

철성분 미세먼지 포집을 위한 자성 필터 연구

Fine Iron Dust Collection by Magnetized Mesh Filters

박해우 · 황 산 · 정상귀¹⁾ · 김상범²⁾ · 조영민*

경희대학교 환경응용과학과, ¹⁾진국대학교 환경공학과, ²⁾한국생산기술연구원

(2015년 1월 12일 접수, 2015년 3월 11일 수정, 2015년 3월 30일 채택)

Haewoo Park, Shan Huang, Sang Gui Chung¹⁾, Sangbum Kim²⁾
and Young Min Jo*

Department of Applied Environmental Science, Kyunghee University

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Kunkook University*

²⁾*Green Process and Material R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology*

(Received 12 January 2015, revised 11 March 2015, accepted 30 March 2015)

Abstract

Fine dust containing iron compounds is of current interests in metro subway as well as large scale industries including iron manufacturing and smelting works. This work attempts to find a new design of magnetic filter module for iron dust capture. It simulated the vertical rectangular duct with metal mesh which might promote electric fields in the duct space. A lab test using coal fly ash composed of 8.66% Fe with the most form of Fe_3O_4 and Fe_2O_3 showed capability of magnetic collection. It showed the capture efficiency with 80~93% for $PM_{2.5}$ depending on magnetic intensity. Ferromagnetic wire mesh contributed up to 50% of collection increment.

Key words : Magnetic capture, Magnetic field, Iron particles, Fly ash, CFD simulation

1. 서 론

한정된 석유 에너지 부존량과 새로운 에너지의 비용으로 인하여 국내 석탄 화력발전소의 비중은 갈수록 상승하고 있는 추세이다(Park and Jo, 2013). 발전소들은 첨단 방지시설을 설치하여 대기오염물질의 배출을 최소화하려고 노력하고 있지만 여전히 국가 지정대기오염물질인 황산화물, 질소산화물, 일산화탄소,

미세먼지의 주요 발생원으로 작용하고 있다. 화력발전소뿐만 아니라 인구증가와 함께 도시폐기물의 발생량이 급격히 증가하여 그와 동시에 폐기물 소각처리량도 증가하고 있으며, 이로부터 발생하는 비산재의 처리도 관심 대상이 되고 있다(Kim *et al.*, 2000). 그 외에도 대도시 지하철 실내환경과 지하터널에서 외부로 배출되는 먼지입자들 역시 철을 포함한 다양한 금속성분을 함유하고 있으므로 이용하는 승객들이나 주변 시민들의 건강을 위협하는 요소가 되고 있다.

석탄화력발전소에서 발생하는 비산재는 실리콘(quartz)과 알루미늄 산화물의 미네랄 형태가 대부분을

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)31-201-2485, E-mail : ymjo@khu.ac.kr

차지하고 있으며, 소량의 철화합물(iron compounds)이 포함되어 있다. 특히 철산화물은 Fe_3O_4 와 $\alpha-Fe_2O_3$ 형태가 대부분이며, 이 가운데 Fe_3O_4 는 자성을 띠는 magnetite로, $38 \mu m$ 이하의 작은 입자에서 상대적으로 많이 발견되고 있다(Lee *et al.*, 2013; Chaddha and Seehra, 1983). 국내 도시폐기물 소각시설에서 배출되는 비산재 또한 Cd, Cu, Ni, Pb 등의 중금속이 다량 포함되어 있으며, Fe_2O_3 를 비롯한 자성을 띠는 성분이 일정량 이상 존재하고 있고, 산업폐기물의 경우 Fe_2O_3 와 $CaCO_2$ 가 다량 함유되어 있다(Jang *et al.*, 2000; Park and Kim, 1999; Lee *et al.*, 1998).

자석을 이용한 입자상 물질의 분리는 광산이나 제철소, 폐수처리장 등지에서 유용한 물질 회수와 오염제어 용도 또는 응집을 위한 목적으로 사용되어 왔다(Gokon *et al.*, 2002; Yiacoumi *et al.*, 1996; Svoboda, 1994). 저농도 철분진 포집연구를 1 T (Tesla) 이상의 자기장 환경에서 실험한 연구도 있었으나 매우 높은 자기장 조건으로 일반적인 자석으로는 제어가 힘들고, 강도 조절이 용이한 전자석을 이용한 경우에 적합한 것으로 판단되었으며, 민감도가 높은 입자들을 대상으로 특수한 환경에 대한 고찰이었다(Albvaroa *et al.*, 2007). 국내에서도 영구자석을 이용한 원료회수 연구 및 토양입자, 폐수 분리실험이 기초적으로 진행되었던 적이 있다(Ha *et al.*, 2006; Suh *et al.*, 2005; Yoon *et al.*, 2003).

자성을 띠는 미세먼지를 포집하기 위한 연구는 간헐적으로 진행되고 있는데, 고구배 자기장을 이용하여 $50 \sim 100 mg/m^3$ 의 고농도 환경에서 자성포집을 수학적 모델링연구 및 MATLAB을 이용한 수치해석을 통하여 C형 고구배 자기장에서의 입자포집을 연구하는 등 이론적 연구가 주로 이루어져왔다(Menzel, 2013; Gooding and Felder, 1981). 최근 석탄화력발전소에서 배출되는 비산재의 물리화학적 성분을 면밀히 조사함으로써 자성분리의 가능성을 연구한 결과가 있다(Shoumkova, 2011). 다양한 발전소의 비산재에 함유되어 있는 자성의 철화합물을 분석하고, 적당한 자기력 ($0.01 < B < 0.02T$)과 유속 ($0.2 < V < 0.4 m/s$)의 범위에서 전처리 장치로서 자성분리장치가 적용될 수 있음을 보여주었다.

이에 본 연구에서는 다양한 발생원의 철성분을 함유하고 있는 비산재나 미세먼지를 포집하기 위하여 무동력의 영구자석을 활용한 새로운 형태의 자기장

여과필터를 설계하고, 시험제작하여 비산재 먼지입자의 포집 가능성을 실험을 통하여 검증하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험용 미세먼지입자 특성 분석

SEM/EDX (Stereoscan 440, Leica Cambridge)로 비산재 입자의 형태 및 개별입자의 화학적 조성을 분석함으로써 자성필터 여과에 적합한지를 고찰하였다. 즉, 먼지입자에 함유되어 있는 철성분(Fe)의 화학적 구조를 파악하기 위하여 XRD 분석을 실시함으로써 Fe, Fe_2O_3 , Fe_3O_4 등의 결정상의 분포 여부를 분석하였다(D8 Advance, Bruker, US). 이를 통해 본질적인 자기적 특징인 강자성 또는 상자성을 판단하고자 하였다. 입자의 입도분포는 particle sizer (Malvern Mastersizer, Malvern, UK)를 이용하여 질량 기준으로 측정하였으며, 본 실험에는 $38 \mu m$ 표준체로 체거름하여 그 이하의 입자를 선별하여 적용하였다.

2.2 자기장 특성 및 미세먼지 포집 실험

문헌고찰을 토대로 초고강도 자석을 사용하지 않고, 제어가 용이한 범위 내에서 보다 효율적인 포집을 위해 금속망(metal grid)과 영구자석을 이용하여 그림 1과 같은 사각모양의 덕트를 제작하여 먼지입자가 공기와 함께 위쪽으로 상승하며 흐를 수 있도록 구성하였다. 유입되는 먼지입자와 금속망 전·후의 입자의 농도 및 크기분포는 입도분석기(Grimm 1.109, German)를 이용하여 실시간 측정함으로써 입자 크기별 포집효율을 산출하였다. 이때 자석필터는 합금으로 이루어진 금속망(Woven type, standard #90)의 가장자리에 접촉되도록 하였으며, 자성강도가 다른 영구자석 ($1 cm \times 4 cm \times 0.2 cm$)을 부착하였다. 이는 영구자석 자체에 포집되는 것 뿐만 아니라 ferromagnetic 소재의 금속망을 자화시키고, 금속망의 체 눈 내부공간에 상대적으로 높은 자기장을 형성하여 철성분 미세먼지입자들의 움직임에 영향을 주고, 궁극적으로 자성포집에 대한 일정한 인력을 작용할 것으로 예상하였다.

이때 제작한 자석필터의 자기력을 평가하기 위하여 자기장 세기를 Gauss meter (F.W. BELL, USA)를 이용하여 측정하고, 전산유체역학 기법을 통하여 자

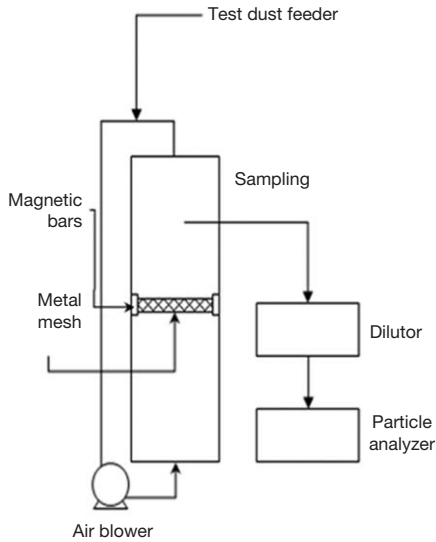


Fig. 1. Schematic diagram of magnetic filtration test setup.

기장의 분포를 이론적으로 계산해보았다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 석탄화력발전소에서 발생하는 비산재의 화학적 성분을 분석하여 자기성분의 함유여부를 우선 고찰하였다. 이러한 석탄비산재를 이용하여 화력발전소 뿐만 아니라 도시지하철, 금속제련 및 가공사업장에서 발생하는 철 함유 미세먼지의 일부를 포집할 수 있는 새로운 무동력/저정압 자기장 여과 장치를 구성하여 포집성능을 고찰함으로써 1 처리장 치로서의 가능성을 검토하였다.

3.1 비산재 입자의 특성 분석

3.1.1 입자형상 및 크기분포

본 연구에서는 미세먼지 부분에 초점을 맞추어 포집 가능성을 고찰하기 위하여 시험용 석탄비산재를 38 μm (Tyler No. 400) 표준체로 사전에 1차 체거름을 실시하였다. 즉, 자기장을 다양하게 구성하면서 기계흐름 내에서 미세먼지입자들의 움직임에 초점을 맞추어 관찰하고자 하였다.

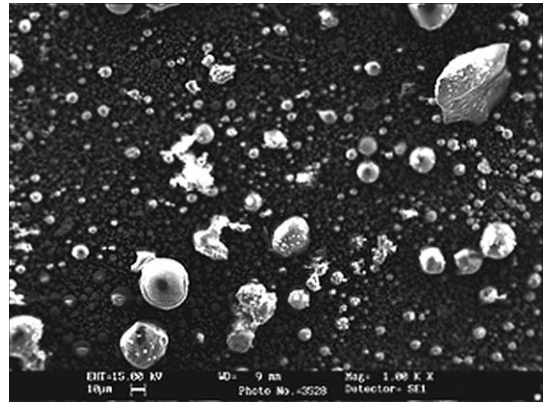


Fig. 2. SEM image of raw ash particles (× 1000).

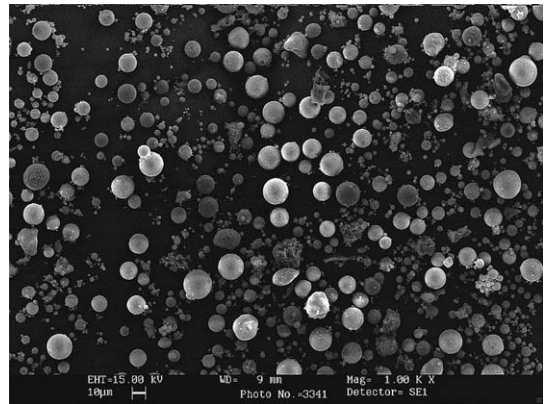


Fig. 3. SEM image of test ash dust (× 1000).

그림 2~5는 실험에 사용한 비산재 입자를 1000 배 확대한 SEM 이미지로서 그림 2는 체거름 이전, 그림 3은 체거름 이후, 그림 4는 자석을 장착하지 않은 필터에 포집된 먼지입자, 그림 5는 자석이 장착된 필터에 포집된 먼지입자의 형태를 나타낸다. 사진에서 볼 수 있듯이 실험에 이용된 석탄회 입자들은 800°C 이상의 고온에서 연소된 후, 비산하여 여과집진기나 전기집진기로 포집한 잔재물로서 주로 구형을 띄고 있다. 본 연구를 위하여 38 μm의 표준체로 선별한 그림 3의 입자들은 원 시료 비산재입자에 비하여 상대적으로 크기분포와 형태가 일정한 것을 알 수 있다. 이러한 체분리는 불순물을 비롯한 비정형 거대입자들을 걸러내고, 크기분포를 축소시킴으로써

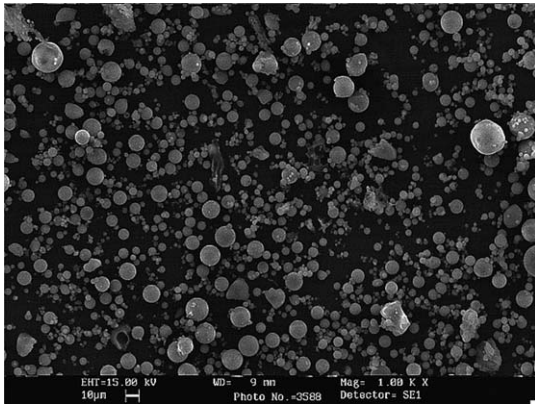


Fig. 4. SEM image of test ash dust : without magnet (× 1000).

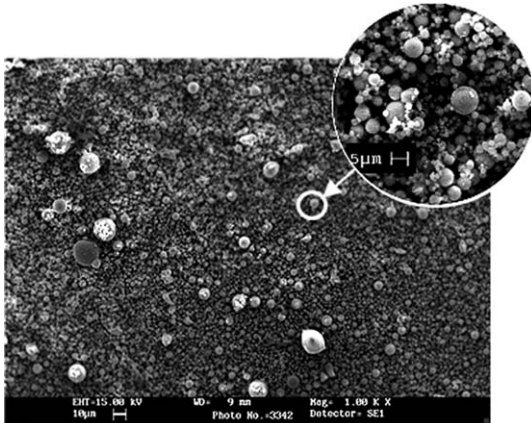


Fig. 5. SEM image of test captured ash dust (× 1000).

미세먼지 시험에 유용하게 활용할 수 있다. 또한 구형의 입자로 구성되어 있는 석탄비산재는 집진장치의 실험에 자주 사용되며, 여과 메카니즘을 이해하는데 도움이 된다(Lee and Jo, 2008).

그림 4에 나타난 자석을 장착하지 않은 필터에 포집된 입자들은 그림 3과 크게 다르지 않은 반면, 그림 5에 나타난 자성필터에 포집된 입자들은 여과장치로 유입되는 먼지보다는 크기가 작은 입자들로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한, 큰 입자의 표면에 미세한 입자들이 응집·부착되어있는 형태를 볼 수 있었다. 그림 4와 그림 5의 비교를 통하여 마찰에 의해 생성되었을 정전기력의 영향보다는 강력한 자기

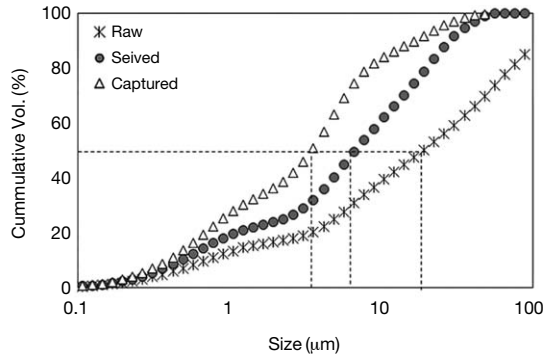


Fig. 6. Cummulative size distribution of raw, seived and captured ash dust.

장을 거치면서 입자표면에 자기력이 형성됨으로써 작은 입자들 간의 van der Waals 인력 외에 추가적인 상호 유인력이 작용되기 때문인 것으로 추정된다.

그림 6은 구체적인 입도분포를 측정된 결과이다. 초기 비산재 먼지입자는 90%가 100 μm 이하로 구성되어 있었고, 중간입경 (dp_{50})은 20 μm, PM_{10} 의 비율은 39% 이었다. 체거름한 시험용 먼지입자의 중간입경은 6.75 μm로 측정되어 원시료 먼지입자보다 크게 축소된 것으로 나타났으며, 90%가 20 μm 이하로 구성되어 미세먼지 시험에 적절한 것으로 보인다. Ferromagnetic 소재의 금속망 필터에 포집된 먼지입자의 중간입경은 3.51 μm로서 유입먼지보다 작은 입자들이 대부분이었으며, 90%가 10 μm 이하, $PM_{2.5}$ 가 약 41%로 자성여과필터에 의해 상대적으로 작은 크기의 먼지가 포집되었음을 확인하였다. 장착한 금속망눈의 크기가 0.16 mm인 것으로 미루어 큰 입자들은 관성력에 의해 유체와 함께 열린 공극을 통과하는 양이 많은 반면, 작은 입자들은 확산효과(diffusion)에 의해 자기력의 영향을 크게 받음으로써 wire 표면에 부착되어 주 흐름으로부터 분리되는 것으로 판단된다.

3. 1. 2 시험용 먼지입자의 화학적 조성

입도 분석결과, 본 실험에 사용되는 비산재 입자는 90%가 20 μm 이하의 크기로 구성되었기에 문헌연구를 토대로 자성입자를 다량 포함하고 있을 것으로 예상할 수 있다(Chaddha and Seehra, 1983). 이를 구체적으로 확인하기 위하여 실험에 사용한 비산재 입자에 대하여 EDX 분석을 실시하였으며, 표 1과 같은

Table 1. Elemental composition of test fly ash.

Element	Raw (w %)	Seived (w %)	Captured (w%)
Si	51.34	46.20	47.43
Al	26.94	22.39	21.76
Fe	6.75	8.66	12.06
Br	0.00	7.13	0.00
Ca	6.33	6.49	8.68
K	3.14	4.25	2.59
Na	2.13	2.82	2.93
Mg	2.01	1.57	2.56
S	0.13	0.19	0.00
Ti	0.10	0.10	1.04
S	1.13	0.20	0.95
Total		100	

원소 함량을 알 수 있었다.

분석결과, 기존의 연구결과에서 나타났듯이 시험용 먼지입자는 Si와 Al로 주로 구성되어 있었으며, 기타 Fe, Ca, K 등이 검출되었다. 강자성 물질로 구분되는 Ni는 검출되지 않았으며, Fe 함량은 6.75%로 나타났다. 이러한 철 성분은 시험용 먼지로 사용하기 위하여 체거름한 시료(sieved)에서는 8.66%로 증가하였다. 또한 실제로 자기장에서 분리·포집된 입자(captured)는 12.06%의 Fe를 함유하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 시료입자는 자성필터 실험에 유효함을 알 수 있고, 개별입자에 고르게 분포되어 있는 Fe에 의해 자기장 내에서 입자의 움직임에 영향을 줄 수 있다고 추정할 수 있다. 또한 본 연구에서 화학원소분석을 실시할 때, 단일 입자를 선택하지 않고, 목표 대상 입자의 폭을 가급적 넓게 지정함으로써 화학원소 분포가 포괄적으로 분석될 수 있도록 하였다. 따라서 각각의 입자에 포함된 Fe의 절대량은 확인할 수 없었지만 환경입자 포집 실험을 수행하기에는 오히려 유효한 접근 방법이라고 할 수 있다.

한편, 시험 장치로 투입되는 먼지가 함유하고 있는 철성분은 대체로 철산화물로서 maghemite-C (Fe_2O_3), hematite (Fe_2O_3)와 Fe_3O_4 의 magnetite 등의 형태로 존재한다(Cornell, 1996). 여기서 maghemite는 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 또는 $\varepsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 로 magnetite인 Fe_3O_4 와 함께 강자성물질이며, hematite는 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 형태로 존재하며, 반자성 물질이다. 따라서 본 시료가 실험에 적합한지를 보다 명확히 하기 위하여 XRD 분석을 통하여 Fe의 구조

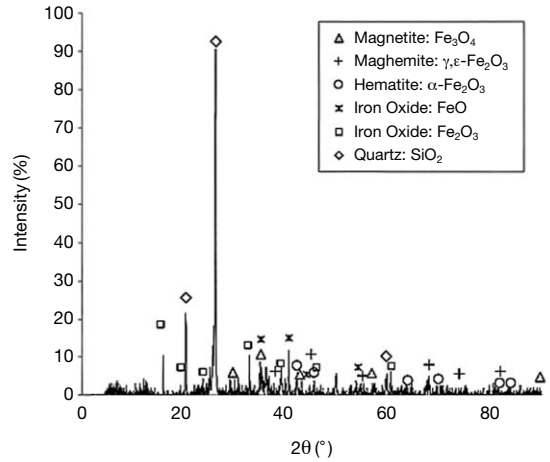


Fig. 7. XRD pattern of test fly ash dust.

를 확인하였다(그림 7 참고).

XRD 패턴에서 볼 수 있듯이 주 피크는 quartz에서 나타나지만, 철산화물 (FeO , Fe_2O_3), maghemite-C (Fe_2O_3), magnetite (Fe_3O_4)의 피크도 명확히 존재하는 것으로 미루어 자성이 매우 강한 화학종들이 먼지입자 내에 고르게 산포되어 있음을 알 수 있다. 다만, 반자성 물질인 hematite (Fe_2O_3)가 눈에 띄게 검출되었기 때문에 실제 비산재 중에는 EDX 분석에서 검출된 Fe의 함량(8.66%)보다는 다소 적은 양의 자성입자가 포함되어있다고 예상할 수 있다. 또한 hematite peak가 다른 Fe 화학종들보다 비교적 적은 양으로 존재하기 때문에 그 영향력이 상대적으로 적을 것으로 추정된다.

따라서 석탄비산재 입자는 물리적 메카니즘을 적용한 자성여과실험을 위한 시험용 먼지로서 적절할 뿐만 아니라 실제 화력발전소 현장에 자성필터를 1차 포집장치로 적용할 수 있는가에 대한 잠재적 가능성을 시험해볼 수 있을 것으로 판단된다. 특히 PM_{10} 과 같은 미세먼지입자에 다량 함유되어 있는 마그네타이트로 인하여 자기장 효과를 궁극적으로 활용하고, 검증하는 데 도움이 될 것으로 사료된다.

3.2 자기장 내에서의 먼지입자거동

영구자석으로 구성된 자기력 방출체 표면에 먼지입자가 직접 부착될 경우, 탈진조작과 자성필터체의 재생에 있어서 어려움이 예상되는 바, 본 연구에서는

Table 2. Spatial distribution of magnetic intensity in a test duct.

Condition	Intensity	Magnetic intensity [gauss]								
		Detection point								
		0	0.1	0.25	0.4	0.5	0.6	0.75	0.9	1
W/O mesh	1,650 gauss	54	27.5	1	0.5	0	0.5	1	25.5	50
	2,050 gauss	78	39.8	1.5	1.8	2	1.7	1.4	33.2	65
	2,500 gauss	78	40	2	3.5	5	3.5	2	41.5	81
	3,000 gauss	160	81.5	3	6.5	10	7	4	81.5	159
With mesh	1,650 gauss	75	38.6	2.1	1.6	1	1.3	1.5	38.25	75
	2,050 gauss	83	43.9	4.9	3.9	3	4.6	6.1	45.6	85
	2,500 gauss	101	55.5	10	7.5	5	8	11	54.5	98
	3,000 gauss	200	106.5	13	11.5	10	11.5	13	107.5	202

그림 1에서 개략적으로 도시한 바와 같이 금속망을 설치하여 간접적으로 자기력을 전달함으로써 덕트 공간에 자기장을 형성하는 구조를 제안하고 있다. 따라서 표 2에 정리한 바와 같이 네 가지 강도(1,650~3,000 Gauss)의 자석을 자성필터유닛 외부에 장착하고, 0.16 mm의 공극으로 짜여진 ferromagnetic 금속성 그물망의 삽입 전(W/O mesh)과 후(With mesh)에 대한 자기장의 공간분포를 Gauss meter를 이용하여 측정하였다. 측정위치는 필터유닛의 가로, 세로 길이를 1로 기준으로하여 세로 0.5, 가로 0~1 지점으로 구분하여 mesh표면에 측정 probe를 접촉시켜 측정하였다. 그 결과 금속망 필터를 삽입하기 전에는 자석이 직접 접촉하는 경계부분인 0과 1 지점에서는 최대 160 gauss로 측정되었으나 중앙으로 갈수록 자기장의 강도가 눈에 띄게 감소하는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 금속망 필터를 삽입한 후에는 최대 202 gauss, 최소 1 gauss로 중앙부에서도 극히 낮은 수치이지만 자기장이 검출되었으며, 전반적으로 삽입전보다 높은 자기장 강도가 검출되었다. 동시에 3,000 gauss를 기준으로 한 필터유닛에 대하여 수치해석(Comsol multiphysics 4.0)을 실시하여 자기장 분포형태를 계산하여 도출된 결과를 그림 8에 도시하였다.

그림 8은 외부에 장착된 자석으로부터 자기력이 전달됨으로써 wire와 금속망 주변에 형성되는 자기장을 형상화한 시뮬레이션 결과이다. 필터유닛에 장착한 영구자석이 필터유닛 외부에 부착되는 형태이기 때문에 필터유닛의 외곽으로 이동할수록 보다 고밀도의 자기장이 형성되었으며, 중앙부에서는 그 강도가 감소하였다. 또한 N극에서 S극을 향하여 자기장이 형성되는 과정에서 금속망 선(metal wire)을 따라

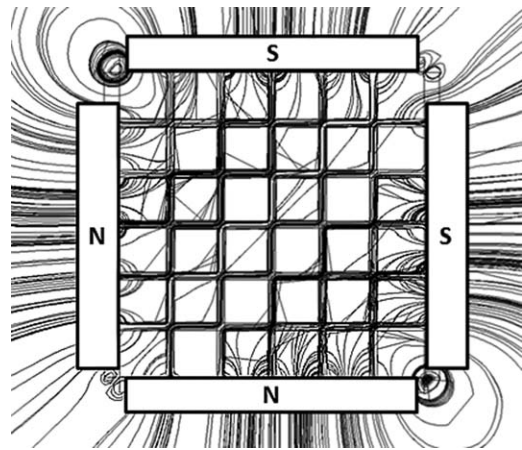


Fig. 8. Density distribution of magnetic flux in the metal grid.

자기력이 이동하면서 증첩되는 일부 구간에서 wire 자체의 자기장 강도는 외부 영구자석의 3,000 gauss 보다 높은 자력을 띄는 것도 고찰되었다. Wire와 wire 사이의 열린 공간에서 형성되는 자기장은 중앙부에서는 외부자석의 영향이 감소하여 자기장 강도가 감소하지만, 정 중앙에서는 자화된 금속망의 영향으로 극소량 증가하는 자기장강도 변화를 보였다. 그림 8의 자기장 분포로부터 각각의 위치별 강도를 수치로 읽어 표 2의 측정 위치별로 도시해보았다(그림 9 참조). 즉, 그림 8의 이론적 예측치를 CFD (computer fluid dynamics) 값으로 도시하였고, 측정 위치별 자기장의 강도를 자석의 강도에 따라 도시하여 비교한 결과, 정확한 절대값은 다르지만 수치해석을 통한 예측치와 실제 측정결과가 동일한 경향을 보임을 확인하

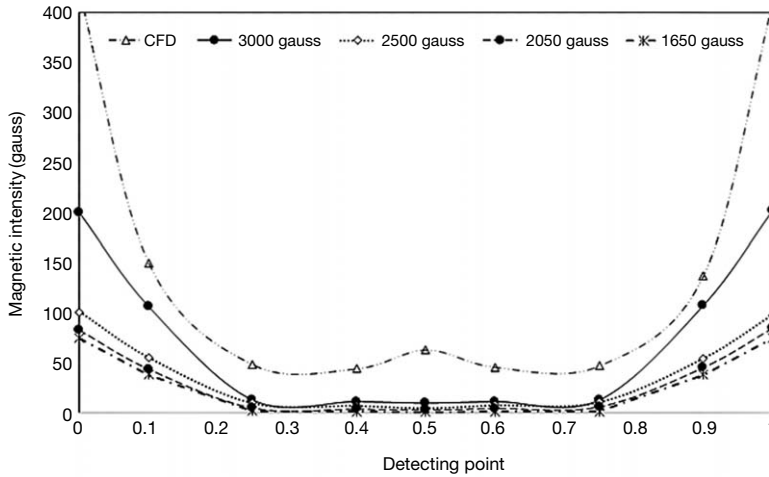


Fig. 9. Compare of magnetic intensity on filter unit.

였다. 이론적 계산값보다 실제 측정치가 다소 낮았음을 알 수 있다.

3.3 미세먼지 포집효율 고찰

그림 1에 도시한 형태의 실험 모듈에 비산재 먼지를 일정량 공급 한 후, 1.5 m/s의 유속으로 1시간 이상 순환시키면서 먼지입자의 시험장치 내벽부착, air blower 내부에서의 손실, 사영역침강 등과 같은 자성 필터 외의 농도감소가 발생하지 않도록 먼지입자의 농도분포를 충분히 안정화시킨 후, 실험을 진행하였다. 그리고 장치 내 공기흐름에서 간헐적으로 채취한 먼지입자의 농도가 일정해 진 것을 1시간 동안 확인한 후 평형상태를 유지하여 더이상의 농도감소가 발생하지 않음을 확인하였다(약 14 g/m³). 금속망 필터를 장착하여 덕트 내부에 자기장을 형성시키면서 미세먼지 포집효율을 측정하였다. 실험시간에 따른 포집결과는 그림 10과 같다. 즉, 자석이 외부에 장착되어 덕트 내부 mesh에 자기력이 전달되기 시작한 초기에는 기체흐름 내 입자의 농도가 급격히 감소하면서 다량 포집되고 있음을 알 수 있었다. 그러나 여과 시험 시작 10~15분 후부터 입자 농도의 감소폭이 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 보다 면밀하게 살펴보면, 본 실험장치의 총 부피와 실험유속 1.5 m/s를 고려하여 필터유닛 투과횟수를 계산하면 1시간동안 약 3600회의 투과순환이 이루어졌음을 알 수 있다. 전체 여과시간에 대한 총괄효율로부터 시간에 따른

평균 포집효율을 산정하여 보면 약 0.18%/min의 낮은 포집효율을 확인할 수 있었다. 그러나 초기 10~15분 구간에서 대부분의 자성입자가 포집되는 것으로 미루어, 여과초기에 대하여 재계산하여 보면 10.2%/min의 포집율이 얻어졌다. 따라서 실제 측정값으로 단위시간당의 포집효율을 측정할 경우에는 3,000 gauss에서는 첫 1분간의 여과 운전에서는 35%, 2분부터는 23%, 3분은 10%로 최저 4%까지 점차 감소하면서 변화되는 것을 알 수 있다. 이는 초기에 많은 양의 먼지입자가 wire의 자기력에 의해 포집되지만 시간이 갈수록 mesh wire 표면에 먼지입자가 쌓이면서 자기장의 강도가 약해지고, 입자에 전달되는 자기력이 저하되는 것으로 판단된다. 또한 Fe 성분을 다량 함유하고 있는 입자들이 초기에 주로 wire에 부착되는 반면, 상대적으로 자성 성분을 적게 포함하고 있는 잔여입자들은 금속망 체눈의 공간에 조성되는 자기장의 영향을 덜 받으면서 덕트 내부를 순환하는 것으로 추정되었다.

그림 10에 비교한 필터유닛의 자석강도에 대한 영향을 고찰해보면, 자기장이 형성되어 있지 않을 때 (W/O)는 매우 불안정한 입자 포집효과를 보여주고 있는 바, 초기 부착된 입자들이 기체흐름의 drag에 의해 재비산하는 경우가 있는 것으로 추정된다. 이러한 후속적인 유체흐름에 의한 입자 재비산 양은 일정한 형태를 이루고 있지 않기 때문에 정확히 정량화하기는 어려운 것으로 보인다. 자석의 강도에 따른

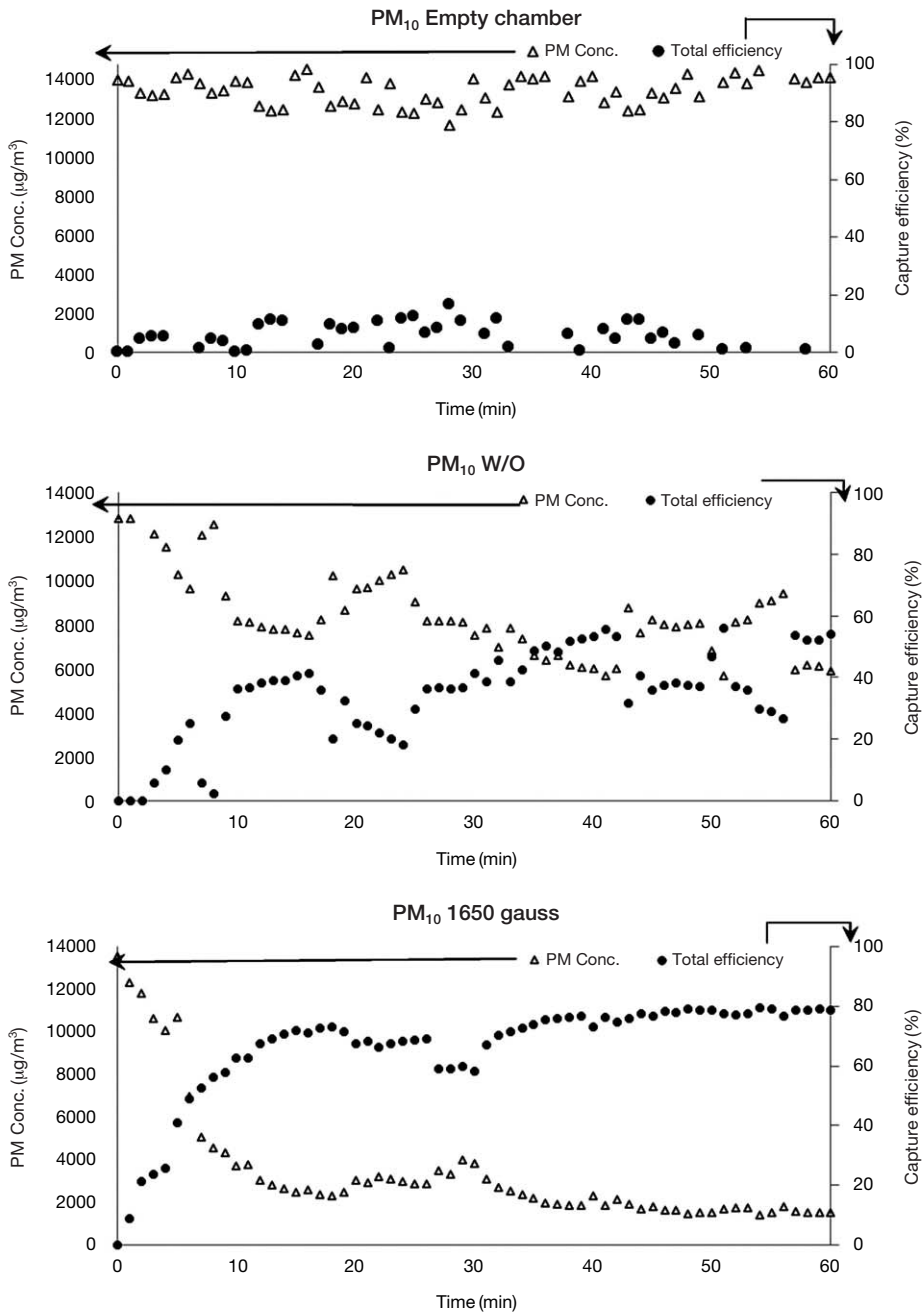


Fig. 10. Magnetic capture of test dust; PM₁₀ and PM_{2.5} in terms of magnetic intensity.

입자포집 효과 변화는 다음과 같았다. 가장 약한 강도인 1,650 gauss의 자석에 대하여는 상대적인 입자 포집효율 상승량이 20~25% 정도였으나, 2,050 gauss

에서는 35%, 2,500 gauss는 37%, 3,000 gauss의 경우에는 최대 40%의 효율증가가 나타나 PM₁₀에 대하여 최고 95%의 포집효율을 얻을 수 있었다. 이러한

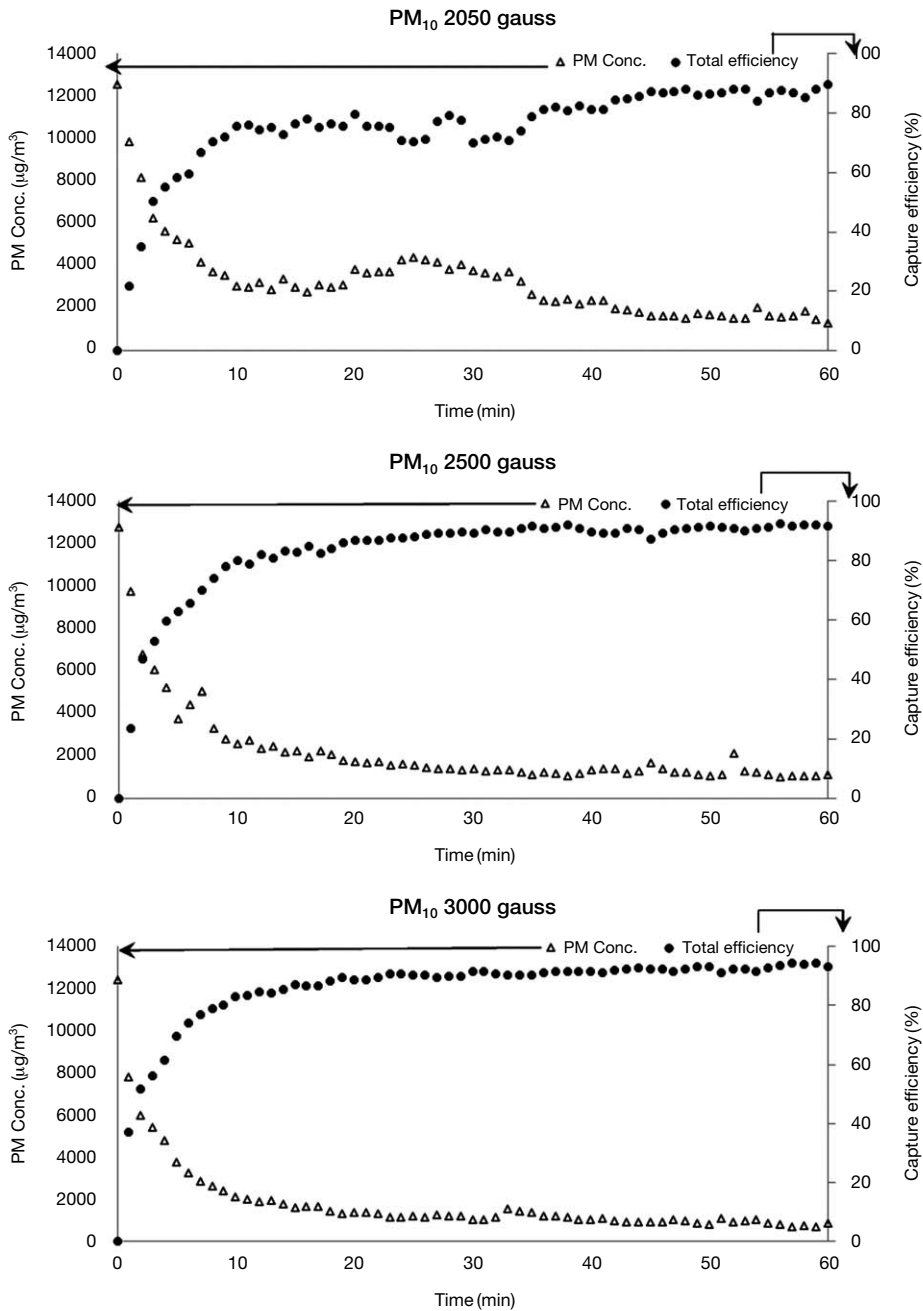


Fig. 10. Continued.

자석 강도의 영향은 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대하여도 유사한 형태의 변화량을 고찰하였다.

본 필터유닛에 의한 압력강하(ΔP) 값은 포집 시작

시 14 pa, 포집 종료 시 최대 15 pa로 포집되는 입자량이 증가함에도 불구하고 압력강하는 크게 상승하지 않았다. 이는 입자가 그림 11과 같이 mesh wire

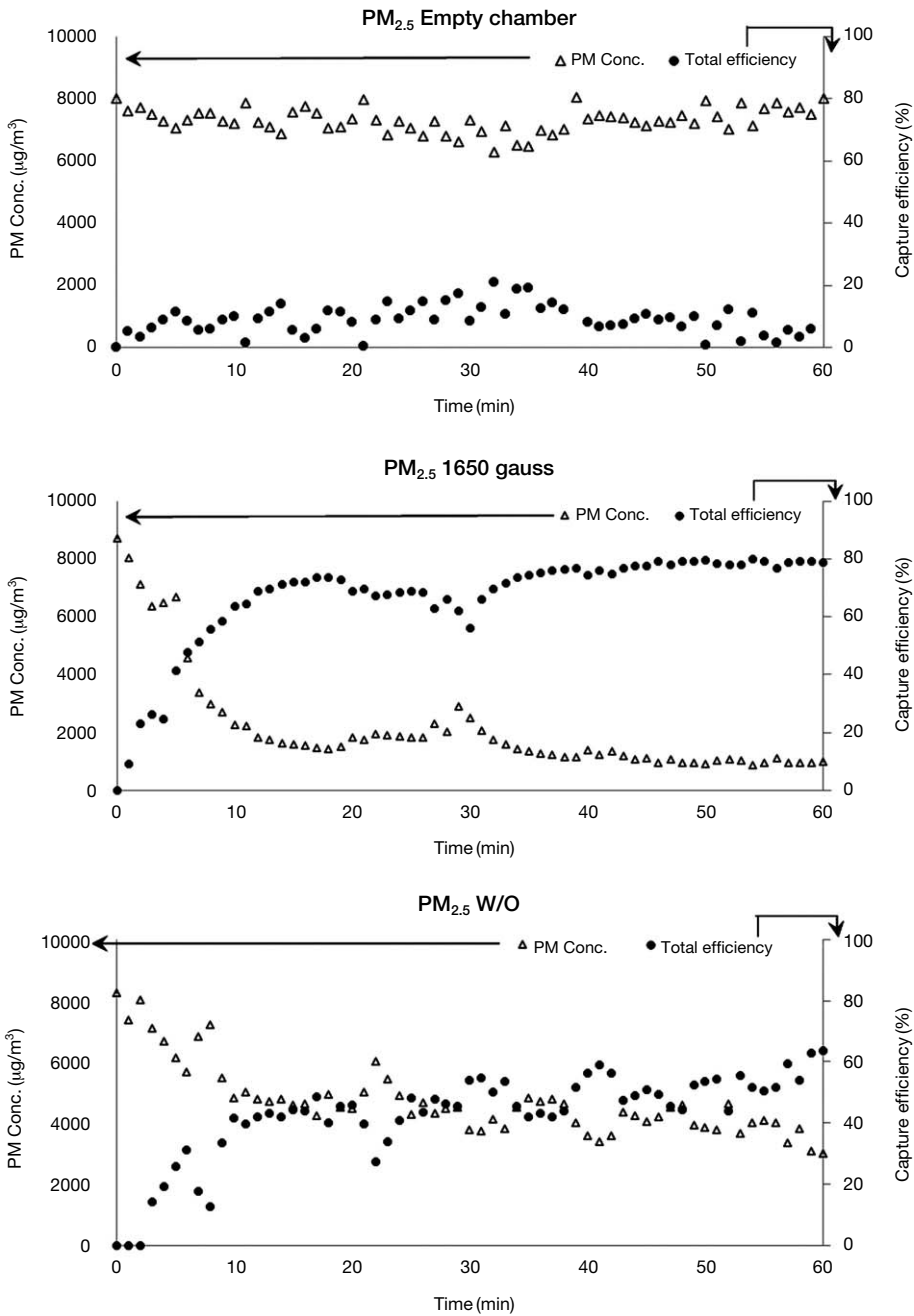


Fig. 10. Continued.

표면에서 자성부착이 주로 이루어지기 때문에 일반적인 섬유필터 등에서 발생하는 dust cake 층이 생성되지 않아 공극이 축소되지 않으며, 유체저항이 증가

하지 않기 때문인 것으로 보인다.

그림 12는 총 비산재 먼지 총괄포집효율로서 포집 시작 후 1시간이 경과하였을 때의 미세먼지 농도값

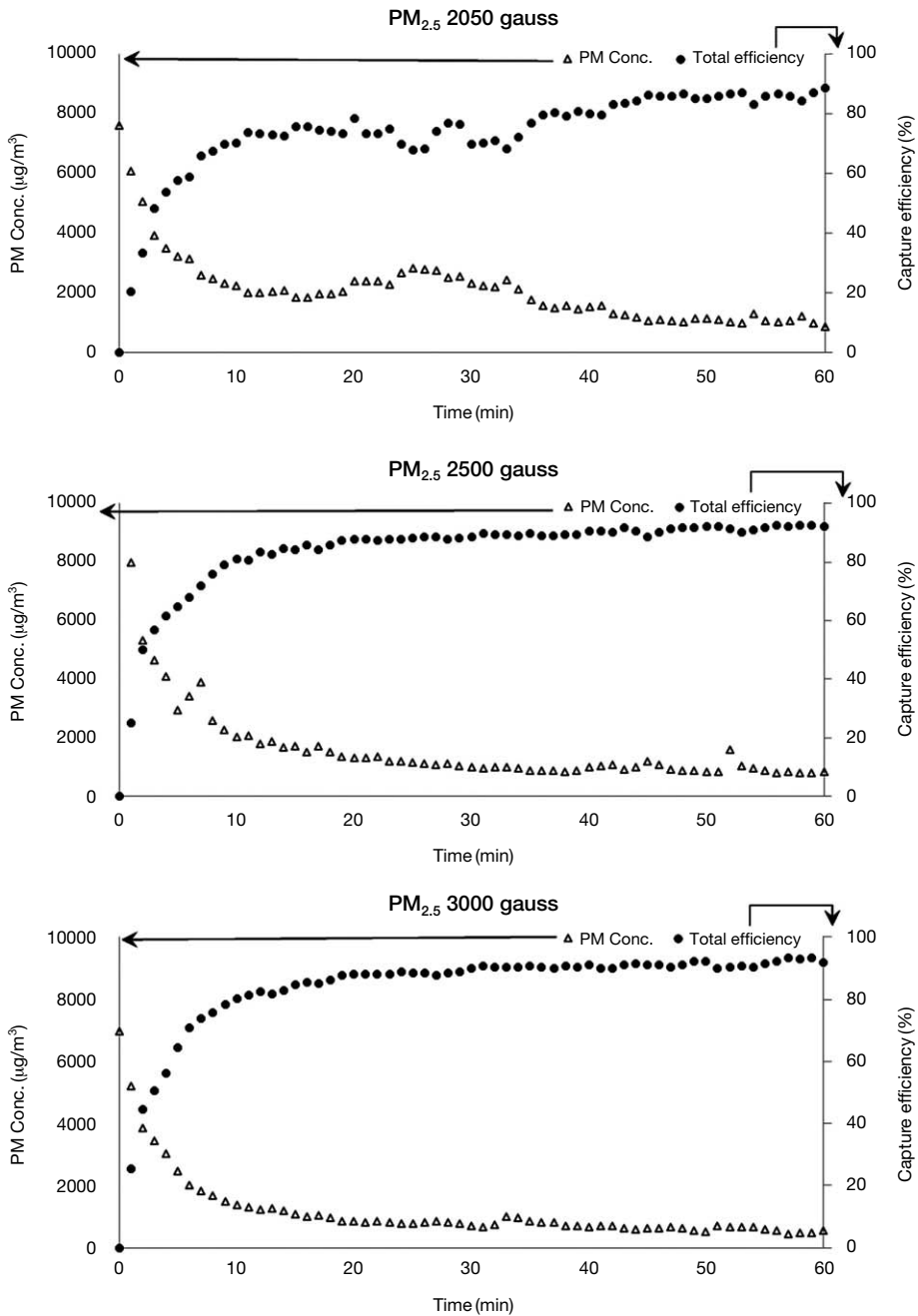


Fig. 10. Continued.

을 측정하여 얻은 결과이다. 자석 강도에 따라 PM_{2.5}와 PM₁₀의 포집효율이 동시에 비례적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 무엇보다 PM_{2.5}의 포집효율이

PM₁₀과 견줄만한 결과가 나타난 것이 특이하다. 최종적으로 포집된 먼지입자의 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 상대적인 값은 그림 13에서와 같이 포집된 PM₁₀ 중

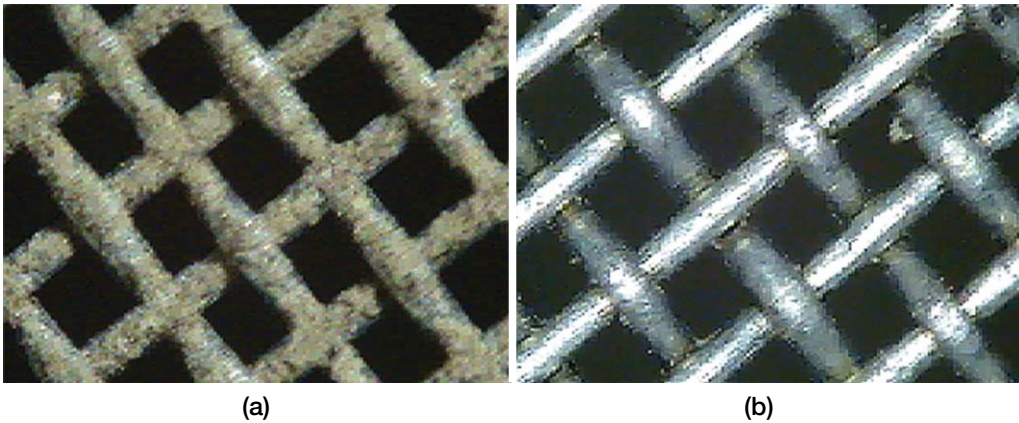


Fig. 11. Metal mesh with captured particles (a) upflow side, (b) downflow side.

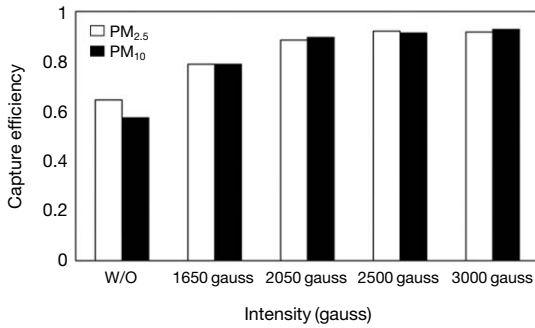


Fig. 12. Overall capture efficiency of test dust with magnetic intensity.

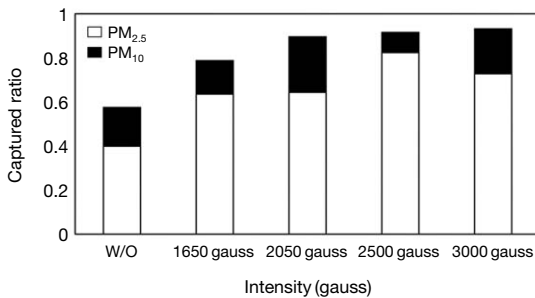


Fig. 13. Relative ratio of captured particles of PM_{2.5} & PM₁₀.

최소 69.46%, 최고 90.16%가 PM_{2.5}에 해당되었다. 이를 통하여 PM_{2.5}와 같이 초미세먼지 제어에 있어서 자기장을 활용하는 도구가 일정 부분 효과적으로

작용함을 알 수 있었다.

4. 결 론

화력발전소로부터 발생된 비산재 입자의 특성을 분석하고, 이를 이용하여 압력손실을 최소화할 수 있는 구조의 자석필터를 적용한 입자포집 실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 화력발전소로부터 채취한 비산재는 Si와 함께 Al, Fe의 금속성 물질을 포함하고, 자석필터에 포집된 비산재는 Fe 함량이 상대적으로 높게 나타났다. 또한 입자의 크기가 작을수록 더 높은 Fe의 함량비율을 보여주었는 바, 미세먼지의 자석포집 가능성을 예측해볼 수 있는 배경이다.
2. 미세먼지에 포함되어 있는, Fe는 주로 Fe₂O₃와 Fe₃O₄의 산화물 형태로 존재하였으며, 그 중에서도 강자성을 띄는 maghemite-C (Fe₂O₃)와 magnetite (Fe₃O₄)의 형태가 다수임을 알 수 있었다.
3. 전산수치해석을 통해 시각적으로 자성여과필터의 주변에서 자기장이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 자기장의 강도변화는 외부의 자석과 근접할수록 높게 나타났고, 중심부에서는 중첩효과에 의해 소폭 증가하는 경향을 보였다. 이는 실제 필터유닛에서 측정된 자기력의 세기와 동일한 경향이었던 바, 본 연구와 유사한 자성여과장치를 설계할 때 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.
4. 포집되는 비산재의 양은 영구자석의 강도에 따라

다르지만 3,000 gauss에서 자석필터를 구성하였을 때에는 금속망만 존재하였을 때보다 최대 40%의 효율증대를 보였고, PM₁₀에서는 95%, PM_{2.5}은 90%의 최대 포집효율을 보였을 뿐만 아니라 포집 비산재 중 최대 90.16%가 PM_{2.5}로 나타났다.

결론적으로 자성물질을 포함하는 미세먼지는 자석 필터 구성에 따라 그 효율을 극대화 시킬 수 있으며, 자기장 강도가 높을수록 보다 안정적인임을 알 수 있었다. 또한 자성을 띠는 Fe가 8.66%였음에도 불구하고 높은 효율증대를 나타냈다. 즉, 본 연구를 통하여 먼지입자의 자기적 특성을 자성여과장치의 설계조건을 도출할 수 있는 기본적인 원리를 제시한 것으로 사료된다.

감사의 글

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

References

- Alvaroa, A., J.M. Rodriguez, P.A. Augusto, and A.M. Estévez (2007) Magnetic filtration of an iron oxide aerosol by means of magnetizable grates, *China PART.*, 5, 140-144.
- Chaddha, G. and S.S. Mohindar (1983) Magnetic components and particle size distribution of coal fly ash, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 16, 1767-1776.
- Cornell, R.M. (1996) *The iron oxides Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Uses*, U. Schwertmann, VCH, 29-32.
- Gokon, N., A. Shimada, N. Hasegawa, H. Kaneko, Y. Tamaura, K. Ito, and T. Ohara (2002) The magnetic coagulation reaction between paramagnetic particles and iron ions coprecipitates. *J. Magn. Magn. Mater.*, 246, 275-282.
- Gooding, C.H. and R.M. Felder (1981) High Gradient Magnetic Filtration of Fine Particles from a Gas Stream, *J. of QAICHE*, 27(2), 193-202.
- Ha, D.W., T.H. Kim, S.S. Oh, H.S. Ha, S.K. Park, S.G. Lee, and Y.M. Roh (2006) Study on magnetic separation of wastewater using superconducting magnet, *J. KIEEME*, 7, 87-88.
- Jang, S.K., D.I. Choi, C.H. Lim, and J.S. Lee (2000) Chemical Analysis of Fly Ashes from Municipal Solid Waste Incinerators, *JAST*, 13(2), 215-221. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.B., W.K. Lee, and Y.J. Shim (2000) A Basic Study on the Effective Management for MSWI Fly Ash (II) - Effect of leaching Parameter-, *J. of KSEE*, 22(7), 1357-1364. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.M. and Y.M. Jo (2008) Assessment of Dust Filters by Filter Quality, *Powder Technol.*, 185, 187-194.
- Lee, S.S., K.Y. Kim, K.K. Oh, J.M. Jeon, and D.C. Kang (2013) Reaction Characteristics of Elemental and Oxidized Mercury with Fly Ash Components. *Clean Technol.*, 19(4), 453-458. (in Korean with English abstract)
- Lee, W.K., J.S. Kim, and J.B. Kim (1998) Fractionation and leaching properties of heavy metals in Fly Ashes from three MSW incinerators. *J. of KSEE*, 20(3), 421-432. (in Korean with English abstract)
- Menzel, K., C.W. Windt, A.J.A. Lindner, A. Michel, and H. Nirschl (2013) Dipolar openable halbach magnet design for high-gradient magnetic filtration, *Sep. Purif. Technol.*, 105, 114-120.
- Park, H.W. and Y.M. Jo (2013) Regulation Standard of Fine Particles and Control Techniques of Emission Sources, *J. KOSAE*, 29(4), 486-503. (in Korean with English abstract)
- Park, T.K. and J.B. Kim (1999) Study on the Evaluation of leaching properties of heavy metals in fly ashes discharged from several combustion, *J. Korea Soc. Environ. Adm.*, 5(1), 51-59.
- Shoumkova, A.S. (2011) Magnetic separation of coal fly ash from Bulgarian power plants, *Waste Manage. Res.*, Oct., 29(10), 1078-1089.
- Suh, H.S., H.C. Shin, and Y.S. Yoo (2005) Separation Between Soil Particles and Magnetic Beads by Magnetic Force, *J. KMS*, 15(2), 76-80.
- Svoboda, J. (1994) The effect of magnetic field strength on the efficiency of magnetic separation. *Miner. Eng.*, 7, 747-757.
- Yiacoumi, S., D.A. Rountree, and C. Tsouris (1996) Mechanism of particle Flocculation by magnetic seeding, *J. Colloid Interf. Sci.*, 184(2), 477-488.
- Yoon, H.S., C.J. Kim, J.L. Lee, S.D. Kim, J.S. Kim, and J.C. Lee (2003) Separation of Neodymium from NdEeB Permanent Magnetic Scrap, *J. Korean Inst. Resour. Recycl.*, 12(6), 57-63. (in Korean with English abstract)