

도시철도 터널 미세먼지 제거용 하이브리드형 집진장치의 성능평가

Performance Evaluation of a Hybrid Dust Collector for Removal of Airborne Dust in Urban Railway Tunnels

우상희 · 김종범 · 장홍량 · 권순박 · 육세진 · 배귀남*

Sang Hee Woo · Jong Bum Kim · Hong Ryang Jang · Soon Bark Kwon · Se-Jin Yook · Gwi-Nam Bae

Abstract Urban railway tunnels are polluted by resuspension of deposited bottom dust or newly generated wear dust. A hybrid type dust collector consisting of a baffle and an electrostatic precipitator was developed to remove these types of airborne dust when trains are running in the tunnel. Since dust collection efficiency of the hybrid dust collector is inversely proportional to the airflow rate, the relationship between airflow rate and dust collection efficiency was experimentally investigated for two baffle models. Collection efficiencies for dust larger than $0.5 \mu\text{m}$ for the hybrid dust collector model A1, operated at 3.4 m/s, were greater than 30%; those for the hybrid dust collector model A2, operated at 4.7 m/s, were higher than 20%. When the applied voltage was 13 kV, the amounts of PM_{10} collected with model A1 and model A2 dust collectors were estimated at 253 μg and 242 μg per hour, respectively.

Keywords : Dust collector, Baffle, Electrostatic precipitator, Collection efficiency, Urban railway tunnel

초 록 도시철도터널은 전동차 운행으로 바닥 먼지가 비산되거나 새로 발생된 마모 먼지로 오염되고 있다. 전동차가 운행하면서 이러한 부유 먼지를 제거하기 위해서 관성집진기인 배플과 전기집진기로 구성된 하이브리드형 집진장치를 개발하였다. 하이브리드형 집진장치의 유량과 집진효율은 서로 반비례하므로, 유량과 집진효율의 관계를 파악하기 위해 2가지 배플 모델을 제작하여 성능을 평가하였다. 유속이 3.4 m/s인 A1 모델을 장착한 집진장치의 $0.5 \mu\text{m}$ 이상인 입자의 집진효율은 30% 이상이었고, 유속이 4.7 m/s인 A2 모델의 경우 20% 이상이었다. 인가전압이 13 kV일 때 1시간 동안 A1 모델 집진장치의 PM_{10} 집진량은 253 mg, A2 모델의 경우 242 mg으로 추정되었다.

주요어 : 집진장치, 배플, 전기집진기, 집진효율, 도시철도터널

1. 서 론

대도시에는 많은 사람들이 편리하게 이동할 수 있도록 도시철도, 버스, 택시 등의 대중교통수단이 있다. 도시철도는 많은 사람들이 일시에 이용할 수 있고, 이동시간을 정확하게 예측할 수 있는 장점이 있어 대도시의 필수적인 대중교통수단으로 자리매김하고 있다. 서울의 경우 연간 26억명 이상의 사람들이 도시철도를 이용하는데, 이것은 대중교통 이용객의 절반에 가깝다[1,2]. 이처럼 많은 사람들이 일상적으로 도시철도 환경에 노출되지만, 전동차의 운행에 따른 먼지의 발생과 지하라는 공간적 한계로 터널의 미세먼지(PM_{10}) 농도($51\text{-}470 \mu\text{g}/\text{m}^3$)는 일반 대기나 도로변의 미세먼지 농도보다 높다[3-7]. 특히, 터널의 입자는 주로 금속 성분으로 구성되어 있으며[7], 이러한 금속 입자는 일반 대기 입자에 비해 산화 스트레스를 일으킬 확률과 독성이 높기 때문에 인체에 더욱 해로울 수 있다[10,11]. 이런 유해한 입자를 관리하기 위해 1996년부터 도시철도 역사의 승강장에 대해서 실내공기질 가이드라인을 마련하여 PM_{10} 농도를 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 관리하고 있다. 승객이 도시철도를 이용하면서 주로 머무르는 공간은 전동차 내부이고, 전동차는 터널이라는 밀폐된 공간에서 운행되기 때문에 전동차 내부의 미세먼지 농도는 터널 공기의 영향을 받을 수밖에 없다. 전동차 내부의 PM_{10} 과 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도는 각각 $41\text{-}325 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $21\text{-}246 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었는데, 일부 장소에서는 대기환경기준($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 대중교통차량의 권고기준($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 높게 나타났다[4-6]. 터널 공기질을 개선하기 위하여 도시철도운영기관에서는 전동차의 운행이 정지된 밤 시간대에 집진 차량을 운영하고 있지만, 속도가 느리고

*Corresponding author. E-mail: gnbae@kist.re.kr.

© 2017 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<https://doi.org/10.7782/JKSR.2017.20.4.433>

보유 차량 대수가 적어 도시철도 전 구간을 운행하려면 상당한 기간이 소요되어 터널 공기질 개선을 위해 새로운 접근방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 터널 비산먼지 문제를 해결할 수 있는 방안을 마련하기 위하여 운행하는 전동차에 부착하여 터널 전 구간에서 상시 미세먼지를 집진할 수 있는 하이브리드형 집진장치를 개발하였다. 즉, 도시철도 터널 환경을 고려하여 큰 먼지 제거에 사용되는 관성집진기와 작은 먼지 제거에 사용되는 전기집진기(electrostatic precipitator, ESP)를 결합하였다. 전기집진기는 일반적으로 수백 나노미터 크기에서 집진효율이 가장 낮으나, 수 나노미터 입자나 수 마이크로 입자의 집진효율은 높다. 터널 내 입자의 개수농도 크기분포로부터 3.3 μm 와 8 μm 에서 피크농도가 나타나고[12], 무게농도 크기분포로부터 2.5 μm 에서 피크농도가 나타난다고 보고되었다[13]. 이에 따라 전기집진기가 지하터널 먼지를 제거하는데 유용하다고 판단되었다.

일반적으로 전기집진기는 유속이 빠를수록 집진효율이 낮아지는 단점이 있는데, 집진효율을 증가시키기 위하여 유속을 낮추면 처리용량이 줄어들어 총 집진량이 감소한다. 본 논문에서는 집진효율이 높으나 처리용량이 적은 모델과 집진효율이 낮지만 처리용량이 많은 모델의 2가지 집진장치를 설계하여 총 집진량을 비교하였다. 그리하여 하이브리드 집진장치의 설계 시 처리용량, 집진효율과 총 집진량의 관계를 고찰하였다.

2. 본 론

2.1 실험 방법

2.1.1 하이브리드형 집진장치

Fig. 1에 나타난 바와 같이 하이브리드형 집진장치는 크게 입자의 관성을 이용하여 집진하는 배플집진기, 전기적 이동도를 이용하여 집진하는 전기집진기, 그리고 공기를 유입하는 팬으로 구성되어 있다. 배플집진기는 입자의 관성을 크게 만들기 위하여 공기를 가속시키는 슬릿형 노즐과 입자가 관성에 의해 기류로부터 이탈하여 충돌하는 원통형 충돌판으로 이루어졌다. 일반적으로 관성집진기는 유속이 빠를수록 집진효율이 높지만, 전기집진기는 유속이 느릴수록 집진이 증가한다. 집진효율뿐만 아니라 처리용량도 집진장치의 성능을 판단하는 중요한 지표이다. 집진효율이 높은 집진장치라도 처리용량이 적으면 총 집진량이 적어 특정공간의 먼지를 효과적으로 제거하지 못한다. 본 연구에서는 집진효율과 처리용량을 함께 고려하기 위하여 처리용량이 다른 2가지 배플 형상을 제작하였다. A1 및 A2 모델은 유동저항이 달라 각각 유입 유속이 약 3.5, 5 m/s가 되도록 설계하였다. Lee et al. [14]에 따르면, 전동차가 최대 70 km/h로 운행할 때 하부 유속은 10 m/s 이하였으며, 중심부는 5 m/s 정도이었다. 전동차 하부에 장착할 집진장치가 연구대상이므로, 전동차 하부 유속을 고려하여 2가지 다른 유속을 구현할 수 있는 배플을 설계하였다. A1 모델은 노즐이 12개이고, 노즐 폭은 5 mm이며, 노즐 출구에서 평균 유속이 3.5 m/s이다. A2 모델은 노즐이 12개이고, 노즐 폭은 10 mm이며, 노즐 출구에서 평균 유속을 5 m/s로 설계하였다.

보통 전기집진기는 1 m/s 근처의 유속에서 사용되지만, 본 연구에서는 처리용량이 많도록 빠른 유속(3-5 m/s)에서 집진장치가 작동되므로, 빠른 유속에서도 집진효율이 우수한 톱날 형태의 하전부를 갖는 2단 전기집진기를 설계하였다[15].

도시철도 전동차의 하부에는 전장품, 기계부품 등이 설치되어 있어 집진장치를 설치할 공간이 제한되므로, 집진장치의 단면적을 40 cm × 40 cm로 설계하였다. 집진장치로 유입되는 공기의 유속이 3-5 m/s가 되도록 팬(F29FSA/FTA(LGT))을 선정하였다.

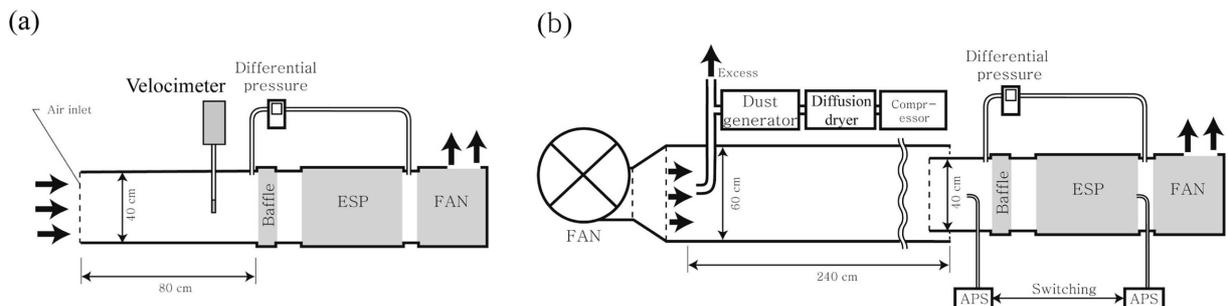


Fig. 1. Schematic of experimental setup for testing of (a) pressure drop, and (b) collection efficiency of the hybrid dust collector.

Table 1. Relation between airflow velocity and pressure drop for dust collectors.

	Airflow velocity [m/s]	Pressure drop [Pa]
Baffle model A1	3.48	480
Baffle model A2	4.88	250
Baffle model A1 + ESP	3.43	510
Baffle model A2 + ESP	4.68	310

2.1.2 성능평가 실험

하이브리드형 집진장치의 대표적 성능인 압력강하와 집진효율 특성을 평가하기 위하여 각각 Fig. 1 (a) 및 (b)와 같이 실험장치를 구성하였다. 유속과 압력강하를 측정하기 위하여 각각 velocimeter (TSI, USA)와 차압계(MP210, MPR2500, KIMO, France)를 사용하였다. 실험 시 외부 교란을 최소화시키기 위하여 집진장치의 앞에 60 cm 길이의 덕트를 연결하였다. 배플 앞 10 cm 지점에서 단면을 9등분하여 각 중심점에서 유속을 측정하여 평균값을 대푯값으로 사용하였다. 배플 전단과 전기집진기 후단에서 정압을 측정하여 압력강하를 평가하였다.

집진효율을 평가하는데 시험입자가 필요하므로, 집진장치의 상류에 단면이 60 cm × 60 cm인 풍동을 연결하였다. 시험입자로 Arizona dust 중 가장 큰 입경분포를 갖는 A4 모델을 사용하였다. 입자발생기(SAG 410, TOPAS, Germany)로 시험입자를 풍동 내부로 공급하였고, 입자측정기의 측정범위를 고려하여 입자발생기의 공급량을 조절하였다. APS (aerodynamic particle sizer, 3321, TSI, USA)로 시험입자의 크기분포를 측정하였다. APS는 실제 개별 입자의 밀도가 1 g/cm³인 입자로 가정하여 공기역학적 크기별 개수농도를 측정하므로, 쉽게 무게농도로 환산할 수 있다. 하나의 APS를 사용하여 집진장치의 상류와 하류를 번갈아가면서 측정하여 집진효율을 평가하였다. 이때 각 위치에서 1분씩 측정하였다. Fig. 2는 10분 동안 측정된 대기입자의 크기분포와 시험입자의 크기분포를 비교하여 나타낸 것이다. 시험입자의 농도가 대기입자에 비해 10-100배 정도로 높으므로, 대기입자의 영향은 크지 않다고 판단된다. 또한, 시험입자의 경우 10 μm까지 오차도 크지 않으므로, 시험입자가 매우 안정적으로 발생되었다고 생각된다.

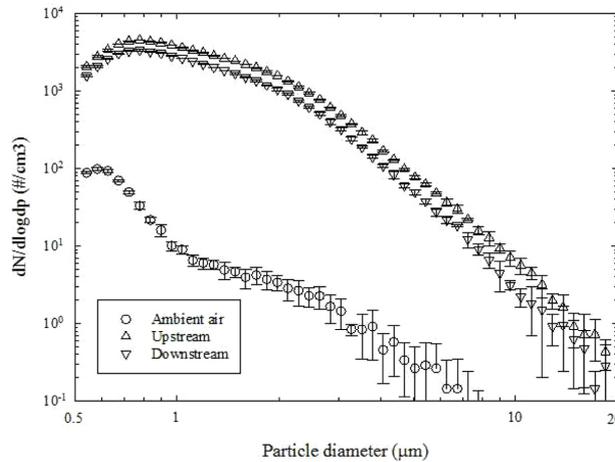


Fig. 2. Size distributions of ambient particles and aerosolized Arizona dust A4 at both upstream and downstream locations from dust collector.

2.2 결과 및 고찰

2.2.1 압력강하 특성

하이브리드 집진장치의 유속에 따른 압력강하 특성을 Fig. 3에 나타냈다. 또한, 구성요소인 baffle model A2와 전기집진기(ESP)에 대한 유속과 압력강하의 관계를 함께 나타냈다. 설계 최고 유속인 5 m/s에서 약 400 Pa의 압력강하가 생기고, 배플과 전기집진기가 각각 전체 집진장치 압력강하의 3/4과 1/4을 차지하는 것으로 나타났다.

하이브리드 집진장치에 내장된 팬을 사용하여 집진장치의 유속과 압력강하를 측정하면, Table 1에 나타낸 바와 같이 baffle model A1 + ESP의 경우 유속이 3.43 m/s이고 압력강하가 510 Pa이었으며, baffle model A2 + ESP의 경우 유속이 4.68 m/s

이고 압력강하가 310 Pa이었다. Baffle model A1 + ESP의 경우 배플과 전기집진기가 각각 460, 50 Pa의 압력강하를 차지하였다. Baffle model A2 + ESP의 경우 배플과 전기집진기가 차지하는 압력강하는 각각 230, 80 Pa이었다. 후자의 경우 전기집진기의 압력강하가 더 큰 것은 유속이 더 빠르기 때문이다.

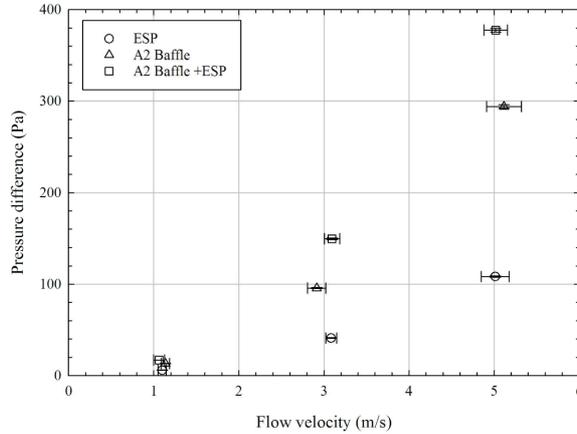


Fig. 3. Relationships between airflow velocity and pressure drop for baffle, electrostatic precipitator, and hybrid dust collector.

2.2.2 집진효율 특성

2가지 배플 형상에 대하여 입경별 집진효율을 비교하여 Fig. 4에 나타냈다. 배플은 관성집진기이므로 2 μm 이상인 입자의 경우 입자가 클수록 관성이 크므로 집진효율이 증가하는 전형적인 특징을 나타낸다. 10 μm 이상인 경우 시험입자의 발생이 불안정하고, 충돌판에서 재비산이 발생할 수 있으므로 집진효율이 더 이상 증가하지 않은 것으로 생각된다. 또한, 평균 유입 유속은 낮지만 노즐 출구의 유속이 빠른 A1 모델의 집진효율이 A2 모델에 비해 약간 높았다. 1 μm 이하인 입자가 일부 집진되는데, 이것은 배플의 충돌면이 수평이 아니라 움푹 파인 원기둥 형상이어서 관성 충돌이외에 입자의 차단 등 다른 메커니즘이 작용하여 나타난 것으로 추정된다. 이처럼 작은 입자가 일부 집진되는 현상은 충돌면이 평평하지 않은 가상입팩터의 성능곡선에서도 나타난다[16].

배플에 전기집진기를 결합시킨 하이브리드형 집진장치의 입경별 집진효율을 Fig. 5에 나타냈다. 이때 전기집진기의 인가전압을 11-13 kV로 변화시켰다. 전기집진기를 추가함에 따라 배플에 비해 집진효율이 크게 향상되었고, 특히 2 μm 이하의 작은 입자가 제거됨을 알 수 있다. 동일 배플 모델을 장착한 경우 인가전압이 증가하면 전체적으로 집진효율이 약간 높아짐을 알 수 있다. A1 모델을 사용한 경우 인가전압을 12 kV 이상으로 설정하면, 모든 입경에서 집진효율이 40% 이상으로 높게 나타남을 알 수 있다. 평균 유입 유속이 빠른 A2 모델의 집진효율이 A1 모델에 비해 낮았다.

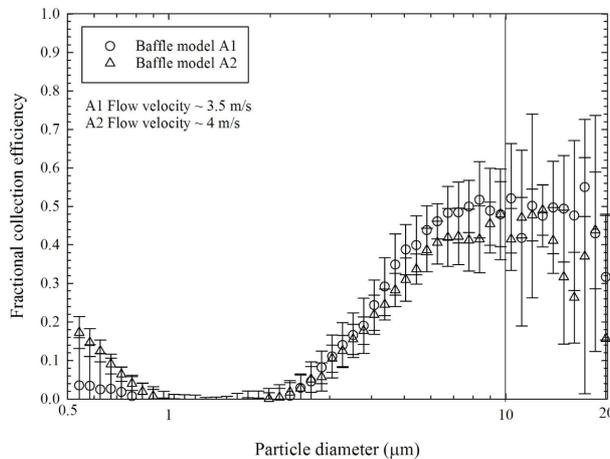


Fig. 4. Particle collection efficiency curves for baffle models A1 and A2.

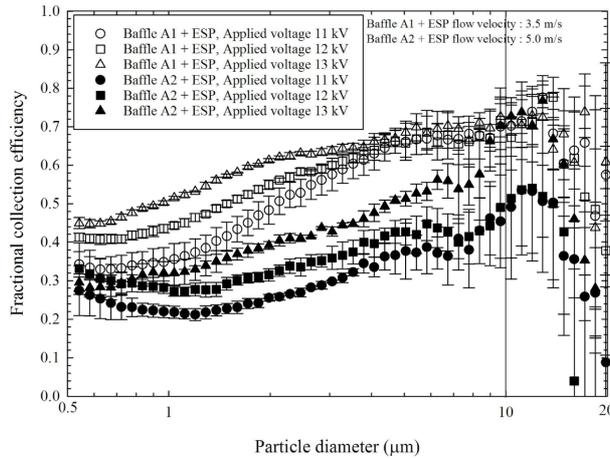


Fig. 5. Particle collection efficiency curves of hybrid dust collectors.

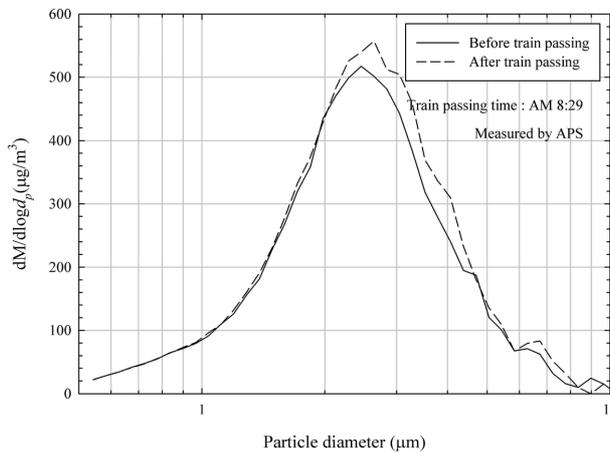


Fig. 6. Particle mass size distributions in the underground railway tunnel from Woo et al. [13].

집진장치의 터널 내 미세먼지 제거능력은 집진효율과 유량을 함께 고려하여야 한다. Fig. 6은 Woo 등이 측정된 터널 내 미세먼지의 크기분포를 나타낸 것이다[13]. Fig. 6의 입경별 무게농도에 Fig. 5의 입경별 집진효율을 결합하고, 각 집진장치의 유량을 고려하여 1시간 동안 작동 시 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 집진량을 계산하여 Table 2에 나타냈다. 이때 터널 내 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 농도를 각각 200, 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가정하였다. 1시간 작동 시 A1 모델 집진장치의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 집진량은 각각 214-253, 107-140 μg 으로 예상되고, A2 모델 집진장치의 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 집진량은 각각 165-242, 83-127 μg 으로 예상되었다. A1 모델의 유량이 적지만 집진효율이 높아 총 집진량이 A2 모델에 비해 더 많은 것을 알 수 있다. A1 모델이 A2 모델보다 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 집진량이 더 많은데, 인가전압이 11 kV에서 13 kV로 증가함에 따라 그 차이가 PM_{10} 집진량은 49, 31, 11 mg으로, $PM_{2.5}$ 집진량은 24, 19, 13 mg으로 점점 줄어들었다. 만약 인가전압을 더 높이거나 A2 모델의 유입 유속을 4 m/s로 낮추면 유량이 많은 집진장치의 집진량이 더 많아질 수도 있다. 집진장치의 성능은 집진효율뿐만 아니라 처리유량도 함께 고려한 집진량을 비교하여야 공간에서 집진장치의 먼지 제거능력을 보다 정확하게 평가할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 도시철도가 운행하면서 발생하는 미세먼지를 신속하게 제거할 수 있는 전동차 하부 부착형 하이브리드형 집진장치를 개발하였다. 이 집진장치는 배플과 전기집진기로 구성하였고, 2가지 모델의 배플을 비교하였다. 집진장치의 대표적 성능인 압력강하, 집진효율 및 집진량을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 유속이 증가함에 따라 압력강하가 급격하게 증가하는데, 이러한 증가는 주로 배플에 기인된다. 둘째, 배플에 전기집진

기를 결합시킴에 따라 모든 입경에서 집진효율이 뚜렷하게 증가하고, 특히 배플이 제거하지 못하는 2 μm 이하인 입자도 제거된다. A1 모델의 경우 인가전압이 11 kV 이상인 경우 0.5 μm 이상인 모든 입경에서 집진효율이 30% 이상이었다. 셋째, 본 실험조건에서 집진장치의 집진효율과 유량을 함께 고려하여 집진량을 구하면 유량은 적지만 집진효율이 높은 A1 모델의 배플을 장착한 집진장치의 집진량이 A2 모델의 집진장치에 비해 더 많았다. 도시철도 터널의 미세먼지 제거를 위한 집진장치의 성능은 집진효율과 처리유량이 함께 고려된 집진량을 비교하여 평가될 필요가 있다.

Table 2. Amount of dust collected by the hybrid dust collectors for 1-hour operation.

	Applied voltage (kV)	Amount of PM ₁₀ (μg)	Amount of PM _{2.5} (μg)
Baffle model A1 + ESP (inlet velocity 3.43 m/s)	11	214	107
	12	231	124
	13	253	140
Baffle model A2 + ESP (inlet velocity 4.68 m/s)	11	165	83
	12	200	105
	13	242	127

후 기

이 연구는 국토교통부의 재원으로 미래철도기술연구사업(17RTRP-B082486-04)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- [1] www.railway.or.kr (Accessed 6 December 2016)
- [2] http://socialindex.seoul.go.kr (Accessed 6 December 2016)
- [3] C. Johansson and P. Johansson (2003) Particulate matter in the underground of Stockholm, *AE International - Europe*, 37, pp. 3-9.
- [4] P. Aarnio, T. Yli-Tuomi, A. Kousa, T. Ma"kela", et al. (2005) The concentrations and composition of and exposure to fine particle (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system, *Atmospheric Environment*, 39, pp. 5059-5066.
- [5] Y. Cheng, Y. Lin, and C. Liu (2008) Level of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei rapid transit system, *Atmospheric Environment*, 42(31), pp. 7242-7249.
- [6] K. Cheung, W. Kam, N. Daher, and C. Sioutas (2011) Particle concentration (PM₁₀, PM_{2.5}) in subways, light rail trains and platforms in the Los Angeles metro system, *29th Annual Conference, American Association for Aerosol Research*, Portland, Abstract number 397.
- [7] K. Furuya, Y. Kudo, K. Okinaga, M. Yamuki, et al. (2001) Seasonal variation and their characterization of suspended particulate matter in the air of subway stations, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 19(40), pp. 469-485.
- [8] H. J. Jung, B. W. Kim, M. A. Malek, Y. S. Koo, et al. (2012) Chemical speciation of size-segregated floor dusts and airborne magnetic particles collected at underground subway stations in Seoul, Korea, *Journal of Hazardous Materials*, 213-214, pp. 331-340.
- [9] V. Martins, T. Moreno, M. C. Minguillon, B. L. Drooge, et al. (2016) Origin of inorganic and organic components of PM_{2.5} in subway stations of Barcelona, Spain, *Environmental Pollution*, 208, pp. 125-136.
- [10] H. L. Karlsson, L. Nilsson, and 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.
- [11] H. L. Karlsson, A. Holgersson, and L. Moller (2008) Mechanisms related to the genotoxicity of particle in the subway and from other sources, *American Chemical Society*, 21(30), pp. 726-731.
- [12] K. Midander, K. Elihn, A. Wallen, L. Belova, et al. (2012) Characterisation of nano- and micron- sized airborne and collected subway particle, a multi-analytical approach, *Science of the Total Environment*, 427-428, pp. 390-400.
- [13] S. H. Woo, J. B. Kim, M. S. Hwang, G. Tahk, et al. (2016) Diurnal variation of the dust concentration in a railway tunnel, *Journal of the Korean Society for Railway*, 19(3), pp. 280-287.
- [14] K. R. Lee, W. G. Kim, S. H. Woo, J. B. Kim, et al. (2016) Investigation of airflow and particle behavior around a subway train running in the underground tunnel, *Aerosol Science and Technology*, 50(7), pp. 669-678.
- [15] S. H. Woo, J. H. Oh, J. B. Kim, S. J. Yook, G. N. Bae (2016) Performance of saw-plate-type electrostatic precipitator for removal of fine particles in subway tunnels, *International Journal of Advanced Railway*, 4(4), pp. 351-359.

[16] W. C. Hinds (1999) Aerosol Technology, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, p. 136.

(Received 14 February 2017; Revised 9 March 2017; Accepted 5 July 2017)

Sang Hee Woo: T14359@kist.re.kr

Korea Institute of Science and Technology, 5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea

Jong Bum Kim: kjb0810@kist.re.kr

Korea Institute of Science and Technology, 5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea

Hong Ryang Jang: 212001@e-dk.co.kr

DK CO., Ltd., 225-7 Pyeongdongsandan-ro, Gwangsan-gu, Gwangju 62416, Korea

Soon Bark Kwon: sbkwon@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 360-1 Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea

Se-Jin Yook: ysjnuri@hanyang.ac.kr

School of Mechanical Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea

Gwi-Nam Bae: gnbae@kist.re.kr

Korea Institute of Science and Technology, 5, Hwarang-ro 14-gil, Seongbuk-gu, Seoul 02792, Korea