

## 보건용 마스크 초미세먼지 제거 성능 평가 및 재사용 연구

이 해 범<sup>1)</sup> · 김 서 정<sup>1)</sup> · 주 흥 수<sup>2)</sup> · 조 희 주<sup>1)</sup> · 박 기 홍<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>광주과학기술원 지구환경공학부

<sup>2)</sup>안양대학교 환경공학부

(2019년 12월 19일 투고, 2019년 12월 30일 수정, 2019년 12월 30일 게재확정)

## Performance and reusability of certified and uncertified face masks

Haebum Lee<sup>1)</sup> · Seojeong Kim<sup>1)</sup> · HungSoo Joo<sup>2)</sup> · Hee-joo Cho<sup>1)</sup> · and Kihong Park<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>*National Leading Research Laboratory (Aerosol Technology and Monitoring Laboratory), School of Earth Science and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)*

<sup>2)</sup>*Department of Environmental Engineering, Anyang University*

(Received 19 Dec 2019; Revised 30 Dec 2019; Accepted 30 Dec 2019)

### Abstract

In this study, performance (particle removal efficiency and breathing resistance) of several commercially available face masks (electrostatic filter masks (KF80 certified), a nanofiber filter mask (KF80 certified), and an uncertified mask) with their filter structure and composition were evaluated. Also, effects of relative humidity (RH) of incoming air, water and alcohol exposure, and reusability on performance of face masks were examined. Monodisperse and polydisperse sodium chloride particles were used as test aerosols. Except the uncertified mask filter, PM<sub>2.5</sub> removal efficiency was found to be higher than 90%, and the nanofiber filter mask had the highest quality factor due to the low pressure drop and high removal efficiency (nanofibers were arranged in a densely packed pore structure and contained a significant amount of fluorine in addition to carbon and oxygen). In the case of the KF80 certified mask, the removal efficiency was little affected when the RH of incoming air increased. When the mask filters were soaked in water, the removal efficiency of mask filters was degraded. In particular, the uncertified mask filter showed the highest removal efficiency degradation (26%). When the mask was soaked in alcohol, the removal efficiency also decreased with the greater degree than the water soaking case. The nanofiber mask filter showed the strongest resistance to alcohol exposure among tested mask filters. During evaluation of reusability of masks in real life, the removal efficiency of certified mask filter was less than 4% for 5 consecutive days (2 hours per day), while the removal efficiency of uncertified mask filter significantly decreased by 30% after 5 days.

Keywords: face mask, filter, removal efficiency, breathing resistance, reusability

\* Corresponding author.

Tel : +82-62-715-3279

E-mail : [kpark@gist.ac.kr](mailto:kpark@gist.ac.kr)

## 1. 서론

얼굴에 착용하는 마스크 (face mask)는 공기 중 오염물질을 호흡 중에 저감 해주는 역할을 한다. 특히, 보건용 마스크는 미세먼지 (particulate matter less than 10  $\mu\text{m}$ , PM<sub>10</sub>) 또는 초미세먼지 (particulate matter less than 2.5  $\mu\text{m}$ , PM<sub>2.5</sub>) 저감에 효과가 있다고 알려져 있다 (Langrish et al., 2009). 특히 고농도 실내외 환경에서 미세먼지 또는 초미세먼지에 노출되는 작업자에게는 마스크 사용을 미국 환경청 등에서는 적극 권장하고 있다 (Rengasamy et al., 2004; EPA, 2009; Yang et al., 2015; Adhikari et al., 2018; Cherrie et al., 2018). 우리나라에서도 대기 중 미세먼지 또는 초미세먼지 고농도 기간에 식약청 인증을 받은 황사 마스크 사용을 권장 하고 있다 (Yang et al., 2015). 하지만 마스크의 미세먼지 저감 효과의 지속적인 유지 시간, 재사용, 수분의 영향 등에 대한 정보는 현재 많이 부족한 실정이다.

마스크의 주요 성능은 입자 제거효율 (removal efficiency)과 호흡저항 (breathing resistance)으로 평가한다 (Newnum, 2010; Ramirez, 2015). 입자 제거효율은 입자의 크기와 속도 등에 관련되어 있고 입자의 충돌 (impaction), 확산 (diffusion), 침강 (settling), 정전기적 인력 (electrostatic attraction) 등의 원리에 의해 제거 된다 (Yang and Lee, 2005; Ramirez, 2015). 호흡저항은 공기가 마스크를 통과시 압력강하 (pressure drop) 와 관련이 있으며 입자의 속도 또는 공기의 속도, 축적된 입자의 양 (aerosol loading), 입자 종류 (hygroscopic versus non-hygroscopic), 상대습도 (relative humidity, RH) 등의 영향을 받는다고 알려져 있다 (Miguel, 2003; Newnum, 2010; Mostofi et al., 2011; Ramirez, 2015). 대개 많은 마스크 사용자들은 호흡저항이 커지면 호흡의 불편함으로 인하여 마스크 사용을 중지하게 되고 미세먼지에 노출에 의한 위해성이 증가할 수 있다. 추가로 마스크 성능 평가 시 마스크와 얼굴의 밀착에 따른 누설 평가도 함께 이루어진다.

한국의 경우 보건용 마스크의 성능과 등급을 평가하기 위해서 입자 제거효율, 호흡저항, 누설률 (leak rate)을 측정한다 (NIFDS, 2017; Cho and Shin, 2019). 제거효율 80% 이상 (유량 95 lpm), 호흡저항 6.2 mm H<sub>2</sub>O 이하 (유량 30 lpm), 누설률 25% 이하 조건을

만족한 경우 KF80 등급으로 황사 마스크 인증을 받는다 (NIFDS, 2017). KF 94의 경우 제거효율 94% 이상 (유량 95 lpm), 호흡저항 7.2 mm H<sub>2</sub>O 이하 (유량 30 lpm), 누설률 11% 이하 조건을 만족해야 한다 (NIFDS, 2017). 가장 높은 등급인 KF 99의 경우 제거효율 99% 이상 (유량 95 lpm), 호흡저항 10.3 mm H<sub>2</sub>O 이하 (유량 30 lpm), 누설률 5% 이하 조건을 만족해야 한다 (NIFDS, 2017). KF80은 염화나트륨 (NaCl) 입자를 사용하고 KF94, KF99는 염화나트륨/파라핀 오일 입자 모두를 사용하여 평가하며, 염화나트륨 입자 농도는  $8 \pm 4 \text{ mg/m}^3$ , 파라핀 오일 입자 농도는  $20 \pm 5 \text{ mg/m}^3$ 이다. 시험용 마스크는 온도  $38 \pm 2.5^\circ\text{C}$ , 상대습도  $85 \pm 5\%$ 에서  $24 \pm 1$ 시간 동안 방치한 후 사용한다. 이와 비슷하게, 미국의 경우 마스크의 등급은 가장 통과가 잘되는 입자 크기 (most penetrating particle size, MPPS)의 제거효율 값 (95%, 99%, 100%) 과 오일에 대한 저항성을 기준 (N: not resistant to oil, R: somewhat resistance to oil, and P: strongly resistance to oil)으로 나눈 알파벳과 결합하여 사용한다 (예, N95) (Bollinger and Schutz, 1987; NIOSH, 2005). 호흡저항은 25 mm H<sub>2</sub>O (들숨) 또는 35 mm H<sub>2</sub>O (날숨) (유량 85 lpm) 보다 적으면 마스크 등급 평가를 통과 할 수 있다 (Janssen et al., 2018).

위의 내용처럼 등급이 부여된 마스크 일지라도 습도에 의한 영향, 성능 지속시간 및 재사용에 대한 정보는 거의 없는 상태이다. 마스크는 다양한 환경에서 착용 되기 때문에 노출된 환경 요인 (예, 상대습도), 노출 입자 종류 및 양, 착용 시간 등에 따라 성능이 변화될 것으로 예측된다. 상대습도가 높은 조건에서는 수분에 의해 정전 필터의 성능을 저하해 입자 제거효율이 떨어질 수 있다고 보고된 바 있다 (Motyl and Lowkis, 2006). 하지만 다른 선행 연구에서는 입자 제거효율에 미치는 상대습도 영향이 미미하다고 보고하기도 했다 (Yang and Lee, 2005). 호흡저항 또한 상대습도에 영향을 받고 상대습도가 높아질수록 저항이 증가된다고 보고되기도 하였다 (Roberge et al., 2010).

본 연구에서는 시중에 나와 있는 다양한 종류의 보건용 마스크의 주요 필터에 대해 제거효율, 호흡저항, 누설률 등을 측정하여 성능 평가를 수행하였고 유입 공기의 상대습도 영향, 물 또는 알코올 노출

영향, 그리고 재사용 평가를 수행하였다. 정전 필터를 포함하고 있는 마스크, 나노섬유를 포함한 마스크, 등급을 부여받지 못한 마스크 (미인증) 등을 대상으로 실험하였다. 마스크 필터의 표면 특성과 성분은 주사전자현미경(SEM)/에너지분산엑스선분석기(EDX) 장비를 통하여 분석하였다. 실험 입자로는 특정 크기의 단분산 (monodisperse) 염화나트륨 입자 (50 nm, 100 nm, 200 nm, 300 nm)와 다분산 (polydisperse) 염화나트륨 입자를 사용하였다. 마스크에 유입 혹은 노출되는 공기의 상대습도를 여러 조건으로 제어하여 평가하였고 물 또는 알코올에 노출된 마스크 필터의 평가도 수행하였다. 이때 알코올에 적신 필터는 유기 용매에 노출된 필터 성능 변화를 파악하고자 하였다. 재사용 평가의 경우 실제 환경에서 하루에 2시간씩 하루에서 5일간 사용 후 제거효율 및 흡기저항을 측정하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험대상

실험 대상은 보건용 마스크로 인증되고 시중에 판매되고 있는 황사 마스크 (KF80) 위주로 진행하였다. KF80 인증을 받은 마스크 뿐만 아니라 미인증 마스크도 포함하였다. 표 1은 실험에 사용된 마스크들을 정리하였다. A, B, C, E 마스크의 경우 정전 필터를 사용하였고 D 마스크의 경우 나노섬유

필터를 사용하였다고 제품에 명시되어 있다. 47 mm 크기로 맞춘 마스크 필터의 무게는 전자 저울 (Cubis, Sartorius, Germany)로 측정하였다. 이중 E 마스크 필터 무게가 가장 가벼운 것으로 나타났다. 또한 마스크당 1개의 가격은 인터넷 상에서 알려진 가격으로 나타내었다.

### 2.2 마스크 필터 구조 및 구성성분 특성 측정 방법

마스크 필터의 구조, 표면 특성, 구성성분은 주사전자현미경 (SEM/EDX, S-4700, Hitachi, Japan)을 사용하여 분석하였다. 마스크는 여러 개의 레이어로 구성되어 있고 레이어에 있는 필터에 대해 분석하였다. 4개의 레이어를 가지는 A, B, C 마스크의 경우 3번째 레이어가 미세먼지 제거 핵심 필터이며, D, E 마스크의 경우 2번째 레이어가 핵심 필터인 것으로 확인되었다.

### 2.3 마스크 필터 성능 평가 방법

마스크 필터의 성능 평가를 위한 실험 장치 시스템에 대한 개략도를 그림 1에 나타내었다. 단분산과 다분산 염화나트륨 입자를 발생하고 제어하는 시스템, 상대습도 제어 시스템, 필터 전후 입자 제거효율 및 압력강하 측정 시스템, 호흡저항 측정 시스템, 누설률 측정 시스템 등으로 구성되어 있다. 미국 TSI사의 분무장치 (3076, TSI, USA)를 사용하여 염화나트륨 수용액 (1wt%)으로부터 염화나트륨 물방울 입

Table 1. A summary for commercial face masks tested in this study.

	Sample A	Sample B	Sample C	Sample D	Sample E
Certification grade	KF80	KF80	KF80	KF80	Uncertified
Number of layers	4	4	4	3	3
Filter type	Electret filter	Electret filter	Electret filter	Nanofiber filter	Electret filter
Mask filter weight (g/m <sup>2</sup> )	253.6	184.4	144.1	98.0	69.2
Price	1900 won	1200 won	1800 won	2000 won	171 won

자를 에어로졸화 시킨다. 이때 발생한 염화나트륨 물방울 입자는 확산 건조기 (diffusion dryer)를 통과하면서 물은 증발하기 때문에 염화나트륨 입자만 남게 된다. 이렇게 생성된 입자는 다분산 (polydisperse) 입자로 정의되며 필터 성능 테스트에 활용된다. 이때 발생된  $PM_{2.5}$ 의 질량농도와 필터 통과 이후  $PM_{2.5}$ 의 질량농도를 측정하여  $PM_{2.5}$  제거효율 계산에 이용하였다.

또한 다분산 입자에서 특정 크기의 입자인 단분산 (monodisperse) 입자를 얻기 위해서는 차등이동성 분석기 (differential mobility analyzer, DMA, 3081, TSI, USA) 장치를 이용하면 가능하다. 이때 선별되는 입자의 크기는 전기이동도 동등 크기 (electrical mobility equivalent size)로 정의된다 (Wang and Flagan, 1990; Kelly and McMurry, 1992). 차등이동성 분석기에서 나오는 에어로졸 유량과 입자가 없는 깨끗한 공기의 유량을 혼합하여 원하는 유량으로 제어하고, 필터 전후의 입자 수농도 또는 질량농도는 각각 응축입자계수기 (condensation particle counter, CPC, 3772, TSI, USA) 또는 질량농도 계측기 (DustTrak, TSI,

USA)를 사용하여 측정하였다. 즉, 입자 크기 별 제거효율은 단분산 입자를 적용하여 응축입자계수기로 측정된 수농도를 기준으로 계산하였고  $PM_{2.5}$  제거효율은 다분산 입자를 적용하고 질량농도 계측기로 측정된 질량농도를 기준으로 계산하였다. 여기서 단분산 입자의 경우 DMA 후단이므로 양의 전하로 하전된 입자를 사용하여 평가한 것이고 (수농도 기준 제거효율 평가), 다분산 입자 (즉,  $PM_{2.5}$  질량 기준 제거효율 평가)의 경우에는 중화기 없이 건조 후 입자를 사용하여 평가하였다.

실험에 사용되는 필터들은 직경 47 mm 크기로 맞춰 실험을 진행하였고, 기계식 필터의 MPPS로 잘 알려진 300 nm 크기와 함께 50 nm, 100 nm, 200 nm, 까지 총 4가지 크기에 대한 입자 제거효율을 각각 측정하였다. 필터 전후의 압력강하는 차압계 (DPM, Sensys, Korea)를 이용하여 측정하였다. 마스크 필터 성능 평가에 사용된 기준유량은 20 lpm으로 설정하였으며, 실질적인 필터 통과 직경은 34 mm이다. 따라서 입자가 통과하는 필터 면적은 약  $9.1 \text{ cm}^2$  이며, 여과속도는 37 cm/sec 이다.

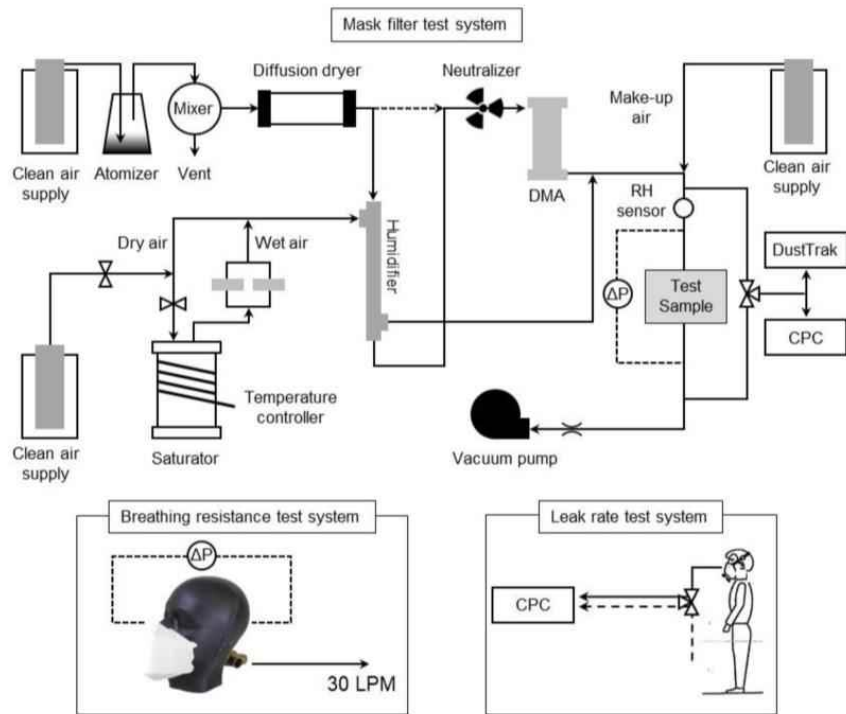


Figure 1. A schematic for experimental setup to measure collection efficiency of size-resolved NaCl particles (50 nm, 100 nm, 200 nm, and 300 nm) and polydisperse NaCl particles under varied RH conditions, including pressure drop, breathing resistance, and leak rate.

추가로 마스크 필터의 성능을 품질 인자 (quality factor,  $q_f$ )를 도입하여 계산하였다 (Cho et al., 2011; Huang et al., 2013). 고효율 필터는 높은 입자 제거 효율과 낮은 압력강하를 가져야 한다. 필터 품질 인자는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.  $\Delta P_{pressure}$ 는 압력강하 (pressure drop)이고  $P_{penetration}$ 는 입자 투과율 (penetration)이다.  $P_{penetration}$ 는 입자 제거효율로부터 계산된다. 필터 품질 인자 값이 높을수록 고효율 필터에 속한다고 볼 수 있다. 따라서 필터의 품질 인자는 입자 크기와 여과 속도가 일정할 경우 필터의 성능 비교 평가의 척도가 될 수 있다.

습한 유입 공기 환경에서의 입자 제거효율 평가를 위해 습공기 (wet air)를 그림 1에 나와 있는 것처럼 포화기 챔버로부터 발생하였다. 이때 발생한 습공기는 건공기 (dry air)와 혼합되어 적절한 상대습도를 만들어 줄 수 있게 된다. 에어로졸 유량과 혼합공기는 습도관 (Nafion tube) (MH-110-24S-4, Perma Pure, USA)에서 만나 물 분자 교환이 이루어지고 우리가 원하는 상대습도를 확보하였다. 상대습도 측정 지점은 추가 공기와 혼합 이후 마스크 필터 통과 직전 측정하였다 (그림 1 참조). 습한 유입 공기 평가에서는 <10% RH (건조한 조건), 40% RH, 70% RH 조건에서 각각 실험을 수행하였다. 상대습도 계측의 오차는 2% 이다 (계측기 불활실성). 75% 이상의 높은 상대습도에서는 발생된 염화나트륨 입자가 수분을 흡수하여 입자의 크기가 설정한 것보다 커지기 때문에 최대 상대습도는 70%로 설정하였다. 그리고 필터 통과 전 추가 공기와 혼합되기 때문에 최대 상대습도 확보에는 제한이 있다. 실험 순서는 상대습도 측정 지점으로부터 원하는 상대습도 조건을 맞춰준 후, 필터 전후 농도를 각각 30초 동안 세 번씩 측정하여 평균 제거효율을 산출하였다.

2.4 마스크 흡기저항 및 누설률 평가 방법

안면부흡기저항은 마스크를 안면 모형에 착용 및 밀착시킨 후 측정하였다 (그림 1 참조). 유량 30 lpm을 통과 시켰을 때의 길리는 차압을 측정하였다. 누설률은 시험대상자가 마스크를 착용했을 때 입이 위치해 있는 부분에 누설률 평가 장치를 연결한다. 시험대상자가 마스크를 착용한 상태에서 30초 동안 마스크 주변 실험실 내의 입자 농도를 측정 후 시험대상자가 착용한 마스크 내부 입자 농도를 측정하였

다. 이때, 여자/남자 각각 한 명씩 3번 이상 측정한다. 누설률 계산은 마스크 내부 입자 농도 (하위 30%)를 실험실 내 입자 농도로 나누어 계산하였다.

2.5 마스크 재사용 평가 방법

첫번째로 마스크 필터를 90±9% RH 이상의 습공기에 (항온항습기) 약 2-6시간 동안 노출 시킨 후 입자 제거 성능 평가를 수행하였다. 추가로 마스크 필터를 물 (deionized (DI) water)에 약 3시간 동안 적신 후 70℃에서 다시 12시간 이상 건조 시킨 후 입자 제거 성능 평가를 수행하였다. 유기 물질의 영향도 알아보기 위하여 마스크 필터를 알코올 (isopropyl alcohol)에 약 3시간 동안 적신 후 동일한 실험을 수행하였다. 일반적으로 필터 정전기력의 경우 습기와 알코올에 약하며 노출 시 정전기력이 저하된다. 마지막으로 마스크를 실제 사람이 일상생활에서 여러 번 착용을 반복하여 재사용성을 평가하였다. B, E 마스크를 사용하여 실험하였고, 각 1, 2, 3, 4, 5일 동안 연속적으로 재착용을 실시하였다 (하루 2시간 착용 이후 물로 스프레이/건조 후 재착용). 1회 착용을 2시간 이상으로 정하여 일정 시간 이상 착용을 원칙으로 하였고, 재착용 시 12시간 이상 건조한 후 익일에 재착용하도록 하였다. 마지막 착용 일에는 착용한 것을 그대로 사용하여 안면부흡기저항을 측정한 후, 47 mm 필터 형태로 맞춰 입자 크기 별 제거효율 측정하였다.

3. 결과

3.1 마스크 필터의 구조 및 구성성분 특성

그림 2는 본 연구에서 주사전자현미경(SEM)을 이용한 사용된 마스크 (A, B, C, D, E) 레이어 별 모양과 구조를 표시한 것이다. A, B, C 마스크의 경우 4개의 레이어를 포함하고, D, E 마스크의 경우 3개의 레이어를 포함하고 있다는 것을 확인하였다. B, D, E 마스크의 경우 첫 레이어 (outer layer)와 마지막 레이어 (inner layer)는 비슷한 구조를 가졌다. 즉, 첫 레이어와 마지막 레이어는 비슷한 부직포 필터를 사용하는 것으로 보인다. 중간 레이어에 들어간 필터들은 다른 레이어에 비해 두께가 얇은 섬유들로 촘촘하게 구성된 필터임을 확인 할 수 있었다. 대부

분의 입자는 중간 레이어 (filter layer)에 있는 필터에 의해 제거된다고 알려져 있다. D 마스크의 경우 두께가 얇은 나노섬유가 사용된 것을 확인할 수 있었다. 즉, 다른 마스크 필터에 비해 많은 공극 (pore)을 포함하고 있음을 보여주었다. 이는 나노섬유 필터의 경우 정전 필터 방식보다는 물리적 제거를 통한 입자 포집이 이루어져야 하므로 섬유들이 촘촘하게 많은 공극을 이루는 형태의 배열로 되어있음을 볼 수 있었다.

또한 그림 2에서 주사전자현미경(SEM)/에너지분산엑스선분석기(EDX)를 이용한 필터 별 중간 레이어 (filter layer)에 대한 섬유의 자세한 구조와 구성 원소 성분을 표시하였다. 필터 섬유의 경우 대부분 탄소 (Carbon)와 산소 (Oxygen)로 이루어져 있음을 확인할 수 있었다. 통상적으로 polypropylene, polycarbonate, polyurethane, polyethylene oxide 등과 같이 낮은 전기 전도도를 갖는 고분자 물질들이 필터 재료로써 사용되기 때문에 발견되는 원소 성분의 대부분은 탄소와 산소로 이루어져 있다 (Motyl and Lowkis, 2006). 특히 D 마스크 필터 (나노섬유)의 경우 상당한 양의 불소 (Fluorine)를 포함하고 있음을 확인하였다. 이는 나노섬유 필터 제작 원료와 방법이 정전 필터와 전혀 다르다는 것을 제시하여 준다. 불소가 포함된 나노섬유는 보통 polyvinylidene fluoride (PVDF)

와 polytetrafluoroethylene (PTFE)을 혼합하여 제조한다고 알려져 있고 PTFE 첨가 정도에 따라 공극 크기를 조절할 수 있다. 또한 기존 필터보다 장기간 높은 여과 효율을 유지, 낮은 압력강하, 높은 비표면적 (specific surface area)과 대전 안정성 (charge stability)을 가지고 있다고 보고되었다 (Lolla et al., 2016; Wang et al., 2016).

3.2 마스크 필터의 성능 평가 결과

입자 크기 별 (50 nm, 100 nm, 200 nm, 300 nm) 제거효율을 그림 3 (a)에 나타내었다. 입자 크기 별 평가는 입자의 수농도를 기준으로 측정하였고, 보여진 결과는 모두 상대습도 10% 미만의 건조한 조건에 수행된 것이다. A, B, C, E 마스크 필터의 경우 200 nm 에서 가장 낮은 제거효율을 보여주었으며, 평가한 입자 크기 중 50 nm 크기에서 가장 높은 효율이 나타났다. A, B, C, E 4종의 마스크는 정전 필터를 사용한 제품이므로, 확산 (diffusion)뿐만 아니라 정전기적 인력 (electrostatic attraction)이 작은 입자 포집 영향에 크게 작용한 것으로 보인다. 따라서 이 4종 마스크의 경우 200 nm MPPS가 된다. 이와 대조적으로 D 마스크의 경우 정전 필터가 아닌 나노섬유 필터를 사용하므로 300 nm 에서 가장 높은 제거효율을 보였지만, 50 nm 와 100 nm 에서 상대

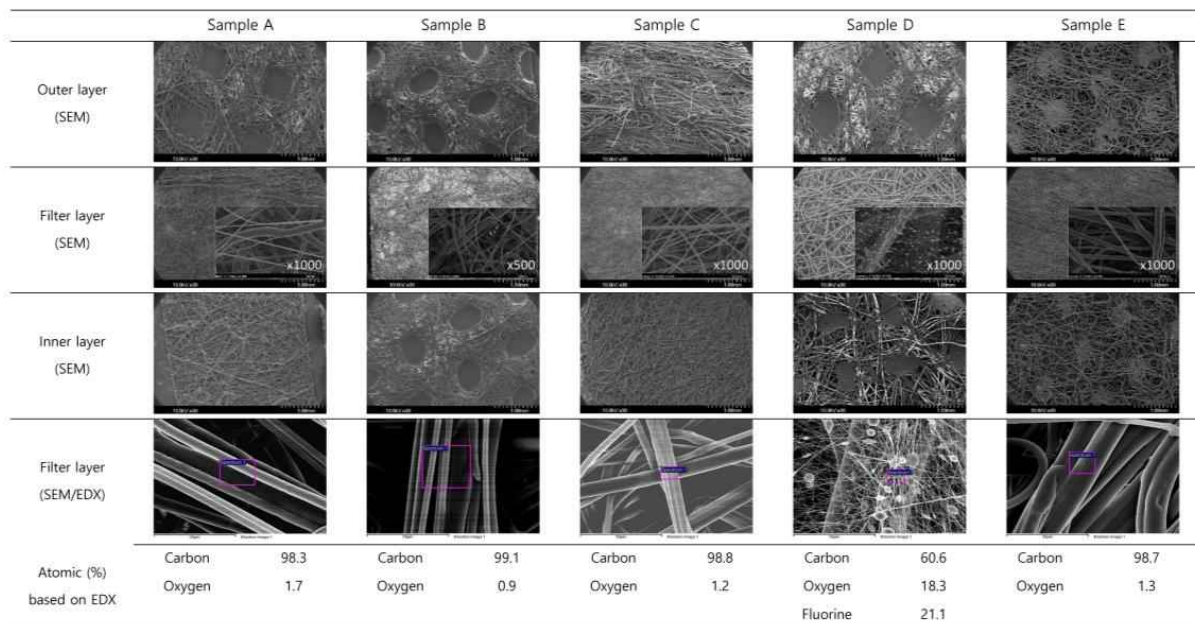


Figure 2. Results for SEM/EDX data for 5 types of face masks.



적으로 낮은 효율을 보였다. 즉, D 마스크 필터의 경우 상대적으로 정전기적 인력이 낮아 작은 입자에 대한 제거효율이 감소하여 낮은 MPPS가 보인 것으로 해석할 수 있다. 본 결과를 바탕으로 공식적인 인증을 받은 마스크 일지라도 수농도 기준 측면에서 특정 크기 입자의 제거효율은 80% 미만이 될 수 있음을 시사한다. 그리고 이처럼 측정된 MPPS (~200 nm) (나노섬유 마스크 제외)와 투과율 (penetration) 결과가 기존의 선행 연구결과와 차이가 있는 것은 사용 유량, 필터 종류, 필터 여재 크기, 정전력의 크기 등의 차이 때문으로 추정된다 (Eshbaugh

et al., 2008; Rengasamy et al., 2009; Shaffer and Rengasamy, 2009; Rengasamy et al., 2013). 현재 평가에 사용된 유량 (20 lpm)은 85 lpm 유량을 사용한 경우와 비교하였을 때 (Rengasamy et al., 2009; Li et al., 2012) 상대적으로 작지만 필터여재의 크기도 작아 여과 속도가 빠른 경우이다. 본 실험 조건의 계산된 여과 속도는 37 cm/sec 이다. 여과 속도가 빨라지면 입자 체류 시간이 짧아져 특히 크기가 작은 입자의 제거효율이 큰 입자에 비해 상대적으로 더 많이 감소 될 것이다. 이는 MPPS가 상대적으로 작아지는 것에 기여 할 수 있다 (Balazy et al., 2006; Alderman et al., 2008; Jung et al., 2013). 매우 높은 등급의 마스크 정전 필터 평가 결과 (Eshbaugh et al., 2008; Alderman et al., 2008)와 비교하였을 때 현재의 투과율 값은 상대적으로 높았다. 여과 속도가 빨라 체류 시간이 짧아지면 전반적으로 작은 크기 입자들의 제거효율이 감소하여 투과율 (penetration)이 증가한다. E 마스크의 경우 인증 등급은 없지만, 입자 크기 별 (50 nm, 100 nm, 200 nm, 300 nm) 제거효율이 다른 마스크 필터 대비 성능이 크게 저하되지 않았다.

PM<sub>2.5</sub> 질량농도를 기준으로 평가된 제거효율 실험 결과를 그림 3 (b)에 나타내었다. 즉, 질량농도 기준으로 평가되고 있는 현 마스크 등급 평가 및 인증 절차와 동일하게 수행하기 위해서, 다분산 입자를 이용한 PM<sub>2.5</sub> 제거효율 평가를 진행하였다. 앞서 언급된 수농도 기반 단분산 입자의 제거효율과 달리 E 마스크 (미인증) 필터가 약 74%로 가장 낮았고 KF80 인증 마스크 4종은 PM<sub>2.5</sub> 제거효율이 모두 90% 이상으로 인증 기준을 충족하였다. 단분산 입자의 경우 입자 수농도에 의해 제거효율을 산출하였고 다분산 입자의 경우 PM<sub>2.5</sub> 질량농도를 기준으로 제거효율을 산출하였다. 여러 이전 연구에서 입자 수농도를 기준으로 하는 단분산 입자의 제거효율이 다분산 입자의 질량농도 기준으로 하는 제거효율보다 낮다는 보고가 있다 (Martin and Moyer, 2000). 그리고 단분산 입자 실험에 포함되지 않는 크기의 입자들의 제거효율이 마스크 필터 샘플 E의 경우 상대적으로 더 낮아 전체 PM<sub>2.5</sub> 질량농도를 기준으로 하였을 때 제거효율이 많이 저하될 수 있을 것으로 추정된다. 표 1에서 언급한 바와 같이 E 마스크 필터의 경우 여과층의 단위 면적당 무게가 제일 가벼

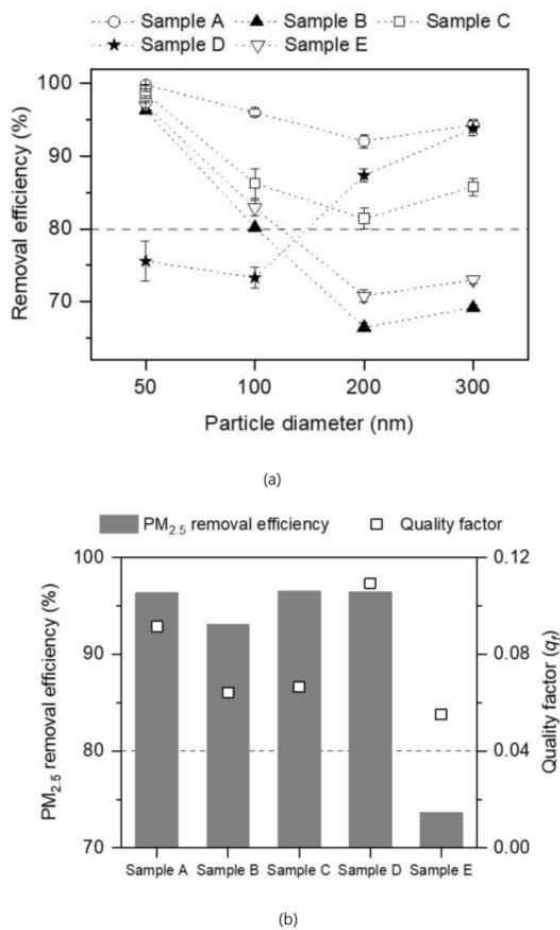


Figure 3. (a) removal efficiency of 50 nm, 100 nm, 200 nm, and 300 nm NaCl particles based on number concentration, and (b) removal efficiency and quality factor based on PM<sub>2.5</sub> mass concentration for 5 types of face mask filters under dry condition (<10% RH).

운 것도 (상대적으로 적은 여과층) 낮은 제거효율에 기여했을 것으로 추정된다. 하지만 실제 정전력 크기, 필터 재료 등의 특성에 관해서는 확인할 수 없었다. 추가로 앞서 언급한 필터 품질 인자 공식을 이용하여, 그림 3 (b)에 도시된 것처럼 PM<sub>2.5</sub>에 대한 5종의 품질 인자를 살펴보았을 때 D 마스크 필터가 가장 좋은 품질 인자 값을 가진 것으로 확인되었다. D 마스크 필터는 E 마스크 필터 다음으로 가벼우면서도 3개의 레이어로 이루어졌음에도 불구하고 조밀한 나노섬유의 높은 여과효율과 더불어 그림 4에서 언급될 낮은 안면부흡기저항 덕분에 더 나은 품질 인자에 기인한 것으로 판단된다.

그림 4 (a)는 5종의 마스크의 안면부흡기저항을 측정된 결과를 도시한 것이다. 표시된 값은 모든 레이어의 필터가 포함된 실제 마스크의 흡기저항이고 인증 실험 조건과 같은 유량 (30 lpm)에서 평가하였

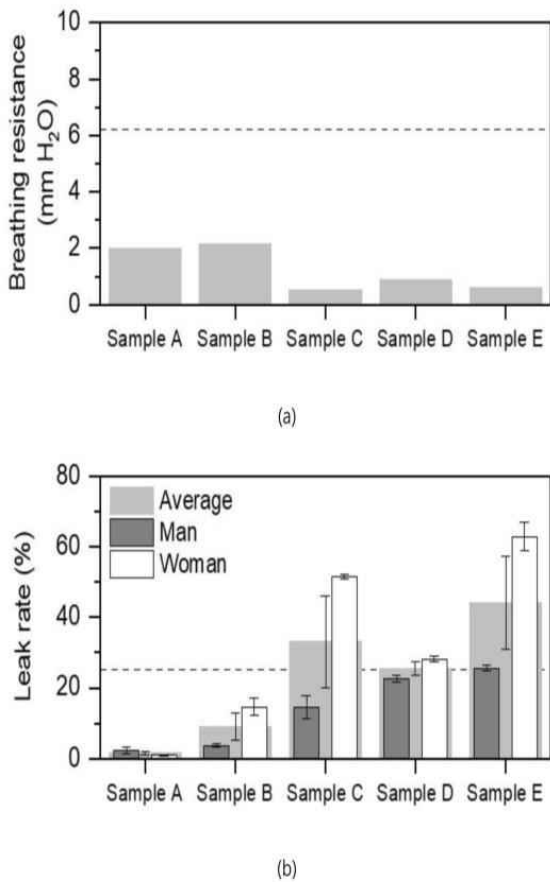


Figure 4. (a) breathing resistance (mmH<sub>2</sub>O) and (b) leak rate (%) for 5 types of face masks under dry condition (<10% RH).

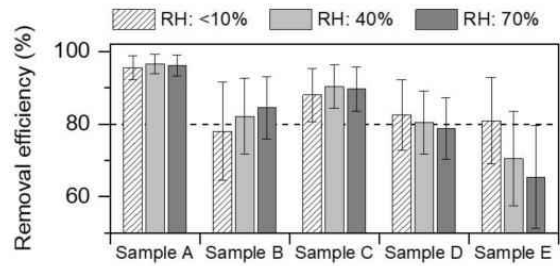


Figure 5. Comparison of removal efficiency (%) for 5 types of face mask filters under different RH conditions (<10%, 40% and 70%) of incoming aerosol flow. The average removal efficiency is obtained from those of 50 nm, 100 nm, 200 nm, and 300 nm particles.

다. 안면부흡기저항은 A, B 마스크가 상대적으로 높았고 C, D, E 마스크는 낮은 값을 보이는 차이에도 불구하고, 모든 마스크가 안면부흡기저항 KF80 등급 조건 (6.2 mm H<sub>2</sub>O)을 모두 만족하였다. 그림 4 (b)에 보이듯 누설률 평가의 경우 A 마스크가 1.6±0.5%로 가장 누설률이 적었고, B>D>C>E 마스크 순으로 누설률이 높았다. 그중 E 마스크가 44±13%로 가장 높았다. C와 E마스크의 경우 표준 편차가 큰 것을 볼 수 있는데, 이는 성별, 얼굴 크기 및 모양, 착용 방법 등에 따라 누설률이 차이가 보인 것으로 추정된다. 남성의 경우는 전체적으로 누설률이 30% 이하로 여성보다 낮았고, E 마스크 (미인증)의 경우 60%가 넘는 누설률을 보이기도 하였다.

마스크 필터에 유입되는 공기의 상대습도가 높은 조건 (40%, 70%)에서 입자 제거효율 평가 결과 (입자 크기 별 결과값을 평균)를 그림 5에 도시하였다. 비교를 위해 상대습도가 10% 미만인 건조한 조건에서의 제거효율 평가 결과도 같이 나타내었다. E 마스크 (미인증) 필터의 경우 상대습도 증가 시 제거효율이 5% 정도 감소했지만 다른 4종의 마스크의 경우 40% 조건과 비교하여 70% 조건에서도 1% 내외로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 오히려 상대습도가 높은 조건에서의 제거효율이 역으로 2% 정도 증가하는 마스크 (B)도 존재하였다. 따라서 KF80 인증을 받은 마스크의 경우 유입되는 공기의 상대습도가 70%로 높은 수준일지라도 제거효율 측면에서 큰 영향을 받지 않았다. 그림 5에 도시하지는 않았지만 압력강하의 경우 소폭 상승하기도 한 마스크



필터도 있었지만 그 영향은 거의 미미한 것으로 확인되었다.

3.3 마스크 필터의 재사용 평가 결과

그림 6은 마스크 필터의 재사용 평가를 위해 첫 번째로 상대습도 90% 조건의 항온항습기에 마스크 필터를 2-6시간 동안 노출한 후에 마스크 필터 성능(입자 크기 별 결과값을 평균)을 평가한 결과를 보여준다. 그림 6 (a)은 4종의 인증된 마스크 필터에 대해 2시간 동안의 상대습도 90%에 노출한 후 측정된 결과이다. 전반적인 입자 제거효율의 감소는 고습도 조건에 노출하지 않은 것과 비교하여 미미하였고 E 마스크 (미인증)의 경우 약 5%로 가장 크게 감소하였다. 그림 6 (b)의 결과는 C 마스크 필터를

사용하여 최대 6시간 동안 상대습도 90%에 노출한 뒤 다분산 입자의 수농도 기준으로 측정된 제거효율 및 압력강하를 측정하였다. 6시간 동안 노출되었을 때 3%정도 제거효율이 감소하였다 (0.6%/hour 감소율). 정전 필터의 경우 습도가 증가함에 따라 표면 전하가 감소하기 때문에 분진포집효율은 감소한다고 알려져 있다 (Ikezaki et al., 1995; Łowkis and Motyl, 2001). 하지만 최근 마스크 필터의 경우 표면 처리를 통해 물 분자에 의한 영향을 최소화한 것으로 보인다 (Yang and Lee, 2005).

두번째 재사용 평가 실험은 마스크 필터를 물에 3시간 동안 적신 다음에 건조한 후, 마스크 필터 성능 측정 실험을 진행하였다. 그림 7에 도시된 것처럼 모든 종류의 마스크 필터의 제거효율(입자 크기 별 결과값을 평균)이 전반적으로 감소된 것을 확인하였고, 그중 E 마스크 (미인증) 필터의 제거효율 성능 저하가 가장 큰 것으로 나타났다 (26% 감소). 같은 방법으로 유기성분입자 혹은 휘발성 유기화합물에 노출된 마스크 필터의 성능 변화를 파악하기 위해 알코올을 이용한 성능 평가가 같이 수행되었다 (물 대신 알코올에 적신 후 평가). 그림에 표시된 것처럼 모든 마스크 필터의 제거효율이 전반적으로 13-37% 범위 내에서 저하되는 것을 확인하였으며 (물에 적신 경우 보다 더 큰 성능 저하를 보임), 그중 D 마스크 필터의 경우 성능 저하가 가장 낮은 13% 였다 (E 마스크 필터는 37% 감소). 정전 필터가 아닌 D 마스크 필터는 유기성분입자 및 휘발성 유기화합물 노출에 상대적으로 높은 저항력을 가진 것으로 보인다.

세번째는 실제 생활환경에서 사용 후 재사용 평가를 진행하였으며 그 결과는 그림 8에 도시하였다. 2종 (B, E)의 마스크를 사용하였고, 총 5일 연속적으로 재사용을 실시하였다 (하루 2시간 착용 이후 물로 스프레이/건조 후 재사용). 미착용 대비 연속 착용 일수 별 1일부터 5일까지 B 마스크 필터의 입자 제거효율(입자 크기 별 결과값을 평균) 감소는 4% 미만으로 미미하였다. 하지만 E 마스크 (미인증) 필터의 경우 착용 일수 별로 점차적으로 18-30%까지 제거효율이 감소하였다. E 마스크 필터의 경우 B 마스크 필터와 비교하여 한 번 착용 후 제거효율이 현저하게 감소함을 확인할 수 있었다. 사용 후 재사용 시 물 스프레이 후 건조를 하기 때문에, 상대적으로

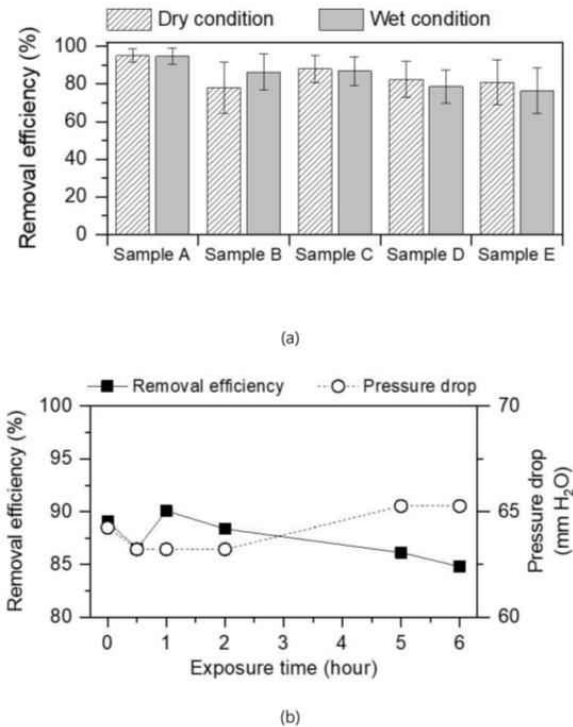


Figure 6. (a) comparison of removal efficiency (%) for 5 types of face mask filters exposed to dry (<10% RH) and wet (90% RH) conditions for 2 hours (the removal efficiency is obtained from those of 50 nm, 100 nm, 200 nm, and 300 nm particles), and (b) removal efficiency (%) and pressure drop (mmH<sub>2</sub>O) for C face mask filters exposed to wet condition (90% RH) up to 6 hours.

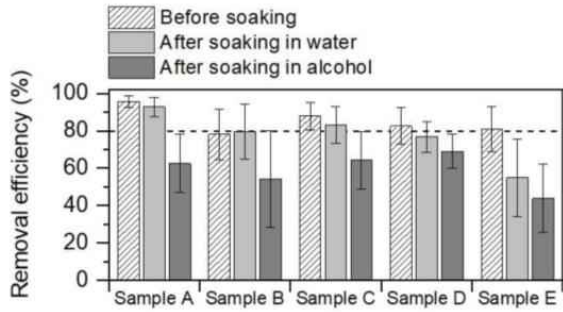


Figure 7. Comparison of removal efficiency (%) for 5 types of face mask filters after soaking in water and alcohol. The average removal efficiency is obtained from those of 50 nm, 100 nm, 200 nm, and 300 nm particles.

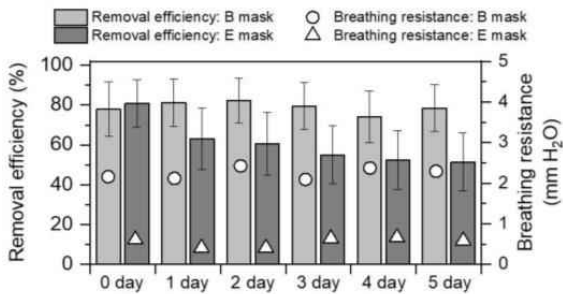


Figure 8. Removal efficiency (%) and breathing resistance (mmH<sub>2</sub>O) for B and E face masks after use for 5 consecutive days (2 hours per day) in real life. The average removal efficiency is obtained from those of 50 nm, 100 nm, 200 nm, and 300 nm particles.

물에 취약한 (앞 실험을 통해 확인함) E 마스크 필터가 제거효율이 크게 감소함을 알 수 있었다. 안면 부흡기저항의 경우 두 마스크 필터 모두 재착용에 따른 변화가 거의 없음을 확인하였다. 이는 실제 노출된 실내외 초미세먼지 농도 조건이 평균적으로 25 µg/m<sup>3</sup> 수준이므로 고농도 작업장 등 비해 훨씬 낮은 농도 수준이라 입자 포집량 증가에 의한 흡기 저항 증가 (aerosol loading effect)는 미미한 것으로 보인다. 본 연구에서 물 스프레이 이후 12시간 이상 건조한 후 재착용 (하루 2시간)은 좀 더 오랜 실제 사용 시간을 모사하려는 방법이었고 앞으로 좀 더 다양한 조건에서 재착용 실험이 필요할 것으로 보인다.

#### 4. 결론

정전 필터 마스크 (KF80 인증), 나노섬유 필터 마스크 (KF80 인증), 미인증 마스크 등에 대해 단분산과 다분산 염화나트륨 입자를 사용하여 제거효율을 평가하였을 때 미인증 마스크 필터를 제외하면 PM<sub>2.5</sub> 제거효율이 모두 90%이상이었으며, 나노섬유 필터 마스크는 낮은 압력강하와 높은 제거효율로 인해 가장 좋은 품질 인자 값을 가진 것으로 확인되었다. 필터 구조 및 구성성분 분석 결과 나노섬유 필터 마스크가 나노섬유들이 촘촘하게 많은 공극을 가진 구조로 배열되어 있었고 필터를 구성하는 나노섬유가 탄소와 산소성분뿐만 아니라 상당한 양의 불소를 포함하였다. 유입 공기 또는 노출 상대습도가 증가하더라도 KF80 인증을 받은 마스크의 경우 입자 제거효율은 거의 영향을 받지 않았다. 물에 적셔서 건조 후의 극한 조건에서는 마스크 필터의 제거효율이 떨어졌고 미인증 마스크 필터가 가장 높은 성능 저하를 나타내었다. 유기 용매 효과를 보기 위하여 알코올에 적셔서 실험한 경우에는 입자 제거효율이 전반적으로 저하되었다 (13-37% 감소). 즉, 물에 적신 경우 보다 더 큰 성능 저하를 보였다. 나노섬유 필터 마스크의 경우에 제거효율 저하가 가장 적었다 (13% 감소). 이는 정전 필터가 아닌 나노섬유 필터 마스크 경우 알코올 노출에 상대적으로 강한 저항력을 가진다고 할 수 있겠다. 재사용 평가의 경우 (하루 2시간 착용 이후 물로 스프레이/건조 후 재착용) 마스크 필터의 입자 제거효율이 5일 사용 이후 4% 미만으로 미미하였지만, E 마스크 (미인증) 필터의 경우 착용 일수 별로 점차적으로 18-30%까지 제거효율이 감소하는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 정부 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 사회문제해결형기술개발사업 (초미세먼지 피해저감 사업단) (NRF-2014M3C8A5030612)와 중견연구자지원사업 (중견연구) (NPF-2019R1A2C3007202)의 지원을 받아 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Adhikari, A., Mitra A., Rashidi A., Ekpo I., Schwartz J., and Doehling J. (2018). Field Evaluation of N95 Filtering Facepiece Respirators on Construction Jobsites for Protection against Airborne Ultrafine Particles, *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 15(9), 1958.
- Alderman, S. L., Parsons, M. S., Hogancamp, K. U., and Waggoner C. A. (2008). Evaluation of the Effect of Media Velocity on Filter Efficiency and Most Penetrating Particle Size of Nuclear Grade High-Efficiency Particulate Air Filters, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5, 713-720.
- Balazy, A., Toivola, M., Reponen T., Podgorski A., Zimmer A., and Grinshpun S. A. (2006). Manikin-Based Performance Evaluation of N95 Filtering-Facepiece Respirators Challenged with Nanoparticles, *Annals of Occupational Hygiene*, 50(3), 259-269.
- Bollinger, N. J., and Schutz R. H. (1987). NIOSH Guide to industrial respiratory protection.
- Cherrie, J. W., Apsley A., Cowie H., Steinle S., Mueller W., Lin C., Horwell C. J., Sleuwenhoek A., and Loh M. (2018). Effectiveness of face masks used to protect Beijing residents against particulate air pollution, *Occupational and Environmental Medicine*, 75(6), 446-452.
- Cho, H.-W., Yoon C.-S., Lee J.-H., Lee S.-J., Viner A., and Johnson E. W. (2011). Comparison of pressure drop and filtration efficiency of particulate respirators using welding fumes and sodium chloride, *Annals of Occupational Hygiene*, 55(6), 666-680.
- Cho, J., and Shin C. (2019). A Study on Indoor Sources-Outdoor Penetration Pathways and Performance Options on Products to Counter Against the Fine Dust Particle, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 31(7), 332-341.
- Environmental Protection Agency (EPA) (2009). Air Quality Index: A guide to air quality and your health.
- Eshbaugh, J. P., Gardner P. D., Richardson A. W., and Hofacre K. C. (2008). N95 and P100 respirator filter efficiency under high constant and cyclic flow, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 6(1), 52-61.
- Huang, S.-H., Chen C.-W., Kuo Y.-M., Lai C.-Y., McKay R., and Chen C.-C. (2013). Factors affecting filter penetration and quality factor of particulate respirators, *Aerosol and Air Quality Research*, 13(1), 162-171.
- Ikezaki, K., Iritani K., Nakamura T., and Hori T. (1995). Effect of charging state of particles on electrets, *Journal of Electrostatics*, 35, 41-46.
- Janssen, L., Johnson A. T., Johnson J. S., Mansdorf S., Meici O. R., Metzler R. W., Rehak T. R., Szalajda J. V. and Moore J. (2018). Chemical, biological, radiological, and nuclear (CBRN) respiratory protection handbook.
- Jung, C. H., Park, H.-S., and Kim, Y. P. (2013). Theoretical study for the most penetrating particle size of dust-loaded fiber filters, *Separation and Purification Technology*, 166, 248-252.
- Kelly, W., and McMurry P. H. (1992). Measurement of particle density by inertial classification of differential mobility analyzer-generated monodisperse aerosols, *Aerosol Science and Technology*, 17(3), 199-212.
- Langrish, J. P., Mills N. L., Chan J. K., Leseman D. L., Aitken R. J., Fokkens P. H., Cassee F. R., Li J., Donaldson K., Newby D. E., and Jiang L. (2009). Beneficial cardiovascular effects of reducing exposure to particulate air pollution with a simple facemask, *Particle and Fibre Toxicology*, 6, 8.
- Li, L., Zuo, Z., Japuntich, D. A., and Pui, D. Y. H. (2012). Evaluation of filter media for particle number, surface area and mass penetrations, *Annals of Occupational Hygiene*, 56(5), 581-594.
- Lolla, D., Lolla M., Abutaleb A., Shin H., Reneker D., and Chase G. (2016). Fabrication, polarization of electrospun polyvinylidene fluoride electret fibers and effect on capturing nanoscale solid

- aerosols, *Materials*, 9(8), 671.
- Lowkis, B., and Motyl E. (2001). Electret properties of polypropylene fabrics. *Journal of Electrostatics*, 51, 232-238.
- Martin, S. B., and Moyer, E. S. (2000). Electrostatic Respirator Filter Media: Filter Efficiency and Most Penetrating Particle Size Effects, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(8), 609-617.
- Miguel, A. (2003). Effect of air humidity on the evolution of permeability and performance of a fibrous filter during loading with hygroscopic and non-hygroscopic particles, *Journal of Aerosol Science*, 34(6), 783-799.
- Mostofi, R., Bahloul A., Lara J., Wang B., Cloutier Y., and Haghighat F. (2011). Investigation of potential affecting factors on performance of N95 respirator, *Journal of the International Society for Respiratory Protection*, 28(1), 26-39.
- Motyl, E., and Lowkis B. (2006). Effect of air humidity on charge decay and lifetime of PP electret non-wovens, *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 14(5), 59.
- Newnum, J. D. (2010). The effects of relative humidity on respirator performance, MS thesis, University of Iowa.
- National Institute of Food and Drug Safety Evaluation (NIFDS) (2017). Guideline and standards for health masks.
- Ramirez, J. A. (2015). Evaluation of particle penetration and breathing resistance of N95 filtering face-piece respirators and uncertified dust masks, PhD thesis, University of Iowa.
- Rengasamy, A., Zhuang Z., and Berryann R. (2004). Respiratory protection against bioaerosols: literature review and research needs, *American Journal of Infection Control*, 32(6), 345-354.
- Rengasamy, S., BerryAnn R., and Szalajda J. (2013). Nanoparticle filtration performance of filtering facepiece respirators and canister/cartridge filters, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(9), 519-525.
- Rengasamy, S., Eimer B. C., and Shaffer R. E. (2009). Comparison of nanoparticle filtration performance of NIOSH-approved and CE-marked particulate filtering facepiece respirators, *Annals of Occupational Hygiene*, 53(2), 117-128.
- Roberge, R. J., Bayer E., Powell J. B., Coca A., Roberge M. R., and Benson S. M. (2010). Effect of exhaled moisture on breathing resistance of N95 filtering facepiece respirators, *Annals of Occupational Hygiene*, 54(6), 671-677.
- National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) (2005). Determination of particulate filter penetration to test against solid particulates for negative pressure, air-purifying respirators standard testing procedure (STP).
- Shaffer, R. E., and Rengasamy S. (2009). Respiratory protection against airborne nanoparticles: a review, *Journal of Nanoparticle Research*, 11(7), 1661.
- Wang, S., Zhao X., Yin X., Yu J., and Ding B. (2016). Electret polyvinylidene fluoride nanofibers hybridized by polytetrafluoroethylene nanoparticles for high-efficiency air filtration, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(36), 23985-23994.
- Wang, S. C., and Flagan R. C. (1990). Scanning electrical mobility spectrometer, *Aerosol Science and Technology*, 13(2), 230-240.
- Yang, H.-J., Kim S.-H., Jang A.-S., Kim S.-H., Song W.-J., Kim T.-B., Ye Y.-M., Yoo Y., Yu J., and Yoon J.-S. (2015). Guideline for the prevention and management of particulate matter/yellow dust-induced adverse health effects on the patients with bronchial asthma, *Journal of the Korean Medical Association*, 58(11), 1034-1043.
- Yang, S., and Lee G. W. (2005). Filtration characteristics of a fibrous filter pretreated with anionic surfactants for monodisperse solid aerosols, *Journal of Aerosol Science*, 36(4), 419-437.