

도로 미세먼지 저감을 위한 필터 모듈의 흡착 특성

Characteristics of a Filter Module Adsorption for Fine Dust Removal on Road

이재엽* · 김일호*^{**,†}

Jai Yeop Lee* · Ilho Kim*^{**,†}

*한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소 · **과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과

**Environment and Plant Research Institute, Korea Institute Civil Technology*

***Department of Environmental Engineering, University of Science and Technology*

(Received May 11, 2016; Revised October 10, 2016; Accepted January 16, 2017)

Abstract : In this study, a electrostatic filter which could be applicable to road environment was developed and evaluated in adsorption capacity. The evaluation were performance for removal by particle size and adsorption amount by pressure using ASHRAE 52.1 and 52.2. The range of size for removal test was 0.3 μm ~10.0 μm which had 12 steps. The filter showed 91.3% removal efficiency from 2.5 μm and under the size, average 53.5% proportional to decreasing size value. The weight removal was 96.7% from 22.6 mmaq, initial pressure to 35 mmaq, end pressure with 715.9 g/m^2 , the adsorption amount. The shape of isotherm was expressed as Langmuir's one. After washing saturated filter with dust to end pressure, the initial pressure and adsorption amount of the filter showed a light drop with no removal efficiency decline.

Key Words : Fine Dust, Langmuir Isotherm, Filter Panel, ASHRAE 52.1, ASHRAE 52.2

요약 : 본 연구에서는 도로환경에 적용 가능한 통기성 정전필터를 개발하여 흡착능을 평가하였다. 흡착특성은 ASHRAE 52.1, 52.2 등의 방법으로 입경별 제거율과 압력별 흡착량 등을 평가하였다. 평가 입경범위는 0.3 μm ~10.0 μm 로 12단계로 제거율을 평가하였다. 필터는 2.5 μm 이상에서 91.3%의 제거율을 보였으며 그 미만의 범위에서는 입경에 따라 감소하여 평균 53.5%의 제거율을 보였다. ASHRAE Dust 합성 분진에 의한 중량 제거율은 초기압력 22.6 mmaq에서 말기압력 35 mmaq까지 측정된 결과, 96.7%였으며 이때까지 흡착량은 715.9 g/m^2 이었다. 압력에 따른 흡착형태는 Langmuir 선도를 보였다. 말기압력까지 흡착된 필터를 물세정으로 1, 2차 재생한 후 흡착을 평가한 결과 제거효율에는 차이가 없었으나 초기압력과 흡착량은 약간의 저하가 발생하였다.

주제어 : 미세먼지, 랭뮤어 등온흡착선, 필터 패널, ASHRAE 52.1, ASHRAE 52.2

1. 서론

도로에서 발생하는 환경문제는 소음 뿐 아니라 미세먼지 등의 대기오염물질도 심각한 상황이다. 미세먼지의 위해성을 알리는 연구들은 대개 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 증가했을 때 사망률 또는 관련 질환 발병률로 심각성을 보고한다. 미세먼지가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 증가했을 때 65세 이상 노인 사망률은 0.4%가 증가하였으며,¹⁾ 초미세먼지에 의한 심혈관계 관련 질병은 1.75% 증가하였다.²⁾ 미세먼지는 사망률 뿐 아니라 영유아의 천식, 아토피 발병률 등과도 민감한 상관관계가 있는 것으로 보고된 바 있다.³⁾

미세먼지 지표는 TSP에서 PM10, PM2.5로 대상의 크기가 점점 줄어들고 있다. PM2.5는 그 위해성이 학자들 중 심으로 제기되어 왔으며, 2011년에 대기환경기준이 신설되어 올해부터 시행되고 있다.

서울의 대기오염 상황은 2013년 현재 PM10 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 과거보다 조금씩 감소되어 왔으나 최근 다시 증가하고 있다. 배출원별 기여도에서 PM10은 자동차 연소가 21%로 비산먼지 48%에 이어 두 번째로 높으며, PM2.5는 35%로 가장 높은 것으로 보고되었다.⁴⁾

정부는 제도개선을 통해 2015년 신규 경유차 측정항목에 PM을 추가하고 평균배출량을 적용하도록 하고 있다. 이외에 운행 경유차의 저공해화, CNG 차량 교체, 도로 물청소·분진흡입 차량 운행 증가 등 도로 환경 개선 사업 운영으로 미세먼지 저감에 노력하고 있다.

도로에서 발생하는 분진은 주행 타이어의 마모에 의한 비산먼지도 고려해야 한다. 대형 차량의 경우 0.23 g/km ·대이며 소형차는 반 정도에 해당한다. EPA에서는 비산먼지 중 PM10의 분율을 0.44로 보고 있다.⁵⁾ 한편 도로에 있는 먼지 역시 주행에 의해 재비산된다. 재비산되는 먼지는 도로의 토사 함량, 차량 무게 등에 영향을 받는다.

도로에서 발생하는 분진을 제거하고자 방음벽을 활용한 연구는 그 사례가 적다.⁶⁾ 네덜란드에서는 정부 차원의 대기오염물질 저감 프로그램 IPL (Innovation programme air quality)을 시행하였으며, 이중 방음벽을 활용한 사례는 두 가지이다. 하나는 Passive shielding으로 차량배출 대기오염물질을 공기로 희석하는 방법이고, 다른 하나는 Active dilution으로 흡입·분출 장비 또는 촉매코팅 방음벽으로 대기오염물질의 활성을 감소시키는 방법이다. 이와 관련하여 네덜란드에서는 에어필터링 시스템, 촉매 처리 등을 결합

[†] Corresponding author E-mail: ihkim@kict.re.kr Tel: 031-910-0649 Fax: 031-910-0291

한 방음벽이 선보이고 있다. 국내에서는 논문보다 특허에서 연구 동향이 활발해 보인다. 산화탄소의 경우에는 고효율성탄소보드를 이용한 흡착 방법이 소개되었으며, 미세먼지는 헤파필터를 사용하였다.

필터를 활용한 기술은 분진을 제거하기 위한 방법으로 널리 인식되어 활용되어 있으나 소개된 대부분의 기술은 실내환경을 위한 에어필터이다. 필터 운영은 주변 환경에 매우 민감하다. 전태영 등은 미세먼지의 필터 제거 특성을 습도, 초기농도, 유속 등에 대하여 평가하였다.⁷⁾ 필터링 후 최종 도달 농도는 모든 경우에서 일치하였으나, 흡착 특성은 주변 환경의 영향을 받았다. 습도가 높을수록 초기 유입 농도가 낮을수록, 유속이 높을수록 최종 도달 농도에 도달하는 시간이 짧았다. 특히 대기오염 저감 방안으로 필터를 고려할 경우 도로환경에 대응할 수 있도록 선행연구가 필요하다. 한편 대기오염물질을 제거하는 기작으로는 구성 성분에서 자성 필터나⁸⁾ VOC 환원 촉매필터 등이 소개되고 있다.⁹⁾

본 연구에서는 도로에서 발생하는 미세먼지를 저감하기 위해 정전 필터를 채용한 패널을 제작하여 성능을 평가하였다. 정전 필터는 비용과 적용성 측면에서 유리하나 입자가 포집됨에 따라 성능이 저하되는 현상이 있다.¹⁰⁾ 이를 방지하기 위해 물세정에 의한 탈리가 가능하도록 소재를 선정하였다. 또한 발생기류에 의한 필터링이 가능하도록 통기성을 향상시켰다. 해당 필터는 도로 위 시설물인 방음벽에 적용할 수 있도록 모듈 규격으로 제작할 수 있으며 본 연구에서는 성능 평가를 위해 일정 규격으로 제작되었다. 본 연구의 내용은 다음과 같다.

1) 개발된 필터의 흡착능을 평가하였다. 흡착능은 규격 제조된 미세먼지를 폐쇄 실험 장치에 통과시켜, 제거효율과 부하 압력·흡착량과의 관계 등을 살펴보았다. 한편 미세먼지 내 포함된 입자 규격별 제거 성능을 확인하였다.

2) 본 필터는 물세척에 의해 흡착된 분진이 세척되도록 제작하였다. 물세척은 강우 환경을 고려하여 물세척으로 흡착된 미세먼지를 역세척, 재생하였다. 재생 1, 2차 후의 흡착능의 변화로부터 필터의 재생능을 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 필터 모듈 제작

실험 대상 시편은 내외부 Electro Filter, Klogon Filter를 구성하여 제작된 정전기 필터를 사용하였다(DAEYOUNG Air Filter, Korea). 본 필터 구조는 현장에서 적용가능하기 위해 통수성과 통기성을 확보하고자 다공성의 net 구조를 내층에, fiber 구조를 표면에 층별로 결합하여 구성하였다. 소재는 미세먼지에 대응가능하고 탈수성, 가공성, 물세척 등이 가능한 polypropylene으로 하였다. 프레임은 STS304이며 두께는 60 mm이었다. 가로×세로 길이는 다양한 크기로 제작



Fig. 1. Manufactured functional filter panel.

가능하나 이후에 기술되는 흡착 평가를 위해 챔버 규격인 $594 \times 594 \text{ mm}^2$ 로 제작하였다(Fig. 1).

2.2. 흡착능 평가

입경별 흡착 제거 효율은 미냉난방공조기술자학회(american society of heating refrigerating and air-conditioning engineers, ASHRAE)에서 정한 ASHRAE 52.2법으로 실험하였다. 입경은 $0.30 \sim 10.0 \mu\text{m}$ 범위 내에서 12단계로 구분하며, 각 단계별 상·하한 크기와 대표입경을 Table 1에 나타내었다. 각 단계의 입경의 제거효율은 계수기를 통해 측정된 것을 분석한 것이다. 말기압력은 40 mmaq였으며 풍속에 따른 영향을 확인하기 위해 2.0, 2.5, 3.0 m/s의 조건으로 실험하였다.

압력에 대한 흡착 평가와 재생능에 관한 효율은 ASHRAE 52.1 법으로 실험하였다. 지정된 유속으로 분진이 발생하는 챔버 사이에 필터 시편을 장착하였고, 통과 및 흡착되는 분진의 양을 무게로 측정하여 효율과 흡착량을 산정하였다. 효율은 다음과 같은 방법으로 정하였다.

$$(1 - W_d/W_u) \times 100 (\%) \quad (1)$$

여기서 W_d 는 필터를 통과한 분진의 중량이며 W_u 는 공급된 분진의 중량이다. 사용 분진은 ASHRAE dust였으며 70 mg/m^3 의 농도를 2.5 m/s의 풍속으로 분진을 발생시켰다. 말기압력을 25, 30, 35 mmaq까지 정하여 해당 압력까지 흡착되

Table 1. The average particle size with upper/lower limit classifying 12 steps of ASHRAE 52.2

Steps	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Average	0,35	0,47	0,62	0,84	1,14	1,44	1,88	2,57	3,46	4,69	6,20	8,37
Lower limit	0,30	0,40	0,55	0,70	1,00	1,30	1,60	2,20	3,00	4,00	5,50	7,00
Upper limit	0,40	0,55	0,70	1,00	1,30	1,60	2,20	3,00	4,00	5,50	7,00	10,0

Table 2. The particle size distribution of ASHRAE dust (average 7.7 μm)

Particle size, μm	0~5	6~10	11~20	21~40	41~80
Portion, %	39	18	16	18	9

는 분진의 양을 측정하였다. ASHRAE dust의 입도 분포는 평균 7.7 μm이며 입경별 분포는 Table 2에 나타내었다.

2.3. 재생능 평가

각각 선정된 말기압력 조건에 대해 물세척을 하여 재생 전후의 흡착능력을 비교하였다. 재생은 총 2회에 걸쳐 진행되었으며 수돗물의 유속을 이용하여 세척하였다. 수도꼭지에 나오는 수돗물의 유속을 빗물 중단속도로 알려진 9 m/s로 맞추기 위해 반경 1.76 mm의 노즐을 장착하였다. 강우 조건 산정은 한해 강우량 자료를 바탕으로 평균 강우지속시간과 평균 강우강도를 곱하여 평균 강우량 47.0 mm로 정하였다. 물세척을 거친 필터는 열풍기로 충분히 건조한 후 2.2의 실험과 동일한 조건으로 흡착능을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 입경별 흡착 특성

개발 필터는 통기성 측면에서 특화되어 개발되었기에 현장에서 발생하는 기류는 중요한 설계인자로 판단된다. 흡착 특성 분석 중 도로 분진 발생 현장을 모사하기 위해 주요한 영향인자로 풍속을 정하였다. 풍속 범위는 도로 위 자동차의 주행속도에 의해 발생하는 유도풍의 기류를 참고하였다.¹¹⁾ 즉, 주행속도가 시속 50, 90, 120 km일 때 도로에서 발생하는 유도풍은 각각 2.2, 4.0, 5.3 m/s이며 도로로부터 2.0 m가 이격된 지점에서는 84%가 감소하여 1.85~4.45 m/s가 된다. 이를 참고하여 풍속 조건을 2.0, 2.5, 3.0 m/s로 정하였다(Table 3).

실험 조건에 따른 입경별 제거 효율을 Fig. 2에 정리하였다. 본 흡착필터의 제거효율은 입경 2.57 μm를 기준으로 크게 나뉘었다. 입경 2.57 μm 이상은 91.3%, 미만은 26.4%였다. 따라서 Fig. 2의 제거효율에서 나타난 평균 93.7%의 대부분은 입경 2.57 μm 이상인 PM10에 해당함을 알 수 있다. 전체 범위에서 보면 풍속이 높을수록 각 입경에서 효율이 근소하게 높은 것으로 조사되었다.

풍속에 따른 압력저하를 Fig. 3에 나타내었다. 그래프에서 보듯이 풍속과 압력저하는 비례관계를 보였다. 특히 각 풍속 조건의 지정값을 기준으로 일정 범위에서 저항이 측

Table 3. Induced flow by driving velocity and the velocity in the case of 2.0 m/s

Driving velocity (km/h)	50	90	120
Induced flow (m/s)	2.2	4.0	5.3
2.0 m/s	1.85	3.36	4.45

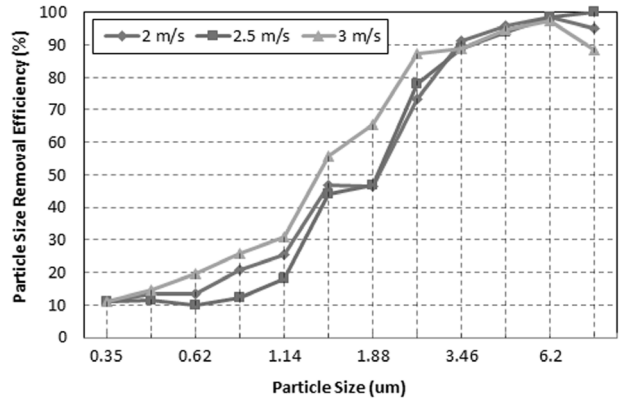


Fig. 2. Particle size Removal Efficiency by air flow(%).

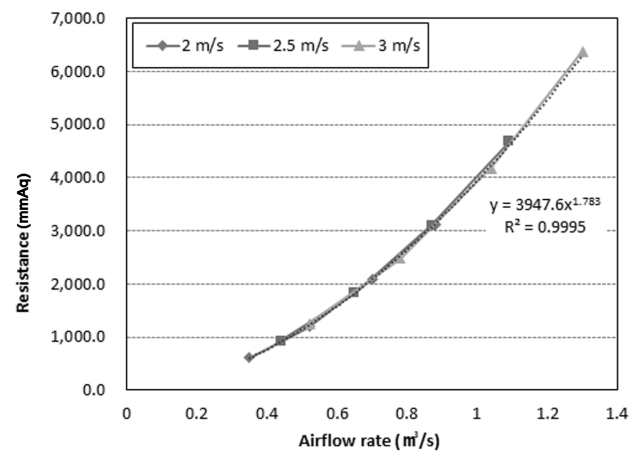


Fig. 3. Resistance by air flow(%).

정되는데 각각의 유량 범위에서 하나의 관계식을 보였다. 즉, 풍속과 압력 저항의 관계는 범위 내에서 해당 선도의 관계를 유지하고 있음을 파악할 수 있다. 해당 선도는 현장 설계에서 참고값으로 반영될 수 있을 것으로 보인다.

한편 풍속이 클수록 저항이 커지는데, 이와 같은 풍속의 증가가 처리 성능에 부정적 영향을 줄 것으로 예상된다. 실제 풍속과 입경별 제거효율은 일관된 경향을 보이지 않는다. 1.88 μm 미만의 크기에서 유속 2.5 m/s에서 제거율은 유속 2.0 m/s보다 작으며, 반대로 6.2 μm에서는 2.5 m/s가 가장 크고 3.0 m/s에서 가장 낮았다. 이는 전체적인 경향과 배치되는 결과이며 풍속에 의한 압력저항이 흡착을 방해하는 요소로 일부 영향을 주었기 때문으로 판단된다.

ASHRAE 52.2에서는 입경 범위를 세 영역으로 분류하여 E1, E2, E3로 나타낸다. 즉, E1은 0.3~1.0 μm에 해당하는 입경이며, E2는 1.0~3.0 μm, E3는 3.0~10.0 μm에 해당하는 입경이다. 이는 필터의 최소 효율 보고 수치(Minimum Efficiency Reporting Value, MERV) 분류표를 위한 범위이며, 본 연구에서는 이보다 세분하여 Fig. 4에 정리하였다. 즉, 0.3~0.7 (Fig. 4(a)), 0.7~1.6 (Fig. 4(b)), 1.6~4.0 (Fig. 4(c)), 4.0~10.0 (Fig. 4(d)) μm의 네 단계로 분류하였다.

입경이 큰 순서대로 보면, 우선 4.0~10.0 μm에서는 평균 95.8%의 높은 제거율을 보였다(Fig. 4(d)). 풍속별로도 94.0%

이상의 제거율을 보여 해당 입경 범위의 흡착 제거가 충분히 가능한 것으로 보였다. 대표입경 8.37 μm 의 상대적으로 낮은 제거율(88.3%)은 전체 경향으로 볼 때 수용 가능한 범위로 인식된다. 다음 입경 범위인 1.6~4.0 μm 에서는 입경에 대한 제거 경향이 뚜렷하게 관찰되었다(Fig. 4(c)). 대표입경 3.46 μm 에서는 89.6%의 높은 제거율을 보였으나 2.57 μm 에서는 다소 떨어진 79.5%로 관찰되었다. 이후 범위 (1.88%)에서는 53.0%로 제거율이 급격하게 감소되었다. 이는 소재의 흡착 특성인 정전기력의 영향권이 2.57 μm 까지이며 그보다 작은 범위에서는 보다 점차적으로 적게 나타나기 때문으로 보인다. 제거율의 변화는 다음 입경범위인 0.7~1.6 μm 에서는 평균 제거율 31.1%로 입경이 작아질수록 제거율이 감소하였다(Fig. 4(b)). 특히 대표입경 1.44 μm 기준으로 제거율은 50%에서 급감하였으며 이후의 범위인 0.3~0.7 μm 에서는 평균 제거율 12.9%를 보였다(Fig. 4(a)). 풍속에 따라서는 뚜렷한 경향으로는 볼 수 없으나, 대체로 3.0 m/s에서 가장 높은 제거율을 보였다. 2.0 m/s와 2.5 m/s를 비교할 때, 부분적으로 2.5 m/s가 높은 제거율을 보이지만 일관된 경향은 아니었다. 앞서 기술한 대로 높은 풍속에 의한 압력저항의 증가가 방해 요소로 작용한 것으로 판단된다. 한편, 전체적으로 3.0 m/s에서 가장 높은 제거율을 보이는 것은 급속한 흐름이 형성된 와류에 의해 물리적

으로 부딪혀 통과하지 못하는 원인에 의한 것으로 해석되나 이에 대해서는 보다 자세한 고찰이 요구된다.

3.2. 압력 대비 흡착 특성

필터의 흡착 특성은 ASERA E 52.1로 평가하였다. 25, 30, 35 mmaq로 설정한 말기 압력에 대한 제거효율과 분진유지 용량을 Fig. 5에 나타내었다. 필터의 효율은 말기압력 별로 각각 92.6, 94.3, 94.1%로 평균 93.7%의 제거율을 나타내었

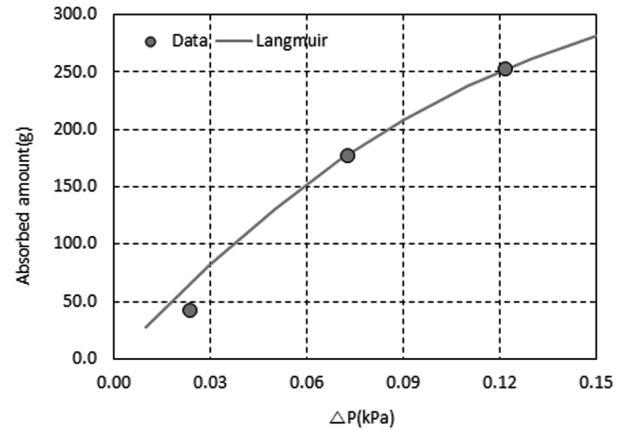
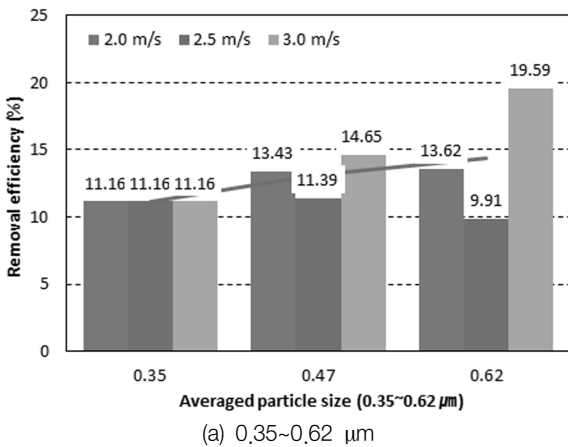
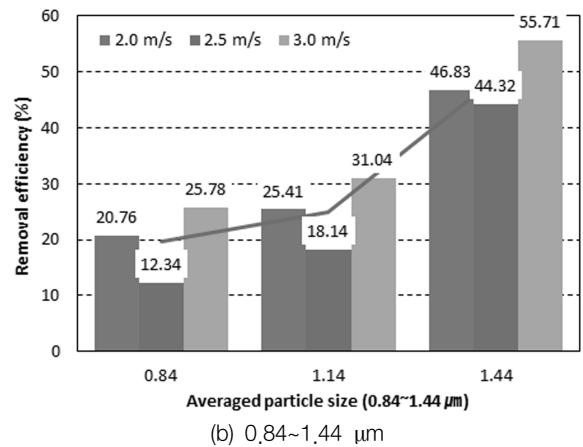


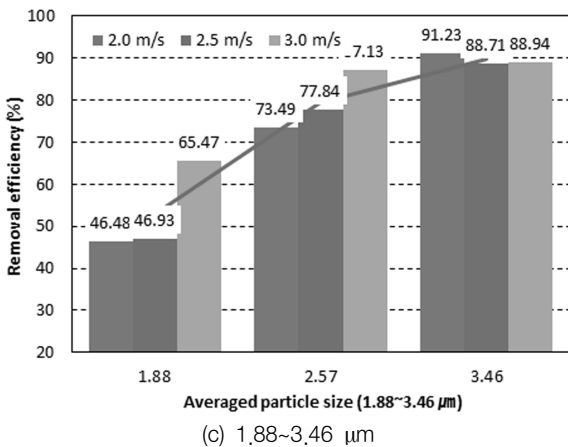
Fig. 5. Langmuir isotherm with absorbed amounts by pressure.



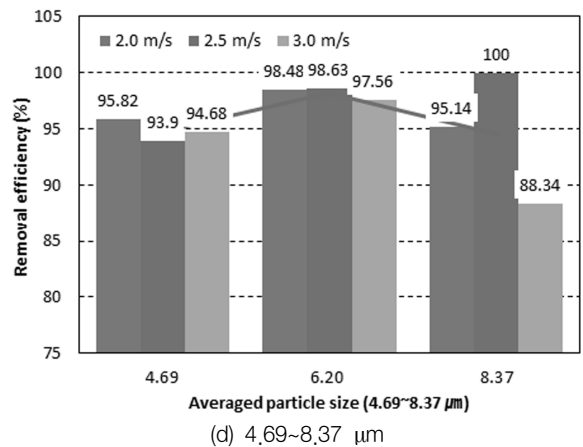
(a) 0.35~0.62 μm



(b) 0.84~1.44 μm



(c) 1.88~3.46 μm



(d) 4.69~8.37 μm

Fig. 4. Removal efficiency by particle size.

Table 3. The parameters of semi-empirical Langmuir isotherm

m	b	t
268.3	0.09	1.60

다. 해당 조건에서 말기압력의 영향은 나타나지 않는 것으로 보인다.

분진유지용량에서 확인된 최대 흡착량은 715.9 g/m²이었다. 이는 제한된 조건에서 실험된 것이므로 말기압력을 증가하면 흡착량은 더욱 늘어날 수 있을 것으로 보인다. 분진유지용량, 즉, 흡착된 분진의 양은 압력에 따라 비례하며 나타나고 있으나 Brunauer 분류에 의한 I형으로 볼 수 있다.^{12,13)} 그러나 분진이 단분자층으로 흡착되는지 여부는 해당 실험에서는 확인이 불가하다. 따라서 흡착과 압력의 관계를 고려한 흡착선도는 반경험 Langmuir 등온흡착식으로 해석하였다. 이러한 경향은 다음 절에서 확장되는 재생 후 흡착-압력 관계에서도 나타난다.

$$n = \frac{mP}{b + P^t} \quad (2)$$

n은 흡착량(g)이며 P는 압력(kPa), m, b, t는 선도 결정을 위한 파라미터이다. 위의 흡착선도식을 적용한 결과 m, b, t는 각각 2.68 × 10², 9.45 × 10⁻², 1.60이었다(Table 3). 반경험 Langmuir 식은 파라미터 t가 1보다 클 경우 한계 흡착량에 수렴하지 않고 중간에 최대점을 보이는 특성을 갖으나 본 실험에서 제시하는 압력 범위에서는 수렴하는 경향을 나타냈다.

등온흡착선도는 흡착량과 압력과의 관계를 정량화하는데 유용하게 사용된다. 구체적인 관계는 이후 재생 1, 2차 흡착선도와의 비교를 통해 고찰하고자 한다.

3.3. 물재생에 의한 흡착능 평가

본 연구에서 적용하는 필터는 물 세정 재생을 고려하여 설계되었다. 따라서 평균 강우 조건을 선정하여 흡착 평가된 필터를 1, 2차로 재생시켜 흡착능을 다시 평가하였다.

재생횟수에 따른 필터효율은 평균 93.3% 및 표준편차 0.844로 재생횟수에 따른 변화를 보이지 않았다. 효율은 재생횟수에 따라 약간씩 증가한 경우도 있으므로 둘 사이의 관계는 미미하다고 볼 수 있다. 반면 초기 압력 저항은 재생횟수에 따라 약간씩 증가하였다. 1차 재생시 8.57%, 2차 재생시 10.26%로 2차 재생시에 압력 저항이 보다 높게 나타났다. 분진유지용량 역시 재생횟수에 따라 감소하였다. 말기압력조건 25 mmaq의 경우에는 분진유지용량이 급격히 소모되어 2차에서는 측정할 수 없었다. 30, 35 mmaq에서도 다소 가파르게 감소되었다. 이는 흡착평가에서 과도한 분진이 필터에 흡착되어 일괄적으로 적용되는 물세척 재생에서 완전한 재생이 불가하기 때문으로 보인다.

필터의 재생 능력을 보다 예측하기 위해 재생전, 재생 1, 2차 흡착특성을 Langmuir 흡착선도를 통해 도시하였다. 실

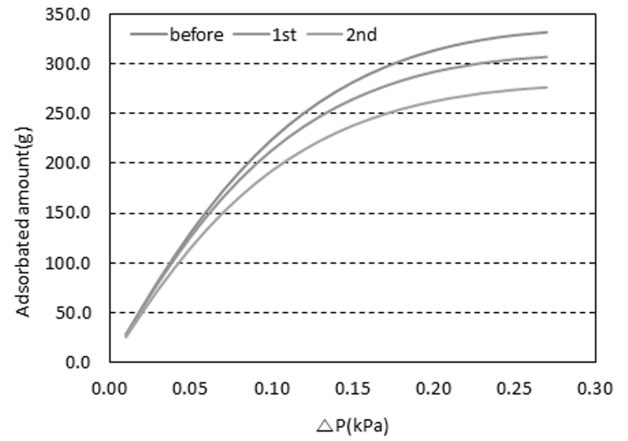


Fig. 6. Comparison of isotherm by recycling times.

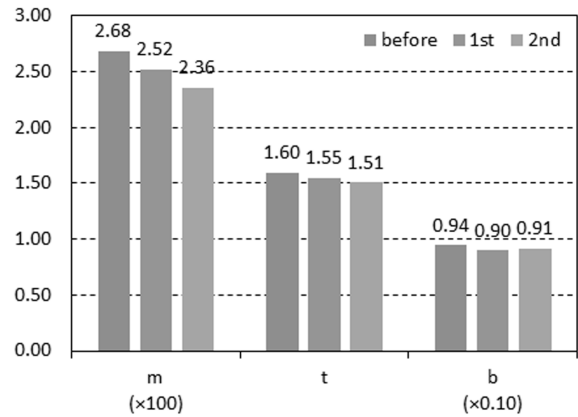


Fig. 7. Comparison of Langmuir isotherm parameters by recycling times.

험에서 구해진 압력별 분진유지용량을 바탕으로 흡착선도와 해당 파라미터를 각각 Fig. 6과 7에 정리하였다. 재생횟수가 증가할 때마다 등온흡착선의 곡선이 조금씩 감소하였다. 해당 기율기에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터는 m으로 재생횟수가 증가할 때마다 각각 2.68, 2.52, 2.36으로 (× 10²) 감소하였다. 흡착량이 커질수록 재생횟수에 따른 흡착선도의 기율기 차가 벌어진다. 1차 재생 후 저하율은 3.04%, 2차 재생 후 저하율은 흡착량 100 g까지 약 9.58%의 저하가 일어났다. 이는 필터 시편을 한계량까지 흡착시키고 난 후에 물세척하여 재생물이 떨어졌기 때문으로 보인다. 실제 현장에서는 실험상의 말기압력까지 분진이 흡착되지 않을 것으로 예상되므로 재생률은 상승될 것으로 기대된다. 한편 물세척에 의한 재생의 저하를 방지하기 위한 한계 흡착량은 이후 추가적인 실험 방안을 고려하여 제시되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 도로 현장에서 발생하는 미세먼지를 제거하고자 물세척이 가능한 모듈 형태의 정전 필터를 개발, 흡

착능 및 재생능을 평가하였다. 흡착능은 압력에 따른 흡착능 뿐 아니라 미세한 입자의 제거를 고려하여 입경별 제거능을 확인하였다. 재생능은 평균 강우량을 산정하여 흡착능에 의해 말기압력까지 폐색된 필터를 역세척하여 총 2회에 걸쳐 재생하여 흡착능을 확인하였다.

1) 입경별 흡착능은 대표입경 $2.57 \mu\text{m}$ 를 기준으로 그 이상의 입경에 한하여 91.3%로 효율을 나타내었다. 반면 $2.57 \mu\text{m}$ 미만에서는 평균 제거율 26.4%로 입경이 작아질수록 제거율도 순차적으로 감소하였다. 개발 필터의 주요 제거 대상은 PM10임을 알 수 있었다. 이는 통풍, 통수성을 고려한 필터 구조에서 기인한 것으로 보인다. 풍속 범위에서는 3.0 m/s 에서 가장 우수한 효율을 보였다.

2) 흡착능력 평가에 있어 제거율은 평균 93.7%의 효율로 제시된 말기압력 범위에서의 영향은 미미한 것으로 확인되었다. 분진유지용량은 설정한 말기압력에 따라 비례하며 정량적으로는 흡착선도로 나타낼 수 있었다. 압력 범위 내에서 최대 분진 흡착량은 715.9 g/m^2 이었다.

3) 재생횟수에 따른 제거효율은 큰 차이가 없었다. 다만 흡착능력 저하는 1차보다 2차에서 유의하게 나타났다. 초기압력 손실과 분진유지용량 등에서 재생 횟수에 따라 흡착능력이 저하되었다. 이는 재생전 흡착질이 실험상 한계량까지 도달한 것으로 실제 현장 재생률은 상승될 것으로 보인다.

실제 현장에서의 일정하지 않은 조건에서 효율 검증이 필요할 수 있으나, 본 연구의 풍속과 입경, 농도 등의 제시한 조건 범위를 고려할 때 제거율은 대체로 만족될 것으로 보인다. 즉, 개발 필터가 대상으로 하는 PM10 범위에서는 3가지 풍속 경우에 대해 모두 일정 수준 이상(평균 91.3%) 성능이 나왔으며 따라서 실험 범위 안에서는 충분한 제거효율을 보일 것으로 예상된다. 풍속의 범위를 벗어날 경우에도 필터의 제거 기작(정전기 + 여과)으로 볼 때 해당 효율에 크게 차이가 나지는 않을 것으로 보인다. 따라서 분진을 포함한 기류가 필터 인입 조건에 충분할 경우 효율에서는 성능 차이를 보이지 않을 것으로 판단된다. 먼지 농도는 성능 평가 규격에 해당하는 ASHRAE 방법에 준하였으나 필터의 제거 기작을 고려했을 때 농도의 변동은 큰 영향을 주지 않을 것으로 보인다. 특히 실험에서는 대기조건보다 고농도의 기류를 통과시켜 얻은 수치이므로 현장의 낮은 농도에서는 충분한 제거효율을 보일 것으로 예상된다. 한편 날씨 조건은 처리 효율에 영향을 줄 수 있으나 강우는 대체로 대기 중의 미세먼지를 현저하게 낮추며,^{7,14)} 개발 필터는 물재생에 대비하여 탈수성이 우수하므로 성능에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

본 필터는 현장에서 발생하는 기류를 이용하여 통과시키는 용도로 압력 손실을 최소화하도록 고안하여 통기성으로 제작되었다. 처리 대상 입경이 작아지기 위해서는 필터의 통기성이 불리해질 수밖에 없으므로¹⁵⁾ 필터의 현장성과 PM

2.5는 trade-off 관계이다. 따라서 통기성을 유지하면서 초미세먼지를 흡착할 수 있는 기작을 이후 연구를 통해 개선해야 할 것으로 보인다.

도로에서 발생하는 미세먼지는 대기환경 뿐 아니라 보건상의 위험을 가중하고 있다. 기존에 소음을 담당하는 시설물인 방음벽 위에 필터 기능을 포함하는 패널을 장착하여 기능성을 높임으로 도로 환경을 개선하고자 하였다. 해당 필터는 통수, 통풍성을 고려하여 현장에서 발생하는 기류로 미세먼지 제거를 유도하였으며 빗물 역세척이 가능하도록 통수성 및 탈수성을 우수한 소재 및 구조를 채용하였다. 도로에서 발생하는 소음의 저감 뿐 아니라 다기능성의 역할을 감당하는 시설물로서 방음벽의 활용성 및 기능성은 이후에도 꾸준히 고려되어야 할 것으로 생각된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2016-0132)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. National Institute of Environmental Research, Health Effect of Exposure to Asian Dust and Ultrafine particle(II), National Institute of Environmental Research, Incheon, pp. 1~152(2009).
2. Korea Environment Institute, A study on the health impact and management policy of PM2.5 in Korea I, Korea Environment Institute, Sejong, p. 73(2012).
3. Seo, J. H., Ha, E. H., Park, H. S., Lee, B. E., Hong, Y. C., Kim, Y. H., Ha, M. N., Kim, B. M., Chang, M. H. and Park, E. K., "The effect of prenatal indoor and outdoor PM10 exposure on growth and development of infant in the MOthers and Children's Environmental Health (MOCEH)," in Proceedings of the annual meeting of Korean Society of Environmental Health and Toxicology, KSEHT, Pyeongchang, pp. 210~211(2011).
4. Yoo, E. C., Dou, W. G. and Cho, J. G., "Study for the Control of Re-suspended Dust from Paved Road," *The Annual Report of Busan Metropolitan City Inst. Health & Environ.*, **19**(1), 177~186(2009).
5. Seoul City, A study of reduction counterplan for ultra-fine dust (PM-2.5), Seoul City, Seoul(2011).
6. Kim, J. S., Lee, W. M., Kim, I. H. and Kim, K. S., "Environmental Functional Soundproof Wall," *Int. J. Highw. Eng.*, **15**(5), 71~72(2012).
7. Jeon, T. Y. and Kim, J. Y., "Characterization of Fine Dust Collection Using a Filter Ventilation," *Appl. Chem. Eng.*, **26**(2), 229~233(2015).
8. Park, H. W., Huang S., Chang, S. G. and Kim, S. B., "Fine Iron Dust Collection by Magnetized Mesh Filters," *J. Korean*

- Soc. Atmos. Environ.*, **31**(2), 118~130(2015).
9. Jeong, S. K. and Park, Y. O., "Study of Catalytic Filter on the Removal of Dust and HVOC," *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**(1), 80~85(2008).
 10. Ji, S. M., Sohn, J. R. and Park, H. S., "Filtration Performance of Fibrous Air Filter under External Electric Field using Insulated Electrodes," *Korean Soc. Atmos. Environ.*, **28**(6), 675~687(2012).
 11. Jeon, J. Y., Han, K. W., Song, J. S. and Park, S. H., "Computational Fluid Dynamic (CFD) Analysis-based Feasibility Study on Wind Power Generation due to Traveling Vehicles on Highway," *J. Korean Soc. Civil Eng.*, **332**(2), 739~748(2013).
 12. Brunauer, S., Deming, L. S., Deming, W. E. and Teller, E. "On a Theory of the van der Waals Adsorption of Gases," *J. Am. Chem. Soc.*, **62**, 1723~1732(1940).
 13. Brunauer, S., *The Adsorption of Gases and Vapours*, Oxford University Press, London, pp. 149~151(1945).
 14. Lee, J. Y. and Kim, I. H., "Effects on Road Airpollutants Reduction by Operating Factors of Water Jet System," *J. Korean Soc. Urban Environ.*, **16**(3), 305~311(2016).
 15. Kim, B. S., Park, I. G., Jung D. G., Lee S. D. and Hong, M. S., "Air quality monitoring and evaluation of bag filter performance for removal of fine particulates in roadway tunnels," *J. Korean Tunn. Undergr. Sp. Assoc.*, **17**(5), 523~531(2015).