Korean Chem. Eng. Res., 62(1), 87-98 (2024)
https://doi.org/10.9713/kcer.2024.62.1.87
PISSN 0304-128X, EISSN 2233-9558

리그노셀룰로오스 섬유-기반 3층 섬유판과 한지로 구성된 실내외 대기 오염물질 정화용 필터세트의 개발

이영규* · 최영서** · 문명철*** · 소재민*** · 권오경* · 최원실* · 최준원**,**** · 양 인**,†

*서울대학교 농생명과학공동기기원
08826 서울특별시 관악구 관악로 1
**서울대학교 그린바이오과학기술연구원
25354 강원특별자치도 평창군 대화면 평창대로 1447
***(주) 행복홈우드테크, 경영지원부
58544 전남 무안군 청계면 청계공단길 40-9
****서울대학교 국제농업기술대학원
25354 강원특별자치도 평창군 대화면 평창대로 1447
(2023년 11월 9일 접수, 2024년 1월 17일 채택)

Development of Filtering Sets Composed of Lignocellulosic Fiber-based 3-layers Fiberboard and Traditional Korean Paper for the Purification of Indoor and Outdoor Air Pollutants

Young-kyu Lee*, Yeong Seo Choi, Myoung cheol Moon***, Jae min So***, Ohkyung Kwon*, Wonsil Choi*, Joon weon Choi**,**** and In Yang**,†**

**The National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea*
***Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, 1447 Pyeongchang-daero, Daewha-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Korea*
****Happyhomewoodtech Co. Ltd., 40-9, Cheonggyegongdan-gil, Cheonggye-myeon, Muan-gun, Jeollanam-do, 58544, Korea*
*****Graduate School of International Agricultural Technology, Seoul National University, 1447 Pyeongchang-daero, Daewha-myeon, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Korea*
(Received 9 November 2023; Accepted 17 January 2024)

요 약

본 연구는 리그노셀룰로오스 섬유와 굴참나무 수피-기반 활성탄(COA)으로 제조한 3층 섬유판에 한지를 조합하여 제작한 섬유판 필터세트의 미세먼지(PM), 휘발성 유기화합물(TVOC), 폼알데하이드(HCHO) 여과능을 조사하기 위하여 수행하였다. 단백질계 접착제를 적용하여 표층에 목섬유 그리고 심층에 재생섬유/COA로 제조한 섬유판(WRF)과 한지로 제작한 섬유판 필터세트는 일반향의 연소에 의하여 발생하는 상기 오염물질을 효과적으로 여과하였다. 섬유판 제조에 있어 표층/심층에 적용되는 접착제의 함지율을 4%/4%, 5%/3%, 6%/2%로 조절하여 WRF를 제조한 후, 이를 한지와 함께 WRF-기반 필터세트 제작에 이용하였다. 이 필터세트의 PM, TVOC, HCHO 여과능은 심층의 함지율이 감소함에 따라 향상되었다. 한편 WRF-기반 필터세트 구성에 있어 45 g/m^2 평량의 한지보다 25 g/m^2 평량의 한지(KP-25g)를 사용하여 제작한 필터세트에서 여과능이 우수하였다. 표층에 재생섬유와 심층에 목섬유/COA로 제조한 섬유판(RWF)과 KP-25g로 구성한 섬유판 필터세트의 여과능은 WRF와 비교하여 높았다. 소형 실내공간 및 대형 옥외공간에 WRF-기반 섬유판 필터세트 및 무필터 조건과 함께 측정한 PM 및 TVOC 여과능은 RWF-기반 섬유판 필터세트에서 높았다. 따라서 RWF와 KP-25g를 조합하여 제작한 섬유판 필터세트가 실내외 공간에 존재하는 PM, TVOC 여과용 필터로서 적용이 가능할 것으로 생각한다.

Abstract – This study was conducted to investigate the efficiency of the filtering sets composed of fiberboards, which were fabricated with lignocellulosic fiber and cork oak bark-based activated carbon (COA), as well as traditional Korean

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: dahadad@snu.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.

paper handmade from mulberry trees (KP) for the filtration of PM, TVOC and HCHO. Three-layers fiberboards (WRF) were fabricated with wood fiber in its surface layers and recycled fiber/COA in its core layer using a protein-based adhesive with the resin content of 8%. Filtering sets were composed of three WRF and one sheet of KP. Concentrations of PM, TVOC and HCHO generated with the combustion of a incense in a sealed laboratory hood were reduced efficiently with the operation of air-purifier installed the filtering sets. Except for the WRF fabricated with 4%/4% resin contents, other WRF were prepared with 5%/3% and 6%/2% resin contents in surface/core layers, and then the WRF were used with KP for the fabrication of filtering sets. Filtration efficiency of the filtering sets was improved as the core-layer resin content applied in the fabrication of WRF decreased. In addition, filtration efficiency of the WRF-based filtering set fabricated with KP of 25 g/m^2 basis weight was higher than that with KP of 45 g/m^2 basis weight. Filtering sets composed of three-layers fiberboards (RWF) that recycled fiber and wood fiber/COA were used in its surface and core layers, respectively, and KP-25g showed higher filtration efficiency than those of WRF-based filtering sets. Air-inhalation equipment installed the RWF-based, WRF-based filtering sets and without filtering set were operated in small indoor and large outdoor spaces. Efficiency for filtering PM and TVOC of the RWF-based filtering sets was higher than that of other filtering sets. It is concluded that fiberboard-based filtering sets composed of RWF and KP-25g can be used as a filter for reducing the concentrations of PM and TVOC existed in indoor and outdoor spaces.

Key words: Filtering set, Wood fiber, Recycled fiber, Traditional korean paper, Wood bark-based activated carbon, Three-layers fiberboard

1. 서 론

미세먼지(Particulate Matter, 이하 PM)는 대기 오염물질이 공기 중에서 반응하여 형성된 황산염, 질산염, 화석연료의 연소과정에서 발생하는 탄소류, 지표면의 흙먼지 등에서 발생하는 금속류 등과 같이 다양한 성분을 가진 대기상에 존재하는 부유물질이다[1]. 입자의 직경이 큰 PM 10 물질은 주로 도로변이나 산업단지 등에서 발생하는 반면 직경이 2.5 μm 미만인 PM 2.5는 탄소, 유기탄화수소, 질산염, 황산염, 유해금속 성분 등으로 구성되어 있다[2]. 입자의 크기가 적은 PM은 코와 기도를 통하여 폐포에 도달할 수 있으며, 이 중에서 매우 미세한 PM은 폐포를 통과한 후, 혈액과 함께 신체 전체를 순환하게 된다[3]. 많은 보건학자들은 PM을 호흡기 및 심장 질환 등과 같은 증상을 일으키는 주요 원인으로 주장하고 있으며, 이와 같은 증상으로 인하여 조기사망에 이를 수 있다고 경고하고 있다. 따라서 PM 저감을 위하여 망상 여과, 물리적 및 정전기적 집진, 습식 세정 등과 같은 다양한 기술이 개발되었으며, 각 개발 기술은 경제성을 고려하여 부유 PM의 여과 및 공기질 정화를 위하여 적용되고 있다.

현재 미세먼지를 제거하기 위하여 개발된 기술 중에 polypropylene(PP)와 polyethylene terephthalate(PET) 등과 같은 합성섬유로 제조한 부직포 필터가 국내외에서 대부분 사용되고 있다. 이는 천연섬유, 세라믹, 금속류 등을 매체로 제조한 직물계 필터보다 경제적인 측면에서 이점을 가지고 있기 때문이다[4]. 그러나 PM 저감을 위한 여과 매체 선택에 있어 경제성 외에 환경적인 측면에 대한 고려가 필요할 것으로 생각한다. 예를 들면, PP 또는 PET로 생산된 부직포 필터는 사용 이후 폐기물로서 대량 발생하는데 원료가 합성섬유인 관계로 매립에 있어 분해에 장기간이 요구된다. 이에 대한 해결방안의 일환으로 부직포를 소각할 경우, 기후변화 및 지구 온난화의 주요 원인인 이산화탄소를 대량으로 방출하게 된다. 또한 PP 및 PET로 생산된 부직포 필터는 입자상 물질인 PM을 효과적으로 여과할 수 있으나, 인체에 유해한 것으로 알려진 휘발성 유기화합물 및 유해금속에 대한 여과에는 화학적 흡착기작이 부족하여 적합하지 않다. 따라서 PM, 휘발성 유기화합물과 유해금속을 효과적으로 제거할 수 있는 공기 정화용 필터의 매체로서 합성섬유를 대신하여 재생가능한 원료를 이용하는 방안에 대한 연구가 필요할 것으로 생각한다.

상기에서 언급한 합성섬유 대체 원료와 비교하여 상대적으로 저렴하면서 친환경 재료인 목섬유는 높은 흡착효율, 낮은 여과저항, 간단한 생산공정 등과 같은 장점으로 인하여 공기정화용 필터의 생산 매체로서 이용하는 방안에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다[5-11]. 이 연구 중에 목섬유는 접착제에 의하여 부분적으로 결합한 연속층의 매트 형태로 제조할 경우 PM을 효과적으로 여과하는 것으로 보고되었다. 이렇게 제조한 목섬유 매트는 형상 유지, 침투성 개선, 기계적 강도 등을 제공하며, 합성섬유 또는 유리섬유 등과 같은 이질적 원료와 혼합한 매트화도 가능한 것으로 보고되었다[12]. 따라서 미세먼지 여과를 위하여 목섬유를 여과매트 제조용 원료로 활용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

한편 Guo 등(2020)은 디젤기관의 배기가스 내에 포함된 NO_X 여과를 위하여 유전체 장벽 방전기(dielectric barrier discharge)에 내장된 목섬유가 10~13% NOx를 저감하며, 목섬유에 활성탄을 일부 첨가할 경우 NOx 외에 탄소 그을음까지 동시에 제거할 수 있다고 보고하였다[13]. 결과적으로 활성탄과 함께 제조한 목섬유-기반 필터가 다양한 외부 환경에 존재하는 인체 유해물질 제거를 위한 흡착제로 널게 사용되고 있다. 활성탄과 함께 제조한 섬유 필터가 PM, 인체 유해 금속 및 미생물 저감에 효율적이라고 연구 결과가 보고되었다[14]. 이 외에 목재-기반 활성탄의 휘발성 유기화합물의 흡착능과 함께 활성탄 내에 존재하는 관능기와 활성화 조건이 흡착능에 미치는 영향을 조사하는 연구도 수행되었다[15-18]. 그러나 강제적인 외기의 흡입없이 노출시킨 활성탄에 충분하게 대기 오염물질을 흡진 또는 흡착하기 위하여 장시간이 요구되며, 활성탄의 제조 및 적용 과정에서 미세분이 대량 발생하는 관계로 이차오염 발생 가능성에 대한 문제점도 제기되었다[19]. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 목섬유에 활성탄을 첨가하여 매트형태로 제조한 후, 매트에 외기가 충분히 접촉할 수 있도록 전용 공기흡입장치에 내장하여 해결하는 방안이 가능할 것으로 생각한다. 그러나 목섬유와 목재-기반 활성탄으로 구성된 섬유판 형태의 필터를 사용하여 PM, 휘발성 유기화합물, 유해금속을 흡진 및 흡착시키는 방안에 대한 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 목섬유 및 재생섬유에 굴참나무 수피 활성탄을 첨가하여 섬유판을 제조하였으며, 이를 한지와 함께 다양한 조합으로 섬유판 필터세트를 제작하였다. 이렇게 제작한 섬유판 필터세트를 공기청정기 또는 공기흡입장치에 내장한 후, 실내외 환경에서 공기질 측정기와 함께 가동시키면서 측정공간 내의 PM 1,

PM 2.5. PM 10, 휘발성 유기화합물, 폼알데하이드 농도를 일정한 시간에 걸쳐 측정하였다. 이 결과를 통하여 대기 오염물질의 흡진/흡착을 위한 합성섬유-기반 부직포 대체용 리그노셀룰로오스 섬유-기반 활성탄 첨가 섬유판의 여과필터로서 적용 가능성을 조사하였다.

2. 연구방법

2-1. 공시재료

섬유판 제조에 사용된 목섬유(함수율: 10±1%)와 왁스 emulsion (고형분 함량: 43±1%)은 ㈜ 유니드(전북, 군산)에서 공급받아 사용하였다. 재생섬유의 경우, 크리넥스 드라이셀 핸드타올을 구입하여 사용한 후, 최소 12시간동안 기건하였으며, 이를 ㈜ 이륜산업(경기 안산)의 세단기(RS-6200A)를 이용하여 세절하여 필터용 섬유판 제조용 원료로 이용하였다. 공기질 정화용 필터로 사용할 섬유판 제조에 있어 휘발성유기화합물 방출을 완전히 배제하기 위하여 기존 석유화학계 합성수지 접착제를 대신하여 천연 접착제를 적용하는 것으로 결정하였다. 섬유판 제조용 접착제 원료로서 단백질 함량이 약 80%를 차지하는 인모, 돈모와 돈혈을 사용하였는데 이는 탄수화물계 원료보다 경화된 접착제에서 우수한 내수성 및 내습성을 제공하기 때문이다[20]. 각 원료에 대한 확보 방안을 보면, 접착제 원료로 돈모(pig hair, 이하 PH)와 돈혈(pig blood, 이하 PB)은 전북 김제시 소재 목우촌에서 공급받아 사용하였다. 수거한 PH는 1주일 이상 자연건조하여 함수율을 9±1%로 조절하였으며, 이를 인모와 동일하게 일반 가위로 1 cm 정도의 크기로 절단하여 접착제 원료로 사용하였다. PB의 경우, 추가공정 없이 접착제 원료로 사용하였다. 단백질 성분만으로 구성된 접착제를 이용하여 제조한 목질 복합재료의 경우 석유화학계 접착제로 제조한 것과 비교하여 강도가 낮은 문제점이 발생하여 이에 대한 해결책으로 수피에 함유된 페놀계 물질인 리그닌과 탄닌을 추가하는 방안이 제기되었다. 이를 위하여 산림조합중앙회 동부목재유통센터(강원, 동해)에서 공급받은 낙엽송 수피를 일정한 크기로 파쇄한 후, 95±2 ℃의 열수에서 4시간 동안 일차적으로 반응시켰다. 이를 증발시켜 농축된 가수분해물(hot water extractive of larch bark, 이하 LB-HE)을 얻었으며, 고형분 함량은 38% 내외, 점도는 1,000 m·Pa·s 이상, pH는 5.4로 측정되었다.

접착제의 주원료인 HH, PH, PB 가수분해에 사용된 수산화나트륨, 수산과 방부를 목적으로 첨가된 붕산나트륨은 랩스토리사이언스(충북, 청주)에서 화학실험용 시약을 구입하여 사용하였다. 섬유판 필터의 방염성능 부여를 위하여 접착제에 첨가한 인산계 방염제는 ㈜ 행복홈우드테크(전남, 무안)에서 공급받아 사용하였다. 여과필터로 사용된 섬유판에서 휘발성 유기화합물(total volatile organic compounds, 이하 TVOC)과 유해금속 등의 흡착을 위하여 사용된 굴참나무 수피 활성탄(이하 COA)은 ㈜ 좋은 숯(서울, 송파)에서 구매하여 사용하였는데 2 mesh 선별체 위에 남은 입자상 것을 분류하여 사용하였다.

2-2. 섬유판 제조용 접착제

섬유판 제조용 접착제는 HH 및 PH 알칼리 가수분해물(HH-AK, PH-AK), PB의 산가수분해물(PB-AC), 그리고 단백질계 성분만으로 구성된 접착제를 섬유판 제조에 적용할 경우, 강도 저하가 우려되어 낙엽송 수피의 열수추출물(LB-HE)로 조제하였다[21]. 접착제의 선정은 다양한 구성비로 조제한 접착제를 적용하여 제조한 섬유판의 휨강도 결과를 토대로 고형분 함량을 기준으로 35 wt% HH-AK, 35 wt% PH-AK, 10 wt% PB-AC와 20 wt% LB-HE로 결정하였다. 한편 접착제의 주성분이 단백질인 관계로 부패 가능성이 있어 5% 농도의 붕산나트륨 수용액을 조제한 후, 적용에 앞서 방부제로서 접착제에 15 drops를 첨가하였다. 붕산나트륨은 현재 유럽연합에서 식품용 방부제로서 사용을 금지하고 있으나, 그 외의 많은 지역과 국가에서 다양한 용도의 방부제 원료로서 첨가되고 있어 인체에 무해할 것으로 사료되어 사용하였다[22]. 한편 섬유판 필터에 방염성능 부여를 위하여 인산계 방염제 용액을 접착제에 15 drops 첨가하였다.

2-3. 섬유판 제조

목섬유- 또는 재생섬유-기반 섬유판이 다양한 실내외 공간에 존재하는 미세먼지(이하 PM), 총휘발성유기화합물(이하 TVOC), 폼알데하이드(이하 HCHO) 등과 같은 공기질 오염물질을 여과하는 것으로 선행연구를 통하여 확인하였다[21]. 그러나 석유화학계 합성수지인 polypropylene, polyethyleneterephthalate 등을 주원료로 제조한 부직포와 석탄계 활성탄으로 구성된 기존 공기청정기 필터보다 여과능이 낮아 이에 대한 개선방안으로 목섬유와 재생섬유 그리고 목재수피 활성탄을 함께 사용하여 섬유판을 제조하였다(Fig. 1).

제조공정을 상세히 설명하면, 섬유판은 목표밀도를 150, 180, 200, 250 kg/m^{3}으로 조절하여 제조하였으며, 이렇게 제조한 섬유판의 강도 및 취급성 확인을 통하여 최종밀도를 250 kg/m^{3}으로 결정하였다. 섬유판 성분 구성은 전체 전건중량에서 31 wt% 목섬유, 31 wt% 재생섬유, 30 wt% COA로 구성하였다(이하 WRF). WRF 제

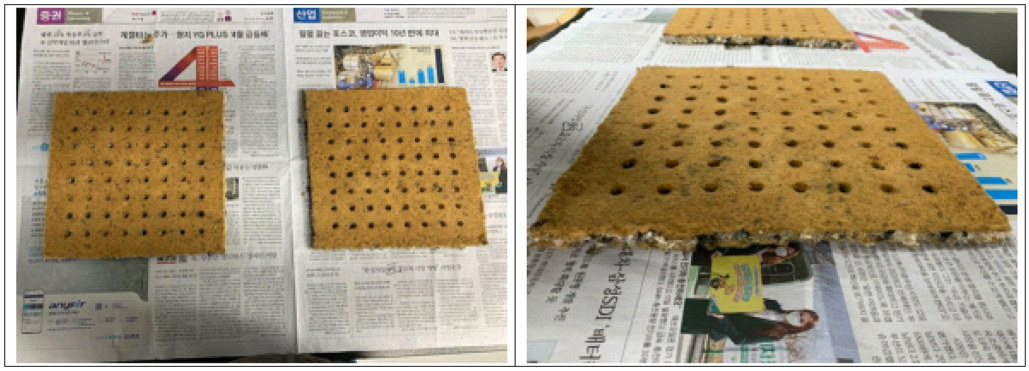


Fig. 1. Image of 3-layer fiberboard, which was composed of wood fiber on the surface layers and recycled fiber and cork oak bark-based activated carbon in the core layer, for the fabrication of fiberboard filtering set.



Fig. 2. Image of 3-layer fiberboard, which was composed of recycled fiber on the surface layers and wood fiber and cork oak bark-based activated carbon in the core layer, for the fabrication of fiberboard filtering set.

조에 사용된 접착제의 전체 함지율은 8%로 고정하였으나, 표층 제조용 원료인 목섬유 및 심층 제조용 원료인 재생섬유에 각각 4%와 4%(이하 WRF-0), 5%와 3%(이하 WRF-1), 6%와 2%(이하 WRF-2) 적용하여 제조하였다. 즉 정해진 양의 접착제를 고점도 도료 분사용 sprayer를 이용하여 목섬유 및 재생섬유에 각각 적용하였으며, 접착제가 적용된 전체 목섬유의 절반(15.5% wt%)을 spiked caul plate 위의 성형틀(250 mm × 250 mm)에 균일하게 분산시키면서 성형하였다. 성형된 목섬유층 위에 30 wt% COA와 함께 접착제가 적용된 31 wt%의 재생섬유를 혼합하여 균일하게 분산시켜 성형한 후, 나머지 목섬유를 재생섬유층 위에 올려 3층으로 성형하였다. 이렇게 성형된 매트를 180 ℃의 온도에서 24 kg/cm^{2}의 압력으로 12분간 열압을 실시하여 64개의 기공을 가진 타공 섬유판(치수: 250 mm × 250 mm × 10 mm)을 제조하였다.

한편 표층에 재생섬유 그리고 심층에 목섬유와 COA로 구성된 3층 섬유판(이하 RWF)을 WRF 제조방법과 동일한 조건으로 제조하였다(Fig. 2). 이는 재생섬유를 표층 섬유로 사용할 경우 공기청정기 또는 공기흡입장치를 통하여 흡입되는 외기가 WRF 표면에 위치한 목섬유와 충돌하면서 발생할 수 있는 미세섬유 양이 목섬유보다 적을 것으로 예상되어 RWF를 제조한 후, 이에 대한 공기질 오염물질 분석에 사용하였다.

2-4. 섬유판-기반 필터세트 제작 및 공기질 평가

섬유판을 이용한 필터세트의 제작에 앞서 섬유판 자체의 내습성과 내후성 향상을 위하여 피마자유와 에탄올(50 wt%/50 wt%)로 조제한 용액을 분무기로 이용하여 섬유판 상단 전체에 균일하게 37.1 g/m^{2}로 분사하여 도포하였다. 이렇게 준비된 1~3장 섬유판의 하단 또는/그리고 섬유판 사이에 평량 25 g/m^2(이하 KP-25g) 또는 45 g/m^2(이하 KP-45g)의 한지(고감한지, 전북 전주) 1~2장을 골판지로 제작한 필터박스에 넣어 섬유판-기반 필터세트를 구성하였다.

이렇게 준비된 섬유판 필터세트를 공기청정기에 내장한 후, 0.8 m^{3}의 실험실 후드에 설치하였다. 다음으로 공기청정기의 유속을 "강"으로 고정한 상태에서 일반 향 또는 모기향을 연소시켜 실내 공기질 오염물질을 자의적으로 발생시킨 후, 각각 150분 및 600분에 걸쳐 실험실 후드 내의 미세먼지(이하 PM), 총휘발성유기화합물(이하 TVOC), 폼알데하이드(이하 HCHO) 농도를 실내공기질 측정기(DSM101, (주) 에프티랩, 경기, 안산)로 10분 및 30분 간격으로 3반복 측정하여 각 섬유판 필터세트에 대한 오염물질 여과능을 비교 및 분석하였다.

2-5. 대형 옥외공간에서 섬유판 필터세트의 공기질 정화능 평가

섬유판 필터세트에 대한 오염물질 여과능 평가를 실험실 후드에서 측정한 결과를 보면 소형 공간인 관계로 일반향 및 모기향에서 발생하는 오염물질의 농도가 전반적으로 매우 높게 측정되었으며, 특히 모기향의 경우 PM 농도는 본 연구에서 사용한 공기질 측정기의 측정범위를 초과하였다. 따라서 오염물질의 농도가 상대적으로 낮은 대형공간에서 섬유판 필터의 저감효과에 대한 평가 필요성이 제기

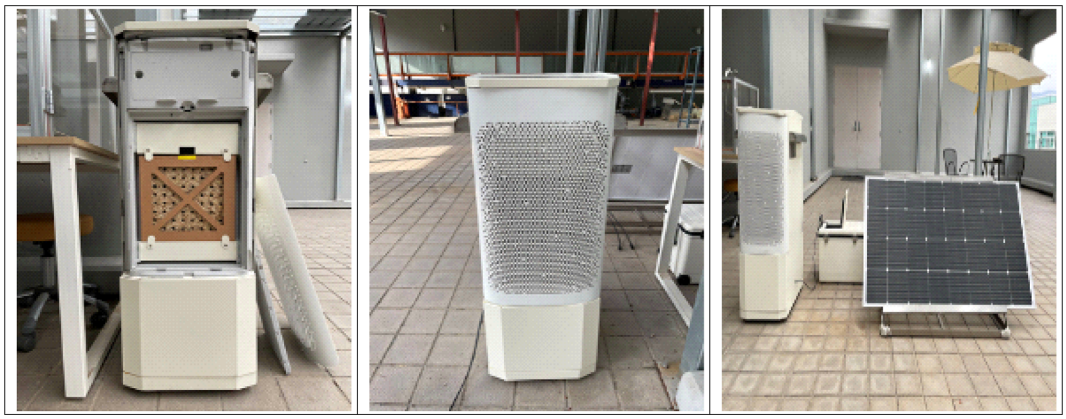


Fig. 3. Images of air inhalation equipment installed with fiberboard-based filtering set, which was placed on the outdoor laboratory of the Pyeongchang campus of Seoul National University, for measuring the filtering capacity of atmosphere pollution matters.

되었다. 이를 위하여 대형공간인 개방형 실험실에서 섬유판 필터세트에 대한 오염물질 여과능을 평가하였다. 개방형 실험실의 용적은 100 m^3 이상으로 한 면을 제외하고 나머지 면은 폐쇄된 공간으로 먼지 발생량이 많은 실험이 수시로 수행되며, 흡연이 허용된 공간인 관계로 섬유판 필터의 PM, TVOC, HCHO 여과능 측정에 적당한 것으로 판단되어 실험공간으로 결정하였다.

표층 그리고 목섬유와 COA로 구성된 심층에 각각 6%와 2%의 접착제를 적용하여 제조한 RWF 2장과 RWF 사이 및 최하단에 각각 KP-25g로 구성한 필터세트(이하 2-RWF-2+2-KP-25g) 그리고 목섬유로 구성된 표층 및 재생섬유와 COA로 구성된 심층에 각각 6%와 2%의 접착제를 적용하여 제조한 WRF 3장과 WRF 최하단에 1장의 KP-25g로 구성한 필터세트(이하 3-WRF-2+KP-25g)를 대형공간의 공기질 평가용 필터세트로 선정하였다. 선정된 WRF- 또는 RWF-기반 필터세트를 공기흡입장치에 각각 2세트를 내장한 후, 이를 서울대학교 평창캠퍼스에 위치한 개방형 실험실에 설치하였다(Fig. 3). 다음으로 공기흡입장치의 fan 속도를 “자동”으로 조정한 후, 각 필터세트마다 입경 1 μm 이하의 미세먼지(이하 PM 1), 입경 2.5 μm 이하의 초미세먼지(이하 PM 2.5), 입경 10 μm 이하의 먼지(이하 PM 10), TVOC, HCHO 농도를 공기흡입장치 상단에 위치한 실내공기질 측정기로 2023년 1월 11일부터 4월 19일까지 1시간마다 1주일 간격으로 3반복 측정하였다. 대조구로 무필터에 공기흡입장치의 fan을 작동 또는 무작동으로 조절한 조건(이하 No Filter-Fan Off, No Filter-Fan On)에서도 PM, TVOC, HCHO 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 실내 공기질 오염물질 여과능에 대한 섬유판 층별 접착제 함지율의 영향

섬유판 제조에 있어 표층과 심층을 구성하는 목섬유와 재생섬유에 각각 동일한 양(4%)의 접착제를 적용하여 제조한 섬유판(이하 WRF-0) 3장과 KP-25g 1장을 섬유판의 최하단에 넣어 제작한 섬유판 필터세트(이하 3-WRF-0+1-KP-25g)를 내장한 공기청정기를 실험실 후드 내에 설치한 후, 150분에 걸쳐 PM, TVOC, HCHO 농도를 측정한 결과는 Fig. 4와 같다. 또한 표층 목섬유와 심층 재생섬유에 접착제를 각각 5%와 3% 그리고 6%와 2%로 조절하여 WRF-1 및 WRF-2를 제조한 후, WRF-0과 동일한 조건으로 필터세트(3-WRF-1+1-KP-25g, 3-WRF-2+1-KP-25g)를 제작하였다. 이를 공기청정기에 내장시킨 후, 실험실 후드에서 가동하여 측정한 오염물질의 농도도 측정하였다. 한편 대조구로 실험실 후드 내에서 공기청정기를 가동시키지 않고 향의 무연소 및 연소 상태(No filter-Fan off)에서 측정한 오염물질의 농도도 측정하였다.

향의 연소없이 측정한 실험실 후드 내의 PM, TVOC, HCHO 농도는 예상대로 측정 전기간에 걸쳐 매우 낮은 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이 향의 연소와 함께 PM 1, TVOC 및 HCHO 농도는 측정기간(150분)동안 매우 높았으며, 특히 PM 2.5와 PM 10의 농도는 향의 연소 이후 30분이 경과한 시점부터 공기질 측정기의 측정 범위를 초과하였다. 이 측정치를 WRF-기반 필터세트를 설치한 공기청정기를 가동한 상태의 측정치와 3개 구간(1구간: 무필터 및 팬의 무가동 상태에서 입자상 물질인 PM이 측정공간 내에 포화된 시점인 0~30분; 2구간: PM이 포화된 상태를 유지하는 시점인 30~60분; 3구간: 섬유판 필터세트를 설치한 상태에서 PM 농도가 감소하는 시점인 60~100분)으로 구분하여 비교한 결과를 보면, 1구간의 20분까지 섬유판 필터세트를 설치하여 측정한 PM 농도는 No filter-Fan off보다 높았다. 이는 작은 공간에서 팬의 작동으로 PM이 빠르게 확산됨에 따라 측정기를 통하여 검출되는 PM 수가 증가하여 나타난 결과라 생각한다. 한편 2구간에서 섬유판 필터세트를 설치하여 측정한 PM 농도는 최대 600 μg/m^3로 조사되었으나, No filter-Fan off보다 크게 낮았다. 또한 3구간의 경우 섬유판 필터세트를 설치하여 가동한 상태에서 측정한 PM 농도는 점진적으로 감소하여 80~90분 이후부터 매우 낮았던 반면 No filter-Fan off 조건에서는 1,000 μg/m^3를 유지하였다. 이와 같은 변화는 TVOC와 HCHO 농도에서도 유사한 경향을 나타내었다. 결과적으로 섬유판 필터세트가 측정 공간 내에 존재하는 오염물질을 효과적으로 여과하는 것을 확인할 수 있었다.

필터세트를 구성하는 WRF에서 표층과 심층에 적용되는 함지율이 PM, TVOC, HCHO 여과에 미치는 영향을 분석한 결과, 표층을 구성하는 목섬유에 적용된 접착제 함지율이 증가함에 따라 PM, TVOC, HCHO 농도는 전반적으로 감소하였다(Fig. 4). 표층 목섬유에 적용되는 접착제의 함지율 증가는 심층 재생섬유에 적용되는 접착제의 함지율 감소를 의미하며, 결과적으로 심층에 존재하는 재생섬유 또는/그리고 COA 간의 결합정도 감소가 WRF 심층의 밀도 저하를 수반함에 따라 오염물질이 침투할 수 있는 공간이 증가하여 향의 연소와 함께 발생한 PM, TVOC와 HCHO가 용이하게 흡착되어 나타난 결과라 추정된다. 한편 표층에 적용되는 접착제 함지율의 증가는 섬유판의 강도 향상을 통한 취급성 개선 효과도 확보할 수 있는 것으로 나타냈다.

3-2. 섬유판 필터세트에서 한지 평량이 공기질 오염물질 여과능에 미치는 영향

상기 결과를 토대로 표층에 5% 또는 6%의 접착제를 적용한 목섬유와 심층에 3% 또는 2%의 접착제를 적용한 재생섬유로 제조한 섬유판(이하 WRF-1, WRF-2)을 섬유판 필터세트 구성을 위한 섬유판으로 선정하였다. 다음으로 섬유판 필터세트 구성에 있어 사용되는 한지의 평량이 PM, TVOC, HCHO 여과능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 3장 WRF 최하단에 KP-25g 또는 KP-45g로 구성된 섬유판 필터세트를 준비하였다. 이를 내장한 공기청정기를 실험실 후드에 설치한 후, 약 8시간동안 오염물질을 발생시키는 모기향을 연소하면서 측정한 PM, TVOC, HCHO 농도는 Fig. 5와 같다. 필터세트 제작에 사용된 WRF 및 한지의 종류와 무관하게 모기향을 연소한 이후 60분까지 시점(1구간)부터 PM 농도는 급격히 증가하였으며, 60분부터 450~480분이 경과한 시점(2구간)까지 최대 농도치를 나타내었다. 다음으로 모기향의 연소가 종료된 450~480분부터 감소하여 570분이 경과한 이후(3구간)부터 최저 농도치를 유지하였다.

한편 PM 1 농도의 측정결과를 구간별로 보면, 3장의 WRF-1을 사용하여 제작한 필터세트의 1구간에서 2구간까지 한지 평량에 따른 차이는 크지 않았으나, 3구간에서 KP-45g와 비교하여 KP-25g로 제작한 필터세트에서 빠르게 감소하여 낮은 것으로 나타났다. 이와 동일한 경향은 PM 2.5와 PM 10 농도에서도 관찰되었다. 반면 WRF-2의 경우, 2구간에서 KP-45g와 비교하여 KP-25g를 사용한 필터세트에서 PM 1 농도가 낮은 것을 명확하게 확인할 수 있었

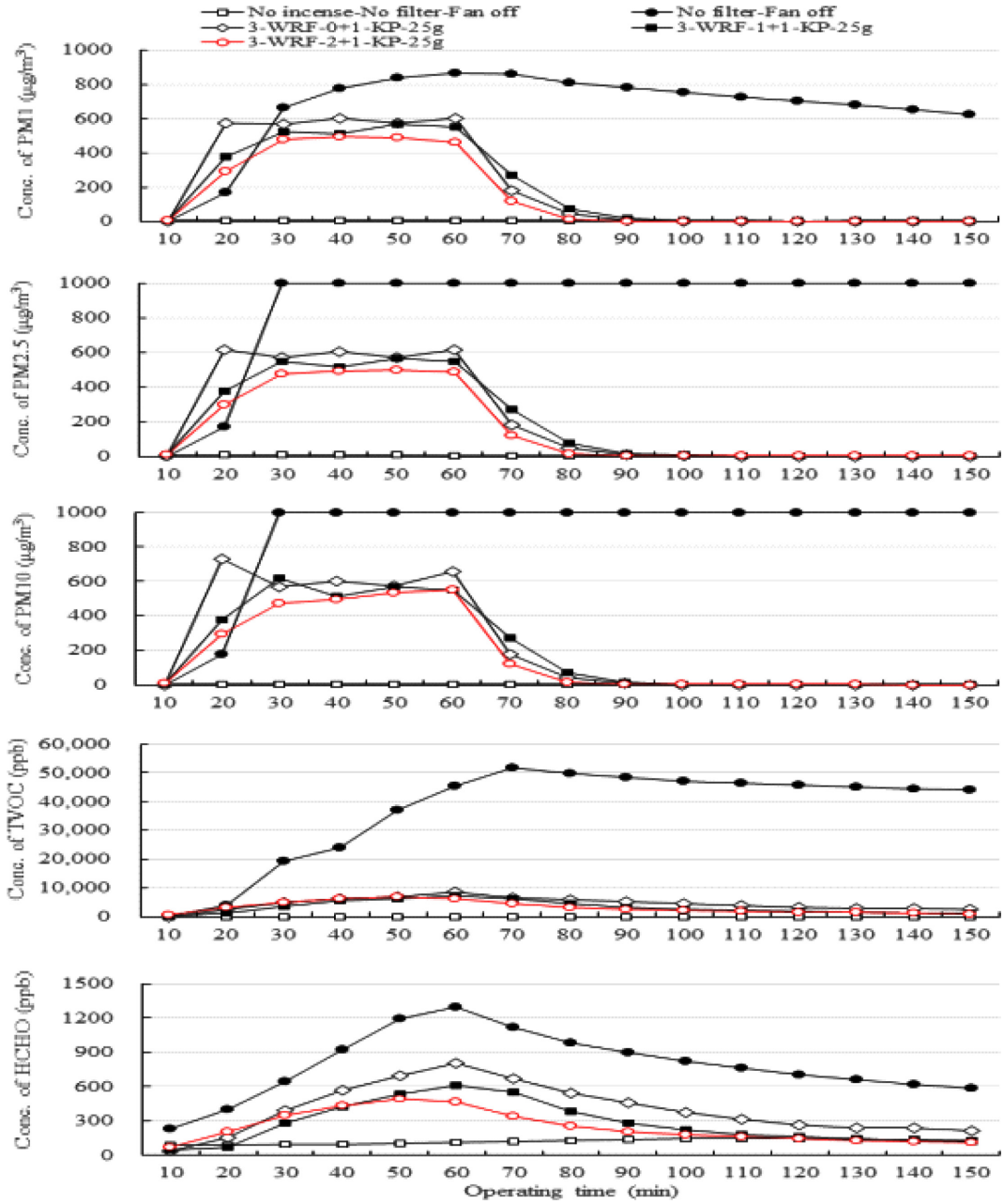


Fig. 4. Effects of resin content of layers composed of fiberboard on the PM (PM 1-1st row; PM 2.5-2nd row; PM 10-3rd row), TVOC (4th row) and HCHO (5th row) concentrations of fiberboard-based filtering set with 1-burning incense in laboratory hood at which air purifier (AP) was installed with a kit for measuring indoor air quality by the operating time.

으나, 3구간에서는 차이가 없었다. 이와 같은 결과는 한지 평량의 감소와 함께 필터박스를 통과하는 유량이 증가함에 따라 실험실 후드 내에서 공기순환이 증가하여 KP에 여과되는 PM 1이 증가하여 나타난 결과라 판단된다. 한편 WRF-2와 KP-25g로 제조한 필터세트(3-WRF-2+1-KP-25g)를 제외한 타 필터세트의 PM 2.5 및 PM 10 농도는 1구간과 2구간에서 공기질 측정기로 측정할 수 있는 최대 농도치인 1,000 μg/m^{3}을 초과하는 것으로 조사되었다. 이는 모기향의 연소와 함께 다량의 PM 2.5와 PM 10이 발생하여 나타난 결과라 생각한다. 그러나 3-WRF-2+1-KP-25g를 설치하여 측정한 PM 2.5 농도는 2구간의 150분 및 300분에서 800 μg/m^3 전후로 일시적으로 감소한 후, 1,000 μg/m^{3}으로 다시 증가하였다. 또한 3구간에서는 한지 평량과 상관없이 3-WRF-2를 이용하여 측정한 PM 2.5 및 PM 10 농도는 3-WRF-1보다 낮았다. 이와 같은 결과는 모기향의 연소에 의하여 발생되는 PM 2.5와 PM 10의 여과는 한지 평량 외에 섬유판의 영향이 있다는 것을 의미한다. 상기 결과를 종합하면, 크기가 작은 PM 1은 KP 그리고 PM 2.5와 PM 10은 WRF에 의한 여과 역할을 주로 담당하는 것으로 추정된다. 그러나 이 추론을 확인하기 위하여 WRF와 KP에 대한 현미경 관찰 또는 섬유판 필터세트의 중량증가율 평가 등과 같은 추가 연구가 필요할 것으로 생각한다.

TVOC 농도는 WRF-2로 구성한 필터세트에서 측정구간 전체에 걸쳐 KP의 영향은 크지 않았으나, WRF-1의 경우 KP-45g보다

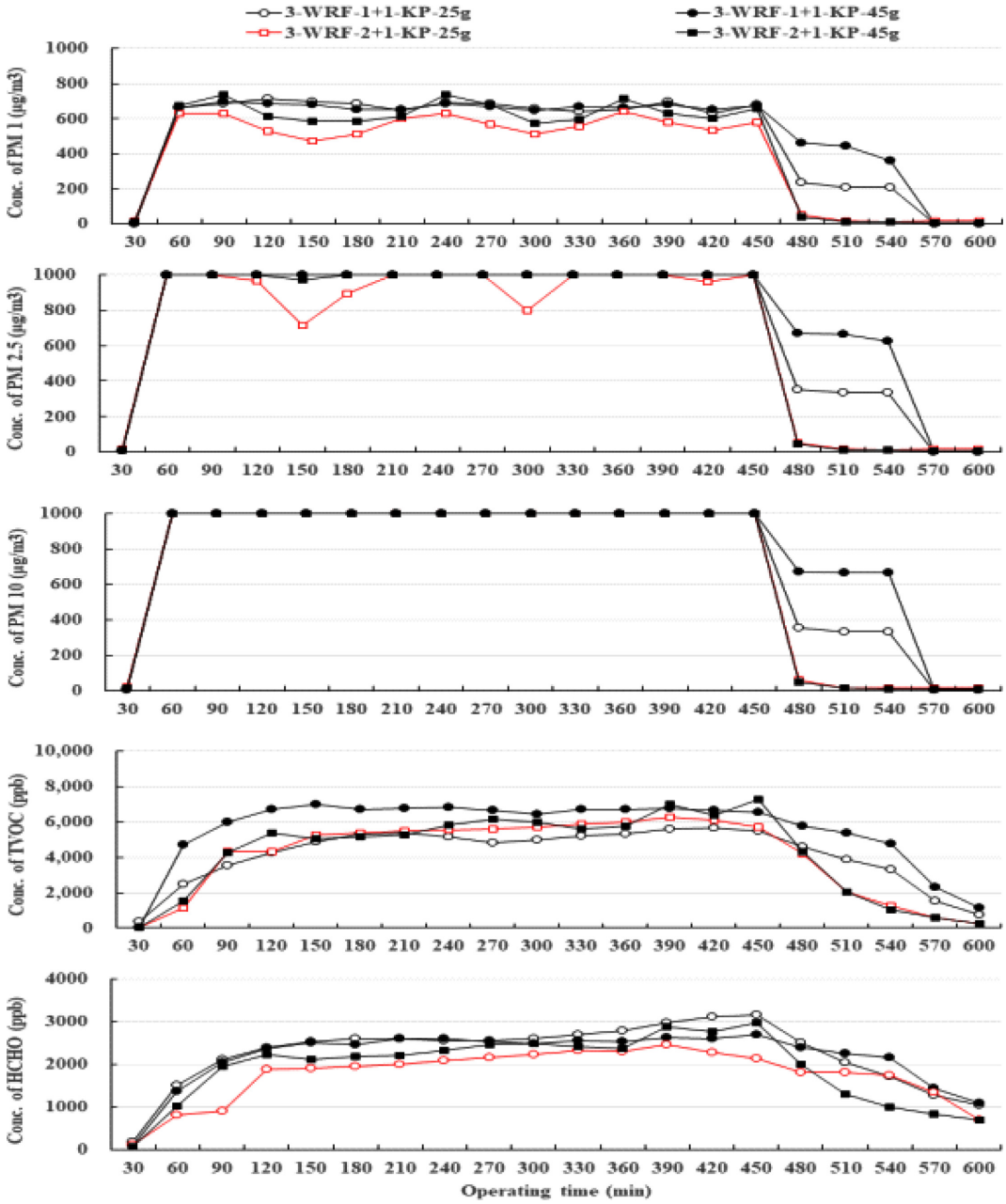


Fig. 5. Effects of resin content of layers composed of fiberboard and basis weight of Hanji on the PM (PM 1-1st row; PM 2.5-2nd row; PM 10-3rd row), TVOC (4th row) and HCHO (5th row) concentrations of fiberboard-based filtering set with 1-burning mosquito incense in laboratory hood at which air purifier (AP) was installed with a kit for measuring indoor air quality by the operating time.

KP-25g로 구성한 필터세트에서 낮았다(Fig. 5). 특히 3-WRF-1+1-KP-45g를 이용하여 측정한 TVOC 농도는 타 필터세트보다 측정기간 대부분에서 가장 높았다. 한편 2구간에서 WRF-1과 WRF-2를 이용하여 각각 제조한 필터세트로 측정한 TVOC 농도에는 차이가 없었으나, 1구간 및 3구간에서 WRF-2로 제작한 필터세트에서 낮게 측정되었다. 즉 KP-45g보다 KP-25g를 사용한 필터세트에서 전체적으로 TVOC 농도가 낮았다. 반면 HCHO 농도는 전체 측정구간에서 모든 필터세트 간의 큰 차이는 없었으나, 3-WRF-2+1-KP-25g에서 전반적으로 낮았다. 이와 같은 결과는 KP-25g의 사용으로 KP-45g보다 필터세트를 통과하는 유량이 증가하여 섬유판 필터세트를 구성하는 COA와 목섬유/재생섬유에 흡착되는 TVOC 및 HCHO 양이 증가하여 나타난 결과라 판단된다. 한편 협소한 공간인 실험실 후드에서 모기향의 연소는 8시간동안 다량의 PM 2.5와 PM 10을 발생시킴에 따라 공기질 측정기로 측정할 수 있는 최대치를 초과하는 것으로 나타나 이를 이용한 섬유판 필터세트의 오염물질 여과능 비교는 적합하지 않을 것으로 생각한다.

3-3. 공기질 오염물질 여과능에 대한 섬유판 표층에 사용된 섬유 종류의 영향

Fig. 6은 표층에 사용된 목섬유를 재생섬유로 그리고 심층에 목섬유와 활성탄으로 제조한 섬유판(이하 RWF)에 한지와 함께 섬유판 필터세트를 제작하고, 실험실 후드에 이를 내장한 공기청정기에 설치한 후, 일반 향의 연소와 함께 PM, TVOC, HCHO 여과도를 측정한 결과이다.

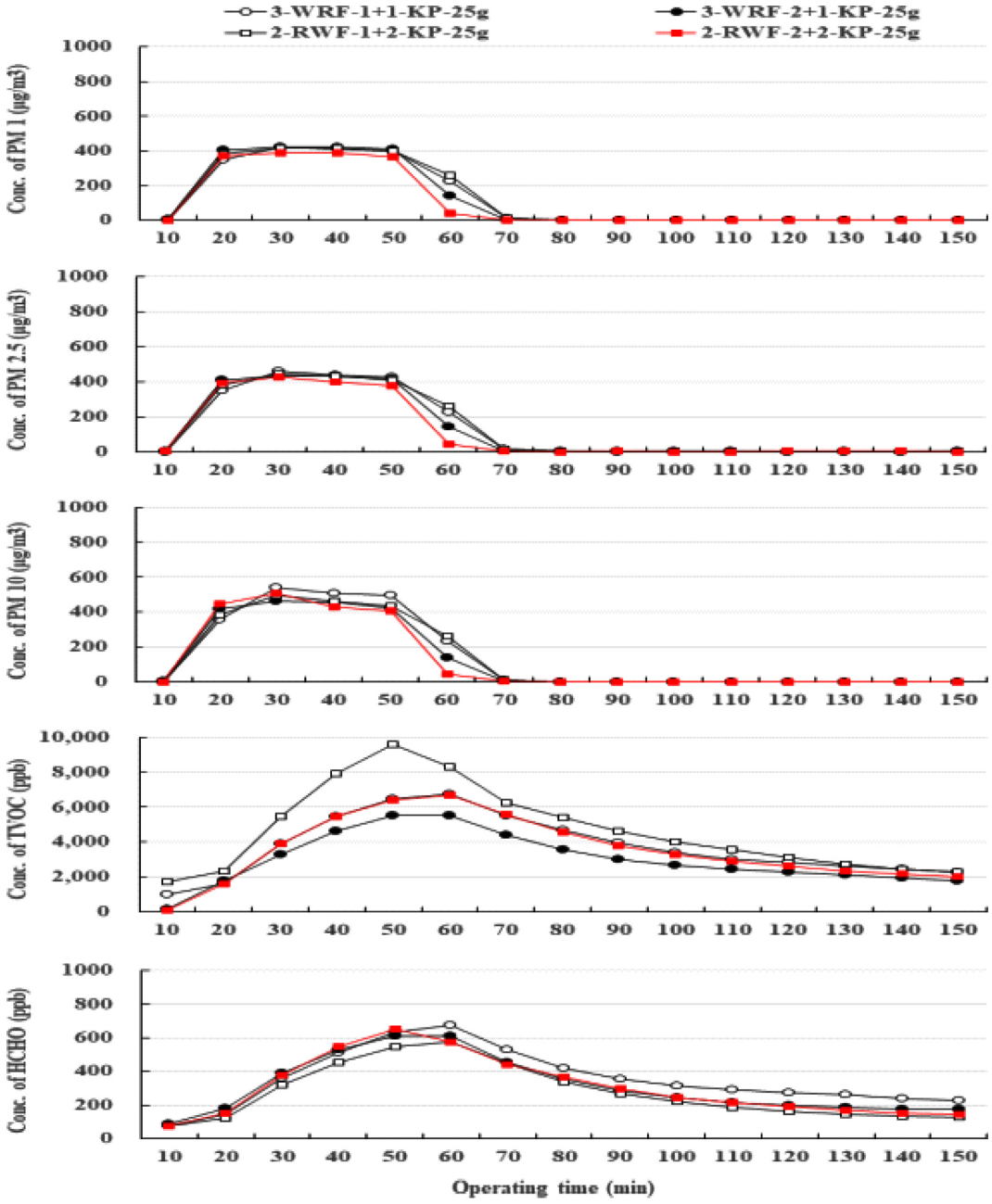


Fig. 6. Effects of resin content of layers and fiberboard type on the PM (PM 1-1st row; PM 2.5-2nd row; PM 10-3rd row), TVOC (4th row) and HCHO (5th row) concentrations of fiberboard-based filtering set with 1-burning incense in laboratory hood at which air purifier (AP) was installed with a kit for measuring indoor air quality by the operating time.

표층에 사용한 목섬유 및 재생섬유에 5%의 함지율로 제조한 WRF- 및 RWF-기반 필터세트(3-WRF-1+1-KP-25g, 2-RWF-1+2-KP-25g)보다 6%의 함지율로 제조한 3-WRF-2+1-KP-25g와 2-RWF-2+2-KP-25에서 PM 농도가 낮았는데 이는 섬유판 심층에 적용되는 접착제의 함지율 감소로 밀도가 저하됨에 따라 심층 내로 PM이 침투할 수 있는 공간을 증가시켜 나타난 결과라 생각한다.

한편 측정공간 내에서 향의 연소로 PM이 계속 발생되어 최대 농도치(400~450 μg/m^3)를 유지하는 20분~50분 구간에서는 섬유판의 종류와 장수 및 한지의 장수에 의한 PM 농도의 차이가 크지 않았다. 반면 연소가 종료되어 PM 발생이 중지된 시점(50~60분 구간)에서 PM 농도가 저감되는 속도를 비교한 결과 2-RWF-2+2-KP-25g의 저감속도가 가장 컸으며, 3-WRF-2+1-KP-25g, 3-WRF-1+1-KP-25g, 2-RWF-1+2-KP-25g 순으로 나타났다. 이 결과를 토대로 RWF-기반 섬유판 필터세트에서도 표층에 적용된 함지율이 높을수록 효과적으로 PM을 여과하는 것을 확인할 수 있었다.

섬유판 필터세트에 의한 TVOC 농도의 저감능 측정결과를 보면, 2장의 RWF로 제작한 필터세트보다 3장의 WRF로 제작한 필터세트에서 낮았는데 이는 필터세트를 구성하는 섬유판 장수의 차이에서 기인한 결과라 판단된다. RWF-기반 필터세트에서 2장의 RWF를 사용한 이유는 섬유판의 내장을 위하여 4 cm 두께로 제작한 골판지 필터박스에 KP와 함께 RWF를 삽입하는 과정에서 모서리 부분이 부분적으로 파괴되어 필터박스에 2장의 RWF만을 삽입하였다.

이에 대한 해결방안으로 3장의 RWF가 필터세트에 용이하게 삽입될 수 있도록 필터박스의 두께를 6 cm로 증가시켰으며, 현재 이를 이용하여 RWF-기반 필터세트를 제작한 후, 이에 대한 공기질 오염물질 여과능 평가를 진행하고 있다. 필터세트 구성에 있어 RWF 장수의 영향 외에 2장의 KP-25g를 사용함에 따라 단위시간당 필터세트를 통과하는 유량이 감소하여 RWF-2-기반 필터세트의 TVOC 흡착능이 감소한 것으로 사료된다. 그러나 섬유판 필터세트의 TVOC 농도 저감능은 필터없이 공기청정기의 팬을 가동한 상태보다 효과적인 것으로 조사되었다. 이에 대한 결과는 다음 절에서 설명하였다. 한편 HCHO 농도의 경우, 전체 측정기간에 걸쳐 2-RWF-1+2-KP-25g에서 가장 낮았으며, 그 외의 섬유판 필터세트에서도 HCHO 농도를 저감한 것으로 나타났다. 상기 결과로부터 RWF- 및 WRF-2-기반 필터세트가 HCHO를 효과적으로 흡착하는 것을 확인할 수 있었다.

섬유판-기반 필터세트의 실내 공기질 오염물질 여과능 결과를 종합하면, 섬유판의 심층에 적용되는 접착제의 함지율을 감소시키고, KP-45g와 비교하여 평량이 낮은 KP-25g의 사용에 의하여 필터세트를 통과하는 단위시간당 유량의 증가가 최적의 섬유판 필터세트 구성조건인 것으로 생각한다. 또한 섬유판 표층에 재생섬유 그리고 심층에 목섬유를 사용하는 것이 공기질 측정공간에서 오염물질 농

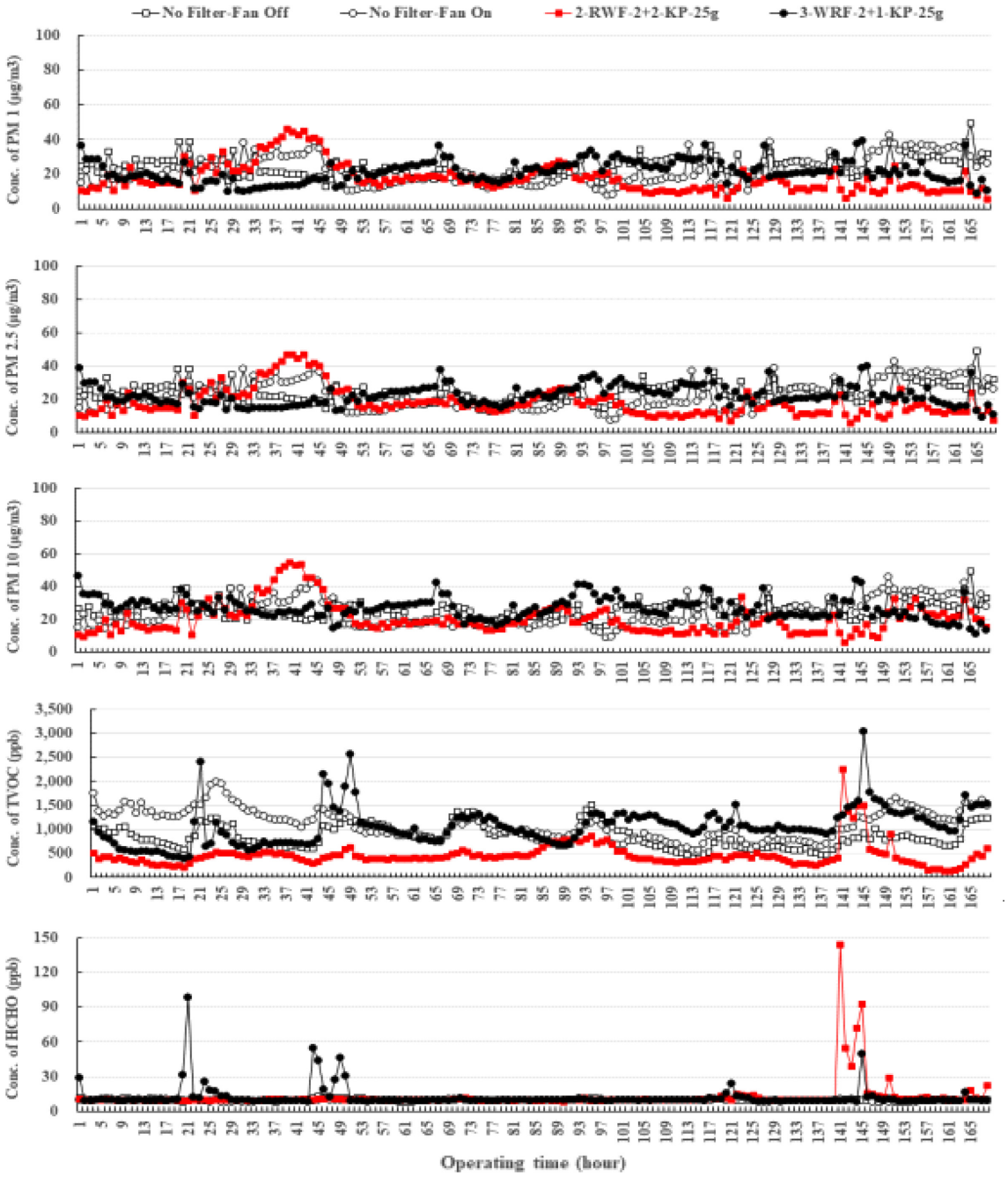


Fig. 7. Effect of fiberboard-based filtering sets, which were composed of WRF or RWF, on the PM (PM 1-1st row; PM 2.5-2nd row; PM 10-3rd row), TVOC (4th row) and HCHO(5th row) concentrations. Air inhalation equipment installed with WRF or RWF was placed at outdoor laboratory in Pyeongchang campus of Seoul National University with a kit for measuring air quality.

도를 효과적으로 저하시키는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 3-WRF-2+1-KP-25g 및 2-RWF-2+1-KP-25g를 실외 공기질 개선을 위한 필터세트로 평가하는 것으로 결정하였다.

3-4. 대형 옥외공간에서 섬유판 필터세트의 오염물질 여과능

서울대학교 평창캠퍼스에 위치한 개방형 실험실은 대형공간으로서 섬유판 필터세트를 내장한 공기흡입장치를 이 공간에서 가동한 상태에서 1주일동안 측정한 PM 1 농도는 대조구인 무필터 조건과 비교하여 측정 초기부터 중반까지 차이가 없거나 약간 낮았으나, 후반에는 효과적으로 여과하는 것으로 나타났다(Fig. 7). 특히 2-RWF-2+2-KP-25g에서 3-WRF-2+1-KP-25g보다 측정기간 전체에 걸쳐 PM 1 농도가 낮았다. 이와 유사한 결과는 PM 2.5와 PM 10 농도에서도 나타났다. 따라서 2-RWF-2+2-KP-25g를 내장한 공기흡입장치를 본 연구에서 설정한 조건으로 가동할 경우 대형공간에 존재하는 PM 농도를 효과적으로 저감할 수 있을 것으로 생각한다. TVOC 농도는 측정기간 전체에 걸쳐 무필터 및 3-WRF-2+1-KP-25g보다 2-RWF-2+2-KP-25g에서 낮은 것으로 나타나 PM 뿐만 아니라 TVOC의 효과적인 흡착을 통하여 여과하는 것으로 생각한다. 한편 2-RWF-2+2-KP-25g를 사용하여 측정한 TVOC 농도가 141~145시간에서 크게 증가하였는데 이는 대형공간에서 흡연에 의하여 발생한 결과라 추정된다. 반면 3-WRF-2+1-KP-25g의 경우, TVOC 농도는 전반적으로 2-RWF-2+2-KP-25g보다 높았는데 이는 3장의 WRF-2의 사용으로 섬유판 필터세트를 통과하는 단위시간당 유량이 감소함에 따라 섬유판 내에서 TVOC를 주로 흡착하여 여과할 것으로 예상되는 활성탄에 TVOC 흡착량이 감소하여 나타난 결과라 사료된다. 반면 무필터의 경우, 전체 측정기간 중에 높은 TVOC 농도를 유지하였으며, 특히 팬을 가동하지 않은 상태보다 가동한 상태에서 높았다. 이는 팬의 가동과 함께 공기흡입장치가 주변에 오염된 외기를 흡입함에 따라 나타난 결과라 생각한다. HCHO 농도는 필터의 종류 및 팬 가동여부에 영향을 크게 받지 않았는데 이는 실험공간에서 HCHO가 발생하지 않았거나, 외기가 필터세트를 빠르게 통과하여 나타난 결과라 추정된다. 한편 섬유판 필터세트를 내장하여 측정한 HCHO 농도는 일부 시간에서 매우 높았는데 이는 전술한 바와 같이 공기흡입장치 상단에 설치된 공기질 측정기 주변에서 흡연에 의하여 나타난 결과라 생각한다.

3-5. 섬유판 필터세트의 실내외 공기질 오염물질의 여과능 향상을 위한 제안

다양한 종류의 섬유판 필터세트를 공기청정기 및 본 연구를 위하여 제작한 공기흡입장치에 내장한 후, 소형 및 대형 공간에 설치하여 일정 시간에 걸쳐 측정한 오염물질 여과능 결과를 종합하면, 섬유판 필터세트는 PM, TVOC, HCHO를 효과적으로 여과하는 것으로 조사되었다. 한편 섬유판 필터세트의 입자상 물질 여과와 TVOC, HCHO 흡착능 향상을 위한 방안으로 필터세트 내에 최소 3장 이상의 섬유판을 삽입하거나, 섬유판 또는 KP-25g의 표면적을 증가시키기 위하여 평면형에서 기존 공기청정기에 사용되고 있는 부직포 필터와 같이 주름형으로 제조하여 사용하는 방안을 확인할 필요가 있을 것으로 생각한다. 그러나 이와 같은 방안을 적용할 경우 섬유판의 강도가 저하되거나, 섬유판 필터세트의 두께가 증가하여 공기흡입장치에서 필터박스 삽입부의 두께 증가가 필요한 관계로 제조비용의 상승이 예상되어 상용화를 위하여 이에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 생각한다.

Table 1. Velocity of passed through the air filtering set, which was composed of synthetic fiber-based non-woven fabrics filter and activated carbon filter, and fiberboard-based filtering set installed in a conventional air purifier

Speed	Conventional air filtering set	Fiberboard-based filtering set
Weak	2.2~2.3 m/sec	0.5 m/sec
Medium	2.7~2.8 m/sec	0.6 m/sec
Strong	3.3~3.4 m/sec	0.7~0.8 m/sec

다음으로 섬유판 필터세트의 형태를 현재와 동일하게 유지한 상태에서 외기를 흡입하는 공기청정기 또는 공기흡입장치에서 단위시간당 섬유판 필터세트를 통과하는 유량을 증가시키는 방안의 적용도 가능할 것으로 생각한다. 이에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여 망상 형태의 pre-필터, 부직포 필터, 활성탄 필터로 구성된 공기청정기 필터와 본 연구를 통하여 제조한 섬유판 필터세트를 공기청정기에 내장한 후, 유속을 일정하게 유지한 상태에서 후면에서 유출되는 유속을 측정하였다(Table 1). 섬유판 필터세트를 내장한 상태에서 측정한 유속은 공기청정기 필터의 20% 수준인 것으로 조사되었다. 공기청정기 필터는 부직포로 제조한 필터가 강한 유속에 의하여 찢어질 수 있어 유속을 제한하는 반면 섬유판 필터세트는 고강도의 타공 섬유판의 사용으로 강한 유속에도 강도 및 형상을 유지할 수 있어 공기흡입장치의 유속을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 생각한다. 이와 같이 섬유판 필터세트를 통과하는 유량이 증가함에 따라 공기질 오염물질을 효과적으로 여과할 수 있을 것으로 판단된다. 현재 이를 위하여 유속을 크게 증가시킨 공기흡입장치를 제작하고 있으며, 이를 이용한 현장 적용연구를 통하여 향후 필터세트를 통과하는 유량과 오염물질 여과능과의 상호관계를 정립할 예정이다.

4. 결 론

선행연구를 통하여 리그노셀룰로오스 섬유와 목재 수피-기반 활성탄으로 제조한 섬유판의 PM, TVOC 여과능을 확인하였다. 따라서 다양한 조건으로 제조한 섬유판과 한지로 구성된 섬유판 필터세트를 제작하였다. 이를 내장한 공기청정기 또는 자제 제작한 공기흡입장치를 실내외 공간에 공기질 측정기와 함께 설치한 후, 일반향 또는 모기향의 연소와 함께 가동시키면서 PM, TVOC, HCHO 농도를 측정하여 섬유판 필터의 각 대기 오염물질에 대한 여과능을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 표층에 목섬유 그리고 심층에 재생섬유와 활성탄으로 제조한 3층 섬유판(WRF)과 한지로 제작한 필터세트는 소형공간인 실험실 후드 내에서 일반향의 연소로 발생한 PM, TVOC, HCHO를 효과적으로 여과하였다. WRF 제조에 있어 표층에 적용되는 합지율의 증가와 이에 따른 심층에 적용되는 함지율의 감소가 WRF-기반 필터세트의 PM, TVOC, HCHO 여과능 향상에 영향을 미쳤다.

(2) 모기향을 연소한 상태에서 WRF-기반 섬유판 필터세트의 PM, TVOC, HCHO 여과능을 3구간으로 나누어 분석하였는데 구간별 차이는 있었으나, 고평량의 한지(KP-45g)보다 저평량의 한지(KP-25g)의 여과능이 효과적인 것으로 조사되었다.

(3) 섬유판 제조에 있어 표층에 목섬유를 대신하여 재생섬유를 사용하고 심층에 목섬유와 활성탄을 사용하여 제조한 섬유판(RWF)에 KP-25g와 함께 제작한 필터세트의 PM 및 HCHO 여과능은 WRF-기반 필터세트와 비교하여 향상되었다. 또한 RWF 제조에 있어 표층에 적용되는 함지율의 증가와 함께 PM, TVOC, HCHO 여과능도 개선되었다

(4) 대형공간에서 조사한 섬유판 필터세트의 PM, TVOC, HCHO 여과능 측정결과를 보면, 무필터 측정치와 비교하여 RWF-기반 필터세트는 PM 및 TVOC를 효과적으로 여과하는 것으로 나타났다.

(5) 결과를 종합하면, 섬유판 필터세트는 전반적으로 PM, TVOC, HCHO를 효과적으로 여과하였다. 특히 RWF와 KP-25g를 조합하여 제작한 섬유판 필터세트의 PM, TVOC, HCHO 여과능이 본 연구에서 평가된 섬유판 필터세트 가운데 가장 우수한 것으로 조사되었으며, 따라서 이를 이용한 현장 적용연구를 통하여 상용화 가능성을 확인하는 추가 연구를 수행하고 있다.

본 연구에서 도출된 결과를 토대로 필터세트 내에 섬유판의 장수를 증가시키거나 표면적 향상을 위하여 주름형으로 제조하는 방안의 적용이 여과능 향상에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 현재 공기청정기에 사용되는 부직포 필터와 비교하여 섬유판 필터세트를 구성하는 WRF 및 RWF의 강도가 크게 강한 관계로 강한 유속에서도 형상을 유지할 수 있어 단위시간당 필터를 통과하는 유량을 증가시킬 수 있는 전용 공기흡입장치에 설치할 경우 여과능은 크게 향상될 것으로 예상되며, 현재 이에 대한 연구를 진행하고 있다. 이 결과에 따라 지하철 터널 내에서 전동차에 의하여 발생하는 강한 유속의 대기 오염물질 배출구에 섬유판 필터세트의 적용 여부를 판단할 수 있을 것으로 생각한다.

감 사

본 연구는 산림청의 “산림과학기술 실용화 지원사업의 산림과학기술 우수연구성과 후속 기술개발” 지원사업에 의하여 수행되고 있습니다(2023504A00-2323-AB01). 섬유판 제조에 있어 목섬유 및 왁스를 제공하여 주신 ㈜ 유니드의 박진학과장님을 포함한 임직원님들과 돈모 및 돈혈을 제공하여 주신 전북 김제시 소재 목우촌의 임직원분들에게 감사드립니다.

References

1. Ciencewicki, J. and Jaspers, I., “Air Pollution and Respiratory Viral Infection,” *Inhal. Toxicol*., **19**(14), 1135-1146(2007).
2. Morabet, R. E., Effects of Outdoor Air Pollution on Human Health. In Encyclopedia of Environmental Health, 2nd Ed., Elsevier, Amsterdam, 278-286(2019).
3. Fan, Z. and Lin, L., Exposure Science: Contaminant Mixtures. In Encyclopedia of Environmental Health, Elsevier, Amsterdam, 645-656(2011).
4. Lee, C. H., “Developing Technologies and Evaluating Method for Various Filters,” Korea Textile Development Institute(2019). http://super.textopia.or.kr:8888/newsletter/170404/lib0201.pdf. [accessed at January 13, 2020].
5. Mao, J., Grgic, B., Finlay, W. H., Kadla, J. F. and Kerekes, R. J., “Wood Pulp Based Filters for Removal of Sub-micrometer Aerosol Particles,” *Nord. Pulp Paper Res. J*., **23**(4), 420-425(2008).
6. Mao, J., Kadla, J. F. and Kerekes, R. J., “Retaining Surface Fibrillation of Wet-beaten Wood Pulp in the Dry State,” *Tappi J*., July, 25-30(2009).
7. Macfarlane, A. L., Kadla, J. F. and Kerekes, R. J., “High Performance Air Filters Produced from Freeze-dried Fibrillated Wood Pulp: Fiber Network Compression due to the Freezing Process,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **51**(320), 10,702-10,711(2012).
8. Jonoobi, M., Oladi, R., Davoudpour, Y., Oksman, K., Dufresne, A., Hamzeh, Y. and Davoodi, R., “Different Preparation Methods and Properties of Nanostructured Cellulose from Various Natural Resources and Residues: A Review,” *Cellulose*, **22**, 935-969(2015).
9. Du, D., Guo, X., Xu, Y. and Yang, X., “Performance Study about a New Kind Wood Fiber Filter Element Utilized in Capturing Diesel Particulate Material,” *J. Wood Sci.*, **65**, 12(2019).
10. Guo, X., Ha, K.H. and Du, D., “New Experiment of Diesel Exhaust Treatment by Atmospheric Pressure Plasma–wood Fiber Combination,” *Catalysts*, **10**, 577(2010).
11. Yang, Q., Zhao, G., Wu, Y., Zhang, B., Hu, J., Hui, L. and Liu, Z., “Lab-scale Design of Two Layers Wood Cellulose Filter Media to Maximize Life Span for Intake Air Filtration,” *Sci. Re.*, **11**, 3153(2021).
12. Hutten, I. M., Raw Materials for Nonwoven Filter Media, In Handbook of nonwoven filter media. Elsevier, Amsterdam, 122-144(2007).
13. Guo, X., Ha, K. H. and Du, D. “New Experiment of Diesel Exhaust Treatment by Atmospheric Pressure Plasma–Wood Fiber Combination,” *Catalysts*, **10**(5), 577(2020).
14. Kim, M., Jang, Y. and Park, D., “Determination of the Optimum Removal Efficiency of Fine Particulate Matter Using Activated Carbon Fiber (ACF),” *IJERPH*, **17**(21), 8230(2020).
15. Das, D., Gaur, V. and Verma, N., “Removal of Volatile Organic Compound by Activated Carbon Fiber,” *Carbon*, **42**, 2949-2962(2014).
16. Kim, S. Y., Yoon, Y. H. and Kim, K. S. “Performance of Activated Carbon-impregnated Cellulose Filters for Indoor VOCs and Dust Control,” *IJEST*, **13**, 2189-2198(2006).
17. Nwali, C. J., “Volatile Organic Compounds Removal by Adsorption on Activated Carbon Filters,” *Int. J. Adv. Res. Chem. Sci*., **1**(3), 38-43(2014).
18. Huang, S., Chung, T. and Wu, H., “Effects of Molecular Properties on Adsorption of Six-carbon VOCs by Activated Carbon in a Fixed Adsorber,” *ACS Omega*, **6**(8), 5825-5835(2021).
19. Choi, Y. J., Lee, Y. S. and Im, J. S., “Effect of Pore Structure of Activated Carbon Fiber on Mechanical Properties,” *J. Ind. Eng. Chem*., **29**, 318-324(2018).
20. Yang, I., Park, D., Choi, W., Oh, S. C., Ahn, D. and Han, G. “Reaction Mechanism and Curing Characteristics of Chicken Feather-Based Adhesives and Adhesive Properties of Medium-Density Fiberboard Bonded with the Adhesive Resins,” *Korean Chem. Eng. Res*. **55**(3), 385-394(2017).
21. Yang, I., So, J. M., Hwang, J. W., Choi, J. W., Lee, Y., Choi, W., Oh, S. W. and Moon, M. C., “Evaluating the Applicability of Activated Carbon-added Fiberboard Filters Fabricated with Lignocellulosic Fiber for the Reduction Equipment of Particulate

Matter," *Korean Chem. Eng. Res*., **59**(4), 548-556(2021).
22. Thévenon, M., Tondi, G. and Pizzi, A. "Environmentally Friendly Wood Preservative System Based on Polymerized Tannin Resin-boric Acid for Outdoor Application," *Maderas. Cienciay Tecnología*, **12**(3), 253-257(2010).

Authors

Young-kyu Lee: Research Professor, National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea; woodlee9@snu.ac.kr
Yeong Seo Choi: Researcher, Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Korea; choiys91@snu.ac.kr
Myoung cheol Moon: President, Happyhomwoodtech Co. Ltd., Muan-gun, 58544, Korea; hwt6300@naver.com
Jae min So: Product Manager, Happyhomwoodtech Co. Ltd., Muan-gun, 58544, Korea; happyhom86@daum.net
Ohkyung Kwon: Research Professor, National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea; zoom@snu.ac.kr
Wonsil Choi: Research Professor, National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea; choialla@snu.ac.kr
Joon weon Choi: Professor, Graduate College of International Agricultural Technology, Seoul National University, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Korea; cjw@snu.ac.kr
In Yang: Research Professor, Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang-gun, Gangwon-do, 25354, Korea; dahadad@snu.ac.kr