



목질계 바이오매스를 활용한 필터 제조와 온실가스 감축량 산정 연구

이호원¹⁾ · 최경훈²⁾ · 장용철^{3)*} · 조해인⁴⁾ · 백충렬⁵⁾ · Shella Angelina Herlintama⁶⁾ · 이승욱⁷⁾ · 이정현⁸⁾ · 박인경⁹⁾ · 정관승¹⁰⁾

Study on Filter Manufacturing Using Lignocellulosic Biomass and Greenhouse Gas Reduction Assessment

Howon Lee¹⁾ · Kyunghoon Choi²⁾ · Yong-Chul Jang^{3)*} · Haein Cho⁴⁾ · Choongreal Baek⁵⁾ · Shella Angelina Herlintama⁶⁾ · Seunguk Lee⁷⁾ · Jeonghyeon Lee⁸⁾ · Inkyung Park⁹⁾ · Gwanseung Jeong¹⁰⁾

Received 21 February 2025 Revised 7 March 2025 Accepted 10 March 2025 Published online 25 March 2025

ABSTRACT The increasing demand for sustainable materials has driven extensive research on lignocellulosic biomass as an alternative to petroleum-based materials. This study aimed to develop a cellulose-based filter using biomass and assess its environmental impacts by life cycle assessment (LCA). Cellulose was extracted from bark sawdust, board wood chips, and pulpwood chips with yielding the highest extraction rate (78.7%). Electron beam irradiation (EBI) was applied as a pre-treatment, achieving a maximum cellulose yield of 82% at 100 kGy and effectively reducing the need for chemical reagents. The resulting filter exhibited enhanced tensile strength and folding endurance with higher cellulose content, while air permeability decreased. A cellulose-to-polypropylene ratio (70:30) was determined as optimal condition for the LCA study. The LCA results showed that the cellulose-based filter reduced greenhouse gas emissions by approximately 15.6% compared to PP-based filters, primarily due to lower emissions in the manufacturing phase. This study demonstrates the potential of cellulose-based filters as an eco-friendly alternative and highlights the role of EBI in optimizing extraction efficiency and reducing environmental impact. Further research is warranted to integrate EBI into LCA and evaluate scale-up industrial applications to manufacturing biomass based-filters.

Key words Lignocellulosic biomass(목질계 바이오매스), Cellulose-based filter(셀룰로오스 기반 필터), Electron beam irradiation(전자선 조사), Life cycle assessment(전과정평가), Carbon footprint reduction(탄소발자국 저감)

1) Master's Student, Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University

2) Research Professor, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

3) Professor, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

4) Master's Student, Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University

5) Doctoral Student, Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

6) Master's Student, Department of Environmental & IT Engineering, Chungnam National University

7) CEO, Newrizon Inc.

8) CTO, Newrizon Inc.

9) Director, Newrizon Inc.

10) Manager, Newrizon Inc.

*Corresponding author: gogator@cnu.ac.kr
Tel: +82-42-821-6674

Subscript

- LCA : life cycle assessment
- EBI : electron beam irradiation
- PB : particle board
- MDF : medium density fiberboard
- PP : polypropylene
- GWP : global warming potential

1. 서론

전 세계적으로 기후변화 대응과 탄소중립 실현을 위한 다양한 노력이 지속되고 있으며, 이에 따라 신재생에너지 및 지속 가능한 소재 개발이 중요한 과제로 대두되고 있다.^[1] 화석연료 및 석유계 소재의 사용은 지속적인 온실가스 배출을 유발하며, 환경오염 문제를 가중하고 있다.^[2~4] 이에 대한 대안으로 바이오매스를 활용한 소재 개발이 주목받고 있으며, 특히 목질계 바이오매스는 풍부한 공급원과 재생 가능성으로 인해 고부가가치 소재로 전환할 수 있는 잠재력을 가지고 있다.^[3,4]

목질계 바이오매스는 주로 셀룰로오스(Cellulose), 헤미셀룰로오스(Hemicellulose), 리그닌(Lignin)과 같은 주요 성분으로 구성되어 있으며, 이를 활용한 친환경 소재 개발이 활발히 진행되고 있다.^[4] 특히 셀룰로오스는 다양한 응용 가능성을 지닌 바이오 소재로, 지속 가능한 산업 발전을 위한 핵심 원료로 주목받고 있다.^[3]

셀룰로오스는 생분해성이 뛰어나고, 높은 기계적 강도와 화학적 안정성을 갖춘 천연 고분자로서 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다.^[4] 예를 들어, 필터, 바이오플라스틱, 의료용 소재, 화장품 등 다양한 분야에서 셀룰로오스를 기반으로 한 제품이 개발되고 있다. 특히, 미세먼지 및 미세플라스틱 오염의 심화 중에 셀룰로오스를 활용한 고효율 필터 개발이 중요한 연구 분야로 주목받고 있다.^[5]

기존의 셀룰로오스 추출 공정은 화학적, 생물학적, 물리적 방법으로 나뉘며, 각 공정은 장단점을 갖고 있다.^[4] 화학적 방법(예: 강산 또는 강염기 처리)은 높은 효율을 보이지만 환경오염 문제를 유발할 수 있으며, 생물학적 방법(예: 효소 처리)은 선택성이 뛰어나지만 반응 시간이 길어 대량

생산에 어려움이 있다.^[3,4] 이에 반해, 물리적 방법(예: 전자선 조사, 초음파 처리 등)은 친환경적이고 공정 조건을 최적화할 경우, 높은 효율성을 가질 수 있는 대안적 접근법으로 떠오르고 있다.^[5]

최근 바이오매스를 활용한 셀룰로오스 추출 공정에 관한 연구 중, 전자선 조사(Electron Beam Irradiation)나 초음파(Ultrasonic) 처리와 같은 물리적 방법이 주목받고 있다.^[6] 전자선 조사는 고에너지 전자를 이용하여 바이오매스의 구조를 변형시키고, 리그닌 및 헤미셀룰로오스 제거를 촉진하는 효과가 있다.^[7] 이러한 방법은 화학적 처리 없이 셀룰로오스를 분리할 수 있어 환경적으로 유리하다는 장점이 있다.^[8] 그러나 최적 조건 설정, 대규모 적용 공정의 경제성 분석, 셀룰로오스 처리 수율 등에 대한 체계적인 연구가 미비한 실정이다. 또한, 지속 가능한 소재 개발을 위해서는 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 활용한 환경적 영향 분석이 필수적이다. 기존 연구에서는 바이오 기반 소재의 환경적 장점을 강조하는 연구가 일부 진행되었으나,^[9,10] 셀룰로오스 추출 공정에서 발생하는 탄소발자국 산정 및 기존 신재(석유계) 소재와의 비교 연구는 제한적이다. 따라서, 전자선 조사 기반 셀룰로오스 추출 공정이 환경적으로 지속 가능하고, 탄소배출을 저감할 수 있는지를 검증하기 위한 전과정평가 연구를 수행할 필요가 있다.

따라서, 본 연구의 목표는 전자선 조사 기반의 목질계 바이오매스 셀룰로오스 추출 및 필터 제조 공정을 개발하고, 해당 공정의 효율성과 LCA 기반 환경영향을 평가하였다. 이를 위해 다음과 같은 세 가지 연구를 수행하였다. 첫째, 다양한 목질계 바이오매스 시료(펄프용 목재칩, 보드용 목재칩, 수피톱밥)를 대상으로 실험실 규모에서 셀룰로오스 추출 실험을 수행하고, 각 시료별 셀룰로오스 수율을 비교·분석하였다. 이를 통해 목질계 원료의 특성에 따른 추출 효율 차이를 평가하고, 최적의 바이오매스 원료를 선정하였다. 둘째, 전자선 조사(Electron Beam Irradiation) 공정을 적용하여 셀룰로오스 추출 공정을 최적화하고, 전자선 조사 강도(100-300 kGy)에 따른 처리 수율 변화를 분석하였다. 또한, 전자선 조사 및 화학적 처리 후 추출한 셀룰로오스를 활용하여 필터를 제조하고, 셀룰로오스 함량 비율별 필터 성능(강도, 접힘 저항성, 공기투과도 등)을 평가하

여 필터 소재로서의 적합성을 검토하였다. 셋째, 필터의 최적 배합비를 결정한 후, 해당 배합비를 적용한 셀룰로오스 기반 필터의 환경적 지속 가능성을 평가하기 위해 전과정 평가를 수행하여 온실가스 배출량을 산정하고, 기존 석유계 필터(폴리프로필렌, PP)와 비교 분석하였다.

본 연구를 통해, 셀룰로오스 추출 및 필터 제조 공정이 환경적으로 지속 가능한 대안이 될 수 있는지를 검증하고, 궁극적으로 목질계 바이오매스를 활용한 친환경 필터 소재 개발의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 셀룰로오스 필터 제조

2.1.1 실험 시료 및 셀룰로오스 처리 수율

셀룰로오스 필터 제조를 위해 사용된 목질계 바이오매스 시료는 국내 P사에서 제공받아 실험을 진행하였다. 사용된 시료는 수피톱밥, 보드용 목재칩(PB/MDF용), 펄프용 목재칩의 세 가지 유형으로 구성되었다. 셀룰로오스 추출 실험은 실험실 규모로 수행되었으며, 기존의 화학적 처리 방법을 기반으로 리그닌을 선택적으로 제거하여 셀룰로오스를 정제하는 방식으로 진행되었다. 실험에 사용된 시료는 70°C에서 열풍 건조 후, 40 mesh와 60 mesh 사이의 입도를 가진 분말로 분쇄하여 균일한 형태로 준비되었다. 모든 시료는 동일한 전처리 과정을 거쳐 실험에 사용되었으며, 셀룰로오스 추출 공정에 적합한 형태로 가공되었다.

셀룰로오스 추출 및 수율 확인을 위한 과정으로 우선 전처리된 시료 2.5 g을 300 mL 삼각 플라스크에 넣고 증류수 150 mL를 혼합한 후, 0.2 mL 아세트산과 1.0 g 아염소산나트륨을 추가하여 항온수조(70~80°C)에서 1시간 반응을 진행하였다. 해당 과정은 리그닌을 최대한 제거하기 위해 총 3회 반복되었다.

이후, 추출된 셀룰로오스를 회수하기 위해 글라스필터(IG3)를 이용한 여과 및 세척을 수행하였다. 여과 과정에서는 진공 여과 시스템을 이용하여 효율성을 높이기 위해 아스피레이터(Aspirator)를 사용하였다. 아스피레이터는 필터를 통해 액체를 빠르게 제거하는 역할을 하며, 증류수 500 mL 및 아세톤 50 mL를 사용하여 잔여 불순물을 제거

하였다. 마지막으로, 건조된 시료의 무게를 측정하여 셀룰로오스 수율을 계산하였다.

2.1.2 전자선 조사를 사용한 필터 제조 공정

본 연구에서는 전자선 조사를 적용한 셀룰로오스 추출 공정이 기존 화학적 처리 공정을 대체할 수 있는 가능성을 평가하고자 실험을 수행하였다. 특히, 기존 공정에서는 10~15%의 NaOH가 사용되지만, 전자선 조사 공정을 적용하면 NaOH 사용량을 2%까지 줄일 수 있어 보다 친환경적인 방식으로 셀룰로오스를 추출할 수 있는지 검토하였다. 이에 따라, 전자선 조사를 활용한 필터 제조 공정을 실험실 규모에서 진행하였다(Fig. 1 참조).

실험에서는 펄프용 목재칩을 원료로 사용하였으며, 전자선 조사를 포함한 전처리 과정을 거쳐 필터 제조 실험을 수행하였다. 전처리를 위해 사용될 전자선은 2.5 MeV 전자 가속기(Electron Accelerator)를 이용하여 발생시켰으며, 조사량을 각각 100, 200, 300 kGy으로 달리하여 그 영향을 확인하였다. 전자선 조사는 목질계 바이오매스의 구조를 변형시키고, 리그닌 제거를 촉진하는 효과가 있어 셀룰로오스 섬유화 공정의 효율성을 높일 수 있다. 이후, 전자선 조사가 완료된 시료를 대상으로 2% NaOH 용액을 이용한 화학적 처리 공정을 적용하여 탈리그닌(Delignification) 과정을 최적화하였다.

위와 같은 과정을 거쳐 전처리된 셀룰로오스는 습식 부직포 제조(Wet-laid Web-forming) 공정에 사용되었다. 실험에서는 수초지기(Wet-laying Machine)를 활용하여 셀룰로오스 섬유와 합성섬유를 일정 비율로 혼합한 후, 물과 함께 균질하게 분산시켜 웹(Web) 구조를 형성하였다. 웹 형성 과정에서는 섬유 간 결합이 균일하게 이루어질 수 있도록 충분한 교반 및 분산 과정을 수행하였다. 웹 형태로 형성된 재료는 캘린더링(Hot Pressing & Drying) 공정을 통해 부직포 형태로 가공하였다. 이를 위해 먼저 웹을 드럼 건조기(Drum Dryer)를 활용하여 100°C에서 건조하여 섬유 간 결합을 강화하였고, 이후 캘린더링(Calendering) 공정을 수행하여 부직포의 두께를 조절하고 표면의 평활도를 향상시켰다.

위와 같은 공정을 거쳐 제조된 필터의 성능을 평가하기 위해 공기투과도(Air Permeability), 인장강도(Tensile

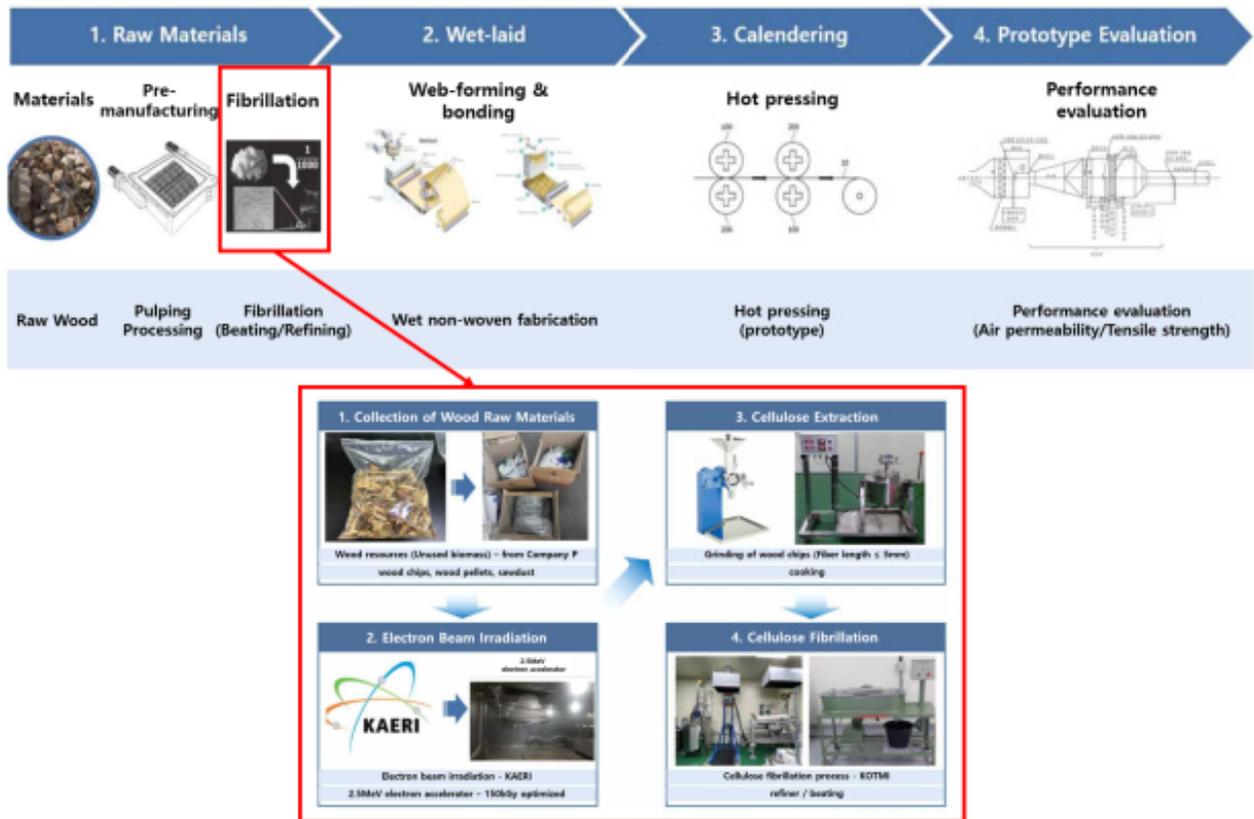


Fig. 1. Schematic diagram of the filter material manufacturing process

Strength), 접힘 저항성(Folding Endurance) 등의 물리적 특성을 분석하였다. 이를 통해 목질계 바이오매스를 활용한 필터 소재가 기존 합성섬유 기반 필터 대비 필터 성능과 내구성 측면에서 활용 가능성이 있는지를 검토하였다.

석유계 플라스틱 기반 필터의 경우, 이미 산업적으로 확립된 제조 공정을 따르고 있어 본 연구에서는 이에 대한 실험을 별도로 수행하지 않았다. 대신, 기존 연구^[11,12]를 참고하여 PP(폴리프로필렌) 필터 기반 마스크의 제조 공정을 고정된 변수로 설정하였으며, 이를 바탕으로 목질계 셀룰로오스 필터 기반 마스크와의 전과정평가를 수행하여 비교하였다.

2.2 셀룰로오스 필터 기반 일회용 마스크의 전과정 평가

목질계 셀룰로오스 기반 필터의 환경영향을 비교 산정하기 위해 전과정평가를 수행하였다. 전과정평가는 KS I ISO 14040, 14044, 14067 기준을 준수하여 수행되었으며, 석

유계 플라스틱 기반 마스크와 목질계 셀룰로오스 기반 마스크의 탄소배출량 산정을 위해 지구온난화 영향(GWP)을 분석하였다. 전과정평가를 위해 국내외 일회용 마스크 전과정평가 관련 문헌자료와 논문에 나타난 데이터^[11~14]를 활용하였다. 각 단위공정의 LCI 데이터베이스는 Ecoinvent 3.8과 USLCI를 활용하였다.

2.2.1 목적 및 범위 정의

전과정평가의 목적은 기존의 석유계 플라스틱 기반 필터를 사용하는 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스 기반 필터를 사용하는 일회용 마스크의 환경영향을 비교 산정하는 것이다. 기능단위는 1 ton 중량의 일회용 마스크로 설정하였으며, 일회용 마스크 1개의 중량은 4.68 g으로 설정하였다. LCA 소프트웨어는 SimaPro v.9.4.0.2를 활용하여 수행하였으며, 영향평가 방법론으로 IMPACT 2002+를 활용하여 종말점 수준에서 지구온난화 영향범주를 평가하였다. 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 필터는 70%의

셀룰로오스 섬유와 30%의 폴리프로필렌 부직포로 구성된다고 가정하였으며, 셀룰로오스 추출 수율은 70%로 가정하였으며, 일회용 마스크의 포장에 관한 데이터는 제외하여 가정하였다. 시스템경계는 플라스틱 기반과 셀룰로오스 기반 일회용 마스크 모두 제조단계, 운송단계, 폐기단계를 포함한 'Cradle to Grave'의 범위로 설정하였다.

석유계 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크의 시스템경계 중, 제조단계는 원유 추출, 석유 정제, 올레핀 제조, 프로필렌 제조의 과정을 거쳐 생산된 PP 레진(Resin)을 통해 일회용 마스크의 필터 재료로 사용될 스펀 본드 방식의 PP 부직포 및 일회용 마스크의 코편 지지대, 귀고리 등의 재료 등을 조립하여 최종적으로 완성된 형태의 제조된 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크 생산까지를 고려하였다. 완성 형태로 제조된 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크는 운반을 통해 판매되고 사용된 후, 생활폐기물 수거 및 처리 공정을 통해 대부분 소각과 매립 처리되고, 일부 적은 비율이 무단 투기 되는 것으로 설정하였다.

목질계 셀룰로오스 필터 기반 일회용 마스크의 시스템경계 중, 제조단계는 식림, 제재, 목재칩 생산, 목재칩으로부터 셀룰로오스 추출 과정을 거친 후, 추출된 셀룰로오스를 통해 셀룰로오스 섬유 70%와 나머지 30%의 PP 부직포로 일회용 마스크의 필터 재료를 구성한다고 설정하였다. 필터 재료 제작 공정은 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크와 마찬가지로 동일한 제조 방식으로 조립된다고 가정하였다. 또한, 이후의 판매, 사용 이후 폐기단계까지 포함한 과정은 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크의 과정과 동일하게 설정하였다.

2.2.2 전과정 목록분석

석유계 플라스틱 기반 일회용 마스크와 목질계 셀룰로오스 기반 일회용 마스크의 단계별 데이터 목록은 제시된 선행연구^[11~14]의 데이터를 참고하여 투입물질, 배출물질 데이터를 입력하였으며, 투입량과 배출량에 관한 데이터는 본 연구의 기능단위인 1 ton 중량의 일회용 마스크 제작 규모에 따라 환산하여 사용하였다.

플라스틱 필터 기반 일회용 마스크의 제조전단계 목록은 PP 레진을 생산하기 위해 사용되는 투입물인 천연가스, 프

로필렌, 질소, 공정수 등의 데이터를 입력하였으며, 배출물은 이산화탄소, 미세먼지, 휘발성유기화합물 등의 데이터를 입력하였다. 제조단계 목록은 일회용 마스크의 구성 부품인 필터, 귀고리, 코편 지지대와 조립에 사용되는 전력에 관한 데이터로 구성하였다. 운송단계 목록은 제조전단계의 원유 추출지로부터 원료생산 공장, 원료생산 공장으로부터 제조공장, 제조공장으로부터 판매처, 폐기물 수거 지점으로 부터 폐기물 처리 시설(소각장, 매립장)까지의 운송을 고려하였다. 운송수단에 관한 데이터 중, 원료 및 제품 운송수단에 관한 데이터는 3.5~7.5 톤 중량 규모의 화물 운송 트럭 데이터를 사용하였으며, 폐기물 운송수단은 생활폐기물 수거 덤프트럭 데이터를 사용하였다. 폐기단계 목록은 생활계폐기물의 소각 및 매립 처리량과 의료폐기물로 배출되는 일회용 마스크 폐기물의 소각량, 무단 투기 등으로 인해 환경 유실되는 일회용 마스크의 양을 고려하였다. 이러한 비율은 선행 연구^[15]에서 보고된 2020년 대한민국 기준 폐기 비율(소각 64%, 매립 31%, 환경 유실 5%)을 참고하여 적용하였다.

셀룰로오스 필터 기반 일회용 마스크의 제조전단계 목록은 셀룰로오스 기반 필터의 주재료로 사용될 셀룰로오스 추출까지의 과정을 고려하였다. 식림 과정을 통해 원목을 확보 후, 원목을 제재하여 제재부산물을 통해 목재칩 생산이 이루어지며, 생산된 목재칩에서 셀룰로오스 추출을 하는 것으로 고려하였다. 제조단계 목록에서 필터 부품에 관한 데이터 중, 70%는 제조전단계로부터 추출된 셀룰로오스 데이터를 사용하였으며, 나머지 30%는 기존 PP 부직포 데이터를 사용하였다. 그 외의 적용 방식은 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크의 목록과 동일하게 수행하였다. 운송단계는 원료 운송 중, 임지로부터 제재소까지 운송되는 원목의 운송수단에 관한 데이터로 7.5~16톤 중량 규모의 화물 운송 트럭 데이터를 적용하였다. 나머지 원료 및 제품, 폐기물 운송수단에 관한 데이터는 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크의 운송수단과 동일하게 적용하였다. 폐기단계 목록은 플라스틱 필터 기반 일회용 마스크의 폐기단계와 동일한 비율로 적용하였다.

Table 1. Results of cellulose yield analysis

Sample ¹⁾	Dried sample (g)	Extracted cellulose amount (g)	Yield (Average)
1	Pulpwood chips-1	2.5002	78.72%
2	Pulpwood chips-3	2.5020	
3	Board production wood chips-1	2.5002	71.16%
4	Board production wood chips-2	2.5019	
5	Board production wood chips-3	2.5013	
6	Bark sawdust-1	2.5049	69.05%
7	Bark sawdust-2	2.5048	
8	Bark sawdust-3	2.5028	

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 셀룰로오스 추출 및 필터 제조

3.1.1 목질계 바이오매스의 셀룰로오스 추출 수율

목질계 바이오매스로부터 셀룰로오스를 추출하기 위해, 본 연구에서는 수피톱밥(Bark Sawdust), 보드용 목재칩(Board Production Wood Chips), 펄프용 목재칩(Pulpwood Chips)의 세 가지 시료를 실험 대상으로 선정하고, 실험실 규모에서 셀룰로오스 처리 수율을 분석하였다. Table 1은 각 시료의 건조 시료량과 추출된 셀룰로오스 양을 기반으로 한 수율 결과를 나타낸 것이다.

추출 실험 결과, 펄프용 목재칩 시료의 평균 셀룰로오스 수율은 78.72%, 보드용 목재칩은 71.16%, 수피톱밥은 69.05%로 나타났다. 가장 높은 수율을 보인 펄프용 목재칩의 경우, 시료 2.5002 g에서 1.9666 g의 셀룰로오스가 추출되었으며, 이는 78.72%의 수율을 기록하였다. 보드용 목재칩의 경우, 평균 71.16%의 수율을 보였으며, 실험에 사용된 모든 시료 중 가장 낮은 수율(69.05%)을 보인 것은 수피톱밥(Bark Sawdust) 그룹이었다.

본 연구에서 사용된 펄프용 목재칩은 원래 펄프 제조 공정을 고려하여 가공된 원료이므로, 상대적으로 높은 셀룰로오스 함량을 유지할 가능성이 크다. 일반적으로 원목의 셀룰로오스 함량은 약 40~50% 내외로 보고된 바^[16] 있으나, 본 연구에서 측정된 셀룰로오스 수율은 리그닌 제거 후 잔존하는 탄수화물 계열 성분이 함께 분석되었기에 기존 문헌에서 제시된 함량과 직접적인 비교에는 한계가 있을 수 있다. 반면, 보드용 목재칩 및 수피톱밥의 경우 비교적 낮은 수율을 기록한 이유는 원료 자체의 셀룰로오스 함량

이 낮거나, 비셀룰로오스 성분(리그닌, 헤미셀룰로오스)의 잔존량이 상대적으로 많기 때문으로 해석할 수 있다. 펄프용 목재칩 시료 중 Pulpwood Chips-2의 경우, 개별 실험 결과 91.26%라는 비정상적으로 높은 수율을 기록하였으며, 이는 데이터의 신뢰도를 고려하여 이상치로 판단되어 최종 수율 평균 산출에서 제외하였다. 또한, 동일한 원료 그룹 내에서도 샘플 간의 수율 차이가 존재하는데, 이는 목질계 바이오매스의 내부 조성 차이 및 실험 과정에서의 오차(전처리 및 필터링 과정에서의 손실 등)에 기인하는 것으로 보인다. 따라서, 실험 오차를 줄이기 위해 반복 실험을 수행하였으며, 각 그룹에서 최소 3개 이상의 개별 샘플을 분석하여 평균값을 산출하였다.

3.1.2 전자선 조사의 영향

본 연구에서는 전자선 조사를 활용하여 목질계 바이오매스에서 셀룰로오스를 추출하는 공정의 효율성을 분석하였다. 앞서 3.1.1 절의 연구 결과에서 펄프용 목재칩이 약 78%의 가장 높은 셀룰로오스 수율을 보였으며, 이에 따라 전자선 조사를 통한 셀룰로오스 추출 공정에서도 펄프용 목재칩을 대상으로 실험을 진행하였다.

펄프용 목재칩에 2.5 MeV 전자가속기를 이용하여 100, 200, 300 kGy의 전자선을 조사한 후, 2% NaOH 용액을 이용한 후속 화학 처리를 적용하였다. Fig. 2는 전자선 조사량에 따른 셀룰로오스 수율 변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 2에 나타난 결과를 살펴보면, 전자선 처리를 하지 않은 0 kGy 시료에서는 71%의 수율을 기록하였으나, 100

1) Pulpwood Chips-2의 수율(91.26%)이 이상치로 판단되어 제외하여 분석

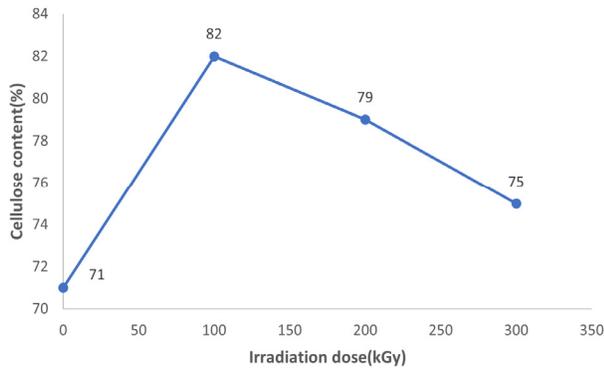


Fig. 2. Measurement of cellulose purity according to electron beam irradiation

kGy 조사 시 셀룰로오스 수율이 82%까지 상승하며 최댓값을 나타내었다. 이는 전자선 조사로 인해 리그닌 제거가 효과적으로 촉진되었으며, 셀룰로오스 구조의 안정성을 유지하면서 높은 추출 효율을 확보할 수 있었기 때문에 분석된다. 100 kGy 조사량을 기점으로 셀룰로오스의 분해가 증가하면서 셀룰로오스 수율이 감소하는 경향이 나타났다. 선행 연구에 따르면, 150~200 kGy 조사 시 리그닌 제거율이 50% 이상 증가하며, 최대 40% 이상의 화학물질 사용량 절감 효과가 있는 것으로 분석되었다.^[17] 이러한 결과는 본 연구에서 수행한 100~300 kGy 조사 실험에서도 동일하게 나타나는 것으로 확인되었다.

이를 종합적으로 고려하면, 100 kGy 전자선 조사 시, 셀룰로오스 수율 82%로 가장 높은 수율을 얻을 수 있었으며, 이는 최적의 공정 효율성을 확보할 수 있는 조건으로 판단된다. 기존 연구에서도 전자선 조사와 알칼리 처리의 병행 공정이 화학적 펄프화 대비 최대 40% 이상의 화학물질 절감 효과를 보이며, 에너지 절감 효과도 20% 이상 향상된 것으로 보고되었다. 또한, 기존 화학적 펄프화 공정에서는 고농도의 NaOH(10~15%)를 사용해야 하지만, 전자선 조사를 병행할 경우 2~4% NaOH 만으로도 유사한 수준의 리

그닌 제거가 가능한 것으로 보고된 바 있다.^[16] 따라서, 본 연구에서 도출된 결과는 기존 연구와의 일관성을 유지하면서도, 목질계 바이오매스를 이용한 친환경적인 셀룰로오스 추출 공정의 가능성을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.3 셀룰로오스-합성섬유 혼합 비율별 필터 성능 차이 비교

실험을 통해 제조된 필터의 성능을 결정하는 주요 요소인 공기투과도(Air Permeability), 접힘 저항성(Folding Endurance), 인장강도(Tensile Strength)에 대해 다양한 셀룰로오스-PP 혼합 비율을 적용하여 분석을 수행하였다. Table 2는 이러한 실험 결과를 정리한 것으로, 필터의 성능 요구사항과 비교하여 최적의 혼합비를 도출하는 데 중점을 두었다.

첫 번째로 공기투과도 분석 결과, 셀룰로오스 함량이 증가할수록 공기 흐름이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 셀룰로오스 섬유가 PP 섬유에 비해 상대적으로 가늘고 치밀한 구조를 형성하기 때문^[18]으로 해석될 수 있다. 공기투과도를 유지하는 것은 필터의 필수적인 기능 중 하나이지만, 셀룰로오스 함량이 50% 이상인 경우, 필터의 성능 요구 기준($120 \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$)에 미치지 못하는 것으로 확인되었다. 반면, PP 함량이 높은 조성에서는 공기투과도가 높게 유지되었지만, 필터의 내구성 및 기계적 강도 측면에서 낮아지는 것으로 나타났다.

두 번째, 접힘 저항성 측면에서는 셀룰로오스 함량이 증가할수록 필터의 내구성이 향상되는 결과가 도출되었다. 특히, 셀룰로오스 함량이 50% 이상일 때, 접힘 저항성이 설정된 기준(11회 이상)을 충분히 만족하며, 높은 유연성과 기계적 충격에 대한 내성을 보여주었다. 이는 천연 셀룰로오스 섬유가 네트워크 구조를 형성하며 섬유 간 결합력이 강화되기 때문^[19]인 것으로 보인다.

Table 2. Evaluation of filter performance according to cellulose-synthetic fiber blending ratio

Sample	Cellulose content (%)	Air permeability ($\text{cm}^3/\text{cm}^2/\text{s}$)	Tensile strength (N)	Folding endurance (Number of cycles)
1	70	54.1	119.4	12
2	50	105.7	105.2	11
3	40	127.5	84.3	9
4	30	155.3	76.8	7

마지막으로 인장강도 분석 결과에서 셀룰로오스 함량이 70%일 때, 설정된 기준(110 N 이상)을 충족하는 것으로 나타났다. 셀룰로오스는 높은 기계적 강도를 가진 천연 고분자로, 섬유 간 결합이 강화될수록 필터의 기계적 안정성이 증가한다.^[20] PP 함량이 높은 조성에서는 상대적으로 강성이 낮아 인장강도가 감소하는 경향이 나타났다.

이러한 결과들을 종합적으로 고려하여 도출한 최적 혼합비(셀룰로오스:PP)는 50%:50%인 것으로 나타났다. 그러나, 친환경적인 셀룰로오스 재료의 함량을 높이고자 하는 제품 개발 의도와 함께 필터의 기계적 안정성과 내구성을 유지하기 위한 목표를 동시에 달성하기 위해, 본 연구의 전과정평가를 위한 셀룰로오스와 PP의 최적 혼합비는 70%:30%로 설정하였다.

3.2 전과정영향평가: 탄소배출량

본 연구에서는 목질계 셀룰로오스 기반 필터와 기존 석유계 PP 기반 필터의 탄소배출량을 비교 분석하였다. 이를 위해 전과정평가를 적용하였으며, 평가 범위는 원료 채취부터 폐기 단계까지를 포함하는 Cradle-to-Grave 접근 방식을 사용하였다. Fig. 3은 PP 기반 필터와 목질계 셀룰로오스 기반 필터의 전과정평가 결과를 나타내며, 각 단계별 탄소배출량을 ton CO₂ eq 단위로 비교한 것이다.

Fig. 3에 나타난 결과에 따르면, PP 기반 필터의 경우, 전체 단계에서 7.18 ton CO₂ eq의 탄소배출량이 발생하는 것으로 분석되었다. 세부적으로 살펴보면, 제조 단계에서 5.35 ton CO₂ eq, 운송 단계에서 0.18 ton CO₂ eq, 폐기 단계에서 1.65 ton CO₂ eq만큼 배출되는 것으로 나타났다. 제조 단계에서의 탄소배출량이 가장 높은 이유는 PP 필터가 고온·고압의 중합반응을 필요로 하는 생산 공정의 특성상 에너지 소비가 크고,^[21] 이에 따라 온실가스 배출량이 증가하기 때문이다. 운송 단계에서는 PP 필터가 0.18 ton CO₂ eq의 탄소배출량을 보였는데, 이는 원료의 경량성으로 인해 높은 운송 효율성에 기인한 것^[22]으로 판단된다. 마지막으로, 폐기 단계에서는 1.65 ton CO₂ eq의 배출량을 나타냈으며, 이는 주로 PP 필터가 소각 처리될 때 발생하는 이산화탄소 배출량 때문^[23]으로 해석된다.

반면, 목질계 셀룰로오스 기반 필터는 총 6.06 ton CO₂ eq만큼 배출되는 것으로 나타났으며, PP 기반 필터 대비

약 15.6%의 탄소배출 저감 효과를 나타냈다. 단계별로 살펴보면, 제조 단계에서 4.40 ton CO₂ eq, 운송 단계에서 0.25 ton CO₂ eq, 폐기 단계에서 1.41 ton CO₂ eq의 탄소배출량이 발생하였다. 제조 단계의 탄소배출량은 PP 필터 대비 약 17.8% 낮았으며, 이는 목질계 바이오매스 원료가 석유계 원료보다 제조단계에서 낮은 탄소배출량을 나타내는 것이며, 화석연료 기반의 고온 공정이 요구되지 않기 때문으로 해석된다. 폐기 단계에서는 PP 필터 대비 약 14.5% 감소한 탄소배출량(1.41 ton CO₂ eq)을 보였으며, 이는 셀룰로오스 기반 필터가 생분해성을 가지므로 자연 분해될 가능성이 크기 때문으로 해석된다.

Table 3과 Fig. 3에서 나타나듯이 두 필터 모두 제조 단계에서 가장 많은 탄소배출이 발생했으며, 이는 필터 원료의 특성과 제조 공정에서의 에너지 소비가 주요 요인으로 작용함을 보여준다. 특히, 목질계 셀룰로오스 기반 필터의 제조 단계에서의 탄소배출량이 상대적으로 감소한 것은 전자선 조사를 통한 전처리 공정이 화학 처리 과정의 필요성을 일부 대체하여 NaOH 등의 화학물질 사용량을 줄일 수 있기 때문으로 판단된다. 이와 같은 결과는 전자선 조사 기

Table 3. Comparison of greenhouse gas emissions from PP-based and cellulose-based filter masks by stage

Category	PP-based filter masks (%)	Cellulose-based filter masks (%)
Manufacturing	74.5	72.6
Transportation	2.5	4.1
Disposal	23.0	23.3
Total	100	100

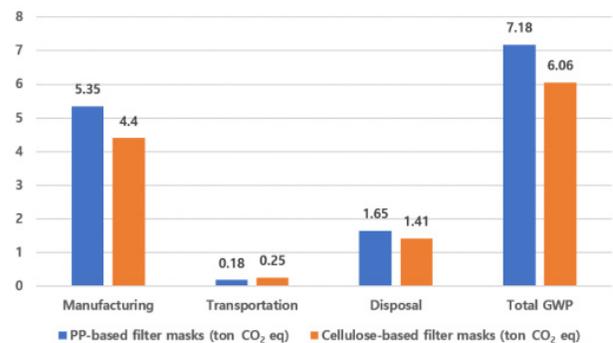


Fig. 3. Graphical comparison of greenhouse gas emissions from PP-based and cellulose-based filter masks by stage

반의 공정이 친환경적인 소재 가공 기술로서의 가능성을 시사하며, 향후 공장 단위에서 대규모 생산 시, 추가적인 환경적 장점이 발생할 수 있음을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 목질계 바이오매스 시료(수피톱밥, 보드용 목재칩, 펄프용 목재칩)를 대상으로 실험실 규모에서 셀룰로오스 추출 공정을 수행하여 수율을 비교하고, 전자선 조사를 활용한 대체적 처리 방법을 적용하여 제조된 필터의 물리적 특성을 비교 분석하고, 끝으로 전과정 평가 분석을 통해 석유계 폴리프로필렌(PP) 필터와의 환경적 영향을 비교 산정하였다.

실험 결과, 첫째, 펄프용 목재칩이 가장 높은 셀룰로오스 수율(78.66%)을 나타냈으며, 보드용 목재칩과 수피톱밥이 각각 71.16% 및 69.59%의 수율을 기록하였다. 전자선 조사를 적용한 실험에서는 100 kGy 조사 시 82%의 최대 수율을 보였으며, 이는 기존 화학적 처리 공정과 유사한 수준의 리그닌 제거 효과를 제공하면서도 화학물질 사용량을 크게 절감할 수 있을 것으로 판단된다. 필터 성능 평가에서는 셀룰로오스 함량이 증가할수록 인장강도와 접힘 저항성이 향상되었으나, 공기투과도는 감소하는 경향을 보였다. 이를 바탕으로, 공기투과도와 기계적 안정성 간의 균형을 고려하여 셀룰로오스 70%와 PP 30%의 배합비를 최적 조건으로 판정하였다.

마지막으로 전과정평가 결과, 목질계 셀룰로오스 필터를 적용한 마스크의 탄소배출량은 6.06 ton CO₂ eq으로 나타나, PP 기반 필터(7.18 ton CO₂ eq) 대비 약 15.6% 낮게 탄소배출량이 나타났다. 특히, 제조 단계에서 목질계 필터는 4.40 ton CO₂ eq의 배출량을 보여 PP 기반 필터(5.35 ton CO₂ eq) 대비 약 17.8%의 배출량 감소 효과를 확인하였다. 이러한 결과는 목질계 바이오매스를 활용한 필터가 기존 석유계 필터 대비 탄소저감 효과를 가질 수 있음을 시사한다.

그러나, 본 연구에서는 실험실 규모에서 실험을 수행하였으며, 전자선 조사 공정을 전과정평가에 직접 반영하지 않은 한계가 있다. 따라서 향후 연구에서는 수행된 연구 결과를 기반으로 산업에서 적용 가능성을 검토하기 위해 파

일럿 스케일 연구 및 대량 생산 공정에 관한 추가적인 연구와 전자선 조사가 환경적 지속 가능성에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 필요가 있을 것으로 생각된다.

결론적으로, 본 연구를 통하여 전자선 조사 기반의 셀룰로오스 추출 공정을 도입하여 기존 화학적 처리 공정의 대체 가능성을 보여주었으며, 전과정평가를 수행하여 목질계 필터의 탄소배출 저감 효과를 정량적으로 분석함으로써 셀룰로오스 소재가 지속가능한 소재로 활용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산림청의 “산림과학기술 연구개발사업(Project No. 202348 7B31-2325-AA01, 한국임업진흥원 지원)”과 환경부의 “폐자원에너지화 전문인력 양성사업”의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] International Energy Agency (IEA), 2021, “Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector”, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [2] Demirbas, A., 2000, “Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals”, *Energy Convers. Manag.*, **42**(11), 1357-1378.
- [3] Ragauskas, A.J., Williams, C.K., Davison, B.H., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C.A., Frederick, W.J. Jr., Hallett, J.P., Leak, D.J., Liotta, *et al.*, 2006, “The path forward for biofuels and biomaterials”, *Science*, **311**(5760), 484-489.
- [4] Rowell, R.M. (ed.), 2005, “Handbook of Wood chemistry and wood composites”, CRC Press, Boca Raton.
- [5] Fukuzumi, H., Saito, T., Iwata, T., Kumamoto, Y., and Isogai, A., 2009, “Transparent and high gas barrier films of cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation”, *Biomacromolecules*, **10**(1), 162-165.
- [6] Abolore, R.S., Jaiswal, S., and Jaiswal, A.K., 2024, “Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review”, *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, **7**, 100396.

- [7] Oun, A.A., and Rhim, J.W., 2016, "Isolation of cellulose nanocrystals from grain straws and their use for the preparation of carboxymethyl cellulose-based nanocomposite films", *Carbohydr. Polym.*, **150**, 187-200.
- [8] Padilla-Rascón, C., Ruiz, E., Romero, I., Castro, E., Oliva, J.M., Ballesteros, I., and Manzanares, P., 2020, "Valorisation of olive stone by-product for sugar production using a sequential acid/steam explosion pretreatment", *Ind. Crops Prod.*, **148**, 112279.
- [9] Li, X., Tabil, L.G., and Panigrahi, S., 2007, "Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: A review", *J. Polym. Environ.*, **15**, 25-33.
- [10] Bampidis, V., Azimonti, G., Bastos, M.L., Christensen, H., Dusemund, B., Kos Durjava, M., Kouba, M., López-Alonso, M., López Puente, S., Marcon, *et al.*, 2020, "Safety and efficacy of hydroxypropyl methyl cellulose for all animal species", *EFSA J.*, **18**(7), 6214.
- [11] Franklin Associates, 2021, "Cradle-to-Gate life cycle analysis of polypropylene (PP) resin", American Chemistry Council (ACC) Plastics Division, Accessed 18 October 2024, <https://plastics.americanchemistry.com>.
- [12] Türkmen, B.A., 2022, "Life cycle environmental impacts of disposable medical masks," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **29**, 25496-25506.
- [13] Chen, S., 2009, "Life cycle assessment of wood pellet", M.S. thesis, Chalmers University of Technology, Department of Energy and Environment, Division of Environmental System Analysis, Göteborg, Sweden.
- [14] Krexner, T., Bauer, A., Zollitsch, W., Weiland, K., Bismarck, A., Mautner, A., Medel-Jiménez, F., Gronauer, A., and Kral, I., 2022, "Environmental life cycle assessment of nano-cellulose and biogas production from manure", *J. Environ. Manag.*, **314**, 115093.
- [15] Lee, S., Kim, B., Ji, S., Jang, Y.-C., Lee, E., Park, M., Kim, S., Sim, Y., Kim, D., and Han, S., 2021, "Proper management of single-use face masks in Korea during COVID-19 pandemic", *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **38**(4), 281-293.
- [16] Won, S.R., Shin, H.K., Jeun, J.P., and Kang, P.H., 2011, "Characteristics and effects of radiation treatment on wood pulping process", *J. Radiat. Ind.*, **5**(3), 227-230.
- [17] Kang, P.H., Jeun, J.P., Kim, H.B., Oh, S.H., Koo, D.H., and Kim, D.Y., 2016, "Technical development of radiation assisted waste wood / plant resource-based pulping and fibrosis", KAERI Report No. KAERI/RR-4027/2015, Korea Atomic Energy Research Institute.
- [18] Kim, Y.L., An, H.J., and Cho, B.U., 2020, "Production of cellulose beads with TEAH-urea solvent and dropping technique: Effect of inner diameter of syringe needle", *J. Korea TAPPI*, **52**(6), 149-156.
- [19] Lee, S.Y., Chun, S.J., Doh, G.H., Lee, S., Kim, B.H., Min, K.S., Kim, S.C., and Huh, Y.S., 2011, "Preparation of cellulose nanofibrils and their applications: High strength nanopapers and polymer composite films", *Journal of the Korean wood science and technology*, **39**(3), 197-205.
- [20] Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT), 2017, "Nano cellulose technology and application industry trends", KEIT PD Issue Report, 17-8, https://kum.korea.ac.kr/cmm/fms/FileDown.do?atchFileId=STM_0000000000000644&fileSn=2&is=Y.
- [21] Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), 2002, "Development of nuclear fuel cycle technology linked to light and heavy water reactors: DUPIC fuel compatibility assessment", KAERI/RR-2228/2001, Final Report.
- [22] HD Hyundai Oilbank, 2023, "Integrated report 2023", https://www.hd-hmd.com/download.jsp?path=upload/report_eng&rn=1724207103003.pdf&dn=%28ENG%29+2023+HDKSOE_Integrated+Report.pdf.
- [23] PBL Netherlands Environmental Assessment Agency and TNO Energy Transition, 2022, "Decarbonisation options for the dutch waste incineration industry", PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, <https://www.pbl.nl/downloads/pbl-2022-decarbonisation-options-for-the-dutch-waste-incineration-industry-4916pdf>.