

# ASTI MARKET INSIGHT

## 전기방사 나노섬유



데이터분석본부 호남지원 선임연구원 **박형욱** Tel: 062-951-7711 e-mail: hyungwook@kisti.re.kr

### KEY FINDING

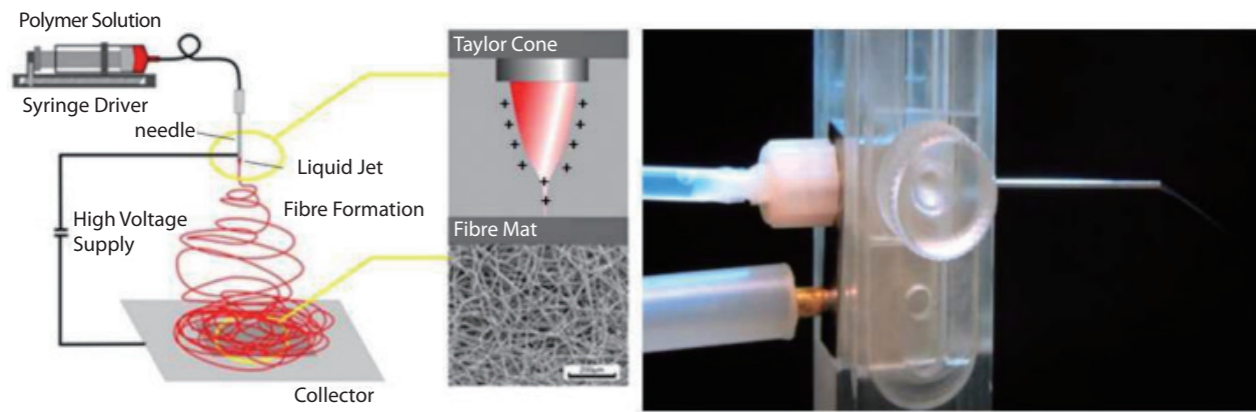
1. 최근 들어 초미세먼지와 코로나19 바이러스 확산에 따른 필터용 나노섬유 소재가 부각되면서 공기청정기 시장이 크게 성장함과 동시에 필터 제조기술 수요가 크게 증가하면서 나노섬유의 대량생산이 가능한 전기방사 방식이 각광받고 있는 추세이다.
2. 전기방사공정의 경우 용액특성, 환경변수, 공정변수에 의한 나노섬유의 굵기가 변화하게 되는데 활용영역에 따라 용액의 농도, 인가전압, 전극간 거리, 유량, 온도, 습도 등을 고려하여 적용하여야 한다.
3. Research and Markets가 제시한 전기방사 나노섬유 세계 시장규모의 80 %를 고려해 2017년 10.08억 달러에서 꾸준히 성장하여 2025년에는 2017년 대비 약 5.7배 증가한 57.92억 달러가 될 것으로 추산되고 있다.
4. 국내시장 역시 세계 시장 추이를 반영해 기발표된 2019년 TechNavio 자료를 근거로 추정된 결과 2018년 434.4억 원 수준으로 시장이 활성화되지 않은 상태였지만 2019년 이후 평균 29.94 %로 꾸준히 성장하여 2025년에는 3천억 원을 돌파할 것으로 전망하고 있다.
5. 전기방사공정은 생산속도 대비 활용성 측면에서 비용이 절대 좋다고 할 수 없는 상황이다. 따라서 사업을 진행하고자 하는 기업에서는 정책적, 산업적 파급효과를 고려한 부가가치가 높은 품목 선정이 핵심으로 볼 수 있다.

### 1) 전기방사 나노섬유의 개요

전기 방사는 전기장을 이용하여 액체 상태의 고분자 용액을  $\mu\text{m}\sim\text{nm}$ 의 직경을 가지는 연속상의 섬유로 구현하는 방법으로 기존의 자기조립(Self Assembly), 상분리(Phase Separation), 주형 합성

(Template Synthesis) 등의 방식에 비해 장치의 구성이 간단하고 재료의 선택에 큰 제약이 없는 방식이다. 또한 높은 비표면적과 공극률, 공극 크기 및 구조 그리고 크기 제어가 용이한 장점 때문에 상용화 측면에서 많이 활용되는 기술 중 하나이다.

그림 1 전기방사 공정 개요도와 실제 방사 장면



1990년대 초에 봉납에 전기를 통하게 되면 고체 섬유가 분출되는 것에 대한 연구가 논의되면서, 많은 종류의 유기 폴리머가 나노섬유로 전기방사될 수 있음을 보여주었다. 그 이후로 본격적인 전기방사를 이용한 나노섬유에 관한 다양한 연구들이 크게 증가되어지고 있으며, 특히 최근 초미세먼지와 코로나19 바이러스 확산에 따른 필터용 나노섬유 소재가 부각되면서 공기청정기 시장이 크게 성장하고 동시에 필터 제조기술 수요가 크게 증감함에 따라 대량생산이 가능한 전기방사 방식이 각광받기 시작했다.

## 2) 전기방사 방법

전기방사방법의 경우 크게 싱글 노즐 방사(Single Nozzle Spinning), 멀티노즐 방사(Multi-Nozzle Spinning), 3겹 방사판

방사(Three-Plate Spinning), 노즐리스 전기방사 (Nozzle-less electrospinning) 방법 등 크게 네가지 방식으로 나누어진다. 이중 싱글노즐을 사용한 전기방사는 가장 기본적인 형태로 알려져 있으며, 테일러 콘에서 시작된 제트가 집적부에 모이면서 랜덤한 형태의 나노섬유 웹을 형성하는 방법이다. 멀티노즐 방사 방법은 대량생산이 어렵고 생산속도가 느린 싱글 노즐 방사 방식의 한계를 극복하기 위해 발전된 방식이다. 최근 여러 개의 노즐을 사용하여 고분자 용액의 방사량을 증가시키고 노즐 간 상호 작용을 알아보기 위하여 다양한 구조의 노즐 배치가 연구되고 있으며, 특히 대량생산형 전기방사 나노섬유 제조 설비의 원천기술로서 활용되고 있다.



그림 2 싱글 노즐 전기방사 방법을 통한 나노섬유

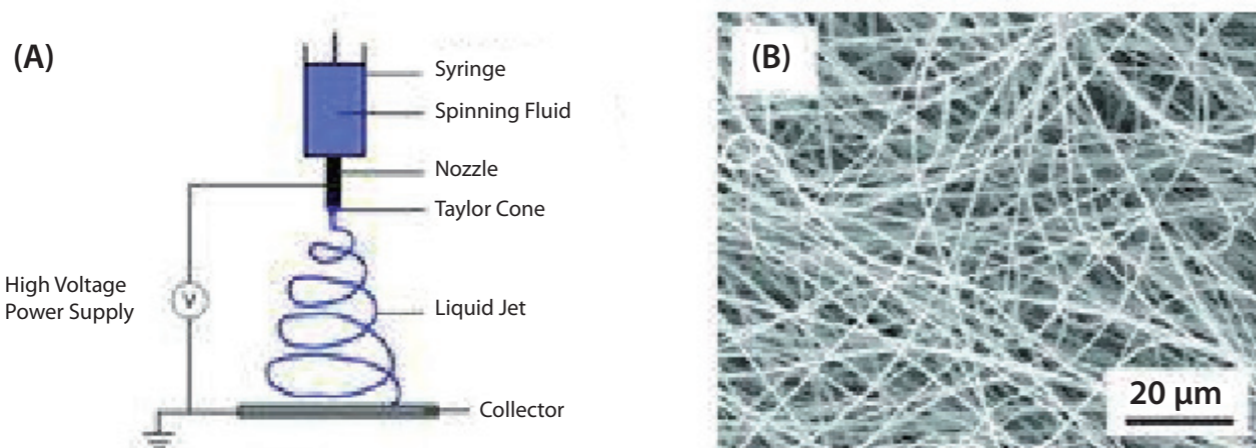
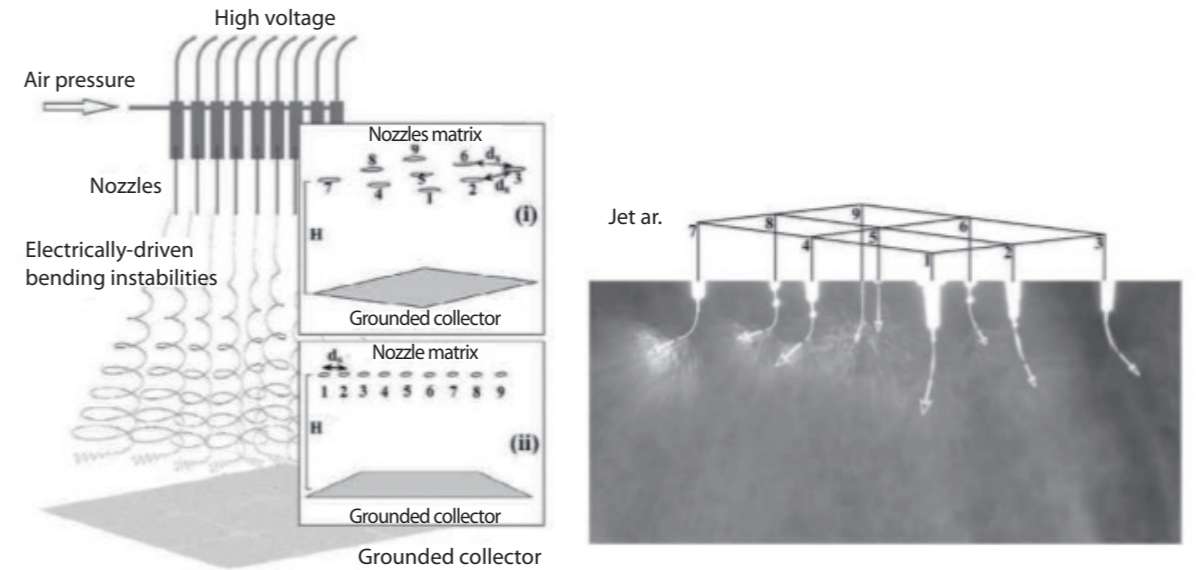


그림 3 멀티노즐 전기방사 방법의 모식도와 제트 분사 사진



2010년 로자노(Lozano)의 연구팀은 높은 회전속도를 가진 3개의 방사판을 활용하여 전기방사 나노섬유를 제조하였으며, 디스크 형태의 3개의 방사판을 이용, 회전 속도를 3,000~5,000 rpm으로 조절함으로써 최대 300 nm의 폴리에틸렌 옥사이드(PEO) 섬유를 얻을 수 있는 3겹 방사판 방사 방법을 제시하였다. 이는 향후 피브리오테크놀로지(FibeRio Technology Corporation)에서 사용하는 Forcespinning® 기술로 이어져 나노섬유의 대량생산 시스템을 갖추는 하나의 방법으로 제시되고 있다.

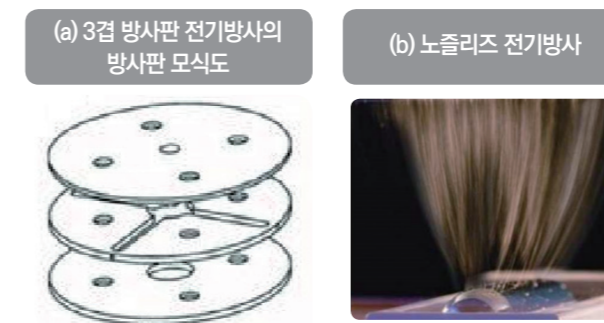
노즐리스 전기방사는 금속이나 유리 등 고분자 용액을 맺히게 하여 방사를 유도하는 노즐을 없애고 메탈 롤러를 용액이 담긴 수조에서 회전시켜 나노섬유를 얻는 방식으로서 Nanospider™으로 알려진 엘마로(Elmaro)사의 산업생산기계의 원천기술로 활용되었으며, 개발된 나노섬유 재료는 에어필터 및 의학용 소재와 상처 치유 소재 등으로 활용되고 있다.

## 3) 전기방사 나노섬유의 활용

전기방사를 통해서 제조된 나노섬유의 일반적인 직경은 10~1,000 nm 수준이며, 섬유 직경이 나노미터 크기로 갈수록 비표면적은 급증해(직경 30 nm 나노섬유의 비표면적은 100 m<sup>2</sup>/g, 직경 60 μm 섬유의 비표면적은 0.05 m<sup>2</sup>/g) 상호작용이 잘 되어 효과적으로 부하가 전달된다. 이와 같이 나노섬유의 기계적 물성은 굵기와 밀접한 관련이 있으므로 적용분야에 따라 탄소나노튜브(Carbon Nanotube, CNT), 몬모릴로나이트(Montmorillonite), 셀룰로오스 나노결정(Cellulose Nanocrystal), 페리틴(Ferritin) 나노입자 등의 다양한 첨가제를 활용하여 산업에 적용되고 있다.

우선 환경 분야에서의 활용을 살펴보면, 길고 고다공성인 나노섬유의 특성상 수처리와 복원 분야의 여과물질로서 활용되어지고 있다. 흡착제나 촉매로 활용할 수 있는 나노섬유는 액상이나 기체상 조건에서 마이크로 크기 미만의 오염물질을 제거하는데 효과적일 수 있으며, 주로 유기오염물질 제거를 위한 하이브리드 MnO<sub>2</sub> 코팅 셀룰로오스 나노섬유, 중금속 제거를 위한 고다공성 4차 암모늄 기능화된 셀룰로오스 섬유 기반의 에어로겔(Aerogel)이 활용되고 있다. 또한 나노 Fe가 함유된 폴리아닐린(Polyaniline, PANI) 복합 나노섬유, 산화 유기화합물 제거를 위한 폴리벤지미다졸(Polybenzimidazole, PBI) 나노섬유, 정삼투압막 지지층으로서의 소수성 PET와 친수성 PVA를 함유한 상호 침투 구조의 나노섬유(HH-PIN-CNF), 전도성 한외여과막으로서의 단일벽탄소나노튜브(Single-Walled Carbon Nanotube, SWCNT)/PANI 복합 나노섬유

그림 4 3겹 방사판 전기방사와 노즐리스 전기방사



등도 환경분야에서 활용되고 있다. 그리고 나노섬유의 우수한 구조적 특성으로 인해 가스성의 물질 확산이나 물질 전달이 용이하다.

또한 실시간으로 산화/환원력을 가진 다양한 가스를 감지하는 데 탁월하기 때문에 나노섬유의 감지 능력과 기능을 더욱 향상시키기 위해서 형태적으로 활성 표면 영역을 증가시키거나 금속 나노입자(e.g., Au, Ag, Pd 등 촉매원소)를 적용하여 산화 반도체 나노섬유를 만들기도 한다. 게다가 전기방사로 만들어진 다공성의 중공 SnO<sub>2</sub> 나노섬유나 p-type Cr<sub>2</sub>O/Cr<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 산화 반도체 나노섬유의 경우 에탄올에 대한 민감도와 감지 속도에 반응을 보이며, 졸겔(SolGel) 전기방사를 통해 만들어진 금 도핑된 SnO<sub>2</sub> 나노섬유의 경우 일산화탄소에 대한 민감도와 감지 속도를 향상시킬 수 있다. 다공성 GaN 나노섬유를 통해서 에탄올을 선택적으로 감지할 수 있으며, 키토산/PANI 복합 나노섬유를 통해서 공기 중 알코올과 아민에 대한 높은 민감도와 재현성이 구현 가능하다는 특징을 가지고 있다.

에너지 분야에서는 나노섬유의 큰 비표면적과 다공질 구조가 전해질 저장과 순간적이고 장기적인 전자/이온 전달에 적합함에 따라 재실 밀폐(Chamberconfined) Si/C 복합 소재 나노섬유 합성을 통해서 리튬이온 배터리의 사이클 수명과 쿨롱 효율(Coulombic Efficiency)에 향상 효과가 있다는 연구가 발표되고 있다. 특히 졸겔 전기방사를 통해서 합성된 Si/C/TiO<sub>2</sub> 나노섬유를 리튬이온배터리의 양극(Anode)으로 적용할 경우, 비용량 및 사이클 수명이 증가된다는 연구결과가 있으며, 전기방사를 통해 합성된 다공질로 얇은 ZnMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 나노섬유를 리튬이온 배터리의 전극 소재로 적용할 경우에는 비용량과 속도 특성(Rate Capability)이 향상된다는 결과가 보고되었다. 리튬-황(Li-S) 배터리 응용 분야에도 3차원 구조의 나노섬유를 적용하는데, 전기방사를 통해 만들 수 있는 독립형 다공성 탄소나노섬유와 탄소나노튜브-황 복합 소재(S<sub>2</sub>PCNFs-CNT)를 활용 중에 있으며, 리튬-황 배터리의 음극(Cathode) 소재로 적용할 경우, 배터리의 전기화학적 성능이 향상된다는 보고가 있다.

또한 미래 에너지인 수소분야에서도 활용되는데 나노섬유와 같은 나노구조화 물질인 수소와 활성종의 확산거리를 단축시키고 수소 흡탈착 동안의 반응계면 두께를 감소시켜줌에 따라 저장분야에 활용되어지고 있다. 수소 저장방식에 고다공성 탄소를 도핑된 Li<sub>3</sub>N 나노섬유를 적용할 경우, 탄소 벽에 다양하게 존재하는 마이크로 기공, 메조 기공, 매크로 기공에 의해 활성종과의 반응을 위한 수소 확산이 촉진되면서 수소 저장 용량을 향상된다는 연구결과 역시 보고되고 있다.

의료분야로서 살펴보면 조직공학과 재생의학 분야에서는 나노섬유의 높은 비표면적, 나노섬유상 및 다공성 구조를 활용한 나노섬유 기반의 지지체(Scaffold) 개발에 큰 관심을 가지고 있다. 세포 외 기질(Extracellular Matrix)의 생체와 유사한 나노섬유의 네트워크 특

징상 지지체로서 세포 성장, 확산, 분화에 적합한 역할을 할 수 있도록 도와주는 역할을 수행할 수 있다. 특히 조직공학 분야의 나노섬유 지지체는 생분해성 또는 생체적합성이 우수한 천연/합성 고분자를 바탕으로 하며, 생분해성 재료와 함께 자기조립된 키틴(Chitin) 나노섬유 지지체 위에 섬유아세포(Fibroblast)를 부착하고 일정한 방향으로 배열하면, 매우 얇고 독립적이며(Free-Standing) 규칙적인 세포 시트가 형성되며, 이러한 세포 시트는 유연성을 가지며, 복잡한 조직 구조를 구성할 때 작업성 측면에서 유리하게 되며, 특히 일직선으로 배열된 젤라틴(Gelatin) 나노섬유-다중 벽 CNT 복합 소재는 근아세포(Myoblast), 그중에서도 수축성이 강화된 일직선의 근관세포(Myotubes) 형성에 유리하게 된다.

접착성을 띤 펩티드로 기능화된 PLGA 나노섬유의 경우 심근세포(Cardiomyocyte)의 접착성과 수축성 개선에 효과적으로 활용되어지고 있으며, 혈소판이 풍부한 혈장으로 코팅된 생분해 가능 PCL 나노섬유(PRP-PLC Nanofiber) 지지체의 경우 중간엽줄기세포(Mesenchymal Stem Cell)의 접착성과 확산을 강화할 수 있다. 은 나노입자로 기능화한 키토산 나노섬유는 P. aeruginosa(Gram 음성)와 S. aureus(Gram 양성)에 항균 작용이 뛰어난 것으로 나타났다. 키토산/은 나노입자/PVA 나노섬유 소재는 가장 흔한 감염균인 대장균(E. Coli)에 항균 기능이 뛰어나므로 상처 회복에 효과적인 결과가 획득 가능하다. 이외에도 나노섬유상의 지지체를 활용해 약물을 국소 영역이나 선별적으로 전달하는 기술이 개발되고 있으며, 또한 환경 분야의 감지 기술과 유사하게, TiO<sub>2</sub> 도핑이나 CNT-polymethylmethacrylate(PMMA) 복합재, polycarbonatepolycaprolactone (PC-PCL) core-shell 나노섬유 합성을 통해서 바이오센서를 개발하는 연구도 다양하게 진행되고 있다.

## 4) 전기방사 나노섬유의 시장 동향

### | 시장 규모 및 전망

전기방사 나노섬유는 고속대량생산이 가능하므로 수처리 필터, 바이오센서, 의류용 방수습 직물, 보호복, 인조피부 등에 응용되고 있으며, 향후 나노섬유의 다양한 수요와 연계한 시장 또한 급성장할 것으로 전망되고 있다. 특히 필터의 경우 80% 정도 전기방사법을 활용하므로 Research and Markets가 제시한 전기방사 나노섬유 세계 시장규모의 80%를 고려해 2017년 10.08억 달러에서 꾸준히 성장하여 2025년에는 2017년 대비 약 5.7배 증가한 57.92억 달러가 될 것으로 추산되고 있다. 국내시장 역시 세계 시장 추이를 반영해

기 발표된 2019년 TechNavio 자료를 근거로 추정된 결과 2018년 434.4억 원 수준으로 시장이 활성화되지 않은 상태였지만 2019년 이후 평균 29.94%로 꾸준히 성장하여 2025년에는 3천억 원을 돌파할 것으로 전망하고 있다.

특히 2020년 코로나19의 영향으로 바이러스 필터 제품과 공기청정기 등 가정용 필터 제품에 대한 나노섬유 제품에 대한 수요가 큰 폭으로 증가하면서 전기방사 나노섬유의 시장도 성장할 것으로 판단된다.

### | 경쟁 현황

나노섬유 산업의 가치사슬을 분류하면 전방산업은 나노섬유를 이용하여 완제품으로 제조하는 완성품 분야, 후방산업은 고순도의 원

료를 공급하는 분야와 나노섬유를 부품 및 제품으로 가공 제조하는 분야로 대별되며, 2~3단계로 계열화한 업체들이 많은 가치사슬을 보유하고 있다.

미국 도널드슨(Donaldson)은 전기방사법을 이용하여 고기능 공기 필터를 개발해 대형 트럭 엔진용 공기 필터 등으로 응용을 확대 중이며, 그 외 미국 나노섬유 제조업체들도 대형 장치를 보유하고 정밀 양산화를 위한 기술 개발을 추진 중에 있다.

일본의 경우 일본 바이린, 히로세제지 및 군제, 테이진, 도레이 등 섬유 제조업체들이 꾸준히 나노섬유 양산화 및 사업화를 위해 연구를 진행하면서 직물과 나노섬유를 융합한 제품, 2차 전지용 분리막, 생체적합성 고분자 등에 적용해 고부가가치 응용제품을 개발하고 있다.

표 1 전기방사 나노섬유(필터) 시장 규모 및 전망

(단위 : 억달러, 억원)

구분	2017년	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	2024년	2025년	CAGR(%)
해외시장	10.08	12.48	15.6	19.36	24.16	30	37.36	46.48	57.92	24.4
국내시장	434.4	525.6	682.4	886.4	1152	1496	1947.2	2528.8	3285.6	29.9

출처 : Research and Markets(Nanofiber Market to 2025), Technavio(Global Nanofiber Market 2017, 2019)

표 2 해외 주요 나노섬유 업체

기업명	국가	나노섬유형태	점유율(%)	비고
도널드슨	미국	고분자	24.0	자동차용 필터, 군수에서 민수용으로 변환
쇼와덴코	일본	탄소	13.9	2010년 수지복합재를 위한 다중벽 나노튜브 400톤/년 양산 설비 조업
에스핀테크놀로지	미국	고분자	9.3	나일론, 아크릴, 폴리카보네이트, 폴리실폰, 플루로폴리머로부터 제조
존스멘빌	미국	유리	7.4	가정용 단열
GE에너지	미국	고분자	6.0	화력발전소 필터로 활용

## 5) 분석자 인사이트

나노섬유는 단면 직경이 수십~수백 nm이며, 비표면적이 매우 큰 나노물질의 일종일 뿐만 아니라 다공성의 그물 구조를 형성하기 때문에 기공 간 상호 연결성이 매우 뛰어나고 무기물과 상용성이 우수하다.

특히 나노 크기의 물질 자체가 가지는 독특한 물리화학적 성질 뿐만 아니라, 원료의 종류와 생산방법에 따라서도 그 물성과 활용

범위가 다양하게 세분화될 수 있으며, 생산하는 방식 역시 전기방사법(electrospinning), 자기조립법(selfassembly), 주형 합성법(template-based synthesis), 고분자 합성법(polymerization), 초음파 화학합성(sonochemical synthesis) 이 활용되고 있다.

이중 전기방사법의 경우 집적판의 개선을 통해 여러 다른 조성 및 복잡한 형상을 갖는 구조나 이에 기인한 개선된 특성들을 얻을 수 있으므로 관련된 연구들이 급격히 증가하고 있는 추세이다.

특히 2020년대에 들어 2.5 μm 이하의 지름을 갖는 초미세먼지와 80~100 nm의 크기를 갖는 코로나19 바이러스가 이슈가 되면서 세탁이 가능한 미세먼지 차단용 마스크, 아웃도어 섬유용 기능성 의류 등

다양한 분야로 적용이 확대될 것으로 전망된다.

전기방사 나노섬유의 기술 및 시장 특성을 기반으로 모색할 수 있는 사업화 전략은 <표 3>과 같다.

표 3 전기방사 나노섬유 PEST 분석

정치	경제
<ul style="list-style-type: none"> <li>나노섬유의 연구개발 및 산업화를 위한 정부의 적극적 지원(2016 섬유-의류산업 비전과 발전전략, 제3기 나노기술 종합발전 계획 등)</li> <li>산·학·연·관 상호협력 및 조정기능 중심의 국가차원 지원전략 수립, 추진</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>나노섬유의 수요산업 발전과 연계한 용도 전개로 시장규모의 성장</li> <li>기능성 섬유 분야 수요증과 시장의 확대 전망</li> <li>가격 및 공급능력의 충족과 기술 개발의 완성도에 따라 수요가 창출 되는 시장</li> </ul>
사회문화	기술
<ul style="list-style-type: none"> <li>나노섬유가 응용되는 제품 다양화, 수요 및 보급 활성화</li> <li>국내 고부가가치 소재 분야의 기술 선점을 통한 시장진입 및 차별화된 특화기술 확보 가능</li> <li>IT, BT 등 관련 제품의 시장 형성으로 응용 가능성 확대</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>관련 연구인력 및 기업이 많고 기술력이 높음</li> <li>가격과 기술면에서 상용화를 위한 양산 화시스템 구축이 필요</li> <li>기업의 연구개발 투자욕이 낮아 정부 주도의 연구개발 및 지원이 일부 기업에 편중</li> </ul>

① 나노섬유 대량생산화 기술 적용 품목 명확화

전기방사 공법은 용융이 가능한 다양한 고분자 용액을 재료로 이용할 수 있어 100 μm급 부직포형 나노섬유를 얻는 데 매우 효과적이다. 하지만 일반적으로 노즐 하나에 시간당 0.1 g의 나노섬유 생산이 가능하고, 고전압이 필요해 소요 비용이 많은 단점을 가져 생산속도 대비 비용이 절대 좋은 상황은 아니다. 따라서 사업을 진행하고자 하는 기업에서는 정책적, 산업적 파급효과를 고려한 고부가가치 품목의 선정이 핵심으로 볼 수 있다.

② 방향성을 가지는 나노섬유의 적용 확대

기존 방향성이 없는 부직포 형태의 섬유는 세탁 시 구조가 손쉽게 변형되어 재사용이 어렵지만, 집진판 형식을 다변화하여 방향성을 갖는 나노섬유는 직교 형태로 제작할 때 구조가 견고해 세탁이 가능하다. 따라서 더욱 향상된 필터 성능과 의류용 기능성 섬유도 제작할 수 있고, 의복과 의료용 섬유 등으로 다변화할 수도 있다. 특히 나노섬유를 이용한 옷감은 통기성과 방수기능이 뛰어나 옷감 내부로 오염물질

이 잘 스며들지 않으면서도 수분 배출 능력이 탁월해 현재는 스포츠 용 의복과 방호복 등에 적용되고 있으며, 향후 일반 의류나 운동화 등을 활용한 BT, IT 등을 고려한 융합기술의 확대도 기대되고 있다.

③ 탄소 등 다양한 소재를 활용한 나노섬유 제조 방법론에 적용

탄소섬유는 탄소가 92 % 이상 차지하는 섬유로 용융온도가 약 3,000 도이기 때문에 재료 자체로는 용융방사가 어려우나, 아크릴 등 기존 고분자 섬유를 섬유로 방사하여 열처리한 후 불활성 가스 분위기에서 산소, 수소, 질소 등의 분자를 제거하는 탄화 공정을 통해 제조를 할 수 있다. 이는 탄소 나노섬유 전기방사 공정을 통해 고분자 나노섬유를 추출한 후 안정화 및 탄화 공정을 통해 탄소 이외의 분자를 제거하여 얻을 수 있는 형태로 기존 탄소섬유 제조공정에 전기방사 공정만 변형하면 되는 구조로서 이렇게 제작된 나노섬유는 흑연 구조로 이루어져 있어 전기전도도 및 열전도도가 우수하며, 강도가 높은 장점이 있어 전자 및 에너지 소재에 대한 적용 관련 연구가 진행되고 있다. [ASTI](#)

# ASTI MARKET INSIGHT



**본원** (우)34141 대전광역시 유성구 대학로 245 한국과학기술정보연구원  
T. 042) 869-1004, 1237 F. 042) 869-1091

**분원** (우)02456 서울특별시 동대문구 회기로 66 한국과학기술정보연구원  
T. 02)3299-6114 F. 02)3299-6244

