

전처리 조건에 따른 케나프/폴리프로필렌 바이오 복합재료의 특성 변화

오준형* · 엄병환*^{*,**,*†}

*한경국립대학교 식품생명화학공학부 화학공학전공

17579 경기도 안성시 중앙로 327

**한경국립대학교 탄소중립자원센터

17579 경기도 안성시 중앙로 327

(2026년 2월 23일 접수, 2026년 4월 29일 수정본 접수, 2026년 5월 4일 채택)

Effects of Pretreatment Conditions on the Properties of Kenaf/Polypropylene Biocomposites

Jun Hyung Oh* and Byung Hwan Um^{*,**,*†}

*School of Food Biotechnology and Chemical Engineering, Hankyong National University, 327, Jungang-ro, Anseong, 17579, Korea

**Carbon-Neutral Resources Research Center, Hankyong National University, 327, Jungang-ro, Anseong, 17579, Korea

(Received 23 February 2026; Received in revised from 29 April 2026; Accepted 4 May 2026)

요 약

본 연구에서는 전처리 조건에 따른 케나프/폴리프로필렌(PP) 바이오 복합재료의 특성 변화를 분석하였다. 케나프 섬유는 NaOH 농도(2-6 wt.%) 및 H-factor(≈ 800) 기반의 중간 가혹도(moderate severity) 알칼리 조건과 산(H_2SO_4) 조건에서 처리되었으며, NREL 표준 방법을 이용한 HPLC 분석을 통해 화학 조성을 정량화 하였고, 복합재료의 열적 및 기계적 특성은 열중량분석(TGA)과 인장강도 시험을 통해 분석하였다. 연구 결과 알칼리 전처리에 의해 케나프 섬유 내 리그닌 및 헤미셀룰로오스 함량이 효과적으로 감소하였으며, 이는 섬유-매트릭스 간의 계면 결합 특성 개선으로 이어졌다. 복합재료의 인장강도는 섬유 함량 30 wt.%까지 유의미하게 향상되었으나, 40 wt.% 조건에서는 증가 폭이 감소하는 경향을 보였다. 열적 분석 결과, 전처리 조건에 따라 케나프 성분의 열분해 거동에는 차이가 나타났으나 PP 매트릭스의 열적 안정성은 비교적 유지되었다. 또한 적절한 전처리 조건과 섬유 함량에서 복합재료의 인장강도가 향상되었으며, 이를 통해 케나프/PP 바이오 복합재료의 최적 제조 조건을 도출하였다.

Abstract – This study investigated the effects of pretreatment conditions on the properties of kenaf/polypropylene (PP) biocomposites. Kenaf fibers were treated under alkaline conditions with moderate severity (NaOH 2–6 wt.%, H-factor ≈ 800) and acidic conditions. The chemical composition changes were quantitatively analyzed using NREL standard methods, ensuring the reliability of the data, while the thermal and mechanical properties of the biocomposites were evaluated by thermogravimetric analysis (TGA) and tensile testing, respectively. The results showed that alkali pretreatment effectively reduced lignin and hemicellulose contents, leading to improved interfacial bonding between the fibers and the PP matrix. The tensile strength increased significantly with fiber loading up to 30 wt.%, while a decrease in the enhancement rate was observed at 40 wt.%, which could be explained by the theoretical rule of mixtures and fiber agglomeration. Thermal analysis revealed that pretreatment influenced the thermal degradation behavior of kenaf components, whereas the thermal stability of the PP matrix was largely maintained.

Key words: Kenaf fiber, Pretreatment, Polypropylene, Biocomposites, Mechanical properties

1. 서 론

현대 산업 사회에서 환경 오염과 자원 고갈 문제는 지속 가능한 발전의 핵심 과제로 대두되고 있다. 특히 자동차, 건축 및 포장 산

업에서 널리 사용되는 유리섬유 강화 고분자 복합재료(Glass Fiber-Reinforced Polymer, GFRP)는 높은 비강도와 내구성을 지니고 있으나, 제조과정에서의 높은 에너지 소비와 폐기 시 생분해가 불가능하다는 한계로 인해 매립 및 소각 과정에서 환경적 부담을 야기한다[1,2]. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 기존 합성 섬유를 대체할 수 있는 친환경 소재인 식물성 천연섬유 강화 고분자 복합재료(Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites, NFRPC)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3].

천연섬유 강화 고분자 복합재료는 경량성, 상대적으로 낮은 제조

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bhun11@hknu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

비용 및 재생가능성을 장점으로 하여 차세대 구조용 소재로 주목받고 있다[1,3]. 그러나 천연섬유는 화학 조성 및 형태적 불균일성으로 인해 매트릭스와의 계면 상용성이 제한적이며, 이로 인해 기계적 성능 및 내구성 확보에 한계가 존재한다는 점 또한 지속적으로 보고되어 왔다[4,5]. 천연섬유 중 케나프(Kenaf, *Hibiscus cannabinus* L.)는 성장 속도가 빠르고 이산화탄소 흡수율이 높으며, 높은 셀룰로오스 함량을 기반으로 비교적 우수한 기계적 특성을 나타내는 대표적인 바이오매스 자원이다[4,6]. 또한 범용 열가소성 수지인 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)은 우수한 성형성, 내화학성 및 경제성을 갖추고 있어 케나프 섬유 강화 복합재료의 매트릭스로 널리 활용되고 있다[6]. 그럼에도 불구하고 케나프 섬유는 표면에 리그닌, 헤미셀룰로오스, 펙틴 및 왁스층과 같은 비셀룰로오스 성분을 포함하고 강한 친수성을 띠는 반면, PP와 같은 고분자 매트릭스는 소수성을 나타내어 두 소재 간의 계면 결합력이 낮다는 문제가 보고되어 왔다[7,8].

이러한 계면 특성의 불일치는 하중 전달 효율을 저하시켜 복합재료의 기계적 강도 감소 및 수분 흡수 증가로 이어질 수 있으며, 이를 개선하기 위해 섬유 표면 특성을 제어하는 전처리 공정의 필요성이 제기되어 왔다[9]. 특히 알칼리 수용액을 이용한 전처리 공정은 섬유 표면의 리그닌 및 헤미셀룰로오스 성분을 선택적으로 제거함으로써 셀룰로오스 비율을 증가시키고, 섬유의 표면 거칠기 및 반응성을 향상시키는 효과적인 방법으로 알려져 있다[4,9]. 최근 연구에서는 알칼리 전처리 조건에 따라 천연섬유 강화 폴리프로필렌 복합재료의 기계적 및 열적 특성이 유의미하게 변화하며, 전처리 용매 농도의 최적화가 복합재료 성능 확보에 중요한 변수로 작용함이 보고되었다[10]. 한편, 전처리 공정 자체는 섬유의 화학 조성뿐만 아니라 구조적 특성에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 처리 조건에 따라 셀룰로오스 비율 증가, 비셀룰로오스 성분 제거 및 표면 상태 개선 등의 변화가 나타날 수 있다[11,12]. 이러한 전처리 효과는 이후 복합재료 제조 시 계면 결합 특성 및 물성 발현에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인으로 작용한다.

화학적 전처리와 더불어 섬유의 물리적 특성을 제어하기 위한 접근으로 볼 밀링(ball milling)과 같은 물리적 미세화 공정이 주목받고 있다. 섬유의 입자 크기를 감소시킬 경우 비표면적이 증가하여 매트릭스와의 접촉 면적이 확대될 수 있으며, 이는 계면 결합 특성 및 복합재료의 물성 향상에 기여할 수 있다[13]. 그러나 화학적 전처리 조건과 물리적 미세화 공정을 복합적으로 적용하고, 이에 따른 케나프 섬유의 화학 조성 변화와 최종 복합재료 물성 간의 상관관계를 체계적으로 분석한 연구는 여전히 제한적인 실정이다.

특히 전처리 조건에 따른 리그노셀룰로오스 성분 변화를 정량적으로 분석하고, 이를 기반으로 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 및 기계적 특성을 연계하여 평가한 연구는 충분히 보고되지 않았다. 이에 본 연구에서는 알칼리 용매 농도 및 섬유 함량 변화에 따른 케나프 섬유의 화학 조성 변화를 HPLC 분석을 통해 정량적으로 평가하고, 최적 조건을 도출하였다. 이후 물리적 미세화 공정과 알칼리 및 산 전처리 공정을 적용하여 제조한 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 및 기계적 특성을 TGA 및 인장강도 시험을 통해 종합적으로 분석함으로써, 케나프/PP 바이오 복합재료의 제조 조건 최적화를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험 재료

본 연구에 사용된 케나프(Kenaf, *Hibiscus cannabinus* L.)는 전라북도 농업기술원으로부터 제공받았으며, 전처리되지 않은 원료를 사용하였다. 실험에 앞서 24시간 오븐에서 건조하여 줄기 부분만 선별하여 사용하였다. 복합재료의 매트릭스로는 범용 열가소성 수지인 폴리프로필렌(Polypropylene, PP)을 사용하였으며, Sigma-Aldrich 사에서 구매한 펠릿 형태의 제품을 별도의 가공 없이 사용하였다. 섬유의 화학적 전처리를 위한 수산화나트륨(Sodium hydroxide, NaOH, 98%)과 황산(Sulfuric acid, H₂SO₄, 98%) 역시 Sigma-Aldrich 사에서 구매하여 사용하였으며, 세척 및 희석 용매로는 증류수(Distilled water)를 사용하였다.

2-2. 알칼리 전처리 조건 및 섬유 함량에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료 제조

2-2-1. 케나프 원료의 알칼리 전처리

케나프 원료의 섬유화 및 계면 특성 변화를 유도하기 위해 NaOH 수용액을 이용한 알칼리 전처리를 수행하였다. 본 알칼리 전처리를 통해 리그닌 및 헤미셀룰로오스와 같은 비셀룰로오스 성분이 제거되었으며, 이를 통해 섬유화된 케나프 섬유를 확보하였다. 알칼리 전처리는 1 L 규모의 교반식 batch 반응기(Chemresys, R-201, 미국)를 이용하여 수행하였다. 건조된 케나프 원료 60 g과 NaOH 수용액 500 mL를 반응기에 투입하였으며, NaOH 수용액은 증류수에 용해시켜 질량 기준 농도가 2, 4, 6 wt.%가 되도록 조제하였다. 반응기 내부 온도를 170 °C까지 승온시키고, 승온 시간과 반응 온도에서의 반응 시간을 조절하여 화학적 반응 가속도(H-factor)가 약 800이 되도록 설정하였다. H-factor는 반응 온도와 반응 시간을 동시에 고려한 지표로, 알칼리 전처리 조건의 재현성을 확보하기 위해 사용되었다. 본 연구에서 적용한 NaOH 농도 범위(2-6 wt.%) 및 H-factor ≈ 800 조건은 리그노셀룰로오스계 바이오매스의 알칼리 전처리 시 리그닌과 헤미셀룰로오스를 효과적으로 용출시키면서도 셀룰로오스의 구조적 손상을 최소화할 수 있는 중간 가속도(moderate severity) 수준으로 설정되었다[14]. 이를 통해 본 연구에서는 열적 가속도의 영향을 최소화하고, NaOH 농도 변화에 따른 화학적 전처리 효과를 보다 명확히 비교하고자 하였다.

$$H = \int_0^t e^{\left(\frac{43.19 - 16.113}{T}\right)} dt \quad (1)$$

전처리 반응 후 반응기를 상온까지 냉각시킨 뒤, 고체 시료를 여과하고 증류수를 이용하여 중화 및 세척과정을 반복 수행하였다. 이후 시료는 24시간 이상 오븐에서 건조하여 실험에 사용하였다. 각 NaOH 수용액의 농도 조건에 대해 3회 반복 실험을 수행하였으며, 전처리 후 수율을 계산하였다.

$$\text{Yield} = \frac{\text{Sample weight of solid sample}}{\text{Sample weight of feed stock}} \times 100 \quad (2)$$

2-2-2. 섬유 함량에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료 제조

알칼리 전처리를 통해 제조된 케나프 섬유를 PP 매트릭스와 혼합하여 케나프/PP 바이오 복합재료를 제조하였다. 모든 복합재료는 총 질량 20 g을 기준으로 하였으며, 케나프 섬유와 PP의 중량비를




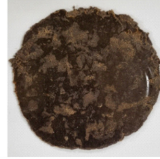



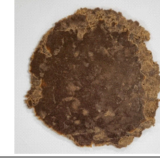

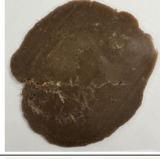


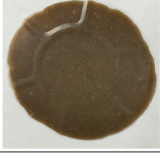



NaOH concentration	Mixing ratio	Kenaf : PP (w:w)			
		1:9	2:8	3:7	4:6
untreated					
NaOH 2 wt.%					
NaOH 4 wt.%					
NaOH 6 wt.%					

Fig. 1. Photographs of kenaf/PP biocomposites prepared at different NaOH pretreatment conditions and kenaf contents.

각각 1:9, 2:8, 3:7, 4:6으로 설정하여 섬유 함량 변화에 따른 영향을 비교하였다. 혼합은 250 °C로 설정된 가열 교반기에서 수행하였으며, 혼합이 다 이루어진 후 복합재료는 스테인리스 금형에 주입하여 압축 성형하였다. 성형이 완료된 바이오 복합재료는 상온에서 냉각한 후 금형으로부터 탈형(demolding)하여 바이오 복합재료를 제조하였다. 제조된 케나프/PP 바이오 복합재료의 외관 및 성형 상태를 Fig. 1에 나타내었다.

2-3. 물리적 미세화 및 전처리에 따른 케나프/PP 바이오 복합 재료 제조

2-3-1. 케나프 원료의 물리적 미세화

케나프의 입자 크기에 따른 화학적 처리 효과를 분석하기 위해 볼 밀링 분쇄기(Globallab, GLBM-G, 대한민국)를 사용하여 케나프 원료를 물리적으로 미세화하였다. 본 연구에서 적용한 물리적 미세화 조건은 입자 크기를 약 17 μm로 조절하여 비표면적을 극대화하면서도, 보강재로서의 기능을 상실할 정도의 과도한 섬유 길이 감소를 초래하지 않는 수준임을 확인하여 결과 해석의 타당성을 확보하였다. 입자 크기 효과 비교를 위해 미세화되지 않은 약 2000 μm 크기의 케나프 원료를 함께 사용하였다.

2-3-2. 미세화된 케나프 원료의 알칼리/산 전처리

알칼리(NaOH) 조건과의 메커니즘 차이를 명확히 하고자 산(H₂SO₄) 전처리 조건을 비교군으로 포함하였다. 이를 통해 헤미셀룰로오스 우선 가수분해(산 조건)와 리그닌 용출(알칼리 조건)이 최종 복합재료의 물성에 미치는 차별적 영향을 분석함으로써, 알칼리 전처리의 우수성과 전처리 메커니즘에 대한 종합적인 이해를 도모하고자 하였다. 화학적 전처리는 각각 1 wt.% 농도의 수용액을 조

제하여 적용하였으며, 입자 크기에 따른 전처리 효과를 비교하기 위해 평균 입자 크기 17 μm 및 2000 μm의 케나프 원료를 사용하였다. 전처리 공정은 2.2.1절에 제시된 알칼리 전처리 공정과 동일한 장비 및 절차를 적용하였으며, 반응 온도는 150 °C 및 200 °C로 설정하여 온도 조건에 따른 영향을 비교하였다. 반응 종료 후에는 반응기를 상온까지 냉각시킨 뒤, 고체 시료를 여과하고 증류수로 충분히 세척하여 중화한 후 24시간 이상 오븐에서 건조하여 케나프 섬유를 제조하였다.

2-3-3. 입자크기 및 전처리에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료 제조 전처리된 케나프 섬유를 사용하여 케나프/PP 바이오 복합재료를 제조하였다. 복합재료 제조 시 케나프 섬유와 PP의 중량비는 알칼리 전처리 및 섬유 함량 분석을 통해 도출된 최적 조건인 3:7로 고정하였으며, 제조 공정은 2.2.2절에 제시된 방법과 동일하게 수행하였다. 제조된 케나프/PP 바이오 복합재료의 외관 및 성형 상태를 Fig. 2에 나타내었다.

2-4. 케나프 섬유의 화학 조성 분석

케나프 섬유의 화학 조성을 분석하기 위해 National Renewable Energy Laboratory(NREL)에서 제시한 바이오매스 성분 분석 표준 방법(NREL/TP-510-42618, 42619)을 인용하여 사용하였다. 각 시료는 0.3000 ± 0.0001 g씩 3개의 시험관에 담은 후, 황산(H₂SO₄, 72 wt.%) 3 mL를 첨가하여 혼합하였다. 이후 30 °C로 유지된 항온조에서 1시간 동안 1차 가수분해를 진행하였다.

가수분해가 완료된 시료는 100 mL 메디아병으로 옮긴 후 증류수 84 mL를 추가하였으며, 121 °C에서 1시간 동안 오토클레이브를 이용해 2차 가수분해를 수행하였다. 반응 후 시료를 상온으로 냉각

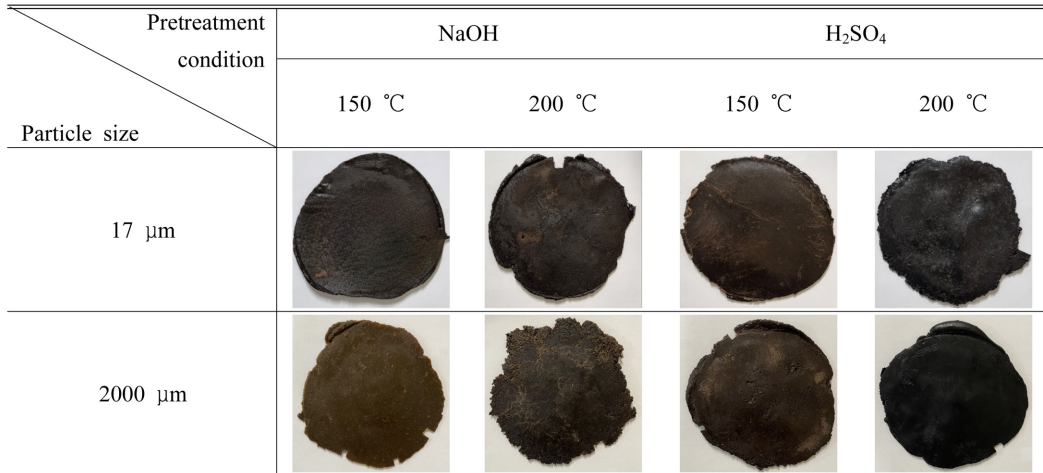


Fig. 2. Photographs of kenaf/PP biocomposites prepared with different particle sizes and alkali/acid pretreatment conditions at 150 and 200 °C.

한 뒤, 상층액 1 mL 를 채취하여 고성능 액체 크로마토그래피 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC) 분석에 사용하였다. HPLC 분석은 Shimadzu사의 Aminex HPX-87H 컬럼을 이용하여 수행하였으며, 컬럼 오븐 온도는 60 °C로 설정하였다. 이동상은 5 mM의 황산 수용액을 사용하였고, 유속은 0.6 mL/min으로 유지하였다. 이를 통해 셀룰로오스 유래 당 성분의 조성을 파악하였다. HPLC 분석 후 남은 용액은 여과하여 고체 잔여물을 회수하였으며, 증류수로 충분히 세척한 후 55 °C 오븐에서 24시간 동안 건조하였다. 건조된 고체 잔여물의 질량을 측정 한 뒤, 550 °C에서 소성기로 가열하여 잔존 질량을 측정함으로써 리그닌 및 회분(ash) 함량을 계산하였다.

2-5. 바이오 복합재료의 열적 및 기계적 특성 평가

바이오 복합재료의 열적 안정성은 열중량분석(Thermogravimetric Analysis, TGA)을 통해 평가하였다. 분석은 ASTM D7582-12 표준 시험 방법에 따라 수행하였으며, PerkinElmer사의 Pyris 1 모델을 사용하였다. 약 5-9 mg의 시료를 도가니에 담아 분석을 진행하였으며, 질소(N₂) 분위기 하에서 30 °C부터 600 °C까지 20 °C/min의 가열 속도로 승온하였다. 이를 통해 온도에 따른 질량 변화를 분석하여 열분해 거동 및 열적 안정성을 평가하였다.

본 연구에서는 섬유-매트릭스 간의 계면 특성 변화에 가장 민감하게 반응하는 지표인 인장강도를 중심으로 기계적 물성을 평가하였다. 시편은 가로 10 mm, 세로 70 mm, 두께 1 mm로 제작하였으며, 각 조건당 3회 반복 측정을 수행하였다. 인장강도 시험은 얇은 플라스틱 시트의 인장 특성 평가를 위한 ASTM D882 표준 시험 방법에 따라 수행하였다. 이는 전처리 조건에 따른 계면 개질 효과를 파악하는 데 적합한 접근이며, 추후 굽힘강도 및 충격강도 등 다

양한 물성 평가를 통해 바이오 복합재료의 실용적 적용 범위를 구체화할 예정이다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 알칼리 전처리 조건에 따른 케나프 섬유의 화학 조성 변화

알칼리 전처리 조건에 따른 케나프 섬유의 화학 조성 변화를 정량적으로 분석하기 위해 HPLC 분석을 수행하였다(Table 1). 전처리되지 않은 케나프 원료와 비교하여, NaOH 수용액을 이용한 알칼리 전처리 이후 케나프 섬유의 화학 조성은 전처리 조건에 따라 뚜렷한 변화를 나타냈다. 셀룰로오스 성분을 대표하는 glucose 함량은 전처리되지 않은 시료에서 61.58 wt.%로 나타났으나, NaOH 농도가 증가함에 따라 2, 4 및 6 wt.% 조건에서 각각 80.35, 84.82 및 89.31 wt.%로 점진적인 증가 경향을 보였다. 이는 알칼리 전처리를 통해 비셀룰로오스 성분이 제거되면서 상대적으로 셀룰로오스 성분의 비율이 증가하였음을 의미한다. 반면, 헤미셀룰로오스 성분을 구성하는 xylose 및 arabinose 함량은 모두 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 xylose 함량은 전처리되지 않은 시료의 17.84 wt.%에서 NaOH 농도 증가에 따라 12.57, 11.09 및 6.92 wt.%로 뚜렷하게 감소하였다. 이는 알칼리 전처리 조건이 헤미셀룰로오스 성분 제거에 효과적으로 작용하였음을 시사한다. 산불용성 리그닌(Acid Insoluble Lignin, AIL) 함량 또한 알칼리 전처리 조건에 따라 현저한 감소를 보였다. 전처리되지 않은 시료의 AIL 함량은 9.92 wt.%였으나, NaOH 4 wt.% 조건에서 2.76 wt.%로 크게 감소하였으며, 6 wt.% 조건에서는 1.09 wt.%까지 감소하였다. 이러한 결과는 알칼리 전처리 과정이 리그닌 제거에 효과적임을 보여주며, 특히 4 wt.% 이상의 조건에서 리그닌 제거 효과가 두드러짐을 확인할 수 있다.

Table 1. Chemical composition of kenaf fibers subjected to alkali pretreatment determined by HPLC

Alkali conc. (wt.%)	Glu (wt.%)	Hemicellulose sugars (wt.%)		Acetyl (wt.%)	T. Sugar (wt.%)	Ash (wt.%)	AIL (wt.%)
		Xyl.	Arab.				
Untreated	61.58	17.84	1.74	2.07	83.23	1.68	9.92
2	80.35	12.57	1.80	2.11	96.83	1.41	8.55
4	84.82	11.09	0.82	2.01	98.74	1.11	2.76
6	89.31	6.92	1.47	2.19	99.89	1.13	1.09

※Glu.-Glucose; Xyl.-Xylose; Ara.-Arabinose; T.sugar-Total Sugar; AIL-Acid Insoluble Lignin

Table 2. Yield of kenaf fibers obtained under different alkali pretreatment conditions

NaOH concentration (wt.%)	2	4	6
Yield (%)	48.06 ± 1.37	40.26 ± 1.74	34.28 ± 1.43

한편, 회분(ash) 함량은 알칼리 전처리 후 전반적으로 감소하는 경향을 나타내어, 전처리 과정 중 무기 성분의 일부가 제거되었음을 시사하였다. 전체 당(total sugar) 함량은 알칼리 전처리 후 96 wt.% 이상으로 증가하여, 처리된 케나프 섬유가 다당류 성분 위주로 구성되어 있음을 확인할 수 있었다.

3-2. 알칼리 전처리 조건에 따른 케나프 섬유의 수율 변화

알칼리 전처리 조건에 따른 케나프 섬유의 수율 변화를 Table 2에 나타내었다. NaOH 수용액 농도가 증가함에 따라 케나프 섬유의 수율은 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. NaOH 농도 2, 4, 6 wt.% 조건에서 수율은 각각 48.06 ± 1.37%, 40.26 ± 1.74%, 및 34.28 ± 1.43%로 측정되었다. 알칼리 용매 농도 증가에 따른 수율 감소는 리그닌 및 헤미셀룰로오스 성분의 제거로 인한 고품분 손실에 기인한 것으로, 이는 천연섬유의 알칼리 전처리 과정에서 일반적으로 보고되는 경향과 일치한다[5]. 즉, 알칼리 전처리 과정에서 리그닌 및 헤미셀룰로오스 성분이 효과적으로 제거됨에 따라 고품분 손실이 증가한 결과로 해석될 수 있다. 특히 NaOH 농도가 증가할수록 리그닌 및 헤미셀룰로오스 제거가 더욱 촉진되어 수율이 추가적으로 감소하는 경향이 관찰되었다. 본 결과는 3.1절의 HPLC 분석 결과에서 확인된 리그노셀룰로오스 조성 변화 경향과 일관된 결과를 나타낸다.

3-3. 알칼리 전처리 조건 및 섬유 함량에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 특성 변화

알칼리 전처리 조건 및 섬유 함량 변화에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 특성을 평가하기 위해 열중량분석(TGA)을 수행하였으며, TGA 분석 결과, 케나프 성분의 초기 분해 온도(Td 5%)는 약 250 °C 이상으로 나타났다. 이는 복합재료 제조 공정 온도인 250 °C가 재료의 급격한 열적 열화를 유발하지 않는 안전 범위 내에 있음을 시사하며, 공정 적용 측면에서 타당한 조건임을 확인하였다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 모든 시료는 약 30 °C에서 600 °C까지 질소 분위기에서 분석되었으며, 질량 변화 곡선(TG)과 미분 열중량 곡선(DTG)을 함께 비교하였다. 무처리 시료(Fig. 3[a,b])의 경우, 케나프 섬유가 포함된 복합재료에서 약 250-380 °C 범위에서 초기 질량 감소가 관찰되었으며, 이는 케나프 섬유에 포함된 헤미셀룰로오스 및 셀룰로오스 성분의 열분해에 기인한 것으로 판단된다. 이후 400 °C 이상 영역에서는 폴리프로필렌 매트릭스의 주된 열분해가 진행되며 급격한 질량 감소가 나타났다.

NaOH 용매를 적용한 복합재료(Fig. 3[c-h])에서는 농도에 따라 열분해 거동의 차이가 관찰되었다. 알칼리 용매가 적용된 시료의 경우, 무처리 시료와 비교하여 케나프 성분에 해당하는 열분해 구간에서 DTG 피크의 강도 및 형태에 변화가 관찰되었으며, 이는 전처리 과정에서 리그닌 및 헤미셀룰로오스 성분의 일부가 제거되어 구성 성분 비율이 변화한 결과로 해석될 수 있다.

또한 동일한 전처리 조건에서 케나프 섬유 함량이 증가함에 따라 300-400 °C 영역에서의 질량 감소 비율이 점진적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 복합재료 내 열적 안정성이 상대적으로 낮

은 천연섬유 성분의 비율 증가에 기인한 것으로 판단된다. 반면, 폴리프로필렌의 주 열분해 온도 영역(약 430-500 °C)은 전처리 조건 및 섬유 함량 변화에 따라 큰 이동을 보이지 않아, 매트릭스 자체의 열적 거동은 상대적으로 유지되는 것으로 확인되었다.

3-4. 알칼리 전처리 및 섬유 함량에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 기계적 특성 변화

알칼리 전처리 조건 및 케나프 섬유 함량 변화에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장강도 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 순수 PP의 인장강도는 29.6 MPa로 측정되었으며, 케나프 섬유를 첨가한 복합재료의 경우 전처리 조건 및 섬유 함량에 따라 인장강도가 상이한 경향을 나타내었다. 무처리 케나프/PP 복합재료의 경우, 케나프 섬유 함량이 증가함에 따라 인장강도가 전반적으로 증가하는 경향을 보였으나, 30% 이상에서는 증가 폭이 제한적이었으며 40%에서는 오히려 감소하는 경향이 관찰되었다. 이러한 강도 정체 현상은 복합재료의 이론적 혼합법칙에 따라 섬유 함량이 임계치에 도달하면서 매트릭스 내 섬유의 수분감소와 이에 따른 유효 응력 전달 면적의 감소로 설명될 수 있다. NaOH 2 wt.%로 전처리 처리된 복합재료에서는 무처리 시료 대비 인장강도가 다소 향상되었으나, 전반적인 강도 수준은 제한적이었다. 반면, NaOH 4 wt.%로 전처리 처리된 복합재료의 경우 케나프 섬유 함량 증가에 따라 인장강도가 크게 향상되었으며, 특히 섬유 함량 30% 조건에서 61.9 MPa의 높은 인장강도를 나타내었다. 이는 알칼리 전처리를 통해 케나프 섬유 표면의 리그닌 및 헤미셀룰로오스와 같은 비셀룰로오스 성분이 효과적으로 제거되어 섬유 표면 거칠기 및 반응성이 향상되고, 이에 따라 PP 매트릭스와의 계면 결합력이 크게 개선된 결과로 해석될 수 있다[4,10]. 한편, 섬유 함량이 40%로 증가할 때 인장강도는 소폭 증가하였으나, 증가 폭은 30% 조건 대비 현저히 감소하였다. 이는 과도한 섬유 함량으로 인해 매트릭스 연속성이 저하되고, 섬유 간 응집 가능성이 증가하여 하중 전달 효율이 제한되었기 때문으로 판단된다. 이러한 결과를 종합할 때, NaOH 4 wt.% 전처리 조건에서 케나프 섬유와 PP의 중량비가 3:7일 때 계면 결합 효과와 매트릭스 연속성 간의 균형이 가장 우수한 최적 조건으로 판단된다.

반면, NaOH 6 wt.% 전처리 조건에서는 과도한 알칼리 처리로 인해 셀룰로오스 사슬의 부분적인 손상 또는 섬유 구조 약화가 발생했을 가능성이 있으며, 이로 인해 복합재료의 인장강도 향상 효과가 제한된 것으로 해석될 수 있다. 이러한 경향은 기존 연구에서 보고된 과도한 알칼리 처리에 따른 셀룰로오스 기반 섬유의 구조적 열화 결과와도 일치한다[7,8]. 전처리 후 기계적 특성의 향상은 비셀룰로오스 성분 제거에 따른 계면 결합력 개선에 기인한 것으로 해석된다. 다만, 본 연구 범위 내에서는 SEM을 이용한 직접적인 계면 관찰이 수행되지 않았으므로, 해당 결과는 화학 조성 변화와 기계적 물성 간의 상관관계를 통한 간접적 입증이라는 해석적 한계를 지닌다. 향후 미세구조 분석을 통해 이를 시각적으로 보완할 계획이다.

이상의 결과를 종합하면, 알칼리 전처리 조건과 케나프 섬유 함

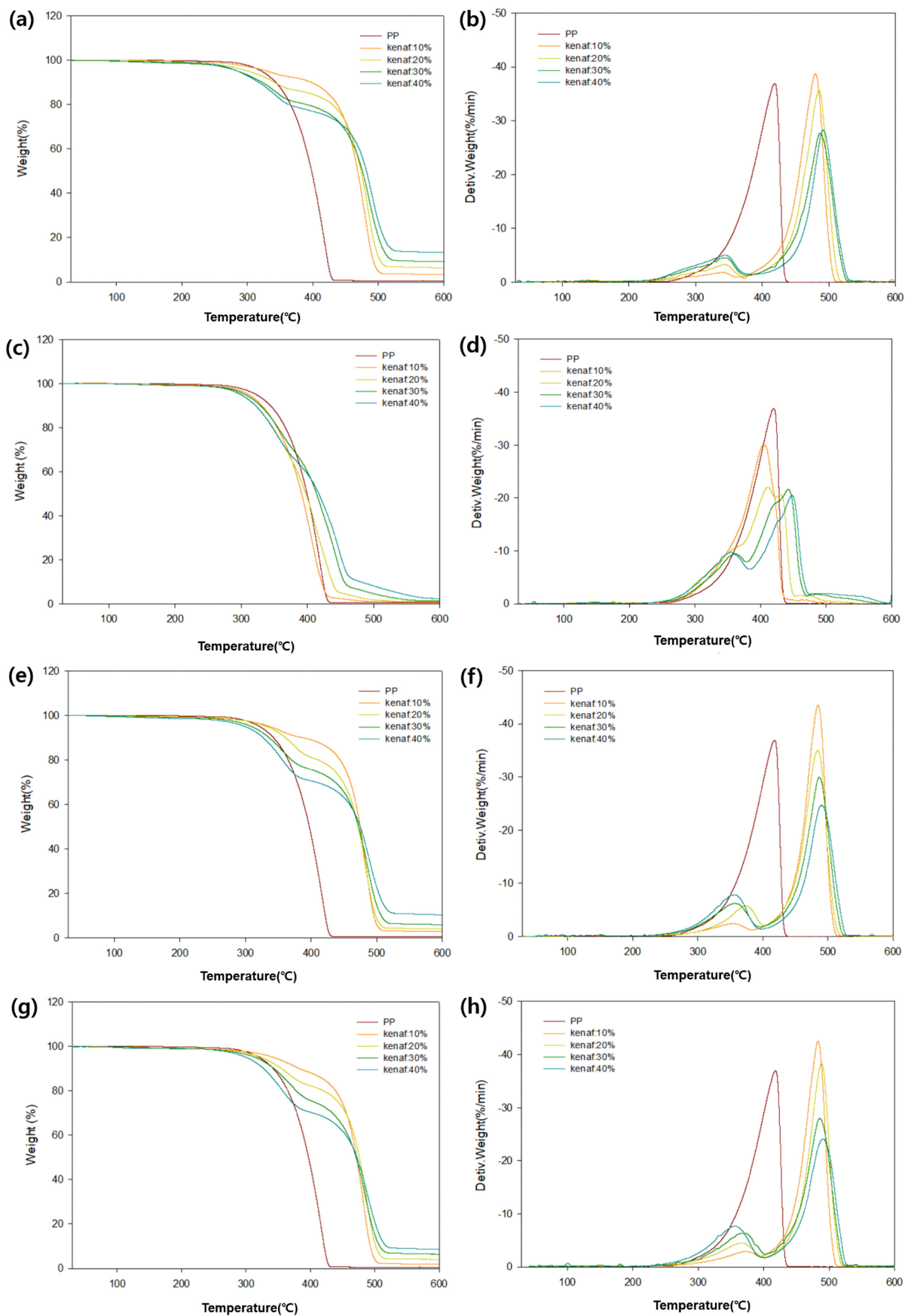


Fig. 3. TG and DTG curves of kenaf/PP biocomposites with different kenaf contents under various alkali pretreatment conditions: [a, b] untreated, [c, d] NaOH 2 wt.%, [e, f] NaOH 4 wt.%, and [g, h] NaOH 6 wt.%

Table 3. Tensile strength of kenaf/PP biocomposites as a function of NaOH concentration and kenaf fiber content

Samples	NaOH conc. (wt.%)	Kenaf contents (%)	Tensile strength (MPa)
PP	-	0	29.6
Untreated Kenaf/PP	0	10	27.9
		20	28.4
		30	32.8
		40	32.4
	2	10	22.4
		20	26.8
		30	30.7
		40	34.6
Treated Kenaf/PP	4	10	33.3
		20	50.4
		30	61.9
		40	64.2
	6	10	21.9
		20	24.4
		30	42.2
		40	45.6

량은 케나프/PP 바이오 복합재료의 기계적 특성에 결정적인 영향을 미치며, 본 연구에서 적용한 NaOH 4 wt.% 전처리 조건과 섬유 함량 30%가 인장강도 향상 측면에서 가장 우수한 조합임을 확인하였다. 이는 이후 물리적 미세화 및 복합 전처리 조건을 적용한 복합재료 설계의 기준 조건으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3-5. 물리적 미세화 및 전처리 조건에 따른 케나프 섬유의 수율 변화

물리적 미세화 및 전처리 조건에 따른 케나프 섬유의 수율 변화를 Table 4에 나타내었다. NaOH 및 H₂SO₄를 이용한 전처리 공정에서 반응 온도와 입자 크기에 따라 케나프 섬유의 수율은 뚜렷한 차이를 보였다. NaOH 전처리의 경우, 150 °C 조건에서 입자 크기 2000 μm 시료의 수율은 64.68 ± 1.17%로 나타났으며, 물리적 미세화를 적용한 17 μm 시료에서는 68.55 ± 0.10%로 다소 증가하였다. 이는 입자 크기 감소로 인해 전처리 용매와의 접촉 면적이 증가하면서 비교적 완만한 조건에서 섬유 분리가 효과적으로 진행되었기 때문으로 판단된다. 반면, 200 °C 조건에서는 수율이 전반적으로 감소하여 2000 μm 시료에서 55.49 ± 1.09%, 17 μm 시료에서 59.31 ± 0.46%로 측정되었다. 이는 고온 조건에서 리그닌 및 헤미셀룰로오스 제거가 보다 촉진되면서 고품분 손실이 증가한 결과로 해석될

Table 4. Yield of kenaf fibers as a function of particle size and alkali/acid pretreatment conditions

Conditions			
Solvent	Temperature, °C	particle size, μm	Average yield, %
NaOH	150	2000	64.68 ± 1.17
		17	68.55 ± 0.10
	200	2000	55.49 ± 1.09
		17	59.31 ± 0.46
H ₂ SO ₄	150	2000	53.21 ± 0.21
		17	61.43 ± 2.11
	200	2000	27.75 ± 5.70
		17	46.41 ± 5.91

수 있다.

H₂SO₄ 전처리의 경우, NaOH 전처리와 비교하면 전반적으로 낮은 수율을 나타냈다. 특히 200 °C 조건에서는 입자 크기 2000 μm 및 17 μm 시료에서 각각 27.75 ± 5.70% 및 46.41 ± 5.91%로 급격한 수율 감소가 관찰되었다. 이는 산 전처리 조건에서 셀룰로오스 성분까지 부분적으로 가수분해가 진행되었기 때문으로 판단되며, 고온 조건에서 이러한 현상이 더욱 두드러지게 나타난 것으로 보인다. 전반적으로 물리적 미세화는 동일한 전처리 조건에서 수율을 증가시키는 경향을 보였으나, 전처리 용매의 종류와 반응 온도가 수율에 보다 지배적인 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 이후 복합재료 제조 시 섬유 수율과 함께 섬유의 화학적 안정성 및 구조적 특성을 종합적으로 고려한 공정 조건 선정의 필요성을 시사한다.

3-6. 물리적 미세화 및 전처리 조건에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 특성 변화

물리적 미세화 및 전처리 조건에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 거동을 평가하기 위해 열중량분석(TGA)을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 열중량분석 결과, 약 200-300 °C 구간에서의 중량 감소는 헤미셀룰로오스의 열분해에 기인하며, 300-400 °C 구간은 셀룰로오스의 주된 분해 영역으로 판단된다. 알칼리 전처리에 의해 헤미셀룰로오스 및 리그닌 성분이 감소함에 따라, 해당 온도 영역에서의 분해 거동이 변화하였으며 이는 앞서 분석한 화학 조성 결과와 일치하는 경향을 보였다. Fig. 4[a]는 2000 μm 조건에서 제조된 케나프/PP 바이오 복합재료의 열중량 곡선을 나타낸 것이다. 모든 시료에서 약 250-380 °C 구간에서 완만한 질량 감소가 관찰되었으며, 이는 케나프 섬유에 포함된 헤미셀룰로오스 및 셀룰로오스 성분의 단계적 열분해 거동에 기인한 것으로 해석된다. 이러한 열분해 특성은 천연섬유 강화 고분자 복합재료의 TGA 분석에서 일반적으로 보고되는 결과와도 일치한다[15-17]. 미분 열중량 곡선(Fig. 4[b])을 통해 전처리 조건에 따른 열분해 거동 차이를 보다 명확히 확인할 수 있었다. 알칼리(NaOH) 및 산(H₂SO₄) 전처리 조건에 따라 케나프 성분에 해당하는 열분해 피크(약 300-360°C)의 강도 및 형태가 서로 다르게 나타났으며, 이는 전처리 과정에서 비셀룰로오스 성분 제거 정도 및 섬유 화학 조성 변화가 상이하게 반영된 결과로 해석된다.

특히 NaOH 전처리 조건의 경우, 150 °C 및 200 °C 처리 시료 모두에서 케나프 성분 분해 구간의 DTG 피크가 비교적 명확하게 분리되어 나타났으며, 이는 알칼리 전처리가 비셀룰로오스 성분 제거에 효과적으로 작용했음을 시사한다. 반면, H₂SO₄ 전처리 조건에서 200 °C 처리 시 600 °C 기준 잔존 질량이 상대적으로 높게 유지되었으며, 케나프 성분에 해당하는 DTG 피크는 비교적 완만하게 분포하는 경향을 보였다. 이는 산 전처리 조건에서 일부 섬유 성분이 열적으로 안정한 잔존 구조로 남거나, 분해가 특정 온도 구간에 집중되지 않고 넓은 온도 범위에 걸쳐 진행되었음을 시사한다. 한편, 모든 전처리 조건에서 폴리프로필렌 매트릭스의 주 열분해 온도 영역(약 430-500 °C)은 큰 이동 없이 유지되었으며, 이는 전처리 공정이 매트릭스 자체의 열적 안정성에는 큰 영향을 미치지 않음을 의미한다. 이러한 결과는 전처리 공정이 주로 섬유 성분의 화학 조성 및 구조를 변화시켜 복합재료의 열분해 거동에 간접적으로 영향을 미친다는 점을 보여준다.

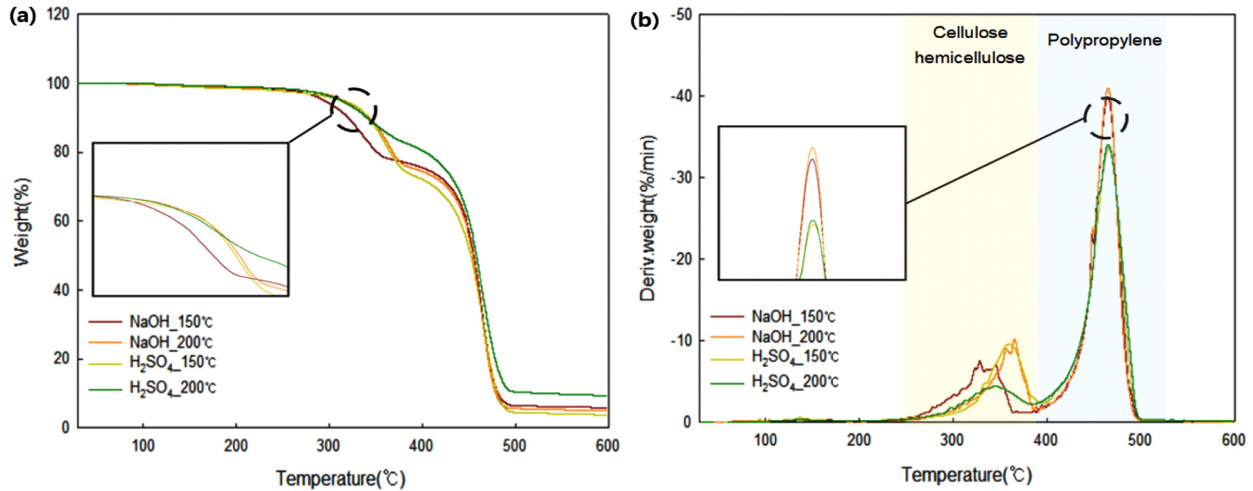


Fig. 4. TG and DTG curves of kenaf/PP biocomposites prepared with different pretreatment solvents and temperatures at 2000 μm particle size: [a] TG curves and [b] DTG curves.

Table 5. Tensile strength of kenaf/PP biocomposites prepared with different particle sizes and pretreatment conditions

Particle size	Solvent	Temperature, °C	Tensile strength (MPa)
	PP		29.6
17 μm	NaOH	150	28.4
		200	29.6
	H ₂ SO ₄	150	24.3
		200	25.5
2000 μm	NaOH	150	21.5
		200	22.3
	H ₂ SO ₄	150	19.9
		200	20.7

3-7. 물리적 미세화 및 전처리 조건에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 기계적 특성 변화

물리적 미세화 및 전처리 조건에 따른 케나프/PP 바이오 복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장강도 시험을 수행하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 비교 기준으로 사용한 순수 PP의 인장강도는 29.6 MPa로 측정되었다. 먼저 입자 크기 효과를 살펴보면, 동일한 전처리 조건에서 미세화된 케나프 섬유(17 μm)를 적용한 복합재료가 상대적으로 큰 입자 크기(2000 μm)를 사용한 시료보다 전반적으로 높은 인장강도를 나타냈다. 이는 물리적 미세화 공정을 통해 입자 크기를 제어하였으며, 이는 매트릭스 내 분산성을 향상시키는 동시에 보강재로서 기능을 수행하기에 충분한 중횡비를 유지함으로써 기계적 특성 향상에 긍정적인 영향을 미친 것으로 판단된다. 이러한 경향은 물리적 미세화 공정이 섬유-매트릭스 간 응력 전달 효율을 향상시킨다는 기존 연구 결과와도 일치한다[12]. 전처리 용매에 따른 영향을 비교한 결과, NaOH 전처리 공정을 적용한 시료가 H₂SO₄ 전처리 시료보다 전반적으로 높은 인장강도를 나타냈다. 특히 17 μm 입자 크기 조건에서 NaOH 전처리(200 °C) 시 인장강도는 29.6 MPa로 순수 PP와 유사한 수준을 보였으며, 이는 알칼리 전처리가 섬유 표면의 리그닌 및 헤미셀룰로오스 제거를 통해 계면 접촉을 효과적으로 개선한 결과로 해석된다. 반면, H₂SO₄ 전처리 조건에서는 산 처리에 따른 섬유 구조 손상 가능성으로 인

해 상대적으로 낮은 인장강도가 관찰되었다. 온도 조건의 경우, 동일 용매 조건에서 200 °C 전처리 시료가 150 °C 조건보다 소폭 높은 인장강도를 나타내는 경향을 보였으나, 그 차이는 제한적이었다. 이는 과도한 전처리 가혹도 증가가 반드시 기계적 특성 향상으로 이어지지 않음을 시사하며, 적절한 화학적 처리 강도의 중요성을 보여준다.

종합적으로 분석한 결과, 물리적 미세화(17 μm)와 NaOH 전처리 조건의 조합이 케나프/PP 바이오 복합재료의 기계적 특성 향상에 가장 효과적인 것으로 판단된다. 특히 17 μm 입자 크기에서 NaOH 전처리(200 °C) 조건은 순수 PP 대비 인장강도 저하 없이 복합재료를 제조할 수 있는 조건으로 확인되었으며, 이는 계면 결합 개선과 섬유 분산성 향상에 기인한 결과로 해석된다[7,9]. 본 결과는 이후 결론에서 제시하는 최적 제조 조건 도출의 핵심 근거로 활용된다.

4. 결 론

본 연구에서는 알칼리 전처리 조건 및 물리적 미세화 공정이 케나프 섬유의 화학 조성 변화와 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 및 기계적 특성에 미치는 영향을 체계적으로 분석하였다. 우선, NaOH 2-6 wt.% 농도와 H-factor ≈ 800 조건에서 수행된 알칼리 전처리는 리그노셀룰로오스 전처리 공정에서 요구되는 중간 가혹도를 충족하는 것으로 확인되었으며, 이를 통해 섬유 내 리그닌과 헤미셀룰로오스를 효과적으로 제거할 수 있었다. NREL 표준 방법에 기반한 HPLC 분석 결과는 이러한 화학 조성의 정량적 변화를 신뢰성 있게 입증하였으며, 비셀룰로오스 성분의 감소가 섬유의 수율 및 성분비에 미치는 상관관계를 명확히 제시하였다. 복합재료의 기계적 특성 분석 결과, 인장강도는 섬유 함량 30 wt.% 까지 뚜렷하게 향상되는 거동을 보였으나 40 wt.% 농도에서는 그 증가 폭이 다소 완화된 경향이 관찰되었다. 이러한 현상은 복합재료의 이론적 혼합법칙 관점에서 해석할 때, 고함량 조건에서의 섬유 응집 현상과 매트릭스 연속성 저하로 인해 응력 전달 효율이 한계에 도달했기 때문으로 판단된다. 아울러 TGA를 이용한 열적 거동 분석을 통해 헤미셀룰로오스, 셀룰로오스, 리그닌의 분해 영역을 구분하고 조성 변화와의 연계성을 확인하였으며, 특히 복합재 제조 온도가 재료의

열적 분해 안전 범위 내에 유지되고 있음을 증명하여 공정의 타당성을 확보하였다.

결론적으로 알칼리 전처리와 물리적 미세화 공정을 병행 적용함으로써 케나프 섬유의 화학 조성을 효과적으로 제어하고, 케나프/PP 바이오 복합재료의 열적 및 기계적 특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 특히 입자 크기 17 μm 의 케나프 섬유를 NaOH 전처리 (200 $^{\circ}\text{C}$) 조건으로 처리한 후, 케나프:PP 중량비 3:7로 제조한 바이오 복합재료가 본 연구에서의 최적 조건으로 도출되었다. 본 연구 결과는 케나프 기반 바이오 복합재료의 제조 공정 설계 및 친환경 고분자 복합재료 개발을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감 사

본 연구는 2025년도 환경국립대학교 연구년 경비의 지원에 의한 것임.

References

- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A. and Le, T. M., "A Review of Recent Developments in Natural Fibre Composites and Their Mechanical Performance," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **83**, 98-112(2016).
- Sanjay, M. R., Madhu, P., Jawaid, M., Senthamarikannan, P., Senthil, S. and Pradeep, S., "Characterization and Properties of Natural Fiber Polymer Composites: A Comprehensive Review," *J. Clean. Prod.*, **172**, 566-581(2018).
- Akil, H. M., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S., Ishak, Z. A. M. and Abu Bakar, A., "Kenaf Fiber Reinforced Composites: A Review," *Mater. Des.*, **32**(8-9), 4107-4121(2011).
- Lee, C. H., Khalina, A., Nurazzi, N. M., Norli, A., Harussani, M. M., Rafiqah, S. A. and Ramli, N., "The Challenges and Future Perspective of Woven Kenaf Reinforcement in Thermoset Polymer Composites in Malaysia: A Review," *Polymers*, **13**(9), 1390(2021).
- Zampaloni, M., Pourboghrat, F., Yankovich, S. A., Rodgers, B. N., Moore, J., Drzal, L. T., Mohanty, A. K. and Misra, M., "Kenaf Natural Fiber Reinforced Polypropylene Composites: A Discussion on Manufacturing Problems and Solutions," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **38**(6), 1569-1580(2007).
- Saba, N., Paridah, M. T. and Jawaid, M., "Mechanical Properties of Kenaf Fibre Reinforced Polymer Composite: A Review," *Constr. Build. Mater.*, **76**, 87-96(2015).
- Kabir, M. M., Wang, H., Lau, K. T. and Cardona, F., "Chemical Treatments on Plant Fibers to Improve the Mechanical Properties of Polymer Matrix Composites," *Compos. Part A: Appl. Sci. Manuf.*, **43**(11), 2883-2892(2012).
- Edeerozey, A. M. M., Akil, H. M., Azhar, A. B. and Ariffin, M. I. Z., "Chemical Modification of Kenaf Fibers," *Mater. Lett.*, **61**(10), 2023-2025(2007).
- Hamidon, M. H., Sultan, M. T. H., Ariffin, A. H. and Shah, A. U. M., "Effects of Fibre Treatment on Mechanical Properties of Kenaf Fibre Reinforced Composites: A Review," *J. Mater. Res. Technol.*, **8**(3), 3327-3337(2019).
- Osman, Z., Elamin, M., Ghorbel, E., and Charrier, B., "Influence of Alkaline Treatment and Fiber Morphology on the Mechanical, Physical, and Thermal Properties of Polypropylene and Polylactic Acid Biocomposites Reinforced with Kenaf, Bagasse, Hemp Fibers and Softwood," *Polymers*, **17**(7), 844(2025).
- Hossain, M. M., Subbiah, V. K. and Siddiquee, S., "Augmented Retting Effect on Kenaf Fibers Using Alkalophilic Pectinase-producing Bacteria in Combination with Water Solvents," *Appl. Sci.*, **12**(14), 7136(2022).
- Kim, J. S., "Physico-Chemical Pretreatment of Herbaceous Biomass by Organosolv Flow-Through Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(4), 441-446(2018).
- Jalaei, A. and Foster, E. J., "Improvement in the Thermomechanical Properties and Adhesion of Wood Fibers to the Polyamide 6 Matrix by Sequential Ball Milling Technique," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **12**(1), 490-500(2023).
- Kim, S. J. and Um, B. H., "Comparison of Hemicellulose Extracts from Two Pulping Woodchips with Green Liquor Followed by Scale-up Pre-hemicellulose Extraction," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **175**(5), 2501-2515(2015).
- Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Rayung, M., Norraahim, M. N. F., Shazleen, S. S., Rani, M. S. A., Harussani, M. M., and Aisyah, H. A., "Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites: Influence of Chemical Treatments," *Polymers*, **13**(16), 2710 (2021).
- Asim, M., Jawaid, M., Saba, N., Nasir, M. and Sultan, M. T. H., "Thermal Stability of Natural Fibers and Their Polymer Composites," *Iran. Polym. J.*, **29**(7), 625-648(2020).
- Neto, J. S. S., de Queiroz, H. F. M., Aguiar, R. A. A. and Banea, M. D., "A Review on the Thermal Characterisation of Natural and Hybrid Fiber Composites," *Polymers*, **13**(24), 4425(2021).

Authors

Jun Hyung Oh: Master student, School of Food Biotechnology and Chemical Engineering, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea; raon9611@hknu.ac.kr

Byung Hwan Um: Professor, School of Food Biotechnology and Chemical Engineering & Carbon-Neutral Resources Research Center, Hankyong National University, Anseong 17579, Korea; bhum11@hknu.ac.kr