


이산화탄소 흡착이 가능한 PAN기반 나노 섬유 공기 필터 연구

박해빈¹, 홍정우¹, 문소영¹, 이태준¹, 강동원², 민경택^{1,2} 

¹ 한국공학대학교 반도체공학부

² 한국공학대학교 IT반도체융합공학과

Investigation of PAN-based Nanofiber Air Filters for Effective Carbon Dioxide Adsorption

Haebin Park¹, Jungwoo Hong¹, Soyoung Moon¹, Taejoon Lee¹, Dongwon Kang², and Kyungtaek Min^{1,2}

¹ Department of Semiconductor Engineering, Tech University of Korea, Siheung 15073, Korea

² Department of IT-Semiconductor Convergence Engineering, Tech University of Korea, Siheung 15073, Korea

(Received September 3, 2025; Revised October 2, 2025; Accepted October 2, 2025)

Abstract: The continuous rise of atmospheric carbon dioxide (CO₂) emissions highlights the urgent need for sustainable air purification technologies. Current Direct Air Capture (DAC) filters often rely on toxic amines, which limit long-term stability and safe application. Here, we report a non-toxic PAN-based nanofiber air filter fabricated by electrospinning and urea-assisted carbonization. Structural analyses confirmed the introduction of nitrogen functionalities that enhanced CO₂ affinity, while SEM and FT-IR revealed graphitic carbon formation. In air-chamber tests, the optimized carbonized nanofiber reduced CO₂ concentration from 25,000 ppm to 2,000 ppm, a level generally regarded as acceptable for indoor environments, while simultaneously removing over 95% of PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{0.1} particulates. This dual functionality, combined with facile fabrication and material safety, demonstrates strong potential for PAN-derived carbon nanofiber membranes in DAC systems and eco-friendly air purification devices. These findings suggest a viable pathway toward scalable, sustainable air-filter technologies for carbon-neutral applications.

Keywords: Carbon dioxide adsorption, PAN nanofiber, Electrospinning, Carbonization, Air purification

최근 많은 국가들이 실시하는 탄소중립 정책에도 불구하고, 산업의 발전으로 인한 에너지 수요의 급증으로 인해 미세먼지 및 이산화탄소(CO₂) 배출량이 상승하고 있다. 미세먼지의 경우 흡입 시 인체에 직접 침투하여 호흡기뿐만 아니라 중추신경계, 뇌 등을 손상시킬 수 있으며, 이산화탄소 배출량의 급격한 증가는 지구의 기후와 환경에 악영

향을 주어 농도 관리가 필요하다. 특히 이산화탄소의 경우 모든 국가가 탄소배출 감소에 적극 동참하는 것이 아닌 현 상황 속에서 탄소 배출량을 감축하는 것보다는 배출된 이산화탄소를 다시 감소시키는 대응 기술의 필요성이 부각되고 있다.

이러한 기술적 대응의 일례로서, 공기의 직접적인 필터링을 통하여 이산화탄소를 흡착하는 기존 DAC(direct air capture) 시스템에는 주로 아민계 물질이 사용된다. 아민계 기반 물질은 고온 및 산소를 포함한 환경에서 열분해 및 산화 분해되는 등 화학적 안정성에 문제가 있고 이로 인해 설

✉ Kyungtaek Min; k.min@tukorea.ac.kr

Copyright ©2026 KIEEME. All rights reserved.
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.

비 부식 등을 초래할 수 있다 [1,2]. 또한 아민 기반 CO₂ 포집 공정은 에너지 소비량이 크고, 독성 물질 아질산아민(Nitrosamines)과 니트라민(Nitramines) 등을 발생시켜 환경과 인체에 유해한 영향을 줄 수 있다 [3-5].

본 연구에서는 이산화탄소 흡착이 가능한 공기 필터 소재로서 Polyacrylonitrile (PAN) 전기방사 나노 섬유 멤브레인 기반의 무독성 필터를 구현하고자 하였다 [그림 1(a)]. 필터의 구현을 위하여 인체에 무해한 PAN 고분자를 전기방사하여 [그림 1(b)] 미세 먼지 정화에 유리한 다공성 구조인 나노 섬유 멤브레인 형태로 가공하였다. 또한 PAN 나노 섬유를 탄화하여, 질소작용기가 형성된 탄화 나노 섬유로 제작함으로써, 나노 섬유의 CO₂ 흡착 성능을 향상시켰다. 제작된 나노 섬유 멤브레인의 성능을 분석하기 위하여, 제작된 나노 섬유 멤브레인 필터들을 순환형 밀폐 챔버에 장착 후 반복 실험하여 다양한 공정 조건에서 탄화된 PAN 나노 섬유들의 CO₂ 흡착 및 미세 먼지 필터링 성능을 비교하였다.

나노 섬유 제조 시 지지체로 이용한 PAN은 고분자 물질로서 인체에 무해하고 섬유 소재로서의 가공이 용이하며, 질소를 함유하여 CO₂ 흡착 성능 향상을 위한 질소작용기 형성에 유리하다 [6]. 전기방사 공정을 통해 제작된 나노 섬유 멤브레인은 높은 비표면적을 가진 다공성 구조이므로 CO₂ 흡착에 유리하며 공기 투과성이 뛰어나 미세 먼지 필터로 활용하기에 적절하다 [7]. 또한 탄소 나노 섬유 기반의 흡착 소재의 경우 CO₂ 탈착이 비교적 간단하고 재사용이 용이하며, 10회 이상의 흡착-탈착 실험 후에도 처음과 거의 동일한 성능을 가진다는 연구결과가 보고된 바 있다 [8,9].

전기 방사 공정을 위하여 다음과 같이 고분자 용액을 준

비하였다. PAN (Mn ~30,000, Sigma-Aldrich, USA)과 Urea (99.0%, SAMCHUN CHEMICALS, Korea)의 용매로는 Dimethylformamide (DMF) (99.5%, DAE-JUNG, Korea)를 사용하였다. PAN과 Urea를 각각 용매에 용해시킨 뒤 두 용액을 혼합하여 고분자 용액을 준비하였다. 구체적으로는 PAN과 DMF를 0.9:9.1 질량비로 혼합하고(이하 PAN 용액), Urea와 DMF를 1:9 질량비로 혼합하여(이하 Urea 용액) 각각 25°C 조건에서 12시간 동안 교반을 진행하였다. 완전히 용해된 PAN 용액과 Urea 용액을 4:1 질량비로 혼합한 뒤, 25°C 조건에서 30분간 교반하여 전기방사를 위한 고분자 용액을 완성하였다.

준비된 고분자 용액을 바늘 직경 23 G의 Syringe에 넣고 전기 방사를 진행하였다. 노즐과 collector 사이의 거리는 10 cm, 용액 유량은 0.8 mL/h, 인가전압은 11.5 kV로 설정하였다. 용매의 증발 및 안정적인 나노 섬유 형성을 위하여 온도는 22-25°C, 습도는 30% 미만으로 유지하였다. 나노 섬유 멤브레인 자체의 두께가 수십 μm 내외로 매우 얇기 때문에, 가공 및 활용의 용이성을 위하여 모기장 등에 활용되는 철망을 collector 위에 부착하고 그 위로 나노 섬유가 수집되도록 하여 내구도 및 활용성을 보완하였다.

전기 방사 공정 시간 및 고분자 용액의 총 토출량을 조절하여, 다양한 공정 조건에서 전기방사 나노 섬유 샘플을 제작하여 그 두께와 투명도를 측정하였다. 그림 2(a)와 같이 나노 섬유 멤브레인의 두께는 방사 시간에 비례하여 증가하며, 분당 약 0.1 μm의 나노 섬유 멤브레인이 형성되었음을 확인하였다. 또한 제작된 나노 섬유 멤브레인의 두께에 따라 멤브레인의 투명도를 조절할 수 있다. 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이, 10분, 20분, 그리고 30분의 전기방사를 통해 제작된 나노 섬유 멤브레인의 가시광선 대역에서의 광

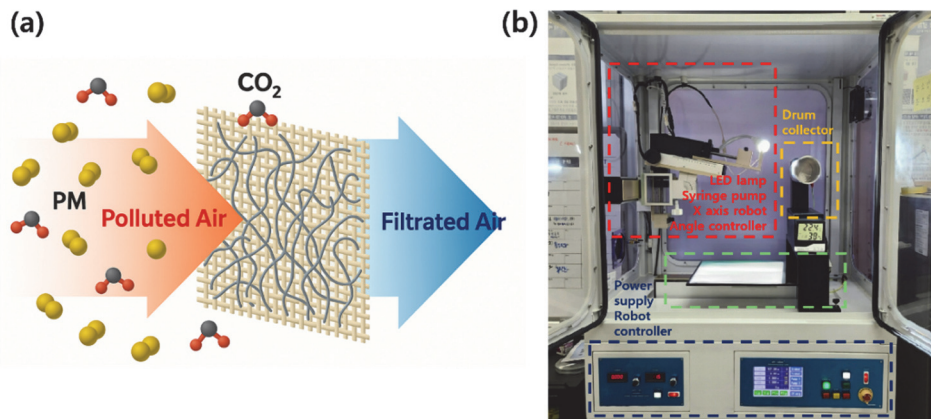


Fig. 1. (a) Schematic of an air filter for CO₂ capture and PM (particulate matter) removal and (b) electrospinning equipment (Electrospray Machine 3, NanoNC, Korea).

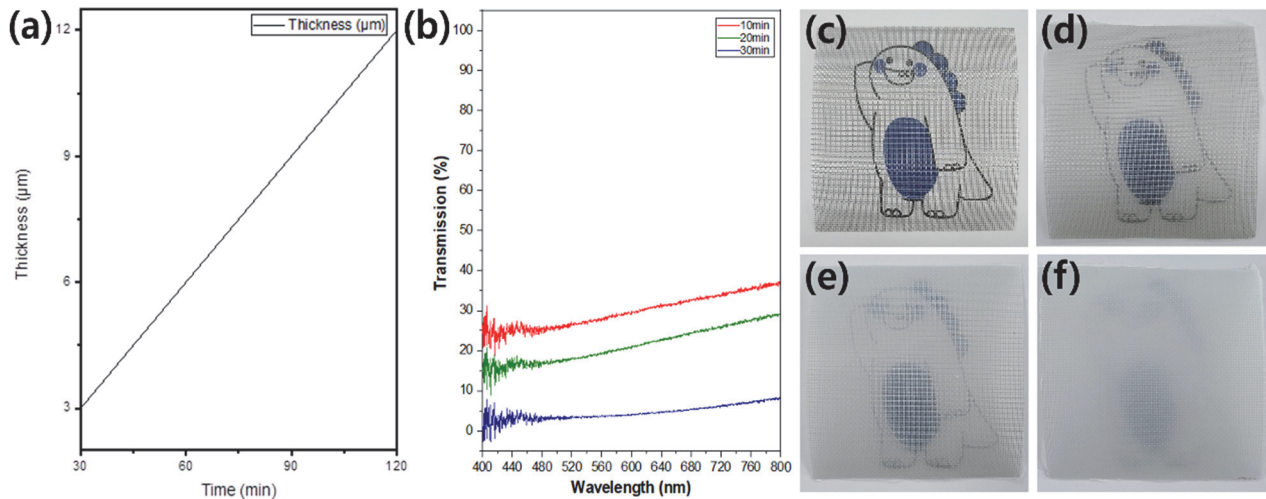


Fig. 2. (a) Filter thickness vs. electrospinning time. (b) Transmission spectra vs. electrospinning time of nanofiber membranes. Photographed images of nanofiber membranes fabricated by (c) 0-min, (d) 10-min, (e) 20-min and (f) 30-min electrospinning processes.

학적 투과도를 분석한 결과, 500 nm 파장 대역에서 각각 30%, 20%, 그리고 5%의 투과율이 나타났다. 그림 2(c-f)의 이미지에서도 나타나듯이, 나노 섬유 멤브레인의 투과도는 방사 시간에 따라 조절 가능하며, 30분 이내의 방사가 이루어진 나노섬유 멤브레인 샘플들에서는 멤브레인 뒤에 놓은 마스크트 그림을 식별할 수 있는 수준의 투과도를 볼 수 있다. 이후의 탄화 및 공기 정화 실험에서는 30분간 전기 방사된 나노 섬유 멤브레인이 활용되었다.

이어서, 탄화 나노섬유의 제작을 위하여 방사된 나노섬유 멤브레인을 퍼니스(Muffle Furnace SH-FU-5MG, SH SCIENTIFIC, (주)삼흥에너지, Korea)에서 고온으로 처리하여 안정화 및 탄화하였다. PAN 나노 섬유를 탄화할 경우, 섬유 직경이 감소하여 비표면적이 상승하고 고정 탄소의 비율이 증가한다. 또한 PAN 내 $C \equiv N$ 삼중결합이 재배열되며 이중결합 사다리꼴로 변화하여 섬유의 열적 내구도를 증가시킨다 [6]. 이때 형성되는 고리 형태의 질소작용기 pyridine은 CO_2 와 친화적인 성질을 가져 화학적 흡착을 가능하게 한다 [2]. 질소작용기를 증가시키기 위한 방법으로는 NH_3 분위기에서의 열처리 방법이 주로 사용되는데, 해당 방법은 공정이 비교적 복잡하고 무엇보다 독성 가스가 사용되므로, 본 연구에서는 나노 섬유 제작을 위한 준비 단계에서 고분자 용액에 Urea를 첨가한 뒤 열처리하는 방법을 채택하였다. 이미 보고된 기존의 연구 결과 [10]에서는 $800^\circ C$ 부근에서 열처리를 진행하여 탄화 나노 섬유를 제조하였으나, 본 연구에서는 나노 섬유 공기 필터의 통기성을 고려하여 상술한 얇은 두께로 멤브레인을 제작할 필요가 있다. 수십 μm 내외의 얇은 두께로 구현된 나노 섬유

멤브레인에서는 기존 연구와 유사한 고온에서 탄화 공정을 진행하였을 때 고분자 수축에 의한 파열 및 나노 섬유의 소실이 관찰되었으며 [10], 다양한 온도에서의 반복 실험을 통해 섬유의 변형 및 파손이 일어나지 않는 최적 조건을 찾고자 하였다.

나노 섬유를 탄화시키기 위하여 최적화된 열처리 공정 과정은 다음과 같다. 우선 $200^\circ C$ 조건에서 나노 섬유의 안정화를 진행하였다. 상온에서 $200^\circ C$ 까지 약 4시간에 걸쳐 서서히 온도를 상승시켰으며, $200^\circ C$ 도달 이후에는 60분간 온도를 유지하였다. 이후 승온 조건을 분당 $2^\circ C$ 설정하여 탄화를 위한 최고 온도까지 상승하도록 하였다. 탄화 온도 도달 후 일정 시간을 유지한 뒤, 가열을 멈추고 퍼니스 내부에서 상온까지 자연 냉각되도록 하였다. 탄화 조건별로 달라지는 나노섬유 멤브레인의 CO_2 흡착 성능을 비교하기 위하여, 탄화 온도($250^\circ C$, $300^\circ C$), 탄화 온도에서의 유지 시간(60분, 90분)을 변수로 설정하여 다양한 환경에서 나노섬유의 탄화를 진행하였다.

탄화 공정 진행 후, 섬유의 특성을 분석하였다. 그림 3(a)는 $300^\circ C$ 의 조건에서 90분 유지를 통해 탄화된 나노섬유 멤브레인의 탄화 전(위)과 후(아래)를 나타내는 사진 이미지이며, 육안상으로 확인하였을 때 탄화 섬유는 탄화 전 섬유에 비해 짙은 갈색으로 나타난다. 그림 3(b)의 SEM 이미지에서 볼 수 있듯이, 탄화가 진행된 이후의 나노 섬유(아래)는 탄화 전 나노 섬유(위)보다 직경이 200-400 nm에서 150-250 nm로 감소하였으며, 섬유 상의 굴곡이 형성된 것이 관측되었다. 또한 탄화가 정상적으로 이루어졌는지 여부를 물성의 측면에서 판단하기 위하여 FT-IR(Fourier

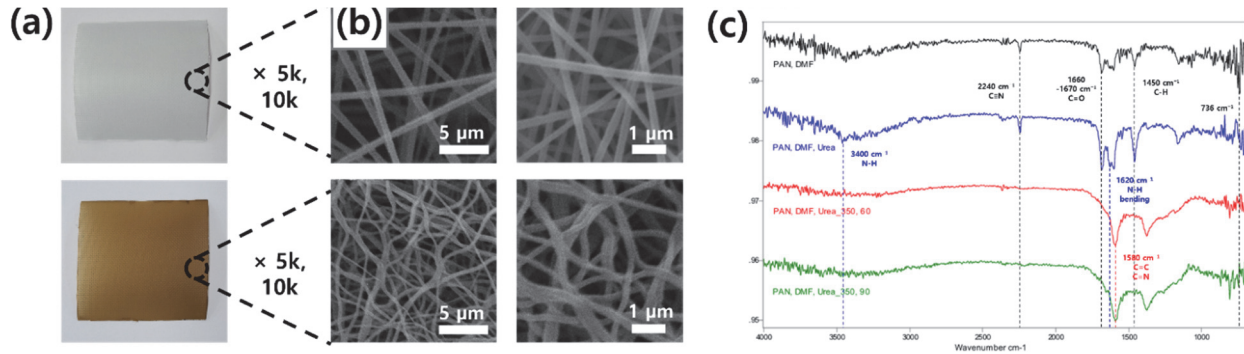


Fig. 3. (a) Photographed images of nanofiber membranes before (top) and after (bottom), (b) SEM images of the nanofibers before and after carbonization (5,000× and 10,000× magnification), and (c) FT-IR analysis results of the nanofibers before and after carbonization.

transform infrared spectroscopy) 분석을 수행하였다. 그림 3(c)와 같이 PAN, DMF, Urea 기반 나노 섬유 및 탄화 섬유에 대해 분석을 수행하였으며, 각 시료별 주요 피크 변화를 통해 화학적 작용기의 변화를 확인할 수 있었다.

구체적으로, PAN과 DMF만을 포함한 나노 섬유의 FT-IR 스펙트럼에서는 2,240 cm^{-1} 부근의 뚜렷한 $\text{C}\equiv\text{N}$ 진동 피크가 관찰되었으며, 이는 PAN에 포함된 대표적인 작용기인 니트릴기로 볼 수 있다 [11]. 또한 1,660-1,670 cm^{-1} 영역에서는 DMF의 $\text{C}=\text{O}$ stretching이 관찰되었고 1,450 cm^{-1} 부근에서는 $\text{C}-\text{H}$ bending 진동이 관찰되어 이미 기존의 연구에서 보고된바 있는 PAN과 DMF의 물성을 확인할 수 있었다 [12]. PAN, DMF, Urea 혼합 시료에서는 3,400 cm^{-1} 영역의 $\text{N}-\text{H}$ stretching, 1,620 cm^{-1} 부근의 $\text{N}-\text{H}$ bending 등 Urea의 특성을 나타내는 피크가 추가적으로 관찰되었다 [13-15]. 특히 PAN + DMF 섬유에서 나타나던 736 cm^{-1} 부근의 진동은 Urea 첨가 시 약화 또는 소멸되는 경향을 보였는데 이는 Urea의 수소결합 네트워크가 PAN과 DMF의 상호작용을 변화시켜 분자 구조가 재배열된 결과로 해석된다 [16].

한편, PAN + DMF + Urea 섬유를 300°C에서 60분간 열처리한 시료의 경우, $\text{C}\equiv\text{N}$ 피크(2,240 cm^{-1})가 뚜렷하게 감소하였으며, $\text{C}=\text{C}$ 및 $\text{C}=\text{N}$ 이중결합을 나타내는 1,580 cm^{-1} 부근에 진동 피크가 새롭게 발견되었다 [17-19]. 또한, 300°C에서 90분간 열처리한 시료에서는 $\text{C}\equiv\text{N}$ 피크가 거의 완전히 소멸되고, 더욱 강화된 1,580 cm^{-1} 부근의 피크가 관찰되어 graphitic carbon structure의 특성이 더욱 뚜렷하게 나타났다 [20,21]. 이는 열처리가 진행됨에 따라 PAN 사슬 내 Nitrile 작용기가 분해되어 고리 형태의 탄소 골격으로 전환되는 cyclization 과정으로 추정할 수 있다. 동시에 $\text{O}-\text{H}$ 및 $\text{N}-\text{H}$ 관련 피크는 약화되어, 잔여 수소결합 작용기가 제거되고 나노 섬유가 정상적으로 탄화되

었음을 알 수 있다 [22].

제작된 탄화 나노 섬유의 CO_2 최대 흡착 성능 및 미세먼지 필터링 성능을 검증하기 위하여 그림 4(a)와 같은 형태의 공기 순환형 밀폐 아크릴 챔버를 제작하였다. 내부에 CO_2 농도 측정 센서(0-50,000 ppm, SEN0220, DFRobot, China)를 설치하고, 가스 카트리지를 이용해 챔버 내부 CO_2 농도를 25,000 ppm으로 맞춘 뒤 순환용 Fan을 작동시켰다. 이후 센서와 연결된 Arduino UNO보드를 통해 CO_2 농도 값을 3초 간격으로 수신하였다. 실험에서 CO_2 가스 포집 성능은 초고농도(25,000 ppm)에서 실내 수준의 농도(2,000 ppm 이하, 비혼잡시간대 대중교통 내부 국토교통부 권고 기준 농도)까지 하락하는 데 소요되는 시간을 기준으로 판단하였다 [23]. 다양한 공정 조건에서 탄화한 섬유의 CO_2 가스 포집 성능을 비교 분석한 결과를 표 1에서 볼 수 있다. 탄화 나노 섬유는 탄화되지 않은 섬유에 비해 우수한 CO_2 포집 성능을 보였으며, 300°C에서 90분간 탄화한 나노 섬유가 가장 우수한 가스 포집 성능을 나타냈다.

나노섬유 멤브레인을 이용한 미세먼지 정확 실험의 경우 일정한 길이로 자른 향을 챔버 내부에서 연소시켜 다양한 크기의 분진을 발생시킨 뒤, 나노섬유 멤브레인이 설치된 동일한 밀폐 챔버 내에서 공기를 순환시키는 방법으로 수행하였다. 탄화 여부에 관계없이 모든 종류의 섬유가 다공성 구조를 유지하고 있었으므로 우수한 미세먼지 성능을 나타내며, PM1.0, PM2.5, PM10 등 다양한 크기의 미세먼지가 나노섬유 멤브레인 필터를 통해 효과적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 전기 방사 공정을 이용하여 PAN 탄화 나노 섬유 기반으로 이산화탄소 흡착이 가능한 공기 필터를 제작하였다. 다공성 구조를 가진 PAN 나노 섬유 멤브레인은 CO_2 가스 포집과 미세먼지 제거에 유효한 성능을 보였

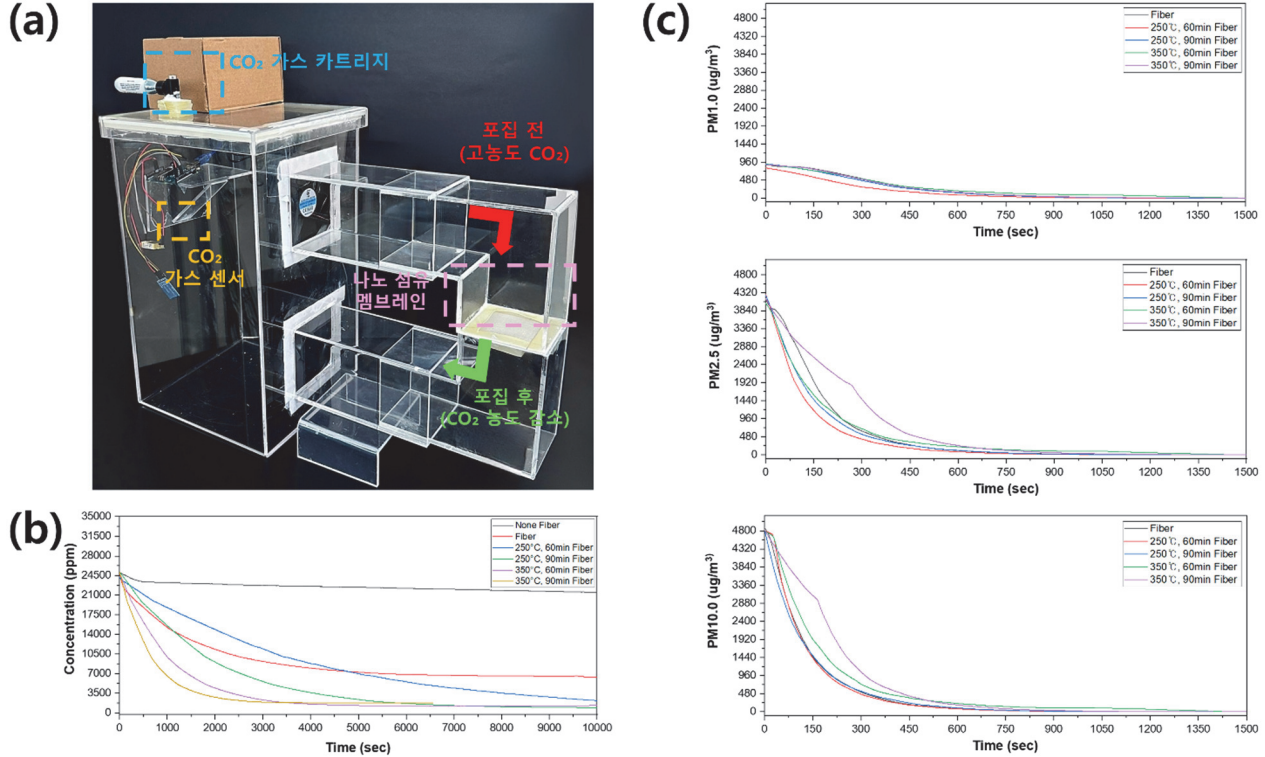


Fig. 4. (a) Sealed chamber for air-purification experiments, (b) CO₂ concentration vs. time, and (c) PM concentration (PM 0.1, PM 2.5, PM 10) vs. time.

Table 1. Dependence of CO₂ capture and PM removal on nanofiber fabrication conditions.

Carbonization temperature (°C)	Carbonization time (min)	Time to reach 2,000 ppm from 25,000 ppm (sec)	Final CO ₂ concentration (ppm)
Non-carbonized fiber		-	6414
250	60	7740	2000
	90	5400	1768
300	60	3255	950
	90	2790	1323

으며, 탄화 시에는 비표면적 증가와 화학적 변화를 거치며 CO₂ 가스 흡착 성능이 더욱 향상되었다. 또한 탄화 온도와 시간에 따라 CO₂ 가스 포집 속도 및 효율을 유의미하게 조절할 수 있음을 실험적으로 확인하였으며, 탄화 조건에 따라 CO₂ 가스 흡착 성능을 최적화할 수 있을 것으로 판단된다. 현재의 early stage research 단계에서는 탄화 나노섬유의 가능성 및 유효성에 대한 연구가 주로 수행되어, 다양한 환경에서의 정량 지표 및 상용화 가능성에 대한 분석이 다소 미흡하므로 추가 실험을 통해 본 연구의 재현성을

보완하고 상용 제품 및 타연구 결과와의 비교 우위를 확보할 필요가 있다. 뿐만 아니라, EU의 유럽 그린딜과 유럽기후법 발표, 일본의 탈탄소화, ESS 도입 확대 등 2050 Net-Zero 실현을 위한 탄소 규제 정책이 세계 각국에서 추진되고 있으며, 대한민국에서도 최근 이산화탄소 포집·수송·저장 및 활용에 관한 법률이 본격 시행되었다. 이러한 환경 및 정책적 측면에서, 본 연구는 공기 필터가 탄소배출량 감축에 기여할 수 있도록 성능을 확장하고 그 제조 공정을 확립하여 공장 매연 배출구에 적용하거나, 산업/가정용 공기

청정기 필터 규격으로 제작하는 등 친환경 탄소 중립 기술 및 실내 공기 정화 기술에 활용될 것으로 기대한다.

ORCID

Kyungtaek Min

<https://orcid.org/0000-0001-7626-043X>

감사의 글

본 연구는 대한민국 산업통상자원부와 한국에너지기술평가원의 지원(RS2022-KP002716, 중견기업 업종별 에너지 효율화기반 탄소자원화 특화 인력 양성) 및 대한민국 교육부와 한국산업기술진흥원의 지원(P0028098, 반도체특성화대학재정지원)을 받아 수행되었음.

REFERENCES

- [1] Q. Liu, T. Luo, Y. Yin, Y. Ouyang, M. Xiao, H. Gao, T. Sema, and Z. Liang, *Chem. Eng. Sci.*, **299**, 120458 (2024).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120458>
- [2] S. H. Hwang, H. S. Park, D. W. Kim, and Y. M. Jo, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **31**, 538 (2015).
doi: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.6.538>
- [3] E. Gjernes, L. I. Helgesen, and Y. Maree, *Energy Procedia*, **37**, 735 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.162>
- [4] C. J. Nielsen, H. Herrmann, and C. Weller, *Chem. Soc. Rev.*, **41**, 6684 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1039/C2CS35059A>
- [5] A. C. Rohr, J. D. McDonald, D. Kracko, M. Doyle-Eisele, S. L. Shaw, and E. M. Knipping, *Energy Procedia*, **37**, 759 (2013).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.165>
- [6] S. H. Hwang, D. W. Kim, D. W. Jung, and Y. M. Jo, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **32**, 176 (2016).
doi: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.2.176>
- [7] C. Lyu, P. Zhao, J. Xie, S. Dong, J. Liu, C. Rao, and J. Fu, *Nanomaterials*, **11**, 1501 (2021).
doi: <https://doi.org/10.3390/nano11061501>
- [8] D. W. Kim, D. W. Jung, and Y. M. Jo, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **33**, 1 (2017).
doi: <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.1.001>
- [9] Y. C. Chiang, C. C. Huang, and W. T. Chin, *Appl. Sci.*, **11**, 7724 (2021).
doi: <https://doi.org/10.3390/app11167724>
- [10] D. W. Kim, D. W. Jung, A. A. Adelodun, and Y. M. Jo, *J. Appl. Polym. Sci.*, **134**, 45534 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1002/app.45534>
- [11] Q. Y. Wu, X. N. Chen, L. S. Wan, and Z. K. Xu, *J. Phys. Chem. B*, **116**, 8321 (2012).
doi: <https://doi.org/10.1021/jp304167f>
- [12] S. Cetiner, H. Karakaş, R. Ciobanu, M. Olariu, N. U. Kaya, C. Ünsal, F. Kalaoglu, and A. S. Saraç, *Synth. Met.*, **160**, 1189 (2010).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2010.03.007>
- [13] P. S. Sampaio and C. R. C. Calado, *Antibiotics*, **9**, 897 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3390/antibiotics9120897>
- [14] V. Prakash, D. Sachdeva, M. Kumar, and R. Bala, *Asian J. Pharm.*, **15**, 357 (2021).
doi: <https://doi.org/10.22377/ajp.v15i3.4151>
- [15] M. Rudmin, E. Abdullayev, A. Ruban, A. Buyakov, and B. Soktoev, *Minerals*, **9**, 507 (2019).
doi: <https://doi.org/10.3390/min9090507>
- [16] S. A. Markarian, L. S. Gabrielyan, and K. R. Grigoryan, *J. Solut. Chem.*, **33**, 1005 (2004).
doi: <https://doi.org/10.1023/B:JOSL.0000048050.47474.fc>
- [17] F. Huang, Y. Xu, S. Liao, D. Yang, Y. L. Hsieh, and Q. Wei, *Materials*, **6**, 969 (2013).
doi: <https://doi.org/10.3390/ma6030969>
- [18] L. Sabantina, M. Á. Rodríguez-Cano, M. Klöcker, F. J. García-Mateos, J. J. Ternero-Hidalgo, A. Mamun, F. Beermann, M. Schwakenberg, A. L. Voigt, J. Rodríguez-Mirasol, T. Cordero and A. Ehrmann, *Polymers*, **10**, 735 (2018).
doi: <https://doi.org/10.3390/polym10070735>
- [19] Y. V. Fedoseeva, E. V. Lobiak, E. V. Shlyakhova, K. A. Kovalenko, V. R. Kuznetsova, A. A. Vorfolomeeva, M. A. Grebenkina, A. D. Nishchakova, A. A. Makarova, L. G. Bulusheva, and A. V. Okotrub, *Nanomaterials*, **10**, 2163 (2020).
doi: <https://doi.org/10.3390/nano10112163>
- [20] W. J. Youe, S. M. Lee, S. S. Lee, and Y. S. Kim, *J. Korean Wood Sci. Technol.*, **44**, 406 (2016).
doi: <https://doi.org/10.5658/WOOD.2016.44.3.406>
- [21] A. Al-Adhrai, M. Al-Saeedy, M. Farooqui, and U. Al-Timari, *Rasayan J. Chem.*, **14**, 2728 (2021).
doi: <https://doi.org/10.31788/RJC.2021.1446570>
- [22] B. Athokpam, S. G. Ramesh, and R. H. McKenzie, *Chem. Phys.*, **488**, 43 (2017).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2017.03.006>
- [23] H. H. Kim, *J. Environ. Health Sci.*, **48**, 44 (2022).
doi: <https://doi.org/10.5668/JEHS.2022.48.1.44>