

한국섬유기계융합연구원, 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터

1. 한국섬유기계융합연구원

한국섬유기계융합연구원(KOTMI, Korea Textile Machinery Convergence Research Institute)은 2003년 3월에 설립된 전문생산기술연구소로, 섬유기계 및 부품 기술의 자립화를 통해 섬유산업과 섬유기계 산업 경쟁력 제고를 목표로 하고 있다. 연구 인프라와 전문인력을 기반으로 연구개발사업, 기반구축사업, 기업지원사업을 수행하며 섬유기계 산업의 R&DB Hub로 성장해 왔으며, 최근에는 친환경 첨단 신소재 및 AI 자율제조 기반의 국가주력산업 고도화를 위한 Total Solution R&D 선도기관으로 거듭나고 있다.

이를 위해 2본부(경영지원본부, 연구본부), 6연구부(AX부품장비연구부, 에너지DX연구부, 유연생산시스템연구부, 첨단로봇융합연구부, 복합소재연구부, 그린소재연구부), 6실(경영지원실, 운영지원실, 기업지원실, 시험분석실, 전략기술기획실, 윤리감사실), 1분원(대구센터)과 산업혁신기반구축사업에 의한 2개의 센터를 운영하고 있다. 전체 구성원 88명 중 66명(75%)이 전문성을 확보한 석·박사 학위를 소지한 인력이다. 이를 바탕으로 매년 1인 2사 기업 발굴 및 기술지원을 실시하고 있으며, 소부장 융합혁신지원단 우수기관(2023년) 및 소부장 실증기반강화사업 실시기관(2024년)에 선정된 유일한 섬유연구기관이다.

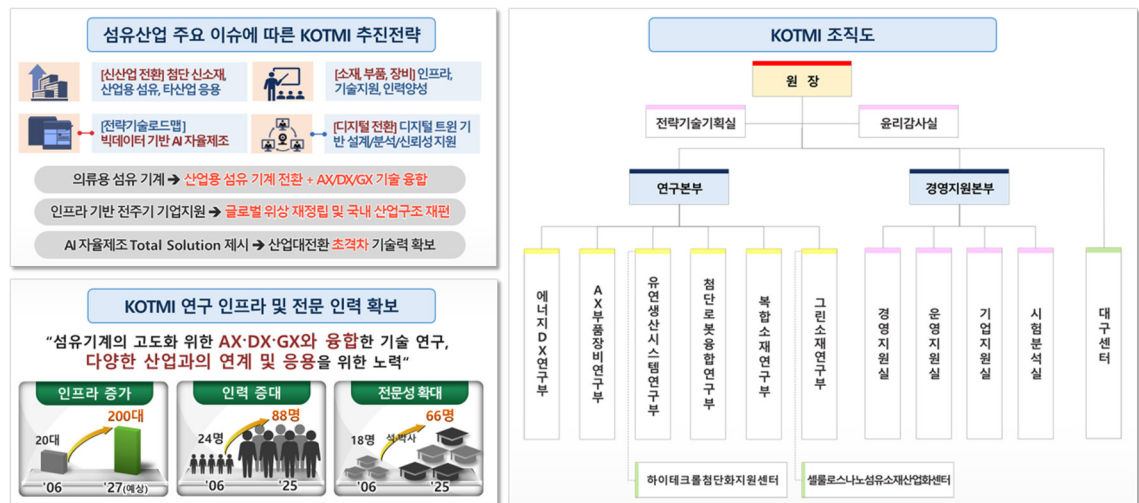


Figure 1. 한국섬유기계융합연구원 조직도.

2. 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터

산업혁신기반구축사업을 통해 건립된 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터는 경북 경산시 진량읍에 위치하고 있다. 셀룰로스 나노섬유(Cellulose Nanofiber, CNF) 소재를 활용하여 제품화를 필요로 하는 기업을 대상으로 소재 지원 및 상용화 기술, 신뢰성 검증, 친환경 인증 시험평가 등 전주기적 지원을 통해 기업의 시장 진입 및 활성화가 가능하도록 CNF 소재 산업화 지원 기반을 마련하고 있다.



Figure 2. 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터.

2.1. 천연물/리사이클 기반 셀룰로스 원료화 기술

2.1.1. 비목질계 원료화 기술

비목질계 소재는 벚짚, 왕겨, 바가스(사탕수수 잔여물), 대나무, 삼, 아마, 면화 등이 있다. 이러한 소재들은 목질계에 비해 상대적으로 저렴하고 재생 가능한 자원으로, 다양한 산업에서 셀룰로스 기반 제품 생산에 활용된다. 비목질계 원물 소재에서 셀룰로스를 원료화하기 위해서는 증해(cooking) 공정이 필수적이며, 이 과정을 통해 셀룰로스를 효과적으로 추출할 수 있다.

본 센터는 대용량 증해기를 보유하고 있어, 다양한 비목질계 셀룰로스 원료화 개발을 적극적으로 진행하고 있다. 이를 통해 지속 가능하고 경제적인 셀룰로스 원료 생산 기술 발전에 기여하고 있다.



Figure 3. 대용량 증해기를 활용한 셀룰로스 원료화 과정.

2.1.2. 리사이클 원료화 기술

폐섬유의 재활용을 위한 다양한 글로벌 규제 및 정책이 시행되고 있으나 폐섬유에 포함된 염료, 가공제 등으로 인해 현재 폐섬유의 약 1% 정도만 새로운 섬유로 재활용되고 있는 실정이다. 폴리에스터는 흔히 면, 스판덱스 등 이종 섬유와 복합하여 사용된다. 100% 폴리에스터 단독 섬유와 달리, 이종 섬유가 혼합된 폐 폴리에스터 복합섬유의 경우 재활용에 어려움이 있다. 이는 이종 섬유가 불순물로 작용하여 폴리에스터의 해중합 및 고순도 폴리에스터 단량체 수득을 방해하기 때문이다.

이러한 문제를 해결하기 위해, 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터에서는 셀룰로스 소재의 화학적·바이오 전처리 기술을 이용하여 폴리에스터-면 복합섬유에서 셀룰로스를 선택적으로 분리·회수하는 데 성공했다. 현재 이 공정의 최적화 연구를 진행 중이며, 이를 통해 셀룰로스를 효과적으로 원료화할 수 있다.

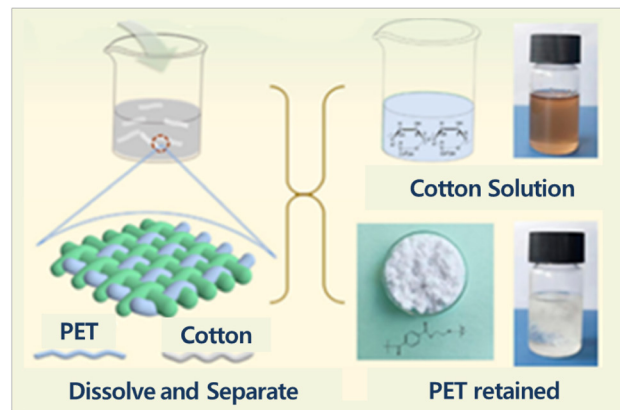


Figure 4. 폐 폴리에스터 복합섬유로부터 셀룰로스를 선택적으로 분리·회수하는 공정.

2.1.3. TMP 기반 리그노셀룰로스 소재화 기술

본 센터는 열기계펄프(Thermo-Mechanical Pulp, TMP)를 활용한 미세섬유화 리그노셀룰로스 제조 기술을 보유하고 있으며, 이 기술을 기반으로 다양한 응용 연구를 검토 중이다. TMP 활용의 가장 큰 장점은 제품화 시 소재의 경제성 확보로 본 센터는 차량용 복합소재를 비롯한 다양한 산업 분야에 적용 가능한 소재 개발을 추진하고 있다.

또한, TMP 기반 리그노셀룰로스의 미세섬유화 가공 최적화 및 물성 향상을 위한 연구를 병행하고 있어, 이를 통해 해당 기술의 상용화 범위를 확대해 나갈 계획이다. 이러한 노력은 친환경적이고 경제적인 소재 개발에 기여할 것으로 기대된다.

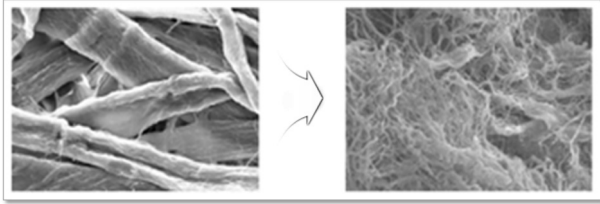


Figure 5. 리그노셀룰로스 미세섬유화.

2.1.4. 용해용 펄프 기술

우리나라는 고순도 펄프 수입 의존도가 높고 목재 자원이 부족한 국가이기에 원재료 수급이 원활하지 않아 자체 수급 가능한 원재료를 이용한 고순도화 공정 개발이 시급한 상황이다. 국내에서 자체 수급이 가능한 원재료로는 국내 벌목칩, 비목질계 소재, 폐코튼 원단 등이 있다. 이들은 셀룰로스 함량이 높아 적절한 고순도 추출 기술을 이용하면 α -셀룰로스 함량이 높은 고순도 셀룰로스 원재료를 얻을 수 있다.

본 센터는 고순도 셀룰로스 원재료 추출 및 정제 기술 확보를 통해 국내 공급망 안정화를 도모하고자 하며, 향후 이를 활용한 재생 섬유화에 대한 연구를 진행할 예정이다. 이러한 노력은 국내 셀룰로스 산업의 자립도를 높이고, 지속 가능한 소재 개발에 기여할 것으로 기대된다.

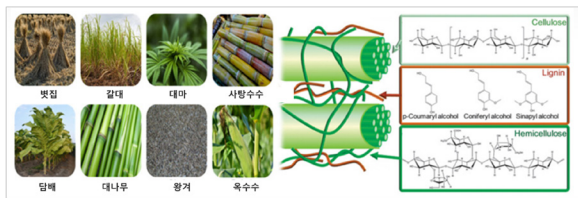


Figure 6. 다양한 바이오매스 유래 소재의 구성요소(Cellulose, Lignin, Hemicellulose).

2.2. 셀룰로스 나노섬유화 기술

2.2.1. 화학적 바이오 전처리 기술

셀룰로스 나노섬유화 시 섬유 직경을 100 nm 미만으로 제어하기 위해서는 나노화 공정 전 셀룰로스 섬유 내 미세섬유(single cellulose microfibril) 간 수소 결합력을 약화시키는 과정이 필수적이고, 이때 화학적, 생물학적 전처리 방법이 주로 활용된다. 본 센터에서는 셀룰로스의 수산기 일부를 음이온계(TEMPO, 카르복시메틸화), 양이온계(4급 암모늄화), 소수계(아세틸화) 작용기로 화학 치환하여 셀룰로스 나노화 전처리를 진행하고 있다. 모든 화학적 전처리 과정의 핵심은 치환도 조절을 통해 셀룰로스의 결정 구조를 유지하면서 셀룰로스 미세섬유 간 결합력을 약화시켜, 경미한 해섬 처리만으로 고결정

성 CNF를 제조하는 것이다. 생물학적 방법으로는 셀룰레이즈(cellulase)를 이용하여 가수분해 전처리 공정을 진행하고 있다. 이 공정은 섬유 구성 성분을 분해하여 나노화를 촉진시키는 친환경적인 방법으로 화학 약품을 사용하지 않고 독성 물질 발생이 없다. 또한, 원료에 대한 의존성이 낮은 장점이 있어 셀룰로스 나노섬유화에 따른 경제적 실용화를 기대할 수 있다.

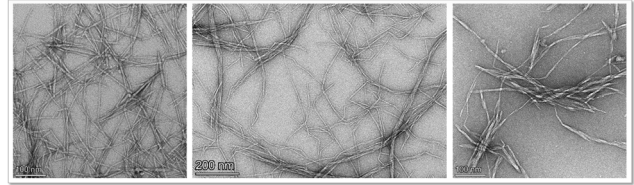


Figure 7. TEMPO/4급 암모늄화/효소 가수분해 전처리 CNF 이미지(좌로부터).

2.2.2. 나노해섬기술

결속력이 약화된 셀룰로스 섬유는 기계적 반복 분쇄를 통해 나노화할 수 있으며, 분쇄 방법은 크게 리파이너, 습식 콜로이드밀로 나뉘어진다. 리파이너는 고정바와 회전바로 구성된 디스크 사이를 섬유가 통과하면서 물리적인 충격에 의해 섬유의 절단 및 피브릴화가 이루어진다. 특히 디스크를 구성하는 바의 폭이 좁고 조밀한 마이크로 Fine bar를 이용하면 나노 크기의 미세섬유를 제조할 수 있다. 습식 콜로이드밀은 고정된 세라믹 디스크와 고속으로 회전하는 세라믹 디스크 사이에 셀룰로스 섬유를 투입하여 원심력에 의해 그라인딩 스톤의 전단력과 마찰력을 받으면서 분쇄되어 나노화가 진행된다. 그 외에도 Microfluidizer, Cryocrushing, High-Intensity Ultrasonification 등의 기계적 처리를 이용하여 CNF를 제조할 수 있다.

셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터에서는 Micro Fine Bar가 장착된 파일럿급 리파이너, 고압균질기, 그라인더를 보유하고 있으며, 전처리 최적화, 에너지 저감, 연속식 제조 공정 등을 통한 대량 생산에 초점을 맞추어 연구를 진행하고 있다. 이를 통해 친환경 나노섬유 공급체제를 확립하고 친환경·저탄소 소재 부품 산업화를 지원할 계획이다.

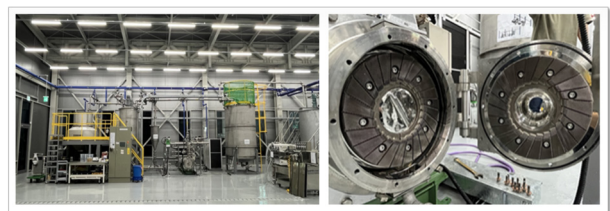


Figure 8. 파일럿급 리파이너 및 마이크로 Fine bar 장착 모습.



Figure 9. 습식 콜로이드밀 및 특수 그래핀.

2.2.3. 고농도 미세나노화 기술

전처리된 셀룰로스를 나노화시키기 위한 장비는 고압균질기가 대표적이다. 고압균질기는 1,000 bar 이상의 고압으로 유체를 충돌시켜 유체 내의 셀룰로스를 분산시키는 원리로 나노섬유화를 이루는 장치이다. 채널 타입 고압균질기는 미세통로를 통과하며 분산이 이루어지기 때문에 섬유의 크기가 커지거나 고농도의 셀룰로스 샘플을 처리하는 데 한계가 있다. 반면, 밸브 타입 고압균질기는 밸브 위치를 조절하며 나노화 처리를 할 수 있어 크기가 큰 섬유나 고농도의 셀룰로스를 처리하는 데 더 적합하다.

본 센터에서는 현재 채널타입 고압균질기를 이용해 다양한 CNF를 제조하고 있으며, 향후 밸브타입 고압균질기를 도입하여 고농도의 CNF 생산성을 향상시킬 계획이다.

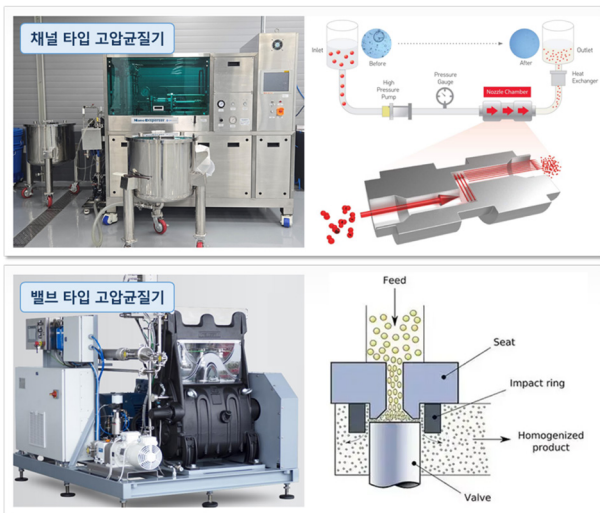


Figure 10. 고압균질기의 노즐 타입에 따른 미세나노화 매커니즘 모식도.

2.2.4. 생체적합/가식화 소재 기술

CNF는 바이오매스 유래 천연 고분자로 구성되고, 생체 적합성, 생분해성, 높은 수분 함유량 등의 장점을 가져 화장품과 일부 바이오 분야에서 활용되고 있다. 그러나 나노물질의 안전성에 대한 우려로 인해 직접 섭취하는 푸드테크 분야에 적용하는

사례는 드물었다.

본 센터에서는 원재료, 전처리, 나노화 공정 모두를 식품 등급 수준으로 관리하여 셀룰로스 식이나노섬유를 개발하였으며, 셀룰로스 식이나노섬유의 안전성은 마우스를 이용하여 4주 반복 경구 투여 독성실험을 통해 평가되었다. 그 결과 안전성이 확보된 셀룰로스 식이나노섬유를 확보하였으며, 향후 푸드테크 산업에 적용하는 연구를 진행할 예정이다. 이를 통해 식품 산업에서의 나노섬유 활용 가능성을 확장하고, 새로운 기능성 식품 소재 개발에 기여할 것으로 기대된다.

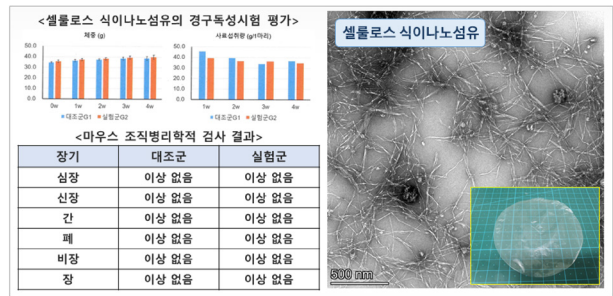


Figure 11. 셀룰로스 식이나노섬유의 경구 독성평가 결과.

2.3. 셀룰로스 나노섬유소재 주요 응용 분야 및 산업화 기술

2.3.1. 바이오 복합소재 응용 기술

▷ 바이오 플라스틱 복합소재 기술

바이오 기반 플라스틱 소재에 대한 수요가 증가하는 산업 트렌드에 대응하여, 본 센터에서는 CNF/Bio-PE 복합 사출용 수지를 개발하고 기존 사출용 수지를 대체할 수 있는 가능성을 평가하였으며, 그 결과, Bio-PE 수지와 CNF의 복합화를 통해 다양한 물성이 크게 향상(인장강도 14.8%, 굴곡강도 19.4%, 충격강도 33.9%, 내열성 26.6% 등)되는 것을 확인하였다. 더불어, 실제 산업 현장에서의 적용 가능성을 검증하기 위해 양산 장비를 이용한 시사출 평가를 진행하여 복합소재의 사출 가능성을 확인하였으며, 기존 플라스틱을 대체할 수 있는 실용적인 소재임을 입증하였다. 이러한 연구 결과는 환경 친화적이면서도 우수한 성능을 갖춘 바이오 기반 플라스틱 소재의 개발이 성공적으로 이루어졌음을 보여주며, 향후 다양한 산업 분야에서의 적용 가능성을 보여준다.



Figure 12. 100% 바이오 기반 플라스틱 복합소재 생산 및 사출.

▷ 바이오 코팅/접착 소재 기술

CNF는 다양한 산업 분야에서 주목받고 있는 소재로, 수계 고분자 수지와의 뛰어난 혼합성을 바탕으로 내구성 향상과 레올로지 변성이 가능하여 접착제, 도료, 복합재료의 바인더 등 광범위한 응용이 시도되고 있다. CNF의 첨가는 피착재 표면과의 접착 면적을 증가시켜 접착 강도를 개선하고, 접착 도막의 구조를 유지하여 온도와 열에 의한 열화를 억제하는 효과가 있다. 이러한 특성으로 인해 CNF를 활용한 연구개발 및 제품화가 활발히 진행 중에 있으며, 본 센터도 CNF를 이용하여 다양한 혁신 제품을 개발하였다. 자동차용 수성 PU 접착제, 생분해성 멀칭 필름용 코팅제, PE 대체 종이 컵용 코팅제, 워크웨어 원단용 수성 PU 코팅제, 아웃도어 원단용 바이오 수성 PU 코팅제 등의 개발을 통해 기존 제품 대비 접착강도, 인장강도, 마찰견뢰도, 통기성 제어 등 기계적 물성을 크게 개선하였다. 이는 CNF의 잠재력과 다양한 산업 분야에서의 적용 가능성을 잘 보여주는 사례라고 할 수 있다.

2.3.2. 탄성소재 응용 기술

▷ CNF 그린고무 기술

전기자동차(EV)의 보급 확대에 의해 타이어의 성능과 내구성에 대한 요구가 더욱 높아지는 최근, EV 차량의 높은 출력과 즉각적인 토크 특성은 타이어의 마모를 가속화하며, 이로 인한 미세 먼지 발생이 새로운 환경 문제로 대두되고 있다. 이러한 산업적, 환경적 이슈에 대응하기 위해 본 센터에서는 CNF를 고무 소재와 복합화하여 물리적 특성을 강화하고, 내마모성과 친환경성을 동시에 향상시키는 기술을 연구하고 있다.

이와 더불어, 화학 산업에서도 석유화학 유래 첨가제인 카본블랙을 대체하기 위해 CNF를 이용한 천연고무 마스터배치를 제조하여 고강도와 고내구도를 갖춘 친환경 마운트부시용 방진고무를 개발하였으며, 현재 상용화를 추진 중이다.

이러한 CNF 그린고무 기술은 자동차 산업의 친환경화와 성능 향상이라는 두 가지 목표를 동시에 달성하려는 노력의 일환으로, 앞으로의 지속 가능한 미래 모빌리티 발전에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.



Figure 13. CNF 복합 천연고무 마스터배치.

▷ CNF/TPU 복합소재 기술

열가소성 폴리우레탄(TPU)은 경질 및 연질 세그먼트로 구성된 블록 공중합체로, 고무 대체제나 투명 필름 형태로 신발 밑

창이나 내장 보호 필름 등 다양한 용도로 활용되고 있다. CNF/TPU 복합소재는 CNF가 TPU의 연질 세그먼트 내에서 3차원 네트워크를 형성하여 탄성을 부여함으로써 경도 강화 효과를 가진다. 따라서, TPU 수지 내 CNF의 분산 고도화를 통해 경도 강화와 신율이 동시에 향상된 CNF/TPU 복합소재 개발 기술이 요구된다. 본 센터에서는 CNF의 함량에 따른 CNF/TPU 복합소재의 물성 데이터베이스를 구축하고 있으며, 이를 기반으로 특정 목표 물성에 부합하는 CNF/TPU 복합소재의 제조 방법과 다양한 산업 응용 기술을 보유하고 있다. 이는 새로운 고성능 복합소재의 산업적 응용 범위를 확장하고, 기존 소재의 한계를 극복할 수 있는 혁신적인 솔루션을 제공할 것으로 기대된다.

2.3.3. 전기전자소재 응용 기술

▷ 절연보드 소재 기술

전기·전자 분야에서는 에너지 효율 향상과 탄소중립 실현을 위해 최근 다양한 정책이 추진 중인 한국전력공사와 미국 에너지부(DOE)는 99.3% 이상의 효율 기준을 제시하며, 에너지 절감과 효율 극대화를 위한 노력을 기울이고 있다. 이러한 글로벌 목표를 달성하기 위한 가장 효과적인 방법 중 하나로 전자기기의 소형 경량화, 즉 콤팩트화가 주목받고 있다. 본 센터에서는 이러한 추세에 발맞추어 변압기와 권선에 사용되는 절연소재의 콤팩트화를 위한 기술 개발을 진행하고 있다.

기존의 셀룰로스 기반 절연소재에 CNF를 혼합하는 기술을 개발하여 절연소재 내부의 공기 공극(Air Void)을 줄이되, 이 과정에서 수소결합과 3차원 나노 네트워크가 형성되어 기계적 강도가 보장되는 효과를 얻을 수 있다. 더불어, CNF의 비유전율(Relative Permittivity)을 낮출 수 있는 표면개질 기술을 접목하여 절연성능을 더욱 강화하는 연구도 진행 중이다. 이러한 기술 개발은 에너지 효율성 향상과 함께 전자기기의 성능 개선에도 기여할 것으로 기대된다.

절연보드 소재 기술은 전기·전자 분야에서의 에너지 효율 향상과 탄소중립 실현이라는 큰 목표를 향한 중요한 걸음이 될 것이며, 앞으로 지속적인 연구와 혁신을 통해 더욱 효율적이고 환경 친화적인 기술로 강화될 것으로 전망된다.



Figure 14. CNF를 적용한 절연소재 기술.

▷ EDLC 분리막 기술

전자기기 산업에서 중요한 역할을 하고 있는 전기 이중층 커패시터(EDLC, Electric Double Layer Capacitor)는 소형 IT 기기부터 자동차에 이르기까지 다양한 분야에서 활용되며, 최근 이차전지 기술의 발전과 함께 대용량화되어 슈퍼커패시터로서 고출력 보조장치 등에 사용되고 있다. EDLC의 핵심 부품인 전극과 전해액은 국내에서 자체 생산 및 공급이 가능하나, 분리막은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이며, 특히 국내에 EDLC용 CNF 기반 분리막을 생산하는 기업이 없어 높은 단가와 불안정한 공급 등의 어려움이 발생하고 있다.

이에 국내 EDLC 산업의 안정적인 성장과 글로벌 시장에서의 경쟁력 확보를 위해 CNF 분리막의 국산화가 시급한 과제로 대두됨에 따라, 본 센터에서는 CNF 시트 롤 성형기를 구축하여 EDLC용 분리막 제조 기술을 개발하고 있다. 더불어 국내 커패시터 업체들과 협력하여 CNF 기반 분리막을 양산 커패시터에 적용하고 평가함으로써 국산화 가능성을 적극적으로 검토하고 있다.

이를 통해 EDLC 산업의 국내 공급망을 강화하고, 기술 자립도를 높이는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대되며, 성공적인 국산화가 이루어진다면 국내 EDLC 산업의 경쟁력 향상과 함께 글로벌 시장에서의 입지를 더욱 굳건히 할 수 있을 것이다.

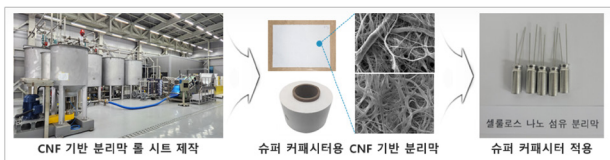


Figure 15. CNF 기반 분리막 적용 슈퍼커패시터.

▷ BIPV 경량 태양광 모듈 기술

BIPV(Building Integrated Photovoltaic) 기술은 건축물과 태양광 발전을 융합하는 혁신적인 접근 방식으로, 건물의 외벽, 지붕, 창호 등에 태양광 모듈을 통합하는 방식을 채택하고 있으나, 기존의 BIPV 모듈은 주로 유리를 기반으로 제작되어 무게와 구조적 부담이 크고, 생산 과정에서 상당한 양의 탄소를 배출하여 친환경성 측면에서 개선이 필요한 상황이다.

이에, 경량화와 친환경성을 동시에 확보할 수 있는 신소재 적용 연구가 활발히 진행되고 있으며, 본 센터에서는 CNF 필름을 롤 시트(Roll Sheet) 형태로 제조한 후, 바이오에폭시 수지를 함침·적층하여 복합재 패널 제조 기술을 개발하고 있다. 이를 통해 제작된 패널은 태양광 모듈에 적용되며, 이는 BIPV 기술의 성능 향상과 환경 친화성 증대에 크게 기여할 것으로 기대된다.

BIPV 경량 태양광 모듈은 CNF의 우수한 물성과 친환경적 특성을 활용하여 BIPV 기술의 한계를 극복하고, 더욱 효율적이고 지속 가능한 건축 통합형 태양광 발전 시스템을 구현하는 데 중요한 역할을 할 것으로 전망된다.

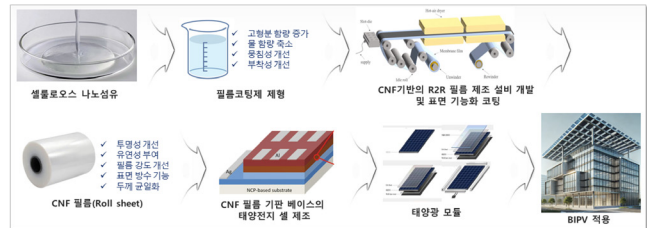


Figure 16. CNF film/Bio Epoxy 복합패널 적용 BIPV 개념도.

▷ 전자파 차폐 소재 기술

IT 기기 기술의 급속한 발전으로 인해 경량화, 고방열, 유연성을 갖춘 소재에 대한 수요가 증가하고 있으나, 현재 상용화된 소재들은 대부분 전자파 차폐나 방열 중 한 가지 기능에 특화됨에 따라 이 두 가지 문제를 동시에 해결할 수 있는 통합 소재 기술의 필요성이 대두되고 있다. 이에 은나노와이어(AgNW)와 CNF를 결합한 나노복합소재를 개발하였다. AgNW는 우수한 전기 전도성과 나노미터 단위의 작은 지름으로 전자파를 효과적으로 차단할 수 있고, CNF는 AgNW의 분산 안정화에 효과적이고, 생분해성, 경량성, 우수한 기계적 강도 및 내열성을 가지고 있어, 이 두 소재의 결합은 전자파 차폐와 방열 성능을 동시에 갖춘 혁신적인 나노복합소재를 만들어낼 수 있다.

현재 AgNW·CNF 나노복합소재는 방열과 전자파 차폐가 중요한 방산용 드론, 자율주행차 등의 분야에 적용하기 위한 연구가 진행 중이며, 향후 첨단 IT 및 신산업 분야의 고성능, 다기능 소재의 개발을 위해 활용될 예정이다.

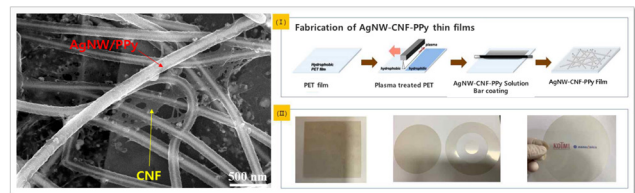


Figure 17. AgNW/PPy/CNF 나노복합소재를 활용한 전자파차폐 기술.

▷ 이차전지 고용량 음극재 기술

리튬이온 이차전지 기술의 발전에도 불구하고, 음극재 분야는 여전히 탄소계 소재에 머물러 있어 양극재의 충전용량에 미치지 못하는 상황에 최근 실리콘이 음극재 소재로 주목받고 있다. 실리콘은 1 g당 1,500 mAh의 높은 전지 용량을 구현할 수 있

으며, 흑연 계열 대비 에너지 밀도가 높고 리튬이온을 빠르게 받아들여 충전 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 실리콘 음극재는 고가이며, 반복적인 충방전으로 인한 급격한 부피 변화가 내구성을 저하시키는 문제점이 있어 이를 해결하기 위한 기술 개발이 필요하다.

본 센터에서는 실리콘 나노입자의 표면에 CNF로 만든 섬유형 껍질을 입히고, 그 위에 탄소 피막을 증착하는 탄소 이중층 구현 기술을 이용하여 실리콘 음극재 충방전 안정성을 크게 향상시키는 연구를 수행 하고 있다. 이는 리튬이온 이차전지의 성능을 획기적으로 개선할 수 있는 잠재력을 가지고 있으며, 향후 전기차 및 에너지 저장 시스템 등 다양한 분야에서 핵심 역할을 할 것으로 기대된다.

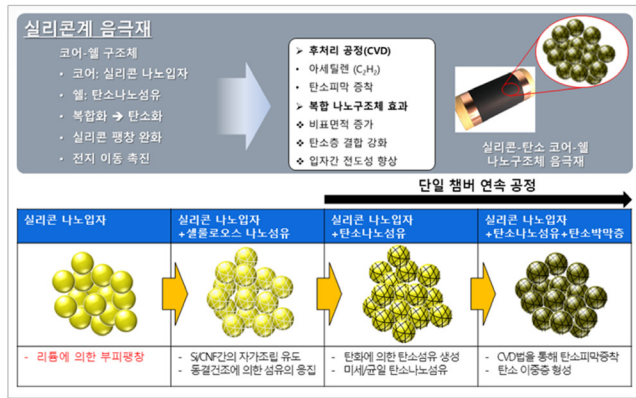


Figure 18. CNF를 활용한 이차전지용 고용량 실리콘 음극재 개발.

2.3.4. 바이오생명소재 응용 기술

▷ 가식용 코팅/푸드패키징 상용화 기술

CNF는 식용 코팅제로서 탁월한 특성을 보여주는데, 이는 분산액 상태로 기재 표면에 박막으로 도포하고 건조시키면 우수한 배리어 특성이 나타나 식품 보존에 매우 적합하다. CNF로 형성된 매우 치밀한 막 구조는 수분 침투를 효과적으로 막아주며, 섬유층의 중형비와 함량을 조절함으로써 기공을 제어할 수 있어 산소나 이산화탄소 같은 가스에 대해서도 높은 차단성을 제공할 수 있다. 또한, 셀룰로스는 인체 내에서 소화되지 않는 β(1→4) glucoside bond로 구성되어 있어 칼로리 증가 문제에서 자유롭다. 이는 식이섬유로서의 장점도 함께 제공한다.

본 센터에서는 이러한 CNF의 특성을 활용하여 식용코팅제를 개발 중에 있으며, 특히 과일 표면에 이를 도포하여 저장성을 향상시키는 기술을 개발하고 있다. 이를 통해 식품 산업에서 신선도 유지와 보존 기간 연장에 큰 기여를 할 것으로 기대된다.

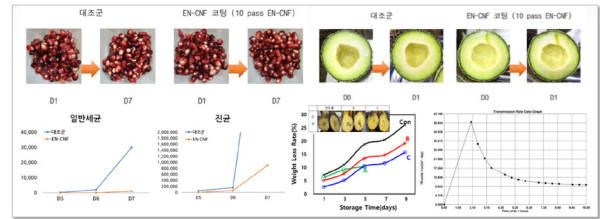


Figure 19. CNF 기반 식용 코팅제가 적용된 과일의 저장 안정성 평가.

▷ 코스메틱 상용화 기술

CNF는 미세한 나노 구조로 인해 뛰어난 보습력과 점도 조절 기능을 가지며, 피부에 자극이 적고 생분해성이 우수한 친환경 소재이다. 코스메틱 분야에서도 비건 트렌드를 반영한 제품이 주목받고 있으며 CNF를 활용한 제품도 시장에 출시되고 있다. 본 센터에서도 화장품 기업에 대한 기술지원을 통해 아래 코스메틱 제품을 개발하여 상용화를 추진 중이다.

- 하이드로겔 마스크팩 : CNF를 활용하여 미용액이 흘러나오는 이수현상을 개선하고, 하이드로겔의 기계적 강도를 개선한 제품 개발
- 친환경 기능성 샴푸바 : 합성 계면활성제와 인공경화제를 천연 성분으로 대체한 CNF 기반의 친환경 포물러를 적용한 샴푸바 개발
- 천연 필링젤 : 기존 필링젤에 포함된 합성 플라스틱 입자를 CNF로 대체하여, 피부에 보습 효과를 제공하면서도 환경 영향을 최소화한 친환경 필링젤을 개발

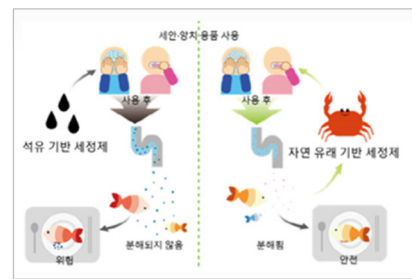


Figure 20. 화학 세정제의 위험성.

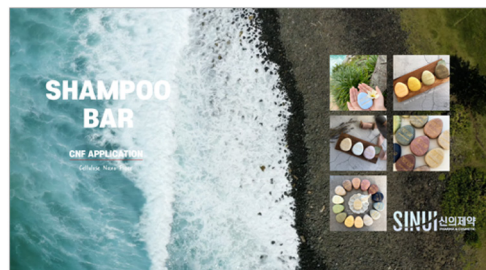


Figure 21. 샴푸바 시제품.

▷ 화상 드레싱 및 국소 지혈용 드레싱 상용화 기술

CNF는 자연유래 소재로 기계적인 분쇄만을 이용해 생산하면, 무독성 및 친환경 공정의 특징으로 인해 의료기기 분야에 적합하다. CNF의 탄력성과 우수한 수분 흡수력은 다양한 의료기기의 구성 소재로서의 활용 가능성을 높여주는데, 특히 창상피복재 제품군에서 그 활용도가 두드러진다. 이 소재는 손상된 피부를 물리적으로 보호하고, 세균과 진균의 감염을 막으며, 상처에서 발생하는 삼출물을 효과적으로 제거하여 피부 재생을 촉진하는 역할을 할 수 있다. 본 센터에서는 개발한 이러한 CNF의 장점을 더욱 발전시켜, 기능성이 강화된 메디컬 폼(CNF 기반의 메디컬 폼에 지혈 촉진제를 복합화하여 기능성을 한층 더 높인 제품)을 개발하고 있으며, 이는 의료 현장에서 더욱 효과적이고 다기능적인 치료 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 의료기기 분야에서 CNF의 활용 범위를 확장하고, 더 나은 치료 효과와 환자의 삶의 질 향상에 기여할 수 있는 혁신적인 제품 개발로 이어질 것으로 전망된다.

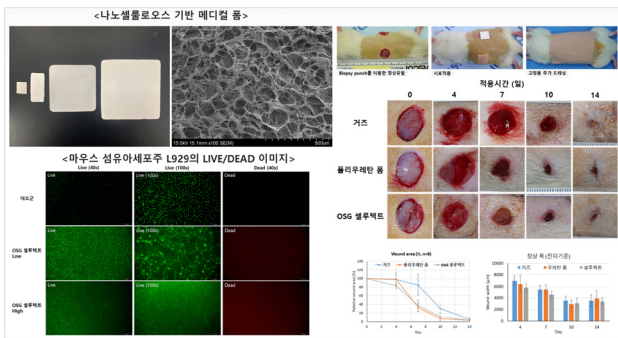


Figure 22. CNF 기반 메디컬 폼의 유효성 및 안정성 평가.

▷ 오가노이드/배양육 소재 상용화 기술

셀룰로스 분해 효소를 이용하면 배양 중인 동물 세포에 영향을 주지 않으면서 CNF를 제거할 수 있어, 오가노이드 배양을 위한 지지체로 매우 적합하며, 이러한 특성은 기존의 동물성

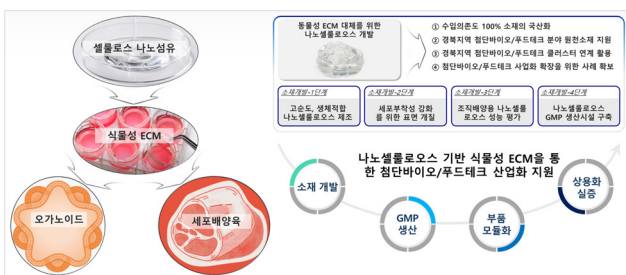


Figure 23. CNF를 활용한 식물성 ECM 개발을 위한 장기 로드맵.

ECM(Extracellular Matrix) 소재를 대체할 수 있는 가능성을 제시함으로써, 오가노이드와 세포배양육 분야에서 중요한 역할을 할 수 있다. 따라서, 식물 유래 CNF 기반 하이드로겔 개발에 집중함으로써 오가노이드와 세포배양육 분야에서 수입 의존도 100%의 동물성 ECM 소재 대체를 위한 연구를 진행 중이며, 이는 지속 가능한 바이오 소재 개발과 함께 생명공학 분야에서의 새로운 가능성을 열어줄 것으로 기대된다.

2.3.5. 청정공기/건설산업재료/기타 응용 기술

▷ 필터 여재 상용화 기술

산업화의 고도화로 인한 대기오염 물질, 중국발 미세먼지, 그리고 각종 바이러스의 위협으로 에어필터 기술의 개발과 보급이 확대되었으나, 친환경 에어필터 소재 및 산업화는 아직 초기 단계에 머물러 있다. 최근 글로벌 환경 규제 강화, 탄소중립 정책, ESG 경영에 대한 요구가 증가하면서 친환경 소재 필터의 중요성이 더욱 부각되면서 CNF가 주목받고 있다.

CNF는 친환경성을 기반으로 높은 비표면적과 섬유 네트워크 구조를 갖추고 있어, 우수한 여과 성능, 높은 기계적 강도, 그리고 다양한 기능성 부여가 용이하다는 장점을 가지고 있어 에어필터 소재로서의 활용 가능성이 매우 높다. 특히, 습식 초지방식(Wet-laid)을 활용하면 롤(Roll) 형태의 원단 생산이 가능해 대량생산에 적합하며, 전처리 방식, 평량, 두께 등의 변수를 조정하여 다양한 특성의 필터를 제작할 수 있다.

본 센터에서는 이러한 CNF 기반 에어필터 원단의 성능을 평가하기 위해 집진 효율과 압력 손실을 분석하고, 이를 데이터베이스(DB)화하는 연구를 진행 중이며, 친환경 에어필터 기술의 발전과 실용화에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

▷ 콘크리트 보강재 상용화 기술

건축 구조물의 핵심 재료인 콘크리트는 우수한 압축강도를 가지고 있지만, 낮은 인장강도와 취성적 성질로 인해 여러 문제점을 안고 있으며, 특히 타설 직후 발생하는 건조수축 및 소성수축으로 인한 균열은 심각한 문제를 야기할 수 있다. 이를 해결하기 위해 보강재 첨가를 통한 내구성 향상 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 최근에는 탄소배출 저감 등 환경 규제가 강화되면서 친환경 소재를 활용한 보강 방법에 대한 관심이 크게 증가하고 있다.

수분산 CNF는 물을 기반으로 하는 시멘트 모르타르와 쉽게 배합할 수 있어 복합 공정이 간단하고 분산성을 향상시킬 수 있으며, 소량만 첨가해도 강도 증진 효과를 나타내므로 다양한 구조물에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

본 센터에서는 이러한 CNF의 잠재력에 주목하여, 콘크리트

연구그룹 소개

보강재로서 최적의 CNF 소재를 개발하기 위한 연구를 진행 중이며, 이를 통해 건축 산업의 지속 가능성을 높이고, 더 안전하고 내구성 있는 구조물을 만드는 데 기여할 것으로 기대된다.

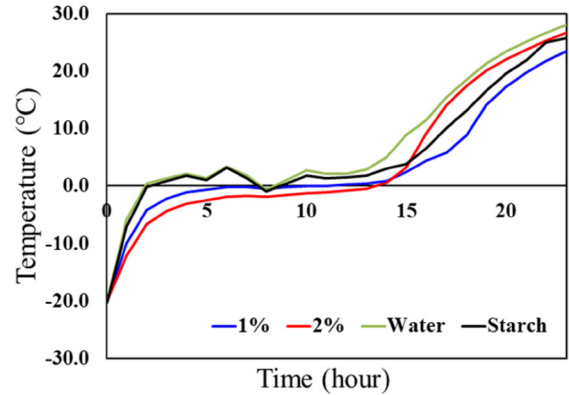


Figure 24. CNF 복합 친환경 콘크리트 제조.

▷ 친환경 아이스팩 상용화 기술

비대면 소비문화의 확산으로 냉장·냉동식품 배송 주문량이 증가하면서 아이스팩 사용량도 급증하고 있으나, 기존 아이스팩에 사용되는 고흡수성수지(SAP)는 생분해되지 않아 환경오염을 유발하고, 재활용이 어려워 별도의 폐기 처리가 필요한 문제점이 있다. 또한 2023년 4월부터는 313원/kg의 폐기물 부담금이 부과되어, SAP 냉매제를 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 센터에서는 친수성 특성을 가지고 있으며 콜로이드 상태로 수분산된 CNF를 아이스팩 냉매제로 활용하기 위한 기술을 개발하였으며, CNF를 1% 첨가한 아이스팩이 우수한 저온 지속성 효과를 보이는 것을 확인하였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 친환경 아이스팩의 사업화를 적극 추진 중에 있으며, 이는 환경 문제 해결과 동시에 산업적 수요에 부응하는 혁신적인 솔루션이 될 것으로 기대한다.



구 분	1% CNF	2% CNF	Water	Starch
15℃ 도달시간	19시 9분	17시 9분	16시 49분	18시 28분

Figure 25. CNF 친환경 아이스팩의 저온 지속성 성능평가.

2.4. 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터 보유 설비

셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터는 CNF 소재의 전주기적 지원을 위해 약 60여 종의 다양한 설비를 구축하고 있다. 본 센터는 원료물질 추출부터 소재·부품화, 그리고 신뢰성 검증에 이르기까지 종합적인 지원이 가능하도록 증해 설비, TEMPO 촉매 산화, 아세틸화, 양이온화, 효소 가수분해 등 다양한 전처리 장비를 비롯하여 마이크로미터급에서 나노미터급까지 분쇄가 가능한 리파이닝 장비까지 원스톱 공정으로 시제품 제작 지원이 가능한 인프라를 구축하고 있다.

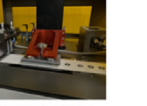
장비명 CNF 시트 롤 생산기 (CNF Sheet Roll Forming) 용도 - CNF 기술사업의 주요 품목인 약화제 분쇄 및 시트를 연속적으로 제조하기 위한 정사형 장판 조지 타입 생산 설비 주요 사양 - 직경 : 600 mm, 생산 속도 : ~10 m/min - 방량 : 10 ~ 50 gsm - 건조장치(Can Dryer) 온도 : ~ 160℃ - 건조장치(Can Dryer) 직경 : Ø 900 mm 	장비명 CNF 리파이닝(Disk) (CNF Refining) 용도 - 셀룰로스 펄프, 습식 분쇄제 수성 라이크로이드 및 수백, 수천 나노미터급으로 나노섬유화가 가능한 리파이닝(그라인딩) 장비 주요 사양 - disc type : single - disc diameter : 356 mm - stock consistency : ~ 5% - rotation speed : Max. 1800 rpm - 처리량 : 150L/min 	장비명 습식 클로이드 밀 (Wet Clot Mill) 용도 - 맛을 그라인딩 방식이 적용된 셀룰로스 섬유 조립 분쇄 장비 주요 사양 - 제분용량 : Max. 300~3,000 kg/hr 이상 - Grinder diameter : Ø350 ± 50 mm - Grinder 재질 : ceramic SIC / Al ₂ O ₃ 	장비명 아세틸화 반응기 (Acetyl Chloride Reactor) 용도 - 친수성인 CNF를 소수성으로 표면개질시키기 위한 내용물 아세틸화 반응 전용 장비 주요 사양 - 용량 : 200L (working capa. : 140L) - 클레너(타이) 및 시트 방식 - 회전속도 : 4~6 (revol type blade) - Rotation : ~ 3,500 rpm - 여과기 용량 : 100L/회 (일일처리 내화력 제형) 	장비명 증기 용해 장비 (Steam Solubilization Equipment) 용도 - 셀룰로스 나노섬유와 표면개질 방법 중 하나인 아세틸화 CNF 제조 시 필요한 장비 주요 사양 - Pot Flask Size : 55 50 Liter stirring heating mantle - Column Size : 50 mm - Vacuum Regulation System Range : 1 ~ 100 Torr 	장비명 고압분쇄기 (High Pressure Homogenizer) 용도 - 가용성, 화학적 전처리 및 리파이닝 공정을 거친 셀룰로스 나노섬유를 더욱 더 정밀하고 고순도의 CNF로 제조하기 위한 고압 나노 분산 장비 주요 사양 - 작동방식 : 40 HP 유압유입 - 최대 사용 압력 : 1 500 bar - 흐름률(flow rate) : 4 000 mL/min (물 기준) - 플런저(Plunger) : 듀얼 타입 방식 
장비명 외원여과기 (Wet Media Filtration System) 용도 - 셀룰로스 섬유 원료의 TEMPO 전처리 반응 후 물 중 유물과 수성 용리제에 함유된 불순물을 제거(세척)하기 위한 여과 장비 주요 사양 - 여과유닛 : 외원 여과 방식, 운전능력 : 5kgf/cm ² - Membrane : Area : 40m ² , Working capacity : 40m ³ /day 	장비명 섬유 교반기 (Fiber Reactor) 용도 - 셀룰로스 섬유의 나노화 전, 섬유의 비분해성 특성을 향상시키기 위한 장비 주요 사양 - Disk Type : single - Disk diameter : 300 mm (12 inch) - Bar space : 2 mm - 생산량 : 1 hr/200 kg/day 	장비명 TEMPO 반응기 (TEMPO Reactor) 용도 - 셀룰로스 섬유의 나노화 그라인딩 전 TEMPO 산화 촉매 전처리를 위한 반응 장비 주요 사양 - 반응용량 : 200 L - 필터이송장치 : 50 L - 저장용량 : 100 L - 생산량 : 200 L/hr 	장비명 필터 프레스 (Filter Press) 용도 - 셀룰로스 현탁액의 함수율을 낮추고 고형 농도를 높이기 위한 압수 여과 장비 주요 사양 - Type : 반자동 (DN/OFF) - Filter Volume : 85 liter/회 - Filter Area : 5.7 m ² /회 - Filter Thickness : 30 mm 	장비명 고형도용 DLP 3DP 장비 용도 - 고형도용 광경화성 세라믹 레진 3D 조형 장비 주요 사양 - 작동두께 : 25 µm 이상 	장비명 스캐닝 용도 - 광경화성 세라믹 레진 3DP 조형 후 3D 데이터 및 신장도를 하기 위한 장비 주요 사양 - 최대온도 : 1 700 °C - 사용온도 : 1 600 °C - 내부형상(mm) : 100W X 100 X 100H 

Figure 26. 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터 보유 설비.

또한 신소재의 신뢰성 검증을 위해 화학구조, 열안정성, 모폴로지 등을 분석할 수 있는 장비들이 구축되어 있으며, 특히 자동차, 전기전자, 바이오 등 다양한 산업 분야에 응용 가능한 소재·부품화 장비들을 갖추고 있다. 이를 활용한 기업 맞춤형 기술 개발, 성능 검증, 맞춤형 기업지원 등을 비롯하여 본 센터가 보유한 핵심기술 이전을 통해 사업화를 촉진하는 기술사업화 등 CNF 소재 기반의 소재 제조부터 소재·부품화·신뢰성 검증까지 전주기적 지원을 지향한다.

아울러, 2023년부터 매년 CNF 수요기업을 대상으로 제품화 아이템을 모집하고, CNF 상용화 기술지원(시제품 제작, 시험평가인증, 기술지도자문)을 실시하고 있으며, 자동차 내·외장재, 기능성 섬유, 건축 재료, 페인트·화장품·타이어 첨가제 등을 포함하여 CNF의 다양한 응용 분야를 개척하고 CNF 기술의 발전과 산업화를 위한 중추적인 역할을 수행하고 있다.

3. 상상 그 이상의 미래기술을 위한 연구 방향성

셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터는 KOTMI의 슬로건인 ‘상상 그 이상의 미래기술’에 부합하여 셀룰로스 산업의 미래가치 비전을 제시하는 것을 핵심 목표로 삼고 있으며, 이를 위해 본 센터는 두 가지 주요 방향에 집중하고 있다.

첫째, 셀룰로스를 활용한 미세섬유 소재화와 지속 가능한 섬유 부문 연구개발을 통해 혁신적인 산업화를 전개하고 시장을 확대하는 데 주력하고 있으며, 둘째, 탄소중립 가치 실현의 관점에서 셀룰로스 산업의 제조 공정을 고도화하고자 한다. 특히 원료화 및 소재·부품화 공정에 AI와 자동화 기술을 적용하여 생산 프로세스의 효율성을 높이는 데 지속적인 노력을 기울이고 있다.

이러한 노력을 통해 셀룰로스 나노섬유소재 산업화센터는 셀룰로스 소재산업 발전에 선도적인 역할을 담당하고자 하며, 본 센터의 이러한 기술 접근은 혁신적인 기술 개발뿐만 아니라 지속가능한 산업 발전과 우수한 공급망 기업의 동반성장을 도모할 것이다.

4. 연구인력

성명	이메일	연구분야
정용일 책임연구원(센터장)	gomer74@kotmi.re.kr	기술지원 및 기반구축 총괄
전경수 선임연구원	jks87@kotmi.re.kr	원료화, 나노화, 전기전자재료, 청정공기산업
이민지 선임연구원	mjlee@kotmi.re.kr	기반구축 실무, 건설산업재료, 아이스팩
금아람 선임연구원	arkeum@kotmi.re.kr	원료화, 나노화, 바이오 코팅/접착, 탄성소재
윤철민 선임연구원	cmyoung@kotmi.re.kr	원료화, 나노화, 전기전자재료, 바이오생명소재
김수진 전임연구원	kimsj@kotmi.re.kr	원료화, 탄성소재, 코스메틱
강석현 전임연구원	shkang@kotmi.re.kr	나노화, 바이오 복합재료, 탄성소재, 전기전자재료
이경민 연구원	gmlee@kotmi.re.kr	기술지원
임지성 연구원	jslim@kotmi.re.kr	기술지원
우정운 연구원	jwwoo@kotmi.re.kr	기술지원
심혜윤 연구원	hysim@kotmi.re.kr	기반구축 지원