

## 리그노셀룰로오스 섬유 기반 활성화탄-첨가 섬유판 필터의 미세먼지 저감장치용 적용가능성 평가

양 인\* · 소재민\*\* · 황정우\*\*\* · 최준원\* · 이영규\*\*\*\* · 최원실\*\*\*\* · 오승원\*\*\* · 문명철\*\*†

\*서울대학교 평창캠퍼스 그린바이오과학기술원  
25354 강원도 평창군 대화면 평창대로 1447  
\*\*(주) 행복홈우드테크

58544 전남 무안군 청계면 청계공단길 40-9  
\*\*\*전북대학교 농업생명과학대학 목재응용과학과  
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567  
\*\*\*\*서울대학교 농생명과학공동기기원

08826 서울특별시 관악구 관악로 1

(2021년 4월 19일 접수, 2021년 6월 21일 수정본 접수, 2021년 7월 1일 채택)

## Evaluating the Applicability of Activated Carbon-added Fiberboard Filters Fabricated with Lignocellulosic Fiber for the Reduction Equipment of Particulate Matter

In Yang\*, Jae min So\*\*, Jeong Woo Hwang\*\*\*, Joon weon Choi\*, Young-kyu Lee\*\*\*\*, Wonsil Choi\*\*\*\*, Seung Won Oh\*\*\* and Myoung cheol Moon\*\*†

\*Institutes of Green Bio Science & Technology, Seoul National University, Pyeongchang, Gangwon-do, 25354, Korea  
\*\*Happyhomewoodtech Co. Ltd., Muan, Jeollanam-do, 58544, Korea

\*\*\*Department of Wood Science Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeollabuk-do, 54896, Korea

\*\*\*\*National Instrumentation Center for Environmental Management, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

(Received 19 April 2021; Received in revised from 21 June 2021; Accepted 1 July 2021)

### 요 약

본 연구는 부직포의 환경오염 문제를 해결하기 위하여 리그노셀룰로오스 섬유와 야자각 활성화탄(CSA)을 이용한 미세먼지-저감 여과필터의 제조 가능성을 조사하였다. CSA의 경우, 휘발성 유기화합물(VOC)과 유해금속의 저감을 위한 여과필터 제조용 원료로서 적용 가능성을 확인하였으며, CSA의 VOC 저감효과는 목섬유보다 5배 이상으로 측정되었다. 돈모, 인모, 돈혈과 같은 단백질계 원료와 낙엽송 수피 열수 추출물을 이용하여 조제한 천연접착제를 적용하여 최소 200 kg/m<sup>3</sup>의 목표밀도와 함께 최대 40 wt%의 CSA로 제조된 섬유판은 취급이 가능한 강도를 보유한 것으로 나타났다. 그러나 이 조건에서 제조된 섬유판의 경우, 통기성이 낮아 이를 해결하기 위하여 통기구를 가진 섬유판의 제조가 요구되었다. 활성화탄으로 사용한 CSA는 강도 및 성형성을 고려하여 입자의 크기는 2 mesh 이상으로 조절이 필요하였고, 표층에는 목섬유만 심층에는 목섬유와 활성화탄으로 구성된 3층 섬유판으로 제조하는 방안이 최적조건으로 도출되었다. 한편 필터지(한지)는 우수한 미세먼지 여과능을 가진 것으로 조사되었으며, 결과적으로 타공 섬유판과 함께 한지로 구성된 여과필터 세트가 부직포로 생산되고 있는 기존 여과필터를 대신하여 실내외 공간에 존재하는 미세먼지 외에 VOC와 유해금속 등의 저감장치용 여과필터로서 사용이 가능한 것으로 나타났다.

**Abstract** – This study was conducted to investigate the applicability of lignocellulosic fiber and coconut shell activated carbon (CSA) for the production of a particulate matter (PM)-reducing air-filter as raw materials to solve the environmental problems of non-woven fabrics. CSA had a good potential to use as a raw material of air-filter for reducing volatile organic compounds as well as noxious metals, and reduction capability of the CSA was 5 times higher than that of wood fiber. Natural adhesives formulated with proteinaceous wastes mostly were applied successfully to fabricate air-filters with the shape of fiberboard. The air-filter fabricated with the minimum target density of 200 kg/m<sup>3</sup>

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hwt6300@naver.com, happyhom86@daum.net

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.

and the maximum CSA-content of 40 wt% in fiberboard had a good manageable strength. However, the fiberboard filters was required to make vent-holes for improving an air-permeability of the filters. Size of the CSA particles was adjusted to greater than 2 mesh with the consideration of strength and formability of the fiberboard. Three-layers fiberboard that only wood fiber and the mixture of wood fiber and CSA were formed in the surface and middle layers, respectively, was determined to the optimal condition for the production of air-filters. In addition, traditional Korean paper handmade from mulberry trees (TKP) showed a good PM-reducing property as an air-filter. It is concluded that air-filtering set composed of fiberboard with vent-holes and TKP instead of conventional air-filters made with non-woven fabrics can be used as a filter for reducing the concentrations of PM, VOC and noxious metals existed in indoor and outdoor spaces.

Key words: Lignocellulosic fiber, Particulate matter, Activated carbon, Air-filter, Volatile organic compounds

## 1. 서 론

미세먼지의 유입 및 발생으로 인한 실내외 공기질 악화로 국민의 삶 만족도 저하와 함께 건강에 대한 불안은 야기하는 상황에서 다양한 실내외 공간에 존재하는 미세먼지를 효율적으로 저감할 수 있는 대책 마련이 시급한 실정이다. 특히 지하철과 관련된 공간인 승강장, 지하터널, 전동차 실내 등은 밀폐된 공간인 관계로 지하철 운행 및 다양한 오염원으로부터 발생되거나 실외에서 유입되는 되는 미세먼지 및 인체 유해물질의 배출이 어렵고, 자연 환기가 불가하여 이용자 및 지하철 근무자의 건강에 직·간접적으로 악영향을 주고 있다[1,2]. 그러나 오염 배출원에 대한 엄격한 제어가 불가능한 관계로 이의 해결을 위한 배출원 관리방안의 적용은 현재까지 한계가 있으며, 결과적으로 지하철 생활공간 내에서 미세먼지 배출원에 대한 억제보다는 배출물질을 효과적으로 저감할 수 있는 해결방안의 마련이 필요한 상황이다.

현재까지 미세먼지의 저감을 위하여 상용화된 기술로는 미세 기공을 보유한 membrane을 여과필터로 이용하여 다양한 크기의 오염원을 제어하는 방안이 주로 사용되고 있으며, 이 외에 건식인 전기집진 방식과 습식인 스크러버 등도 단독 또는 공동으로 적용되고 있다[3]. 그러나 상기 기술들은 빠른 유속을 감당하지 못하여 대형 시설에 적용이 불가하거나, 낮은 미세먼지 제거효율, 짧은 필터의 사용기한, 높은 필터 교체비용의 부담 등과 같은 단점이 있다[4]. 한편 건식의 여과필터는 주로 미세먼지만을 저감시키는 공기청정 기술인 관계로 실내외 공간에 존재하는 인체유해성 휘발성 유기화합물 및 유해금속 등을 제한적으로만 저감하게 된다. 또한 공기 청정기 및 미세먼지 저감장치에 사용되는 여과필터는 polypropylene, polyethylene terephthalate와 같은 합성섬유 부직포로 제조되고 있어 매립시 생분해에 많은 시간이 소요되어 결과적으로 토양 오염과 대량의 쓰레기를 발생시키며, 소각시 지구온난화의 주요 원인인 이산화탄소를 대량으로 발생시키게 된다[5,6]. 따라서 합성섬유 부직포를 대체할 수 있는 재생섬유를 여과필터의 원료로 사용한 고효율 저비용의 새로운 포집 및 여과 기술의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

미세먼지 저감과 관련하여 국내외에서 개발되고 있는 기술동향을 보면, 전반적으로 미세먼지 처리 소재와 공정개발 기술, ICT (Information and Communication Technologies) 기반 대기오염물질 관리 분야 등 실적용을 위한 기술 확보가 주로 이루어지고 있다 [7]. 특히 국내의 경우, 물질별 제거 반응의 원인 규명, 소재 원천기술 및 소재/공정 주요 핵심기술 개발 분야에 집중하고 있으며, 1차 배출(집진)과 2차 생성(탈질·탈황) 전구물질 제거에도 초점이 맞추어져 있다. 또한 배출저감 기술의 개발보다 미세먼지 발생원에 설

치 공간을 최소화하면서 미세먼지 배출을 획기적으로 줄일 수 있는 집진장치에 대한 기술개발이 진행되고 있다[8,9]. 그러나 저감 대상이 50 μm 이하의 TSP (total suspended particles)에서 2.5 μm 이하의 PM 2.5로 이동하고 있어 기존 설비의 개선 및 집진기술의 성능개선을 위한 기술 확보가 요구되고 있다. 국외의 경우, 최고 수준의 미세먼지 저감기술은 초미세먼지 규제가 강화된 미국, 일본을 중심으로 독일과 스웨덴에서 산업설비의 배기후 처리장치와 관련한 다양한 설비를 개발 중에 있으나, 실내외 초미세먼지 저감기술의 개발은 아직 미흡한 상황이다[10]. 따라서 초미세먼지를 포함한 다양한 오염물질을 실용화 및 비용 측면에서 효율적으로 저감할 수 있도록 기존 설비를 이용한 집진 및 여과기술의 개발이 요구된다.

상기에서 언급한 내용을 토대로 대기 중에 존재하는 미세먼지의 농도 저감을 위한 여과필터로서 목섬유를 저밀도섬유판 형태로 제조하는 방안이 본 연구팀에 의하여 제기되었다. 그러나 목섬유만으로 제조한 여과필터는 다양한 실내외 공간에 존재하는 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOC) 및 유해금속과 같은 오염물질의 흡착과 여과에 한계가 있을 것으로 사료되어 VOC 및 유해금속 흡착능성이 뛰어난 활성탄의 첨가를 고려하게 되었다. 활성탄은 경제성 및 폐기물의 재자원화 측면을 고려하여 미활용 바이오매스 부산물을 원료로 이용하고, 목섬유와 활성탄으로 제조한 섬유판 형태의 여과필터가 취급가능한 수준의 강도 보유할 수 있도록 접착제를 적용하는 방안이 도출되었다. 여과필터 제조용 접착제의 경우, 목섬유가 탄소중립 자원인 관계로 사용한 이후 수거된 필터는 고체 바이오연료로 사용이 가능할 것으로 판단되어 목질계 섬유판 제조에 대부분 사용되고 있는 석유화학계 합성수지 접착제가 아닌 천연 접착제를 이용하는 것으로 결정하였다. 천연 접착제로 제조한 여과필터를 고체연료로 사용할 경우, 화석연료의 연소와 비교하여 유독성 가스 및 이산화탄소 발생량의 최소화가 가능할 것으로 추정된다. 또한 접착제의 원료로 유기성 생활/도축/산업 폐기물을 이용할 경우, 쓰레기 발생량의 감축과 함께 폐기물 자원의 효율적인 재자원화 및 부가가치화 외에 매우 저렴한 비용으로 여과필터의 생산이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구는 미세먼지, VOC, 유해금속의 흡진/흡착을 위한 합성섬유 기반 부직포 대체용 리그노셀룰로오스 섬유 기반 활성탄-첨가 섬유판 형태의 여과필터 적용가능성을 조사하기 위하여 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2-1. 공시재료

섬유판 형태의 여과필터 제조에 사용된 목섬유(함수율: 10 ±

1%)와 왁스 emulsion(고형분 함량:  $43 \pm 1\%$ )는 (주) 유니드(전북, 군산)에서 공급받아 사용하였다.

접착제 원료로 사용된 인모(human hair, 이하 HH)는 전북대학교 전주캠퍼스 인근 미용실에서 확보한 후, 일반 가위로 1 cm 정도의 크기로 절단하여 전처리없이 접착제 조제에 이용하였다. 돈모(pig hair, 이하 PH)와 돈혈(pig blood, 이하 PB)은 전북 김제시 소재 목우촌에서 공급받아 사용하였다. 수거한 PH는 1주일 이상 자연건조하여 함수율을  $9 \pm 1\%$ 로 조절하였으며, 이를 인모와 동일하게 일반 가위로 1 cm 정도의 크기로 절단하여 접착제 원료로 사용하였다. PB의 경우, 추가공정 없이 접착제 원료로 사용하였다. 단백질 성분으로 대부분 구성된 접착제에 강도 향상을 위하여 산림조합중앙회 동부목재유통센터(강원, 동해)에서 공급받은 낙엽송 수피의 열수 추출물을 첨가하였다.

HH, PH, PB의 가수분해에 이용된 수산화나트륨, 수산화 칼륨을 목적으로 첨가된 붕산나트륨은 랩스토토리사이언스(충북, 청주)에서 화학실험용 시약을 구입하여 사용하였다. 섬유판 필터의 방염성능 부여를 위하여 접착제에 첨가한 인산계 방염제는 (주) 행복홈우드테크(전남, 무안)에서 공급받아 사용하였다.

섬유판 여과필터 내에서 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, 이하 VOC)과 유해금속 흡착을 위하여 첨가된 활성탄은 야자각 활성탄(coconut shell activated carbon, 이하 CSA)을 (주) 에코생활건강(대구, 남구)에서 구입하여 사용하였다. 활성탄의 입도 크기에 따른 강도 및 흡착능 차이를 비교하기 위하여 구입한 상태에서 실험용 막자 사발에 넣고 파쇄한 후, 4 mesh 선별체를 통과한 분말상과 2 mesh 선별체 위에 남은 입자상으로 구분하여 사용하였다.

## 2-2. 유해금속 및 휘발성 유기화합물 흡착능 평가 방법

CSA를 다양한 실내외 공간(흡연실, 금속가공업체, 전철역 인근 건물 복도, 제재소, 지하주차장)에 1주일 이상 노출시킨 후, 회수하여 환경보건법 시행령에 따라 활성탄에 흡착된 납, 구리, 철, 알루미늄, 크롬, 아연의 양을 측정하였다. 즉 노출이 종료된 활성탄을 65%의 질산용액을 이용하여 회분을 제외한 모든 성분을 제거한 후, 증류수로 희석한 용액을 조사된 각 원소의 검출 파장에 따라 Inductively coupled plasma (ICP) emission spectrometer (Optima 4300 DV, Perkin-Elmer Inc., United States)를 이용하여 흡착된 유해금속의 정량분석을 수행하였다.

목섬유 및 CSA에 흡착된 VOC 양을 측정하기 위하여 유해금속 흡착능 측정에 사용된 CSA와 같은 시료를 흡연실과 음식점 주방에 48시간 노출시킨 후, 이를 stainless steel 재질로 제작된 마이크로 챔버에 넣고 고순도 질소로 120 ml/min 유속으로 purge하면서 50 °C 온도를 유지하여 발생하는 기체를 100 ml/min 유속으로 10 분 동안 Tenax TA 흡착관으로 포집하여 열탈착-기체크로마토그래프-MS법을 응용하여 VOC를 정량적으로 분석하였다. 활성탄의 VOC 흡착 성능 시험법은 외부 환경에 노출시키지 않은 활성탄 시료를 고정틀에 넣고 액상 VOC(벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스틸렌) 표준물질을 200 °C에서 기화시킨 후, 100 ml/min 유속으로 활성탄 시료가 설치된 고정틀에 통과시켰다. 이렇게 활성탄 통과 전·후 기체 샘플을 Tenax TA 흡착관으로 포집하여 열탈착 GC (6890N, Agilent Technologies Inc., United States)/MS(5975, Agilent Technologies Inc., United States)를 이용하여 정량 분석하였다. VOC 정량 평가를 위한 방법은 실내공기질공정시험기준 실내 및

건축자재에서 방출되는 휘발성유기화합물 측정방법 - 고체흡착관과 기체크로마토그래프 - MS, FID법(ES 02602.1c)을 사용하였다[11].

## 2-3. 접착제 조제

HH 및 PH를 접착제의 원료로 사용하기 위하여 액화가 필요하며, 이를 위하여 5% 농도의 수산화나트륨 수용액(350 ml)에 200 g의 HH와 PH를 각각 천천히 투입하였으며,  $95 \pm 2.5$  °C에서 240분간 가수분해반응시켜 알칼리 가수분해물(alkaline hydrolyzate, 이하 AK)을 수행하였다. 인모(HH-AK) 및 돈모 알칼리 가수분해물(PH-AK)의 고형분 함량은 35~40%, pH는 약 12.8, 점도는 25 °C에서 500 m·Pa·s 범위로 측정되었으며, 불충분하게 가수분해된 인모와 돈모는 선별과정을 통하여 제거함으로써 분사에 있어 분사구가 막히는 등의 문제가 전혀 발생하지 않았다. HH-AK와 PH-AK의 pH가 12 이상인 관계로 경화반응의 단축을 위하여 pH를 낮추는 경화제로 PB의 산가수분해물(acidic hydrolyzate, 이하 AC)을 사용하였다. PB의 산가수분해물(PB-AC)은 섬유판 필터의 사용/수거한 후, 고체 바이오연료로 사용하기 위하여 염소, 황, 질소를 함유한 무기산이 아닌 유기산인 수산으로 반응시켰다. 가수분해 반응은 충분히 교반한 PB에 PB 고형분 함량 기준 5%의 수산을 첨가한 후,  $90 \pm 5$  °C에서 0.5시간 동안 반응시켜 PB-AC를 얻었다. PB-AC의 고형분 함량은 19.3%, pH는 2.1로 측정되었으며, 반응의 종료와 함께 진흙과 같은 형태가 되어 점도 측정은 불가하였다. 단백질계 성분만으로 구성된 접착제를 섬유판 제조에 사용할 경우, 강도 저하가 우려되어 수피에서 phenolic compounds를 추출하여 접착제에 첨가하였다. 이를 위하여 일정한 크기로 파쇄된 낙엽송 수피를  $95 \pm 2$  °C의 열수에서 4시간 동안 일차적으로 반응시킨 후, 증발과정을 통하여 농축된 가수분해물(hot water extractive of larch bark, 이하 LB-HE)을 얻었다. 이렇게 얻은 LB-HE의 고형분 함량은 38% 내외, 점도는 1,000 m·Pa·s 이상, pH는 5.4로 측정되었다.

섬유판 필터의 제조를 위한 접착제는 HH-AK, PH-AK, PB-AC 그리고/또는 LB-HE를 반응시켜 조제하였다. 선행연구 결과를 통하여 HH-AK/PH-AK/PB-AC/LB-HE를 고형분 함량 기준 35 wt%/35 wt%/10 wt%/20 wt%로 조절하여 접착제를 조제하였다[12,13]. 한편, 접착제의 주성분이 단백질인 관계로 부패 가능성이 있어 5% 농도의 붕산나트륨 수용액을 조제한 후, 적용에 앞서 방부제로서 접착제에 15 drops를 첨가하였다. 유럽연합의 경우, 현재 붕산나트륨의 식품용 방부제로서 사용을 금지하고 있으나, 그 외의 많은 지역과 국가에서는 다양한 용도의 방부제 원료로서 첨가되고 있어 인체에 무해할 것으로 사료되어 사용하였다[14]. 제조된 섬유판 필터에 방염성능 부여를 위하여 인산계 방염제 용액을 (주) 행복홈우드테크에서 제공받아 접착제에 15 drops 첨가하였다.

## 2-4. 섬유판 필터의 제조 및 물성 평가

정해진 치수와 목표밀도에 따라 일정량의 목섬유를 60 리터의 플라스틱 통에 넣고, 고점도 도료용 분무기를 사용하여 목섬유의 전건중량 대비 2%의 왁스 emulsion을 분사한 후, 정해진 함지율로 계산된 양의 접착제를 분사하였다. 왁스 및 접착제의 분사가 완료된 목섬유를 CSA와 함께 caul plate 위의 성형틀(250 mm × 250 mm)에 골고루 분산시키면서 성형하였다. 이렇게 성형된 매트를 180 °C의 온도, 24 kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 12분간 열압을 실시하였다. 각 조건마다 3개씩의 섬유판 필터를 제조하였으며, 제조 즉시 비닐

백에 넣어 24시간 이상 항온항습실에 방치한 후, 물성 평가에 이용하였다.

제조된 섬유판 필터의 경우, 미세먼지를 포함하여 VOC, 유해금속 저감용 장치에 설치시 강제적으로 흡입된 외부공기의 통과가 필요한 관계로 시판 저밀도섬유판보다 낮은 밀도로 제조하는 것으로 결정하였다. 따라서 취급이 가능한 정도의 강도를 보유할 필요가 있고, 결과적으로 “KS F 3200 섬유판” 기준에 따라 휨강도만 측정하였다[15]. 이렇게 제조된 섬유판 필터의 통기성은 일차적으로 입바람을 이용한 간이방법에 따라 평가하였다. 즉, 수직방향으로 고정된 섬유판 필터 앞면에 입바람을 불었으며, 뒷면에서 손으로 느끼는 정도로 통기성을 확인하였다.

섬유판의 강도와 통기성 결과를 토대로 섬유판 필터의 목표밀도를  $200 \text{ kg/m}^3$  이상으로 결정하였다. 그러나 이렇게 제조한 섬유판의 통기성이 낮았으며, 이를 해결하기 위하여 Fig. 1과 같이 최대 64개의 원추형 통기구(직경: 10 mm 이하)를 보유한 섬유판을 제조할 수 있는 spiked caul plate를 특수 stainless steel로 제작하였다. 한편

섬유판 필터의 성형방법에 따른 강도 및 통기성에 미치는 영향을 확인하기 위하여 목섬유와 CSA의 혼합물을 열압하기 전에 무작위, 심층의 중앙에 단층 그리고 두 성형방법에 따라 제조된 섬유판 필터의 단점을 개선한 층별 성형을 적용하였다. 층별 성형방법을 상세히 설명하면 다음과 같다. 접착제가 분사된 목섬유 전체 중량의 25%를 spiked caul plate가 놓인 열압틀에 일정하게 분산시키면서 성형한 후, 그 위에 목섬유 전체 중량의 50%와 활성탄의 혼합물을 순차적으로 성형하였으며, 마지막으로 나머지 25% 중량의 목섬유를 그 위에 성형하였다. 성형이 완료된 목섬유와 활성탄 매트 위에 flat 또는/그리고 spiked caul plate를 올려놓은 후, 무타공 섬유판 필터와 동일한 조건으로 열압을 실시하였다.

2-5. 섬유판 필터의 VOC 흡착능 측정

섬유판 형태의 여과필터에 대한 VOC 흡착능 측정을 위하여  $15.5 \text{ cm} \times 8.5 \text{ cm}$  크기의 시편을 준비하였다. 이 시편을 Fig. 2와 같이 키트에 넣고 밀봉처리한 후, 이미 측정된 양의 VOC가 들어있는

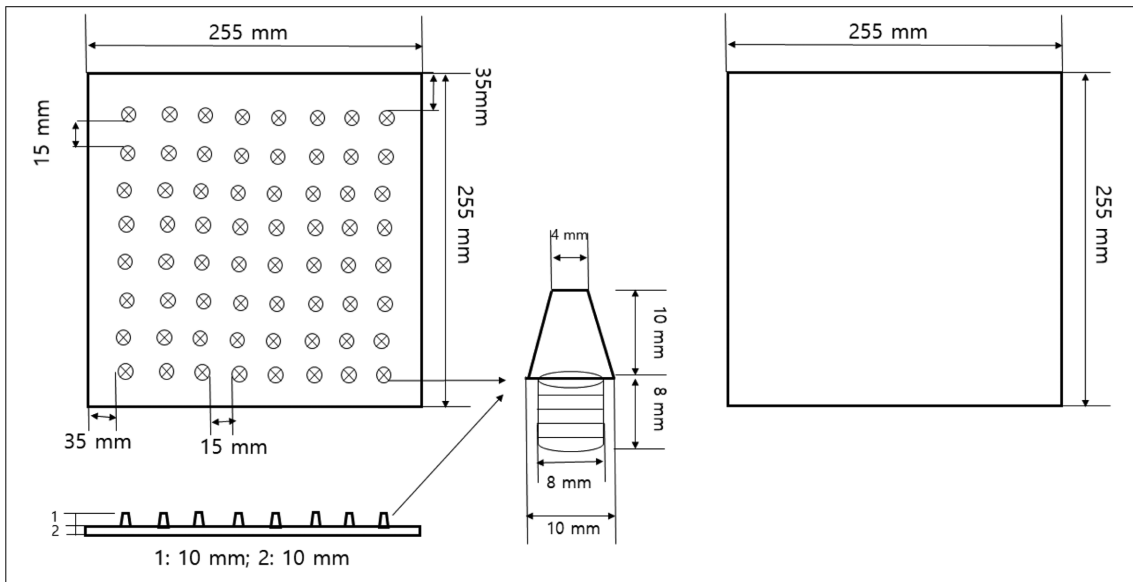


Fig. 1. Schematic diagram of spiked caul plates used for fabricating filters with the type of fiberboard.

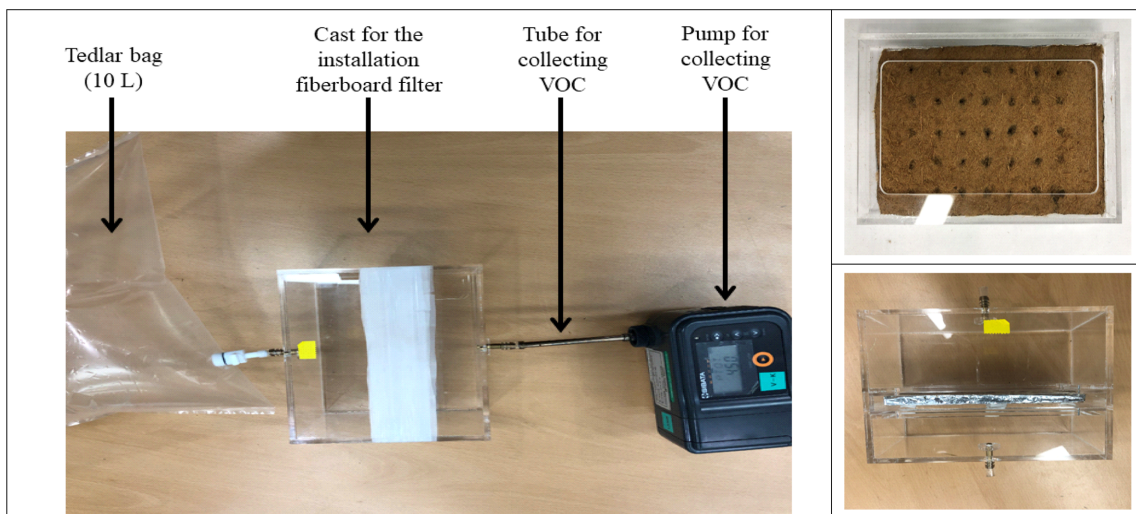


Fig. 2. Images of equipment used for measuring the amount of volatile organic compounds adsorbed onto a fiberboard filter quantitatively.

10 리터 tedlar bag과 연결하였다. 다음으로 VOC 포집펌프를 작동시킨 후, 2-2절에서 설명한 방법과 같이 총휘발성유기화합물(total volatile organic compounds, 이하 TVOC, 분자량 C<sub>6</sub> ~ C<sub>16</sub> 사이 물질의 총합), 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌 양의 측정을 통하여 시편에 흡착된 TVOC와 5VOC 양을 분석하였다.

**2-6. 섬유판 필터의 미세먼지 흡진능 평가**

섬유판 필터의 미세먼지 흡진능 측정을 위하여 20 cm × 25 cm 크기의 시편을 준비한 후, 이를 국립환경과학원에서 고시한 대기오염공정시험기준에 따라 환경대기 중 먼지 측정 방법-고용량 공기시료채취기법(ES 01604.1)에 의하여 수행하였다[16]. 즉, 20 ± 5 °C의 온도와 20 ± 5%의 습도 조건에서 7일 이상 향온·향습을 처리한 섬유판과 먼지측정용 석영필터의 무게를 측정한 후, 미세먼지 주의보가 발령된 날에 서울특별시 관악구 신림동 서울대학교 201동 2층 외부에서 8시간동안 500 l/min 유량으로 먼지를 포집하였다. 포집처리가 완료된 시편을 다시 상기와 동일한 조건에서 향온·향습으로 처리한 후, 무게변화의 측정을 통하여 섬유판 필터의 미세먼지 흡진능을 평가하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3-1. 아자각 활성탄의 유해금속 흡착능**

다양한 실내외 공간에 노출시킨 CSA의 유해금속 흡착능을 측정할 결과는 Table 1과 같다. 비노출 CSA와 비교하여 흡연실- 및 지하주차장-노출 CSA의 낮은 알루미늄 함량을 제외하고 모든 노출 CSA에서 많은 유해금속을 흡착한 것으로 조사되었다. 특히 옥외 전철역(옥수역)에서 약 30 m 거리에 있는 건물의 개방된 창과 연결된 통로와 제재소에 노출시킨 CSA의 경우 비노출 CSA보다 약 10배 정도 많은 철 및 알루미늄이 흡착된 것으로 측정되어 환기가 어려운 지하철 전동차 및 승강장 내에 많은 유해금속이 존재할 것으로 추정된다. 한편 흡연실- 및 지하주차장-노출 CSA의 낮은 알루미늄

함량은 노출 공간의 낮은 알루미늄 함유량 또는 실험과정에서 오류로부터 기인한 것으로 추정된다. 그러나 CSA에 흡착된 유해금속 측정결과와 관련한 여러 추론을 명확하게 확인하기 위하여 다양한 종류의 활성탄뿐만 아니라 지하철 역사, 승강장 및 전동차를 포함한 다양한 실내외 공간에 노출시킨 활성탄에 대한 측정이 필요할 것으로 생각한다.

**3-2. 목섬유 및 아자각 활성탄의 휘발성 유기화합물 흡착능 및 저감능**

목섬유에 흡착된 TVOC 양을 측정한 결과를 보면 흡연실에 노출시킨 것이 가장 높았으며, 다음으로 비노출, 음식점-노출 목섬유 순으로 조사되었다(Table 2). 5VOC 흡착량의 경우도 흡연실-노출 목섬유에서 가장 많은 양이 검출되었고, 다음으로 음식점-, 비노출 목섬유 순으로 측정되었다. CSA의 TVOC 흡착량은 흡연실-, 음식점-노출 그리고 비노출 CSA 순이었으며, 5VOC 흡착량은 음식점-노출 CSA에서 가장 높았으며, 비노출, 흡연실-노출 CSA 순으로 조사되었다. 본 연구의 수행 초기에 활성탄인 CSA가 목섬유보다 많은 양의 VOC를 흡착할 것으로 예상하였으나, 통계학적으로 차이가 없는 것으로 분석되었다(p = 0.53). 또한 비노출 목섬유 및 CSA, 노출여부 그리고 노출장소 간의 VOC 흡착량을 비교하였을 때, 전체적으로 차이가 없는 것으로 나타났다(목섬유의 경우, 비노출/음식점-노출: p = 0.38; 비노출/흡연실-노출: p = 0.22; 음식점-/흡연실-노출: p = 0.31; CSA의 경우, 비노출/음식점-노출: p = 0.35; 비노출/흡연실-노출: p = 0.35; 음식점-/흡연실-노출: p = 0.37). 이와 같은 결과는 목섬유와 활성탄의 보관 및 운송과정에서 VOC를 흡착하여 나타난 결과라 생각한다. 이 문제를 해결하기 위하여 섬유판 형태 여과필터의 판매/출하 또는 밀봉 포장에 앞서 일정한 조건에서 건조 또는 열처리 과정의 공정 추가 필요성이 제기되었다.

목섬유와 CSA에 대한 5VOC인 benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, styrene의 흡착량 결과를 보면, 기재의 종류 및 노출여부, 노출 장소에 따른 차이는 없었는데 이는 상기에서 언급한 바와 같이

**Table 1. Contents of noxious metals adsorbed on coconut shell activated carbon, which was exposed at a certain space for one week (unit: mg/kg)**

Type of space exposed	Pb	Cu	Fe	Al	Cr	Zn
Sawmill plant	ND	ND	982.1	1,190.1	ND	59.2
Iron foundry	ND	24.5	441.2	708.5	6.8	47.2
Hallway of building next to the platform of a railway station	ND	28.7	1,113.6	728.9	ND	71.0
Closed smoking room	ND	18.3	221.7	159.7	ND	142.2
Underground parking lot	ND	24.5	484.7	75.5	5.0	54.3
Unexposed activated carbon	ND	16.1	134.8	464.0	ND	50.1

ND: not detected (< 5.0 mg/kg).

**Table 2. Contents of volatile organic compounds adsorbed on wood fiber (WF) and coconut shell activated carbon (CSA), which were exposed at a restaurant and smoking room for 48 h (unit: µg/m<sup>3</sup>)**

	WF	CSA	Exposed at restaurant		Exposed at smoking room	
			WF	CSA	WF	CSA
TVOC	173.00	562.70	208.10	152.80	148.90	69.61
5VOC	7.47	6.68	6.41	6.02	3.87	7.71
Benzene	5.03	2.12	4.07	3.47	1.80	2.51
Toluene	1.31	2.06	1.38	1.43	1.20	2.68
Ethylbenzene	0.21	0.57	0.18	0.25	0.19	0.51
m, p-xylene	0.44	0.94	0.47	0.47	0.43	1.18
Styrene	0.35	0.66	0.19	0.25	0.14	0.38
o-xylene	0.13	0.33	0.13	0.16	0.12	0.45

**Table 3. Reduction capacity of wood fiber and coconut shell activated carbon by the adsorption of volatile organic compounds**

Reference material	Wood fiber		Coconut shell activated carbon	
	Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Reduction rate (%)	Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Reduction rate (%)
TVOC	1050.00	1046.00	929.00	11.5
5 VOC	638.24	617.67	536.26	16.0
Benzene	82.48	85.70	80.09	2.9
Toluene	109.23	110.50	92.36	15.4
Ethylbenzene	92.20	91.07	77.53	15.9
<i>m, p</i> -xylene	180.51	177.04	146.88	18.6
Styrene	85.23	69.30	63.56	25.4
<i>o</i> -xylene	88.60	84.08	75.84	14.4

보관 및 운송과정에서 VOC의 흡착에서 기인한 것으로 사료된다 (Table 2). 한편 5VOC 중에서 benzene이 목섬유와 CSA에 가장 많이 흡착되었으며, 다음으로 toluene, xylene, ethylbenzene, styrene 순으로 분자량이 낮을수록 흡착량이 증가하는 경향을 보였다. 이는 활성탄의 흡착능이 VOC 분자량의 증가와 함께 증가한다는 Li et al. (2012)의 연구 결과와 상반되었는데 보관 및 운송과정에서의 5VOC 흡착에서 기인한 것으로 추정된다[17].

상기에서 제기한 목섬유 및 CSA의 VOC 저감능에 대한 보관 및 운송과정 등에서 VOC 흡착이 미치는 영향을 확인하기 위하여 오븐에서 12시간동안 열처리한 목섬유 및 CSA를 튜브에 삽입하고, 인위적으로 VOC를 통과시킴으로서 목섬유 및 CSA의 VOC 저감능을 측정할 결과는 Table 3과 같다. CSA가 목섬유와 비교하여 매우 많은 양의 TVOC 및 5VOC를 저감하였으며, 따라서 섬유판 형태 여과필터의 판매 또는 출하에 앞서 건조/열처리할 경우, 활성탄에 의하여 VOC 흡착능이 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 한편 목섬유와 CSA에 대한 5VOC 흡착능은 분자량의 증가와 함께 증가하여 흡착능과 분자량과의 비례관계를 확인할 수 있었다.

**3-3. 섬유판 필터의 강도 및 통기성에 미치는 영향인자**

여과필터로 사용될 섬유판의 밀도를 결정하기 위하여 활성탄의 첨가없이 10% 함지율과 함께 다양한 목표밀도로 섬유판을 제조하였으며, 이에 대한 휨강도 측정에 앞서 육안으로 취급(handling) 가능여부를 확인하였다. 먼저 200 kg/m<sup>3</sup>로 제조한 섬유판은 용이하게 취급이 가능하였으나, 입바람으로 통기성을 선제적으로 조사한 결과, 섬유판을 통과하는 입바람을 손으로 전혀 느낄 수 없어 목표밀도로 부적합한 것으로 판단하였다. 다음으로 100 및 125 kg/m<sup>3</sup>의 목표밀도로 제조한 섬유판의 경우, 통기성은 향상되었으나, 취급시 쉽게 부서져 목표밀도로 부적합하였다. 마지막으로 150 및 180 kg/m<sup>3</sup>의 목표밀도로 제조한 섬유판은 100 및 125 kg/m<sup>3</sup>로 제조한 섬유판과 비교하여 취급은 어느 정도 용이하였으나, 제조 또는 운반 과정에서 부분 파괴가 발생하였다.

활성탄과 관련한 제조인자들의 결정을 위하여 10% 함지율과 250 kg/m<sup>3</sup>의 목표밀도로 섬유판의 전체 중량 대비 30 및 40 wt%의 CSA와 함께 제조한 섬유판의 강도는 각각 0.67 kgf/cm<sup>2</sup> 및 0.59 kgf/cm<sup>2</sup>로 CSA 첨가량에 의하여 강도에 미치는 차이는 없었다(p = 0.27). 그러나 50 wt%의 활성탄을 넣고 제조한 섬유판은 취급이 불가하였으며, 이 결과를 토대로 섬유판 필터의 최대 CSA 첨가량을 40 wt% 이하로 결정하였다.

한편 CSA를 무작위로 혼합하여 250 kg/m<sup>3</sup>의 목표밀도와 40

wt%로 제조한 섬유판의 휨강도는 0.73 kgf/cm<sup>2</sup>로 심층에만 CSA를 적용하여 제조한 섬유판의 휨강도(0.59 kgf/cm<sup>2</sup>)보다 상승하였는데 이는 섬유상의 목섬유와 입자상의 CSA가 적절히 혼합되어 나타난 결과라 생각한다. 이 조건에서 제조된 섬유판은 취급에 있어 전혀 문제가 없었으나, 섬유판 표층에 존재하는 CSA에 접착체가 적용되지 않아 제조 및 운송과정에서 탈착되었다. 따라서 CSA를 접착체가 분사된 목섬유와 무작위로 혼합한 후, 열압하여 섬유판 필터를 제조하는 방안을 배제하였다. 다음 방법으로 섬유판 필터의 두께방향으로 심층 중앙에 단층(1 layer)으로 활성탄을 배치하여 제조하였으나, 시험편 제조를 위한 절삭시 CSA에 접착체가 적용되지 않아 섬유판의 심층 중앙에서 분리되는 현상이 발생하여 단층으로 활성탄을 적용하는 방안도 배제하였다. 상기 결과들을 토대로 개선된 방법을 적용하여 섬유판을 제조하였으며, 그 방법은 다음과 같다. 섬유판 필터의 표층(상층 및 하층)에는 접착체가 분사된 전체 목섬유의 각각 25 wt%를 이용하여 성형하고, 심층(중층)에는 나머지 50 wt%의 목섬유와 전체 CSA를 무작위로 혼합한 방법을 적용하여 3층 섬유판으로 제조하였다. 이렇게 제조한 섬유판의 휨강도와 차이가 없었으며(p = 0.59), 외관적으로도 일반 섬유판과 유사하였다.

섬유판 강도에 대한 활성탄 입도크기의 영향을 보면, 상기에서 언급한 바와 같이 섬유판 필터의 전건중량 대비 50 wt% 분말상 활성탄(4 mesh 이하)을 섬유판의 두께방향 심층 중앙에 단층(1 layer)으로 첨가하여 제조한 섬유판의 경우 시험편 제조를 위한 절삭시 중앙에서 활성탄 층이 분리되는 현상이 발생하였다. 동일한 조건에서 입자상 활성탄(2 mesh 이상)으로 제조한 섬유판의 경우 절삭에 따른 분리현상이 발생하지 않았다. 따라서 분말상보다 입자상 활성탄의 적용이 섬유판 필터의 강도 유지를 위하여 최적조건이라 판단된다. 그러나 3층 섬유판 필터의 강도, 성형성, 미세먼지, VOC, 유해금속 흡진/흡착능 결과에 따라 활성탄의 입도형태에 대한 최종 결정이 필요할 것으로 생각한다.

성형과정에서 심층에 무작위로 40 wt%의 CSA(>2 mesh)와 함께 200 kg/m<sup>3</sup>의 목표밀도로 제조한 섬유판 표면에 입바람을 이용하여 통기성을 확인한 결과, 반대면에서 통과되는 입바람을 전혀 느낄 수 없었다. 이를 보완하기 위하여 일정한 간격으로 동일한 직경의 통기구를 갖도록 전동드릴을 이용하여 타공하였으며, 이를 통하여 통기성은 크게 향상되었다. 그러나 빠른 유속의 공기가 섬유판 필터의 통기구를 통과할 때, 흡착보다 통과하는 미세먼지, VOC, 유해금속 양이 많을 것으로 예상되며, 이에 대한 해결책으로

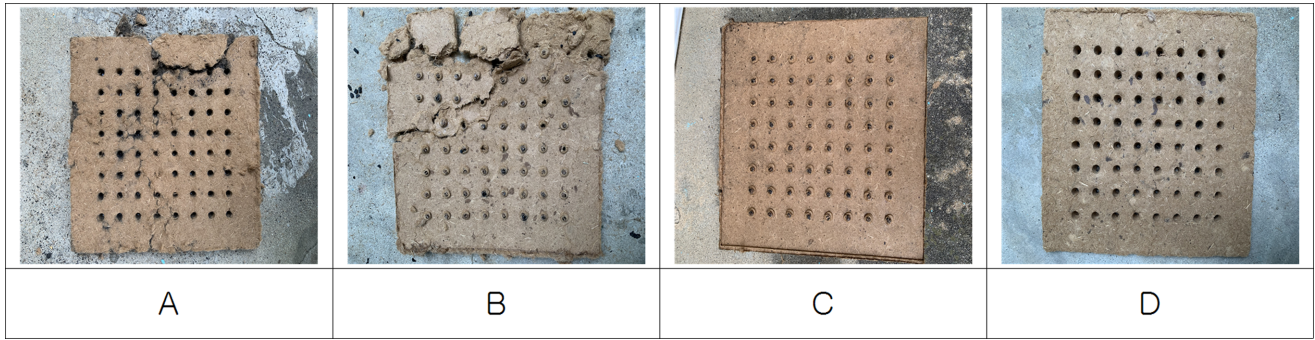


Fig. 3. Images of fiberboard filter made with coconut shell active carbon. These fiberboards were fabricated at the target density-pressing time of  $200 \text{ kg/m}^3$ -6 min (A),  $200 \text{ kg/m}^3$ -12 min (B),  $300 \text{ kg/m}^3$ -12 min (C) and  $250 \text{ kg/m}^3$ -12 min (D). Activated carbon content in fiberboard was adjusted to 40 wt%.

두 장의 타공 섬유판 사이에 흡진/흡착능 향상을 위하여 무타공의 저밀도 섬유판 또는 한지와 같은 필터지를 첨가하는 방안이 제기되었다.

한편 전동드릴을 이용한 타공시 섬유판 필터의 밀도가 낮아( $200 \text{ kg/m}^3$ ) 통기구 주위에 목섬유가 부풀어 오르는 외관상 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 열압과정에서 pressure plate에 spikes를 접합시켜 통기구가 있는 최소  $200 \text{ kg/m}^3$ 로의 목표밀도로 섬유판을 제조하였다(Fig. 3).

#### 3-4. 타공 섬유판 필터의 VOC 초기 흡착능 및 보지율

Table 4는 섬유판의 목표밀도-CSA 첨가량을  $200 \text{ kg/m}^3$ -0 wt%,  $200 \text{ kg/m}^3$ -40 wt%  $250 \text{ kg/m}^3$ -40 wt%로 고정된 상태에서 제조한 섬유판 필터의 VOC 초기 흡착능과 보지율을 측정된 결과이다. 대조구인 목섬유만으로 제조한 섬유판과 비교하여 CSA와 함께 제조한 섬유판에서 TVOC 및 5VOC 흡착능이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 또한 섬유판 필터의 밀도 증가와 함께 TVOC와 5VOC의 보지율이 증가하는 경향을 나타내었다. 이 결과로부터 섬

유판 필터의 제조에 있어 CSA 첨가와  $200 \text{ kg/m}^3$  이상의 목표밀도가 필요한 것을 확인할 수 있었다.

#### 3-5. 타공 섬유판 필터의 미세먼지 흡진능

미세먼지 주의보가 발령된 날에 목섬유 및 CSA를 원료로 제조한 섬유판 필터의 미세먼지 흡진능을 측정된 결과는 Table 5와 같다. 섬유판 필터의 미세먼지 흡진능은 중량증가율을 측정하였는데 대부분의 섬유판 필터에서 상당한 양의 미세먼지를 흡진한 것으로 측정되었다. 그러나 미세먼지 흡진능을 측정할 기간의 습도가 80~87%로 매우 높아 섬유판 필터가 두께방향으로 팽윤한 것을 관찰할 수 있었다. 초기 및 노출 완료 후의 섬유판 필터의 중량을 일정기간 항온항습 처리한 이후 측정함에도 불구하고 대기 중에 고습도가 섬유판 필터의 미세먼지 흡진능 측정에 부분적으로 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 특히 40 wt%의 활성탄 함량과  $200 \text{ kg/m}^3$ 의 목표밀도로 제조한 섬유판 필터는 노출을 완료한 후, 중량을 측정하는 단계에서 부분 파괴와 함께 CSA의 탈착이 발생하여 미세먼지 흡진능의 측정에 실패하였다. 따라서 섬유판 필터의 방습성을

Table 4. Initial volatile organic compounds adsorbing-capacity and retention rate of perforated fiberboard filters fabricated with wood fiber and coconut shell activated carbon

Board composition (wt%)			Board density ( $\text{kg/m}^3$ )	Initial adsorbing capacity		Retention rate	
Wood fiber	Coconut shell activated carbon	Resin content		TVOC	5 VOC	TVOC	5 VOC
86		14	200	+25.2%	-66.9%	-	3.0%
50	40	10	200	-85.4%	-54.3%	8.5%	10.9%
46	40	14	200	-83.0%	-66.3%	-2.9%	-8.6%
46	40	14	250	-77.9%	-43.0%	18.9%	17.3%

Table 5. Particulate matter (PM) absorbing-capacity of fiberboard filters fabricated with wood fiber and coconut shell activated carbon

Board composition (wt%)			Board density ( $\text{kg/m}^3$ )	Exposure time (hr)	Velocity of air flow (L/min)	PM absorbing-capacity (%)
Wood fiber	Coconut shell activated carbon	Resin content				
Quartz filter <sup>1</sup>						
86		14	200			100
50	40	10	200			2,857
46	40	14	200	8	500	-
46	40	14	250			712
Bandpass glass filter <sup>1</sup>						
Filter paper <sup>2</sup>						
						100
						200

<sup>1</sup>Standard testing method.

<sup>2</sup>Traditional Korean paper handmade from mulberry trees with the basis weight of  $30 \text{ g/m}^2$ .

향상시키기 위한 처리가 필요할 것으로 생각하며, 이를 위하여 집착제에 왁스 첨가량의 증가, 섬유판 표면에 왁스 또는 방습제의 도포, 방습-도포지의 표면 부착 등과 같은 방안을 적용하는 실험을 진행 중에 있다.

#### 4. 결 론

휘발성 유기화합물의 방출농도 및 저감농도 분석 결과를 통하여 목섬유 및 CSA의 VOC 저감을 위한 여과필터 제조용 원료화 가능성을 확인하였으며, CSA가 목섬유보다 5배 이상의 VOC 저감능을 보유한 것으로 나타났다. 그러나 목섬유와 활성탄을 이용하여 생산된 섬유판 필터의 경우, 활성탄이 대기 중에 존재하는 VOC를 흡착하기 때문에 이송, 포장, 출하에 앞서 일정한 조건으로 건조 또는 열처리한 즉시 밀봉처리가 필요할 것으로 생각한다. 돈모, 인모, 돈혈, 낙엽송 수피의 열수 추출물로 조제한 집착제를 적용하여 제조한 섬유판 필터의 강도 측정 및 성형성과 외관을 관찰한 결과를 종합하면, 강도적인 측면에서 목표밀도를 최소 200 kg/m<sup>3</sup>으로 조절하고, 이 조건으로 제조된 섬유판 필터의 통기성 확보를 위하여 타공을 통한 통기구 필요성을 확인하였다. 이 결과를 통하여 통기구의 치수 및 수에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 활성탄의 첨가량은 최대 40 wt%까지 가능하며, 입자 크기는 2 mesh 이하로 조절하는 것과 외관상 및 활성탄 탈착에 의한 문제점 해결을 위하여 표층은 목섬유만으로 심층은 목섬유와 활성탄을 무작위로 혼합한 것을 이용한 3층 보드로 제작이 최적이라는 결론을 얻었다. 한편 미세먼지 여과를 위하여 조사된 필터지(한지)의 성능을 확인하였으며, 따라서 타공 섬유판과 함께 한지가 조합된 여과필터 세트가 부직포로 생산되고 있는 여과필터를 대신하여 실내외 공간에 존재하는 미세먼지, VOC, 유해금속 등의 저감장치용 여과필터로서 사용이 가능할 것으로 생각한다.

현재 VOC의 흡착능 향상과 재방산 최소화를 위하여 섬유판의 두께, 목표밀도 등에 대한 최적 제조조건을 탐색하는 추가연구를 진행 중에 있다. 이 외에 생산될 섬유판 여과필터의 생산성 및 경제성 향상을 위하여 고밀도 야자각을 대신하여 활성탄 원료로 산업폐기물로서 임목부산물인 수피 등과 같은 미이용 목재자원을 사용하는 방안과 이에 대한 최적 활성화 및 성상에 대한 연구도 수행하고 있다. 또한 한지의 미세먼지 흡진능은 공정시험방법에서 기준으로 사용되는 BG 필터(유리섬유 필터)의 미세먼지 흡진능보다 2배가 높은 것으로 측정되어 섬유판 필터와 한지를 조합한 흡진필터 세트의 사용 가능성을 확인 중에 있다. 이 결과들을 종합하여 선정된 최적조건으로 제조된 여과필터를 고효율 저비용 실내외용 공기정화장치에 설치한 후, 성능 평가를 통하여 섬유판 형태의 여과필터에 대한 상용화 방안을 도출할 예정이다. 한편 섬유판 여과필터 제조에 있어 방부/방충제, 방염제를 집착제에 첨가하였으며, 제조된 섬유판에 유지를 이용한 표면처리를 통하여 방부/방충, 방염, 방습성을 부여하였으나, 이에 대한 실제적 성능 분석 연구가 수행되어야 할 것으로 생각한다.

#### 감 사

본 연구는 산림청 “목재자원의 고부가가치 소재 개발 연구개발 사업”의 지원에 의하여 수행되고 있습니다(2020227D10-2122-

AC01). 목섬유 및 왁스를 제공하여 주신 ㈜유니드의 박진학과장님과 돈모 및 돈혈을 제공하여 주신 전북 김제시 소재 목우촌의 임직원분들에게 감사드립니다.

#### References

- Kim, M., Sankararao, B., Kang, O., Kim, J. and Yoo, C. “Monitoring and Prediction of Indoor Air Quality (IAQ) in Subway or Metro Systems Using Season Dependent Models,” *Energy Build*, **46**, 48-55(2012).
- Moreno, T., Perez, N., Reche, C., Martins, V., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., Minguillón, M. C., Amato, F., Alastuey, A., Querol, X. and Gibbons, W., “Subway Platform Air Quality: Assessing the Influences of Tunnel Ventilation, Train Piston Effect and Station Design,” *Atmospheric Environment*, **92**, 461-468(2014).
- Yeo, K., “Technological Trend for Managing Particulate Matter,” *Korea Environmental Industry & Technology Institute*, Konetic Report 2016-112(2016).
- 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]
- Bok, J. S., “Technology Trends of Non-woven Fabrics Industry for Sanitation and Medical Uses,” In Seminar for the recent technology-developing trends of non-woven fabrics at September 6, 2018, Korea Textile Development Institute(2018).
- Marketsandmarkets. Non-Woven Fabrics Market, <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/non-woven-fabrics-market-101727296.html>(2020). [accessed at January 15, 2021]
- Ha, S. J. and Lee, H. G., “Technologies Trend of Particulate Matter - In the Center of Dust-collecting and Reducing Technologies,” Commercializations Promotion Agency for R&D Outcomes, S&T Market Report-64(2018).
- Woo, S. H., Kim, J. B., Jang, H. R., Kwon, S. B., Yook, S. and Bae, G., “Performance Evaluation of a Hybrid Dust Collector for Removal of Airborne Dust in Urban Railway Tunnels,” *J. of the Korean Soc. for Railway*, **20**(4), 433-439(2017).
- Jeong, D. G., Kim, B. S. and Hong, M. S., “The Effect of Cyclone Vortex Finder Configurations on the Fine Particle Collection Efficiencies,” *J. of Korean Soc. of Environ. Engineers*, **39**(60), 371-376(2017).
- Lee, J. R. and Baek, C. W., “Current State of (Fine) Particulate Matter and Future Responding Strategy of Busan,” Busan Institute of Science & Technology Evaluation and Planning, BISTEP 2018-4(2018).
- National Institute of Environmental Research, “Standard Method for Measuring Indoor Air Quality,” NIER 2020-23, Incheon, Republic of Korea(2020).
- Yang, I., Han, G., Ahn, S. H., Choi, I., Kim, Y. and Oh, S. C., “Adhesive Properties of Medium-density Fiberboards Fabricated with Rapeseed Flour-based Adhesive Resins,” *J. of Adhesion*, **90**, 279-295(2014).
- Yang, I., Park, D. H., Choi, W., Ahn, D. U., Y., Oh, S. C. and Han, G., “Adhesive and Curing Properties of Chicken Feather/Blood-based Adhesives for the Fabrication of Medium-density Fiberboards,” *J. of Adhesion*, **94**, 1,137-1,154(2018).

14. Thévenon, M., Tondi, G. and Pizzi, A., "Environmentally Friendly Wood Preservative System Based on Polymerized Tannin Resin-boric Acid for Outdoor Application," *Maderas. Ciencia y Tecnología*, **12**(3), 253-257(2010).
15. Korean Agency for Technology and Standards, Fiberboards, KSC, KS F 3200, Eumseong, Chungbuk, Republic of Korea(2011).
16. National Institute of Environmental Research, "Standard Method for Measuring Dust in Atmospheric Environment," NIER 2020-30, Incheon, Republic of Korea(2020).
17. Li, L., Sun, Z., Li, H. and Keener, T. C., "Effects of Activated Carbon Surface Properties on the Adsorption of Volatile Organic Compounds," *J. of the Air & Waste Management Association*, **62**, 1196-1202(2012).