함으로써 규제의 일관성 유지, 2) 산업계에서의 규격화 포장 사용에 따른 다양한 치수 제품의 봉입에 의한 부득이한 과대포장을 방지, 3) 궁극적으로 산업계 정착이 되면 포장 표준화 유도는 물론 물류 효율화에도 기여할 것으로 판단된다.

유통 및 유품 산업계에서는 포장 자동화 공정이 적극적으로 도입되고 있는 상황에서, 택배용 PB 포장재에 제품 자동 봉입 및 자동 쉐어링 공정에서 발생하는 부득이한 포장 공간이나 면적을 고려할 필요가 있으므로, 향후 필요공간용적에 대해 추가적인 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 탄소중립 정책포털(<https://www.gihoo.or.kr/menu>), 탄소중립/온실가스 감축목표(NDC) & 온실가스 감축시책
2. Jae Young Oh, Mijin Lim et al., 2020, A Study on Adaptability of Returnable Transport Packagings in the Parcel Delivery Service by e-commerce, J. Korea Soc. Packaging Sci. & Tech. Vol. 26, No. 2 : 99-103.
3. 생활물류통계 년도별 생활물류실적, 국가물류통합정보센터 (<https://www.nlic.go.kr/nlic/parcelServiceLogistics.action>)
4. Jae Young Oh, Hyun Jun Jo et al., 2019, A Study on the Waste Reduction of Parcel Delivery Packaging, J. Korea Soc. Packaging Sci. & Tech. Vol. 25, No. 2 : 1-7.
5. 한국건설생활환경시험연구원, 2018, 과대포장 방지를 위한 실태조사 및 적정기준 마련 연구, 환경부.
6. 제품의 포장재질·포장방법에 관한기준 등에 관한 규칙, 2025, 법제처 법령정보센터.
7. 제품의 포장재질 및 포장방법에 대한 간이측정방법 [별표 3], 2025, 환경부 고시 제2025-165호.
8. 재활용 폐기물 종합관리 대책, 2018.05.10., 환경부.

투고: 2026.02.01 / 심사완료: 2026.04.21 / 게재확정: 2026.04.21

The Role of Palladium Carbon Quantum Dots on UV-Blocking and Antibacterial Properties of PVA Nanocomposite Films for Food Packaging

Mohammadreza Jozaghkar, Sehyun Jin, Jamilur R. Ansari, and Jongchul Seo*

Department of Packaging, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Kangwon-do, 26493, South Korea

Abstract The development of sustainable and active food packaging materials with multifunctional properties has become increasingly important to enhance food safety and extend shelf life. In this study, palladium-based carbon quantum dots (PQDs) were synthesized via a combined reduction–hydrothermal approach and incorporated into a poly(vinyl alcohol) (PVA) matrix to fabricate multifunctional nanocomposite films. The incorporation of PQDs significantly improved the functional performance of PVA films. UV–Vis analysis revealed excellent ultraviolet shielding, achieving nearly complete blocking in the UV-B region and approximately 90% attenuation in the UV-A region, while maintaining high transparency (>95%) in the visible range. X-ray diffraction results indicated a slight increase in crystallinity without disrupting the intrinsic semi-crystalline structure of PVA. The oxygen transmission rate (OTR) decreased markedly from 5.54 to 0.86 cc/m²-day with increasing PQD content, demonstrating enhanced barrier performance due to the formation of a tortuous diffusion pathway and improved structural ordering. Furthermore, the nanocomposite films exhibited strong antibacterial activity against both *S. aureus* and *E. coli*, with inhibition zones increasing in a concentration-dependent manner. Notably, an inhibition zone of 19.1 mm and 21.9 mm against *S. aureus* and *E. coli*, respectively, was achieved at only 1.0 wt.% PQDs, indicating superior antibacterial efficiency at relatively low filler loadings. The developed PVA/PCQD nanocomposite films demonstrate a unique combination of high transparency, effective UV shielding, improved oxygen barrier properties, and strong antibacterial activity. These findings highlight their potential as advanced, eco-friendly materials for active food packaging applications.

Keywords Palladium Carbon Quantum Dots, Polyvinyl alcohol, Antimicrobial Packaging, Multifunctional Packaging, UV Shielding

Introduction

The widespread use of petroleum-based packaging materials has undeniably improved food preservation and distribution; however, their persistence in the environment has led to severe ecological challenges, particularly long-term plastic accumulation (S. M. Jalilian et al., 2023; Jozaghkar et al., 2026b; M. R. Jozaghkar et al., 2019; Mirtaleb et al., 2025). This growing environmental burden has accelerated the search for sustainable, biodegradable, and high-performance alternatives capable of meeting the functional demands of modern food packaging systems (Jozaghkar et al., 2026a; M. R. Jozaghkar et al., 2022). Among the various candidates, poly(vinyl alcohol) (PVA) has emerged as a promising biodegradable polymer owing to its excellent film-forming abil-

ity, transparency, biocompatibility, and superior oxygen-barrier properties. Nevertheless, the intrinsic hydrophilicity of PVA, along with its limited resistance to ultraviolet (UV) radiation and lack of inherent antimicrobial activity, significantly restricts its practical application in active food packaging (Jailani et al., 2026; Saeed and Abdulwahed, 2024).

To address these limitations, the incorporation of functional nanomaterials into polymer matrices has gained considerable attention as an effective strategy to enhance physicochemical and biological properties. In this context, carbon quantum dots (CQDs) have emerged as a versatile class of zero-dimensional nanomaterials, characterized by their small size, large surface area, tunable surface functionalities, and optical properties. CQDs are particularly attractive for food packaging applications due to their excellent dispersibility within polymer matrices, ability to improve UV-shielding performance, and potential antimicrobial activity. Furthermore, their surface chemistry can be readily engineered or doped with heteroatoms or metals to tailor their functionality for specific applications (Gholizadeh et al., 2026; Mahmood et al., 2021; Qiang

*Corresponding Author: Jongchul Seo
Department of Packaging, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Kangwon-do, 26493, South Korea
Tel: +82-31-760-2697
E-mail: jseo@yonsei.ac.kr

et al., 2020).

Recent advances have highlighted that metal-doped CQDs exhibit significantly enhanced functional properties compared to their undoped counterparts. In particular, palladium (Pd), a noble metal known for its catalytic activity and antimicrobial potential, offers a unique opportunity to engineer CQDs with improved bioactivity and UV-blocking efficiency. Palladium-based carbon quantum dots (PQDs) can introduce additional active sites, facilitate reactive oxygen species (ROS) generation, and disrupt microbial cell membranes, thereby enhancing antibacterial performance. Simultaneously, the incorporation of Pd can modify the electronic structure of CQDs, leading to improved light absorption and UV-shielding capabilities, which are critical for protecting food products from photo-induced degradation (Tang *et al.*, 2025; You *et al.*, 2021).

Despite these promising attributes, the integration of PQDs into biodegradable polymer matrices for food packaging applications remains largely unexplored. Most existing studies have focused on pristine CQDs or other nanofillers such as metal oxides, graphene derivatives, or cellulose-based nanomaterials, often achieving improvements in isolated properties but lacking a balanced enhancement of UV protection, antimicrobial activity, and barrier performance (Elugoke *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2019; Qurtulen *et al.*, 2026). Moreover, the potential synergistic effects between PQDs and PVA in creating multifunctional nanocomposite films have not been systematically investigated.

Therefore, this study aims to develop and evaluate multifunctional PVA-based nanocomposite films incorporating palladium-doped carbon quantum dots. It is hypothesized that the incorporation of PQDs will not only improve the UV-blocking performance of PVA films but also impart strong antibacterial activity against common foodborne pathogens, while maintaining desirable mechanical and barrier properties. To validate this hypothesis, nanocomposite films with varying PQD loadings were fabricated and comprehensively characterized in terms of their structural, optical, thermal, mechanical, and antimicrobial properties. The findings of this work are expected to provide new insights into the design of advanced, eco-friendly, and active packaging materials for sustainable food preservation.

Materials and Methods

1. Materials

Poly(vinyl alcohol) (PVA, degree of hydrolysis ~98-99%) and poly(vinyl pyrrolidone) (PVP, $M_w \approx 40,000$) were purchased from Sigma-Aldrich (USA). Palladium powder (Pd, $\geq 99.9\%$) was obtained from Alfa Aesar (USA). Sodium borohydride (NaBH_4 , $\geq 98\%$) was supplied by Daejung Chemicals (South Korea). All chemicals were used as received without further purification. Deionized (DI) water was used

throughout all experiments.

2. Synthesis of PQDs

PQDs were synthesized via a combined chemical reduction and hydrothermal approach. Initially, a poly(vinyl pyrrolidone) (PVP) solution (0.05 M) was prepared by dissolving an appropriate amount of PVP in 100 mL of distilled water under magnetic stirring until a clear homogeneous solution was obtained. Subsequently, 5 mL of the prepared PVP solution was withdrawn and used as the solvent medium for further reactions.

For the preparation of the palladium precursor solution, palladium powder (corresponding to a concentration of 0.05 M) was dispersed into 95 mL of the previously prepared PVP solution and stirred continuously to ensure uniform distribution. In parallel, a reducing agent solution was prepared by dissolving 3.78 mg of sodium borohydride (NaBH_4) in the 5 mL aliquot of PVP solution. The reduction process was initiated by adding the freshly prepared NaBH_4 solution dropwise into the palladium precursor solution under constant stirring. The reaction mixture was maintained at 80°C for 3 h to facilitate the reduction of Pd ions and the formation of Pd-based nanostructures.

Following the reduction step, the resulting dispersion was transferred into a Teflon-lined stainless-steel autoclave and subjected to hydrothermal treatment at an elevated temperature (160°C) for 3 h. After completion of the hydrothermal process, the autoclave was allowed to cool naturally to room temperature. The obtained dark-colored solution was centrifuged at high speed (15,000 rpm) for 20 min to remove larger particles and impurities. The supernatant containing PQDs was collected and further purified, if necessary, via dialysis or filtration. The obtained PQDs were readily dispersible in water, forming a stable and homogeneous colloidal solution without visible aggregation. Finally, the purified PQDs were stored at 4°C for subsequent characterization and incorporation into PVA nanocomposite films.

3. Preparation of PVA/PQDs Films

A 10 wt.% aqueous poly(vinyl alcohol) (PVA) solution was prepared by dissolving PVA powder in distilled water at 90°C under continuous magnetic stirring for 1 h until a clear and homogeneous solution was obtained. The solution was then cooled to room temperature prior to further use. The PQD suspension was subsequently added to the PVA solution at different loadings (0.1, 0.5, 0.7, and 1.0 wt.% relative to the weight of PVA). The mixtures were stirred continuously for 2 h to achieve a homogeneous distribution of PQDs within the polymer matrix. The prepared nanocomposite solutions were cast onto clean, leveled glass plate and dried in a controlled environment at $40\text{--}50^\circ\text{C}$ for 48 h to allow slow solvent evaporation and uniform film formation. After drying, the films

were carefully peeled off and conditioned at 25°C and 50% relative humidity for at least 48 h prior to characterization.

The thickness of the obtained films was measured using a digital micrometer at five different random positions, and the average thickness was found to be in the range of approximately 90-100 μm . The selected PQD loading range was designed to investigate the concentration-dependent effects on the optical, antibacterial, and barrier properties of the films while minimizing the risk of nanoparticle agglomeration at higher concentrations.

4. Characterization

The morphology and size distribution of the synthesized PQDs were examined using transmission electron microscopy (TEM) (JEM-2100F, JEOL). For sample preparation, a dilute dispersion of PQDs was drop-cast onto a carbon-coated copper grid and allowed to dry naturally at room temperature prior to imaging.

The chemical structure and intermolecular interactions of the films were analyzed using attenuated total reflection Fourier-transform infrared (ATR-FTIR) spectroscopy (Perkin-Elmer Frontier FTIR). Spectra were collected over the wavenumber range of 4000-400 cm^{-1} with 64 scans at a suitable resolution, using air as the background reference.

Crystalline characteristics of the prepared films were investigated by X-ray diffraction (XRD) analysis using a Rigaku diffractometer (Ultima IV) with Cu K α radiation ($\lambda = 0.154$ nm). The diffraction patterns were recorded over an appropriate 2θ range, and the intensities were normalized to enable comparison between samples.

Mechanical properties, including tensile strength and elongation at break, were determined using a universal testing machine (UTM, Qmesys Co., South Korea) under standard testing conditions.

The oxygen barrier performance of the films was evaluated by measuring the oxygen transmission rate (OTR) using an

OX-TRAN 702 system (MOCON, USA). Film thickness was measured at multiple points using a digital thickness gauge, and the average value was used for calculations.

The antibacterial activity of the nanocomposite films was assessed against *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) following a disk diffusion method based on JIS Z 2801:2010. A bacterial suspension equivalent to 0.5 McFarland standard (approximately 1×10^8 CFU/mL) was prepared and uniformly spread onto tryptic soy agar plates. Sterilized circular film specimens (25 mm in diameter) were then placed onto the inoculated agar surface and incubated at 37°C for 24 h. After incubation, the diameter of the inhibition zones formed around the samples was measured using a digital caliper. All experiments were conducted in triplicate, and the results were expressed as mean values with corresponding standard deviations.

5. Statistical Analysis

All experiments were performed in triplicate, and the results are presented as mean \pm standard deviation (SD). Statistical analysis was carried out using OriginPro (OriginLab Corporation, USA). Differences between samples were evaluated using one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's post hoc test to determine significant differences between groups. A p-value of less than 0.05 ($p < 0.05$) was considered statistically significant.

Results and Discussion

1. Morphological Analysis of the Synthesized PQDs

The structural features and morphology of the synthesized PQDs were investigated using transmission electron microscopy (TEM) and high-resolution TEM (HR-TEM). As illustrated in Figure 1a, the PQDs exhibited a well-dispersed, nearly spherical morphology with good uniformity, indicating effective control over particle formation during synthesis. The good aqueous dispersibility of PQDs facilitates their uniform

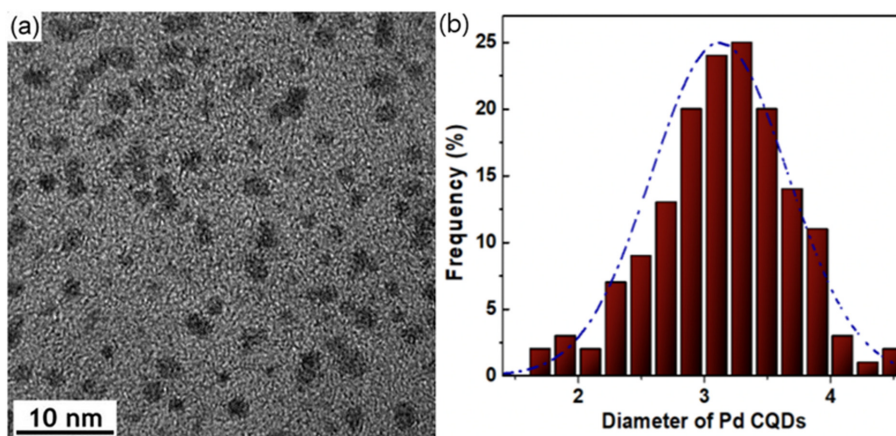


Fig. 1. (a) TEM of PQDs with 10 nm magnification and (b) particle size distribution histogram

distribution within the PVA matrix, contributing to improved optical and barrier properties.

Detailed structural analysis using HR-TEM revealed distinct lattice fringes with an interplanar spacing of approximately 0.21 nm, which can be attributed to the graphitic carbon structure, along with the possible contribution of palladium incorporation within the carbon matrix. The particle size distribution histogram (Figure 1b) demonstrates that the PQDs are predominantly below 10 nm in diameter, with an average particle size in the range of 3–4 nm. This narrow size distribution highlights the successful synthesis of nanoscale quantum dots with controlled dimensions, which is beneficial for enhancing their optical and antibacterial properties (Azam *et al.*, 2021; Liu *et al.*, 2025; Setianto *et al.*, 2024).

2. Structural Analysis of PVA/PQD Nanocomposite Films

Figure 2 illustrates the FTIR spectra of pristine PVA and PVA/PQD nanocomposite films containing different PQD loadings (0.1, 0.5, 0.7, and 1.0 wt.%). The spectra were collected over the wavenumber range of 4000–500 cm^{-1} . All samples display the typical absorption features of PVA, including a broad band centered around 3300 cm^{-1} , which is attributed to O–H stretching vibrations associated with strong intermolecular and intramolecular hydrogen bonding. The peaks observed near 2940 cm^{-1} and 2850 cm^{-1} correspond to asymmetric and symmetric stretching vibrations of C–H groups, while the band at approximately 1430 cm^{-1} is assigned to CH_2 bending. Additionally, the peak located around 1090 cm^{-1} is characteristic of C–O stretching vibrations within the polymer backbone. Upon incorporation of PQDs, noticeable yet subtle modifications in the spectral features are observed. In particular, the O–H stretching band becomes broader and slightly more intense with increasing PQD content, indicating strengthened hydrogen-bonding interactions between the hydroxyl groups of PVA and the oxygen-containing functional

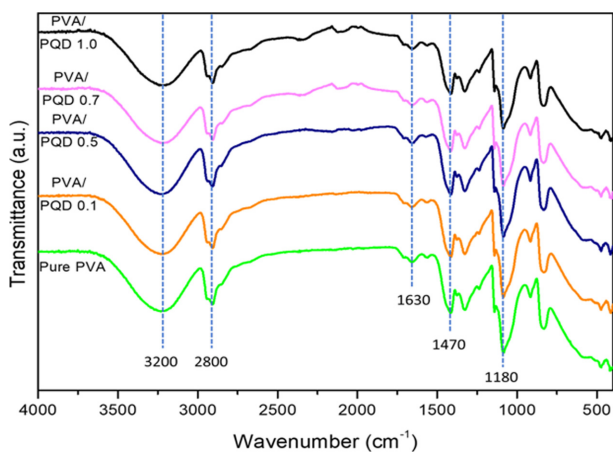


Fig. 2. FT-IR spectra of PVA/PQDs nanocomposite films.

groups present on the surface of PQDs. Furthermore, minor changes in the intensity of bands associated with C–O and C=O vibrations suggest the contribution of surface functionalities of the PQDs, such as hydroxyl, carbonyl, and carboxyl groups.

No significant shift or emergence of distinct new peaks related to palladium species is observed, likely due to their low concentration and uniform dispersion within the polymer matrix. However, the absence of major spectral changes and the preservation of the characteristic PVA peaks confirm good compatibility between PVA and PQDs. These results indicate that the nanofillers are well incorporated into the polymer network without disrupting its fundamental chemical structure, while promoting intermolecular interactions that are beneficial for enhancing film properties (M. Jalilian *et al.*, 2023; M. Jozaghkar *et al.*, 2022, 2019; Mohammad Jozaghkar and Ziaee, 2024; Mohammadreza Jozaghkar and Ziaee, 2024; Kim *et al.*, 2025).

3. Optical Properties and UV-Blocking Performance

The UV–Vis transmittance spectra of pure PVA and PVA/PQD nanocomposite films with varying PQD loadings are presented in Figure 3. The spectra were recorded over the wavelength range of 200–800 nm to evaluate the optical transparency and UV-shielding capability of the films. Pure PVA exhibited high transparency across the entire visible region, with transmittance approaching ~100% at 660 nm, indicating its excellent optical clarity but poor resistance to ultraviolet radiation. In contrast, the incorporation of PQDs significantly reduced transmittance in the UV region (200–400 nm), demonstrating enhanced UV-blocking performance. Notably,

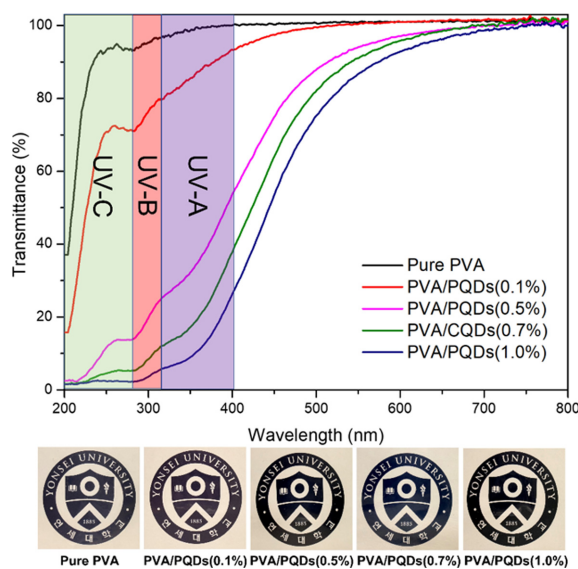


Fig. 3. (a) UV-spectra and (b) appearance of PVA/PQDs nanocomposite films.

the nanocomposite films achieved nearly complete blocking in the UV-B region (280–315 nm) and substantial attenuation in the UV-A region (315–400 nm), with blocking efficiency reaching approximately 90% at higher PQD loadings.

The improvement in UV-shielding behavior can be attributed to the strong absorption characteristics of PQDs, which arise from π - π^* transitions of the carbon core and possible n - π^* transitions associated with surface functional groups. Additionally, the presence of palladium species may contribute to enhanced photon absorption and scattering, further improving the UV-blocking efficiency of the films. As the PQD content increased from 0.1 to 1.0 wt.%, a gradual decrease in transmittance within the UV region was observed, indicating a concentration-dependent enhancement in UV protection. Despite this reduction in UV transmittance, the films maintained high transparency in the visible region. Specifically, the transparency at 660 nm remained above 95% even at the highest PQD loading, suggesting that the incorporation of PQDs does not significantly compromise the optical clarity of the films. This balance between excellent UV-blocking capability and high visible light transparency is particularly advantageous for food packaging applications, where protection against photo-induced degradation must be achieved without sacrificing product visibility. The results confirm that PQDs act as effective multifunctional nanofillers, enabling the development of advanced packaging materials with improved light-barrier properties.

The significant achievement in this study is achieving stunning UV-A blocking in very low PQDs concentration among other reported studies. For instance, our previous study showed that PVA nanocomposites based on tea leaf-derived CQDs showed that UV-A blocking can be achieved at CQDs concentrations higher than 1.0 wt. %. Moreover, maximum UV-A blocking was observed for the sample containing 3.0 wt.% of CQDs around 70 %. While current project demonstrates that 90% UV-A blocking can be achieved by just 0.1 wt. % of PQDs. Table 1 clearly compares current data with our previous studies (Ansari et al., 2025a; Department of Packaging & Logistics, Yonsei University et al., 2025).

4. XRD analysis of PVA/PQDs nanocomposite films

The X-ray diffraction patterns of neat PVA and PVA/PQDs nanocomposite films with different PQD loadings are shown

in Figure 4. The measurements were carried out over a 2 θ range of 3°–60° to examine the structural organization and crystallinity of the films. Pure PVA displays a characteristic broad diffraction peak centered at approximately 19.5°, which is commonly associated with its semi-crystalline nature, arising from the partial ordering of polymer chains embedded within an amorphous matrix. This broad feature reflects the dominance of disordered regions alongside limited crystalline domains.

Upon incorporation of PQDs, the overall diffraction profile remains largely unchanged, with the main peak at ~19.5° clearly retained in all nanocomposite samples. This indicates that the fundamental crystalline structure of PVA is preserved after the addition of PQDs. However, a gradual increase in peak intensity is observed with increasing PQD content, suggesting a slight enhancement in the degree of crystallinity. This behavior can be attributed to the nucleating effect of PQDs, which may promote more ordered packing of PVA chains during film formation. No additional sharp diffraction peaks corresponding to crystalline palladium or separate PQD phases are detected, which can be explained by their low concentration and homogeneous dispersion within the polymer matrix. This absence of distinct secondary phases confirms that the PQDs are well integrated into the PVA network without phase separation or aggregation (El-Shamy and Zayied, 2020; Gupta et al., 2009; Latif et al., 2024).

5. Oxygen barrier performance of PVA/PQDs nanocomposite films

The oxygen transmission rate (OTR) of pure PVA and PVA/PQDs nanocomposite films is summarized in Table 2. The films exhibited comparable thicknesses in the range of approximately 97–99 μ m, ensuring reliable comparison of barrier performance across all samples. Pure PVA showed an OTR value of 5.54 ± 0.8 cc/m²-day, indicating moderate resistance to oxygen permeation, which is typical for hydrophilic, semi-crystalline polymers. Upon incorporation of PQDs, a substantial decrease in OTR was observed, demonstrating a clear improvement in oxygen barrier properties. Specifically, the OTR decreased to 1.84 ± 0.3 , 1.23 ± 0.3 , 1.08 ± 0.2 , and 0.86 ± 0.1 cc/m²-day for PQD loadings of 0.1, 0.5, 0.7, and 1.0 wt.%, respectively. This progressive reduction in oxygen permeability with increasing PQD content suggests a strong

Table 1. Comparison of UV-blocking performance of this study with our previous studies related to PVA/CQDs nanocomposite films

System	Optimum percentage (wt.%)	UV-Blocking Performance	Reference
PVA/PQDs	1	UV-A blocking (>90%)	This study
PVA/Tea Leaf-CQDs	3	UV-A blocking (~70%)	(Department of Packaging & Logistics, Yonsei University et al., 2025)
PVA/N-doped CQDs	1	UV-C blocking	(Kim et al., 2025)
PVA/Ag-NCQDs	1	UV-B blocking	(Ansari et al., 2025a)

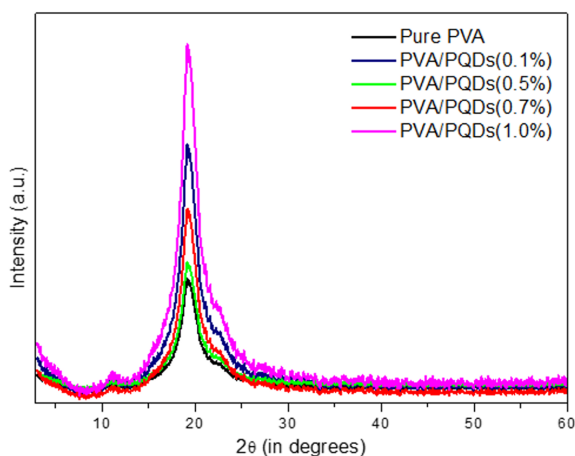


Fig. 5. XRD graph of PVA/PQDs nanocomposite films.

concentration-dependent barrier enhancement. The improvement can be primarily attributed to the homogeneous dis-

Table 2. Film thickness, crystallinity degree, and oxygen barrier characteristics of PVA/PQDs nanocomposite films

	Film Thickness (mm)	Crystallinity (X_c , %)	OTR ($\text{cc}/\text{m}^2\cdot\text{day}$)
Pure PVA	97 ± 1	28.6 ± 0.3	5.54 ± 0.8
PVA/PQDs (0.1%)	99 ± 2	29.7 ± 0.5	1.84 ± 0.3
PVA/PQDs (0.5%)	99 ± 1	30.9 ± 0.5	1.23 ± 0.3
PVA/PQDs (0.7%)	98 ± 2	31.8 ± 0.6	1.08 ± 0.2
PVA/PQDs (1.0%)	97 ± 3	32.9 ± 0.7	0.86 ± 0.05

*Values are expressed as mean standard deviation ($n = 3$)

persion of PQDs within the PVA matrix, which introduces a more tortuous diffusion pathway for oxygen molecules. As a result, gas molecules must travel a longer and more complex route through the film, effectively reducing their transmission rate.

In addition, the slight increase in the degree of crystallinity (X_c) observed with higher PQD incorporation may further contribute to the enhanced barrier performance. Increased crystallinity typically reduces the free volume within the polymer matrix, limiting the mobility of gas molecules and thereby improving resistance to permeation. The minimal variation in film thickness among the samples indicates that thickness effects on OTR are negligible, and the observed improvements are mainly due to structural modifications induced by PQDs. Overall, these findings demonstrate that the incorporation of PQDs significantly enhances the oxygen barrier properties of PVA films, making them promising candidates for active food packaging applications where controlled oxygen permeability is essential for extending product shelf life (Ansari *et al.*, 2025b; Chen *et al.*, 2020; Oh *et al.*, 2024).

6. Antibacterial Performance

The antibacterial performance of pure PVA and PVA/PQDs nanocomposite films was evaluated against both Gram-positive (*S. aureus*) and Gram-negative (*E. coli*) bacteria using the disk diffusion method. The quantitative measurements and example qualitative inhibition zones and corresponding quantitative measurements are presented in Figure 4. Pure PVA films exhibited negligible antibacterial activity against both tested strains, as evidenced by the absence of a clear inhibition zone, confirming that PVA itself does not possess inherent antimicrobial properties. In contrast, the incorporation of PQDs resulted in a significant improvement in antibacterial

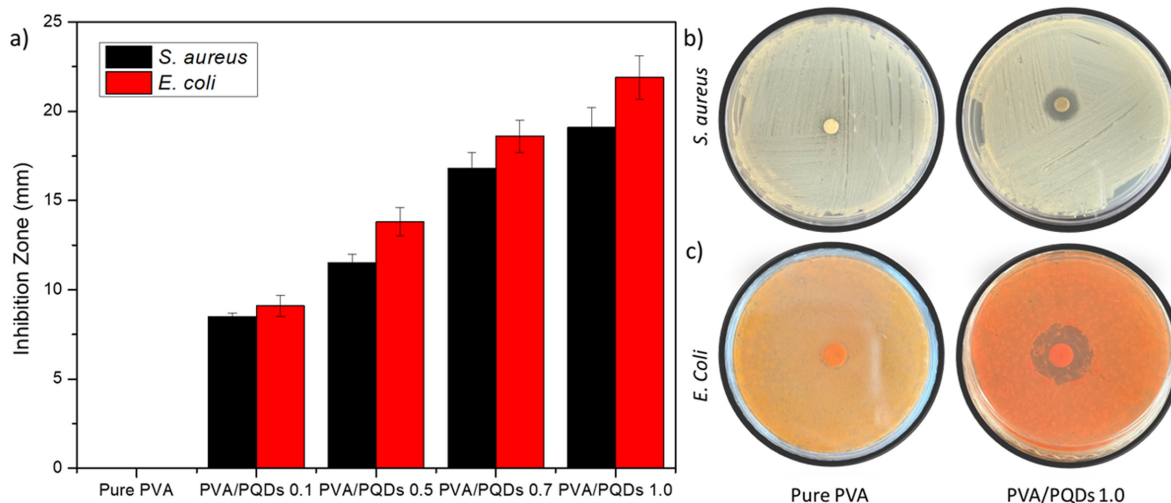


Fig. 5. Antibacterial activity of PVA/PQDs nanocomposite films: a) quantitative measurements, b and c) qualitative measurements for pure PVA and PVA/PQDs (1.0%) in *S. aureus* and *E. coli*, respectively. Error bars represent standard deviation from three independent measurements ($n = 3$).

Table 3. Comparison of antibacterial activity against *S. aureus* between two different CQD-based systems

System	CQDs Concentration	Inhibition Zone (mm)	Reference
PVA/PQDs	0.1	8.5 ± 0.2	This study
	0.5	11.5 ± 0.5	
	0.7	16.8 ± 0.9	
	1	19.1 ± 1.1	
PVA/Tea Leaf-CQDs	0.5	11.4	(Department of Packaging & Logistics, Yonsei University et al., 2025)
	1.0	12.9	
	2.0	16.8	
	3.0	20.5	

*Values are expressed as mean standard deviation (n = 3)

performance, with clear inhibition zones observed around the nanocomposite films.

As the PQD loading increased from 0.1 to 1.0 wt.%, the diameter of the inhibition zones progressively enlarged for both *S. aureus* and *E. coli*, indicating a concentration-dependent antibacterial effect. At the highest loading (1.0 wt.%), the inhibition zones reached approximately 19.1 ± 1.1 mm for *S. aureus* and 21.9 ± 1.2 mm for *E. coli*, demonstrating strong antimicrobial activity. Notably, the nanocomposite films showed slightly higher inhibition against *E. coli* compared to *S. aureus*, which may be attributed to differences in cell wall structure and susceptibility to reactive species. PQDs are known to generate reactive oxygen species (ROS), which can induce oxidative stress, damage bacterial cell membranes, and disrupt intracellular components. Additionally, the small size and high surface area of PQDs facilitate close interaction with microbial cells, further contributing to membrane disruption and leakage of cellular contents (Mou et al., 2023; Wang et al., 2022; Wen et al., 2025).

Surprisingly, these results were achieved by a very low concentration of PQDs. In comparison to our recent study on tea leaf-derived CQDs, it has been observed that reaching an inhibition zone of nearly 20 mm requires 3 wt.% of CQDs (Table 3) (Department of Packaging & Logistics, Yonsei University et al., 2025). Thus, introducing PQDs and improving the synthesis protocol of preparation of quantum dots significantly improves the antibacterial properties of PVA nanocomposite films.

Moreover, the observed dose-dependent behavior and broad-spectrum activity against both Gram-positive and Gram-negative bacteria highlight the potential of these nanocomposite films for use in active food packaging applications, where microbial inhibition is essential for extending shelf life and ensuring food safety.

Conclusion

In this study, PVA-based nanocomposite films reinforced with PQDs were successfully developed using a simple and

effective synthesis approach. The incorporation of PQDs significantly enhanced the overall performance of PVA films without compromising their intrinsic structural integrity. The nanocomposite films exhibited outstanding UV-shielding capability, achieving near-complete blocking in the UV-B region and substantial attenuation in the UV-A region while maintaining high transparency in the visible range. Structural analysis confirmed that PQDs were well dispersed within the PVA matrix and contributed to a slight increase in crystallinity, which positively influenced the material properties. In addition, the oxygen barrier performance was markedly improved, with the OTR reduced by more than 80% compared to pure PVA, owing to the formation of a tortuous pathway and reduced molecular mobility. Importantly, the incorporation of PQDs imparted strong antibacterial activity against both Gram-positive and Gram-negative bacteria. The films demonstrated significant inhibition against *S. aureus* and *E. coli*, achieving inhibition zones of 19.1 mm and 21.9 mm, respectively, at a low filler loading of 1.0 wt.%. This highlights the high antibacterial efficiency of PQDs compared to conventional CQD systems. These synergistic properties make this system highly promising candidates for next-generation sustainable and active food packaging applications.

Acknowledgements

This study was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) [grant number RS-2023-00208596]. This study was also supported by the Regional Innovation System & Education (RISE) program through the Gangwon RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Gangwon State, Republic of Korea (2026-RISE-10-006).

References

1. Ansari, J.R., Park, K., Sadeghi, K., Seo, J., 2025. Preparation of MoS₂ modified with carbon quantum dots and its application to extremely high oxygen-barrier nanocomposite

- films for packaging. *Food Packaging and Shelf Life* 49, 101504.
2. Ansari, J.R., Park, K., Seo, J., 2025b. Improving the oxygen barrier properties of composite films using green tea extracted CQDs and PVA for active packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life* 48, 101460.
 3. Azam, N., Najabat Ali, M., Javaid Khan, T., 2021. Carbon Quantum Dots for Biomedical Applications: Review and Analysis. *Front. Mater.* 8, 700403.
 4. Chen, S., Liu, D., Qian, M., Xu, L., Li, Y., Sun, H., Wang, X., Zhou, H., Bao, J., Xu, C., 2020. Preparation of cyanobacteria-enhanced poly(vinyl)alcohol-based films with resistance to blue-violet light / red light and water. *PLoS ONE* 15, e0228814.
 5. Department of Packaging & Logistics, Yonsei University, Jozaghkar, M., Ansari, J.R., Seo, J., 2025. PVA /Tea Leaf-Derived Carbon Quantum Dots Nanocomposites for Enhanced Barrier and Antimicrobial Food Packaging Films.
 6. *Korean Journal of Packaging Science and Technology* 31, 195-201.
 7. El-Shamy, A.G., Zayied, H.S.S., 2020. New polyvinyl alcohol/carbon quantum dots (PVA/CQDs) nanocomposite films: Structural, optical and catalysis properties. *Synthetic Metals* 259, 116218.
 8. Elugoke, S.E., Uwaya, G.E., Quadri, T.W., Ebenso, E.E., 2024. Carbon Quantum Dots: Basics, Properties, and Fundamentals, in: Berdimurodov, E., Verma, D.K., Guo, L. (Eds.), *ACS Symposium Series*. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 3-42.
 9. Gholizadeh, Z., Aliannezhadi, M., Ghominejad, M., Shariatmadar Tehrani, F., 2026. The novel alumina/CQDs nanocomposites for modifying optical and structural properties of alumina nanostructure. *Sci Rep* 16, 4837.
 10. Gupta, S., Pramanik, A.K., Kailath, A., Mishra, T., Guha, A., Nayar, S., Sinha, A., 2009. Composition dependent structural modulations in transparent poly(vinyl alcohol) hydrogels. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 74, 186-190.
 11. Jailani, A., Hidzer, M.H., Firdaus, A.H.M., Sapuan, S.M., Zainudin, E.S., Atiqah, A., Wan Jaafar, W.M., Suryanegara, L., 2026. Enhancing polyvinyl alcohol (PVA) nanocomposites: Key properties, applications and challenges in advanced engineering. *Defence Technology* 55, 11-29.
 12. Jalilian, M., Jozaghkar, Mohammad, Ziaee, F., 2023. Novel insight into low-temperature performance of various polyalkyl methacrylate) homopolymers in lube oil. *Polyolefins J.* Jalilian, S.M., Jozaghkar, M.R., Ziaee, F., 2023. Synthesis and characterization of butyl methacrylate/1-hexene copolymers catalyzed by AlCl₃ and organometallic acids and their performance assessment in lube oil. *JPSE* 6, 4957.
 13. Jozaghkar, M., Han, S., Park, K., Ansari, J.R., Seo, J., 2026a. Preparation and characterization of PBAT/PLA/lemon-extract quantum dots by melt extrusion for enhanced antibacterial and sustainable packaging. *Applied Surface Science* 730, 166308.
 14. Jozaghkar, M., Jalilian, M., Ziaee, F., 2022. Synthesis and assessment of the effect of monomer feed ratio and Lewis acids on the copolymerization of Butyl methacrylate/1-octene. *Polyolefins J.*
 15. Jozaghkar, M., Mirtaleb, F., Ansari, J.R., Irshad, M.S., Irshad, M.K., Seo, J., Arabi, H., 2026b. Tuning melt viscoelastic properties of LDPE via reactive extrusion: a dual-agent strategy using TMPTMA and Polyhexene-1. *International Polymer Processing*. <https://doi.org/10.1515/ipp-2025-0140>
 16. Jozaghkar, Mohammadreza, Ziaee, F., 2024. Characterization and kinetics study of poly(α -methyl styrene) synthesized by living anionic polymerization. *J Polym Res* 31, 156.
 17. Jozaghkar, Mohammad, Ziaee, F., 2024. Synthesis of Novel styrene-olefin triblock copolymer via living anionic polymerization. *Polyolefins J.* <https://doi.org/10.22063/poj.2024.3544.1290>
 18. Jozaghkar, M., Ziaee, F., Heyran Ardakani, H., Ashenagar, S., Jalilian, M., 2019. Kinetics of High-Temperature Bulk Thermal Polymerization of Methyl Styrene. *IJPST* 32.
 19. Jozaghkar, M.R., Jahani, Y., Arabi, H., Ziaee, F., 2019. Effect of Polyethylene Molecular Architecture on the Dynamic Viscoelastic Behavior of Polyethylene/Polyhexene-1 Blends and Its Correlation with Morphology. *Polymer-Plastics Technology and Materials* 58, 560-572.
 20. Jozaghkar, M.R., Sepehrianazar, A., Ziaee, F., Mirtaleb, F., 2022. Preparation, assessment, and swelling study of amphiphilic acrylic acid/chitosan-based semi-interpenetrating hydrogels. *Turkish Journal of Chemistry* 46, 499-505.
 21. Kim, H., Park, K., Ansari, J.R., Jang, J., Ahn, K., Seo, J., 2025. Enhancing physical properties of polyvinyl alcohol film using carbon quantum dots upcycled from polyethylene terephthalate waste. *Materials Today Chemistry* 46, 102774.
 22. Latif, Z., Albargi, H.B., Khaliq, Z., Shahid, K., Khalid, U., Qadir, M.B., Ali, M., Arshad, S.N., Alkorbi, A.S., Jalalah, M., 2024. Reinforcement using undoped carbon quantum dots (CQDs) with a partially carbonized structure doubles the toughness of PVA membranes. *Nanoscale Adv.* 6, 1750-1764.
 23. Li, Z., Che, G., Jiang, W., Liu, L., Wang, H., 2019. Visible-light-driven CQDs@MIL-125(Ti) nanocomposite photocatalyst with enhanced photocatalytic activity for the degradation of tetracycline. *RSC Adv.* 9, 33238-33245.
 24. Liu, Y., Feng, S., Zhu, Q., 2025. The effect of CQDs' particle size on its fluorescence behavior and Cu²⁺ detection. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 341, 126408.
 25. Mahmood, A., Shi, G., Wang, Z., Rao, Z., Xiao, W., Xie, X., Sun, J., 2021. Carbon quantum dots-TiO₂ nanocomposite as an efficient photocatalyst for the photodegradation of aromatic ring-containing mixed VOCs: An experimental and DFT studies of adsorption and electronic structure of the interface. *Journal of Hazardous Materials* 401, 123402.
 26. Mirtaleb, F., Jozaghkar, M., Ziaee, F., 2025. Controlled Polymerization Route to Novel α -Methyl styrene - Olefin Triblock Copolymers with Tailored Architecture. *Polyolefins J.*
 27. Mou, C., Wang, X., Liu, Y., Xie, Z., Zheng, M., 2023. A robust carbon dot-based antibacterial CDs-PVA film as a wound dressing for antibiosis and wound healing. *J. Mater.*

- Chem. B 11, 1940-1947.
28. Oh, Y., Park, K., Ansari, J.R., Seo, J., 2024. Using a Carbon Quantum Dot Suspension as a New Solvent for Clear Hydrophobic Surface Coating on Hydrophilic PVA Films. *Polymers* 16, 2513.
 29. Qiang, T., Han, M., Wang, X., 2020. Waterborne polyurethane/carbon quantum dot nanocomposite as a surface coating material exhibiting outstanding luminescent performance. *Progress in Organic Coatings* 138, 105433.
 30. Qurtulen, Q., Ahmad, A., Mujahid, M., Al-Hartomy, O., Hasan, P.M.Z., 2026. Hydrothermal Synthesis and Photocatalytic Performance of CQDs/TiO₂ Nanocomposites for CIP Removal. *Water Air Soil Pollut* 237, 136.
 31. Saeed, A., Abdulwahed, J.A.M., 2024. Development and characterization of PVA-based nanocomposites with graphene and natural quartz nanoparticles for energy storage applications. *Journal of Energy Storage* 98, 113138.
 32. Setianto, S., Men, L.K., Bahtiar, A., Panatarani, C., Joni, I.M., 2024. Carbon quantum dots with honeycomb structure: a novel synthesis approach utilizing cigarette smoke precursors. *Sci Rep* 14, 1996.
 33. Tang, J., Li, C., Ma, W., Ba, Z., Hu, Z., Willner, I., Wang, C., 2025. An Activatable Caged Palladium Nanocomposite for Targeted Cancer Therapy. *Angew Chem Int Ed* 64, e202503485.
 34. Wang, M., Su, Y., Liu, Y., Liang, Y., Wu, S., Zhou, N., Shen, J., 2022. Antibacterial fluorescent nano-sized lanthanum-doped carbon quantum dot embedded polyvinyl alcohol for accelerated wound healing. *Journal of Colloid and Interface Science* 608, 973-983.
 35. Wen, F., Su, W., Cen, L., Chen, Y., Huo, L., Zhong, H., Li, P., 2025. Natural fluorescent carbon quantum dots embedded polyvinyl alcohol/chitosan film with photoregulation and high antibacterial efficiency for infected wound healing. *International Journal of Biological Macromolecules* 306, 141716.
 36. You, J.-L., Chen, Y.-S., Chang, C.-P., Wu, M.-Z., Ger, M.-D., 2021. Utilizing a pH-responsive palladium nanocomposite to fabricate adhesion-enhanced and highly reliable copper coating on nylon 6 fabrics. *Journal of Materials Research and Technology* 15, 3983-3994.

투고: 2026.03.29 / 심사완료: 2026.04.01 / 게재확정: 2026.04.06

생강 껍질 유래 아연 도핑 탄소점을 함유한 카라기난 필름의 비교 연구

정윤¹ · 안효진¹ · 김준태^{1,2*}

¹경희대학교 식품영양학과

²바이오나노컴포지트 연구 센터

Comparative Study on Carrageenan-Based Films Incorporating Zinc-Doped Carbon Dots Derived from Ginger Peel

Yoon Jeong¹, Hyo Jin An¹, and Jun Tae Kim^{1,2*}

¹Department of Food and Nutrition, Kyung Hee University, 26, Kyunghedae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02447 Republic of Korea

²BioNanocomposite Research Center, Kyung Hee University, 26, Kyunghedae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02447 Republic of Korea

Abstract In this study, zinc-doped carbon dots (Zn-GPCDs) were synthesized using a hydrothermal synthesis method with ginger peel waste and applied to a carrageenan-based active packaging film. FT-IR spectroscopic analysis revealed that the Zn-GPCDs exhibited characteristic surface functional groups, including specific Zn-O coordination bonds. The effects of zinc doping on the structural and functional performance of the composite film were compared and analyzed. Due to zinc doping, the free radical scavenging ability of Zn-GPCDs was slightly reduced compared to non-doped GPCDs. However, it acted as an important functional trigger for antimicrobial efficacy. Zn-GPCDs exhibited significant antimicrobial activity against *Staphylococcus aureus* (20.92 ± 0.99 mm) and *Salmonella enterica* (21.60 ± 1.04 mm), effectively overcoming the functional limitations of non-doped GPCDs. The carrageenan/Zn-GPCDs composite film exhibited stable mechanical properties, maintaining a tensile strength of 16.36 ± 2.00 MPa and an elongation at break of $12.40 \pm 3.79\%$. In addition, the composite film showed excellent UV-blocking properties at wavelengths below 400 nm and achieved an ABTS radical scavenging ability of approximately 88% through a synergistic effect that enhanced antioxidant activity. These results suggest the potential for Zn-GPCDs-containing carrageenan films to be utilized as sustainable active packaging materials with antioxidant, antibacterial, and UV-blocking functions.

Keywords Upcycling, Ginger peel, Carbon dots, Zinc doped, Active packaging

서론

최근 플라스틱 폐기물에 의한 환경 오염 문제가 심화됨에 따라 포장 산업계에서는 기존 석유계 플라스틱을 대체하기 위한 생분해성 고분자 기반 포장재 개발 연구가 가속화되고 있다¹⁻³⁾. 다양한 천연 고분자 중 적조류 유래 황합유 다당류인 카라기난은 탁월한 필름 형성 능력과 가시광선 영역에서의 높은 투명성 및 우수한 산소 차단성을 보유하고 있어 차세대 친환경 포장 소재로서 높은 잠재력을 가지고 있다⁴⁻⁶⁾. 하지만 카라기난 필름은 자외선 차단 능력이

미비할 뿐만 아니라, 식품의 산화 및 미생물 부패를 억제할 수 있는 항균 및 항산화 활성이 부족하여 활성 포장(active packaging) 소재로 단독 사용에는 한계가 있다^{4,7)}. 이러한 물리·화학적 한계를 보완하기 위해 나노 크기의 기능성 필러를 고분자 매트릭스에 도입하는 나노복합화 전략이 주목받고 있으며, 이를 통해 카라기난 기반 필름의 기능성을 향상시키려는 다양한 시도가 이루어지고 있다^{8,9)}. 특히, 농업 및 식품 가공 부산물을 활용하여 탄소점(carbon dots, CDs)을 합성하는 기술은 자원 업사이클링을 통한 제로 웨이스트(zero-waste) 전략의 일환으로 높은 경제적·환경적 가치를 지니며, 차세대 친환경 활성 포장재 개발에 유망한 접근법으로 평가된다^{10,11)}.

생강은 진저롤(gingerol), 쇼가올(shogaol) 등 풍부한 생리 활성 물질을 함유하고 있어 식품·의약·화장품 등 다양한 산

*Corresponding Author: Jun Tae Kim
Department of Food and Nutrition, Kyung Hee University, Seoul 02447, Republic of Korea
Tel: +82-2-961-9408
E-mail: jtkim92@khu.ac.kr

업 분야에서 활용되고 있으나¹²⁾, 가공 과정에서 발생하는 생강 껍질은 주요 부산물로, 기계식 박피 기준 원물 중량의 약 3~8%에 달하며 대부분 폐기되고 있다¹³⁾. 생강 껍질을 수열 합성법(hydrothermal carbonization)으로 처리하여 얻은 생강 껍질 유래 탄소점(ginger peel-derived carbon dots, GPCDs)은 10 nm 이하의 나노 크기를 가지며, 표면에 -OH, -COOH, 및 -NH₂ 등 다양한 친수성 작용기를 풍부하게 보유하고 있어 친수성 고분자 매트릭스와 우수한 상호작용을 형성할 수 있으며, 자외선 차단 기능과 항산화 활성을 부여할 수 있는 소재로 보고되고 있다^{14,15)}. 또한 탄소점은 표면 작용기를 통해 세균 세포막과 상호작용하여 자체적인 항균 활성을 나타내는 것으로 알려져 있으나, 전구체 종류 및 표면 특성에 따라 그람양성균 또는 그람음성균 중 특정 균종에 대해 선택적으로 작용하는 경향이 있어 광범위한 항균 효과를 발휘하는 데 한계가 있다고 보고되고 있다¹⁶⁾. 이러한 GPCDs의 항균 활성 한계를 극복하기 위한 전략으로 금속 이온 도핑이 효과적인 대안으로 제시되고 있다. 그중 아연(zinc)은 식품 안전성이 확보된 필수 미량 원소로서, 세균의 세포막 투과성을 변화시키고 세포 내 활성산소종(reactive oxygen species, ROS) 생성을 유도함으로써 탄소점 고유의 항균 활성을 더욱 강화할 수 있을 것으로 기대된다^{17,18)}. 따라서 아연 도핑 생강 껍질 유래 탄소점(zinc-doped ginger peel-derived carbon dots, Zn-GPCDs)은 GPCDs의 구조적·기능적 특성을 유지하면서 아연 도핑을 통해 그람양성균과 그람음성균을 포함한 광범위한 세균에 대한 항균 활성을 부여한 다기능성 나노필러로, 카라기난 기반 활성 포장 시스템에서 GPCDs의 기능적 한계를 보완할 수 있는 소재로 기대된다¹⁶⁻¹⁸⁾.

이에 본 연구에서는 식품 가공 과정에서 발생하는 생강 껍질을 고부가가치 소재로 전환하는 업사이클링 전략을 기반으로, 수열 합성법을 통해 GPCDs 및 Zn-GPCDs를 제조하고 이를 카라기난 매트릭스에 도입한 카라기난 기반 복합 필름을 제조하였다. 제조된 탄소점 및 복합 필름의 표면 작용기와 화학적 구조를 분석하여 나노 필러의 성공적인 도입을 입증하고, 아연 도핑이 필름의 기계적 물성, 광학적 차단성, 그리고 항균 및 항산화 활성에 미치는 영향을 체계적으로 평가하였다. 궁극적으로 본 연구를 통해 GPCDs 및 Zn-GPCDs 함유 카라기난 필름의 구조적 특성과 기능적 특성을 비교 평가하고, 생강 껍질 유래 금속 도핑 탄소점이 지속 가능한 활성 포장 소재로서 지닌 잠재력을 검토하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

본 실험에서 사용된 생강은 국내 온라인 유통망(Coupage

Corp., Seoul, Korea)을 통해 시판 제품을 구입하여 사용하였다. 카라기난(HE-A type, 1.5% 수용액, 75°C에서 50 cp 점도)은 (주)한국카라긴(Seoul, Korea)에서 구입하였고, 글리세롤(순도 ≥99.0%)은 대정화금(주)(Siheung, Korea)에서 구입하여 사용하였다. ZnO 나노입자(평균 입경 20-30 nm)와 2,2'-azino-bis-(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS; 순도 ≥98%)는 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO, USA)에서 구입하였다. 실험 균주인 *Staphylococcus aureus* (ATCC 23235) 및 *Salmonella enterica* (ATCC 15313)는 한국생명공학연구원 생물자원센터(KCTC, Seoul, Korea)로부터 분양받아 사용하였다.

2. Gi-peel 제조 및 탄소점(GPCDs, Zn-GPCDs) 합성

생강으로부터 분리하여 얻은 생강 껍질을 60°C 온도에서 24시간 동안 건조한 후, 분쇄 과정을 거쳐 미세 분말 형태의 전구체를 준비하였다. 실험 시료는 처리 조건 및 아연 도핑 여부에 따라 Gi-peel, 생강 껍질 유래 탄소점인 GPCDs, 그리고 아연이 도핑된 Zn-GPCDs의 세 가지 군으로 구분하여 제조하였다. 대조군인 Gi-peel은 생강 껍질 분말 2 g을 증류수 50 mL에 혼합한 후, 나노 물질의 수열 합성 시간과 동일한 조건인 7시간 동안 상온에서 교반하여 준비하였다. GPCDs는 생강 껍질 분말 2 g과 증류수 50 mL의 혼합액을 테플론 라이너가 장착된 스테인리스 오토클레이브에 넣고 200°C에서 7시간 동안 열수 합성하여 제조하였다. Zn-GPCDs의 경우, 동일한 생강 껍질 혼합액에 ZnO 0.1 g을 첨가한 후 GPCDs와 동일한 조건에서 열수 합성을 실시하였다. 모든 시료는 반응 종료 후 상온까지 자연 냉각한 뒤, 0.2 μm 시린지 필터로 여과하여 불순물을 제거한 최종 액상 시료(Gi-peel, GPCDs, 및 Zn-GPCDs)를 확보하였다. 생강 껍질로부터 Zn-GPCDs를 얻기 위한 전체 수열 합성 및 정제 과정은 Fig. 1(a)에 모식도로 제시하였다.

3. 카라기난 기반 복합 필름의 제조

카라기난 기반 복합 필름은 용매 캐스팅법을 이용하여 제조하였다. 증류수 200 mL에 가소제로 글리세롤 1.2 g과 카라기난 4 g을 첨가하고 1시간 동안 교반하여 완전히 용해시켰다. 용액을 55°C까지 냉각한 다음, 대조군(Car)에는 아무것도 첨가하지 않고, 앞서 제조한 각 액상 시료(GPCDs, Zn-GPCDs)를 카라기난 중량 대비 5 wt%의 고형분 함량이 되도록 계산하여 첨가하고 20분간 균질하게 혼합하였다. 이후 제조된 혼합액을 Teflon 코팅된 유리 플레이트 위에 일정하게 캐스팅한 후, 25°C에서 48시간 동안 건조하여 탄소점이 함유된 카라기난 기반 복합 필름(Car, Car/GPCDs, 및 Car/Zn-GPCDs)을 최종적으로 제조하였다. Zn-GPCDs를 포함한 카라기난 기반 복합 필름의 제조 공정은 Fig. 1(b)에 모식도로 제시하였다.

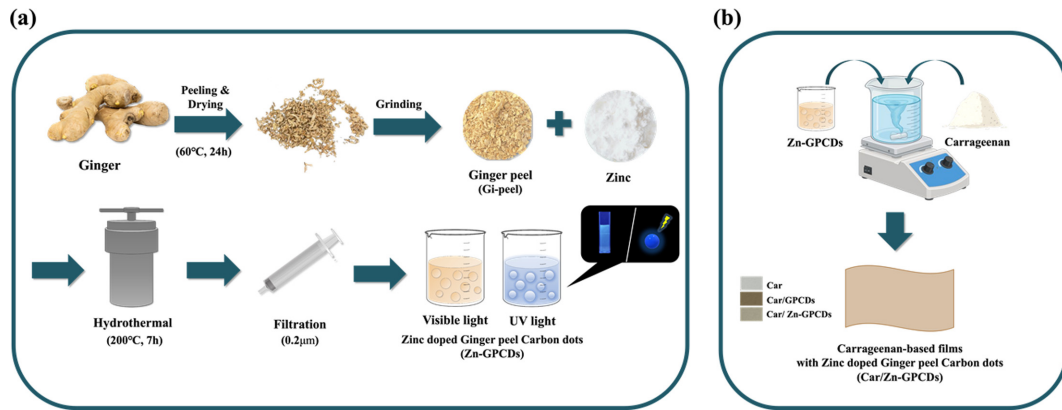


Fig. 1. Schematic illustration of (a) preparation of zinc-doped ginger peel-derived carbon dots (Zn-GPCDs) using a hydrothermal method and (b) preparation of carrageenan-based composite films incorporated with GPCDs and Zn-GPCDs.

4. 액상 시료 및 복합 필름의 표면 작용기 분석

제조된 액상 시료 및 카라기난 기반 복합 필름의 표면 작용기 분석은 FT-IR spectrometer (FT-IR 4x, JASCO Spectroscopy, Tokyo, Japan)를 사용하여 수행하였다. 시료의 스펙트럼은 4,000-500 cm^{-1} 범위에서 투과율을 측정하였으며, 모든 분석은 주사 횟수 32회, 분해능 4 cm^{-1} 조건에서 진행하였다.

5. Gi-peel, GPCDs, 및 Zn-GPCDs 항균 효과 분석

Gi-peel, GPCDs, 및 Zn-GPCDs 액상 시료의 항균 활성은 평판 확산법(agar well diffusion method)^{19,20}을 이용하여 *S. aureus*와 *S. enterica*에 대해 평가하였다. 먼저 10⁶ CFU/mL 농도로 조절된 각 균액을 고체 한천 배지에 균일하게 도말한 후, 직경 8 mm의 well을 형성하였다. 각 well에는 Gi-peel 원액과 9 mg/mL 농도의 GPCDs 및 Zn-GPCDs 용액을 각각 150 μL 씩 주입하였다. 이후 37°C에서 *S. aureus*는 18시간, *S. enterica*는 12시간 동안 배양하였으며, 형성된 저해존 직경을 측정하여 항균 활성을 비교하였다.

6. Gi-peel, GPCDs, Zn-GPCDs 및 복합 필름의 항산화 효과

액상 시료 및 카라기난 기반 복합 필름의 항산화 효능은 ABTS 양이온 라디칼 소거 활성 측정법을 사용하여 평가하였다. 먼저 7 mM ABTS와 2.45 mM potassium persulfate를 혼합한 후, 암소에서 16-24시간 동안 방치하여 ABTS 라디칼을 생성시켰다. 생성된 라디칼 용액은 실험 직전 734 nm에서 대조구의 흡광도 값이 0.70 ± 0.02 가 되도록 증류수로 희석하여 사용하였다. 액상 탄소점의 분석을 위해, 96-well plate에 농도별 용액(0.1, 1, 2.5, 5, 7.5, 10, 및 20 $\mu\text{g/mL}$) 20 μL 와 희석된 ABTS 용액 180 μL 를 각각 분주하여 혼합한 후, 암소에서 2분간 반응시킨 후 734 nm에

서 흡광도를 측정하였다. 복합 필름의 경우, 일정 크기로 절단된 시료(50 mg, 약 $2 \times 2 \text{ cm}^2$)를 코니칼 튜브에 넣고 희석된 ABTS 용액 10 mL를 가하였다. 이후 암소 조건의 shaking incubator에서 30분간 반응시킨 후 상등액의 흡광도를 734 nm에서 측정하였다. 라디칼 소거 활성(%)은 다음 식에 따라 산출하였다.

$$\text{Radical scavenging rate (\%)} = \left(\frac{A_c - A_s}{A_c} \right) \times 100$$

여기서 A_c 는 대조구의 흡광도, A_s 는 시료의 흡광도를 의미한다.

7. 기계적 물성 분석

카라기난 기반 복합 필름의 인장강도(tensile strength)와 연신율(elongation at break)은 ASTM D882-88 표준 규격에 따라 Universal Testing Machine (Z010, Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Germany)을 사용하여 측정하였다. 시편은 ASTM 규격에 준하여 절단하였으며, 그립 간격은 5 cm, 크로스헤드 속도는 50 mm/min으로 설정하였다. 각 시료에 대해 최소 3회 반복 측정하여 평균값과 표준편차를 산출하였다.

8. 복합 필름의 광학적 특성 및 색도 분석

제조된 카라기난 기반 복합 필름의 표면 색도(L^* , a^* , b^*)는 색차계(Chroma meter, CR-400, Konica Minolta, Tokyo, Japan)를 사용하여 측정하였다. 필름의 총 색차(ΔE)는 대조구 Car 필름과 GPCDs 및 Zn-GPCDs 필름 간의 색도 차이를 이용하여 다음 식으로 계산하였다.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

여기서 ΔL^* , Δa^* 및 Δb^* 는 Car 필름과 각 필름 시료 간

의 색도 값 차이를 나타낸다.

한편, 필름의 자외선 차단 특성과 투명도는 UV-vis spectrophotometer(Optizen POP Series, Mecasys, Seoul, Korea)를 사용하여 200-800 nm 파장 범위에서 측정하였다. 특히 280 nm (T_{280}) 및 660 nm (T_{660})에서의 광투과율을 측정하여 자외선 차단 능력과 가시광선 투명도를 평가하였다.

9. 통계처리

액상 시료 및 카라기난 기반 복합 필름의 모든 품질 특성은 3회 반복 측정하였으며, 결과는 평균 ± 표준편차로 나타내었다. 실험 데이터의 통계적 유의성 분석은 SPSS-24 (IBM-SPSS, NY, USA) 및 Design-Expert (Stat-Ease, Inc., USA) 소프트웨어를 사용하여 수행하였다. 각 실험구 간 평균값의 차이에 대한 유의성 검정은 일원배치 분산분석(one-way ANOVA)을 실시한 후, Duncan의 다중범위검정(Duncan's multiple range test)을 통해 95% 신뢰수준($p < 0.05$)에서 통계적 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

1. Gi-peel, GPCDs 및 Zn-GPCDs 용액 특성 분석

1.1. 표면 작용기 분석

생강 껍질로부터 탄소점이 형성되고 아연 도핑이 이루어짐에 따른 표면 구조 변화를 FT-IR 스펙트럼으로 분석한 결과는 Fig. 2에 나타내었다. GPCDs, Zn-GPCDs의 3,239 cm^{-1} 및 3,254 cm^{-1} 의 부근에서 관찰된 넓은 흡수 띠는 수산기(-OH) 작용기의 존재를 의미하며, 2,946 cm^{-1} 및 2,961 cm^{-1} 의 피크는 메틸기(CH_3) 및 메틸렌기(CH_2)의 C-H 신축 진동에 대응하였다. 1,584 cm^{-1} 및 1,581 cm^{-1} 의 부근의 피크는 방향족 C=C 신축 진동 또는 카르복실레이트(COO^-)의 비대칭 신축 진동에, 1,375 cm^{-1} ~1,394 cm^{-1} 와 1,034 cm^{-1} ~1,046 cm^{-1} 영역의 피크는 각각 C-H 굽힘 진동 및 C-N 신축 진동과 C-O 신축 진동에 대응한다²¹⁾. 원재료인 Gi-

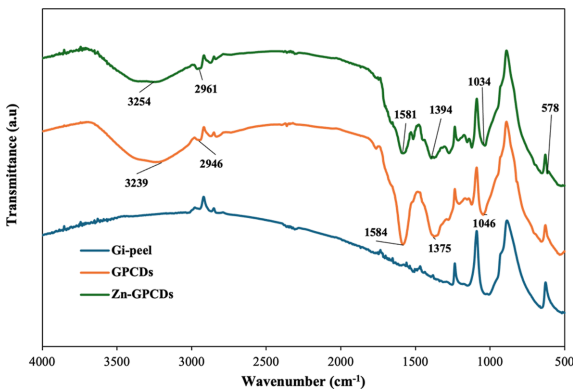


Fig. 2. FT-IR spectra of Gi-peel, GPCDs, and Zn-GPCDs.

peel에 비해 GPCDs 및 Zn-GPCDs로 변환됨에 따라 주요 작용기 피크의 위치와 흡수의 강도 변화가 나타났으며, 이는 수열 합성 과정에서 다양한 기능기를 가진 나노 탄소점이 성공적으로 합성되었음을 의미한다. 특히 Zn-GPCDs의 경우 GPCDs에서 나타나지 않았던 578 cm^{-1} 부근에 특이적 피크가 확인되었는데, 이는 Zn-O 결합에 해당하는 것으로 아연 이온이 탄소점 골격 내에 성공적으로 도입되었음을 입증한다²²⁾.

1.2. 항산화 활성 평가

Gi-peel, GPCDs, 및 Zn-GPCDs의 농도(0.1~20 $\mu g/mL$)에 따른 ABTS 라디칼 소거 활성을 나타낸 결과는 Fig. 3에 제시하였다. 모든 시료에서 농도 증가에 따라 라디칼 소거 활성이 증가하는 농도 의존적 경향을 보였다. 대조군인 Gi-peel는 전 농도 구간에서 매우 낮은 항산화 활성을 나타낸 반면, GPCDs와 Zn-GPCDs는 유의적으로 높은 소거 활성을 보여 탄소점 합성에 의해 항산화 능력이 크게 향상되었음을 확인하였다. 탄소점의 ABTS 라디칼 소거 메커니즘은 표면의 -OH 및 -COOH 등 산소 풍부 작용기가 ABTS 양이온 라디칼에 수소 원자 또는 전자를 공여하여 안정한 비라디칼 형태로 환원시키는 수소 원자 이동(HAT) 및 단일 전자 이전(SET) 경로와, sp^2 탄소 코어의 π 전자계를 통한 전자 저장 메커니즘에 관련되는 것으로 알려져 있다²³⁾. 최고 농도인 20 $\mu g/mL$ 에서 Gi-peel의 소거 활성은 2.93%에 불과한 반면, GPCDs와 Zn-GPCDs는 각각 36.73%, 31.24%로 유의적인($p < 0.05$) 우수한 소거 활성을 나타냈다. Zn 도핑에 따라 GPCDs 대비 소거 활성은 소폭 감소하는 경향을 보였는데, 이는 Zn^{2+} 이온이 탄소점 표면 작용기와 Zn-O 배위결합을 형성하여 ABTS 라디칼 소거에 기여하는 작용기 접근성이 일부 감소하였을 가능성이 있다²²⁾. 그러나 두 탄소점 모두 원재료인 Gi-peel에 비해 현저히 우수한 항산화 특성을 나타내어 기능성 필러로서의 적용 가능성이 확인되었다.

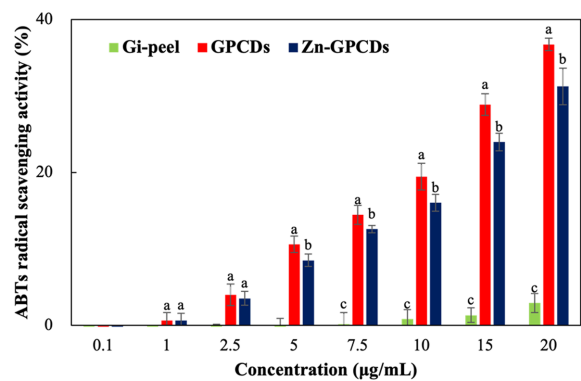


Fig. 3. ABTS radical scavenging activity of Gi-peel, GPCDs, and Zn-GPCDs at various concentrations (0.1~20 $\mu g/mL$).

1.3. 항균 활성 평가

Staphylococcus aureus (그람양성균)과 *Salmonella enterica* (그람음성균)에 대한 항균 활성은 Fig. 4에 나타내었다. Gi-peel은 두 균주에서 모두 항균 저해존이 관찰되지 않아 유의적인 항균 활성을 보이지 않았다. GPCDs는 *S. enterica*에 대해서는 저해존이 형성되지 않았으나, *S. aureus*에서는 16.60 ± 0.81 mm 저해환 직경을 보여 제한적인 항균 활성을 나타냈다. 이러한 탄소점의 항균 작용은 입자가 박테리아 세포 표면에 흡착되어 ROS를 유도하고, 수산화 라디칼 및 단일항 산소 생성을 통해 세포벽의 지질과 단백질을 산화적으로 손상시켜 세포 용해를 유발하는 기전에 관련되는 것으로 보고된다¹⁶⁾. 반면, Zn-GPCDs는 두 균주 모두에서 뚜렷한 저해존을 형성하며 우수한 항균 성능을 나타냈다. 저해환의 직경은 *S. aureus*에서 20.92 ± 0.99 mm, *S. enterica*에서 21.60 ± 1.04 mm로 측정되어 그람양성 및 그람음성 균주 모두에 대해 효과적인 억제 능력을 보유하고 있음을 확인하였다. Zn-GPCDs의 향상된 항균 성능은 탄소점의 ROS 유도 기전과 도핑된 아연으로부터 방출된 Zn^{2+} 이온의 시너지 효과와 관련되는 것으로 판단되며, Zn^{2+} 이온은 박테리아의 세포질 내부 구성 성분과 상호작용하여 추가적인 ROS 생성을 촉진하고 세포막 손상이 가속화한다²⁴⁾. 따라서 아연 도핑은 탄소점의 항균 범위를 확대하고, 항균 성능을 효과적으로 증진시키는 중요한 요인으로 판단된다.

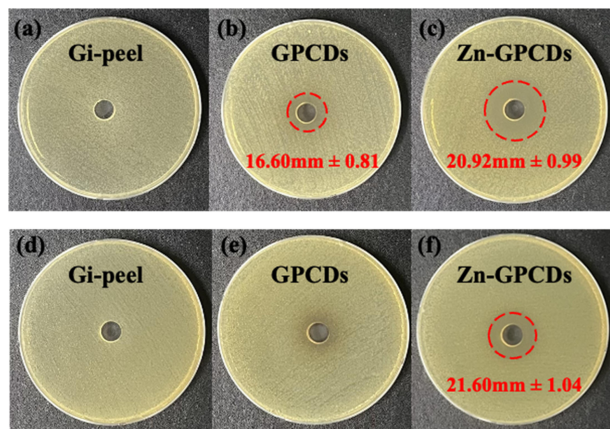


Fig. 4. Antimicrobial activity of (a,d) Gi-peel, (b,e) GPCDs, and (c,f) Zn-GPCDs against (a-c) *Staphylococcus aureus* and (d-f) *Salmonella enterica*.

2. Car, Car/GPCDs, 및 Car/Zn-GPCDs 복합 필름 특성

2.1. 두께 및 기계적 물성 평가

카라기난 기반 복합 필름의 두께(Thickness)와 인장강도(TS) 및 연신율(EB) 측정 결과는 Table 1에 제시하였다. 모든 필름의 두께는 0.06~0.07 mm의 범위로 나타나 전반적으로 균일한 두께를 유지하였다. Car 필름과 Car/Zn-GPCDs 필름의 두께는 각각 0.06 mm로 유의적인 차이가 없었으나, Car/GPCDs 필름은 0.07 mm로 소폭 증가하는 경향을 보였다. 인장강도는 14.89~16.82 MPa 범위에서 측정되었다. Car/GPCDs 필름의 인장강도는 14.89 MPa로 대조구 Car 필름 대비 다소 감소하였는데, 이는 비도핑된 GPCDs가 고분자 사슬 사이에서 가소제와 유사한 역할을 수행하여 사슬 이동성을 증가시켰을 가능성이 있다²⁵⁾. 반면, Zn이 도핑된 Car/Zn-GPCDs 필름은 16.36 MPa로 Car 필름과 통계적으로 유사한 수준을 유지하였다. Zn^{2+} 이온이 카라기난의 황산기와 이온성 교차결합을 형성하여 필름의 구조적 결합력을 강화한 것으로 판단된다²⁶⁾. 필름의 유연성을 나타내는 연신율은 10.97~15.51% 범위를 보였으며, Car/GPCDs 필름에서 15.51%로 최대치를 나타내었다. Car/Zn-GPCDs 필름은 12.40%로 Car 필름 대비 소폭 증가하였으나 통계적 유의성은 없었다. 이는 Zn-GPCDs의 표면의 -OH 및 -COOH 기가 가소화 효과를 유도하여 연신율을 약간 향상시킨 결과로 해석된다²⁶⁾.

2.2. 표면 작용기 및 상호작용 분석

복합 필름의 화학적 구조와 분자 간 상호작용은 FT-IR 스펙트럼을 통해 평가하였으며, 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 모든 필름에서 $3,336\sim 3,338\text{ cm}^{-1}$ 부근의 넓은 흡수 대역이 관찰되었으며, 이는 O-H 및 N-H 신축 진동에 해당한다. 카라기난의 특성 피크인 황산기($1,215\text{ cm}^{-1}$)와 글리코시드 결합($1,064\text{ cm}^{-1}$) 피크가 모든 필름에서 명확히 관찰되어 필러 첨가 후에도 카라기난 고분자 골격 구조가 안정적으로 유지됨을 확인하였다. 한편 O-H 신축 진동 피크는 Car 필름에서 $3,338\text{ cm}^{-1}$, Car/GPCDs 필름에서 $3,337\text{ cm}^{-1}$, Car/Zn-GPCDs 필름에서 $3,336\text{ cm}^{-1}$ 로 낮은 파수 영역으로 이동하였다. 이러한 파수 이동은 탄소점 표면의 친수성 작용기와 카라기난 사슬 간 분자 상호작용의 가능성을 시사하며, 탄소점이 카라기난 매트릭스 내에 균일하게 도입되었음을 간접적으로 지지한다²⁷⁾. 또한, 황산기(-S=O) 피크가

Table 1. Thickness, tensile strength (TS), and elongation at break (EB) of Car, Car/GPCDs, and Car/Zn-GPCDs films (mean \pm SD, n = 3)

Films	Thickness (mm)	TS (MPa)	EB (%)
Car	$0.06 \pm 0.01^{a,*}$	16.82 ± 2.06^a	10.97 ± 2.31^b
Car/GPCDs	0.07 ± 0.00^b	14.89 ± 1.55^b	15.51 ± 2.67^a
Car/Zn-GPCDs	0.06 ± 0.00^a	16.36 ± 2.00^{ab}	12.40 ± 3.79^b

*Different letters in the same column indicate a significant difference at $p < 0.05$ by Duncan's multiple range test.

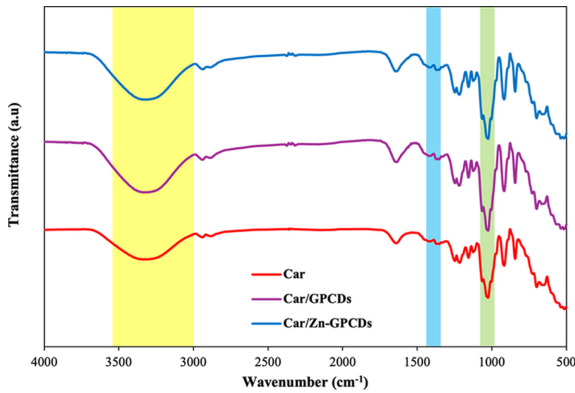


Fig. 5. FT-IR spectra of Car, Car/GPCDs, and Car/Zn-GPCDs films.

1,215 cm^{-1} 부근에서 소폭의 파수 이동을 나타내었으며, 이는 탄소점 필러와 카라기난 매트릭스 간 분자 상호작용의 가능성을 보여준다²⁸). 종합적으로 볼 때, 생강 껍질 유래 탄소점은 카라기난 매트릭스 내에 분자 상호작용을 매개로 균일하게 분산 및 도입되었음을 확인할 수 있었다.

2.3. 광학적 차단 성능 및 색도

카라기난 기반 복합 필름의 광학적 특성과 색도 분석 결과는 Table 2 및 Fig. 6에 제시하였다. Car 필름은 자외선 및 가시광선 영역 전반에서 높은 광투과도를 보여 우수한 투명성을 나타냈으나, 자외선 차단 능력은 매우 낮았다. 반면 카라기난 매트릭스에 GPCDs와 Zn-GPCDs를 도입함에 따라 200-400 nm 자외선 영역에서 필름의 광차단 특성이 현저히 향상되었다. 특히 Car/GPCDs 필름의 T_{280} 값은 $2.71 \pm 0.47\%$ 로 가장 낮은 투과도를 보여 가장 우수한 자외선 차단 효과를 나타냈으며, Car/Zn-GPCDs 필름 역시 T_{280} 가 $8.13 \pm 0.39\%$ 로 대조구 대비 우수한 UV 차단 성능을 보였다. 이러한 개선은 탄소점 내부 sp^2 탄소 코어의 $\pi-\pi^*$ 전이 및 표면 작용기의 $n-\pi^*$ 전이에 따른 자외선 광자의 효과적인 흡수와, 나노입자에 의한 빛 산란 증가가 복합적으로 작용했기 때문으로 판단된다. 특히 탄소점의 π -공액 구조는 특정 파장의 자외선 에너지를 흡수하여 기저상태에서 들뜬상태로 전이됨으로써 식품의 산화적 손상을 일으키는 자외선의 투과를 효과적으로 차단하는 역할을 수행한다²⁹).

색도 분석 결과, 탄소점 첨가에 따라 명도(L^*)는 감소하

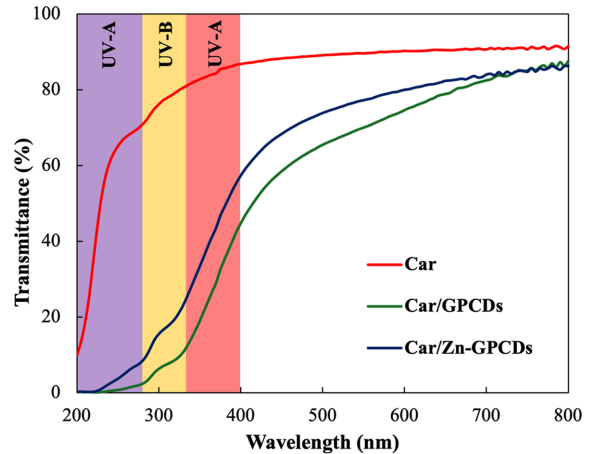


Fig. 6. UV-vis transmittance spectra of Car, Car/GPCDs, and Car/Zn-GPCDs films.



Fig. 7. Photographs of Car, Car/GPCDs, and Car/Zn-GPCDs films.

고 황색도(b^*)는 증가하는 경향을 보였다. Car/GPCDs 필름의 L^* 값이 70.90 ± 0.53 로 가장 낮아 가장 어두운 색조를 띠었으며, b^* 값은 9.79 ± 0.14 로 가장 크게 증가하였다. Car/Zn-GPCDs 필름은 L^* 값이 76.84 ± 0.50 로 Car/GPCDs 필름보다 높아 상대적으로 밝은 특성을 보이며, a^* 와 b^* 값의 변화를 통해 부드러운 황색 톤을 형성함을 확인하였다. 이에 따라 Car 필름과의 전체 색차(ΔE)는 Car/GPCDs 필름에서 21.90 ± 0.33 로 가장 높았고, Car/Zn-GPCDs 필름에서 16.34 ± 0.41 로 그 뒤를 이었다. 시각적으로도 Fig. 7에서 확인되었듯이 Car 필름은 무색 투명한 외관을 유지하는 반면, Car/GPCDs 필름은 진한 갈색을 띠며, Car/Zn-GPCDs 필름은 상대적으로 밝고 부드러운 황색 톤을 나타내어 색도 분석 결과와 일치하였다.

결론적으로 Zn-GPCDs를 도입한 카라기난 복합 필름은 단파장 자외선을 효과적으로 차단함과 동시에, 비도핑

Table 2. Color parameters (L^* , a^* , b^*), total color difference (ΔE), and light transmittance (T_{280} , T_{660}) of Car, Car/GPCDs, and Car/Zn-GPCDs films (mean \pm SD, $n = 3$)

Films	L^*	a^*	b^*	ΔE	T_{280}	T_{660}
Car	$88.10 \pm 0.06^{a,*}$	2.00 ± 0.12^b	-3.65 ± 0.21^c	0.00 ± 0.00^d	67.35 ± 3.49^a	89.41 ± 0.99^a
Car/GPCDs	70.90 ± 0.53^c	3.63 ± 0.06^a	9.79 ± 0.14^a	21.90 ± 0.33^a	2.71 ± 0.47^b	78.42 ± 1.94^b
Car/Zn-GPCDs	76.84 ± 0.50^b	1.37 ± 0.27^c	8.16 ± 0.07^b	16.34 ± 0.41^b	8.13 ± 0.39^b	80.81 ± 2.45^b

*Different letters in the same column indicate a significant difference at $p < 0.05$ by Duncan's multiple range test.

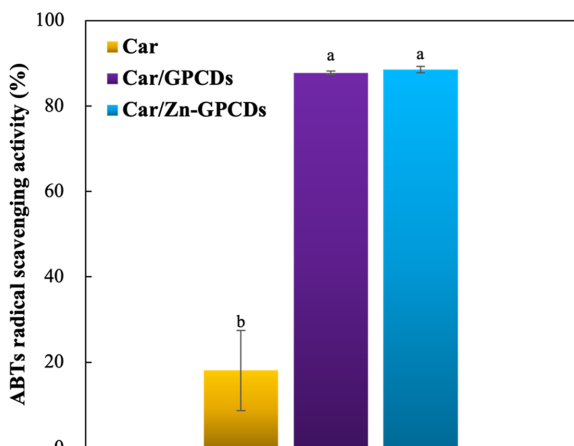


Fig. 8. ABTS radical scavenging activity of Car, Car/GPCDs, and Car/Zn-GPCDs films.

GPCDs 필름에 비해 명도 저하 및 과도한 불투명성을 완화하여 식품 보호를 위한 광차단 성능과 내부 시인성 확보라는 두 가지 요구를 동시에 충족시켰다. 이는 아연 도핑 탄소점이 기존 유기 나노필러의 광학적 한계를 보완하여 차세대 다기능성 활성 포장 시스템 구축에 기여할 수 있음을 입증한다³⁰⁾.

2.4. 복합 필름의 항산화 활성

복합 필름의 ABTS 라디칼 소거 활성 결과는 Fig. 8에 나타내었다. Car 필름은 18.10 ± 9.37%의 낮은 소거 활성을 보여 카라기난 단독 필름의 항산화 능력이 제한적임을 확인하였다. 반면, Car/GPCDs 필름과 Car/Zn-GPCDs 필름은 각각 87.81 ± 0.44% 및 88.59 ± 0.73%의 매우 높은 소거 활성을 나타내어 대조구 대비 항산화 능력이 비약적으로 향상되었다. 액상 시료 대비 더욱 우수한 소거능은 5 wt% GPCDs와 Zn-GPCDs가 카라기난 매트릭스 내에서 균일 분산되어 라디칼 접촉면적이 상대적으로 증가한 결과로 판단된다. 두 복합 필름 간에는 통계적으로 유의한 차이가 관찰되지 않았으며($p > 0.05$), 이는 필름 매트릭스 내 고농도 분산 상태에서 탄소점 표면의 풍부한 전자 공여 작용기(-OH 및 -COOH)가 Zn-O 배위결합에 의한 작용기 밀도 차이를 상쇄하며 라디칼을 효과적으로 중화시켰을 가능성이 있기 때문으로 판단된다²³⁾.

요약

본 연구는 농업 부산물인 생강 껍질을 수열 합성법으로 자원화하여 생강껍질 유래 탄소점(GPCDs) 및 아연 도핑 탄소점(Zn-GPCDs)을 제조하고 이를 카라기난 기반 복합 필름에 기능성 강화 인자로 적용하여 특성을 평가하였다. 제조된 GPCDs와 Zn-GPCDs는 풍부한 표면 작용기를 보유

하고 있었으며, 특히 Zn-GPCDs 내 Zn-O 결합에 해당하는 피크가 확인되어 아연 이온이 탄소점 골격 내에 안정적으로 도입되었음을 입증하였다. 항산화 활성 분석 결과, 두 탄소점은 원재료인 생강 껍질 대비 유의적으로 향상된 ABTS 라디칼 소거능을 나타냈고, 항균 활성 측면에서는 Zn 도핑의 효과가 뚜렷하게 나타나 Zn-GPCDs가 *Staphylococcus aureus*와 *Salmonella enterica*에 대해 우수한 저해 활성을 보였다. 이러한 탄소점을 도입한 카라기난 기반 복합 필름은 두께와 기계적 물성이 대조구와 유사한 수준으로 유지되는 동시에 자외선 차단 성능과 항산화 활성이 크게 향상되어 약 88% 수준의 라디칼 소거능을 확보하였다. 특히 Zn-GPCDs 함유 필름은 GPCDs 함유 필름에서 나타난 명도 저하와 불투명성 증가를 유의적으로 개선하여, 우수한 UV 차단 효율과 내부 시인성 확보라는 상충되는 요구 조건을 동시에 충족하였다. 또한 나노 탄소점과 카라기난 매트릭스 간 분자 상호작용을 통해 필름의 기계적 안정성을 유지하면서도 유연성을 향상시키는 시너지 효과가 관찰되었다. 본 연구의 결과는 생강 껍질 유래 Zn-GPCDs는 친환경 다기능적인 나노 첨가제로서의 잠재력을 가지며, 개발된 카라기난 복합 필름이 식품 포장의 산화 및 미생물 억제를 위한 활성 포장 소재로서의 가능성을 제시한다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR068166).

참고문헌

1. Ncube, L.K., Ude, A.U., Ogunmuyiwa, E.N., Zulkifli, R. and Beas, I.N. 2020. Environmental impact of food packaging materials: A review of contemporary development from conventional plastics to polylactic acid based materials. *Materials* 13(21): 4994.
2. Liu, Y., Ahmed, S., Sameen, D.E., Wang, Y., Liu, R., Dai, J., Li, S., and Qin, W. 2021. A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based for food packaging application. *Trends Food Sci. Technol.* 112: 532-546.
3. Perera, K.Y., Jaiswal, A.K. and Jaiswal, S. 2023. Biopolymer-based sustainable food packaging materials: Challenges, solutions, and applications. *Foods* 12(12): 2422.
4. Riahi, Z., Khan, A., Lee, J.H., Rhim, J.-W., Shin, G.H., and Kim, J.T. 2025. Zero-waste development of sustainable carrageenan-based active packaging films by utilizing hydrothermally synthesized carbon dots and byproduct hydrochar. *Food Packag. Shelf Life* 52: 101665.
5. Cheng, C., Chen, S., Su, J., Zhu, M., Zhou, M., Chen, T. and Han, Y. 2022. Recent advances in carrageenan-based films for food packaging applications. *Front. Nutr.* 9: 1004588.
6. Dhilipkumar, T., Sadeq, A.M., Karuppusamy, P., Thiagarajan,

- S., Shyamalagowri, K., Oun, A.A. et al. 2025. Exploring recent advances in carrageenan-based films for sustainable food packaging applications. *Eur. Food Res. Technol.* 251(13): 3151-3173.
7. Cheng, C., Chen, S., Su, J., Zhu, M., Zhou, M., Chen, T. and Han, Y. 2024. Bioionic liquid-assisted transparent sodium alginate- κ -carrageenan-lignin composite films with excellent ultraviolet shielding, antioxidant, and antibacterial properties. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 12(10): 4314-4327.
 8. Riahi, Z., Khan, A., Hong, S.J., Rhim, J.-W., Shin, G.H., and Kim, J.T. 2025. Innovative dual-ligand approach for designing Zn-MOFs nanostructures for carrageenan-based active and intelligent packaging of fresh-cut fruits. *Food Chem.* 492: 145360.
 9. Manzoor, A., Khan, T., Lone, A.H., Haque, A., Banat, F. and Bano, S. 2025. Bioactive alginate and carrageenan nanocomposite packaging: A review of recent insights on fabrication techniques, applications and environmental concerns. *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.* 12: 101011.
 10. Jayakumar, A., Radoor, S., Shin, G.H., and Kim, J.T. 2024. Lemon peel-based fluorescent carbon quantum dots as a functional filler in polyvinyl alcohol-based films for active packaging applications. *Ind. Crops Prod.* 209: 117968.
 11. Liu, Y., Cui, Y., Zhang, H., Sun, Y., Zhao, Y. and Chen, G. 2023. Turning food waste into value-added carbon dots for sustainable food packaging application: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 137: 177-192.
 12. Shaukat, M.N., Nazir, A. and Fallico, B. 2023. Ginger bioactives: A comprehensive review of health benefits and potential food applications. *Antioxidants* 12(11): 2015.
 13. Holker, C.R., Kumar, K., Singh, L. and Sharanagat, V.S. 2019. Design, development and statistical optimization of ginger peeling machine. *CIGR J.* 21(3): 157-166.
 14. Raypah, M.E., Jamlos, M.F., Nugroho, A., Ahmad, H.F., Kozin, M. and Balakrishnan, V. 2025. One-step hydrothermal process of carbon dots derived from lemon and ginger juice: Synthesis and characterizations. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 100(9): 2601-2615.
 15. Bhavikatti, S.K., Zainuddin, S.L.A., Ramli, R.B., Nadaf, S.J., Dandge, P.B., Khalate, M. and Karobari, M.I. 2024. Green-synthesized carbon dots from ginger: Multifunctional agents against oral pathogens with biocompatibility in human gingival fibroblast cells. *Curr. Plant Biol.* 40: 100392.
 16. Dong, X., Liang, W., Meziani, M.J. and Sun, Y.P. 2020. Carbon dots as potent antimicrobial agents. *Theranostics* 10(2): 671-686.
 17. Ashraf, A., Ullah, H., Shah, A., Niazi, M.B.K., Nazir, A., Iqbal, S. et al. 2022. Zinc-doped carbon dots as effective blue-light-activated antibacterial agent. *J. Colloid Interface Sci.* 618: 70-82.
 18. Khan, S., Alam, F., Azam, A., Ahmad, J., Khan, A.U. and Khan, M. 2020. Antimicrobial activity and mechanisms of carbon quantum dot decorated modified zinc oxide nanoparticles against oral pathogenic bacteria. *Mater. Sci. Eng. C* 116: 111204.
 19. Li, Y., Zhang, R., Wang, X., Liu, Y., Chen, H. and Li, B. 2024. Carrageenan-based functional films hybridized with carbon dots and anthocyanins from rose petals for smart food packaging applications. *Int. J. Biol. Macromol.* 238: 124193.
 20. Balouiri, M., Sadiki, M. and Ibsouda, S.K. 2016. Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. *J. Pharm. Anal.* 6(2): 71-79.
 21. Li, H., Wang, R., Zhang, Z., Xu, G., Zhang, Y. and Liu, Y. 2022. Chitosan/gelatin-based multifunctional film integrated with green tea carbon dots to extend the shelf life of pork. *Food Packag. Shelf Life* 33: 100886.
 22. Jaishi, D.R., Ojha, I., Bhattarai, G., Baraili, R., Pathak, I., Ojha, D.R., Shrestha, D.K. and Sharma, K.R. 2024. Plant-mediated synthesis of zinc oxide (ZnO) nanoparticles using *Alnus nepalensis* D. Don for biological applications. *Heliyon* 10(21): e39255.
 23. Ji, Z., Sheardy, A., Zeng, Z., Zhang, W., Chevva, H., Allado, K., Yin, Z. and Wei, J. 2019. Tuning the functional groups on carbon nanodots and antioxidant studies. *Molecules* 24(1): 152.
 24. Agarwal, H., Nakara, A. and Shanmugam, V.K. 2022. A comprehensive review on zinc oxide nanoparticle production and the associated antibacterial mechanisms and therapeutic potential. *J. Biochem. Nanotechnol.* 23(3): 145-169.
 25. Kanmani, P. and Rhim, J.-W. 2014. Properties and characterization of bionanocomposite films prepared with various biopolymers and ZnO nanoparticles. *Food Sci. Biotechnol.* 23(3): 1083-1089.
 26. Khan, A., Riahi, Z., Kim, J.T. and Rhim, J.W. 2024. Carrageenan-based multifunctional packaging films containing Zn-carbon dots/anthocyanin derived from Kohlrabi peel for monitoring quality and extending the shelf life of shrimps. *Food Chemistry* 432: 137215.
 27. Riahi, Z., Khan, A., Rhim, J.-W., Shin, G.H., and Kim, J.T. 2024. Carrageenan-based active and intelligent packaging films integrated with anthocyanin and TiO₂-doped carbon dots derived from sweet potato peels. *Int. J. Biol. Macromol.* 259(2): 129371.
 28. El-Houssiny, A.S., Ward, A.A., Mostafa, D.M., Abd-El-Messieh, S.L., Abdel-Nour, K.N. and Darwish, M.M. 2016. Drug-polymer interaction between glucosamine sulfate and alginate nanoparticles: FTIR, DSC and dielectric spectroscopy studies. *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 7(2): 025014.
 29. Khan, A., Riahi, Z., Kim, J.T. and Rhim, J.W. 2024. Carboxymethyl cellulose/gelatin film incorporated with eggplant peel waste-derived carbon dots for active fruit packaging applications. *Int. J. Biol. Macromol.* 271(2): 132715.
 30. Riahi, Z., Khan, A., Ebrahimi, M., Rhim, J.-W., Shin, G.H. and Kim, J.T. 2025. Exploring sustainable carbon dots as UV-blocking agents for food preservation. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 24(1): e70192.

식품용 대용량 기구·용기의 용출 시험법 개선 연구

이정훈¹ · 이진규¹ · 안혜정² · 김준호² · 김준태^{1*}

¹경희대학교 식품영양학과

²한국건설생활환경시험연구원

Research on Improving the Migration Test Method for Large-capacity Food Equipment and Containers

Jung Hoon Lee¹, Jin Gyu Lee¹, Hye Jeong Ahn², Jun Ho Kim², and Jun Tae Kim^{1*}

¹Department of Food and Nutrition, Kyung Hee University, Seoul, Korea

²Korea Conformity Laboratories

Abstract According to current standards of the Ministry of Food and Drug Safety (MFDS) of Korea, migration tests for food containers are required to be conducted by filling the container completely with food simulants. However, for large-capacity containers, excessive solvent consumption not only causes economic, environmental, and practical problems but also results in a dilution effect in the volume to surface area ratio. To address these limitations, this study designed and validated alternative testing methods, such as partial filling, single-sided migration, and double-sided migration, by standardizing the volume-to-surface area ratio to 2 mL/cm². To intentionally increase the migration amounts, a comparative analysis was performed using 20 L high-density polyethylene (HDPE) containers containing 20% calcium carbonate (CaCO₃). When tested with a 4% acetic acid simulant, the overall migration was 17.9 mg ± 3.5 mg/L using the conventional filling method. However, the proposed methods recorded significantly higher concentrations of 42.6–45.7 mg/L. Furthermore, these alternative methods reduced solvent consumption to 1–7% of the conventional volume. Moreover, a ‘Tiered approach’ is introduced as a practical strategy, allowing for the selective and stepwise application of the most suitable test method depending on container characteristics. This framework is expected to foster a more scientifically rigorous, cost-effective, and environmentally sustainable food safety management system.

Keywords Migration Test, Large-capacity Containers, Alternative testing methods, Food safety management, Tiered approach

서론

식품용 기구 및 용기·포장은 식품의 생산부터 소비에 이르는 전 과정에서 식품과 직접 접촉하기 때문에¹⁾ 재질에서 유래한 유해물질이 식품으로 이행(Migration)될 가능성이 있어 이에 대한 안전관리가 요구된다^{2,3,4)}. 특히, 최근 1인 가구의 증가와 배달 및 외식 산업의 발달 등 소비 트렌드의 변화로 인해 가정과 업소 등에서 식품을 장기간 보관하거나 대량으로 조리하기 위한 대용량 기구 및 용기의 사용이

급증하고 있다^{5,6)}. 하지만 현행 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」에 규정된 용출 시험법에서는 ‘채울 수 있는 시료(용기 등)’의 경우 모사용매를 가득 채워서 시험하도록 규정하고 있어⁷⁾ 대용량 제품을 평가하는데 물리·화학적 한계점을 가지고 있다. 첫째, 부피가 큰 대용량 기구·용기 제품들은 가온 조건(70°C 또는 100°C)을 수행하기 위한 실험실용 오븐에 물리적으로 수용되지 않아, 규정된 시험의 수행 자체가 불가능한 실용적 한계가 있다. 둘째, 수습에서 수백 리터에 달하는 용기를 가득 채우기 위해 막대한 양의 침출용매가 소모되며, 이는 시험 비용의 급증과 함께 다량의 폐액 발생으로 이어져 심각한 경제적·환경적 부담을 초래한다. 셋째, 다량의 용매가 충전 됨에 따라 검체의 총 중량이 과도하게 증가하여 시험자가 취급하는데 어려움이 있고, 실험 중 안전사고 발생 위험이 높아진다. 마지막으로, 용기의 용

*Corresponding Author: Jun Tae Kim
Department of Food and Nutrition, Kyung Hee University, Seoul, Korea
Tel: +82-2-961-9408
Email: jtkim92@khu.ac.kr

량이 커질수록 접촉 표면적 대비 사용되는 용매의 부피가 크게 증가함에 따라 용출된 물질의 최종 농도(mg/L)의 '희석효과 (Dilution Effect)'가 발생할 수 있다. 이는 제품의 잠재적 위해성을 과소평가하게 만들 수 있는 과학적 오류가 될 수 있다. 미국, 유럽연합(EU), 일본 등의 주요 국가는 용출 시험의 신뢰성을 확보하기 위해 표면적 대 부피 비율(V/S Ratio)을 표준화하고 있으며, 대용량 용기의 경우 일정 크기의 시편을 제작하여 이 비율에 따라 용출 시험을 진행하는 방법을 채택하고 있다 (Table 1)⁸⁻¹³. 따라서 국내에서도 대용량 용기에 대한 현행 '가득 채우는 방법'의 한계를 극복하고, 일관된 용출 조건을 보장할 수 있는 합리적인 시험법 개선이 필요한 실정이다.

본 연구는 표면적 대 부피 비율을 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」의 표준 수치인 1 cm² 당 2 mL로 고정하여 세 가지 개선 시험법을 설계하였다. 이는 단순히 시험의 편의성을 높이는 것을 넘어, 용기의 크기가 커질수록 발생하는 희석 효과를 배제하고 모든 크기의 용기에 대해 동일한 척도로 안전성을 평가할 수 있는 기반을 제공한다. 개선 시험법으로는 1) 부분 용출법, 2) 단면 용출법(용출 셀을 이용한 용출 방법), 3) 양면 용출법(절단 시편을 침지하는 방법) 등 세 가지 시험법을 설계하였다 (Fig. 1). 이를 바탕으로 현행 시험법과 개선 시험법 간의 총용출량을 비교·분석하고, 실험실 간 교차 검증을 통해 새로운 시험법의 타당성과 재현성을 입증함으로써 대용량 기구 및 용기의 용출 시험에 관하여 합리적인 기준·규격 개정안을 제시하고자 한다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

본 연구에서는 대용량 식품용 기구 및 용기·포장의 용출 시험법 개선안을 검증하기 위해 국내 유통 중인 주요 플라스틱 재질 제품을 선정하였다. 폴리프로필렌 (Polypropylene, PP) 재질의 대용량 밀폐용기 (4.5 L, 12 L, 16 L), 폴리에틸렌테레프탈레이트 (Polyethylene terephthalate, PET) 재질의 용기(4.4 L, 10 L), 폴리프로필렌과 엘라스토머 (Elastomer)가 혼합된 냉동밀폐용기 (3.2 L, 6 L) 등이며, 해당 재료들은 인근 생활용품 전문 판매점(다이소)에서 구매하였다. 또한, 현행 시험법(가득 채우는 방법)과 개선 시험법 간의 상관성 및 희석효과(Dilution Effect)를 명확히 입증하기 위해, 탄산칼슘(CaCO₃)을 20% 비율로 혼합하여 용출량을 인위적으로 증가시킨 20 L 용량의 고밀도 폴리에틸렌(High density polyethylene, HDPE) 용기를 사출 제작하여 실험에 사용하였다. 침출용매(Food Simulant)로는 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」에 규정된 물, 4% 초산, 20% 에탄올 및 n-헵탄을 사용하였다.

2. 3D 스캐닝을 이용한 표면적 및 부피 측정

복잡한 굴곡이 있는 원통형이나 비정형 형태를 가진 대용량 용기는 전통적인 기하학적 수치 계산으로 실제 접촉 면적을 정밀하게 산출하는 데 한계가 있다. 본 연구에서는 이러한 오차를 최소화하고 시험의 객관성을 확보하기 위해 3D 스캐닝 장비(CR-Scan Lizard 3D Scanner, Creality, China)와 분석 프로그램(Mesh Lab, Canada)을 도입하였다¹⁴. 용기 내부의 디지털 모델을 생성한 후, 전체 스캔 면적(S_{mesh})에서 식품과 접촉하지 않는 상부인 윗면 면적(S_{upper})을 제외하여 실제 식품 접촉 표면적(S_{total})을 다음 (1)과 같이 산출하였다.

$$S_{total} = S_{mesh} - S_{upper} \quad (1)$$

이후, 표면적 대 부피 비율(V/S)을 2 mL/cm²로 고정하기 위해, 액체의 높이를 미세 조정하며 수식 (2)에 의해 산출된 이론적 필요 용매량($V_{calculated}$)과 실제 내부 부피(V_{mesh})가 일치하는 지점을 찾는 반복 최적화 과정을 수행하여 최적 높이(h)를 산출하였다. 조정된 최적 높이(h)에서의 필요 용매량($V_{calculated}$)이 실제 부피(V_{mesh})와 오차 범위 2% 이내에서 일치할 때의 수치를 최종 시험 조건으로 확정하였다.

$$V_{calculated} = S_{total} \times 2 \text{ mL/cm} \quad (2)$$

3. 용출시험법의 설계 및 방법

대용량 기구 및 용기에 대한 현행 '가득 채우는 방법'의 한계를 해결하고자, 본 연구에서는 대조군인 현행법과 표면적 대 부피 비율 (2 mL/cm²)을 반영한 세 가지 개선 시험법을 설계했다. 실험은 현행법(대조군)과 세 가지 개선 시험법(부분 용출법, 단면 용출법, 및 양면 용출법)을 포함한 총 4가지 방법으로 수행되었다. 용출 조건은 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」에 의거하여 재질 별 기준 온도(70°C 또는 100°C)에서 30분간(n-헵탄의 경우 25°C에서 1시간) 방치하는 것을 원칙으로 하였다⁷.

현행법인 '가득 채우는 방법(Filling Method)'은 용기 내부에 침출용매를 용량만큼 전량 충전하여 용출을 진행하는 방식으로 대조군으로 활용하였다. 이에 대응하는 '부분 용출법(Partial Filling Method)'은 용기를 절단하지 않고 원형을 유지한 상태에서 앞서 산출된 최적 높이(h)까지 용매를 일정량만 채움으로써 단위 면적당 용매량을 2 mL/cm²로 고정하였다. '단면 용출법 (Single-sided Migration Method)'은 시료의 식품 접촉 단면만을 선택적으로 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 자체 제작한 스테인리스스틸 재질의 단면 용출 셀(내경 112.8 mm, 높이 35 mm, 면적 99.88 cm²)을 사용하였다. 시편과 용출셀 접합부의 누수를 방지하기 위해 내화

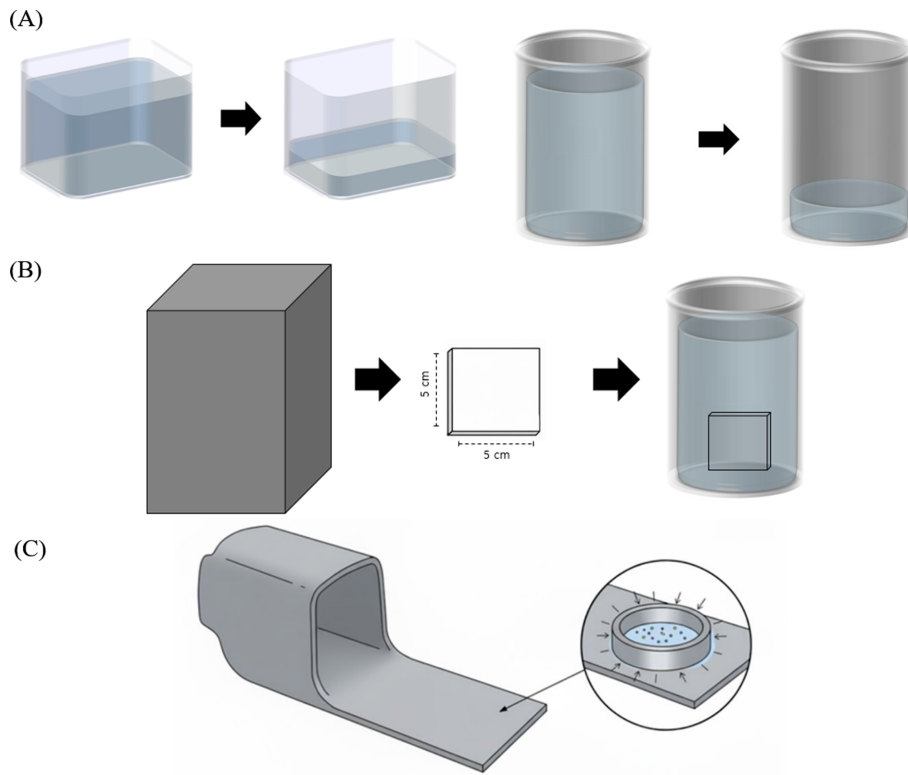


Fig. 1. Schematic representation of the three alternative migration testing methods for large-capacity containers: (A) partial filling, (B) double-sided migration, and (C) single-sided migration using a migration cell.

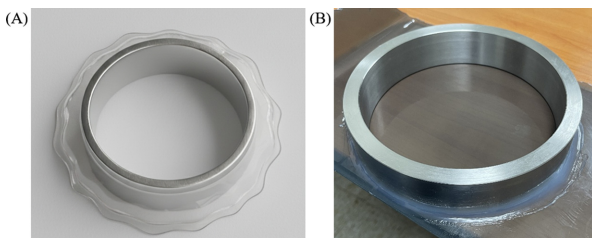


Fig. 2. Illustration (A) and actual image (B) of the migration cell for single-sided migration testing.

학성 실리콘을 도포한 뒤 48시간 동안 충분히 건조하였으며, 실리콘 성분에 의한 간섭을 보정하기 위해 공시험(Blank Test)을 병행하였다. 셀 내부 표면적을 기준으로 2 mL/cm² 비율로 용매 204 mL를 주입하였다. ‘양면 용출법(Double-sided Migration Method)’은 시료를 일정한 크기 (5 cm × 5 cm)로 절단한 시편 2개를 제작하여, 시편 양면의 전체 표면적 100 cm²에 대응하는 200 mL의 용매를 사용하는 완전 침지 방식(Total immersion)으로 설계하였다.

4. 중 용출량(Overall Migration) 및 과망간산칼륨(KMnO₄) 소비량 측정

각 시험법을 통해 조제된 시험 용액 내 잔류물 총량을 정량 하기 위해 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」의 총용

출량 시험법을 준수하여 분석을 수행하였다^{7,15}). 먼저, 조제된 시험 용액 200~300 mL을 미리 항량한 증발 접시에 취한 후, 수욕 상에서 용매를 완전히 증발 건조시켰다. n-헥탄을 침출용액으로 사용한 경우, 규정에 따라 시험 용액을 감압 농축 장치를 이용해 2~6 mL로 농축한 후 증발 접시에 옮겨 동일한 과정을 수행하였다. 증발이 완료된 잔류물은 105°C 오븐에서 2시간 동안 가열 건조하여 완전히 고형화 하였으며, 이후 실리카겔이 충전 된 데시케이터 내에서 30분간 방냉 과정을 거쳤다. 최종적으로 침출용액만을 사용한 공 시험(Blank Test) 결과값을 반영하여 최종 총용출량(mg/L)을 산출하였다. 산출식은 다음 (3)과 같다.

$$\text{Overall Migration (mg/L)} = \frac{(a - b) \times 1,000}{V} \tag{3}$$

여기서 *a*는 본시험의 잔류물 무게(mg), *b*는 공시험의 잔류물 무게(mg), *V*는 취한 시험용액의 양(mL) 이다.

물 침출액으로 이행된 유기물 및 환원성 물질의 총량을 평가하는 과망간산칼륨(KMnO₄) 소비량 측정은 산화 적정법을 이용하였다^{7,16}). 자세한 방법으로, 삼각 플라스크에 물 100 mL에 1:3으로 희석한 황산 5 mL 및 0.002 M 과망간산칼륨 용액 5 mL을 넣고 끓인 후 액을 버리고 물로 씻는다. 이 삼각플라스크에 시험용액 100 mL를 취하여 1:3으로 희

석한 황산 5 mL을 가하고 다시 0.002 M 과망간산칼륨용액 10 mL를 가하여 5분간 끓인 후 가열을 중지하고 0.005 M 수산화나트륨용액 10 mL을 가하여 탈색시킨 후 0.002 M 과망간산칼륨용액으로 엷은 홍색이 남을 때까지 적정한다. 같은 방법으로 공시험(Blank Test)을 행하고 다음 식(4)에 따라 과망간산칼륨소비량을 구한다.

$$\text{KMnO}_4 \text{ consumption (mg/L)} = \frac{(a-b) \times f \times 1,000 \times 0.316}{100} \quad (4)$$

여기서 a , b 는 각각 본시험, 공 시험의 0.002 M 과망간산칼륨 용액의 적정량 (mL)이고, f 는 0.002 M 과망간산칼륨 용액의 역가이다.

5. 통계 분석 및 기관 간 교차 검증

제안된 개선 시험법의 재현성과 객관적 신뢰성을 확보하기 위해 공인된 시험검사기관 3곳을 대상으로 교차 검증(Inter-Laboratory Comparison Test)을 수행하였다¹⁷⁾. 본 교차 검증은 구체적인 표준시험절차서(SOP)를 제공하여 실험의 일관성을 기하였다. SOP의 주요 내용은 모든 기관에 동일한 로트(lot)의 혼합 HDPE시편을 배포하여 4% 초산을 용매로 한 총용출량 시험을 의뢰하는 것이며, 대조군인 현

행 ‘가득 채우는 방법’과 본 연구에서 설계한 세 가지 ‘개선 시험법 (부분 용출법, 양면 용출법)’을 대상으로 하였다. 시험의 기본 원리와 용출 조건은 앞서 2.3절에서 기술한 설계 방식 및 「식품용 기구 및 용기·포장 공전」의 총용출량 시험법을 따랐으며, 모든 용출 과정은 데이터의 신뢰성을 위해 3회 반복 실시하였다. 수집된 결과는 분산분석(ANOVA)을 통해 실험실 간 편차(Between-Lab Variance) 및 반복 오차를 비교하여 평균값의 유의적 차이를 통계적으로 검증하였다.

결과 및 고찰

1. 3D 스캐닝을 이용한 표면적 및 부피 측정

형태가 복잡하고 굴곡이 있는 원통형이나 비정형 대용량 용기의 정확한 표면적과 부피 산출을 위해 도입된 3D 스캐닝 기술은 표준 용출 비율($V/S = 2 \text{ mL/cm}^2$)을 수립하는데 유효한 것으로 나타났다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 10 L PET 용기의 경우, 3.7 cm의 높이를 설정하여 반복 최적화 과정을 수행한 결과, 윗면(390 cm^2)을 제외한 실제 접촉 표면적(S_{total})은 610 cm^2 로 산출되었다. 이에 따른 이론적 필요 용매량($V_{\text{calculated}}$)은 1,220 mL였으며, 3D 모델 상에서 측정된 실제 부피(Mesh Volume)는 1,247 mL로 나

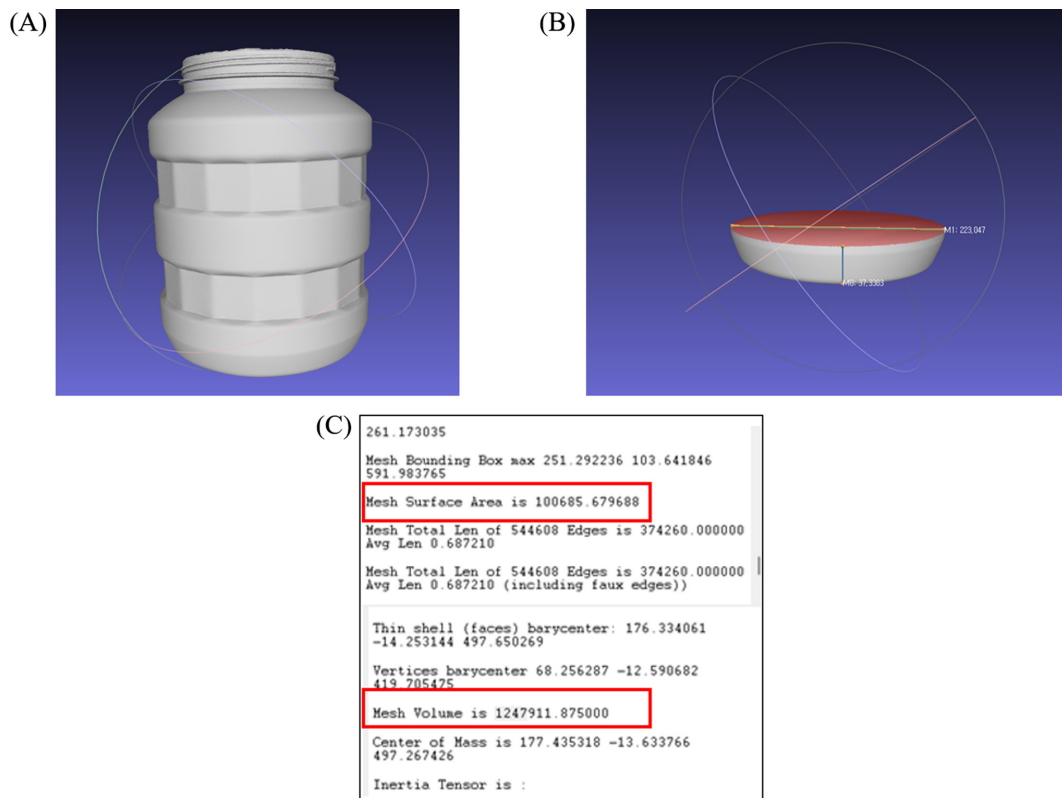


Fig. 3. 3D scanned images of a 10 L PET container, (A) 3D scan of the entire container, (B) scanned image for calculating the diameter and height after sectioning, and (C) surface area and volume measurements via software after sectioning.

Table 1. Regulatory standards and surface-to-volume ratio by countries

Region	Regulatory standards	Surface-to-volume ratio (V/S)
South Korea	Standard and Specifications for Utensils, Containers and Packages	2 mL/cm ²
European Union (UN)	(EC) No.1935/2004 Commission Regulation (EU) No. 10/2011 EN 1186	100 mL/2 dm ² (0.5 mL/cm ²)
USA	FDA 21 CFR	10 mL/in ² (1.55 mL/cm ²)
Japan	Public Notice of the Ministry of Health and Welfare No. 370, 1959	2 mL/cm ²
China	National Food Safety Standard (GB31604)	6 dm ² /kg (L) (1.66 mL/cm ²)

타나 약 2% 내외의 정밀한 일치도를 보였다. 또한, 자체 제작한 20 L 용기(HDPE + 탄산칼슘)의 경우, 실제 표면적 (S_{total})은 709.5 cm²에 대해 높이를 2.96 cm로 설정하였을 때 실제 부피가 1,402 mL로 측정되어 목표치인 1,420 mL와 단 1.32%의 오차를 나타냈다. 이러한 결과는 3D 스캐닝 기술이 용기의 크기와 형태에 관계없이 표준 용출 조건 (2 mL/cm²)을 수립하는 데 유효한 수단임을 입증한다.

2. 시험법에 따른 용매 소비량 및 경제적, 환경적 효율성 평가

현행 ‘가득 채우는 방법’과 제안된 세 가지 개선 시험법의 침출용매 소비량을 비교 분석한 결과, Table 2에서 보이는 바와 같이 대체 시험법 도입 시 획기적인 용매 절감 효과가 확인되었다. 특히 16 L 대용량 밀폐용기의 경우, 현행법 적용 시 16,200 mL의 대량 용매가 소요되는 반면, ‘부분 용출법’은 약 1,800 mL(현행 대비 11.1%), ‘양면/단면 용출법’은 단 200 mL(현행 대비 1.23%)의 용매만으로 시험 수행이 가능하였다. 이외 다양한 유통 제품을 대상으로 분석한 결과, ‘부분 용출법’은 현행 대비 약 11.1%에서 45% 수준으로, ‘양면/단면 용출법’은 6.25%에서 1.23% 수

준까지 용매 소비를 줄일 수 있었다. 특히 20 L 이상의 대형 용기에서는 용매 사용량을 기존 대비 0.8% 수준까지 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 시험 비용의 감소뿐 아니라 실험 후 발생하는 다량의 폐액을 억제함으로써 경제적·환경적 부담을 완화하고 실험실 내 안전사고 위험을 낮추는 실무적 이점을 동시에 제공한다.

3. 제작 용기를 통한 ‘희석 효과’ 입증 및 개선 시험법의 타당성

4 종의 모사 용매를 사용하여 시험법 간 총용출량을 비교했을 때, 유통 중인 대부분의 제품은 이미 품질이 안정화되어 있어 모든 제품에서 안전 기준인 30 mg/L이하의 값을 보였지만(Table 3), 시험법 간의 명확한 수치적 변별력을 확인하기에는 한계가 있었다. 이에, 유통 제품의 변별력 한계를 극복하고 개선 시험법의 효과성을 과학적으로 입증하기 위해, 탄산칼슘(CaCO₃)을 혼입하여 의도적으로 과용출을 유도한 20 L HDPE 제작 용기를 활용하였다¹⁸⁾. 실험의 정확성을 위해 각 시험법 당 10회 반복 수행을 진행하였다(Fig. 4).

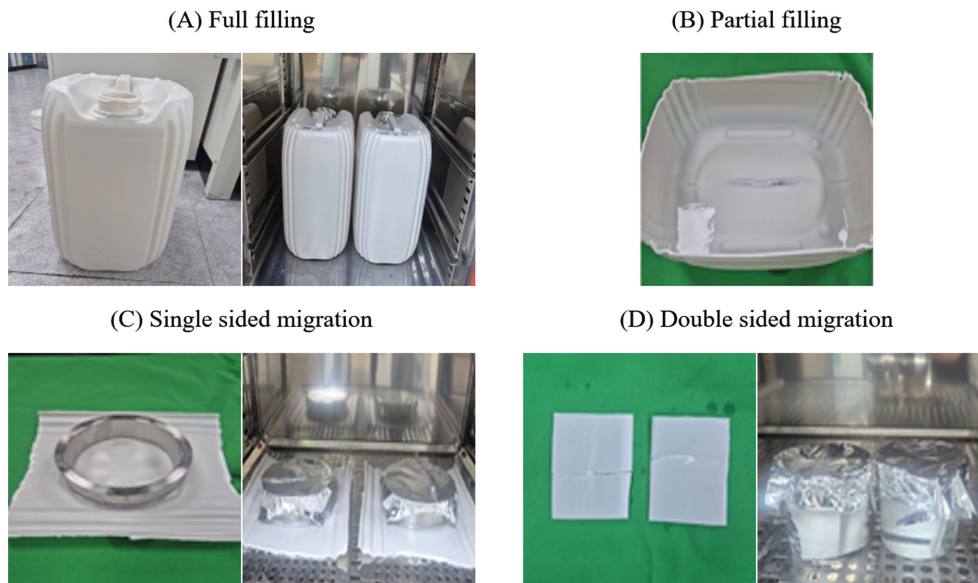
20 L 제작 용기의 경우, 현행법은 24,420 mL의 많은 용매

Table 2. Comparison of simulant consumption between current and alternative migration testing methods for commercial containers

Samples	Test Method	Required simulant volume (mL)	Ratio to current (%)
Large Airtight Container (16 L)	Full Filling	16,000	100
	Partial Filling	1,800	11.11
	Double-sided	200	1.25
Large Airtight Container (12 L)	Full Filling	12,000	100
	Partial Filling	1,800	15
	Double-sided	200	1.6
Storage Container (6 L)	Full Filling	6,000	100
	Partial Filling	1,920	32
	Double-sided	200	3.33
Freezer Airtight Container (3.2 L)	Full Filling	3,200	100
	Partial Filling	1,450	45
	Double-sided	200	6.25
Liquor Jar (4.4 L)	Full Filling	4,400	100
	Partial Filling	900	20
	Double-sided	200	4.54

Table 3. KmnO4 consumption and overall migration of various food containers by migration test methods

Samples	Test Method	KMnO ₄ Consumption (mg/L)	Overall Migration (mg/L)			
			Water	4% Acetic acid	20% Ethanol	n-Heptane
Large Airtight Container (16 L)	Full Filling	1 ± 0.36	2 ± 0.58	3 ± 1.15	3 ± 1.00	7 ± 1.15
	Partial filling	1 ± 0.00	3 ± 1.70	3 ± 1.00	1 ± 0.00	1 ± 0.00
	Double-sided	1 ± 0.00	3 ± 1.53	7 ± 1.15	5 ± 0.00	10 ± 2.00
Large Airtight Container (12 L)	Full Filling	1 ± 0.00	2 ± 0.58	2 ± 0.58	4 ± 1.53	7 ± 0.58
	Partial filling	1 ± 0.00	3 ± 2.83	6 ± 6.72	1 ± 0.00	6 ± 4.11
	Double-sided	1 ± 0.00	6 ± 2.00	8 ± 2.00	15 ± 4.51	16 ± 5.13
Storage Container (6 L)	Full Filling	1 ± 0.00	4 ± 0.58	2 ± 1.15	4 ± 2.00	8 ± 0.58
	Partial filling	1 ± 0.47	4 ± 2.16	5 ± 0.82	2 ± 0.82	6 ± 7.07
	Double-sided	1 ± 0.00	4 ± 1.73	5 ± 2.31	6 ± 3.46	19 ± 3.06
Freezer Airtight Container (3.2 L)	Full Filling	2 ± 0.00	2 ± 0.58	5 ± 1.16	5 ± 0.58	7 ± 1.15
	Partial filling	3 ± 0.47	3 ± 0.58	8 ± 1.53	5 ± 1.15	6 ± 1.53
	Double-sided	2 ± 0.00	3 ± 2.31	9 ± 3.61	6 ± 2.31	9 ± 3.01
Liquor Jar (4.4 L)	Full Filling	1 ± 0.00	2 ± 0.58	2 ± 1.15	4 ± 3.46	3 ± 1.15
	Partial filling	1 ± 0.00	2 ± 0.58	4 ± 1.53	5 ± 1.00	6 ± 2.00
	Double-sided	1 ± 0.00	3 ± 2.31	3 ± 1.15	5 ± 3.06	6 ± 2.00

**Fig. 4.** Migration testing of the fabricated containers: (A) full filling, (B) partial filling, (C) single-sided migration, and (D) double-sided migration.

가 소요되었고 표면적 대 용매 비율(V/S)이 5.325 mL/cm²에 달하는 반면, 개선 시험법들은 표준 비율인 2 mL/cm²을 엄격히 준수하였다(Table 4). 또한, Table 5에서 보이는 바와 같이 4% 초산 용매 조건에서 현행법의 총용출량은 17.9 ± 3.5 mg/L로 나타났지만, 부분 용출법(42.6 ± 5.5 mg/L), 단면 용출법(45.7 ± 6.9 mg/L), 양면 용출법(43.6 ± 7.2 mg/L)은 모두 기준치인 30 mg/L을 초과하여 나타났다. 이는 개선 시험법들에 비해 가득 채우는 방법의 표면적 대 용매 비율이 2.4-2.6배 낮기 때문에 총용출량의 농도도 약 2.4배

~2.6배 희석되는 결과를 보였다.

특히 이러한 경향성은 외부 3개 공인 기관의 교차 검증 결과에서도 일관되게 나타났다(Table 6). 이는 제안된 개선 시험법이 단순히 특정 실험실의 결과에 국한되지 않고, 국가 공인 시험기관의 표준 업무 환경에서도 동일하게 재현될 수 있는 높은 신뢰성과 객관적 타당성을 확보했음을 의미한다. 결과적으로 개선 시험법은 용매 사용량을 획기적으로 줄이면서 과학적 타당성을 동시에 확보할 수 있는 합리적인 대안으로 판단된다.

Table 4. Comparison of consumption of simulant and volume to surface area ratio between current and alternative testing methods for fabricated containers

Parameters	Test method			
	Full filling	Partial Filling	Single sided migration	Double sided migration
Width (cm)	22.2	22.2	-	5
Length (cm)	27.5	27.5	-	5
Height (cm)	40	2.96	-	-
Surface Area (cm ²)	4,586	710	100	100
Volume (mL)	24,420	1,402	-	-
Calculated volume (2 mL/cm ²) (mL)	9,172	1,420	200	200
Ratio to current (%)	100	5.81	0.82	0.82
V/S Ratio	5.325	2	2	2

Table 5. Comparison of overall migration (mg/L) from 20% CaCO₃ HDPE containers by migration test methods (n = 10)

Simulant	Test Methods			
	Full filling	Partial filling	Single sided migration	Double sided migration
Water	13.1 ± 2.7 ^{ab,*}	13.5 ± 3.9 ^{ab}	15.0 ± 5.0 ^b	10.7 ± 2.9 ^b
4% Acetic acid	17.9 ± 3.5 ^a	42.6 ± 5.5 ^b	45.7 ± 6.9 ^b	43.6 ± 7.2 ^c
20% Ethanol	5.4 ± 2.1 ^a	8.3 ± 3.2 ^b	10.6 ± 3.6 ^b	4.6 ± 2.8 ^a
n-Heptane	6.3 ± 2.3 ^a	6.9 ± 3.4 ^a	14.2 ± 5.9 ^b	9.4 ± 2.1 ^b

*Different letters in the same row indicate a significant difference at $p < 0.05$ by Duncan's multiple range test.

Table 6. Inter-laboratory comparison results of overall migration in 4% acetic acid by test methods (n=3)

Laboratory	Test Methods		
	Full filling	Partial filling	Double sided migration
A	13.3 ± 2.5 ^{a,*}	40.7 ± 5.0 ^b	39.3 ± 6.4 ^b
B	7.7 ± 2.1 ^a	65.3 ± 2.5 ^c	44.3 ± 6.5 ^b
C	13.4 ± 1.5 ^a	44.1 ± 3.6 ^b	45.2 ± 3.8 ^b

*Different letters in the same row indicate a significant difference at $p < 0.05$ by Duncan's multiple range test.

결론 및 요약

본 연구는 최근 사용이 급증하고 있는 대용량 식품용 기구 및 용기·포장을 대상으로, 현행 '가득 채우는 방법'이 가진 물리적, 경제적, 환경적 한계를 개선하고자 수행되었다. 연구의 핵심은 용기의 크기와 관계없이 동일한 표면적 대 부피 비율($V/S = 2 \text{ mL/cm}^2$)을 적용하는 것이며, 이를 기반으로 세 가지 대체 시험법 (부분 용출법, 단면 용출법, 양면 용출법)을 설계하고 그 타당성을 검증하였다. 본 연구를 통해 도출된 주요 결론은 다음과 같다. 첫째, 3D 스캐닝 기술은 통한 접촉 면적 산출의 정밀성을 확보하였다. 비정형 대용량 용기의 복잡한 내부 구조를 디지털화하여 실질적인 접촉 면적을 산출한 결과, 표준 용출 조건을 수립하는

데 있어 높은 객관성을 확보할 수 있었다. 이는 향후 대용량 용기 안전성 평가의 기술적 기반이 될 것이다. 둘째, 제안된 개선 시험법들은 경제적, 환경적 효율성을 입증하였다. 개선 시험법 적용 시 현행법 대비 침출 용매 사용량이 획기적으로 절감되었으며, 특히 20 L 이상의 대용량 용기에서는 용매 소비량을 최대 1% 미만 수준으로 낮출 수 있었다. 이는 검사 비용 절감은 물론 폐액 발생량 감소에 따른 환경적 부담 완화 측면에서 유의미한 성과로 판단된다. 셋째, 일정한 '표면적 당 부피 비율'을 통해 시험 결과에 일관성을 확보할 수 있었다. 4% 초산 용출 실험 결과, 현행법상 '적합'으로 판정될 수 있는 시료($18 \pm 3.45 \text{ mg/L}$)가 표준 비율(2 mL/cm^2)을 적용한 개선 시험법에서는 모두 기준치를 초과하는 결과($43\sim 46 \text{ mg/L}$)를 나타냈다. 이는 실제 사용 환경에 비해 다소 가혹한 조건일 수 있으나 결과의 일관성을 확보할 수 있으며 용기의 크기나 형태에 관계 없이 제품에 대해 동일한 척도로 안전성을 평가할 수 있는 기반을 마련해 준다.

다만, 본 연구에서 제안한 시험법의 실무적 완성도를 높이기 위해서는 대용량 기구 및 용기·포장의 제조 공정 특성에 따른 샘플링의 대표성 확보가 추가로 검토되어야 한다. 대용량 제품은 성형 방식의 특성상 용기의 위치(상·중·하단 등)에 따라 물성이나 두께의 차이가 발생할 수 있으며, 이는 용출 결과에 영향을 미칠 가능성이 있다. 본 연구에서는 개선 시험법의 원리와 효율성 입증에 집중하였으나, 향후

연구 및 실제 제도화 과정에서는 용기 내 여러 지점의 시편을 채취하여 평균값을 산출하거나 위치 별 편차를 보정하는 등 정밀한 샘플링 프로토콜이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2025년도 식품의약품안전처의 연구개발비(식품용 대용량 기구·용기의 용출시험법 개선 연구, 25192첨포안009)로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Barnes, K. A., Sinclair, R., & Watson, D. H. (2007). Chemical Migration and Food Contact Materials. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, pp. 25-50.
- Paseiro-Cerrato R, DeJager L, Begley TH. (2019). Assessment of the Impact of Accelerated Migration Testing for Coated Food Cans Using Food Simulants. *Molecules*. Aug 28; 24(17): 3123.
- Tang, C., et al. (2023). Evaluation and identification of chemical migrants leached from baby food pouch packaging. *Chemosphere*, Volume 340, 139758.
- Yan Li. (2020). Migration of metals from ceramic food contact materials. 1: Effects of pH, temperature, food simulant, contact duration and repeated-use. *Food Packaging and Shelf Life*, volume 24, 100493.
- Korea Agro-Fisheries & Food Trade Corporation (2024). *Food & Food Service Statistics*, 11-15430000-000862-10.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). (2023). *Production Performance of Food, Health Functional Food, and Processed Livestock Products*, 11-1470000-001922-10.
- Ministry of Food and Drug Safety (MFDS). (2024). *Standards and Specifications for Utensils, Containers and Packages*. Osong, Korea.
- European Commission. (2011). Commission Regulation (EU) No 10/2011 of 14 January 2011 on plastic materials and articles intended to come into contact with food. *Official Journal of the European Union*, L 12/1.
- Simoneau, C (2009). Guidelines on testing conditions for articles in contact with foodstuffs. *JRC Scientific and Technical Reports*.
- European Union (2004). Regulation (EC) No 1935/2004 of the European Parliament and of the council of 27 october 2004, *Official Journal of the European Union*.
- U.S. Food and Drug Administration. (2023). *Code of Federal Regulations, Title 21, Part 177 - Substances for Use as Basic Components of Single and Repeated Use Food Contact Surfaces*. Washington D.C., USA.
- Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan. (1959). *Public Notice of the Ministry of Health and Welfare No. 370: Specifications and Standards for Foods, Food Additives, etc.* Tokyo, Japan.
- National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. (2015). GB 31604.1-2015: *National Food Safety Standard - General Rules for Migration Test of Food Contact Materials and Articles*. Beijing, China.
- Igathinathane, C., Davis, J. D., Purswell, J. L., & Columbus, E. P. (2010). Application of 3D scanned imaging methodology for volume, surface area, and envelope density evaluation of densified biomass. *Bioresource Technology*, 101(11), 4220-4227.
- Shin, C., et al. (2021). Migration of substances from food contact plastic materials into foodstuff and their implications for human exposure. *Food and Chemical Toxicology*, 154, 112373.
- Yun, H. J., et al. (2024). Investigation on the Safety of Biodegradable Synthetic Resins for Food. *Journal of Food Hygiene and Safety*, 39(2), 95-101.
- ISO/IEC 17043:2023. *Conformity assessment — General requirements for the competence of proficiency testing providers*. International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission.
- Fredd, C. N., & Fogler, H. S. (1998). The kinetics of calcite dissolution in acetic acid solutions. *Chemical Engineering Science*, 53(22), 3863-3874.

투고: 2026.04.07 / 심사완료: 2026.04.14 / 게재확정: 2026.04.20

Recent Advances in High-Barrier Food Packaging Based on Mono-material and Natural Materials

Youngjin Cho*

Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, Wanju 55365, Republic of Korea

Abstract The transition toward sustainable food packaging has intensified over the past decade, driven by regulatory pressure and environmental concerns associated with plastic waste. The increasing demand for sustainable food packaging has driven significant research into eco-friendly high-barrier materials capable of replacing conventional multilayer plastics. This paper provides a comprehensive analysis of recent advances in mono-material and natural-material-based food packaging systems, focusing on their barrier performance, material design strategies, and industrial applicability. Fundamental barrier mechanisms, including diffusion, solubility, and tortuous path effects, are discussed in relation to polymer structure and morphology. The barrier properties of major material groups, such as polyethylene (PE), polypropylene (PP), polylactic acid (PLA), cellulose-based materials, and nanocomposites, were compared and analyzed. Advanced technologies, including inorganic coatings (SiO_x, AlO_x) and bio-based coatings, are critically discussed as strategies to overcome intrinsic limitations of bio-based polymers. Furthermore, the paper examines recyclability and life cycle assessment (LCA) in the context of emerging circular economy policies. Finally, key challenges and future research directions are outlined, emphasizing scalable manufacturing, multifunctional materials, and integration into existing industrial systems.

Keywords High-barrier Food Packaging, Mono-material, Natural material, Nanocomposites, Sustainability

Introduction

Food packaging plays a critical role in preserving food quality, extending shelf life, and ensuring food safety. Conventional high-barrier packaging systems, typically based on multilayer combinations of polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyethylene terephthalate (PET), and ethylene vinyl alcohol (EVOH), have been widely used due to their superior oxygen and moisture barrier properties. However, their heterogeneous structure renders them incompatible with current mechanical recycling systems, leading to significant material losses and environmental burden¹.

In recent years, increasing environmental concerns, plastic waste accumulation, and implementation of regulations—such as the European Union's Packaging and Packaging Waste Regulation (PPWR)—have accelerated the transition toward sustainable packaging solutions. In particular, recent policy within the European Union have emphasized the transition toward recyclable and mono-material packaging systems. This

concept of a circular economy has emphasized the need for materials that are recyclable, reusable, or biodegradable while maintaining functional performance.

Currently, two major approaches have emerged as promising alternatives: (i) mono-material packaging systems, which utilize a single polymer family to enable recyclability, and (ii) natural material-based systems, which employ renewable and biodegradable polymers such as cellulose, starch, chitosan, and polylactic acid (PLA). As a result, significant research efforts over the past decade have focused on developing mono-material and bio-based alternatives. However, these systems often suffer from inferior barrier properties compared to conventional multilayer structures.

To overcome these limitations, significant research efforts have focused on enhancing barrier performance through nanocomposite design, surface coatings, and structural engineering. Despite these advances, a fundamental challenge persists: achieving high barrier performance comparable to conventional multilayer systems while maintaining recyclability. Mono-material systems, particularly those based on polyolefins, offer improved recyclability but suffer from inherently poor oxygen barrier properties². In contrast, natural materials such as cellulose exhibit excellent oxygen barrier performance but are highly sensitive to moisture³⁻⁴. This fundamental

*Corresponding Author: Dr. Youngjin Cho
Food Safety and Distribution Research Group, Korea Food Research Institute, Wanju 55365, Jeollabuk-do, Republic of Korea
Tel: +82-63-219-9428
E-mail: yjcho74@kfri.re.kr

trade-off has driven the development of hybrid strategies combining structural modification, nanocomposite engineering, and coating technologies⁵.

This review aims to provide a comprehensive and critical overview of recent developments in mono-material and natural-material-based high-barrier food packaging systems, with particular emphasis on barrier mechanisms, quantitative performance evaluation, and industrial applicability.

Barrier Mechanisms and Structure–Property Relationships

Barrier properties in polymeric systems are governed by the solution–diffusion mechanism, where permeability (P) is defined as:

$$P = D \times S$$

where D is the diffusion coefficient and S is the solubility coefficient of the permeating molecule in the polymer matrix.

Gas transport through polymer films typically follows a solution-diffusion mechanism, involving:

- 1) Sorption of gas molecules at the polymer surface
- 2) Diffusion through the polymer matrix
- 3) Desorption at the opposite surface

The permeability is influenced by several factors, including polymer chain mobility, free volume, crystallinity, and intermolecular interactions. The molecular architecture of the material plays a critical role in defining these parameters, particularly in terms of crystallinity, chain mobility, and inter-

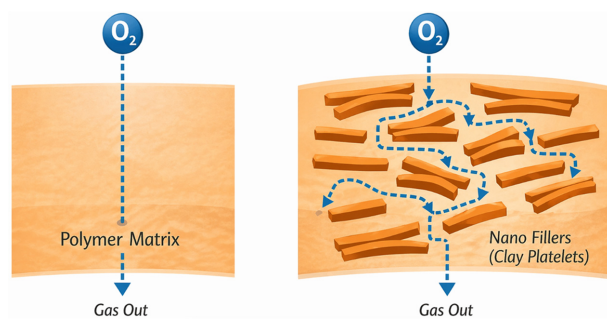


Fig. 1. Tortuous path mechanism in mono polymer matrix and nanocomposite system.

Table 1. Barrier properties of representative major film systems

Material	OTR (cc/m ² ·day)	WVTR	Strengths	Limitations
PE/PP	> 2000	Low	Moisture barrier	Poor O ₂ barrier
EVOH	< 1 (dry)	High	Excellent O ₂ barrier	Moisture sensitivity
Nanocellulose	< 10 (dry)	High	Renewable, high O ₂ barrier	Humidity sensitivity
Nanocomposites	10-100	Moderate	Tunable performance	Dispersion issues
SiOx/AlOx	< 1	Low	Ultra-high barrier	Cracking, adhesion

molecular interactions⁶.

Fig. 1 shows the tortuous path mechanism in mono polymer matrix and nanocomposite system. Hydrophobic polymers such as polyethylene exhibit relatively high oxygen permeability due to their non-polar structure and weak intermolecular forces. Siracusa reported that the high free volume in polyolefins facilitates oxygen diffusion, resulting in poor barrier performance². In contrast, hydrophilic polymers such as cellulose form dense hydrogen-bonded networks, significantly restricting molecular transport.

The nanostructured materials can reduce oxygen permeability by up to two orders of magnitude compared to conventional polymers, approaching the performance of EVOH under controlled conditions^{5,7}. However, persistent challenges including humidity sensitivity⁴, coating brittleness⁸, and scalability limitations remain unresolved.

Aulin et al. demonstrated that cellulose nanofibril (CNF) films exhibit extremely low oxygen permeability under dry conditions, comparable to high-performance synthetic barriers³. This behavior is attributed to the highly ordered fibrillar structure and strong intermolecular hydrogen bonding. Similarly, Lavoine et al. reported that nanocellulose coatings significantly reduce oxygen transmission when applied to porous substrates such as paper⁷.

Nanocomposite systems further enhance barrier properties through the tortuous path mechanism⁹. Bharadwaj showed that high aspect ratio fillers, such as nanoclays and graphene oxide, increase the effective diffusion path length, thereby reducing permeability¹⁰. However, experimental studies indicate that this mechanism is highly sensitive to filler dispersion. Sorrentino et al. reported that agglomeration of nanofillers leads to defect formation, which can negate barrier improvements⁵. These findings highlight that barrier performance is not solely determined by material composition, but also by structural organization and processing conditions.

Quantitative Barrier Performance and Trade-offs

The barrier properties of representative major film systems are shown in Table 1. Quantitative comparison of barrier performance across different material systems reveals a fundamental trade-off that defines the field. Polyolefins such as PE

and PP exhibit oxygen transmission rates (OTR) typically exceeding 2000 cc/m²-day, making them unsuitable for oxygen-sensitive applications²). However, they provide excellent moisture barrier properties due to their hydrophobic nature. In contrast, EVOH exhibits OTR values below 1 cc/m²-day under dry conditions, positioning it as a benchmark material for high-barrier applications¹¹). However, multiple studies have demonstrated that EVOH loses its barrier performance under high humidity conditions. Blanchard et al. reported that oxygen permeability increases significantly at relative humidity above 70%, due to plasticization effects¹²).

Nanocellulose-based materials exhibit similar behavior. Lavoine et al. reported OTR values below 10 cc/m²-day under controlled humidity conditions⁷), while Hubbe et al. demonstrated that permeability increases by more than an order of magnitude at high humidity⁴). This phenomenon is attributed to water-induced swelling and disruption of hydrogen bonding networks. Nanocomposite systems offer a potential solution to this trade-off. Sorrentino et al. reported that polymer–clay nanocomposites can reduce oxygen permeability by up to 90% without significantly compromising moisture resistance⁵). However, achieving consistent performance requires precise control of filler dispersion and orientation.

Overall, these results indicate that no single material system currently provides optimal performance under all conditions. Instead, hybrid systems combining multiple strategies are required to balance oxygen and moisture barrier properties.

Mono-material Systems: Recyclability vs Barrier Performance

The structures of multi-layer and mono-layer based barrier

films are shown in Fig. 2. High-barrier multi-layer films possess barrier properties but present environmental issues due to the difficulty of recycling. Therefore, mono-material packaging has recently emerged as a primary strategy for improving recyclability in flexible food packaging. Polyethylene (PE) and polypropylene (PP)-based systems are particularly attractive due to their compatibility with existing recycling infrastructures. However, their inherently poor oxygen barrier properties remain a critical limitation.

Recent studies have attempted to improve barrier performance through structural modification. Blanchard et al. reported that biaxially oriented polyethylene (BOPE) exhibits reduced oxygen permeability compared to conventional PE due to increased crystallinity and molecular orientation¹²). Similarly, Niaounakis highlighted that density and crystallinity directly influence gas diffusion by reducing free volume¹³). However, these improvements are incremental and insufficient for applications requiring long shelf life.

To overcome this limitation, coating and deposition technologies have been widely integrated into mono-material systems. Currently, the EU, the US, and Korea define and manage films as mono-materials that do not pose recycling issues if the heterogeneous material constitutes 5 wt% or less of the total film. For example, if the typical film thickness of retort food packaging is 120 to 200 μm or more, and the heterogeneous high-barrier coating layer is 5 wt% (equivalent to 6 to 10 μm in thickness) or less, it can be recycled as a mono-material. Li et al. demonstrated that thin SiO_x coatings deposited on PE substrates can reduce oxygen transmission rates (OTR) to below 1 cc/m²-day, approaching EVOH-level performance¹⁴). AlO_x coatings have also shown comparable results, with additional advantages in optical transparency.

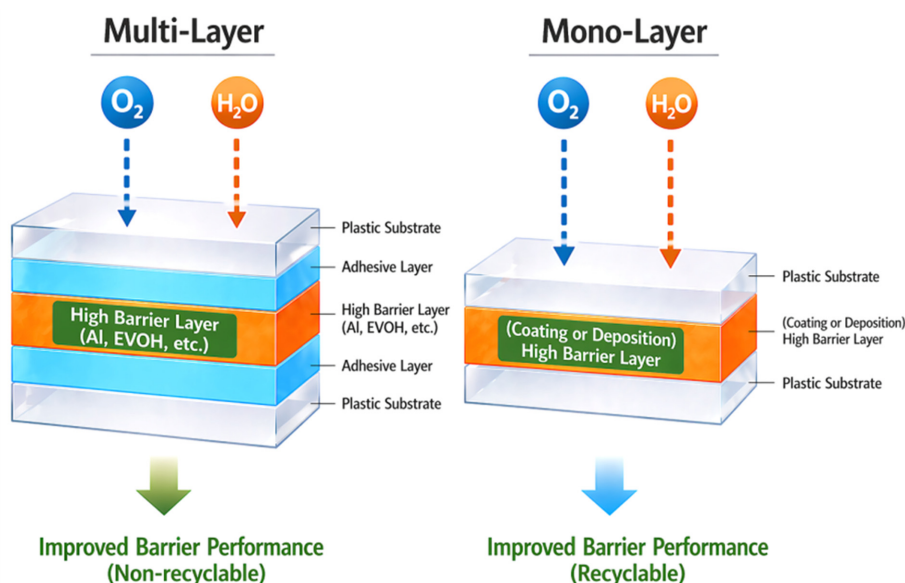


Fig. 2. Structure of barrier films: Multi- vs Mono-layer film.

Despite these promising results, mechanical reliability remains a major concern. Langowski reported that inorganic coatings are highly brittle and prone to micro-crack formation under flexural stress⁸). These cracks act as preferential diffusion pathways, leading to rapid degradation of barrier performance. Furthermore, adhesion between inorganic coatings and polymer substrates is often weak, requiring surface treatments such as plasma activation.

More importantly, the long-term recyclability of coated mono-material systems remains unresolved. While ultra-thin coatings may not significantly affect recycling processes, their accumulation and potential contamination effects have not been fully evaluated. Therefore, mono-material systems with coatings represent a partial solution, but not a definitive replacement for multi-layer structures.

Natural Materials: Nanocellulose as a High-Barrier Benchmark

Nanocellulose has become the most extensively studied bio-based material for high-barrier applications due to its exceptional oxygen barrier properties¹⁵). Its performance is primarily attributed to its nanoscale fibrillar network and strong hydrogen bonding interactions, which create a dense and highly ordered structure. Aulin et al. demonstrated that cellulose nanofibril (CNF) films exhibit oxygen permeability comparable to EVOH under dry conditions³). Lavoine et al. further showed that nanocellulose coatings can significantly improve the barrier properties of paper substrates, making them promising candidates for fiber-based packaging⁷).

However, a critical limitation consistently reported across studies is moisture sensitivity. Hubbe et al. demonstrated that water uptake leads to swelling of the nanocellulose network, increasing free volume and disrupting hydrogen bonding⁴). As a result, oxygen permeability increases dramatically at relative humidity above 70%. Similar observations were reported by Fotie et al., confirming that humidity is the dominant factor limiting the practical application of nanocellulose¹⁶). Several strategies have been proposed to address this issue. Chemical modification, such as acetylation or surface grafting, has been shown to reduce hydrophilicity⁷). However, these modifications often reduce the density of hydrogen bonding, leading to a trade-off between moisture resistance and barrier performance.

Alternatively, multi-layer systems combining nanocellulose with hydrophobic polymers have demonstrated improved stability under humid conditions. However, such approaches introduce complexity and may compromise recyclability, which contradicts the primary goal of sustainable packaging. Compared to other natural materials such as starch and chitosan, nanocellulose consistently exhibits superior oxygen barrier performance¹⁷). However, its sensitivity to environmental

conditions still remains a major obstacle to industrial application. Recent studies on improving barrier properties and sustainability of other biodegradable materials besides nanocellulose are summarized in Table 2.

Nanocomposite Systems: Bridging Performance Gaps

Nanocomposite systems have been extensively studied as a means of enhancing barrier properties while maintaining processability and mechanical performance. The incorporation of nanoscale fillers introduces a tortuous diffusion pathway, significantly increasing the effective path length for gas molecules (Fig. 1). Bharadwaj provided a theoretical model describing this effect, showing that permeability decreases as a function of filler aspect ratio and volume fraction. Experimental validation has been reported in numerous studies¹⁰). For example, Sorrentino et al. demonstrated that polymer-clay nanocomposites can reduce oxygen permeability by up to 90% when fillers are well dispersed⁵). Graphene oxide has also attracted significant attention due to its impermeable structure and high aspect ratio. Cui et al. reported that graphene-based nanocomposites exhibit superior barrier performance compared to conventional nanoclays, even at low loading levels³²).

However, the effectiveness of nanocomposites is highly dependent on filler dispersion. Hubbe et al. emphasized that agglomeration of nanofillers leads to defect formation, which can significantly reduce barrier performance⁴). This issue becomes particularly critical during scale-up, where achieving uniform dispersion is more challenging. Furthermore, the addition of nanofillers can affect mechanical properties and processability. High filler loading may lead to increased brittleness, while processing techniques such as extrusion may not be compatible with certain nanomaterials.

Nanocomposites also raise concerns regarding energy consumption. While bio-based fillers such as cellulose nanocrystals (CNCs) and cellulose nanofibrils (CNFs) are often considered environmentally favorable due to their renewable origin, their pilot-scale manufacturing processes can be highly energy-intensive. For instance, the mechanical fibrillation process used to produce nanocellulose typically requires energy inputs in the range of 10,000–30,000 kWh per ton, depending on the degree of fibrillation and pretreatment conditions³³). Chemical pretreatments such as TEMPO-mediated oxidation³⁴) or enzymatic hydrolysis can reduce energy demand. However, they introduce additional environmental burdens associated with chemical consumption, wastewater treatment, and process complexity. Furthermore, the overall environmental impact of nanocomposites is highly dependent on filler loading and dispersion efficiency. In cases where high filler loadings are required to achieve significant barrier improve-

Table 2. Recent applications of other biodegradable films for sustainable food packaging⁹⁾

Case	Biodegradable film matrix	Metal oxide nanoparticle	Findings	Impact on gas permeability	Novelty
Fe ₂ O ₃ -PLA Nano-composite for Bakery Packaging	Polylactic Acid (PLA)	Iron Oxide (Fe ₂ O ₃)	Improved preservation of bread by reducing mold growth	Reduced oxygen permeability by 27%	First-time integration of Fe ₂ O ₃ in PLA for bakery applications ¹⁸⁾
CeO ₂ -Alginate Films for Seafood Storage	Alginatebased film	Cerium Oxide (CeO ₂)	Enhanced antioxidant activity, delaying lipid oxidation in fish	Oxygen permeability lowered by 22%	Novel use of CeO ₂ to prevent oxidation in fatty seafood ¹⁹⁾
CuO-Chitosan Film for Fresh Produce	Chitosan	Copper Oxide (CuO)	Improved antimicrobial protection against foodborne pathogens	Gas permeability decreased by 38%	Innovative active packaging solution for fresh-cut fruits and vegetables ²⁰⁾
ZnO-Gelatin-Based Film for Poultry Packaging	Gelatin-based film	Zinc Oxide (ZnO)	Increased shelf life by reducing bacterial contamination	33% decrease in oxygen permeability	Application of ZnO in gelatin for protein-rich food preservation ²¹⁾
TiO ₂ -Soy Protein Film for Snack Packaging	Soy protein-based film	Titanium Dioxide (TiO ₂)	Enhanced UV resistance and mechanical stability	Oxygen barrier improved by 24%	Pioneering use of TiO ₂ in plant-based protein films ²²⁾
MgO-Polysaccharide Film for Dairy Preservation	Polysaccharide-based film	Magnesium Oxide (MgO)	Maintained sensory quality of cheese and yogurt packaging	Water vapor permeability reduced by 35%	New biodegradable application targeting dairy storage ²³⁾
ZnO-Protein-Iso-late Film for Frozen Foods	Protein isolate-based film	Zinc Oxide (ZnO)	Strengthened mechanical properties and frost resistance	30% reduction in gas permeability	Novel protein-isolate integration for frozen food packaging
CeO ₂ -Starch-Based Film for Dry Snack Packaging	Starch-based biodegradable film	Cerium Oxide (CeO ₂)	Improved resistance to oxidation and extended shelf life	Oxygen permeability decreased by 28%	First reported use of CeO ₂ in starch films for dry goods ²⁴⁾
Al ₂ O ₃ -PLA Biodegradable Coating for Beverages	PLA-based coating	Aluminum Oxide (Al ₂ O ₃)	Increased durability and moisture resistance for liquid packaging	Gas permeability lowered by 31%	Unique application of Al ₂ O ₃ for sustainable beverage packaging ²⁵⁾
TiO ₂ -Pectin Nano-composite for Fresh-Cut Vegetables	Pectin-based matrix	Titanium Dioxide (TiO ₂)	Improved transparency, UV protection, and antimicrobial efficacy	Reduced oxygen permeability by 26%	New approach using TiO ₂ for minimally processed vegetable packaging ²⁶⁾
NiO-CuO-PVA/Starch/Chitosan Film for Food Packaging	Polyvinyl Alcohol (PVA)/Starch/Chitosan	Nickel Oxide (NiO) and Copper Oxide (CuO)	Improved antibacterial activity against foodborne pathogens	Significant reduction in gas permeability	Novel incorporation of NiO-CuO for active food packaging applications ²⁷⁾
Eggshell-Derived Hydroxyapatite-Chitosan Bionano-composite	Chitosan	Hydroxyapatite (HAp) from eggshell	Improved mechanical strength and barrier properties	Enhanced barrier against oxygen and moisture	Sustainable use of eggshell-derived nanoparticles for biodegradable packaging ²⁸⁾
Ni-Zn Ferrite-Chitosan Green Films	Chitosan	Nickel-Zinc Ferrite (Ni-ZnFe ₂ O ₄)	Enhanced mechanical properties and gas barrier due to natural juice synthesis	Reduced water vapor permeability	Green synthesis approach using natural juice as a reducing agent ²⁹⁾
Zn Ferrite-Chitosan Film with Natural Acids	Chitosan	Zinc Ferrite (ZnFe ₂ O ₄)	Improved water resistance and mechanical strength	Decreased solubility and gas permeability	Environmentally sustainable approach to chitosan film synthesis ³⁰⁾
NiO-Gelatin/Chitosan Active Packaging	Gelatin/Chitosan	Nickel Oxide (NiO)	Antimicrobial and improved barrier properties for food applications	Enhanced oxygen and water vapor barrier	Combination of NiO with gelatin/chitosan for active packaging ³¹⁾

ment, the cumulative energy demand and processing complexity can offset the environmental benefits associated with bio-based materials. For example, poorly dispersed nanocellulose or graphene oxide can lead to agglomeration, necessitating additional processing steps such as ultrasonication or high-shear mixing, which further increase energy consumption.

Therefore, it is necessary to evaluate the overall environmental benefits of nanocomposites through a full life cycle assessment.

Coating Technologies: Toward Industrial High-Barrier Solutions

Coating technologies represent one of the most advanced approaches for achieving high barrier performance in food packaging. Currently, inorganic coatings such as silicon oxide (SiOx) and aluminum oxide (AlOx) have been widely adopted in commercial applications (Fig. 3). These coatings are typically deposited using vacuum-based processes such as physical vapor deposition (PVD) or plasma-enhanced chemical vapor deposition (PECVD), which are already established at the industrial scale with high throughput and roll-to-roll compatibility. Li et al. reported that SiOx coatings can achieve oxygen transmission rates below 1 cc/m²-day, making them comparable to EVOH¹⁴). Similarly, AlOx coatings provide excellent barrier performance with improved optical clarity and process compatibility.

From an industrial perspective, one of the key advantages of inorganic coatings is their ability to be integrated into existing converting lines without fundamentally altering the base polymer structure. This makes them particularly attractive for mono-material packaging systems, where thin coatings can provide barrier enhancement without significantly compromising recyclability. However, these coatings are not without limitations. Langowski highlighted that inorganic coatings are inherently brittle and susceptible to cracking under mechanical stress⁸). This issue is particularly problematic for flexible

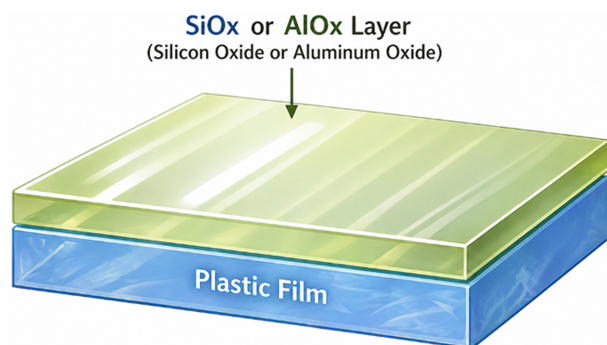


Fig. 3. Schematic illustration of inorganic SiOx/AlOx coating or deposited film for high-barrier packaging.

packaging, where repeated bending and handling are unavoidable. In addition, coating defects such as pinholes and non-uniform thickness can significantly affect barrier performance. Advanced deposition techniques, such as atomic layer deposition (ALD), have been proposed to address these issues by enabling precise control over film thickness. However, their high cost limits industrial applicability.

Bio-based coatings, including polysaccharides and proteins, have also been explored as sustainable alternatives. While these materials provide excellent oxygen barrier properties under dry conditions, their performance deteriorates under humid conditions, similar to nanocellulose¹⁷). As a result, their use is currently limited to dry food applications or requires additional protective layers. To address these limitations, recent research has focused on hybrid coating systems combining inorganic and organic layers. These systems aim to achieve both high barrier performance and mechanical flexibility. Nevertheless, challenges related to scalability, interlayer adhesion, process complexity, and cost remain significant barriers to commercialization. Therefore, future industrial implementation will depend not only on achieving high barrier performance, but also on ensuring cost-effective, scalable manufacturing processes and compatibility with existing recycling infrastructures.

Paper-Based and Fiber-Based Hybrid Systems

The transition toward fiber-based packaging has accelerated in recent years, driven by both regulatory pressure and consumer demand for plastic-free alternatives. Paper and paperboard offer inherent advantages in terms of recyclability and biodegradability, making them attractive substrates for sustainable packaging systems. However, paper-based materials exhibit poor intrinsic barrier properties against oxygen, moisture, and grease. To address these limitations, recent research has focused on hybrid systems combining paper substrates with functional coatings. Herrera et al. demonstrated that nanocellulose coatings significantly improve the oxygen barrier properties of paper, achieving oxygen transmission rates comparable to synthetic high-barrier materials under controlled conditions³⁵). Similarly, Ferrer et al. reported that combining nanocellulose with biopolymer coatings can further enhance barrier performance³⁶).

Despite these advances, moisture barrier performance remains a critical limitation. The hydrophilic nature of cellulose-based materials leads to rapid degradation of barrier properties under humid conditions. To mitigate this issue, multilayer coatings incorporating hydrophobic polymers such as polyethylene or wax-based coatings have been explored. However, such hybrid systems introduce trade-offs in recyclability. While paper-based systems are inherently recyclable,

the addition of polymer coatings may complicate recycling processes. Therefore, optimizing the balance between barrier performance and recyclability still remains a key research challenge.

Industrial Challenges and Scale-Up Limitations

Although significant progress has been achieved at the laboratory scale, the translation of high-barrier sustainable materials into industrial applications remains limited due to a combination of interrelated technical and economic challenges. These limitations can be broadly categorized into three key barriers: cost competitiveness, processing compatibility, and performance reliability under real-world conditions.

First, cost remains one of the most critical barriers to industrial adoption. Nanomaterials such as nanocellulose and graphene oxide are inherently more expensive than conventional petroleum-based polymers due to their energy-intensive production processes. Lavoine et al. emphasized that large-scale production of nanocellulose requires substantial energy input during fibrillation and drying stages, significantly increasing production costs⁷⁾. In addition, upstream processing steps, including chemical pretreatment and purification, further contribute to the overall cost structure. As a result, despite their superior barrier properties, these materials often fail to meet the strict cost-performance requirements of the packaging industry, where margins are typically low and material cost is a dominant factor.

Second, processing compatibility presents a major technological bottleneck. Many high-performance barrier materials rely on laboratory-scale fabrication techniques such as solvent casting, layer-by-layer assembly, or vacuum-based deposition methods, which are not easily scalable or compatible with existing industrial processing technologies. In contrast, conventional packaging materials are produced using highly optimized and continuous processes such as extrusion, co-extrusion, and lamination, which offer high throughput and cost efficiency. The integration of advanced materials into these established production systems often requires significant modification of equipment or processing conditions, creating additional barriers to industrial implementation.

Third, performance stability under real-world conditions represents a critical gap between laboratory results and practical applications. Barrier performance is typically evaluated under controlled temperature and humidity conditions, which do not accurately reflect the complex environments encountered during storage, transportation, and consumer use. Hubbe et al. reported that nanocellulose-based materials exhibit significant degradation in barrier performance under high humidity due to swelling and disruption of hydrogen bonding networks⁴⁾. Similarly, inorganic coatings are prone to mechan-

ical damage such as cracking and delamination under flexural stress, leading to rapid loss of barrier functionality. These findings highlight that long-term durability and environmental stability are as important as initial barrier performance for industrial adoption.

Importantly, these challenges are not independent but strongly interconnected. For example, improving barrier performance often requires increased material complexity or additional processing steps, which can further increase cost and reduce recyclability. Likewise, strategies aimed at improving moisture resistance, such as multilayer structures or hybrid coatings, may compromise processing simplicity and circularity. Therefore, the key challenge in advancing sustainable high-barrier packaging lies in achieving an optimal balance among performance, cost, processability, and sustainability. Bridging this gap requires not only material innovation but also system-level integration, including scalable manufacturing technologies, cost reduction strategies, and compatibility with existing recycling infrastructures.

Sustainability and Life Cycle Assessment (LCA)

Sustainability considerations have become a central aspect of packaging material development. Life cycle assessment (LCA) is widely used to evaluate the environmental impact of different packaging systems. Geueke et al. reported that mono-material packaging systems generally exhibit lower environmental impact compared to multilayer structures due to improved recyclability¹⁾. Similarly, fiber-based systems offer advantages in terms of biodegradability and renewable sourcing. However, trade-offs between performance and sustainability must be carefully considered. For example, while nanocomposites improve barrier performance, their production processes may be energy-intensive. Likewise, coating technologies may introduce materials that complicate recycling processes. Recent studies emphasize the importance of a holistic approach, considering the entire life cycle of packaging materials, including raw material sourcing, processing, use phase, and end-of-life management.

Conclusions

Over the past decade, significant progress has been made in the development of sustainable high-barrier food packaging materials. Mono-material systems and natural materials offer promising alternatives to conventional multilayer plastics. However, no single material system currently satisfies all performance requirements. Polyolefins provide excellent moisture resistance but poor oxygen barrier, while natural materials such as nanocellulose exhibit the opposite behavior. Nanocomposites and coating technologies offer potential solutions,

but challenges related to scalability, cost, and durability remain. Future research should focus on addressing the key limitations identified in current systems. One promising direction is the development of moisture-resistant bio-based materials. One promising direction is the development of moisture-resistant bio-based materials. Advances in chemical modification and hybrid structures may enable improved stability under humid conditions. Additionally, scalable processing techniques for nanocomposites must be developed to facilitate industrial application. Ultimately, hybrid strategies integrating multiple material approaches are required to achieve high barrier performance while maintaining sustainability. Furthermore, bridging the gap between laboratory research and industrial implementation remains the most critical challenge for the field.

Acknowledgment

This work was supported by the High Value-added Food Technology Development Program funded by the Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (RS-2026-25511270/GA268500-01).

References

- Geueke, B., Groh, K. and Muncke, J. 2018. Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *J. Clean Prod.* 193: 491-505.
- Siracusa, V. 2012. Food Packaging Permeability Behaviour: A Report. *Int. J. Polym. Sci.* 2012(1): 302029.
- Aulin, C., Gällstedt, M. and Lindström, T. 2010. Oxygen and oil barrier properties of microfibrillated cellulose films and coatings. *Cellulose.* 17(3): 559-574.
- 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. *BioRes.* 12(1): 2143-2233.
- Sorrentino, A., Gorrasi, G. and Vittoria, V. 2007. Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. *Trends Food Sci. Technol.* 18(2): 84-95.
- Prasad, K., Nikzad, M. and Sbarski, I. 2018. Permeability control in polymeric systems: a review. *J. Polym. Res.* 25: 232.
- Lavoine, N., Guillard, V., Desloges, I., Gontard, N. and Brsa, J. 2016. Active bio-based food-packaging: Diffusion and release of active substances through and from cellulose nanofiber coating toward food-packaging design. *Carbohydr. Polym.* 149: 40-50.
- Singh, P., Wani, A. A. and Langowski, H. -C. 2017. *Food Packaging Materials.* Taylor & Francis, London, UK, pp. 1-356.
- Edo, G. I., Mafr, A. N., Ali, A. B. M., Akpogheli, P. O., Yousif, E., Isoje, E. F., Igbuku, U. A., Zainulabdeen, K., Owhero, J. O., Essaghah, A. E. A., Umar, H., Ahmed, D. S. and Alamiery, A. A. 2025. Advancing Sustainable Food Packaging: the Role of Green Nanomaterials in Enhancing Barrier Properties. *Food Eng. Rev.* 17: 573-607.
- Bharadwaj, R. K. 2001. Modeling the Barrier Properties of Polymer-Layered Silicate Nanocomposites. *Macromolecules.* 34(26): 9189-9192.
- Maes, C., Luyten, W., Herremans, G., Peeters, R., Carleer, R. and Buntinx, M. 2017. Recent Updates on the Barrier Properties of Ethylene Vinyl Alcohol Copolymer (EVOH): A Review. *Polym. Rev.* 58(2): 209-246.
- Blanchard, A., Gouanvé, F. and Espuche, E. 2017. Effect of humidity on mechanical, thermal and barrier properties of EVOH films. *J. Membr. Sci.* 540: 1-9.
- Niaounakis, M. 2015. *Biopolymers: Application and Trends.* Elsevier, Amsterdam, Netherlands, pp. 91-183.
- Li, H., Yang, L., Wang, Z., Liu, Z. and Chen, Q. 2019. Pre-grafted Group on PE Surface by DBD Plasma and Its Influence on the Oxygen Permeation with Coated SiO_x. *Molecules.* 24(4): 780.
- Riaz, T., Zeng, X., Ye, X., Yu, T., Xia, Z., Khan, M. M., Ahmad, T., Kalsoom, A., Rauf, M. A., Ashraf, M. A., Riaz, R., Jin, Y. and Fu, X. 2005. The Biophysics of Nanocellulose Packaging: Linking Nanoscale Structure to Food Preservation and Safety. *Food Biophys.* 20: 196.
- Fotie, G., Rampazzo, R., Ortenzi, M. A., Checchia, S., Fessas, D. and Piergiorganni, L. 2017. The Effect of Moisture on Cellulose Nanocrystals Intended as a High Gas Barrier Coating on Flexible Packaging Materials. *Polymers.* 9(9): 415.
- Rhim, J. -W., Park, H. -M. and Ha, C. -S. 2013. Bio-nanocomposites for food packaging applications. *Prog. Polym. Sci.* 38(10-11): 1629-1652.
- Mulla, M. Z., Rahman, M. R. T., Marcos, B., Tiwari, B. and Pathania, S. 2021. Poly Lactic Acid (PLA) nanocomposites: effect of inorganic nanoparticles reinforcement on its performance and food packaging applications. *Molecules.* 26(7): 1967.
- Hashemi, M., Adibi, S., Hojjati, M., Razavi, R. and Noori, S. M. A. 2023. Impact of alginate coating combined with free and nanoencapsulated Carum copticum essential oil on rainbow trout burgers. *Food Sci. Nutr.* 11(3): 1521-1530.
- Duda-Chodak, A., Tarko, T. and Petka-Poniatowska, K. 2023. Antimicrobial compounds in food packaging. *Int. J. Mol. Sci.* 24(3): 2457.
- Sultan, M., Ibrahim, H., El-Masry, H. M. and Hassan, Y. R. 2024. Antimicrobial gelatin-based films with cinnamaldehyde and ZnO nanoparticles for sustainable food packaging. *Sci. Rep.* 14: 22499.
- Tian, X., Chen, Z., Lu, X., Mu, J., Ma, Q. and Li, X. 2023. Soy Protein/Polyvinyl-Alcohol (PVA)-based packaging films reinforced by nano-TiO₂. *Polymers.* 15(7): 1764.
- Liu, Y., Xu, H., Chen, Z., Xie, Z., Wen, H., Chang, X. and Li, G. 2025. Development of lily starch films reinforced with chitosan-honeysuckle essential oil hybrid particles and cellu-

- lose nanofibers for enhanced properties. *Foods*. 14(4): 589.
24. Cahyana, Y., Verrell, C., Kriswanda, D., Aulia, G. A., Yusra, N. A., Marta, H., Sukri, N., Esigapovich, S. J. and Abdvakhitovna, S. S. 2023. Properties comparison of oxidized and Heat Moisture Treated (HMT) starch-based biodegradable films. *Polymers*. 15(9): 2046.
 25. Al, M. M. Z., Mobarak, M. H. and Hossain, N. 2024. Emerging trends in biomaterials for sustainable food packaging: A comprehensive review. *Heliyon*. 10(1): e24122.
 26. Singha, S. K., Hoque, S. M., Das, H. and Alim, M. A. 2023. Evaluation of chitosan-Ag/TiO₂ nanocomposite for the enhancement of shelf life of chili and banana fruits. *Heliyon*. 9(11): e21752.
 27. Upadhyay, P. and Ullah, A. 2024. Enhancement of mechanical and barrier properties of chitosan-based bionanocomposites films reinforced with eggshell-derived hydroxyapatite nanoparticles. *Int. J. Biol. Macromol.* 261(2): 129764.
 28. Hassan, D., Sani, A., Antonio Pérez, A., Ehsan, M., Hernández-Varela, J. D., Chanona-Pérez, J. J. and Huerta, A. L. T. 2024. The impact of nickel-zinc ferrite nanoparticles on the mechanical and barrier properties of green-synthesized chitosan films produced using natural juices. *Polymers*. 16(24): 3455.
 29. Momtaz, F., Momtaz, E., Mehrgardi, M. A., Momtaz, M., Narimani, T. and Poursina, F. 2024. Enhanced antibacterial properties of polyvinyl alcohol/starch/chitosan films with NiO-CuO nanoparticles for food packaging. *Sci. Rep.* 14: 7356.
 30. Hassan, D., Sani, A., Chanihoon, G. Q., Antonio Pérez, A., Ehsan, M. and Huerta, A. L. T. 2024. Environmentally sustainable and green polymeric method for chitosan (CH) film synthesis using natural acids and impact of zinc ferrite nanoparticles (NPs) on Water Solubility (WS) and physical properties. *Polymers*. 16(24): 3466.
 31. Momtaz, M., Momtaz, E., Mehrgardi, M. A., Momtaz, F., Narimani, T. and Poursina, F. 2024. Preparation and characterization of gelatin/chitosan nanocomposite reinforced by NiO nanoparticles as an active food packaging. *Sci. Rep.* 14: 519.
 32. Cui, Y., Kundalwal, S. I. and Kumar, S. 2016. Gas barrier performance of graphene/polymer nanocomposites. *Carbon*. 98: 313-333.
 33. Signori-lamin, G., Aguado, R. J., Putaux, J., Santos, A. F., Thielemans, W. and Delgado-Aguilar, M. 2025. Energy and property trade-offs in nanocellulose production: High-pressure homogenization at different processing consistencies. *Chem. Eng. J.* 509: 161257.
 34. Hwang, J. and Kim, D. Recent Advances in TEMPO-oxidized Cellulose Nanofibers and Regenerated Cellulose Films from Food by-product Biomass: Mechanisms, Properties, and Applications. *J. Korea Soc. Packag. Sci. & Tech.* 31(2): 115-125.
 35. Herrera, M. A., Mathew, A. P. and Oksman, K. 2017. Barrier and mechanical properties of plasticized and cross-linked nanocellulose coatings for paper packaging applications. *Cellulose*. 24: 3969-3980.
 36. Ferrer, A., Pal, L. and Hubbe, M. 2017. Nanocellulose in packaging: Advances in barrier layer technologies. *Ind. Crop. Prod.* 95: 574-582.

투고: 2026.04.13 / 심사완료: 2026.04.20 / 게재확정: 2026.04.24

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 한줄 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. 수학기호의 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, 개변 또는 추가를 원할 때에는 편집위원회의 승인을 얻어야 한다.

12. 채택되어 저자교정이 끝난 원고에 대해서는 출판 및 인쇄인 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 진산화를 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	3,000,000원 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: 지속가능한 미래를 위한 K-Packaging의 현재
- 2) 일 시: 2026. 03. 31(화) 13:30 ~ 2026. 04. 01(수) 18:00
- 3) 장 소: 일산 킨텍스 제1전시장 2층 세미나실 212호, 213호
- 4) 주 최: (사)한국포장학회
- 5) 공동주관: (사)한국포장학회, (사)대한민국친환경패키징포럼, (사)그린플라스틱연합, 한국건설생활환경시험연구원
- 6) 후 원: 한국건설생활환경시험연구원, 소프트팩(주), (주)대진 화학, (주)경연전담, 연세패키징기술경영최고위과정 총동문회
- 7) 프 로 그 램 :

※ 3/31 (TUE)

13:30~14:00	등록 (Registration)	
개회식(Opening ceremony, 세미나실 212호)		
14:00~14:20		사회: 한민지 팀장(한국법제연구원)
	개회사	김종경 회장(대한민국 친환경패키징 포럼위원회)
	축사	김동진 이사장(한국포장재활용사업공제조합)
	사진촬영	
특별 세션: 친환경 패키징 정책 토론		
	세미나실 212호	좌장(Chair): 한민지 팀장(한국법제연구원)
14:20~14:50	Lecture 1: EU PPWR에 대응하는 한국형 포장재 관리제도(K-PPWR) 추진방향 (맹학균 과장, 기후에너지환경부 자원재활용과)	
14:50~15:20	Lecture 2: 디지털제품여권(DPP) 시대, 친환경 패키징의 전환 전략 (이소라 실장, 한국환경연구원)	
15:20~15:50	Lecture 3: 한국의 재생원료 사용 의무제 도입 및 향후계획 (조영진 과장, 한국환경공단)	
15:50~16:20	Lecture 4: PPWR 대응 시험인증 솔루션 (주민정 책임, 한국건설생활환경시험연구원)	
종합 토론		
	세미나실 212호	좌장(Chair): 장용철 교수(충남대학교)
16:20~17:00	종합 토론(주제: 글로벌 친환경 패키징 규제에 따른 기업 대응 전략) (토론자: 산, 학, 연 전문가)	
17:00~	정회	김종경 회장(대한민국 친환경 패키징 포럼위원회)

※ 4/1 (WED) 09:00~18:00

09:00~18:00	등록 (Registration)	
개회식(Opening ceremony, 세미나실 212호 & 213호)		
09:30~10:00		사회: 한재준 수석이사 (한국포장학회)
	개회사	유하경 회장(한국포장학회)
	환영사	황정준 총장(그린플라스틱연합)
	축사	이상문 부원장(한국건설생활환경시험연구원)
	축사	임병규 회장(연세패키징기술경영최고위과정 총동문회장)
	경과보고 및 사진촬영	

통합 세션		
	세미나실 212호 & 213호	좌장 (Chair): 서종철 부회장 (한국포장학회)
10:00~10:30	Plenary Lecture 1: 식품용 물리적 재생원료 사용 확대를 위한 글로벌 동향과 국내 기준·규격의 변화 (김준태 교수, 경희대학교)	
10:30~11:00	Plenary Lecture 2: 폐플라스틱 토목소재 전환을 통한 환경개선과 탄소저장 효과 (최경영 회장, 한국지영향개발협회)	
11:00~11:30	Plenary Lecture 3: 자원순환을 통한 사회적 탄소 저장 효과와 방법론 개발 필요성 (황정준 총장, 그린플라스틱연합)	
11:30~12:30	LUNCH BREAK & ESG지속가능 패키징페어 전시회 관람	
12:30~13:30	Poster Session	
장소	세미나실 212호	세미나실 213호
	Session A-1: 지속가능한 패키징을 위한 글로벌 규제 대응 및 탄소중립 기술 전략 (주관: 한국건설생활환경시험연구원)	Session B-1: 재활용 탄소순환 및 저장기술 (공동주관: 그린플라스틱연합, 고양연구원)
	좌장: 서상욱 센터장 (한국건설생활환경시험연구원)	좌장: 구현진 본부장(FITI)
13:30~13:50	패키징 디자인의 글로벌 환경규제 대응을 위한 서비스 플랫폼 개발 연구 (문병근 수석연구원, 한국건설생활환경시험연구원)	PET 화학적 재활용 기술의 현황 및 전망 (신용준 박사, SK케미칼)
13:50~14:10	포장재 유형별 탄소발자국 산정 및 저탄소화 방안 연구 (김택수 센터장, 한국생산성본부)	신규 PET 재생 LSP 공법과 기여 (임현진 대표, 대상 T&C)
14:10~14:30	식품 포장 안전성과 ESG 대응을 위한 수정 그라비아 잉크 적용 기술 (이병찬 대표, 대진화학)	EU PPWR 대응을 위한 국내 기업의 인증 대응 전략 (임유나 대표, 에코디언)
14:30~14:50	COFFEE BREAK	
	Session A-2: 안전과 순환을 잇는 친환경 포장 소재 혁신 (주관: 식·의약품 및 소재 환경분과위원회)	Session B-2: 바이오기반 생분해 제품기술 (공동주관: 그린플라스틱연합, 고양연구원)
	좌장: 조영진 박사(한국식품연구원)	좌장: 윤찬석 연구소장(에버캐텍)
14:50~15:10	지속 가능한 식품 포장 소재로서 박테리아 셀룰로오스의 응용 전략 (이정수 교수, 부산대학교)	Green Lab to Market: 바이오기반 소재 및 시장적용 사례 (이소영 과장, 동성케미칼)
15:10~15:30	알루미늄 파우치의 혁신적인 재활용: 기회와 도전 (서종철 교수, 연세대학교)	PHA 기반 지속가능 생분해 솔루션 (이광우 팀장, CJ제일제당)
15:30~15:50	코르크 유래 수베린을 이용한 친환경 PLA 포장소재 연구 (서종환 교수, 성균관대학교)	생분해성플라스틱 폐자원 통합 바이오가스화 실증 사업 (김태원 대표, 위사이클)
15:50~16:10	COFFEE BREAK	
	Session A-3: 지속가능한 경험을 설계하는 K-패키징 디자인 융합 (주관: 디자인·융합분과위원회)	Session B-3: 혁신 포장제품 사례와 현황 (공동주관: 그린플라스틱연합, 고양연구원)
	좌장: 손수경 교수(백제예술대학교)	좌장: 임유나 대표(에코디언)
16:10~16:30	「OOBE」 관점에서 본 제조사 디바이스 패키징 디자인 (삼성전자 책임디자이너)	PPWR: PFAS규제 대응 유럽 기업의 준비 현황과 사례 (Mr. Ludwig Gruber, 프라운호퍼연구소) (녹화 강연, 온라인 질의응답)
16:30~16:50	친환경인데, 왜 그냥 버려질까 - 지속가능성을 '사용 경험'으로 번역하는 패키징 디자인 (박주하 책임, 롯데중앙연구소)	PET-IML(인폴드 성형):재활용 공정 적합 구조와 프리미엄 패키징 구현 (한승훈 이사, 한일프라콘)
16:50~17:10	관능적 설계 경험으로 본 K-패키징 디자인의 미래 (주영혜 대표, 브랜드딩커어)	냉장용 컵커피용기(RTD컵)의 발전과정 및 친환경으로의 도약 (최서영 대표, 승화피앤피)
17:10~17:30	-	할랄 인증 포장재: 글로벌 수출 경쟁력을 높이는 새로운 기준 (윤태균 대표, 그린웨이일 글로벌)
17:30~18:00	감사장 증정, 시상식 (사)한국포장학회 임시총회	사회: 한재준 수석이사 (한국포장학회)

3. 임원회의

3.1. 제 1차 정기 이사회

- ◎ 일 시 : 2026. 01. 13(화), 17-18시
- ◎ 장 소 : 토즈 강남컨퍼런스점 및 온라인(Zoom)
- ◎ 안 건 : 학회장 신년 인사, 26년 이사진 선출 보고, 26년 사업 계획 및 예산(안), 25년 결산 보고, 기타 학회 발전 및 운영 방안 논의 등

3.2. 제 2차 정기 이사회

- ◎ 일 시 : 2026. 02. 11(수), 17-18시
- ◎ 장 소 : 토즈 강남컨퍼런스점 및 온라인(Zoom)
- ◎ 안 건 : 26년 이사진 선출 보고, 학술지 진행 사항, 춘·추계 학술대회 추진 및 준비, 기타 학회 발전 및 운영 방안 논의 등

3.3. 제 3차 정기 이사회

- ◎ 일 시 : 2026. 03. 17(화), 17-18시
- ◎ 장 소 : 토즈 강남컨퍼런스점 및 온라인(Zoom)

- ◎ 안 건 : 학술지 진행 사항, 춘·추계 학술대회 추진 및 준비, 용역 사업 진행보고, 기타 학회 발전 및 운영 방안 논의 등

4. 2026년 한국포장학회 법인회원

- ◎ (주)대진화학, 엔피씨(주), (주)세립, (주)알엔에프케미칼, 주식회사 윌로그, 한솔제지(주), 에스아이컴비블록코리아주식회사, 연세패키징기술경영최고위과정 총동문회

5. 포장학회 논문 투고안내

- ◎ 한국포장학회는 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