

## 미세입자, 휘발성유기화합물 차단을 위한 전기방사 창문 필터

김순호\* · 한상일\*\*†

\*창원대학교 산학협력단 기술경영센터

\*\*창원대학교 스마트그린공학부 화학공학과

51140 경상남도 창원시 의창구 창원대학교로 20

(2023년 6월 16일 접수, 2023년 7월 14일 수정본 접수, 2023년 7월 20일 채택)

## Development of Window Filters Using an Electrospinning Technique to Block Particulate Matter and Volatile Organic Compound

Soon-Ho Kim\* and Sang-Il Han\*\*†

\*Industry-University Cooperation Foundation

\*\*Department of Chemical Engineering, Changwon National University,

20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140, Korea

(Received 16 June 2023; Received in revised form 14 July 2023; accepted 20 July 2023)

### 요 약

산업이 발달함에 따라 미세먼지는 환경, 건강, 생활 등 다양한 분야에서 문제를 일으키고 있으며, 특히 대기오염에 의해 발생하는 미세먼지는 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 따라서 본 연구에서는 전기방사 기술을 적용하여 실리콘 지지체에 셀룰로오스아세테이트 고분자 섬유를 방사하여 미세입자를 차단하고, 활성탄 입자를 첨가하여 휘발성유기화합물을 제거하고자 하였다. 활성탄 비율과 전기방사 시간을 달리하여 활성탄 비율, 필터 두께에 따른 미세먼지 차단 효과, 톨루엔 흡착 성능을 분석하였다. 그 결과 전기방사시간이 증가함에 따라 1~3  $\mu\text{m}$  크기의 입자가 효과적으로 차단되었으며, 활성탄의 양이 0%에서 5%로 증가함에 따라 톨루엔 흡착량이 증가하는 것으로 나타났다. 전기방사 시간이 길어질 경우 필터 두께 증가로 인해 빛 투과가 현저히 떨어졌으며, 20~30분 전기방사한 필터의 경우 빛이 투과하여 창문 필터 적용 가능성을 보여주었다.

**Abstract** – With the development of industry, fine dust is causing difficulties in various fields such as environment, health, and life, and a large amount of pollutants generated from human social activities are emerging as a serious environmental problem due to air pollution. Therefore, in this study, activated carbon was added to remove fine dust and volatile organic compounds by spinning cellulose acetate polymer fibers on a silicon support using the electrospinning method. By varying the activated carbon ratio and electrospinning time, the fine dust blocking effect and toluene adsorption performance were confirmed according to the activated carbon ratio and filter thickness. As a result, it was shown that the particles were effectively blocked with the increase in the electrospinning time due to the filter thickness increase. Adsorbed amount of toluene was increased with increase in activated carbon amount. Light transmittance was decrease with increase in electrospinning time, showing that there were light transmittance in filters electrospun for 20~30 minutes.

Key words: Particulate matter, Air quality, Electrospinning, Silicone support, Activated carbon

### 1. 서 론

산업활동이 활발해짐에 따라 전력생산과 운송 증가로 인해, 화석 연료 사용이 늘어나고, 이는 대기 중으로 배출되는 미세먼지 증가를

초래한다[1]. 최근 미세먼지에 대한 국민들의 불안이 증가하면서 미세먼지가 중요한 사회적 이슈로 부각되고 있으며, 2013년 세계보건기구(WHO)는 미세먼지를 1군 발암물질로 지정하여, 미세먼지 저감의 중요성이 주목을 받았다. 대한민국의 경우, 편서풍에 의해 중국으로부터 미세먼지가 유입되고 국내에서 배출된 오염물질이 혼합되어 대기 중 미세먼지의 농도를 증가시킨다. 일반적으로 중국의 영향이 클 경우 황산화물에 의한 미세먼지가 증가하며, 국내 요인이 클 경우 질소 산화물에 의한 미세먼지 농도가 증가한다[2].

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: sangilh@changwon.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.

미세먼지는 유기화합물, 금속 등으로 구성된 대기 중 부유물질이며 산업체 생산시설뿐만 아니라 발전소, 자동차의 배기가스, 도로 주행 과정에서 발생하는 금속, 타이어 가루 등 다양한 원인에 의해서 발생한다. 미세먼지는 크게 두 가지 종류로 구분되며, 직경이  $10\ \mu\text{m}$  이하일 경우 PM10,  $2.5\ \mu\text{m}$  이하일 경우 PM2.5로 분류된다 [3]. 특히, 미세먼지는 호흡기를 통과하여 인체의 폐와 기관지 등에 누적될 경우 혈관, 장기 등에 축적되어 염증을 일으키거나 정상적인 기능을 저해한다. 또한 난분해성 물질 중 하나인 잔류성 유기오염물질(persistent organic pollutants, POPs)이 미세먼지와 결합하여 인체에 침투할 경우 내분비계 교란을 유발할 수 있다[4]. 이러한 이유로 미세먼지를 효과적으로 여과 할 수 있는 필터에 대한 필요성이 급증하였다. 미세먼지의 인체 침투를 최소화하기 위해 개인용 필터 마스크뿐만 아니라, 창문에 필터를 부착하여 공기와 빛은 통과하고 미세입자는 걸러내는 방진창에 대한 연구가 보고되었다 [5]. 미세먼지 제거를 위해, 미세입자를 전기적으로 대전하여 분리하는 정전기 방식, 응집을 통해 무게 차이를 이용하여 분리하는 중력 방식, 기공을 조절하여 입자의 거동을 차단하는 필터방식 등을 사용한다[7]. 하지만 입자크기  $2.5\ \mu\text{m}$ 이하의 경우, 기존 melt-blown 방법으로 제조된 필터로는 여과가 어려워, 폐포를 통해 인체 내부에 침투할 수 있다. 따라서, 초미세먼지 여과를 위해서 필터는 나노섬유로 구성된 미세기공을 가져야 하며, 이는 전기방사 방법을 이용하여 제조될 수 있다. 또한 전기방사방법으로 제조된 필터는 여과효율이 매우 높아 필터두께를 최소화하여 빛 투과도를 높일 수 있는 장점을 가진다[6].

전기방사 필터 제조 과정에서, 고분자용액에 높은 전압이 가해지면 전기적 힘에 의해 용액 출구에서 Taylor cone이 생성되며 집진된 집진판으로 고분자 미세섬유가 방사되어 필터가 제조된다. 전기방사 조건(용액농도, 전압, 유속, 폴리머 소재 등)에 따라 수백 나노미터부터 수십 마이크로미터 직경의 섬유를 생산할 수 있다[8]. 전기방사섬유로 구성된 필터는 비표면적과 다공도(porosity)가 매우 높아 분리, 흡착, 에너지 저장 등 다양한 분야에서 연구되었다. 본 연구에서는 햇빛과 공기는 통과하고 미세입자는 걸러내는 기능을 가지는 방진창을 제조하기 위해 셀룰로스 아세테이트(cellulose acetate, CA)를 실리콘 메쉬 지지체에 전기방사 하였다. 기존 수행된 연구[9]에서는 전기방사 시간은 동일하게 하고, 활성탄 양이 증가함에 따른 미세입자 제거 성능을 평가하였지만, 본 연구에서는 전기방사 시간, 첨가된 활성탄 양을 달리하여 미세입자 제거 성능을 평가하였을 뿐만 아니라 실리콘 지지체 위에 전기방사를 하여 필터 두께를 조절하여 햇빛 투과도를 분석하였다. 또한 활성탄/CA 필터의 휘발성 유기 화합물(VOCs) 흡착 성능을 평가하기 위해 활성탄 농도에 따른 톨루엔 흡착 성능을 평가하였다. 톨루엔은 자동차, 생활용품, 전자제품 등에서 흔히 발견되는 대표적인 생활 속 유해 물질이므로 필터 성능 평가를 위해 선택되었다. 미세입자 여과 성능 평가는 광학 분석 장치(optical particle sizer, OPS)를 이용하여 수행되었으며, 톨루엔 흡착 성능 평가는 톨루엔 흡착 전, 후의 필터 질량 변화를 측정하여 수행되었다.

## 2. 연구 내용, 방법

### 2-1. 용액의 제조

전기방사 실험에 사용할 용액을 제조하기 위해 CA (Cellulose

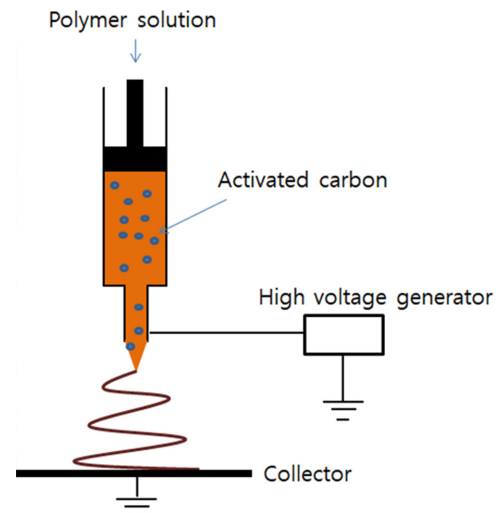


Fig. 1. Schematics of electrospinning process.

Acetate)를 아세톤과 DMAC (N,N-dimethyl acetamide) 2:1 비율 혼합용매에 녹여 4시간 교반하여 15 wt% CA 용액을 준비하였다. 제조된 CA 용액에 활성탄을 서로 다른 비율로 첨가하여 2.5%, 5%의 활성탄 용액을 만들었다. 사용한 시료의 상세 내역은 다음과 같다. Acetone (99.5%, SAMCHUN), DMAC (98.5%, SAMCHUN), CA (average Mn: ~30,000, Sigma Aldrich), 활성탄(DARCO® 100 mesh, Sigma Aldrich).

### 2-2. 전기방사를 이용한 필터 제조

전기방사 시스템은 고전압 발생 장치, 집진판(Collector), 방사구(needle), 시린지펌프(syringe pump), 접지선으로 Fig. 1과 같이 구성된다. 전기방사 용액은 펌프에 의해 0.06 mL/min의 유속으로 흐르고, 18 kV의 전압을 가해 집진판 위의 메쉬 지지체에 방사된다. 실린더와 집진판 사이의 거리는 30 cm이며, 필터두께를 조절하기 위해 전기방사 시간을 30, 60, 90분으로 달리하였다(Fig. 1).

### 2-3. 필터 미세입자 여과 성능평가

전기방사 필터의 미세입자 여과 성능을 분석하기 위해 필터사용 전, 후의 미세입자 농도를 OPS (Model 3330, TSI)를 이용하여 측정하였다. 입자 발생기를 이용해 NaCl 과포화 수용액으로 부터  $0.3\sim 4.0\ \mu\text{m}$  크기의 미세입자를 생성하였다. 생성된 미세입자는 공기 건조 장치를 이용하여 공기 중 수분이 제거된 다음, 필터를 통과하여 미세입자 여과 성능이 평가된다. NaCl 입자와 습한 공기는 실리카겔로 채워진 공기 건조 장치를 통과하여 습도는 60%에서 20% 낮아지고, 미세입자는 1.0 atm, 20~23 °C 조건 하에서 필터로 주입된다(Fig. 2). 필터에 가해지는 압력이 증가하면 필터 수명을 저하시키고 공기의 흐름을 방해하므로, 필터 전, 후에 차압계를 설치하여 미세입자가 필터를 통과할 때 가해지는 압력을 모니터링 하였다.

### 2-4. 전기 방사된 나노섬유의 특성

#### 2-4-1. 공극률(porosity)

전기방사는 미세한 섬유를 생산하여 섬유가 서로 연결될 경우, 높은 단위부피당 비표면적을 가질 수 있는데, 이러한 다공성 구조는 분리, 전기전도, 기체포집, 촉매 등 다양한 분야에 적용 가능하다[10].

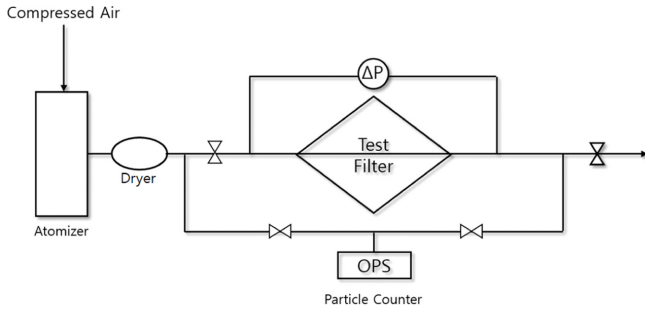


Fig. 2. Layout of filter test system.

활성탄, 제올라이트, 실리카 같은 입자상 다공성 물질에 비해, 전기방사 섬유는 경우 비표면적은 작지만, 삼차원 네트워크 구조로 연결된 기공의 크기는 상대적으로 크다. 기공크기, 공극률은 필터의 성능에 영향을 미쳐 공극률이 클수록 공기의 흐름은 증가하며, 기공의 크기는 차단하고자 하는 미세먼지의 크기보다 작아야 한다[11].

#### 2-4-2. 표면구조

전기방사를 통해 제조된 섬유의 표면은 전기방사 제조 조건에 의해 영향을 받는다. 낮은 점도의 고분자 용액을 사용하거나, 높은 전기장을 인가하여 제조된 섬유는 섬유상에 구슬형태의 입자들이 존재하며, 높은 점도의 고분자 용액에 의해 제조된 균일한 섬유의 표면에 비해 상대적으로 거칠어짐을 알 수 있다. 또한 전기방사에 의한 섬유의 단면은 대부분 원형이나 종종 납작한 리본(ribbon)형의 섬유가 형성되기도 하는데, 이는 높은 분자량의 고분자 용액 또는 고농도 용액을 전기방사 하였을 때 발견되는 현상이다[11]. 높은 점도의 고분자 용액에서 용매 증발 속도는 느리며 상당량의 용매를 함유한 상태에서 집진판으로 도달하기 때문에, 이때의 물리적인 충격으로 인해 jet의 표면에 형성된 고분자의 표면이 붕괴되면서 납작한 리본 형태를 가지면서 고형화된다. 이러한 섬유의 표면구조 분석을 위해 SEM (scanning electron micro scope), TEM (transmission electron microscopy) 등의 광학 실험 장비가 주로 이용된다.

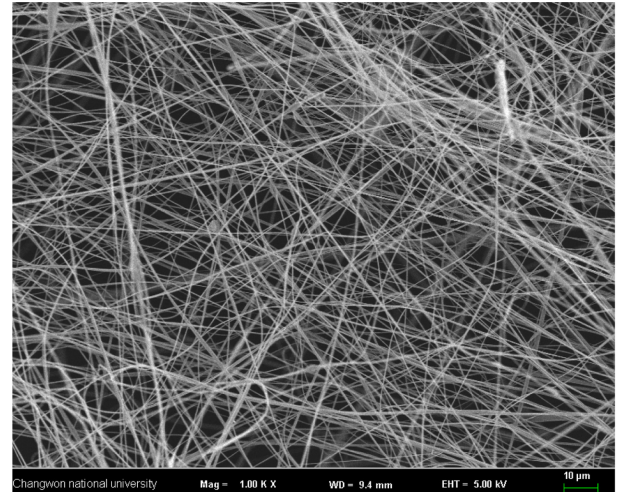
#### 2-5. 표면분석

샘플에 전도성을 가하기 위해 스퍼터 코터(sputter coater (Pt), Polaron SC 7640)를 이용하여 백금코팅을 하였다. 저전압 주사전자현미경(Low voltage scanning electron micro scope, Merlin compact)을 이용하여 필터 표면과 단면의 구조, 직경을 관찰하였다.

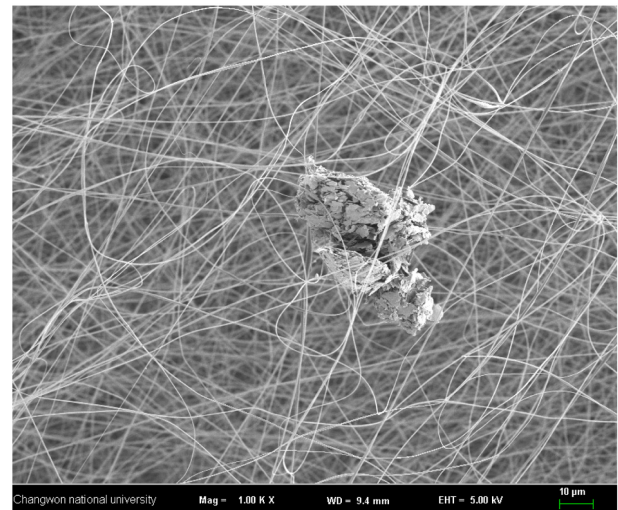
### 3. 결과 및 고찰

SEM 이미지에서 (Fig. 3) 활성탄의 양이 늘어남에 따라 섬유 직경에는 변화가 없으나, 섬유 내에 활성탄 응집 입자의 전체적인 분포가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

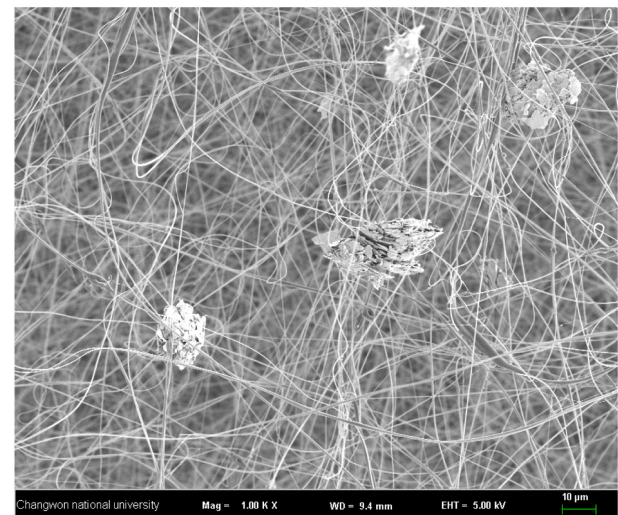
리론 지지체위에 CA 섬유를 전기방사한 필터에 대한 분리효율 결과를 보면 Fig. 4와 같다. 전기방사 시간이 20, 40, 60분으로 증가할수록, 섬유필터 두께 증가에 따른 필터 표면적 증가로 인해 1.0~3.3  $\mu\text{m}$  크기의 입자가 차단되는 것을 알 수 있다. 특히 초미세먼지 보다 크기가 상대적으로 큰 1.5~3.3  $\mu\text{m}$  크기의 입자가 필터 두께에 더 큰 영향을 받았다. 만약 전기방사 조건을 조절하여 필터 기공크기가 더 작아진다면 초미세먼지 차단 효율이 증가할 것으로



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. SEM images of fiber filters for (a) AC/CA 0%, (b) AC/CA 2.5%, (c) AC/CA 5% (scale bar=10  $\mu\text{m}$ ). (a) Activated carbon 0%, (b) Activated carbon 2.5%, (c) Activated carbon 5.0%.

예상된다.

Fig. 5는 미세입자 크기에 따른 제거효율을 보여준다. 입자의 크



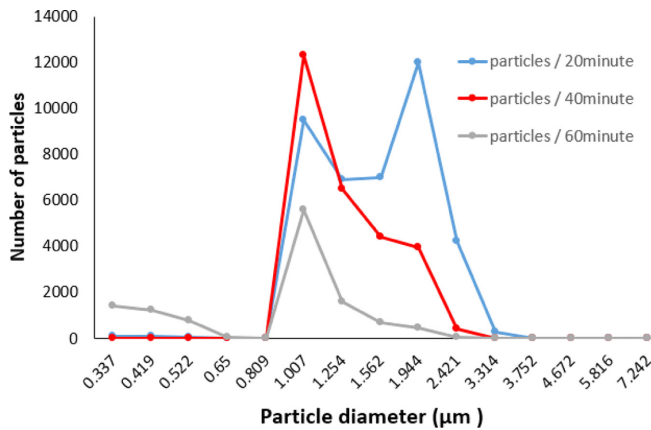


Fig. 4. Aerosol distribution after filtration through electrospun CA filters on silicone support.

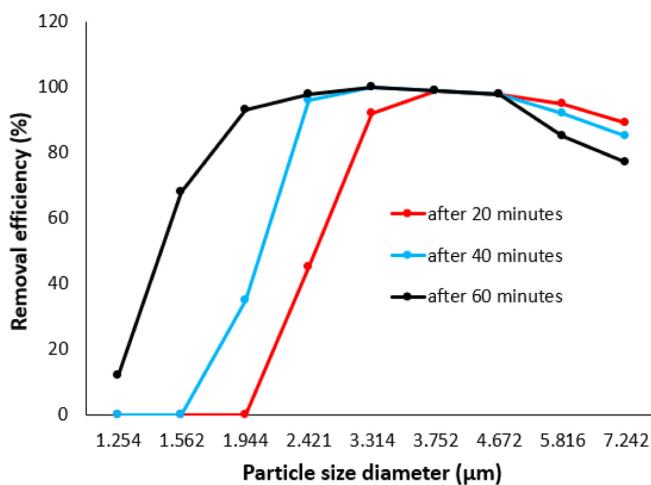


Fig. 5. Filtration efficiency vs. particle size for CA silicone fiber filters.

기가 2  $\mu\text{m}$ 이하로 작을수록 분리효율은 줄어들며, 입자의 크기가 클수록 필터를 통과하지 못해 분리효율은 높아지는 경향을 보인다. 또한 전기방사 시간이 20분에서 60분으로 증가할 경우 필터두께가 증가하여 표면적이 커짐에 따라, 섬유와 미세먼지 상호작용이 증가하여 분리효율이 향상되었다.

Fig. 6는 전기방사 CA 실리콘 필터에서 활성탄 비율(0, 2.5, 5.0 wt%)에 따른 필터를 통과한 미세입자의 개수를 보여준다. 전기방사 시간이 30분에서 90분으로 증가할수록 필터의 두께가 증가하여 (Table 1) 더 많은 입자가 차단되었지만, 활성탄 농도에 따른 미세입자 차단 성능은 크게 영향을 받지 않았다. 따라서, 활성탄 추가에 따른 톨루엔 흡착 성능 평가를 추가로 수행하였다.

Table 2는 상온에서 톨루엔 증기에 24시간 노출한 다음 활성탄 필터 샘플(전기방사 30분)의 질량변화를 측정한 결과이다. 모두 3

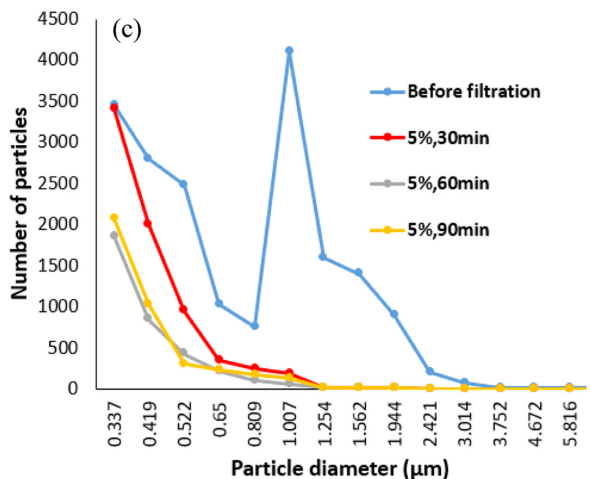
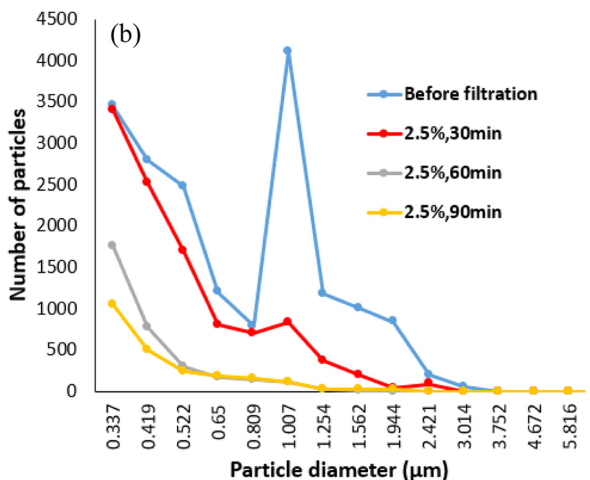
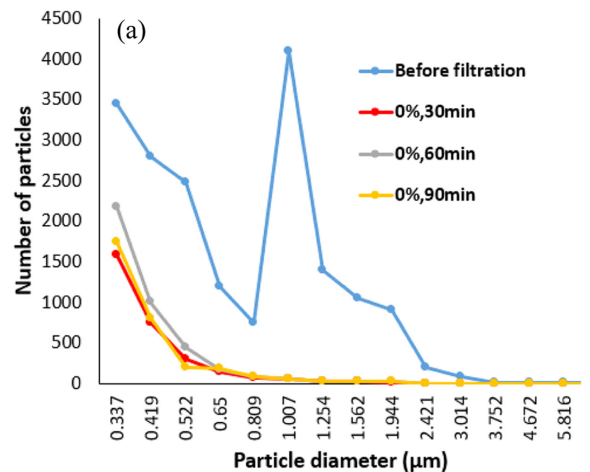


Fig. 6. Aerosol distribution after filtration through CA filters with different % of activated carbon. (a) Activated carbon 0%, 30, 60, 90 minutes, (b) Activated carbon 2.5%, 30, 60, 90 minutes, (c) Activated carbon 5.0%, 30, 60, 90 minutes.

Table 1. Filter thickness made with different electrospinning times

Number/Time	30 min	60 min	90 min
Exp. #1	0.11	0.19	0.33
Exp. #2	0.12	0.22	0.29
Exp. #3	0.11	0.23	0.31
Average	0.11 mm	0.21 mm	0.31 mm

Table 2. Filter mass change % after exposure to toluene

	AC 0% 30 min	AC 2.5% 30 min	AC 5% 30 min
Exp. #1	30.4%	52.4%	60.2%
Exp. #2	32.4%	50.2%	59.6%
Exp. #3	29.3%	51.7%	60.8%
Average	30.7%	51.4%	60.2%

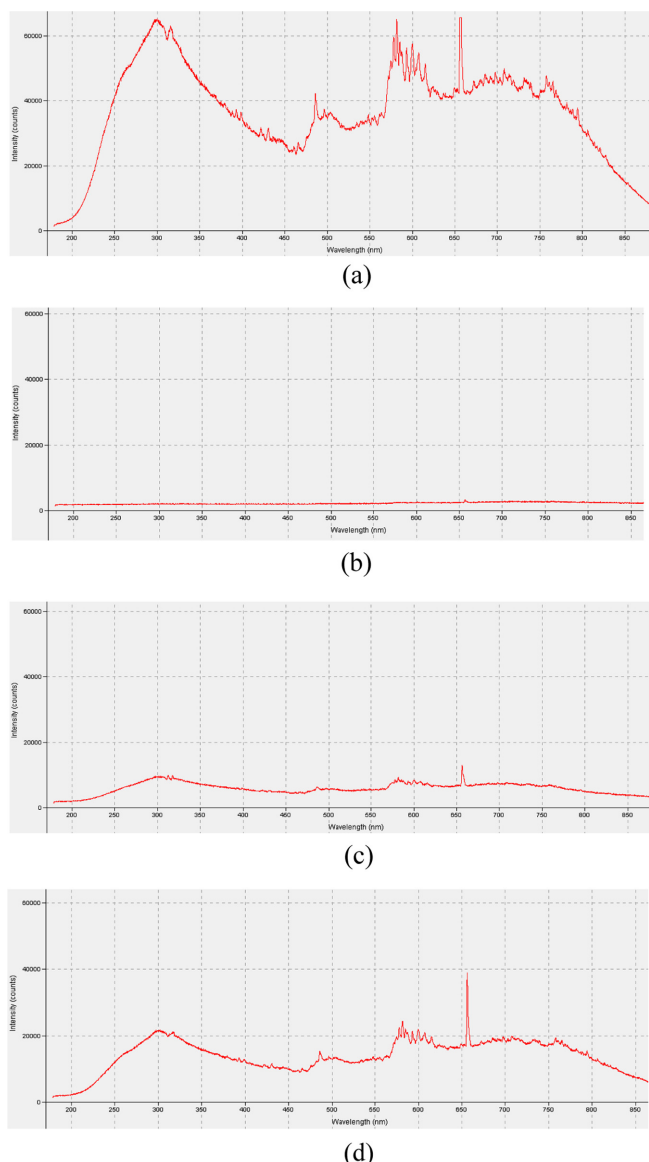


Fig. 7. UV/VIS spectra of CA silicone filters with 2.5% AC electrospun for 20, 30, and 90 minutes. (a) Background without filter, (b) UV-VIS spectrum for the filter (90 minutes electrospinning), (c) UV-VIS spectrum for the filter (30 minutes electrospinning), (d) UV-VIS spectrum for the filter (20 minutes electrospinning).

번의 실험을 수행하여 평균값을 제시하였다. 활성탄 0% 샘플에서 톨루엔 흡착에 의해 30% 정도의 질량이 증가하였고, 활성탄 2.5%는 51%의 질량 상승, 활성탄 5.0%일 경우 60%의 질량상승을 보여, 활성탄이 증가할수록 필터 내에 톨루엔 분자를 흡착할 수 있는 미세 기공이 증가하여 톨루엔 흡착량이 증가하는 경향을 보였다.

전기방사 섬유필터를 창문 방진창으로 사용하기 위해 미세먼지 차단, VOC 흡착 뿐만 아니라, 빛 투과도 또한 중요한 요소이다. 따라서, 분광광도계(UV-VIS spectrophotometer)를 이용하여 빛 투과도를 측정한 결과는 Fig. 7과 같다. 활성탄 2.5%가 포함된 CA-실리콘 전기방사 필터를 이용하여 전기방사 시간 20, 30, 90분에 따른 빛 투과도를 비교하였다. 90분 방사한 필터는 빛이 거의 투과되지 않았다. 30분 방사한 필터의 경우 빛이 어느 정도 투과하였으며, 전

기방사 시간 20분의 경우 필터 막이 얇아져 비교적 가시광선 영역(380~780 nm)에서 투과가 잘됨을 확인할 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 전기방사 방법을 이용하여 실리콘 지지체 위에 CA 폴리머 섬유를 방사하였다. VOCs 제거를 위해 활성탄을 추가하였으며, 활성탄 비율과 전기방사 시간을 달리하여 활성탄 비율, 필터두께에 따른 미세먼지 차단효과, 톨루엔 흡착성을 평가하였고, 창문 방진창으로 적용 가능성을 평가하기 위해 빛 투과도를 분석하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 전기방사 시간이 증가할수록 필터의 두께가 두꺼워져 1~3  $\mu\text{m}$  크기의 입자를 효과적으로 차단하여 평균 80% 이상의 제거효율을 보였다.

(2) 활성탄이 첨가된 CA-실리콘 메쉬 필터의 경우 활성탄의 농도가 0에서 5.0%까지 증가함에 따른 미세먼지 차단 효과 상승은 미미하였다. 하지만 톨루엔 흡착량은 활성탄이 증가함에 따라 향상되었다.

(3) 방진창 적용을 위한 빛 투과도의 경우, 필터의 두께가 두꺼워질수록 빛이 투과하기 어려웠으며, 전기방사 시간을 줄여 필터 두께가 작아질수록 빛 투과도가 상승하였다.

## 감 사

이 논문은 2023~2024년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

## References

- Hwang, K. J., Park, J. S., Lee, T. J. and Gwon, J. K., "Effect of the Silica Nanoparticles on Pore Size Control of the Air Filter Made from Cellulose Nanofibers (CNFs)," *Journal of Korea TAPPI*, **55**(1), 39-48(2023).
- Seo, J., Ha, E., Lee, B., Park, H., Kim, H., Hong, Y. and Yi, O., "The Effect of PM10 on Respiratory-related Admission in Seoul," *KOSAE*, **22**(5), 564-573(2006).
- Kim, Y. P., "Analysis of the Trend of Atmospheric PM10 Concentration over the Seoul Metropolitan Area Between 1999 and 2008," *Journal of Environmental Impact Assessment*, **19**(1), 59-74(2010).
- Kim, J. C. and Kim, J. W., "Risk Study of Fine Dust and Air Pollution Mixtures," *News & Information for Chemical Engineers*, **38**(2), 184-189(2020).
- Park, S., Kim, J. and Han, S., "Development of Electrospun Cellulose Acetate Membranes using Carbon Nanotubes for Filtration of Particulate Matter in the Air," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(1), 68-73(2017).
- Kim, D. B. and Pack, J. H., "Manufacturing and Application Technology Trends of Nanofibers," *Prospectives of Industrial Chemistry*, **13**(1), 32-50(2010).
- Keng, D. S., Lee, K. H. and Cho, D. G., "Develop Ment of Passive/active Integrated Modular Device for Fine Dust Free Zone Implementation," Ministry of Land, Infrastructure, Transport and

- Tourism. 2018.
8. Han, S., "Study on Electrospun Activated Carbon Mats for the Filtration of Particulate Matter and Volatile Organic Compound in the Air," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(3), 356-360(2018).
  9. Han, S. I., "Study on Electrospun Activated Carbon Mats for the Filtration of Particulate Matter and Volatile Organic Compound in the Air," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(3), 356-360(2018).
  10. Kim, S. S., Kim, J. H. and Park, S. W., "Adsorption Analysis of Benzene Vapor in a Fixed-Bed of Granular Activated Carbon," *Kor. Chem. Eng. Res.*, **47**(4), 495-500(2009).
  11. Gu, M., Kim, D. and Han, S., "Study on Performance Comparison in Carbon Nanotube Embedded Electrospun Membranes

for Particulate Matter Removal," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(1), 56-60(2018).

#### Authors

**Soon-Ho Kim:** Associate Professor, Industry-University Cooperation Foundation, Changwon National University, Changwon 51140, Korea; shkims@changwon.ac.kr

**Sang-II Han:** Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Changwon National University, Changwon 51140, Korea; sangilh@changwon.ac.kr