

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

왕효동 · 장종식*

국민대학교 일반대학원 혁신소재리뉴어블디자인학과

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

Wang Xiaodong and Jang Jung-sik

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

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

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

서 론

1. 연구 배경

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

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

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

2. 기존 연구 현황 및 연구 간극

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

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

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

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

3. 연구 목적 및 의의

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

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

실 험

1. 재료

본 연구에 사용된 재료는 Table 1에 요약되어 있다.

2. 시료 제조

2.1. 실험 설계 및 배합표

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

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

Table 1. Experimental materials and specifications

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

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

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

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

2.2. 제조 공정 (8단계 SOP)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3. 특성 분석 (Characterization)

3.1. 밀도 측정 (Density Measurement)

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

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

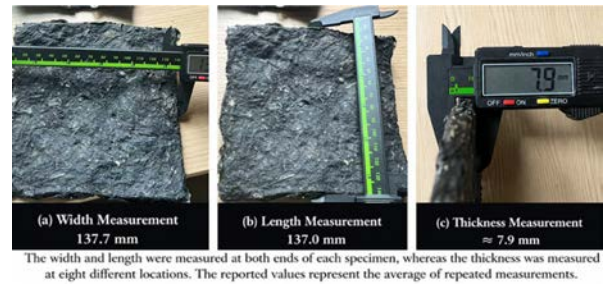


Fig. 1. Measurement of specimen dimensions using a digital caliper: (a) width, (b) length, and (c) thickness.

여기서 ρ 는 밀도(g/cm³), M은 질량(g), L은 평균 길이(cm), W는 평균 너비(cm), H는 평균 두께(cm)이다.

3.2. 흡수율 측정 (Water Absorption Test)

흡수율은 ASTM D570을 참고한 수정 방법으로 측정하였다. 각 시료에서 5 × 5 cm 크기의 시편을 절단하고 실외 햇빛 건조 후 질량을 측정하여 건조 중량(W₀)으로 하였다. 시편을 상온(20-25°C)의 증류수에 완전히 침지하여 24시간 방치한 후 꺼내어 표면의 물을 여과지로 가볍게 흡수하고 즉시 질량을 측정하였다. 이 측정값에서 시편에 부착된 식별 라벨의 흡수에 의한 오차(0.2 g)를 보정하여 최종 습윤 중량(W₁)으로 하였다.

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

3.3. 기계적 특성 측정 (Mechanical Properties)

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

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

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

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

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

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

3.5. 적외선 분광 분석 (FT-IR)

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

3.6. 열중량 분석 (Thermogravimetric Analysis, TGA)

열중량 분석은 TA Instruments TGA Q5000(V3.17 Build

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

3.7. 접촉각 측정 (Water Contact Angle Measurement)

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

결과 및 고찰

1. 외관 및 형태

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

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



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

Table 3. Density measurement results of composite specimens

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

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

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

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

2. 밀도 특성 (Density Properties)

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

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

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

3. 흡수율 특성 (Water Absorption Properties)

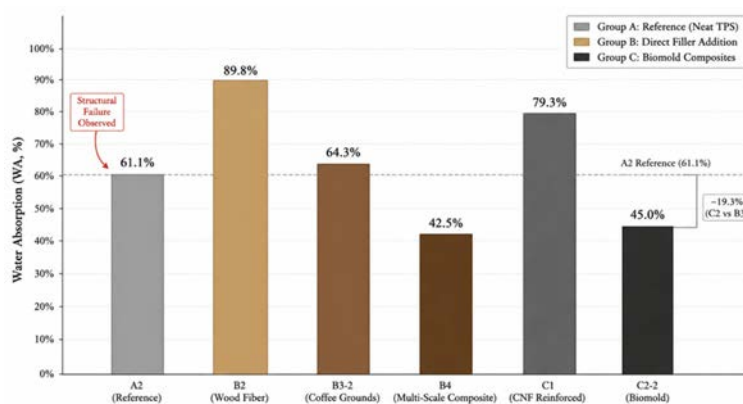
Table 4에 각 시료의 흡수율 측정 결과를 정리하였다(Fig. 3 참조). Fig. 4는 침지 전후 외관 변화를 나타낸 것이다. 라벨에 의한 흡수 오차(0.2 g)를 보정한 결과, 흡수율은 B2(89.8%)>C1(79.3%)>B3-2(64.3%)>A2(61.1%)>C2-2(45.0%)>B4(42.5%)의 순서로 나타났다.

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

Table 4. Water absorption measurement results of composite specimens

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

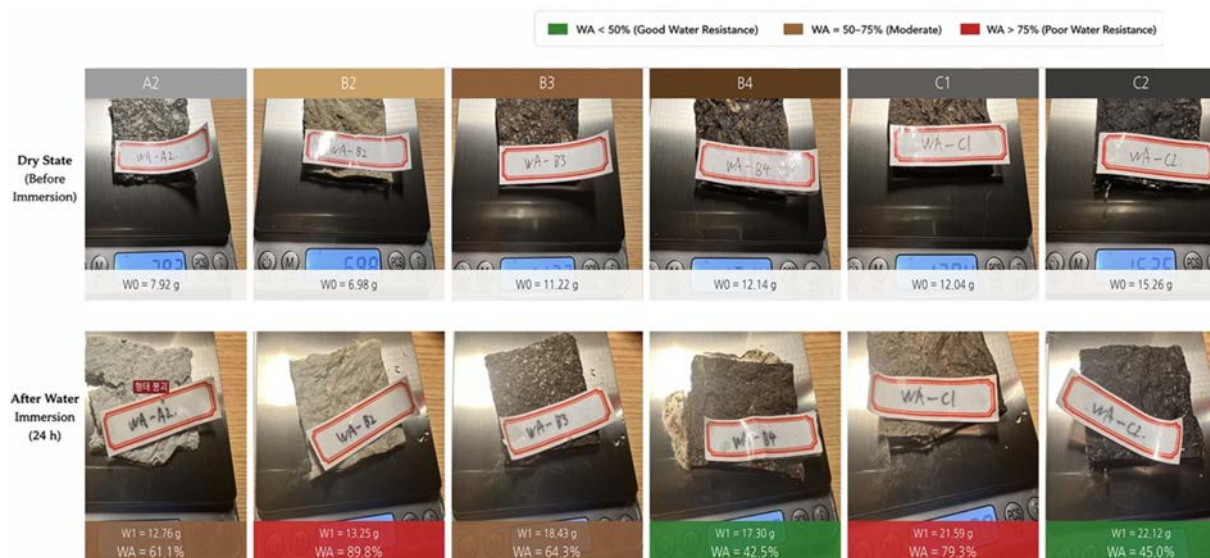
주: B3-2 및 C2-2 배합 그룹에서 만든 패널에서 흡수율 시편과 별도로 굽힘·인장 시험용 시편을 함께 절단하여 사용하였다. B3-1 및 C2-1은 제조 재현성 검증(밀도 비교)용으로만 제작되었으며 흡수율 측정에는 포함되지 않았다.



Comparison of water absorption after 24 h of water immersion.

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. 기계적 특성 (Mechanical Properties)

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

4.1. 굽힘 특성 (Flexural Properties)

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

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

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

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

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

4.2. 인장 특성 (Tensile Properties)

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

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

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

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

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

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

형성함으로써 인장 특성을 크게 향상시켰음을 확인하였다.

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

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

4.3. 표면 경도 (Surface Hardness, Shore A)

표면 경도는 Shore A 듀로미터를 사용하여 각 시료의 5

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

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

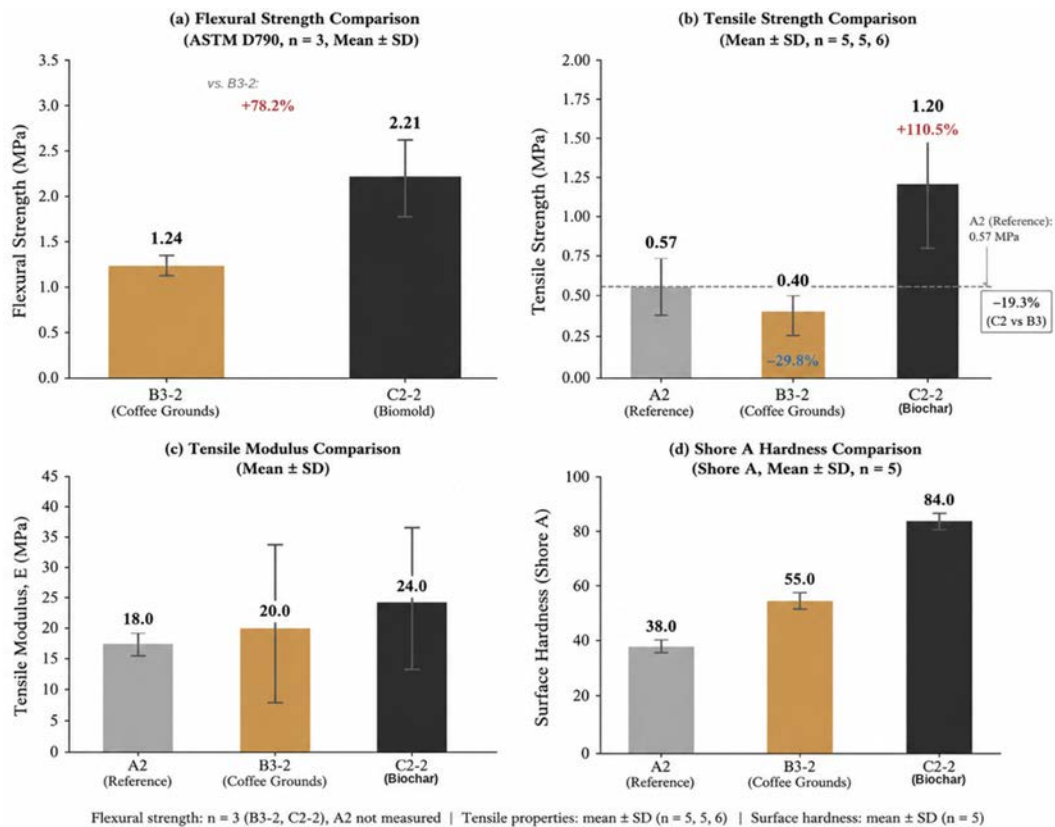


Fig. 5. Comprehensive comparison of mechanical properties and surface hardness.

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

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

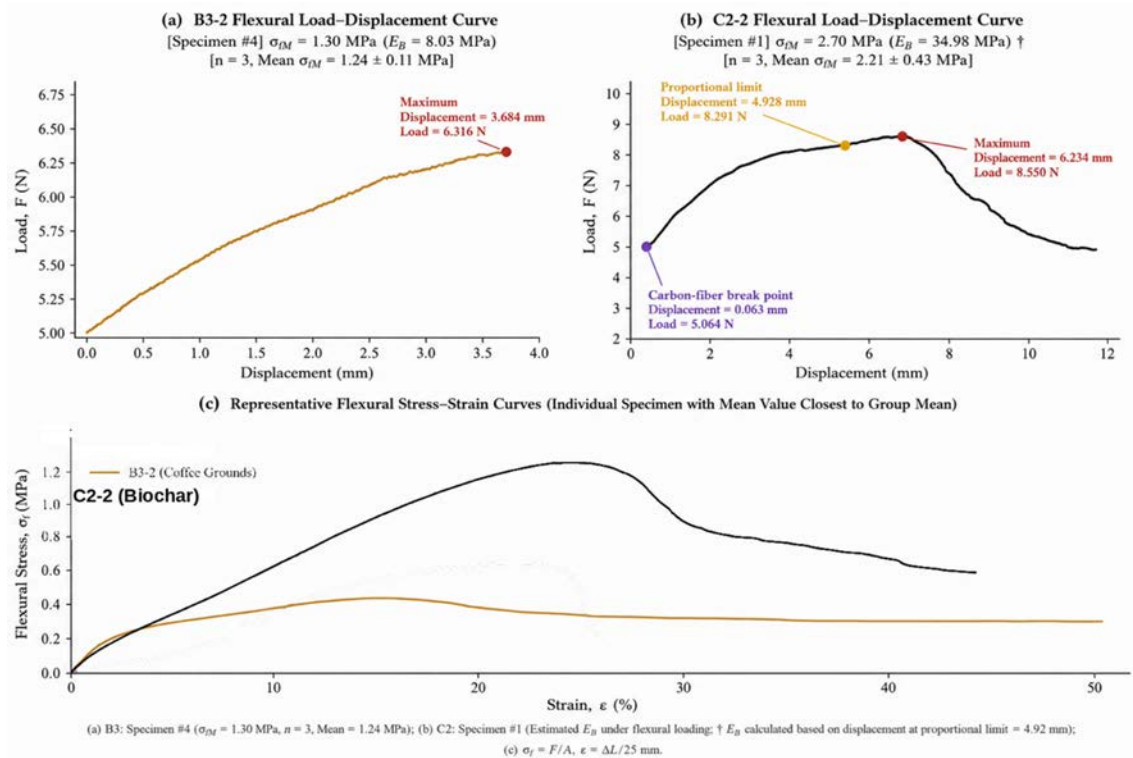


Fig. 6. Load-deformation curves from bending and tensile tests.

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

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

5. 화학 구조 분석 (FT-IR Analysis)

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

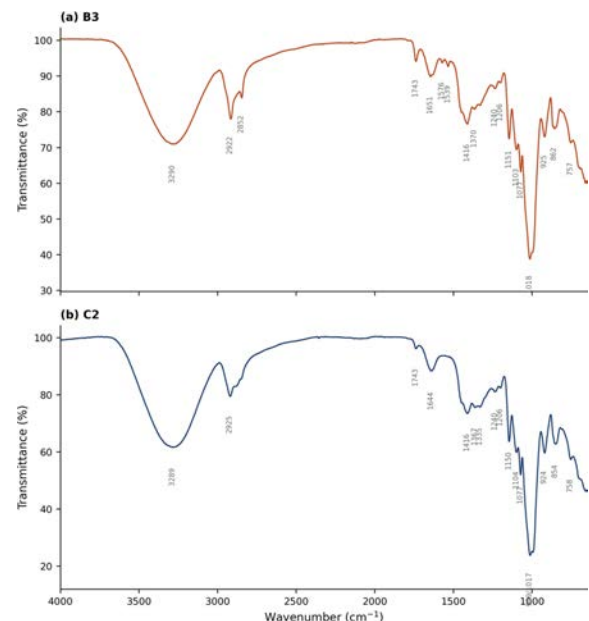


Fig. 7. FT-IR spectra of B3 and C2 composite specimens (spectral curves digitized from raw instrument data; peak positions per KTR Test Report No. TBK-2026-006263/006264, KS M 0024:2017).

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

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

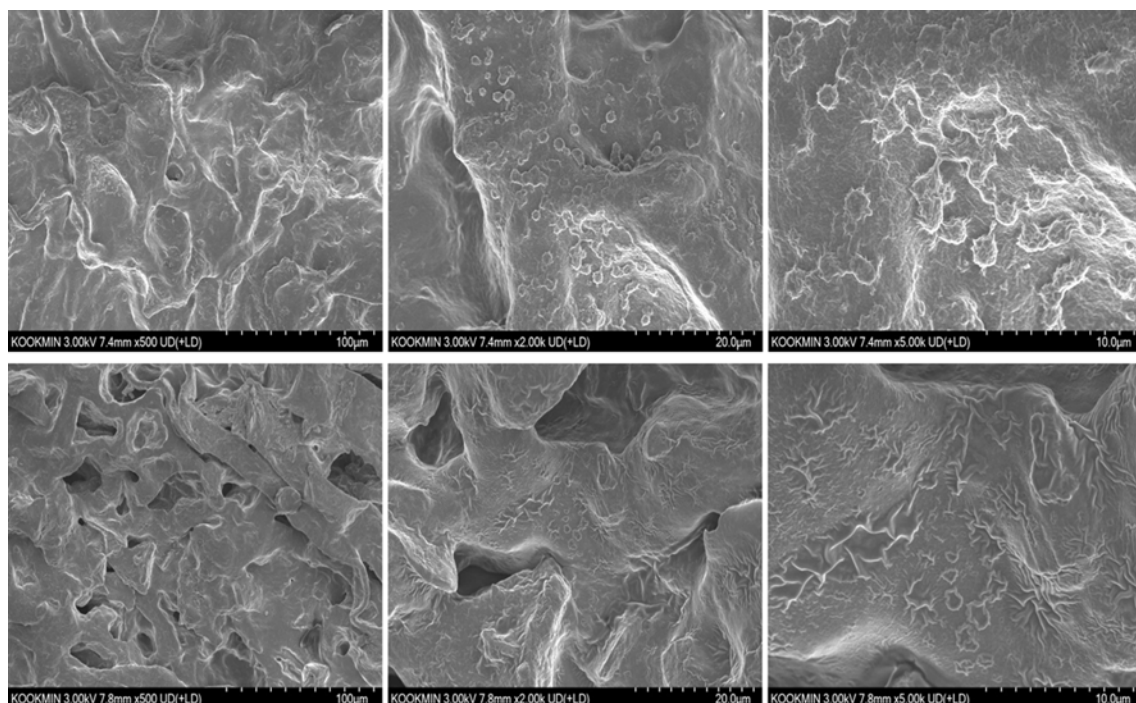
Wavenumber (cm ⁻¹)	B3 Transmittance (%)	C2 Transmittance (%)	Peak Assignment	Interpretation
3289–3290	~71%	~62%	O–H stretching vibration	Hydroxyl groups from starch and glycerol
2921–2925	~75%	~74%	C–H stretching vibration	Methylene groups
2851.8	~80%	—	Saturated C–H stretching	★ Characteristic peak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

★ B3-specific peak (coffee grounds characteristic)

◆ C2-specific peak (biochar characteristic)

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

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

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

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

6. 미세구조 분석 (FE-SEM Analysis)

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

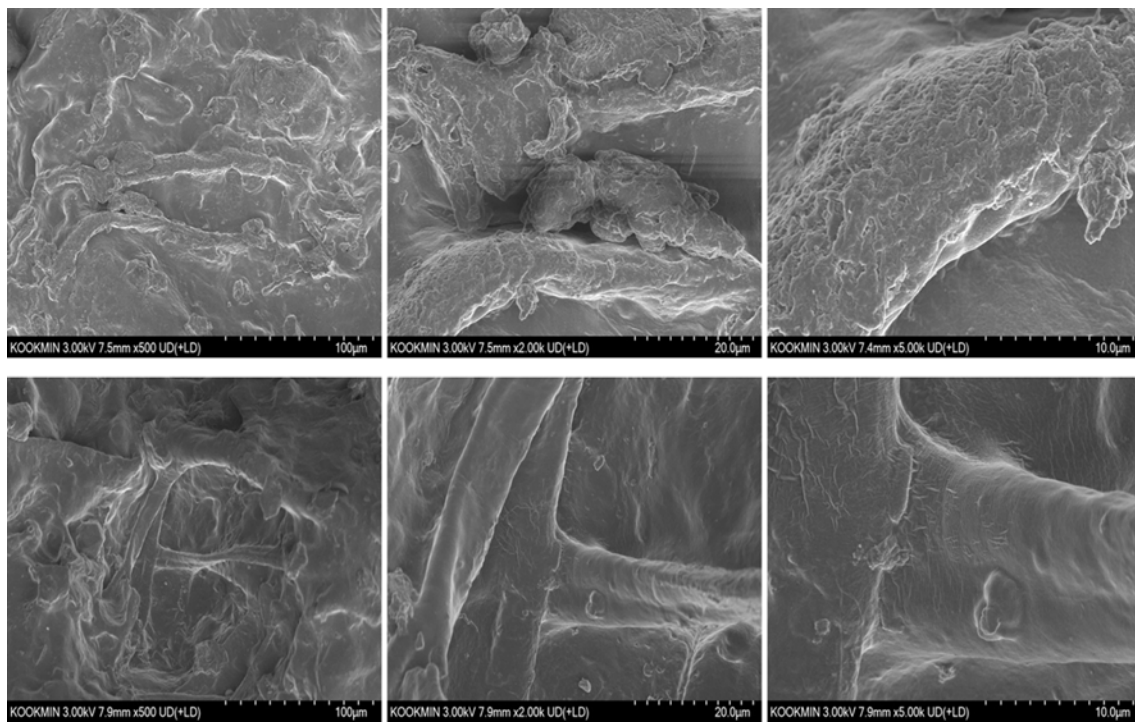


Fig. 9. FE-SEM images of C2 specimen: (a) $\times 500$, (b) $\times 2,000$, (c) $\times 5,000$.

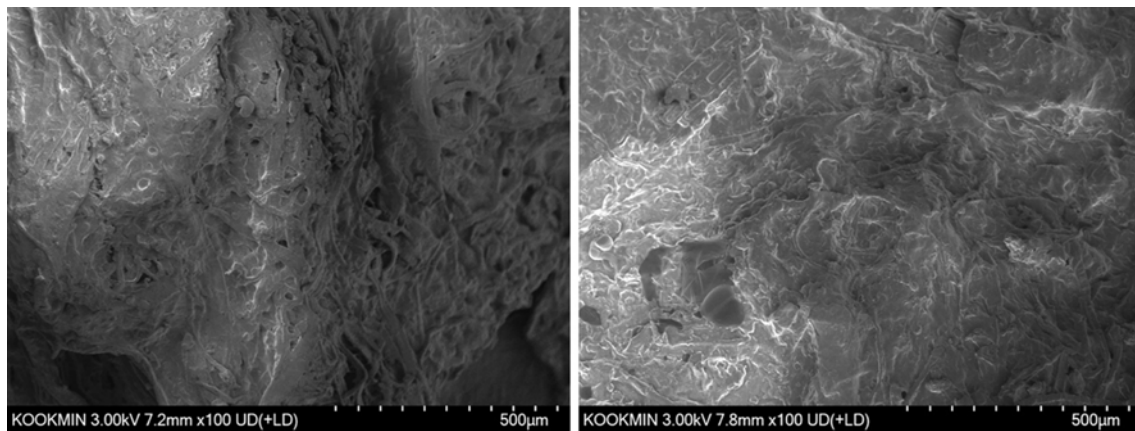


Fig. 10. Overview FE-SEM images of B3 (left) and C2 (right) specimens at $\times 100$.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7. 열중량 분석 (TGA/DTG Analysis)

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

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

B3-2(커피 찌꺼기 직접 첨가)는 177.6°C 에서 첫 번째

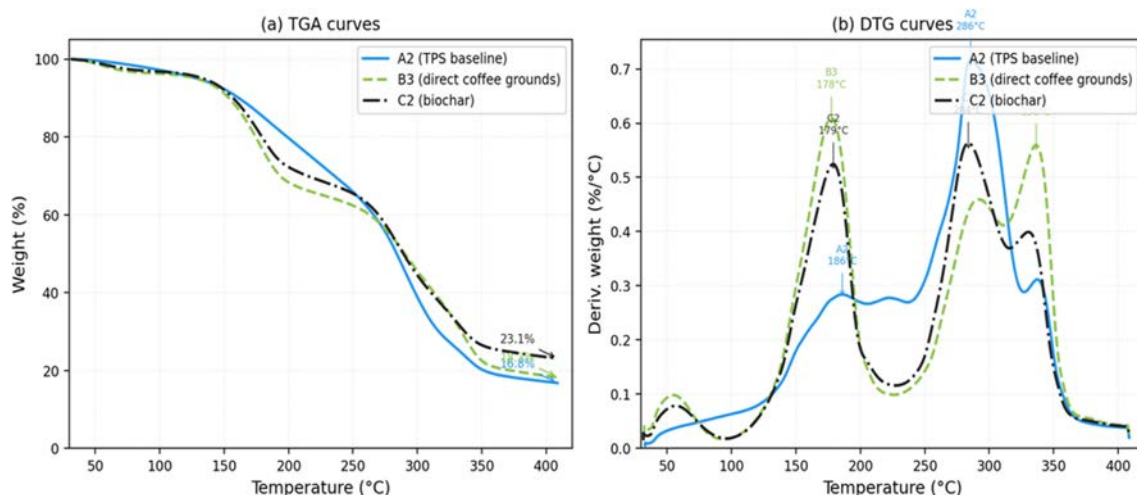


Fig. 11. TGA and DTG curves of A2, B3-2, and C2-2 specimens (TGA Q5000, 10°C/min, N₂ atmosphere).

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

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

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

실용적 관점에서, 세 시료 모두 100°C에서 96% 이상의

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

8. 접촉각 분석 (Water Contact Angle Analysis)

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

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

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

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

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

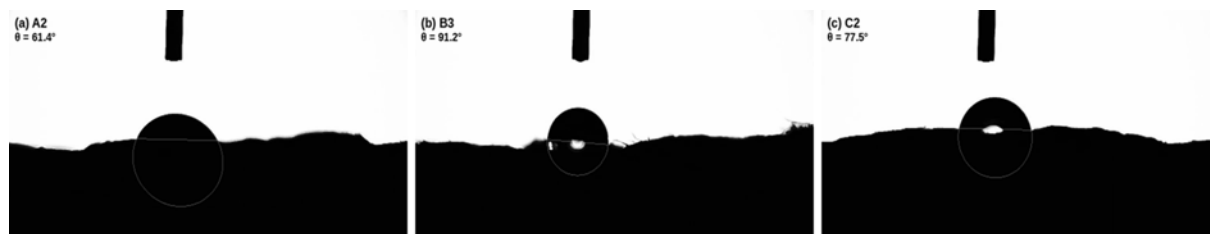


Fig. 12. Representative water contact angle (WCA) images of composite specimens: (a) A2, (b) B3-2, (c) C2-2. For each group, the individual measurement closest to the group mean was selected as representative (A2: 61.4° of mean 66.8° ± 14.4°, n = 4; B3-2: 91.2° of mean 91.2° ± 11.2°, n = 8; C2-2: 77.5°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

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

9. 종합 고찰

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

10. 제품 설계 및 응용

10.1. 설계 개념 및 재료-제품 매칭

개발 복합재료의 특성을 기반으로 세 가지 제품 응용 방

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

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

10.2. 제품 1: 커피 브랜드 포장 박스 (C2 기반)

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

Table 11. Material property-product matching analysis

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

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

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

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

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

하다.

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

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

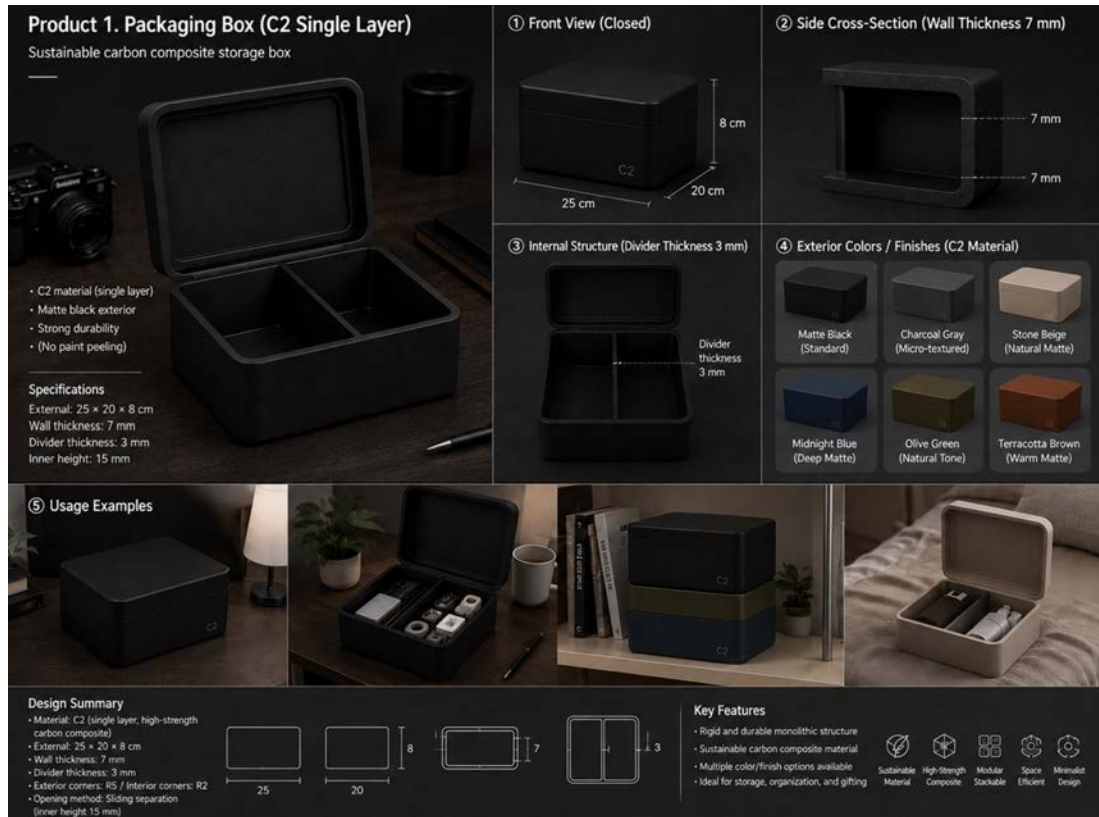


Fig. 14. Packaging box (C2) design specifications: closed front view, side cross-section (7 mm wall thickness), internal layout (3 mm divider), exterior color and texture options, and application scenarios.

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

10.3. 제품 2: 생분해성 컵 슬리브·받침 세트 (B3 기반)

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

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

구조적 타당성을 검증하기 위해 B3-2의 실측 물성(밀도

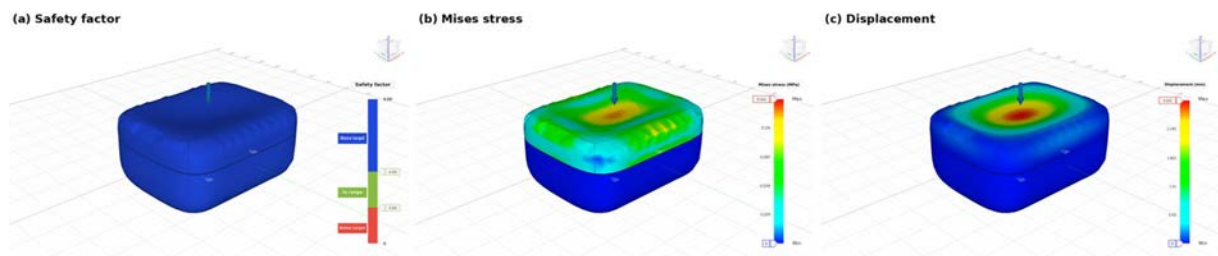


Fig. 15. Static structural FEA of the packaging box (C2), 39 N stacking load on the closed lid, bonded box-lid assembly: (a) safety factor, (b) Mises equivalent stress, (c) displacement.



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



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

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

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

10.4. 제품 3: 모듈형 수납 박스 (B4 기반)

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

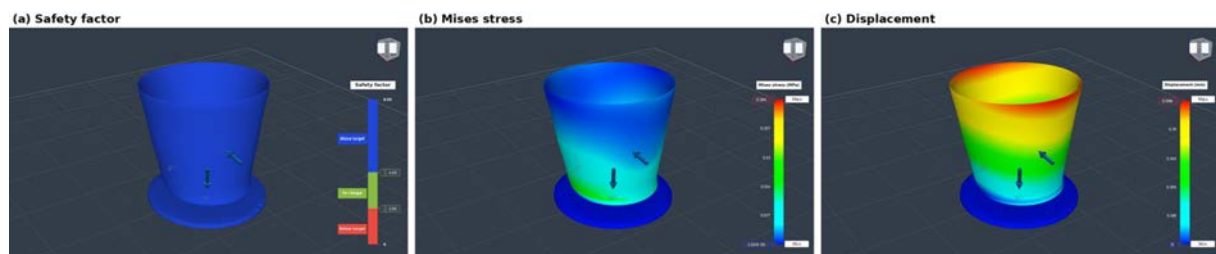


Fig. 18. Static structural FEA of the cup sleeve and coaster (B3), combined gravity + 15 N grip force + 5 N vertical load: (a) safety factor, (b) Mises equivalent stress, (c) displacement.

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

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

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



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

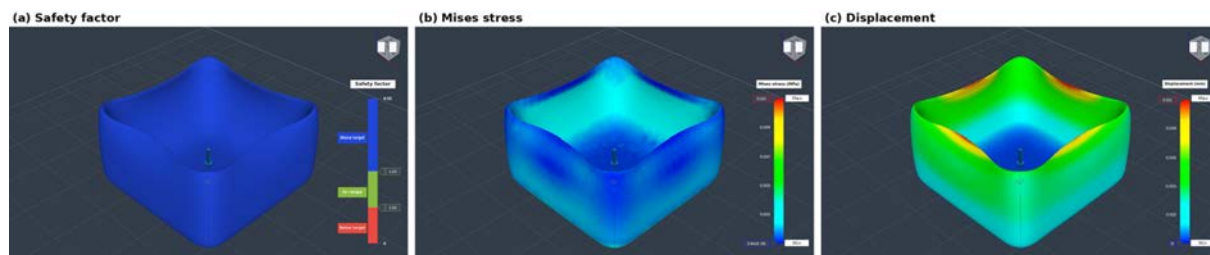


Fig. 20. Static structural FEA of the modular storage box (B4 design; B3 measured properties applied as a conservative proxy), 25 N load on the interior base: (a) safety factor, (b) Mises equivalent stress, (c) displacement.

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

10.5. 경제성 분석

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

요 약

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

첫째, 밀도 측정 결과 B3 그룹이 평균 0.80 g/cm³로 가장 높은 충진 효과를 나타냈으며, C2 그룹은 평균 0.68 g/cm³로 바이오차의 다공성 구조를 반영하였다.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

감사의 글

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

References

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

투고: 2026.07.10 / 심사완료: 2026.08.05 / 게재확정: 2026.08.20