

브레이크 마모입자의 하전 및 자성 특성 분석

조채연^{1),3)} · 신동호¹⁾ · 이건희¹⁾ · 우상희²⁾ · 이석환²⁾ · 한방우^{1)*} · 황정호^{3)*}

¹⁾한국기계연구원 지속가능환경연구실

²⁾한국기계연구원 모빌리티동력연구실

³⁾연세대학교 기계공학부

(투고 2023년 04월 25일, 수정 2023년 05월 30일, 게재확정 2023년 06월 05일)

Analysis of charge and magnetic characteristics of brake wear particles

Chaeyeon Jo^{1),3)}, Dongho Shin¹⁾, Gunhee Lee¹⁾, Sang-Hee Woo²⁾, Seokhwan Lee²⁾,
Bangwoo Han^{1)*}, Junggho Hwang^{3)*}

¹⁾Department of Sustainable Environment Research, Korea Institute of Machinery & Materials

²⁾Department of Mobility Power Research, Korea Institute of Machinery & Materials

³⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

(Received April 25 2023; Revised May 30 2023; Accepted June 05 2023)

Abstract

The charge and magnetic characteristics of LM (Low-metallic) and NAO (Non-asbestos-organic) brake wear particles were analyzed. The ratio of charged particles from total particles is about 86% of the LM pad and about 92% of the NAO pad. Number of charge per particle from the NAO pad is also higher than that of the LM pad. The ratio of magnetic particles from total particles increases with the particle size. The ratio of magnetic particles from the LM pad is about 15% for the particles with the size of 1 μm , and about 74% for ones with 5 μm . The ratio from the NAO pad is about 5% for the particles with the size from 0.5 μm to 2 μm , and about 80% for the particles with 5 μm . Through the analysis of the components of the two pads with SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), it was found that the LM pad was occupied with more iron fraction than the NAO pad and that PM_{2.5-10} was occupied with more iron fraction than PM_{2.5}. The particles smaller than 10 μm (i.e. PM₁₀) from the LM pad contained about 83% of charged particles, about 43% of magnetic particles, and about 93% of charged or magnetic particles. PM₁₀ from the NAO pad contained about 88% of charged particles, about 15% of magnetic particles, and about 89% of charged or magnetic particles.

Keywords: brake wear particles, electrostatic precipitator, magnetic collector, APS, SEM-EDS

* Corresponding authors.

Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284 (B. Han), Tel : +82-2-2123-2821, Fax : +82-2-312-2821 (J. Hwang)
E-mail : bhan@kimm.re.kr (B. Han), hwangjh@yonsei.ac.kr (J. Hwang)

1. 서론

도심 속 미세먼지 발생원으로는 도로이동오염원, 에너지 산업 연소, 제조업 연소 등이 있다. 환경부 수도권 대기환경청에서 공시한 자료에 따르면 2013년 수도권 PM₁₀ 배출량의 약 41%를 도로이동오염원이 차지하고 있는 것으로 보고되고 있다. 한편 도로이동오염원은 배기계와 비배기계 미세먼지로 나눌 수 있다. 배기계 미세먼지는 엔진 연소에 의해 배출되는 미세먼지로 과거에는 도로이동오염원의 주원인이었고 이를 저감하기 위한 연구가 다양하게 수행되었다(Rissler et al. 2012; Amato et al. 2009; Buckeridge et al. 2002). 현재는 차량 제조 시 DPF(Diesel Particulate Filter) 등의 후처리 장치 개발로 인해 배기계보다 비배기계 미세먼지가 더 많은 비중을 차지하고 있다(Lawrence et al. 2016; Amato et al. 2014; Denier van der Gon et al. 2013; Pant and Harrison 2013). 도로에서 발생하는 비배기계 미세먼지 중 약 55%가 브레이크 마모먼지인 것으로 알려지고 있다(Harrison et al. 2012). 이에 도심 교통 환경에서 발생하는 미세먼지를 줄이기 위해서는 브레이크 마모먼지 저감에 대한 연구가 필요하다.

현재까지 연구되고 있는 브레이크 마모먼지 저감장치는 필터 방식과 사이클론 방식이 있다. 필터 방식의 경우 입자를 포집하기 위해서 높은 차압을 극복할 수 있는 송풍팬을 사용해야한다. 이때 송풍팬을 사용하면 팬을 설치하기 위한 공간이 필요하고, 필터의 주기적으로 교체가 필요하다(Hascot and Adamczak 2020). 사이클론 방식의 경우 입자의 원심력을 통해 입자를 포집하기에 약 2.5 μm 이하의 초미세먼지를 집진하기 어려운 문제가 있다(Hwang and Lee 2021). 이에 위와 같은 단점들을 해결할 수 있는 새로운 형태의 집진 방식이 필요하다.

브레이크 발생 미세먼지는 주로 자동차 제동 시 브레이크 디스크와 패드의 마모로 인해 발생한다(Grigoratos and Martini 2015). 서로 다른 재질의 물체가 마찰을 일으킬 때 마찰하전이 일어난다. 브레이크 마모먼지 역시 재질이 다른 디스크와 브레이크 패드 간의 마찰로 인해 발생하므로 배출되는 마모먼지는 마찰 하전에 의한 전기적인 성질을 띠고 있을 것으로 판단하였다. 또한 브레이크 패드는 제동 시 높은 마찰계수를 갖기 위해 철 성분이 많이 함유되어있다(Peng et al. 2017; Stadler et al. 2007). 이를 통해 브레이크

마모먼지에 자력으로 포집 가능한 입자가 다수 포함되어 있을 것으로 판단하였다. 이에 브레이크 마모먼지를 포집하기 위해 마찰 하전된 먼지를 포집하기 위한 전기 집진 방식과 자력으로 자성 먼지를 포집하기 위한 자석 집진 방식을 고려해볼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 브레이크 마모먼지를 정전기력이나 자력으로 포집하고자 할 때 어떤 방식이 보다 적합한지 파악하기 위해 브레이크에서 발생하는 마모먼지의 크기별 하전 및 자성 특성을 확인하고자 하였다.

2. 실험장치

브레이크 마모먼지의 하전 및 자성 특성을 확인하기 위해 전기집진기와 자석집진기를 설계하였다.

그림 1(a)는 전기집진기의 설계도면을 나타내고 있다. 브레이크 마모입자가 발생할 때 마찰에 의해 하전된 입자의 비율을 확인하고자 하전부 없이 집진부만으로 전기집진기를 구성하였다. 집진기 입구면적은 가로 135 mm, 세로 135 mm이고, 집진기의 길이는 110 mm이며 고전압판과 집진판의 간격은 4 mm이다. 집진기의 총 집진면적은 0.23 m²이다. 집진기의 설계 조건은 Deutsch Anderson 식인 아래 식 (1)을 통해 결정하였다(Hinds, William C. 1999).

$$\eta_E = 1 - \exp\left(\frac{-V_{TE}A_C}{Q}\right) \quad (1)$$

여기서 η_E 는 전기집진기의 집진효율(-), V_{TE} 는 입자의 정전기력에 의한 중단 속도(m/s), A_C 는 집진면적(m²), 그리고 Q 는 집진부 통과 유량(m³/s)을 의미한다.

그 중 V_{TE} 는 아래 식 (2)로 정의할 수 있다.

$$V_{TE} = \frac{neEC_C}{3\pi\mu d_p} \quad (2)$$

여기서 n 은 입자 하전량(-), e 는 기본 전하량(1.602 x 10⁻¹⁹ C), E 는 집진부의 전기장 세기(V/m), C_C 는 미끄럼 보정계수(-), μ 는 공기의 점성계수(1.81 x 10⁻⁵ kg/(m·s), 상온조건), 그리고 d_p 는 입자의 직경(m)이다. 이를 통해 집진판 사이에 6 kV 인가 시 1 m/s 유속 조건에서 0.3 μm 입자에 전자가 하나 붙었을 때 집진효율이 99% 이상 나오도록 설계하였다. 이때 입자의

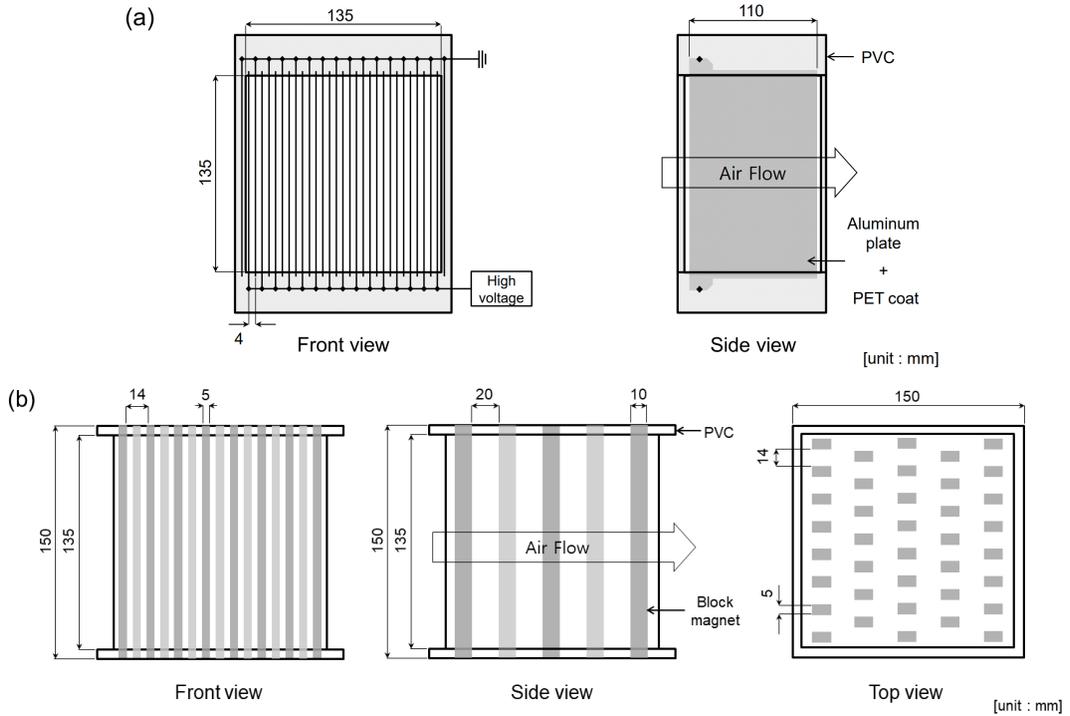


Figure 1. Design of (a) the electrostatic precipitator and (b) the magnetic collector in this study.

C_C 는 1.59, 입자의 정전기력에 의한 종단속도는 2.9×10^{-1} m/s 이다. 하전입자를 99% 이상 포집할 수 있도록 설계된 집진기를 사용하여 하전부 없이 브레이크 패드 마모입자 중 마찰에 의해 하전입자가 얼마나 존재하는지에 대해 알아보았다.

고전압판과 집진판의 재질은 전도성이면서 상대적으로 가벼운 알루미늄을 사용했다. 또한 알루미늄에 PET (Polyethylene terephthalate) 코팅을 통해 절연을 강화함으로써 좁은 집진판 간격에도 높은 전압을 인가할 수 있도록 하였다(Mo et al. 2020). 전기집진기의 외곽 틀은 절연이 가능하면서 내구성을 갖춘 PVC (Poly vinyl chloride)로 만들었다. 설계한 전기집진기 내 유속은 실험 조건과 동일하게 설정하였고 그때 집진기로 인해 발생하는 차압은 3.1 Pa 이다.

그림 1(b)는 자석집진기의 설계도면을 나타내고 있다. 실험에 사용한 자석은 N35등급의 네오디뮴 자석으로서 12080 gauss의 자기장의 세기를 갖고 있다. 자석의 크기는 가로 10 mm, 세로 5 mm, 높이 150 mm 이다. 자석 간의 간격은 가로 20 mm, 세로 14 mm로

정하였다. 자석집진기의 자석 간의 간격은 입자가 자기장 안에서 자성을 통해 이동하는 시간과 유동을 따라 통과하려는 시간의 비를 이용하여 정하였다. 두 시간의 비를 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{t_{Magnet}}{t_{flow}} = \frac{\frac{y}{V_{Magnet}}}{\frac{x}{V_{Flow}}} = \frac{y \times V_{Flow}}{x \times V_{Magnet}} < 1 \quad (3)$$

여기서 t_{Magnet} 은 입자가 자석으로 도달하는데 걸리는 시간(s), t_{Flow} 는 입자가 유동을 따라 자석을 통과하는 시간(s), x 는 자석의 세로 길이(m), y 는 입자에서 자석까지 거리(m), V_{Magnet} 은 자성에 의해 입자가 자석으로 이동하는 종단속도(m/s), 그리고 V_{Flow} 는 자석을 통과하는 입자의 속도(m/s)이다. 입자가 자석으로 이동하는데 걸리는 시간이 자석을 통과하는 시간보다 작다면 입자가 자석에 포집이 된다고 가정하였다.

V_{Magnet} 는 자기력과 항력의 관계를 이용하여 정의할 수

있고, 이를 식 (4)에 나타냈다.

$$V_{Magnet} = \frac{F_{Magnet} \times C_C}{3\pi\mu d_p} \quad (4)$$

여기서 F_{Magnet} 은 자기력이고 이는 아래 식 (5)를 통해 정의할 수 있다(Park, 2019).

$$F = \frac{A \times B^2}{2 \times \mu} = \frac{\pi \times d_p^2}{8 \times \mu} \times B^2 \quad (5)$$

여기서 A 는 입자의 단면적(m^2), B 는 입자와 자석 간의 거리에 따른 자속밀도($N/(A \cdot m)$)이다. 실험에 사용한 자석은 직육면체로 B 는 식 (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$B = \frac{B_r}{\pi} \left[\arctan\left(\frac{L \times W}{2z\sqrt{4z^2 + L^2 + W^2}}\right) - \arctan\left(\frac{L \times W}{2(D+z)\sqrt{4(D+z)^2 + L^2 + W^2}}\right) \right] \quad (6)$$

여기서 B_r 은 자석의 자석밀도로서 N35 네오디뮴 자석의 자석밀도인 1.208 T(=12080 gauss)를 사용하였고, z 는 입자와 자석 간의 거리(m), L 은 자석의 높이(m), W 는 자석의 세로 길이(m) 그리고 D 는 자석의 가로 길이(m)이다. 이를 통해 식 (4)의 V_{Magnet} 을 계산할 수 있고, 이를 바탕으로 식 (3)의 y 를 정할 수 있다. 설계한 자석집진기의 조건인 자석의 세로길이의 반(x)인 5 mm와 자석 간의 거리인 14의 반(y)인 7 mm를 통해 입자가 자석을 통과하는 시간(t_{Flow})는 0.005 sec, 입자가 자석에 붙는 시간(t_{Magnet})은 0.00027 sec을 알아낼 수 있다. 입자가 자석을 통과하는 시간보다 입자가 자석에 붙는 시간이 더 짧기에 설계한 조건에서 자석입자가 99% 이상 집진될 것이라 예상할 수 있다. 이때 입자가 자석을 통과하는 속도(V_{Flow})는 1 m/s이고, 입자의 크기(d_p)가 1 μm 이며 실험에 사용한 자석의 입자와 자석 간의 거리에 따른 자속밀도(B)는 0.42 N/(A·m), 자기력(F_{Magnet})은 3.8×10^{-9} N, 자성에 의해 입자가 자석으로 이동하는 종단속도(V_{Magnet})는 26 m/s 이다. 설계한 자석집진기 내 유속은 실험 조건과 동일하게 설정하였고 그때 집진기로 인해 발생하는 차압은 3.2 Pa 이다.

그림 2는 실험장치의 구성도를 나타내고 있다. 브레이크의 운전 및 제동에는 브레이크 동력계(BDM220, NEOPPLUS, Korea)를 사용하였다. 브레이크 동력계는 280 kg의 회전축을 통해 50.4 kg·m²의 관성 모멘트를 모사하여 실제 차량이 주행할 때의 관성 영향을 반영하였다. 디스크의 9시 방향에 브레이크 캘리퍼를 위치시켰고, 캘리퍼 안에 브레이크 패드를 장착하여 브레이크 제동 시 마모 입자를 발생시켰다. 디스크와 브레이크 패드를 감싸는 원형 챔버는 지름 600 mm이다. 원형챔버의 공기 유입구에 HEPA (High Efficiency Particulate Air)필터를 설치하여 원형 챔버 내 깨끗한 공기만 유입되도록 하였다. 원형 챔버의 출구는 직경이 150 mm이고, 재질이 stainless steel인 원형덕트를 설치하여 발생된 입자가 빠져나가도록 하였다. 원형덕트 입구쪽에 다공판을 설치하여 유동을 최대한 균일한 상태로 만들어 주었다. 다공판 후단에는 브레이크 패드 마모 입자를 제거하기 위한 두 종류의 집진기를 설치하였다. 그리고 집진기의 전후로 샘플링 포트를 설치하여 집진기 포집 전후의 입자를 샘플링하였다. 입자 측정에는 브레이크 마모 시 발생하는 먼지의 대부분의 중량을 차지하고 있는 마이크로급 크기의 입자를 대상으로 측정이 가능한 Aerodynamic particle sizer (APS, 3321, TSI, USA)를 사용하였다. 또한 Woo et al. (2020)에 의하면 브레이크 패드 마모입자 측정 시 중량법 대비 APS가 가장 유사하게 측정된다. APS의 흡입 유량은 5 L/min으로 ¼ inch의 샘플링 관을 사용하여 등속흡입 샘플링 조건을 만족하였다. 블로잉 팬을 원형 덕트 출구 쪽에 설치하여 유동을 만들어 주었고, Debimo blade형 유속계(CP210, KIMO, France)를 사용하여 유속을 측정하였고, 실험 유속은 1 m/s로 유지하였다. 브레이크 동력계에서 모터의 동력전달을 멈추면 회전축에 연결된 추에 의해 디스크에는 계속 회전하고자 하는 관성 모멘트가 발생한다. 이때 마스터 실린더를 통해 유압이 패드에 전달되어 패드와 디스크가 접촉하면 디스크는 멈추게 된다. 이를 통해 브레이크 마모 입자는 디스크와 패드 간의 마찰로 인해 발생된다. 브레이크 패드에 작용하는 압력은 20 bar로 고정하였고, 디스크의 회전수는 319 rpm 조건으로 수행하였다. 실험에 사용한 디스크는 현대 코나 자동차용으로서 타이어 지름은 664 mm이므로 이때 자동차 시속은 40 km/h에 해당한다.

실험에 사용한 디스크는 주철 재질로서 직경이 305 mm이고, 브레이크 패드는 성분이 다른 2 종류의 LM

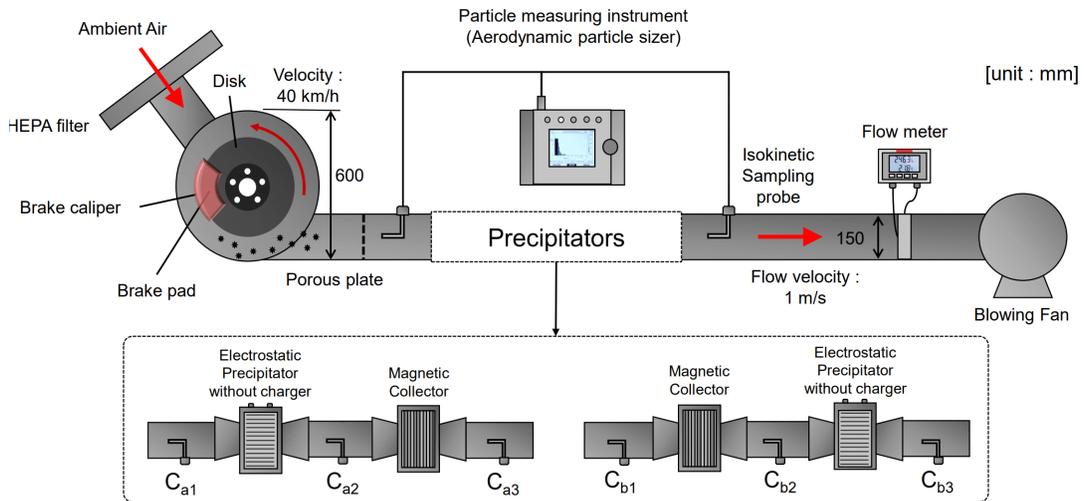


Figure 2. Experimental setup to measure the charge and magnetic ratios from brake wear particles.

(Low-metallic) 패드(HadronZR, Sangsin brake, Korea)와 NAO (Non asbestos organic) 패드(KONA pure brake pad, Hyundai mobis, Korea)를 사용하였다. LM 패드는 철 성분이 10~30% 정도 함유된 브레이크 패드로서 제동성능은 우수하지만 마모먼지 발생량이 많고, NAO 패드는 철 성분은 10% 이하로 LM 패드보다 상대적으로 적게 함유되어있고 주로 고무, 유리, 섬유와 같은 유기 재료로 구성된 패드이다. 이에 NAO 패드의 제동성능은 LM 패드에 비해 떨어지지만 마모먼지 발생량은 상대적으로 적다(Wei et al. 2019).

본 연구에서는 전기집진기와 자석집진기를 일렬로 구성하여 사용함으로써 브레이크 마모입자의 총 발생 입자 중에 전기적인 하전 비율과 자기적인 자성 비율을 알아보고자 하였다. 이때 전기집진기에 포집된 입자는 브레이크 디스크와 패드 사이에서 마찰 하전된 입자이고, 자석집진기에 포집된 입자는 철, 니켈, 코발트 등의 강자성 성분이 함유된 입자로 판단하였다. 먼저, 발생 입자가 전기집진기, 자석집진기 순으로 통과하는 실험을 진행하였다. 전기집진기의 전단 입자 농도(C_{a1})와 후단 입자 농도(C_{a2})의 차를 통해 하전입자 농도(C_{CP})를 알 수 있다. 전기집진기의 후단 입자 농도(C_{a2})와 자석집진기의 후단 입자 농도(C_{a3})의 차를 통해 비하전-자성입자 농도(C_{NCP-MP})를 알 수 있다. 두 집진기를 통과한 후 입자 농도(C_{a3})는 비하전-비자성입자

농도($C_{NCP-NMP}$)이다.

다음으로는 발생 입자가 자석집진기, 전기집진기 순으로 통과하는 실험을 진행하였다. 자석집진기의 전단 입자 농도(C_{b1})와 후단 입자 농도(C_{b2})의 차를 통해 자성입자 농도(C_{MP})를 알 수 있다. 자석집진기의 후단 입자 농도(C_{b2})와 전기집진기의 후단 입자 농도(C_{b3})의 차를 통해 비자성-하전입자 농도(C_{NMP-CP})를 알 수 있다. 두 집진기를 통과한 후 입자 농도(C_{b3})는 비자성-비하전입자 농도($C_{NMP-NCP}$)이다.

실험을 통해 직접적으로 구할 수 있는 성분 농도는 C_{CP} , C_{MP} , C_{NCP-MP} , C_{NMP-CP} , $C_{NMP-NCP}$ 이다. C_{CP} 에서 C_{NMP-CP} 를 빼면 C_{CP-MP} 를 얻을 수 있다. 마찬가지로 C_{MP} 에서 C_{NCP-MP} 를 빼면 C_{CP-MP} 를 구할 수 있는데, 초기 농도 (C_{a1} , C_{b1})가 같다면 위 두 가지 방법을 통해 얻은 C_{CP-MP} 의 농도 역시 같을 것으로 판단하였다. 이를 통해 입자의 하전 및 자성 비율을 알 수 있다.

Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS)을 이용하여 브레이크 마모먼지의 성분분석을 수행하였고, 전기집진기와 자석집진기를 통해 구한 마모 입자의 하전 및 자성 비율의 이유를 살펴보았다. 성분 분석은 Impactor (PM₁₀ Impactor, Dekati, Finland)를 이용하여 PM_{2.5}, PM_{2.5-10} 입자를 분리하여 브레이크 동력계에서 약 12시간 동안 입자를 포집하여 수행하였다.

3. 실험결과

그림 3은 하전부 없이 집진부만 갖는 전기집진기를 단독으로 사용하였을 때 입자 크기에 따른 집진효율을 나타내고 있다. 전기집진기에 전압을 2, 4, 6, 8, 10 kV로 인가하면서 입자 크기에 따른 집진효율을 측정하였고, 인가전압을 높였음에도 불구하고 집진효율이 증가하지 않는 것을 통해 하전된 입자가 모두 포집된 것으로 판단하였다.

그림 3(a)는 LM 패드의 입자 크기에 따른 집진효율을 나타내고 있다. 전기집진기에 2, 4, 6 kV 인가 시 입자 크기가 증가함에 따라 집진효율이 증가하고, 인가 전압이 높아질수록 평균 집진효율이 57, 75, 79%로 증가하였다. 8, 10 kV 인가 시를 비교할 때 인가 전압이 높아졌음에도 불구하고 평균 집진효율이 약 86%로 유사하게 나타났다.

그림 3(b)는 NAO 패드에 대한 입자크기에 따른 집진효율을 나타내고 있다. LM 패드와 마찬가지로 2, 4, 6 kV 인가 시 평균 집진효율이 61, 80, 86%로 증가하였다. 또한 8, 10 kV 인가 시를 비교할 때 인가 전압이 높아졌음에도 불구하고 평균 집진효율이 약 92%로 유사하게 나타났다.

이를 통해 하전입자를 모두 집진할 수 있는 인가전압을 확인하였고 그 때의 수렴된 집진효율을 통해 하전입자와 비하전입자의 비율을 알 수 있었다. 모든 입자크기에 대해 평균적으로 LM 패드의 경우 하전입자의 비율이 약 86%, NAO 패드의 경우 하전입자의 비율이 약 92%로 나타났다. NAO 패드의 하전입자 비율이 상대적으로 높게 나타나는 이유는 상대적으로 다른 재질의 물질이 마찰되면서 마찰 하전된 입자가 더 많이 발생했을 것으로 판단된다. 즉, 디스크의 성분인 주철과 유사한 철 성분을 상대적으로 많이 함유하고 있는 LM 패드가 NAO 패드에 비해 마찰 하전된 입자 비율이 낮게 나타난 것으로 판단된다.

그림 4는 입자의 크기에 따른 입자 하나 당 평균 하전량을 나타내고 있다. ELPI (Electric Low Pressure Impactor, Dekati, Finland)를 사용하여 입자 당 평균 하전량을 측정하였다(Marjamäki et al. 2000).

ELPI는 Impactor를 통해 크기에 따라 입자를 분류한다. 이때 측정기 입구의 하전부를 통해 입자는 각 입자 크기마다 정해진 입자 당 평균 하전량을 갖고 집진

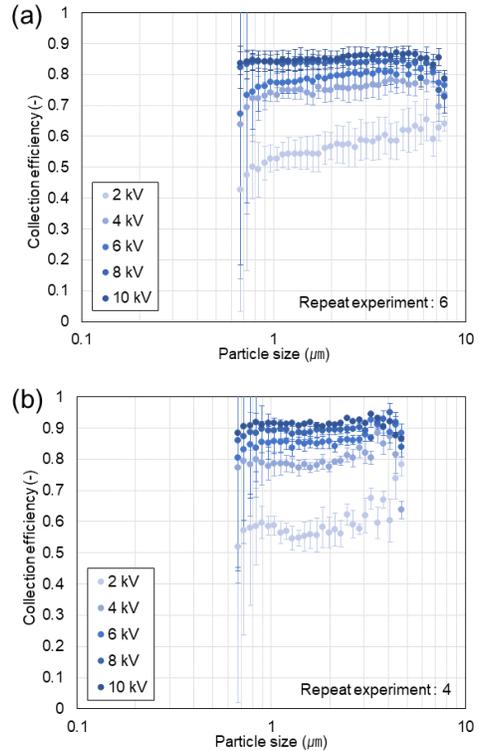


Figure 3. Collection efficiency according to the particle size in the electrostatic precipitator for (a) LM and (b) NAO pads.

판에 붙게된다. 이때 ELPI의 집지와 하전된 입자들로 인해 집진판과의 전위차를 통해 전류를 측정할 수 있다. 측정된 전류에 ELPI가 정해놓은 변수 값을 나누면 각 입자 크기별 입자의 개수농도를 측정할 수 있다. 이를 아래 식 (7)로 정리할 수 있다.

$$C_{on} = \frac{I_{on}}{P_{on}n_{on}eQ} \quad (7)$$

여기서 C_{on} 은 하전부를 컷을 때 개수농도($\#/cm^3$), I_{on} 는 하전부를 컷을 때 집진판에 측정되는 전류(A), P_{on} 는 하전부를 컷을 때 하전부의 통과률(-), n_{on} 는 하전부로 인해 정해진 입자 당 평균 하전량(-) 그리고 Q 는 ELPI의 유량(9.6 L/min)이다.

이때 하전부를 끄게된다면 입자들은 고유의 하전량을 갖고 집진판에 부착되게된다. 이를 아래 식 (8)로 정리할 수 있다.

$$C_{off} = \frac{I_{off}}{P_{off}n_{off}eQ} \quad (8)$$

여기서 C_{off} 은 하전부를 켜고 있을 때 개수농도(#/cm³), I_{off} 는 하전부를 켜고 있을 때 집진판에 측정되는 전류(A), P_{off} 는 하전부를 켜고 있을 때 하전부의 통과률(-) 그리고 n_{off} 는 입자 고유의 입자 당 평균 하전량(-)이다.

이때 들어오는 개수농도는 같기에 C_{on} 과 C_{off} 는 같으며 이를 이용하여 입자 당 하전량을 아래 식 (9)를 통해 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} n_{off} &= \frac{I_{off}}{P_{off}C_{off}eQ} = \frac{I_{off}}{P_{off}eQ} \times \frac{P_{on}n_{on}eQ}{I_{on}} \quad (9) \\ &= \frac{I_{off}}{I_{on}} \times \frac{P_{on}}{P_{off}} \times n_{on} \end{aligned}$$

각 상황의 전류는 측정할 수 있으며, P_{on} , P_{off} , n_{on} 은 ELPI가 정해놓은 변수 값이기에 입자 당 평균 하전량을 구할 수 있다.

측정한 입자 당 평균 하전량은 0.025 μm 이하의 크기에서 두 패드의 입자 하전량이 유사하게 나오지만 0.025 μm 보다 큰 입자에서는 LM 패드가 NAO 패드보다 하전량이 낮게 나오는 것을 알 수 있었다. 이는 0.03 μm 이하의 극미세 나노입자의 경우 제동 시 급격한 고온 환경에서 발생하는 핵생성(nucleation) 입자로서 마찰하전에 의해 크게 영향을 받지 않아 하전량이 낮고 유사한 것으로 판단된다(Woo et al. 2022).

그림 5는 자석집진기를 사용하였을 때 입자 크기에 따른 집진효율을 나타내고 있다. 자석의 개수를 늘려가면서 입자 크기에 따른 집진효율 변화를 살펴보고, 자석의 개수가 늘어남에도 집진효율이 증가하지 않는 지점에서 자성을 띤 입자가 모두 포집되는 것으로 판단하였다.

그림 5(a)는 LM 패드의 입자 크기에 따른 자성 집진효율을 나타내고 있다. 입자의 크기가 증가함에 따라 집진효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 자석집진기 내에 38, 76, 101 개의 자석을 사용하였을 때 자석의 개수가 늘어날수록 집진효율이 증가하였다. 한편 101, 114 개의 자석을 사용하였을 때에는 자석의 개수가 늘어남에도 불구하고 평균 집진효율이 입경 1 μm에서 15%, 5 μm에서 74%로 거의 유사하게 나타났다.

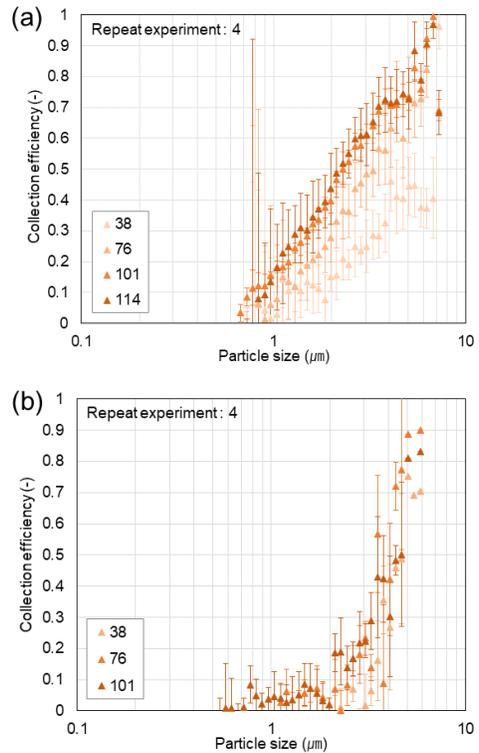


Figure 5. Collection efficiency according to the particle size in the magnetic precipitator for (a) LM and (b) NAO pads.

그림 5(b)는 NAO 패드의 입자 크기에 따른 자성 집진효율을 나타내고 있다. NAO 패드 또한 입자의 크기가 증가함에 따라 집진효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 76, 101 개의 자석을 사용하였을 때에는 자석의 개수가 늘어남에도 불구하고 평균 집진효율이 0.5 μm에서 2 μm까지는 자석집진기의 집진효율이 약 5% 이하로서 자석 효과가 거의 나타나지 않았고, 2 μm 보다 큰 입자에서는 입자 크기가 커질수록 집진효율이 증가하여 5 μm 크기에서 약 80%의 유사하게 나타났다. 이를 통해 자성입자를 모두 집진할 수 있는 자석의 개수를 확인하였고 그 때의 수렴된 집진효율을 통해 입자크기에 따른 자성 입자와 비자성 입자의 비율을 파악할 수 있었다. LM 패드의 자성입자 비율이 상대적으로 높게 나타났는데 그 이유는 브레이크 마모입자는 브레이크 패드가 마모되어 주로 발생하므로 브레이크 패드의 성분에 큰 영향을 받기

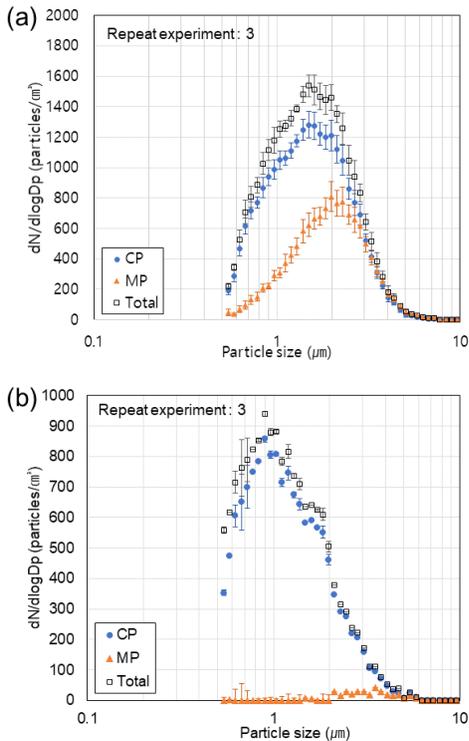


Figure 6. Particle number size distributions for (a) LM and (b) NAO pads.

때문이다. 즉, LM 패드에는 NAO 패드보다 철 입자가 많이 함유되어 있어 자성입자 발생 비율이 높은 것으로 판단된다(Grigoratos and Martini 2015).

그림 6은 LM 패드와 NAO 패드의 입자 크기에 따른 하전 입자와 자성 입자의 개수농도 분포를 보여주고 있다. LM 패드의 경우, 총 발생입자의 GMD (Geometric mean diameter)는 1.5 μm, GSD (Geometric standard deviation)는 1.96, 총 개수 농도는 3.03×10^4 개/cm³이다. 하전 입자의 GMD는 1.49 μm, GSD는 1.93이고, 자성 입자의 GMD는 1.83 μm, GSD는 1.9이다. NAO 패드의 경우, 총 발생입자의 GMD는 1.14 μm, GSD는 1.85, 총 개수 농도는 8.73×10^3 개/cm³이다. 하전 입자의 GMD는 1.16 μm, GSD는 1.82 이고, 자성 입자의 GMD는 2.36 μm, GSD는 2.0이다. 이를 통해 총 발생 입자의 경우 LM 패드가 NAO 패드보다 평균 크기가 크고 개수 농도도 높은 것을 알 수 있었다. 그리고 각 패드에 대해 총 발생 입자의 GMD는 하전 입자의 GMD와 유사하지만 자성 입자의 GMD보다는 작은 경향이 있는 것을 알 수 있었다.

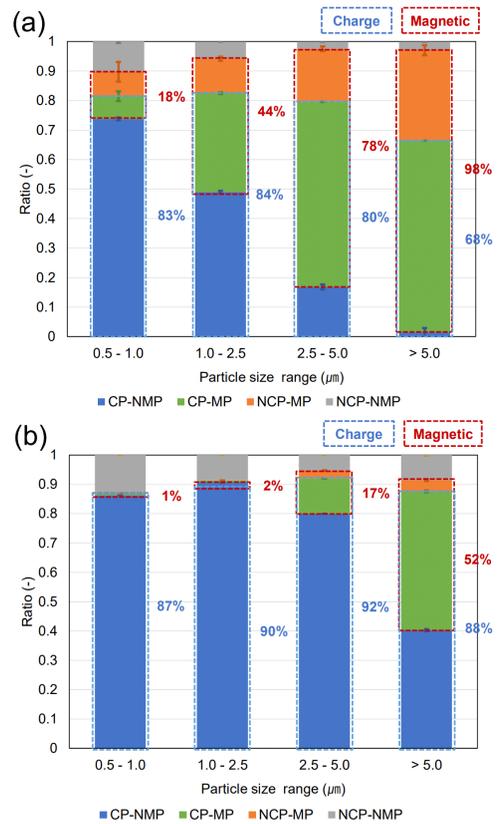


Figure 7. Ratio of magnetic and charged particles from total particles according to particle size range for (a) LM and (b) NAO pads.

그림 7은 0.5-1.0 μm, 1.0-2.5 μm, 2.5-5.0 μm, 5.0 μm 이상 입자 크기 범위에 대해 하전 및 자성 입자의 비율을 나타내고 있다. LM 패드의 경우 입자의 크기가 커질수록 하전-비자성 입자(C_{CP-NMP})의 비율은 줄어들고 하전-자성 입자(C_{CP-MP})와 비하전-자성 입자(C_{NCP-MP})의 비율은 늘어나는 것을 알 수 있다. 이를 통해 LM 패드의 하전입자는 2.5 μm 이상부터 비율이 소폭 감소하고 자성입자는 입자가 커질수록 비율이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. NAO 패드의 경우 2.5 μm 이하는 하전-비자성 입자(C_{CP-NMP})의 비율이 대부분을 차지하고 있지만 2.5 μm 이상부터는 입자의 크기가 커질수록 하전-자성 입자(C_{CP-MP}) 비율이 늘어나는 것을 알 수 있다. 그리고 비하전-자성 입자(C_{NCP-MP}) 비율은 거의 없는 것을 알 수 있다. 이를 통해 NAO 패드는 대부분 하전입자이고 비하전된 자성입자는 거의 없는 것을 알 수 있다. 하지만 5 μm 이상부터 하전입자

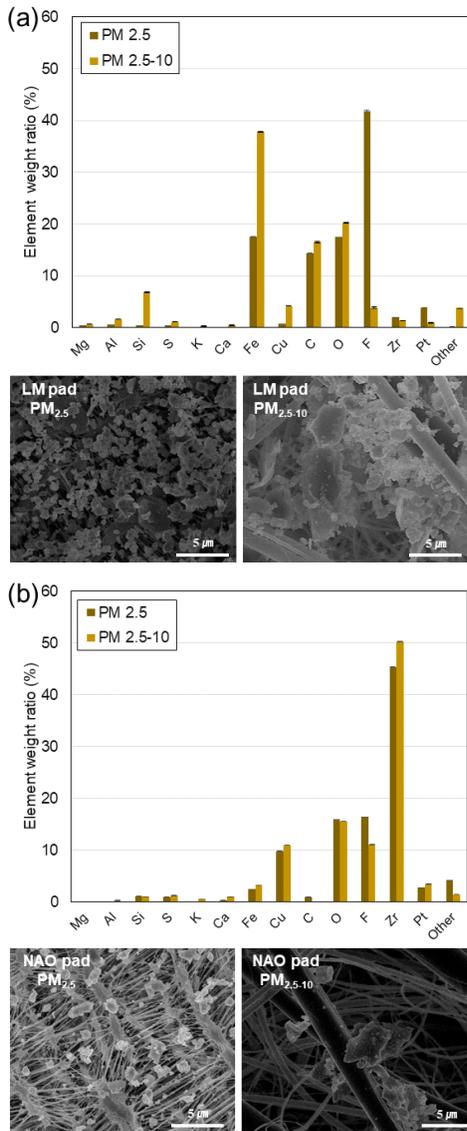


Figure 8. SEM-EDS analysis of brake wear particle divided by PM_{2.5} and PM_{2.5-10} for (a) LM and (b) NAO pads.

비율이 소폭 감소하고 자성입자 비율이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 브레이크 마모입자의 경우 하전 입자와 자성 입자로 분류할 수 있으며, 각각의 비율은 브레이크 패드 성분에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다.

그림 8은 SEM-EDS로 알아본 각 패드의 PM_{2.5}와

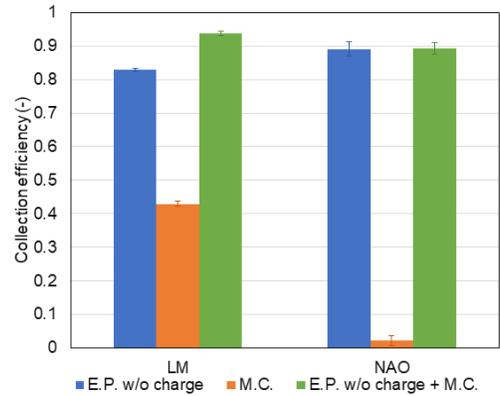


Figure 9. PM₁₀ collection efficiency according to the kind of collector (E.P. : Electrostatic precipitator), (M.C. : Magnetic collector).

PM_{2.5-10} 성분과 이미지를 나타내고 있다. LM 패드에서 NAO 패드보다 철, 구리 등 금속 성분이 더 많이 측정되었다. 그리고 PM_{2.5-10}에서 PM_{2.5}보다 철 입자가 차지하는 비율이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 디스크의 성분인 주철과 유사한 성분인 철 입자를 많이 갖고 있는 LM 패드가 NAO 패드보다 하전입자의 비율이 낮고, 입자의 크기가 커질수록 자성입자의 비율이 증가하는 이유를 확인할 수 있다.

그림 9는 각 집진기를 사용했을 때 PM₁₀의 집진 효율을 나타내고 있다. LM 패드의 경우 전기집진기를 통해서서는 약 83%, 자석집진기를 통해서서는 약 43%, 전기집진기와 자석집진기를 동시에 사용할 때에는 약 93% 정도 집진할 수 있는 것으로 나타났다. NAO 패드의 경우 전기집진기를 통해서서는 약 88%, 자석집진기를 통해서서는 약 15%, 전기집진기와 자석집진기를 모두 사용할 때에는 약 89% 집진할 수 있는 것으로 나타났다. 즉, NAO 패드에서는 자석집진기의 동시 사용효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

성분이 다른 두 가지 브레이크 패드를 사용할 때 브레이크에서 발생하는 마모 입자의 하전 및 자성특성을 분석하였다. 전기집진기와 자석집진기의 집진효율을 통해 브레이크 마모 입자에는 하전-자성입자, 하전-비자성입자, 비하전-자성입자, 비하전-비하전입자가 존재하는 것을 알 수 있었다. 각 특성을 갖는 입자들의 비율은 패드의 성분에 따라 결정되었다.

PM₁₀ 기준으로 LM 패드의 경우 전기집진기를 사용하여 최대 약 83%의 집진효율을 얻을 수 있고 자석집진방식을 추가할 경우 최대 93%까지 마모 입자를 제거할 수 있는 것으로 확인되었다. NAO 패드는 전기집진기를 사용하여 최대 88%의 마모 입자를 제거할 수 있고, 자석집진기는 제거 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 브레이크 마모먼지 저감장치를 개발함에 있어서 브레이크 패드 성분에 따라 전기집진 방식과 자석 집진 방식을 각각 단독으로 사용하거나 이 두 가지를 복합적으로 적용하여 마모먼지의 저감 성능을 효율적으로 향상시키는데 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원으로 수행하였고, 이에 감사드립니다. (grant no. 20007027)

References

- Amato, F., Pandolfi, M., Escrig, A., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Perez, N., and Hopke, P.K. (2009). Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2. *Atmospheric Environment*, 43(17), 2770-2780. doi:10.1016/j.atmosenv.2009.02.039.
- Amato, F., Cassee, F.R., Denier van der Gon, H.A.C., Gehrig, R., Gustafsson, M., Hafner, W., Harrison, R.M., Jozwicka, M., Kelly, F.J., Moreno, T., Prevot, A.S.H., Schaap, M., Sunyer, J., and Querol, X. (2014). Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions, *Journal of Hazardous Materials*, 275, 31-36. doi:10.1016/j.jhazmat.2014.04.053.
- Buckeridge, D.L., Glazier, R., Harvey, B.J., Escobar, M., Amrhein, C., and Frank, J. (2002). Effect of motor vehicle emissions on respiratory health in an urban area, *Environmental health perspectives*, 110(3), 293-300. doi:10.1289/ehp.02110293.
- Denier van der Gon, H.A.C., Gerlofs-Nijland, M.E., Gehrig, R., Gustafsson, M., Janssen, N., Harrison, R.M., Hulskotte, J., Johansson, C., Jozwicka, M., Keuken, M., Krijgsheld, K., Ntziachristos, L., Riediker, M., and Cassee, F.R. (2013). The Policy Relevance of Wear Emissions from Road Transport, Now and in the Future-An International Workshop Report and Consensus Statement, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63 (2), 136-149. doi:10.1080/10962247.2012.741055.
- Grigoratos, T. and Martini, G. (2015). Brake wear particle emissions: a review. *Environmental science and pollution research*, 22 (4), 2491-2504. doi:10.1007/s11356-014-3696-8.
- Harrison, R.M., Jones, A.M., Gietl, J., Yin, J., and Green, D.C. (2012). Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to non exhaust traffic particles derived from atmospheric measurements, *Environmental science & technology*, 46 (12), 6523-6529. doi:10.1021/es300894r.
- Hascoët, M. and Adamczak, L. (2020). At source brake dust collection system, *Results in engineering*, 5 (November 2019). doi:10.1016/j.rineng.2019.100083.
- Hinds, William C., Y.Z. (1999). *Aerosol Technology : Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, WILEY-INTERSCIENCE, 338-341
- Hwang, I.S. and Lee, Y.L. (2021). A Study on Mini-cyclone for Collection of Fine Dust in Vehicle Brakes, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 30 (2), 142-147. doi:10.7735/ksmte.2021.30.2.142.
- Lawrence, S., Sokhi, R., and Ravindra, K. (2016). Quantification of vehicle fleet PM10 particulate matter emission factors from exhaust and non-exhaust sources using tunnel measurement techniques, *Environmental Pollution*, 210, 419-428. doi:10.1016/j.envpol.2016.01.011.
- Marjamki, M., Keskinen, J., Chen, D.R., and Pui, D.Y.H. (2000). Performance evaluation of the electrical low-pressure impactor (ELPI), *J. Aerosol Sci*, 31 (2):249-261. doi:10.1016/S0021-8502(99)00052-X.
- Mo, J., Tian, E., and Pan, J. (2020). New electrostatic precipitator with dielectric coatings to efficiently and safely remove sub-micro particles in the building environment. *Sustainable cities and society*, 55 (November 2019), 102063. doi:10.1016/j.scs.2020.102063.
- Pant, P. and Harrison, R.M. (2013). Estimation of the contribution of road traffic emissions to

- particulate matter concentrations from field measurements: A review, *Atmospheric Environment*, 77, 78-97. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.04.028.
- Park, J.-H. (2019). The Optimal Design of Magnet Type Dust Collector for the Removal of Iron Particulate Matters, *Journal of The Korean Society For Urban Railway*, 7 (2), 133-140. doi:10.24284/jkosur.2019.6.7.2.133.
- Peng, T., Yan, Q., Li, G., Zhang, X., Wen, Z., and Jin, X. (2017). The Braking Behaviors of Cu-Based Metallic Brake Pad for High-Speed Train Under Different Initial Braking Speed, *Tribology letters*, 65 (4), 1-13. doi:10.1007/s11249-017-0914-9.
- Rissler, J., Swietlicki, E., Bengtsson, A., Boman, C., Pagels, J., Sandström, T., Blomberg, A., and Löndahl, J. (2012). Experimental determination of deposition of diesel exhaust particles in the human respiratory tract, *Journal of aerosol science*, 48, 18-33. doi:10.1016/j.jaerosci.2012.01.005.
- Stadler, Z., Krnel, K., and Kosmac, T. (2007). Friction behavior of sintered metallic brake pads on a C/C-SiC composite brake disc, *Journal of the European Ceramic Society*, 27 (2-3), 1411-1417. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2006.04.032.
- Wei, L., Choy, Y.S., and Cheung, C.S. (2019). A study of brake contact pairs under different friction conditions with respect to characteristics of brake pad surfaces, *Tribol. Int.*, 138 (February):99-110. doi:10.1016/j.triboint.2019.05.016.
- Woo, S., Kim, Y., Lee, Sunyoun, Choi, Y., and Lee, Seokhwan (2020). Characteristic of Brake Wear Particles under Various Test Driving Cycles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36 (3), 346-359, doi:10.5572/KOSAE.2020.36.3.346
- Woo, S.H., Jang, H., Na, M.Y., Chang, H.J., and Lee, S. (2022). Characterization of brake particles emitted from non-asbestos organic and low-metallic brake pads under normal and harsh braking conditions, *Atmospheric environment*, 278 (March), 119089. doi:10.1016/j.atmosenv.2022.119089.