지하철 터널 내 미세먼지 제거를 위한 하이브리드형 집진장치

Hybrid Dust Collector for Removing Subway Tunnel Particle

우상희*, 배귀남*†, 김종범*, 김민락**, 박형구***, 장홍량***, 윤화현****, 황문세****

Sang-Hee Woo*, Gwi-Nam Bae*†, Jong Bum Kim*, Min Rak Kim**, Hyung Gu Park***, Hong Ryang Jang***, Hwa-Hyun Yoon****, Moon Se Hwang****

Abstract A lot of particles were generated by friction of train wheel and railway or pantograph during subway traveling in underground tunnel. Then generated particles could not escape from underground tunnel and it accumulated in subway tunnel and re-suspended by subway moving. Contaminated air in underground tunnel come to be cause of bad effect for train passengers and electrical device trouble. To decrease particles in underground tunnel, dust collector was installed at under the train to use the train wind. The subway speed was changed during it traveling station to station. Then dust collector installed at under the train should be considering the various train wind speed conditions. Therefore, in this study, hybrid dust collector which merging electrostatic precipitator and inertial collector was designed. Collection efficiency of hybrid dust collector was tested in wind tunnel and it installed at under the train to check how many dust was collected by hybrid dust collector.

Keywords **:** dust, particle, subway, underground tunnel, ESP, louver

초 록 지하철은 터널을 주행하면서 바퀴와 휠의 마찰, 팬토그래프의 마찰 등에 의해 수많은 미세먼지를 생성하고, 생성된 미세먼지는 지하철 터널 내에서 빠져나가지 못하고 축적되어 지하철 운행에 의해 다시 재비산된다. 지하철 터널의 오염된 공기는 객차로 유입되어 승객의 건강에 나쁜 영향을 미치거나 전동차 장치들에 침착되어 고장의 주요 원인이 되기도 한다. 이러한 지하철 터널의 미세먼지를 줄이기 위해 전동차에 집진장치를 직접 부착하고 열차가 달리는 주행풍을 이용하여 미세먼지를 집진하고자 하였다. 지하철은 역과 역 사이를 오가며 속도가 항상 바뀌기 때문에, 이러한 유동속도를 모두 커버하기 위해서 관성집진기와 전기집진기를 결합한 하이브리드형 집진장치를 개발하였다. 하이브리드형 집진장치의 집진 성능을 풍동에서 시험하고, 실제 전동차에 부착하여 미세먼지 포집량을 확인하였다.

주요어 : 먼지, 입자, 지하철, 터널, 전기집진장치, 루버

† 교신저자: 한국과학기술연구원 환경복지연구단(GNBae@kist.re.kr)
* 한국과학기술연구원
** 한양대학교
*** DK 산업
**** 서울도시철도공사 기술연구소

1. 서 론

지하철 차량에 의해 선로 등에서 재비산 되거나 생성되는 미세먼지들은 지하공간이라는 닫힌 공간에 빠져나가지 못하고 농축된다. 이렇게 농축된 입자들은 객차에 스며들어 승객의 건강을 위협하거나 운행장비에 침착하여 열교환기 성능을 저하시켜 전기적 고장을 일으키는 등 원활한 지하철 운행에 위협이 되고 있다. 기존 연구들이 측정한 지하철 터널 내 미세먼지 농도는 51-470 $\mu g/m^3$ 으로 일반 대기에 비해 매우 높다. [1], [2], [3] 지하철 터널 내 미세먼지는 대부분 철(철 산화물)을 중심으로 한 금속원소로 이루어져 있으며, 그 밖에 망간, 크롬, 구리 및 아연, 티타늄, 니켈, 주석, 은 등의 원소로 구성되어 있다. [3] 철 산화물 중심의 금속원소는 산화 스트레스와 독성을 일으키는 촉매로 여겨지므로 ([4],[5]) 터널 내 미세먼지를 제거하기 위한 노력이 필요하다.

지하철에 집진장치를 부착하여 지하철 터널 내 미세먼지를 제거한다면, 따로 풍력을 발생하지 않고 지하철의 주행풍 만으로 터널 내 미세먼지를 자동으로 제거해줄 수 있다. 본 논문에서는 지하철에 부착하여 터널 내 미세먼지를 제거하기 위한 집진장치를 개발하였다.

먼지를 집진 하는 집진장치는 여러 종류가 있다. 필터는 가장 흔하게 쓰이는 집진장치이다. 필터는 유로를 막아 먼지를 집진하는 장치로써 효율이 매우 좋지만 유동저항이 크다는 단점이 있다. 그 밖에 임팩터, 사이클론 및 루버 등의 관성집진장치가 있지만 필터보다 전체적인 성능은 떨어진다. 하지만 이들 관성집진장치는 1 ㎛이상 크기의 입자에 대해서는 집진효율이 필터만큼 높으며 유동저항은 훨씬 적게 받는다는 장점이 있다. 특히 터널 내 미세먼지는 3.3 ㎛ 에서 8 ㎛ 에서 무게농도가 가장 높은 만큼([6]) 필터보다 유동저항이 적은 관성집진장치를 사용하는 것이 에너지 효율 측면에서 터널 먼지집진에 유리하다.

또 다른 집진장치의 유형으로는 전기집진장치가 있다. 전기집진장치는 와이어나 팁에 고전압을 걸어줘서 코로나 방전을 일으켜 입자를 하전 시키고 전기장으로 입자를 집진 하는 방법이다. 유동저항이 거의 없으면서 집진효율이 매우 높다는 장점이 있지만, 오존이 발생하고 유속이 빠르면 집진효율이 급격히 감소한다. 지하철이 달리면서 오존을 생성하면 희석이 빨리 일어나기 때문에 실내용 전기집진장치보다 기준이 완화 될 수 있지만, 지하철의 속도는 계속 변하기 때문에 이에 대한 보완이 필요하다.

본 논문에서는 빠른 속도에서 집진 효율을 보완해줄 관성 집진장치와 저속에서 집진효율이 높은 전기집진장치를 합하여, 다양한 유동속도에서 변동 대응이 가능한 하이브리드 형 집진장치를 개발하였다. 풍동 실험으로 각 유동속도에 대한 하이브리드 형 집진장치의 집진효율을 평가하였다.

2. 본 론

2.1 실험 구성

본 연구에서는 지하철의 변동유속에 대응하여 지하철 터널 내 먼지를 집진 하기 위해 전기집진기(ESP)와 루버 관성집진장치를 복합한 집진장치를 개발하였다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 루버 부분이 전면에 설치되어, 우선적으로 back corona나 전기집진기에 위해가 갈 수 있는 큰 입자를 미리 루버로 걸러주며, 후에 한번 루버로 필터링 된 입자를 전기집진장치로 마저 집진 하는 구조이다. 하이브리드 집진장치의 크기는 1.3 m X 1.1 m X 0.5 m 이며, 유로 단면은 0.4 m X 0.6 m 이다. 시험 풍동은 집진장치에서의 유속이 1 - 5 m/s사이가 유지되도록 하였다. 집진효율 실험에 사용된 시험 입자는 Arizona dust A2로, Dust generator (TOPAS, Grimm)을 통해 생성하여 풍동 상단에서 분사하여 주었다. 풍동의 단면에서 Re가 33,000-168,000으로 난류 영역이므로 시험먼지가 시험단면에서 균일하게 분포하였을 거라 추정되었다. 시제품의 상류와 하류에는 ㄴ 자 입자 샘플링관이 설치되어 각각의 Optical Particle Counter(OPC, Grimm 1.109)로 이송되었다. OPC로 측정한 입자 농도는 하이브리드 집진장치의 집진효율을 계산하는데 활용되었다. 집진효율 측정과 동시에 집진장치의 차압(MP210, KIMO)과 유량(Balometer. TSI)을 측정하였다. 하이브리드 집진장치의 집진효율 뿐만 아니라, 루버와 전기집진장치로 각각 분리하여 각 구성품의 집진효율도 측정하여, 하이브리드로 집진하였을 때의 성능 향상을 알아보았다.

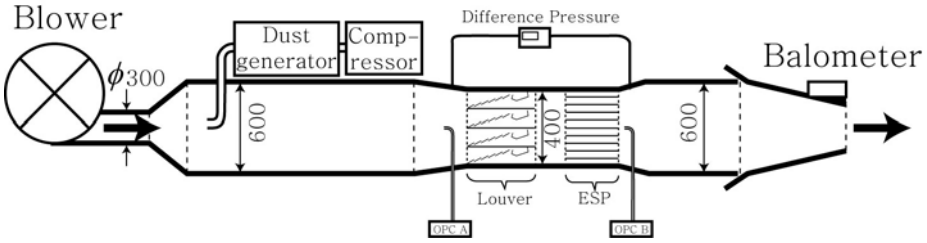

Fig. 1 Schematic of prototype wind tunnel experiment set-up

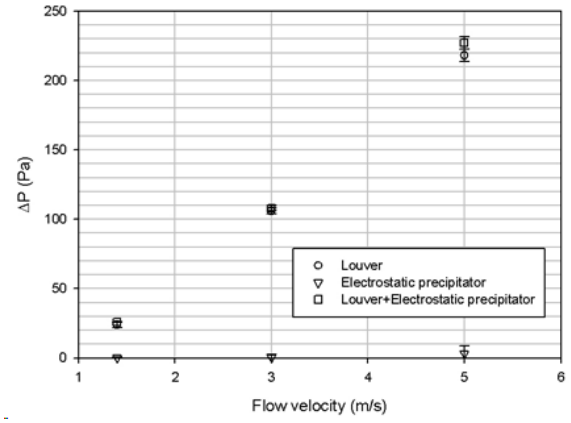

Fig. 2 Relationship of differential pressure and flow velocity at hybrid dust collector

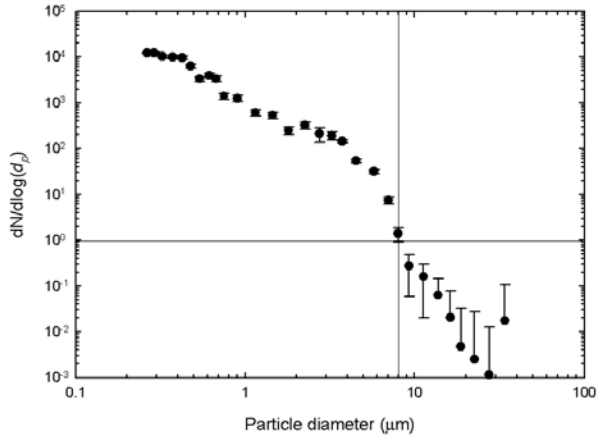

Fig. 3 Particle concentration distribution at upstream of hybrid dust collector

2.2 결과 및 고찰

2.2.1 차압 및 유동 분석

본 하이브리드 집진장치는 지하철에 부착되어 주행풍만으로 풍량을 감당하기 때문에 집진장치의 유동저항이 중요한 변수이다. 이에 따라 측정한 차압 유량 곡선이 fig. 2에 나타나 있다. 그림에서 보이듯이, 유동 속도 1.4 에서 5 m/s 까지의 루버 및 하이브리드 집진장치 차압은 비교적 선형적으로 증가하였다. 5 m/s 유동 속도에서 루버의 차압은 대략 220 Pa이었으며, 전기집진장치의 차압은 3 Pa로 루버에 비해서는 매우 미미한 수준이었다. 따라서 하이브리드 집진장치의 유동저항은 루버에서 거의 생긴다고 볼 수 있다. 이렇게 루버가 강제적으로 유동저항을 만들어줌으로써 전기집진장치가 집진효율이 좋아지는 유동속도로 하이브리드 집진장치로 들어오는 주행풍이 낮아지는 효과가 생긴다.

2.2.2 집진 효율

Fig. 3에 나타나듯이 dust generator로 생성한 Arizona dust A2는PM_{10} 집진효율을 판단하기에 충분한 입자 농도를 풍동에 만들어주었다. 따라서 10 ㎛ 이하의 입자에 대해서만 집진효율을 판별하였다.

우선 루버만의 집진효율이 fig. 4의 좌측 그래프로 나타나 있다. 루버만 있을 때의 PM_{10} 집진효율은 유속이 느린 1.4 m/s의 경우에만 50 % 이상을 넘었으며, 유속이 빨라지면 집진 효율이 45 % 까지 감소하였다. 루버의 경우 유동저항을 일반적인 관성집진장치 보다는 적게 먹지만, 일반적인 관성집진장치와는 다르게 일정 레이놀즈 수 이상에서 집진효율이 오히려 떨어지는 경향을 보여주기도 한다. [7] 루버의 $PM_{2.5}$ 집진효율은 모든 유속에서 30 % 이하의 낮은 집진효율을 보여주었다. 루버 같은 관성집진장치는 일정 입자 크기 이상만 집진효율이 좋기 때문에 $PM_{2.5}$의 집진효율이 급격히 떨어지는 것이다.

전기집진장치의 PM_{10} 집진효율은 1.4 m/s에서 99 % 이상이었으며, 5 m/s의 빠른 유속에서도 70 % 이상의 집진효율을 보여주었다. $PM_{2.5}$ 에서도 전기집진장치는 50 % 이상의 집진효율이 나타났으며, 1.4 m/s의 느린 유속에서는 PM_{10} 집진효율과 크게 다르지 않은 90 % 이상의

$PM_{2.5}$ 집진효율을 보여주었다. 전기집진장치는 관성집진장치와는 다르게 크거나 작은 입자에서 집진효율이 좋기 때문이다.

이러한 전기집진장치와 루버를 합치게 되면 5 m/s의 빠른 유속에서 집진효율이 크게 상승하여 PM_{10} 값이 90 %에 근접하며 $PM_{2.5}$의 값도 70 %에 가깝게 된다. 1.4 m/s의 느린 유속에서는 전기집진장치의 효율이 워낙 좋아서 루버의 유무가 크게 상관이 없었지만, 빠른 유속에서는 관성집진장치로써의 루버가 집진효율 향상에 크게 도움이 되는 것이 확인되었다.

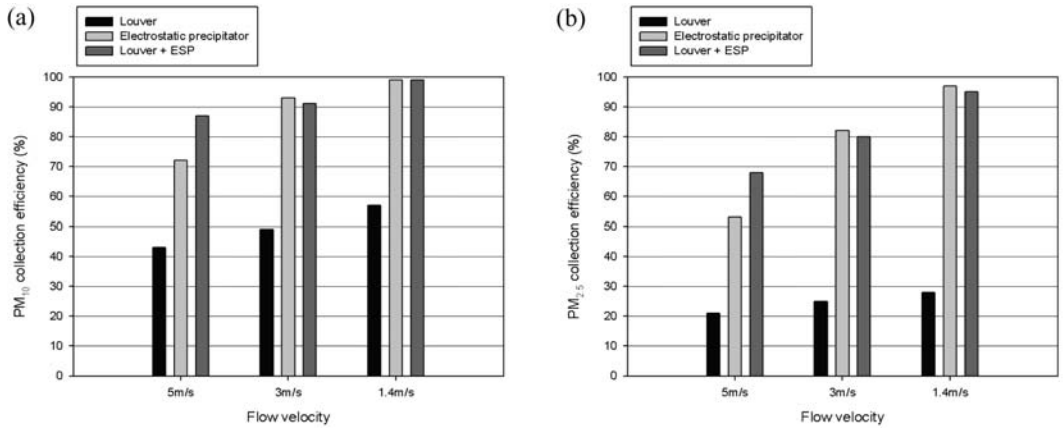

Fig. 4 Dust collection efficiency for hybrid dust collector (a) PM_{10} (b) $PM_{2.5}$

3. 결 론

지하철의 터널 내의 미세먼지는 지하철 운행으로 생성되거나 재비산 되어 터널 내에 농축된다. 농축된 미세먼지는 객차로 유입되어 승객의 건강을 위협하며, 지하철 외부장치에 침착하여 잦은 고장의 원인이 되기도 한다. 본 연구에서는 이러한 터널 내 미세먼지 저감을 위해 지하철에 부착하여 주행 중의 주행풍을 활용하여 자동적으로 미세먼지를 집진하는 집진장치를 개발하였다. 지하철은 역과 역사이마다 다양한 속도로 운행되므로 다양한 속도에 대응하여 집진을 수행하기 위해 전기집진장치와 루버를 합친 하이브리드형 집진장치가 고안되었다.

하이브리드 집진장치가 실제 다양한 풍속에 대응하여 집진성능이 높게 유지되는지 확인하기 위해 풍동 실험이 시행되었다. 루버는 1.4 - 5 m/s 유속 범위에서 45 - 55 %의 PM_{10}집진효율을 보여주었으며, 전기집진장치는 72 - 99 %의 PM_{10} 집진효율을 보여주었다. $PM_{2.5}$로 보면 루버는 1.4 - 5 m/s 유속 범위에서 30 % 이하의 집진효율을 보여주었으며, 전기집진장치는 50 - 95 %의 집진효율을 보여주었다. 전기집진장치는 유속이 빠를 때는 유속이 느릴 때에 비해 급격히 집진효율이 감소하였지만, 루버는 집진효율이 크게 변화가 없음이 확인되었다. 이에 따라 두 집진장치를 병합하면 빠른 유속에서도 90 %에 근접하는 PM_{10} 집진효율을 가지게 됨이 확인되었다. 느린 유속에서 집진효율이 좋은 전기집진장치에 루버를 추가함으로써 자체적으로 집진효율이 상승하였을 뿐만 아니라, 직접 하이브리드 집진장치를 지하철

에 추가하면 루버가 유동저항을 만들어서 전기집진장치가 취약한 빠른 유동속도를 자동적으로 저감시켜줘서 전체적인 집진장치의 집진효율이 크게 향상될 것이라 예상되었다.

후 기

이 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도기술연구사업(15RTRP-B082486-02)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

[1] H. Jung, B. Kim, J. Ryu, S. Maskey, J. Kim, J. Sohn, C. Ro (2010) Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particle analysis, *Atmospheric Environment*, 44, pp. 2287-2293.

[2] Y. H. Cheng, Y. L. Lin, C. C. Liu (2008) Levels of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Taipei rapid transit system, *Atmospheric Environment*, 42(31), pp. 7242-7249.

[3] C. Johansson, P. A. Johansson (2003) Particulate matter in the dunerground of Stockholm, *Atmospheric Environment*, 37(1), pp. 3-9.

[4] H. L. Karlsson, A. Holgersson, L. Moller (2008) Mechanisms related to the genotoxicity of particle in the subway and from other sources, *American Chemical Society*, 21(3), pp. 726-731.

[5] H. L. Karlsson, L. Nilsson, L. Moller (2004) Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells *Chemical Research in Toxicology*, 18(1), pp. 19-23.

[6] K. Midander, K. Elihn, A. Wallen, L. Belova, A. B. Karlsson, I. O. Wallinder (2012) Characterisation of nano- and micron-sized airborne and collected subway particles, a multi-analytical approach *Science of the Total Environment*, pp. 427-428, 390-400.

[7] G. O. Musgrove, K. A. Thole, E. Grover, J. Barker (2013) Performance measurements of a unique louver particle separator for gas turbine engines *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 135, 012001-1.