

지하철 공조실 미세먼지에 대한 자성포집연구

박해우¹⁾ · 정상귀²⁾ · 조영민^{1)*}

¹⁾경희대학교 환경응용과학과, ²⁾건국대학교 환경공학과

(2015년 6월 21일 투고, 2015년 6월 29일 수정, 2015년 6월 29일 게재확정)

Study of Magnetic Filtration for Subway MVAC Dust

Hae Woo Park¹⁾, Sang Gui Chung²⁾, Young Min Jo^{1)*}

¹⁾*Department of Applied Environmental Science, Kyunghee University*

²⁾*Department of Environmental Engineering, Kunkook University*

(Received 21 Jun 2015; Revised 29 Jun 2015; Accepted 29 Jun 2015)

Abstract

Dust particles, which inflow to the subway mechanical ventilation and air conditioning(MVAC) chamber, contain a fair amount of iron compounds, approximately 25.2w/w%. This work attempted to capture those iron containing dust using magnetic filters. Average magnetization value of the test MVAC dust was 0.012 emu on 5,000 Oe, which could correspond sufficiently with the magnetic interaction. External permanent magnets provided with magnetization of iron mesh screen showing high gradient magnetic field(HGM). It resulted in the capture efficiency with 84.0 ~ 99.7% and 81.2 ~ 99.8% for PM₁₀ and PM_{2.5} respectively. Magnetic capture was found to be closely associated with the magnetic intensity, mesh opening size and flow velocity.

Keywords : Magnetic filtration, Subway dust, PM₁₀, PM_{2.5}, Fine particle capture

* Corresponding author.

Tel : +82-31-201-2485, Email : ymjo@khu.ac.kr

1. 서 론

2015년 2월, 서울시에는 미세먼지 농도는 최고 $765 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 황사주의보, 경보가 발표되었다. 예년보다 높은 수치로 많은 사람들이 미세먼지에 대해 경각심을 가지게 되었고, 마스크를 쓰도 확보하는 사람들을 많이 볼 수 있게 되었다. 이처럼 미세먼지의 농도가 높게 나타날 때 예는 실내공간에서는 보다 더 높은 미세먼지 농도가 나타나게 된다. 특히 지하철공간의 경우, 위치적 특성에 의하여 외기보다 높은 미세먼지 농도를 가지는 경우가 대부분이다. 또한 지난해 서울 지하철 이용객 수는 각 업체의 발표 결과에 따르면 환승인원 등을 고려하였을 때 총 26억 6090만명이 이용해 왔음을 확인 할 수 있었다. 이는 2013년보다 4137여만명 증가한 수치로 대다수의 현대인들이 지하철 공간에서 시간을 보내게 되었음을 알 수 있다. 지하철 환경중의 미세먼지를 분석하였을 때 Seatonetal (2005)과 Do et al. (2009) 등에 의하면 대기중 미세먼지에 비하여 Fe 와 같은 금속성 성분이 다량 함유되어있고 각진 모양을 띄고 있다. Chillrud et al. (2004), Birenzvice et al. (2003), Jung et al. (2011) 등 과 같은 다수의 연구에 의하면 이러한 특성은 지하철 운행중 지하철 바퀴와 선로의 마찰로 인해 생성되기 때문이다. 이처럼 Fe 와 같은 금속성 성분을 함유하는 미세먼지는 비중이 높아 바닥에 쉽게 가라앉지만, 강력한 열차풍에 의해 재비산되며, 스크린도어의 설치이후 외부유출이 이루어지지 않은 상태에서 지하철 문과 스크린도어가 열릴 시 내부로 유입되어 객실내부와 승강장으로 금속성 미세먼지가 급속하게 유입되며 이용객들의 호흡기로 들어와서 악영향을 끼치게 된다.

이처럼 지하철 미세먼지에 포함되어 있는 Fe 는 강자성체를 띄는 대표적 물질로서 자기적인 성질을 보유하고 있다. 따라서 지하철 미세먼지는 일종의 자성입자(Magnetic particle)로 분류할 수 있다. 이러한 특성을 반영하여 보다 효과적인 지하철 미세먼지 포집을 위해 자성포집 연구를 진행하였다. 기존 자성포집에 대한 연구로는 광산이나 제철수 폐수처리장 등에서 물질 회수와 오염제어 용도로 자성을 적용한 적이 있어왔다. 자기장의 최근 연구로는 Menzel et al. (2013) 과 Štefušová (2012) 등이 외부에

영구자석을 적용하고, 보조적인 장치를 추가하여 포집연구를 진행하였다. 이에 본 연구에서는 외부에 영구자석을 적용한 형태가 아닌 내부에 영구자석을 적용하여 보다 효과적인 자성포집이 이루어질 수 있도록 하며, 각각의 운전변수가 포집효율 증대에 끼치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 MVAC dust 시료의 채취 및 분석

도시 지하철 실내 공간에 존재하는 미세먼지 중 지하철 터널, 대합실, 공조실 및 외기로부터 공기를 유입시켜 처리하는 공간인 MVAC(Mechanical Ventilation and Air Conditioning) 에서 시험용 분진을 채취하였다. MVAC 내에서 집진을 완료한 pre-filter 와 Electret pleated filter로부터 탈진을 통해 시료를 채취하였으며, 채취한 시료는 건조시킨 뒤 $38 \mu\text{m}$ 공극의 표준체(Taylor No. 400)를 이용하여 체거름한 뒤 건조시켜 실험에 사용하였다. 이러한 사전분리를 통하여 탈진 시 유입된 필터의 파편이나 거대 규모의 입자를 제거할 수 있었으며, 목표대상인 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 에 해당하는 미세 MVAC dust를 획득할 수 있었다.

선행연구들에 의하여 지하철 환경중의 미세먼지의 보편적인 특징은 알려져 있으나, 본 연구에 사용하는 MVAC dust의 경우에는 지하철 환경중의 미세먼지와 외기로부터 유입된 일반 대기중의 먼지가 혼합되어있기 때문에 선행연구결과와 그 특성이 완벽하게 동일하게 나타나지는 않으나, 특성분석을 위해 SEM/EDX(Leica, Stereoscan 440, Cambridge) 분석을 통하여 시료의 외형과 화학적 조성의 경향을 파악하였다. 이후 XRF(Ragaku, ZSX-100e, Japan)를 통하여 시료의 화학성분의 정량분석을 진행하였고, 레이저회절방식의 입도분석기(Malvern, Mastersizer, UK)를 통하여 입자의 크기분포를 측정하였으며, VSM(Quantum, PPMS Dynacool VSM option, USA) 분석을 진행하여 자기적 특성을 파악하였다. 특히 시험 미세먼지의 포집전 분진과 포집분진, 그리고 비포집 분진에 대해 반복적으로 분석함으로써 MVAC dust 시료의 자성 특성을 확인하였다.

2.2 자성입자 포집실험

시험필터유닛은 영구자석을 이용한 것으로, HGMF(High Gradient Magnetic Field)를 형성 하는 역할을 수행할 금속메쉬를 적용하여 Fig. 1 과 같이 제작하였다. 본 필터유닛은 미세먼지 여과공정의 주요 제한요소 가운데 하나인 탈진과정을 용이하게 하는 구조로 설계하였으며, Gauss meter(F.W. BELL, Hall Effect Gaussmeters 5180)로 필터유닛의 공간 자기장 강도를 사전에 측정하였다.

지하철의 공조시스템에 의하면 외기와 함께 지하철이 들어올 때 승강장 하부 흡기구를 통해 공조 챔버에서 순간적으로 강한 압력과 함께 철성분 화합물을 포함한 미세먼지가 고농도로 MVAC 내로 유입된다. 공조 챔버내에서 처리된 공기는 대합실, 승강장 등으로 재공급된다. 이러한 상황을 고려하여 Fig. 2 와 같은 순환형 여과장치를 구성하였으며, 자기력이 전달될 수 있는 스텐레스형 메시스크린을 삽입하여 서울의 D역사 MVAC에서 포집한 먼지 입자를 공급하며 포집 실험을 진행하였다. 시험장치로 유입되는 미세먼지는 농도 측정 개시 1시간 전에 투입하여 유실, 부착 등의 영향을 무시할 수 있는 농도(약 14g/m³)를 유지할 때 까지 예비적으로 순환시킴으로써 유체흐름을 안정화 시켰다. 이후 장착되는 영구자석의 강도를 1,650 ~ 3,000 gauss로 변화시켜 가며, filter 내부 공간에 형성되는 자석강도의 영향

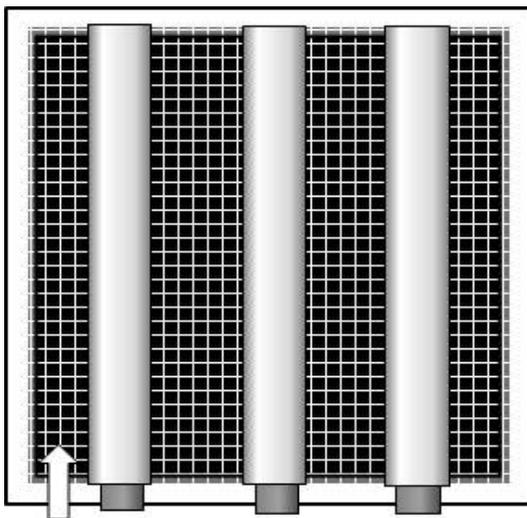


Fig. 1. Diagram of magnetic filter unit.

를 확인하였다. 또한 실험유속을 1 m/s, 1.25 m/s, 1.5 m/s 로 세분화하여 유속의 영향을 관측하였으며, 필터유닛에 적용되는 금속망 눈의 크기에 따른 자기장 형성과 먼지포집성능을 검토하기 위해 4 mm, 1 mm, 100 μm, Non-mesh 의 조건으로 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시험입자 특성 분석

3.1.1 외형 및 크기

지하철 역사 공조실에서 채취한 먼지입자의 기본적인 물성을 1차적으로 조사분석 하였다. 각 입자별로 함유하고 있는 철성분의 양을 조사하여 잠재적 자기력을 측정할 수 있었으며, 입자크기를 분석하였다.

SEM을 통해 관측한 MVAC dust의 외형은 Fig. 3 ~ 5와 같이 나타났다. 본 연구에서 제작한 자성필터 유닛에 의해 포집된 미세먼지를 보여주는 Fig. 3 은 입자가 모난형태를 취하고 있으며, 일부 입자들이 뭉쳐있는 것을 확인할 수 있었다. 확인하였을 때, 주로 입자의 크기가 20 μm 이하에 분포되어 있음을 알 수 있었다. 포집된 dust 인 Fig. 4 에 나타난 입자들은 크기가 10 μm 이하인 미세입자가 주로 관찰되었으며, 입자의 모서리 부분에 작은 초미세 입자가 부

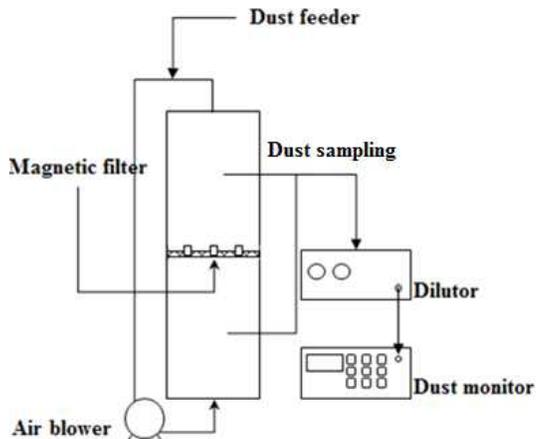


Fig. 2. Schematic diagram of experiment set up.

착되어있는 형태를 확인할 수 있었다. 이들은 특히 다른 이미지 보다 밝게 나타났으며, 이미지 관측 시 동일한 출력전압 상태에서 측정하였고, 시료가 mono layer 상태이었음을 고려하였을 때, 부정형의 외형과 특정성분의 밀집에 의한 현상이라고 판단할 수 있다. 포집되지 않은채 자성필터유닛을 투과한 dust를 나타낸 Fig. 5 는 입자의 크기가 20 μm 부근에서 주로 관찰되었고, 동시에 $\text{PM}_{2.5}$ 로 분류되는 초미세입자들도 상당량 관측되었다. 그러나 그 밝기가 전체적으로 어두웠으며, 응집되거나 서로 부착되어 있는 경우는 눈에 띄지 않았다.

입도분석기를 이용하여 현미경을 통하여 관찰한 먼지 입자시료를 보다 정밀하게 크기분포를 측정해 보았으며, Fig. 6 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

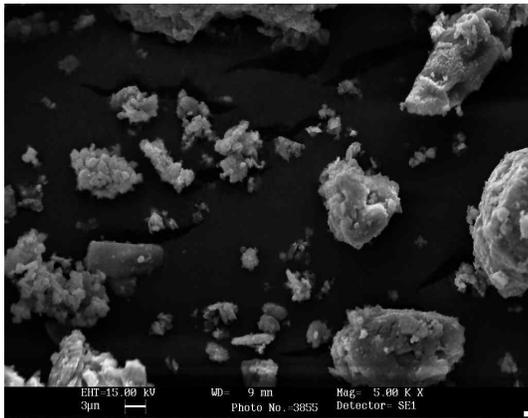


Fig. 3. SEM image of raw dust ($\times 5000$).

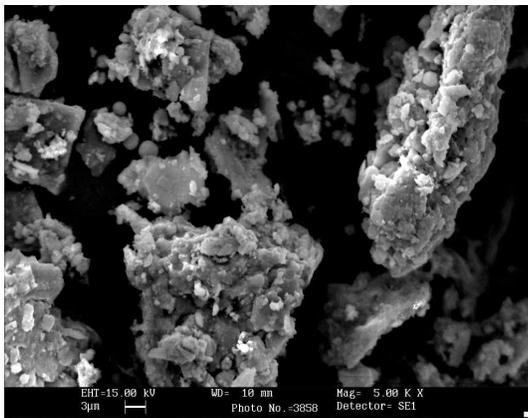


Fig. 4. SEM image of captured dust ($\times 5000$).

포집전 시험 시료는 90% 이상이 66 μm 미만에 분포되어 있었으나, 자성필터 유닛에 의해 포집된 분진의 경우 55 μm , 비포집분진의 경우 90% 이상이 113.7 μm 미만으로 구성되어 있었다. 특히 포집전 시료는 38 μm 의 표준체를 이용하여 체거름을 사전 진행하였음에도 불구하고, 66 μm 부근의 상대적으로 큰 입자가 검출되었으나, 입도분포는 부피분율로 측정되었기 때문에 실제 이러한 비정상적인 입자의 수는 미미하다고 판단되었다. 실제 시험용 분진으로 준비한 먼지 시료의 중간입경(dp_{50})은 25.2 μm 로 나타났다.

일반적으로 미세먼지로 구분되는 PM_{10} 은 전체의 27.3%의 부피를 차지하고 있었으며, 초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$)는 11.3%로 나타났다. 실험결과 포집분진에 보다 작은 크기의 미세먼지가 포집되어 PM_{10} 이 39.9%를 차지하는바, 상대적으로 작은 크기의 먼지

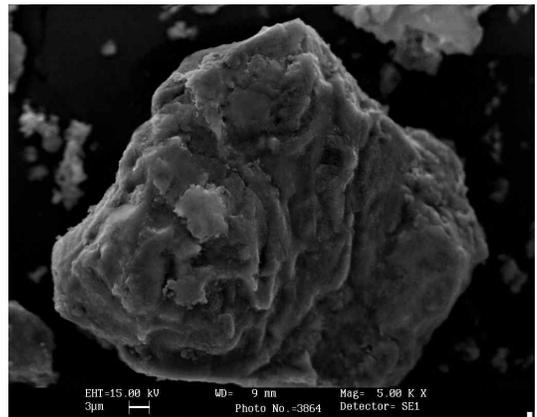


Fig. 5. SEM image of uncaptured dust ($\times 5000$).

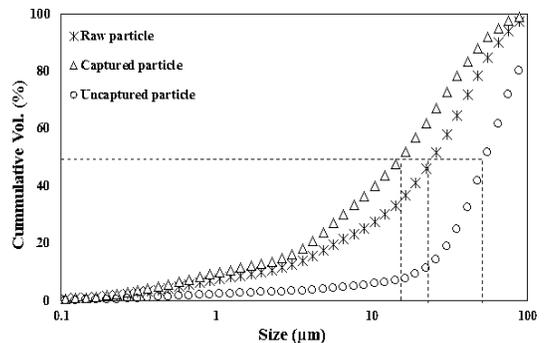


Fig. 6. Cumulative MVAC particle size distribution.

가 자성에 반응하여 포집되었다고 추측 할 수 있었다. 비포집분진의 크기는 보다 크게 나타난 바, 큰 크기의 입자는 자성에 반응하는 성분을 적게 포함하는 바, 자기력에 의해 포집되기 보다는 입자의 관성력에 의해 금속망 필터를 통과하였을 것으로 판단되었다.

3.1.2 시험입자의 화학적 조성

SEM을 통한 외형 이미지 분석과 더불어 진행된 EDX 분석결과를 Table 1에 요약하였다. EDX 분석 시, 측정 시료가 일정한 두께의 고체인 경우, X-ray 투과도가 Carbon tape 층 까지 영향을 끼치지 않지만, 본 미세먼지 시료는 충분히 그 크기가 작고, 비어있는 여유공간 Carbon tape의 성분이 동시에 측정되었기 때문에, C 와 O 의 성분을 제외한 무게 비율로 산출하였다.

분석결과 토양으로부터 생성되는 Si가 가장 많은 양을 차지하였고, Fe 와 Al 의 금속성분이 그 다음으로 높게 측정되었다. 그 외에 Ca, K, Mg 등과 같은 금속성분과 기타 성분들이 관측되었으며, 강자성 물질로 구분되는 Ni 와 Co 등은 검출되지 않았다. 필터에 의한 포집 전의 미세입자는 14.2%의 Fe가 관측되었으며, Hwang et al. (2005)의 연구에 의해 Fe₂O₃ 형태로 21.7%의 함량과 Lim et al. (2010)의 연구에서 나타난 PM₁₀중 33%, Hwang et al. (2013)의 24% 등에 비하면 선행연구결과의 평균결과보다 낮

은 함유량으로 나타났다. 포집된 MVAC dust 에서는 25.3%로 Fe 함량이 증가하였으며, 문헌에서 나타난 Fe 함량과 유사하게 나타났다. 이는 포집전 입자와 비교하였을 때 Fe 함량이 높은 분진 또는 Fe 성분을 포함하고 있는 분진이 자성필터에 의해 포집되었기 때문에 상대적인 비율이 증가한 것으로 이해할 수 있다. 동시에 비포집 MVAC dust 에서는 Fe 함량이 8.9%로 감소되었는바, 8.9%에 해당되는 Fe는 자성을 갖지 않는 형태인 Hematite (Fe₂O₃)로 존재할 가능성이 높다고 판단되었다. 또한, X선 형광분석(XRF, ZSX-100e, Rigaku)을 이용하여 화학성분을 분석하여 Fe 함유량을 정량화 하였다. 이때, MVAC dust 중 금속성분들은 주로 산화물의 형태로 존재하기 때문에 진공 - Oxide 모드로 측정하였다.

측정시료는 여타 분석과 같이 포집전, 포집분진, 비포집분진의 세 종류로 24 ~ 25 가지의 원소가 측정되었다. 이때 EDX 결과와의 비교를 위해 공통 원소 위주로 결과를 선별하였고, 그 중에서 Na 함량보다 낮은 값을 갖는 원소와 한 종류의 분진에서만 검출된 원소 등은 대표성이 낮다고 판단하여 제외한 후, Table 2 와 같이 무게비율 (wt%)로 나타낼 수 있었다.

측정결과 Si가 가장 높은 함유율을 나타냈으며, Fe, Al, Ca, K 등이 그 뒤를 이어 존재하였고, EDX 결과와 동일한 경향을 나타냈다. 기타 원소들은 존재성을 확인할 수는 있었으나 random하게 나타났으며,

Table 1. Chemical composition of test dust by EDX.

Element (wt%)	RAW particle	Captured particle	Non captured particle
Si	53.82	36.05	41.31
Fe	14.17	25.29	8.88
Al	12.76	12.25	14.05
Ca	4.28	9.66	16.64
K	3.75	4.82	3.39
Mg	1.40	3.46	7.11
S	1.34	5.13	-
Na	2.89	2.74	5.43
Mo	4.38	0.59	2.42
Ba	0.75	-	0.40
As	0.45	-	0.35
Total		100	

Table 2. Chemical composition of test dust by XRF.

Element (wt%)	RAW particle	Captured particle	Non captured particle
Si	42.63	38.55	43.95
Fe	25.24	30.42	23.44
Al	13.61	14.59	13.92
Ca	9.59	9.15	9.57
K	4.23	3.15	4.40
Na	0.16	0.14	0.16
Mg	2.13	1.96	2.2
Ti	1.33	1.13	1.32
S	1.08	0.92	1.05
Total		100	

Fe 함량은 「포집분진 > 포집전 분진 > 비포집분진」의 순서로 각각 30.4%, 25.2%, 23.4%를 보였다. XRF 결과는 EDX 결과와는 달리 참고문헌에서 보편적으로 나타났던 지하철 분진의 철 함유량과 유사하며, 자성포집 전/후의 차이가 뚜렷하게 나타났다.

3.1.3 시험입자의 자기력 분석

진동 시료 자력계를 사용하여 개별 입자의 자화도를 측정하였다. 자화는 물질에 자기장을 인가하면, 그 물질의 주위에 새로운 자기장이 유도되고, 물질이 이와 같이 자기장을 갖게 되는 현상을 뜻한다. 따라서 자화도가 높을수록 외부 자기력에 강하게 반응한다. Park et al. (2015) 과 Shoumkova (2011) 등의 자성포집 연구에 따르면 석탄 Flyash는 평균적으로 8.6%의 Fe 함량을 가지고 있었다. Li et al. (2007)

은 이러한 Fylash 의 VSM을 측정하여 0.0015 ~ 0.003 emu 의 자화도를 가짐을 보였다. 따라서 이보다 높은 Fe 함량을 갖는 MVAC dust는 보다 높은 자화값을 가질 것 이라고 예상할 수 있었고, 그 결과를 Fig. 7 에 나타내어 비교하였다.

Fig. 7을 살펴보면, 포집전 시료는 5,000 Oe에서 0.012 emu를 보였으며, 외부자기장의 강도가 증가할수록 그 값이 소폭 상승하는 형태를 보였다. 포집분진의 경우, 화학성분 분석결과 Fe 함량이 가장 높게 측정되었던 바, VSM 측정 결과와 비교하여 소폭 높은 수치인 0.016 emu를 보였으며, 역시 외부자기장에 반응하여 지속적으로 증가하는 양상을 보였다. 반면에 비포집분진의 경우, Li et al. (2007)의 Flyash 보다는 높고, 포집전 시료보다는 낮은 0.006 emu의 값을 5,000 Oe에서 보였다. 이러한 결과를 토대로 지하철 공조실로 유입되는 미세먼지는 자기장에 반응하는 분진임을 알 수 있었으며, 자성필터를 이용한 포집실험이 중요한 의미를 가질 것이라고 확인 수 있게 되었다.

3.2 자성포집연구

3.2.1 자성필터 유닛의 자기장 강도

본 연구에 적용한 자성필터유닛의 금속망필터 표면에 형성되는 자기장을 Gauss meter를 이용하여 측정하였다. 측정지점은 필터유닛의 가로, 세로 길이

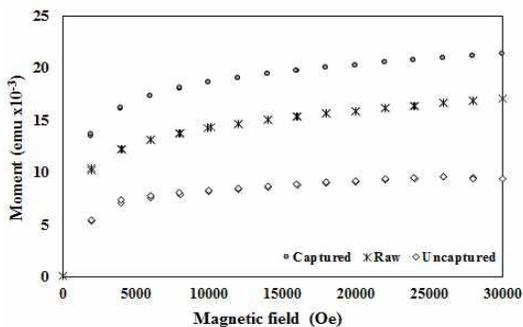


Fig. 7. VSM results of MVAC dust.

를 1로 기준으로 설정하고, 상대적인 위치인 세로 0.5, 가로 0 ~ 1 지점으로 구분하여 필터유닛의 금속망 표면에 probe를 접촉시켜 측정하였다. 시험용 자석 가운데 가장 높은 강도인 3,000 gauss의 영구자석을 삽입하였을 때, 측정위치와 적용 금속망 눈의 크기에 따라서 그 결과가 다르게 나타났다. 금속망 눈의 크기와 관계없이 필터유닛의 중앙부에서 최저 200 gauss(금속망이 없는 경우), 최고 1,100 gauss(1 mm 금속망 눈)의 자기장 강도가 나타났다. 또한 자석의 중심효과가 적은 외곽으로 갈수록, 또 금속망 눈의 크기가 클수록 자기장의 강도가 높게 증가하는 것을 확인하였다. 이는 금속망 눈의 크기가 클수록 구성 금속 와이어의 두께가 두꺼워지며, 외부자기장의 영향을 받아 자화되는 정도가 보다 강해지기 때문이다.

3.2.2 입자의 자성포집효율

시험용 시료 dust가 자성필터에 포집되는 양을 평가하기 위한 실험으로서, Fig. 2 와 같은 구조로 제작한 챔버 내에 자성필터유닛을 삽입하여 1시간 동안 순환포집 시키면서 시간에 따른 포집효율을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 9와 10 에 요약하였다.

Fig. 9 와 Fig. 10 은 1 mm의 금속망 필터를 1.5 m/s의 유속으로 순환시키면서 나타나는 적산 포집효율을 보여주고 있다. 금속망이 설치되어있는 경우, 자석만 존재하였을 때보다는 훨씬 높고, 상대적으로 안정적인 포집효율을 보여주었다. 그러나 자석의 강도가 낮을수록 포집량이 불안정하게 변화되는 반면, 강도가 증가할수록 비교적 안정한 포집효율 형태를 나타냈다. 즉, 3,000 gauss의 자석이 적용되었을 때, 여과시작 초기 10분 이내에 90%이상의 입자 포집 효율을 보여주었으나, 금속망 필터가 없는 경우, 1 시간 이상의 여과를 지속하였음에도 불구하고 60%이내의 효율을 나타내고 있었다. 또한 포집효율의 증가량 변화를 보여주는 변곡점은 자석의 강도가 약해질수록 늦게 나타나는데, 1,650 gauss의 자석에 대하여 초기부터 15분 후에 70%효율 부근에서 증가량 변화가 일어났다. 이는 자기장의 강도가 증가할수록 자성필터유닛과 시험용 dust간에 작용하는 자기력이 증가하기 때문이라고 생각할 수 있다.

한편, 참고적으로 실시한 금속망에 의한 여과효과 실험에서 외부 자기력을 공급하지 않은 상태에서, 필터 표면에 부착된 먼지입자의 탈착 현상이 부정

기적으로 발생하여 포집효율 값이 불안정하게 변하고 있음을 알 수 있다. 포집효율의 절대값 또한 자성필터 유닛보다 훨씬 낮은 50%정도에 머무르고 있었다.

또한 PM₁₀과 PM_{2.5}의 시간에 따른 포집효율형태는 서로 유사한 경향을 나타냄을 확인하였다. 자성포집효과로 PM₁₀보다는 PM_{2.5}에서 높게 나타났다. 즉 금속망 눈이 1 mm 인 필터유닛을 구성하였을 때, PM₁₀은 자석이 없을 때 보다 최대 48%의 포집효율 증가가 이루어졌으나, PM_{2.5}는 45%까지 효율상승이 있었다. 자성필터 유닛에 의한 포집효율은 PM₁₀이 PM_{2.5}보다 약 5%내외의 높은 포집효율을 보임으로써 포집되는 미세먼지의 상당량이 PM_{2.5}에 분포하고 있음을 알 수 있다.

동시에 Fig. 11과 12 에 동일한 유속(1.5 m/s)으로 흘러주면서 실험하여 포집을 진행할 때 금속망 눈 크기에 따른 최종포집효율을 비교하여 나타내었다. 75 mm의 데이터는 금속망을 적용하지 않은 상태로 영구자석과 필터프레임에 의해 생성되는 빈 공간의 평균거리를 나타내었다. 그래프를 통하여 확인하였을 때, 포집효율과 금속망 눈의 관계는 음의 지수 형태를 가짐을 확인할 수 있었다. 이에 영구자석의 강도가 감소할수록 금속망 눈의 영향이 보다 크게 나타나서 포집효율이 감소하는 것을 알 수 있었다. 이때 1,650 gauss를 적용하였을 때, PM₁₀에서 최대 49.5%의 포집효율 차이가, PM_{2.5}에서는 55.8%의 포집효율 차이나 나타났다.

Fig. 13 ~ 14는 1 mm의 금속망 눈 크기를 기준으로, 자성필터실험에 적용한 실험유속의 빠르기에 따른 포집효율 변화를 나타낸다. 동시에 적용 영구자석강도에 따라 그 효율 변화도 함께 나타낼 수 있었다. 실험유속은 1 m/s, 1.25 m/s, 1.5 m/s로 유속이 증가할수록 포집효율이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 삽입영구자석의 강도가 강할수록 포집효율의 하강폭이 감소하는 것을 알 수 있었다. PM₁₀에서는 1,650 gauss의 가장 낮은 영구자석을 적용하였을 때 자력에 의한 포집입자 고정력이 낮기 때문에 유속의 영향을 가장 강하게 받아 포집된 입자의 재비산 등의 현상이 발생한다. 따라서 1.5 m/s에서 1 m/s로 감속하였을 때 포집효율이 9.2%의 증가가 나타났다. PM_{2.5}에서는 1,650 gauss의 영구자석을 적용하였을 때 9.4%증가하였다. 반면, 3,000 gauss를 적용

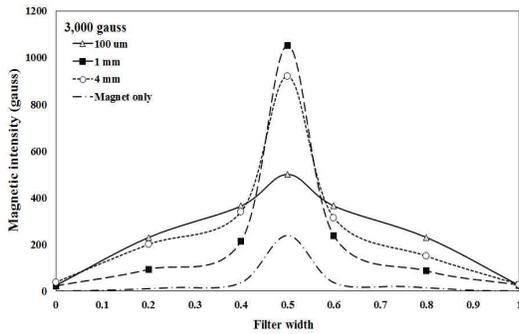


Fig. 8. Magnetic flux density depending on the used mesh opening size.

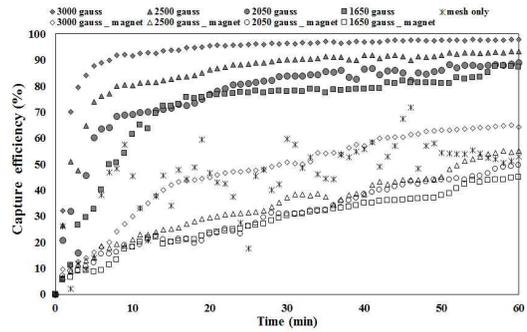


Fig. 9. PM₁₀ capture efficiency with 1 mm mesh opening.

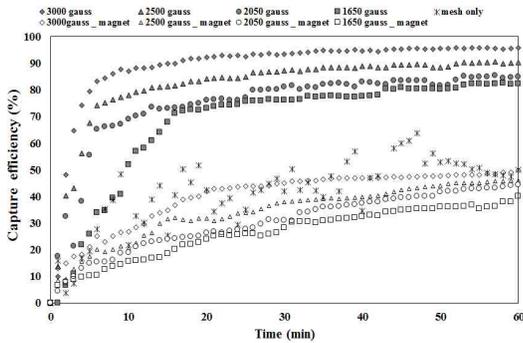


Fig. 10. PM_{2.5} capture efficiency with 1 mm mesh opening.

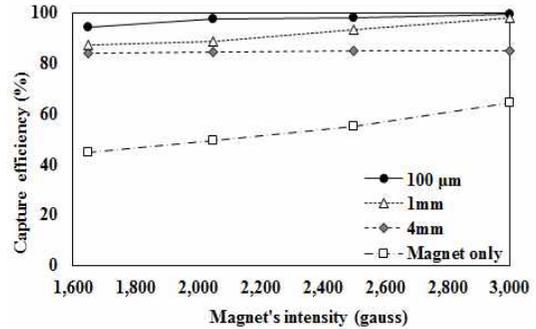


Fig. 11. Magnet intensity and capture efficiency : PM₁₀.

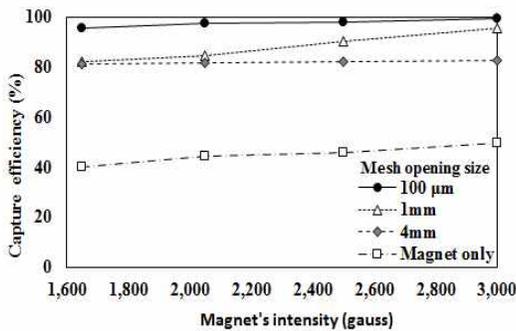


Fig. 12. Magnet intensity and capture efficiency : PM_{2.5}.

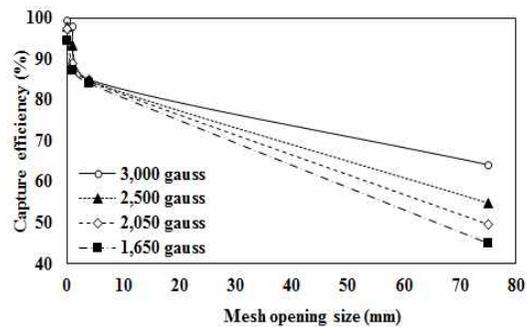


Fig. 13. Mesh opening size and capture efficiency : PM₁₀.

하였을 때에는 유속의 영향이 가장 적게 나타났다. 이들은 정비례의 관계를 가지지는 않았으며, PM₁₀의 경우에는 유속의 제곱에 음의 비례관계를(-x²) 가지

는 것으로 보였으나 PM_{2.5}의 경우에는 유속이 증가함에 따라 포집효율이 유속의 제곱에 비례관계(x²) 하는 형태로 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

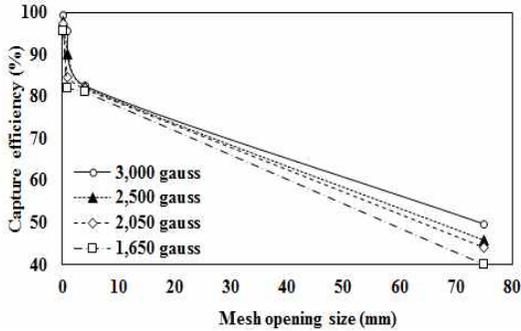


Figure 14. Mesh opening size and capture efficiency : PM_{2.5}.

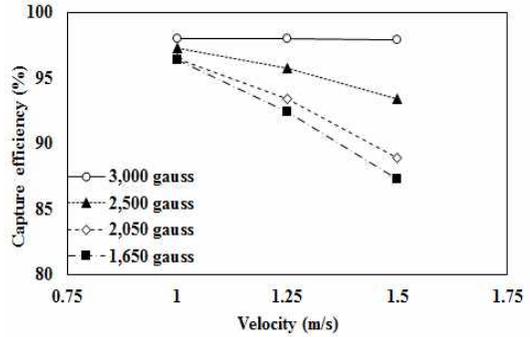


Figure 15. Test velocity and capture efficiency : PM₁₀.

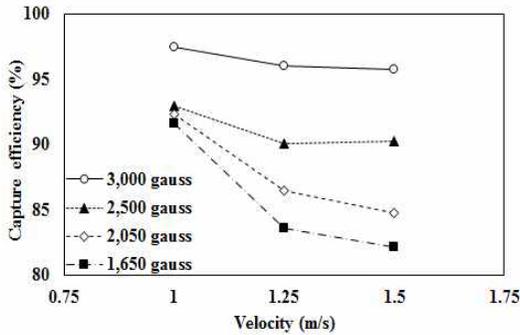


Figure 16. Test velocity and capture efficiency : PM_{2.5}.

Fig. 15와 Fig. 16은 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 유속과 자석의 세기에 대하여 상관관계를 고찰한 것이다. 일반 미세먼지 포집용 필터와는 달리 자기력 전달에 의한 자성필터 개념의 본 연구에서 사용한 금속망 여과체는 직접차단이나 관성력 포집의 메카니즘을 기대할 수 없다. 따라서 입자의 포집이 대부분 입자와 자화된 메시 와이어의 상호 자기 인력에 의해 이루어진다고 볼 수 있다. 따라서 미세먼지입자나 초미세먼지는 금속망의 강한 자기력에 의해 망 와이어 표면으로 이끌려져 부착되는 원리이므로 높은 강도의 자석에 의해 조성되는 자기장 필터에서 보다 많이 포집된다. 상대적으로 유속이 빠르고, 자기력의 강도가 낮은 경우, 다수의 미세입자가 공기 흐름과 함께 메시를 관통하게 되어 궁극적인 포집효율이 낮게 나타났다. 이미 전술하였듯이 입자의 크기가 클수록 자체 자기력이 크게 작용하게 되어 PM₁₀과 PM_{2.5}의 시험결과에서 고찰되듯이 유속이 증

가할수록 눈에 띄는 포집효율 차이를 보여주었다. 다만 유속에 의한 영향이 PM₁₀과 PM_{2.5}가 서로 다른 형태의 관계를 보여주고 있으며, 이는 실험 유속 범위에 따라 변화량이 다양하게 나타날 것으로 예상된다.

4. 결 론

본 연구에서 사용한 지하철 역사 MVAC 챔버에서 채취한 입자는 강자성의 Fe 화합물을 25.2% 함유하고 있었다. 시험용으로 사용한 MVAC dust는 5,000 Oe에서 0.012 emu의 자화도값을 보여 자기력에 의한 포집이 충분히 가능함을 알 수 있었다. 이를 위해 철 메쉬스크린과 영구자석을 이용하여 시험제작한 자성필터유닛은 금속망 눈 크기와 자석의 강도에 따라 공간에 형성되는 자기장의 세기가 다

양하였으며, 최고 1,100 gauss의 강도를 보였다.

이러한 사실을 토대로 순환형 필터유닛 내에서 1 시간 동안 자성포집을 진행하였을 때 최종포집량은 영구자석만 존재할 때 보다 PM₁₀ 기준으로 최대 35%, PM_{2.5}의 경우에는 최대 33.0% 증가한 값을 얻을 수 있었다. 각각의 적용변수에 대해서는 영구자석의 강도가 증가할수록, 필터유닛의 금속망 눈 크기가 작을수록, 유속이 낮을수록 그 포집효율이 증가하였으며, 유속에 대한 영향을 제외하고는 PM₁₀과 PM_{2.5}의 포집효율 변화경향이 동일하게 나타났다.

지하철 먼지입자의 철 함량을 고려하여 보면, Flyash 의 발생원인 화력발전소, 제철소, 조선소, 철 성분이 포함된 폐분진의 발생원에 자성필터를 다양하게 적용하면 보다 효과적인 포집효율을 얻게 될 것으로 생각된다.

감사의 글

본 과제는 중소기업청에서 지원하는 2014년도 산학연협력 기술개발사업 (No. C0192092)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- Birenzvige, A., Eversole, J., Seaver, M., Francesconi, S., Valdes, E. and Kulaga, H. (2003) Aerosol Characteristics in a Subway Environment, *Aerosol Science and Technology*, 37, 210-220.
- Chillrud, S.N., Epstein, D., Ross, J.M., Sax, S.N., Pederson, D., Spengler, J.D., and Kinney, P. L. (2004) Elevated Airborne Exposures of Teenagers to Manganese, Chromium, and Iron from Steel Dust and New York City's Subway System. *Environmental Science and Technology*, 38, 732-737.
- Do, H.S., Song, H.B., Shin, D.C., Kwak, J.H., Lee, M.S., Yoon, H.S., Kang, H.J. and Phee, Y.G. (2009) Characteristic Assessment of Heavy Metals in Dusts Collected by the Air Filtration System at Subway Stations in Daegu, Korea, *J Kor Soc Environ Eng.* 31(1), 42-50.
- Jung, H.J., Yeom, H.J., Chung, S.G., Kim, J.C. and Nho, C.U. Characterization of Magnetic Fe-containing Particles Collected at Underground Subway Stations, *Proceeding of the 53rd Meeting of KOSAE*(2011).
- Li, Y.W., Zhao, C.S., Wu, X., Lu, D.F. and Han. S. (2007) Aggregation mechanism of fine fly ash particles in uniform magnetic field, *Korean J. Chem. Eng.*, 24(2), 319-327.
- Menzel, K., Windt. C.W., Lindner, J.A., Michel, A. and Nirschl, H. (2013) Dipolar openable Halbach magnet design for High-Gradient Magnetic Filtration, *Separation and Purification Technology*, 105, 114-120.
- Park, H.W., Huang, S., Chung, S.G., Kim, S.B. and Jo, Y.M. (2015) Fine Iron Dust Collection by Magnetized Mesh Filters, *J. KOSAE*, 31(2), 118-130.
- Seaton, A., Cherrie, J., Dennekamp, M., Donaldson, K., Hurley, J.F. and Tran C.L. (2005) The London underground : dust and hazards to health, *Occupational and Environmental Medicine*, 62, 355-362.
- Shoumkova, A.S. (2011) Magnetic separation of coal fly ash from Bulgarian power plants, *Waste Manage. Res.*, 29(10), 1078-1089.
- Štefušová, K., Václavíková, M., Lovás, M., and Hredzák, S. (2012) Use of magnetic filtration in waste water treatment, *Acta Montanistica Slovaca Ročník*, 17(1), 81-84.