

Study on the effects of sCMF and lignocellulose addition on eco-friendly PP composite materials

Yu Jin Park[†] and Min Seong Lee^{*}

Department of Digital Convergence, Hanseo University, Seosan 31962, Korea

**REVATION Co., Ltd., Seoul 07788, Korea*

(Received May 14, 2026)

(Revised June 16, 2026)

(Accepted June 16, 2026)

Abstract This study investigated changes in the physical and mechanical properties of polypropylene (PP) composites reinforced with sCMF (silica-coated cellulose microfiber) and lignocellulose to develop eco-friendly bioplastics suitable for injection-molded household goods, films, and trays. The total cellulose content was fixed at 30 wt%, while portions of conventional cellulose were replaced with sCMF and lignocellulose. Density, melt flow rate (MFR), tensile strength, and impact strength were measured after extrusion and injection molding processes. The density values were approximately 1.03 g/cm³ for most samples, while the CNL5T sample containing Talc increased to 1.07 g/cm³. The MFR decreased from 4.8 g/10 min for the control sample (CLB30) to 2.5~4.5 g/10 min for the modified samples. Tensile strength increased from 19.8 MPa for CLB30 to 20.8~23.2 MPa, with CNL10 showing the highest value. Impact strength remained in the range of 45~51 J/m for most samples, similar to CLB30 (46 J/m), whereas CNL5T decreased to 35 J/m. These results indicate that the physical and mechanical properties of cellulose-based PP composites can be controlled by the type and substitution ratio of modified cellulose-based fillers and auxiliary additives.

Key words Cellulose composites, sCMF, Lignocellulose, Polypropylene (PP), Injection molding, Mechanical properties, Eco-friendly fillers

친환경 PP 복합소재에 대한 sCMF 및 리그노셀룰로오스의 첨가 영향 연구

박유진[†], 이민성^{*}

한서대학교 디지털융합학과, 서산, 31962

*리베이션(REVATION), 서울, 07788

(2026년 5월 14일 접수)

(2026년 6월 16일 심사완료)

(2026년 6월 16일 게재확정)

요약 본 연구에서는 사출 성형품 및 필름, 트레이 등에 적용 가능한 친환경 바이오플라스틱 개발을 위해, 표면 개질 셀룰로오스(sCMF)와 리그노셀룰로오스를 적용한 폴리프로필렌(PP) 기반 복합소재의 물성 변화를 분석하였다. 총 셀룰로오스 함량을 30 wt%로 고정하고 sCMF와 리그노셀룰로오스를 부분 치환하여 배합하였으며, 압출 및 사출 공정을 거쳐 밀도, 용융지수, 인장강도, 충격강도를 측정하였다. 연구 결과, 밀도는 대부분의 시료에서 1.03 g/cm³로 유사하게 나타났으나, Talc를 적용한 CNL5T 시료는 1.07 g/cm³로 증가하였다. 용융지수(MFR)는 대조군인 CLB30의 4.8 g/10 min 대비 2.5~4.5 g/10 min 범위로 감소하였으며, 인장강도는 CLB30의 19.8 MPa 대비 20.8~23.2 MPa로 향상되었다. 충격강도는 대부분의 시료에서 45~51 J/m 범위로 CLB30(46 J/m)과 유사한 수준을 유지하였으나, Talc를 적용한 CNL5T 시료는 35 J/m로 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 이를 통해 개질 원료의 종류와 치환 비율, 보조 첨가제 적용 여부에 따라 PP 기반 셀룰로오스 복합소재의 밀도, 용융지수, 인장강도 및 충격강도 특성이 조절될 수 있음을 확인하였다.

[†]Corresponding author
E-mail: doccod001@naver.com

1. 서 론

전 세계적으로 지속가능한 소재 전환이 가속화됨에 따라, EU를 비롯한 주요 국가들은 화장품 용기 및 패키지에 일정 비율 이상의 바이오 기반 소재 및 재활용 원료 사용을 의무화하고 있다[1]. 이러한 환경 규제 미충족 시 수출이 제한되는 사례가 발생하고 있어, 관련 산업계의 신속한 대응이 요구되는 실정이다[2].

천연섬유 소재인 셀룰로오스(Cellulose)는 우수한 생분해성과 자원 순환성으로 인해 복합소재 충전재로서 주목받아 왔다[3]. 그러나 셀룰로오스는 비극성 고분자인 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)과의 상용성이 낮아, 고품량 적용 시 분산 불균형 및 기계적 물성 저하 등의 한계가 존재한다[4].

Habibi에 따르면, 셀룰로오스 표면 개질은 고분자 matrix와의 계면 접착 특성 개선에 영향을 미치는 것으로 보고되었다[5]. 이에 본 연구에서는 셀룰로오스의 표면을 실리카로 개질한 sCMF(silica-coated cellulose microfiber)와 리그노셀룰로오스(Lignocellulose)를 적용하였다. 선행연구에서는 sCMF와 리그노셀룰로오스가 단독 셀룰로오스 대비 낮은 함량에서도 물성 개선 효과를 나타낼 수 있어 가공성 측면에서 유리한 소재로 제시되었다[6]. 또한 천연섬유 기반 PP 복합소재는 낮은 밀도와 우수한 강성으로 인해 친환경 복합소재 분야에서 활발히 연구되고 있으며[7,10], 충전재와 PP 간 계면 접착 특성 및 상용화제 적용이 복합소재의 기계적 물성에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되었다[8,9,11,12].

본 연구에서는 PP를 기지 수지로 하여 개질 원료 치환과 첨가 물질에 따른 물성 변화를 비교하고자 하였다. 개질 원료로는 sCMF와 리그노셀룰로오스를 선택하였으며, Talc 및 Wax 등의 첨가제가 혼화성 및 기계적 물성에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 통해 제조된 복합소재의 밀도, 용융지수(MFR, Melt flow rate), 인장강도 및 충격강도 분석 결과를 제시함으로써, 향후 친환경 포장 소재를 위한 기초 자료로의 활용을 기대하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시료 배합

본 연구에서는 기존에 활용하고 있는 셀룰로오스 복합소재(셀룰로오스 함량 50 wt%)를 마스터 배치(이하 MB)로 지정하였다. MB의 물성은 Table 1에 나타내었다.

MB 셀룰로오스 함량 조정 시 가공성 등을 고려해 셀룰로오스 함량을 30 wt%로 고정하고, 일부를 개질 셀룰로오스 및 리그노셀룰로오스 등으로 대체하였다. sCMF는 총 무게 대비 3~5 wt% 비율로 투입 후 물성 보완 효과를 관찰하였다. 리그노셀룰로오스의 경우 5~10 wt% 범위에서 적용하였으며, 총 셀룰로오스 함량 대비 1:5 및 1:2 수준으로 배합하여 물성 변화를 관찰하였다. 또한 리그노셀룰로오스 적용 시에는 PP 일부를 Talc(magnesium silicate)로 대체하였다. 함량 희석을 위한 Homopolymer Polypropylene(이하 Homo PP)은 JC160 grade(Lotte

Table 1
Properties of conventional cellulose composites (50 wt% cellulose)

Property	Unit	Value	Test Method
Density	g/cm ³	1.13	ASTM D792
Melt Flow Rate (MFR)	g/10 min	0.4	ASTM D1238
Tensile Strength	MPa	12	ASTM D638
Elongation at Break	%	19	ASTM D638
Flexural Modulus	MPa	425	ASTM D790
Izod Impact Strength (Notched)	J/m	150	ASTM D256

Table 2
Properties and grade information of Homo PP (JC160, Lotte Chemical Co., Ltd.)

		JC160
Density	g/cm ³	0.9
Melt Flow Rate (MFR)	g/10 min	20
Tensile Strength at yield	MPa	39
Elongation at Break	%	100
Flexural Modulus	MPa	2,060
Izod impact	J/m	34
HDT @0.46 MPa	°C	140
Molecular weight	g/mol	> 1,000

Table 3
Formulations of PP composites with various contents of sCMF and lignocellulose

Sample ID*	Formulation** (Component ratio, %; cellulose-derived content in parentheses, wt%)											
CLB30***	MB 60% (30 wt%)		+	Homo PP 37%		+	MAPP 3%					
sCMF series	CLS03	MB 54% (27 wt%)		+	Homo PP 40%		+	sCMF 3% (3 wt%)	+	MAPP 3%		
	CLS05	MB 50% (25 wt%)		+	Homo PP 42%		+	sCMF 5% (5 wt%)	+	MAPP 3%		
	CLS5W	MB 50% (25 wt%)		+	Homo PP 41%		+	sCMF 5% (5 wt%)	+	Wax 1% +	MAPP 3%	
Ligno-cellulose series	CNL05	MB 50% (25 wt%)		+	Homo PP 42%		+	Lignocellulose 5% (5 wt%)		+	MAPP 3%	
	CNL5T	MB 50% (25 wt%)		+	Homo PP 37%		+	Lignocellulose 5% (5 wt%)		+	Talc 5% +	MAPP 3%
	CNL10	MB 40% (20 wt%)		+	Homo PP 47%		+	Lignocellulose 10% (10 wt%)		+	MAPP 3%	

* All samples were fixed at a total cellulose content of 30 wt%.

** Formulation values indicate component ratios based on the total composite weight.

*** CLB30: control sample containing 30 wt% cellulose without sCMF or lignocellulose.

**** Homo PP indicates homopolymer polypropylene (JC160).

Chemical Co., Ltd.)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 JC160의 MSDS 기준 분자량은 1,000 g/mol 이상으로 확인되었으며, 주요 물성은 Table 2에 나타내었다.

총 셀룰로오스 함량을 30 wt%로 유지하기 위해 상용 화제인 maleic anhydride-grafted polypropylene(MAPP, FUSABOND™ P613, Dow)을 3 wt% 고정 투입하여 혼합성을 높이고자 하였으며, MAPP 투입에 따른 중량 변화는 Homo PP의 함량을 조절하여 보정하였다. MB는 셀룰로오스 함량 50 wt%를 사용하였으며, sCMF 및 리그노셀룰로오스 적용에 따른 최종 배합비는 Table 3에 나타내었다. 마스터배치(MB)의 비율은 실험군에서 40~54 % 범위로 조절하였으며, 대조군인 CLB30은 기존 셀룰로오스 파우더 30 wt% 조건을 기준으로 MB 60%를 적용하였다. CLS 계열은 sCMF를 적용한 시료이며, CNL 계열은 리그노셀룰로오스를 적용한 시료이다.

2.2. 시편 사출

압출된 복합소재 펠렛은 사출 시험을 위해 시편 사출 장비(LS mtron. co., WIZ50E)를 사용하여 ISO 규격에 맞는 시편으로 성형하였다. 시편 금형은 ISO 527의 인장 시편과 ISO 180 기준의 굴곡 시편 금형을 사용하였다. 사출 온도는 220/210/200/190°C로 배럴 온도를 설정하였고, 금형 온도는 50°C로 설정하였다. 계량은 150 rpm, 사출 속도는 60 mm/s, 배압은 20 bar로 주었으며, 보압은 400 bar로 15~20초간 진행하였다. 사출 거리(보

압 절환 위치)는 초기 사출 진행 후 시편이 95 % 성형 되는 시점으로 설정하여 사출하였다. 냉각 시간은 10초로 고정하여 성형하였다.

2.3. 장비 및 시험 조건

복합소재의 성형 가능성과 물성 평가를 위하여 밀도, 용융지수, 인장강도, 충격강도 시험을 수행하였다. 밀도 측정장비(Alfa Mirage co., EW-300SG) 전자 비중계의 부력법을 사용하였으며, 증류수에서의 부력 원리를 활용하여 시편의 공기 중 무게와 수중 무게 차이를 통해 밀도를 산출하였다. 용융지수(MFR) 측정장비(Tinius Olsen co., MP1200 Melt Flow Indexer) ISO 1133 기준(230°C, 2.16 kg 조건)에서, 열가소성 수지의 유동성을 g/10 min 단위로 측정하였다. 인장강도 측정장비(ZwickRoell co., AllroundLine Z005) ISO 527 기준, dogbone 형태 시편을 이용하여 gauge length 5 cm, 시험 속도 5 mm/min 조건에서 수행하였다. 충격강도는 노치 가공된 시편을 대상으로 충격강도 시험기(Tinius Olsen co., IT504)를 사용하여 ISO 180 규격에 의거해 펜듈럼 에너지 2.75 J 조건에서 수행하였다. 각 물성 시험은 시료별 최소 5회 이상 반복 측정하였으며, 결과값은 평균값으로 제시하였다. 표준편차는 반복 측정값을 바탕으로 산출하였다. 또한 각 시료의 물성 변화는 대조군(CLB30)과의 비교를 통해 분석하였으며, 반복 측정 결과를 기반으로 물성 변화 경향을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

본 장에서는 셀룰로오스 복합소재의 색상, 밀도, 인장강도, 충격강도, 용융지수(MFR) 및 SEM 이미지를 분석하고, sCMF 및 리그노셀룰로오스 적용이 소재 물성에 미치는 영향을 고찰하였다.

3.1. 색상

Figure 1(a) 및 (b)에 나타난 바와 같이, 리그노셀룰로오스를 적용한 CNL05, CNL5T, CNL10 시편은 리그노셀룰로오스에 포함된 리그닌 성분의 영향으로 갈색빛을 나타내었다. 특히 리그노셀룰로오스 함량이 증가할수록 성형 후 시편의 색상이 짙어지는 경향이 관찰되었다. 이는 리그노셀룰로오스 치환이 복합소재의 외관 색상에도 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

3.2. 밀도

Figure 2에 나타난 바와 같이, sCMF와 리그노셀룰로오스를 적용한 복합소재의 밀도 측정 결과에서는 Talc를 투입한 CNL5T 시료를 제외한 모든 시료는 유사한 밀도 값을 보였다. Talc는 고밀도의 무기물로 적은 양의 투입으로도 밀도를 높였으며, Talc의 높은 비중과 리그노셀룰로오스 조성의 영향으로 Talc를 투입한 CNL5T 시료는 다른 시료 대비 상대적으로 높은 밀도를 나타내었다.

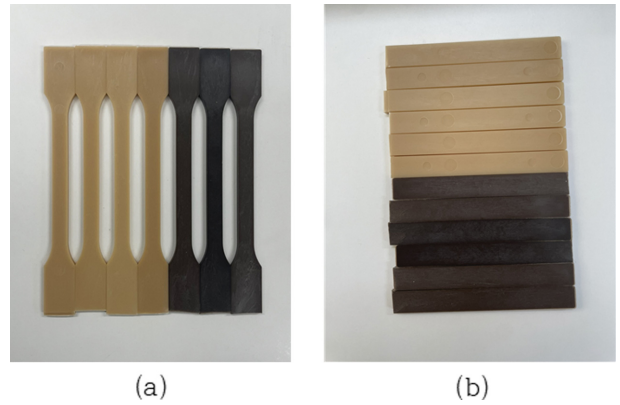


Fig. 1. Injection-molded specimens for (a) tensile testing (ISO 527) and (b) flexural and impact testing (ISO 180).

3.3. 인장강도

Figure 3에 나타난 바와 같이, 실리카 개질 셀룰로오스와 리그노셀룰로오스를 적용한 시료의 인장강도 측정 결과에서는 기존 셀룰로오스 파우더 함량 30 wt%를 적용한 대조군(CLB30)보다 높은 인장강도를 나타내었다. 실리카 개질 셀룰로오스의 경우 3 wt% 적용 시(CLS03), 5 wt% 적용 시(CLS05)보다 높은 인장강도를 나타내었으며, 이는 충전재 함량 증가에 따른 분산성 저하 및 응집 현상과 관련된 것으로 해석된다. 리그노셀룰로오스의 경우 투입 함량이 증가할수록 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, CNL10 시료에서 가장 높은 인장강도



Fig. 2. Density values of PP composites containing sCMF and lignocellulose.



Fig. 3. Tensile strength of PP composites reinforced with sCMF and lignocellulose.

를 확인하였다. 이는 리그닌 성분에 의한 계면 결합 효과와 충전제 분산 특성의 영향으로 판단된다. PP 기반 Wax를 적용한 CLS5W 시료는 Wax를 적용하지 않은 CLS05 시료보다 높은 인장강도를 나타내었고, Talc를 적용한 CNL5T 시료는 Talc를 적용하지 않은 CNL05 시료와 비교할 때 인장강도 향상 효과를 보이지 못했다. 이는 Talc의 무기 충전 특성이 리그노셀룰로오스의 계면 결합 향상 효과보다 우세하게 작용하여 응력 전달 효율 향상에 크게 기여하지 못한 결과로 해석된다.

3.4. 충격강도

Figure 4에 나타난 바와 같이, sCMF와 리그노셀룰로오스를 적용한 대부분의 시료는 단순 셀룰로오스 파우더를 적용한 CLB30(46 J/m)과 유사한 충격강도를 나타내었으나, Talc를 적용한 CNL5T 시료는 상대적으로 낮은 충격강도를 보였다. sCMF는 투입 함량 증가에 따라 충격강도가 소폭 증가하는 경향을 보였으며, 리그노셀룰로오스는 함량 변화에 따른 큰 차이를 나타내지 않았다. 충격강도는 개질 충전제의 종류 및 첨가제 변화에 비해 상대적으로 큰 변화 없이 유사한 수준을 유지하였다.

3.5. 용융지수 분석

Figure 5에 나타난 바와 같이, sCMF 및 리그노셀룰로오스 적용 시료는 동일 셀룰로오스 함량의 CLB30 대비

낮은 용융지수를 나타내었다. 이는 실리카 및 리그닌 성분이 PP matrix 내에서 고분자 사슬의 이동성을 제한하고, 충전제와 matrix 간 상호작용을 증가시켜 용융 점도를 증가시킨 데 기인한 것으로 해석된다. 반면 동일 계열 내에서는 충전제 함량 증가에 따라 용융지수가 일부 증가하는 경향을 보였는데, 이는 개질 충전제의 분산 상태와 보조 첨가제의 영향으로 용융 흐름성이 부분적으로 개선되었기 때문으로 판단된다.

3.6. 미세구조(SEM) 분석

Figure 6은 Cellulose와 Lignocellulose 원료의 표면 형상을 관찰한 SEM 이미지이다. Cellulose는 비교적 균일한 섬유형 구조와 매끄러운 표면 형상을 나타내었으며, 일부 섬유 응집 형태가 관찰되었다. 반면 Lignocellulose는 리그닌 성분의 영향으로 보다 거칠고 불규칙한 표면 구조를 나타내었으며, 표면의 요철과 불균일한 입자 형상이 확인되었다. 이러한 표면 특성 차이는 복합소재 내부에서 충전제와 PP matrix 간 기계적 결합 특성에 영향을 미칠 수 있는 것으로 해석된다.

Figure 7은 sCMF 및 Lignocellulose 기반 PP 복합소재의 파단면 SEM 이미지를 나타낸 것이다. CLS 계열 복합소재의 경우 충전제가 비교적 균일하게 분산된 형태를 나타내었으며, filler와 PP matrix 간 계면 분리가 상대적으로 적게 관찰되었다. 또한 비교적 치밀한 파단면 구조를 나타내어 충전제와 matrix 간 계면 접착성이



Fig. 4. Izod impact strength of PP composites containing sCMF and lignocellulose.



Fig. 5. Melt flow rate (MFR) of PP composites according to the type and content of modified cellulose-based fillers.

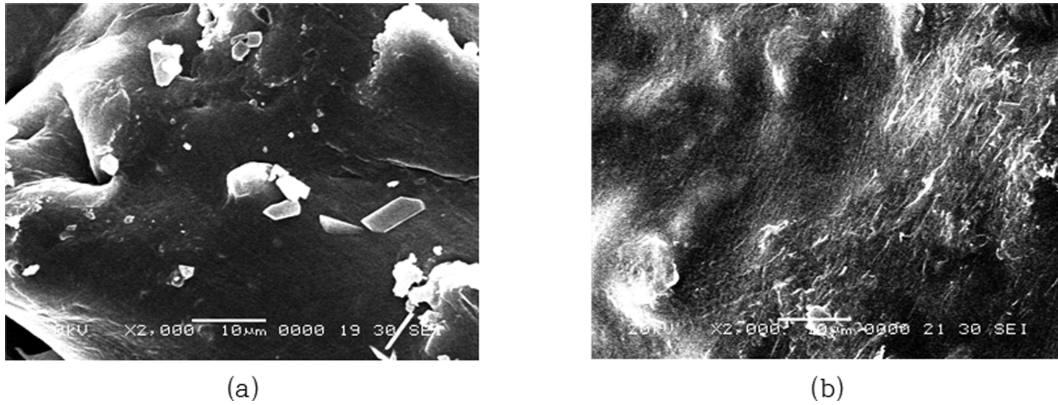


Fig. 6. SEM micrographs of raw materials observed at $\times 2000$ magnification: (a) cellulose and (b) lignocellulose.

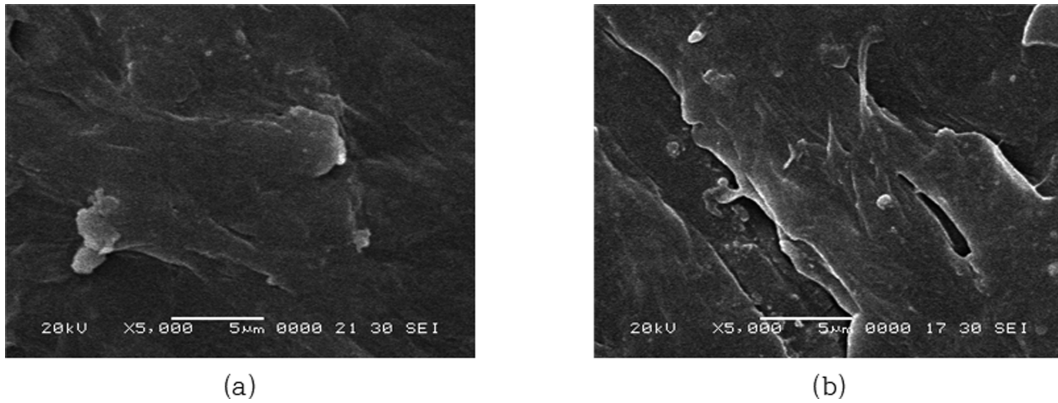


Fig. 7. SEM micrographs of fractured surfaces of representative PP composites observed at $\times 5000$ magnification: (a) CLS-based composite and (b) CNL-based composite.

향상된 것으로 해석된다. 이러한 미세구조 특성은 Fig. 3에서 확인된 인장강도 향상 경향과 유사한 결과를 보였다.

반면 CNL 계열 복합소재의 일부 영역에서는 충전재 응집(agglomeration) 형태가 관찰되었으며, 리그노셀룰로오스 및 무기 충전재에 의한 거친 파단면 구조와 판상 형태의 미세구조가 일부 확인되었다. 이러한 구조는 고분자 matrix 내부에서 충전재 간 기계적 interlocking 형성에 영향을 미칠 수 있으며, Fig. 3~5에서 확인된 물성 변화 경향과 유사한 결과를 나타내었다. 이상의 SEM 분석 결과는 sCMF 및 리그노셀룰로오스의 적용이 충전재의 분산성 및 계면 결합 특성 향상에 영향을 미치며, 이는 복합소재의 기계적 물성 변화와 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.

다만 본 연구에서는 SEM 분석을 통해 충전재의 분산성과 계면 특성을 관찰하였으나, sCMF의 표면 개질 특성과 리그노셀룰로오스의 화학적 구조 변화를 정량적으로 분석하지는 못하였다. 따라서 FTIR 및 열분석을 통한 표면 개질 여부, 화학적 구조 변화 및 열적 안정성에 대한 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 폴리프로필렌(PP)을 기지 수지로 하는 셀룰로오스 기반 복합소재의 물성 개선을 위해 표면 개질 셀룰로오스(sCMF)와 리그노셀룰로오스를 치환 적용하였다. 총 셀룰로오스 함량은 30 wt%로 고정하였으며, sCMF는 3~5 wt%, 리그노셀룰로오스는 5~10 wt% 범위에서 치환하고, Wax와 Talc 첨가에 따른 물성 변화도 함께 확인하였다.

치환 물질에 따라 성형 후 컬러의 차이가 발생하며, 리그노셀룰로오스에 포함된 리그닌 성분의 영향으로 짙은 갈색빛이 된다.

치환 물질과 관계없이 밀도는 약 1.03 g/cm^3 로 영향을 받지 않았으나, 무기물인 Talc가 첨가된 경우 CNL5T 시료는 1.07 g/cm^3 로 증가하였다.

인장강도는 sCMF를 치환한 경우 약 5~10% 증가하지만, 3 wt%에서 5 wt%로 치환량을 증가시키면 인장강도가 낮아지는 현상이 관찰된다. 리그노셀룰로오스의 경우는 반대로 5 wt%에서 10 wt%로 치환하면 인장강도는 7~22% 향상되어, 두 치환 물질 간에 인장강도에 미

치는 영향은 반대 성향을 확인할 수 있었다.

충격강도는 첨가물에 관계없이 45~51 J/m 범위로 CLB30 (46 J/m)과 유사한 수준을 유지하였다. sCMF의 경우 인장강도와 달리 함량 증가에 따라 10%의 성능 향상을 보이나, Talc를 적용한 CNL5T 시료는 20%의 성능 감소를 보였다.

용융지수(MFR)는 치환 및 첨가제의 영향으로 대조군인 CLB30의 4.8 g/10 min 대비 2.5~4.5 g/10 min 범위로 감소하여 유동성을 개선하지는 못하였지만, 리그노셀룰로오스가 10 wt% 치환된 경우 비교군과 같은 수준의 용융지수를 유지하였다.

따라서 sCMF와 리그노셀룰로오스는 기계적 물성은 향상시켰으나, 용융지수를 기존 수치 수준으로 유지하기 위해서는 리그노셀룰로오스 10 wt% 치환이 적절할 것으로 예상된다.

감사의 글

이 논문은 2026년도 한서대학교 교내연구지원사업에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] C. Cinelli and A. Lazzeri, “Cosmetic packaging: European regulatory aspects and sustainability”, *Cosmetics* 11 (2024) 110.
- [2] European Commission, “Packaging and packaging waste regulation (PPWR), regulation (EU) 2025/40 of the european parliament and of the council”, *Official Journal of the European Union* (2025).
- [3] M.J. John and S. Thomas, “Bio-composites: Progress and prospects”, *Prog. Polym. Sci.* 33 (2008) 341.
- [4] A.K. Mohanty, M. Misra and L.T. Drzal, “Surface modifications of natural fibers and performance of the resulting biocomposites: An overview”, *Compos. Interfaces* 12 (2005) 313.
- [5] Y. Habibi, “Key advances in the chemical modification of nanocelluloses”, *Chem. Soc. Rev.* 43(2014) 1519.
- [6] S.J. Eichhorn, “Cellulose nanowhiskers: promising materials for advanced applications”, *Soft Matter* 7 (2011) 303.
- [7] Q.T.H. Shubhra, A.K.M.M. Alam and M.A. Quaiyyum, “Mechanical properties of polypropylene composites: A review”, *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 26 (2013) 362.
- [8] H.S. Yang, H.J. Kim, H.J. Park, B.J. Lee and T.S. Hwang, “Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites”, *Composite Structures* 77 (2007) 45.
- [9] H.S. Kim, B.H. Lee, S.W. Choi, S. Kim and H.J. Kim, “The effect of types of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP) on the interfacial adhesion properties of bio-flour-filled polypropylene composites”, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 38 (2007) 1473.
- [10] S. Wang, Y. Lin, X. Zhang and C. Lu, “Towards mechanically robust cellulose fiber-reinforced polypropylene composites with strong interfacial interaction through dual modification”, *RSC Advances* 5 (2015) 50660.
- [11] M. Garcia, G. van Vliet, S.H. Jain, B.A.G. Schrauwen, A.U. Sarkissov, W.E. van Zyl and B.A. Boukamp, “Polypropylene/SiO₂ nanocomposites with improved mechanical properties”, *Reviews on Advanced Materials Science* 6 (2005) 169.
- [12] P.H.P.M. da Silveira, M.C.C. dos Santos, Y.S. Chaves, M.P. Ribeiro, B.Z. Marchi, S.N. Monteiro, A.V. Gomes, N.L.C.O. Tapanes, P.S.C. Pereira and D.C. Bastos, “Characterization of thermo-mechanical and chemical properties of polypropylene/hemp fiber biocomposites: Impact of maleic anhydride compatibilizer and fiber content”, *Polymers* 15 (2023) 3271.