

도시철도 터널 환기구에서의 열차풍에 의한 (초)미세먼지 유입·유출 특성

Characteristics of Inflow and Outflow of Particulate Matters by Train-induced Wind thought Natural Shift in Subway Tunnel

이용일, 허재석¹⁾, 박세찬²⁾, 김종범³⁾, 김정호⁴⁾, 정무현⁵⁾, 박덕신^{1),*}

한강유역환경청 환경감시단, ¹⁾한국철도기술연구원 교통환경연구실,

²⁾(주)나옴 빅데이터연구팀, ³⁾충남연구원 서해안기후연구소,

⁴⁾(주)미세먼지연구소, ⁵⁾한국화학융합시험연구원 대기환경센터

Yongil Lee, Jaeseok Heo¹⁾, Sechan Park²⁾, Jong Bum Kim³⁾, Jeongho Kim⁴⁾,
Muhyun Jung⁵⁾, Duckshin Park^{1),*}

Environmental Inspection Group, Hanriver Basin Environmental Office, Hanam,
Republic of Korea

¹⁾Transportation Environmental Research Department, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Republic of Korea

²⁾Department of Bigdata Research Team, NAOM Inc., Uiwang, Republic of Korea

³⁾Seohae Research Institute, ChungNam Institute, Chungcheongnam-do, Republic of Korea

⁴⁾Fine particle Lab. Co., Ltd., Incheon, Republic of Korea

⁵⁾Air Quality Center, Korea Testing & Research Institute, Gwacheon, Republic of Korea

접수일 2021년 9월 30일
수정일 2021년 12월 27일
채택일 2022년 1월 11일

Received 30 September 2021
Revised 27 December 2021
Accepted 11 January 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-460-5367
E-mail : dspark@krri.re.kr

Abstract The train operation causes a piston effect which generates train-induced wind affects the ventilation volume of the natural ventilation system. This study measured the wind velocity and the concentration of particulate matter (PM) in natural ventilation. In addition, the volume of natural ventilation at subway vent shift and the mass of inflow and outflow PM by train operation were calculated. As a result of the study, the volume of inflow ventilation from urban to subway tunnel is higher than the volume of outflow ventilation. However, the concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} in subway tunnel is about 1.7 to 2.6 times higher than the concentration in the city. Consequently, the mass of PM₁₀ and PM_{2.5} is emitted from the subway tunnel and affect urban air quality.

Key words: Subway, Piston-effect, Ventilation, Train-induced wind, Tunnel

1. 서 론

대도시에서 도시철도는 교통혼잡을 해결하기 위한 주요 대중교통수단으로, 지속적인 확장과 증설이 이뤄지고 있다. 이러한 도시철도는 도시공간의 효율적인 이용을 위하여 대부분 지하에 설치되어 운영되고 있다. 그러나 도시철도로 이용되는 지하 공간은 밀폐된 특징으로 해당 공간 내부에서 생성되거나 환기를 통해 외부에서 유입된 (초)미세먼지 (Particulate mat-

ter less than 2.5 and 10, PM_{2.5} and PM₁₀) 등의 오염물질이 쉽게 누적되어 이용객 및 작업자의 건강을 위협할 수 있는 인자로 작용하고 있다 (Lee *et al.*, 2014; Park *et al.*, 2014).

(초)미세먼지는 세계보건기구 (World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소 (International Agency for Research Cancer, IARC)에 의해 그룹 1인 발암물질로 지정되었다 (WHO, 2013). 도시철도 운행으로 생성된 (초)미세먼지는 수 나노미터 (Nanometer,

nm)부터 수 마이크로미터 (micrometer, μm)까지 다양한 크기를 가지고 있으며 (Lee *et al.*, 2018), 구성성분 대부분이 금속성분인 산화철로 도로, 자동차 및 연소 등의 오염원보다 더욱 해로운 것으로 보고되고 있다 (Gustavsson *et al.*, 2008; Karlsson *et al.*, 2006; Karlsson *et al.*, 2005).

선행 연구 결과에 따르면, 서울 M 역사의 도시철도 터널의 공기질은 미세먼지 (PM_{10}) $213.7 \pm 50.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$) $78.4 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 외기에 비해 PM_{10} 4.8배, $\text{PM}_{2.5}$ 2.5배 높고 철 성분이 PM_{10} 40.3%와 $\text{PM}_{2.5}$ 33.6%를 차지하며, 주로 산화철 형태로 구성되어 있다 (Son and Ryu, 2018; Lee *et al.*, 2018; Jung *et al.*, 2012). 또한 미세먼지의 입자크기가 작을수록 폐에 깊숙이 침투하는데 특히 20~80 nm 크기의 산화철이 인간의 뇌에서 발견된 사례도 보고되었다 (Maher *et al.*, 2016).

서울의 모든 도시철도 지하역사에는 승객의 안전보화와 공기질 개선을 위해 스크린 도어 (Platform Screen Door, PSD)가 설치되었다. 긍정적 효과로 우발적인 사고를 예방하고, 냉난방 효율을 개선하였으며, 터널과 역사를 물리적으로 구분하여 지하역사의 공기질을 획기적으로 저감하였다 (Chung *et al.*, 2016; Son *et al.*, 2014, 2013; Kim *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2010). 다른 측면에서는 PSD가 열차운행으로 발생한 열차풍 (Train-induced Wind)의 이동을 차단함에 따라 본선 터널의 공기질이 악화되었다 (Park *et al.*, 2014; Jung *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2004). 이를 개선하기 위해 도시철도 터널에는 자연 및 기계 환기시스템을 운영하고 있으며, 기계 환기시스템 미가동 시에도 지속적인 환기를 위한 개선공사가 진행되고 있다.

전동차의 피스톤 효과 (Piston effect)는 전동차가 터널을 이동하면서 발생하는 현상으로 지하역사의 공기질과도 밀접한 관련이 있다. 현장측정 및 수치해석을 통해 피스톤 효과는 전동차의 전면부에는 양압을 형성하여 환기구 및 터널 전방으로 기류를 밀어내게 되며, 전동차 후면부에 형성된 음압은 환기구 및 터널 후방으로부터 기류를 끌어당기는 것으로 보고되었다

(Liu *et al.*, 2019; Marta *et al.*, 2014; Kim and Kim, 2009, 2007; Krasnyuk and Lugin, 2007). 이로 인해 열차풍이 발생하고, 자연환기 (Natural ventilation system) 용량에 직접적인 영향을 주어 전동차 1회 운행 시 자연환기구를 통해 약 $2,300 \text{ m}^3$ 가 유출되며, $5,400 \text{ m}^3$ 가 유입된다고 보고하였다 (Lee *et al.*, 2014).

도시철도 터널의 자연환기는 상대적으로 깨끗한 외부 공기를 유입하여 터널 내 오염된 공기를 희석시킬 목적으로 수행되며, 이는 터널에서 전동차의 이동으로 생성된 고농도의 (초)미세먼지가 외부로 배출되는 문제를 초래할 수 있다. 또한 외부 공기가 오염된 경우, 이러한 시스템은 오히려 터널 내의 공기질에 대한 악효과를 유발할 수 있다. 아울러 터널에서 전동차의 이동으로 생성된 고농도의 (초)미세먼지는 기계환기 (Mechanical ventilation system)와 자연환기 시스템이 복합적으로 운영됨에 따라 해당 조건에 따라 지속적으로 누적되는 문제와 누적된 오염물질이 외부로 배출되지 못하고 농축되어 공기질을 더욱 악화시킬 수 있다. 그러므로 환기 조건에 따라 오염물질의 유입과 출입에 대한 사항을 정량화하여 최적의 환기시스템을 유지하는 것이 지하역사 공기질 관리에 중요한 부분이다. 하지만 환기구에서의 환기량에 대한 연구는 수치해석 및 실험을 통해 일부 수행되었으나 (Liu *et al.*, 2019; Lee *et al.*, 2014; Marta *et al.*, 2014; Kim and Kim, 2009, 2007; Krasnyuk and Lugin, 2007), (초)미세먼지의 이동 특성에 대한 연구는 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 도시철도 터널과 외부를 연결하는 자연환기구의 기류 패턴을 파악하고, (초)미세먼지를 측정하여 열차풍에 의한 (초)미세먼지의 유입 및 유출량을 정량화하였다. 추후 본 자료는 지하역사 내에서 최적의 환기시스템 유지관리를 위한 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구 방법

2.1 본선 터널 환기시스템

그림 1과 같이 도시철도 본선 터널에서 사용되는

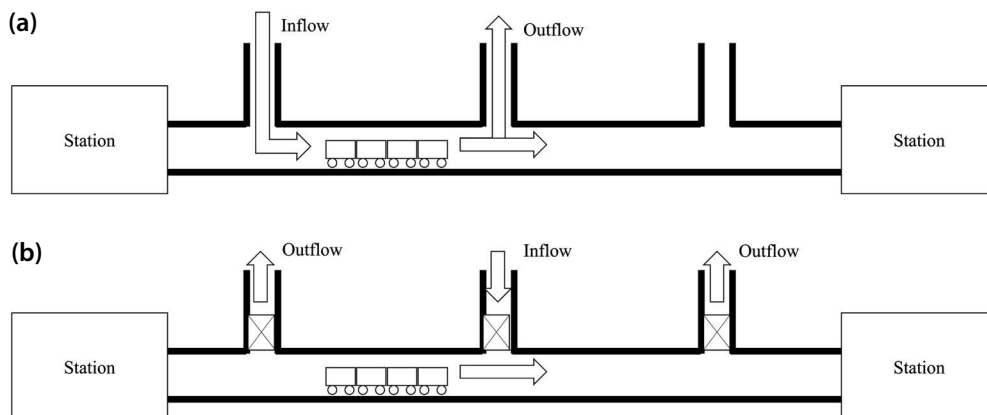


Fig. 1. Schematic diagram of subway ventilation systems: (a) Natural ventilation system, (b) Mechanical ventilation system.

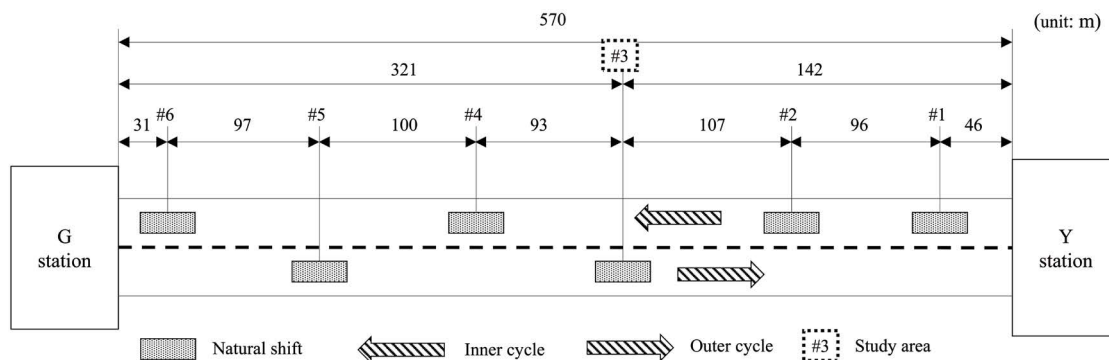


Fig. 2. Schematic diagram of the location of the subway vent shafts between G and Y station of Line 2.

환기시스템은 자연환기 방식과 기계환기 방식으로 구분된다. 자연환기 방식은 전동차 운행 시 발생하는 피스톤 효과에 의해 전동차 전면에서 터널 내의 공기를 외부로 배출하고 후면에서는 외기를 터널 내부로 유입시킨다. 기계환기 방식은 자연환기구에 급·배기 송풍기를 설치하여 터널 내의 환기를 강제로 하는 방식이다. 기계환기 방식은 송풍기의 성능에 따라 환기량을 조절할 수 있으나, 자연환기 방식은 전동차의 운행 속도, 횡수, 터널 구조 등에 따라 환기가 불규칙하며 환기량 조절이 불가능하다.

2.2 자연환경기후 선정

서울 도시철도 2호선은 1980년도에 개통되어 서울

의 중요지역을 이동하는 순환선으로 시계방향으로 순환하는 내선과 시계 반대방향으로 운행하는 외선으로 구분된다. 그리고 2호선의 환기구는 총 235개이며, 그 중 자연환기구가 185개를 차지하고 있다. 본 연구에서는 2호선 본선 터널 중 자연환기구로 구성된 G역과 Y역 구간을 대상으로 선정하였다. 그림 2에 나타낸 바와 같이 G역과 Y역 사이의 터널 길이는 570 m이며, 6개의 자연환기구로 구성되어 있다. 해당 본선 터널의 자연환기구는 거의 균등하게 위치하고 있으며 내선 순환에 4개의 환기구와 외선 순환에 2개의 환기구가 위치해 있다. 자연환기구에서의 풍속은 전동차의 운행속도가 빠를수록 열차풍이 함께 커지며 (Lee *et al.*, 2014; Marta *et al.*, 2014), 이전 연구 결과에서도 본선

터널 중앙에 근접한 #3번 환기구에서 열차풍에 의한 풍속이 #1 및 #2번 환기구보다 약 1 m/s 높았다(Lee *et al.*, 2014). 이는 전동차가 터널구간을 가속, 정속, 감속 형태로 운행하는데, #1과 #2는 가속구간으로 최대속도에 다다르기 전 구간이고, #3의 경우 최대속도로 정속운행을 하는 구간이기 때문이다(Lee *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2000). 측정은 2021년 9월 13일 15:20부터 16:20인 1시간 동안 수행하였으며, 측정기간 동안 전동차는 내선 11회, 외선 9회로 총 20회 운행하였다.

2.3 측정장비

자연환기구에서 열차풍에 의해 발생하는 풍속과 풍향을 파악하기 위하여 표 1에 나타난 바와 같이 풍속계와 차압계를 사용하였다. 그리고 (초)미세먼지의 농도를 측정하기 위하여 Electrical low-pressure impactor (ELPI, Dekati, Finland)를 사용하였다. 그리고 자연 환기구와 주변 공기질의 영향을 비교하기 위하여 G역 인근 도로변 자동측정망(Road Air-Quality Monitoring Stations, RAQMS)의 자료를 수집하였다. 본 연구에서 사용된 ELPI는 코로나 대전기(Charger), 다단 임팩터, 다채널 eletrometer로 구성되어 있다. 다단 임팩터(N1369)는 0.006~9.89 μm 범위의 입자를 총 14단으로 분리하며, 코로나 대전기에서는 유입된 입자를

대전시키고 다단임팩터에서 입자의 관성력을 이용하여 공기역학적 직경으로 입자를 크기별로 분류한다. 그리고 각 임팩터에 설치된 electrometer에서 입자들이 충돌할 때 얻어지는 전류를 측정하여 입자의 개수농도를 산출한다. 흡입유량은 10 L/min이며, 입경별 개수농도를 1초 단위로 측정하여 이를 질량농도로 환산하였다. 이때 밀도는 1 g/m³을 적용하였다. 그리고 HEPA Filter를 사용하여 electrometer의 교정을 수행하였다.

그림 3은 #3번 환기구의 형태와 측정장비의 설치 위치를 나타낸 모식도이다. 그림 3과 같이 #3번 환기구의 상부에 풍속계, 차압계와 ELPI를 설치하였다. 환기구의 크기는 가로 1 m, 세로 4.4 m이며, 4개 구간으로 구분하여 풍속계를 설치하고 “○” 위치에는 차압계와 미세먼지 측정용 프로브를 설치하였다. 그리고 (초)미세먼지 측정 시 정전기에 의한 관로스를 최소화하기 위하여 전도성 튜브를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 풍속 및 차압 측정 결과

그림 4는 #3번 환기구에서 측정된 풍속과 차압을

Table 1. Specifications of the measurement devices and period of the measurement.

Measurement device	Specifications	Measurement period
Velocity sensor (Testo405i)	Measuring rage: 0~30 m/s Accuracy and Resolution: 5% and 0.01 m/s Operative range: -20~ + 50°C Sampling frequency: 1 Hz	
Differential pressure (Testo400)	Measuring rage: -100~200 hPa Accuracy and resolution: 1% (0~25 hPa) and 1.5% (25.1~200 hPa), 0.001 hPa Sampling frequency: 1 Hz	2021-09-13 15:20~16:20
Particulate number and mass concentration, size distribution (Electrical low-pressure impactor)	Size distribution: 14 stages (D ₅₀ *: 9.89, 5.37, 3.66, 2.47, 1.63, 0.91, 0.591, 0.315, 0.169, 0.097, 0.051, 0.034, 0.019, 0.014 and 0.006 μm) Flow rate: 10 L/min Sampling frequency: 1 Hz	

*D₅₀: Impactor cut-off size, Aerodynamic diameter

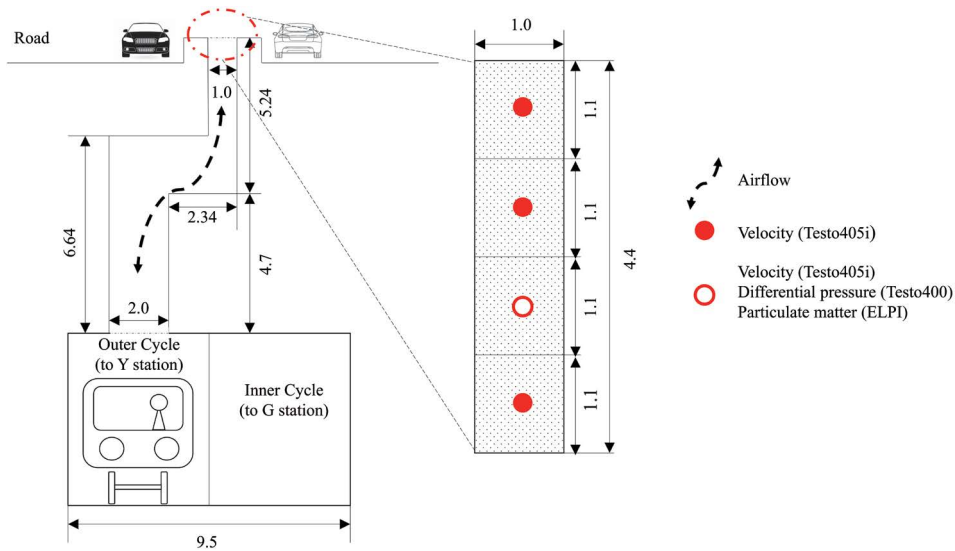


Fig. 3. Schematic diagram of the measurement points at the subway vent shaft #3.

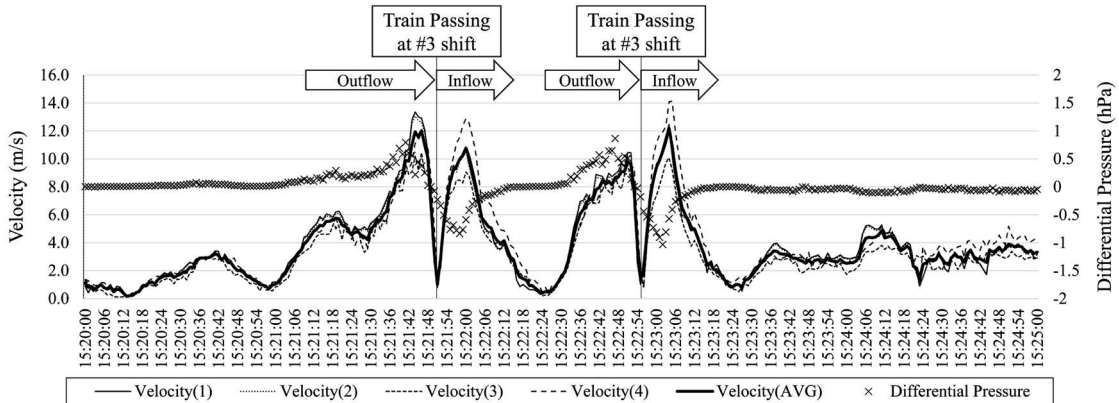


Fig. 4. Results of air velocity (magnitude) and Differential pressure measured though the subway vent shaft #3.

나타내었다. 전동차가 #3번 환기구를 향해 다가올 때 차압이 양압으로 증가하고 풍속도 함께 증가하였으며, 정중앙에서는 풍속과 차압과 풍속이 0에 가깝게 급격히 감소하였다. 정중앙 통과 직후 다시 급격하게 풍속은 증가하고, 차압은 음의 값으로 증가하였다. 이러한 결과를 토대로 측정된 풍속의 평균을 양압일 때에는 “+”를, 음압일 때에는 “-”로 표현하여 그림 5에 나타내었다. 그리고 15:21부터 15:42까지 4회 동안

전동차가 외선에서 먼저 통과하고 약 1분 차이로 내선에서 통과하였으며, 15:55부터 16:16까지는 4회 동안 반대로 내선 통과 후 외선에서 전동차가 통과하여 내선 및 외선에서 발생한 열차풍의 사례를 4회씩 선별하였다. 마지막으로 선별된 내 외선의 사례에 대한 풍속을 평균하여 그림 6에 표현하였다. 전동차 통과 시점을 기준으로 열차풍이 발생하여 풍속이 두드러지게 증가하는 시점은 외선 -21초, 내선 -26초, 전동차

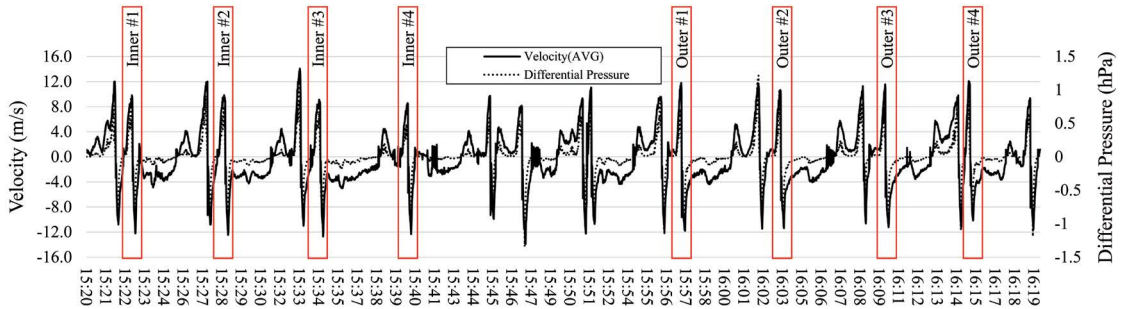


Fig. 5. Velocity (vector) and Differential pressure measured through the subway vent shaft #3.

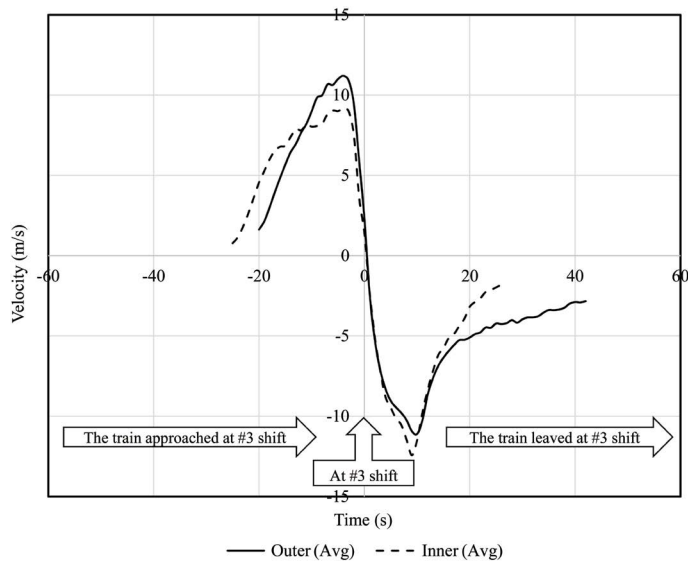


Fig. 6. Average of air velocity in outer and inner cases.

통과 후 풍속이 완만해지는 시점은 외선 42초, 내선 26초로 이전 연구 결과(Lee *et al.*, 2014)와는 최대 유출 및 유입속도와 전동차 통과 후 풍속이 완만해지는 시점에서 차이를 보였다. 이는 현장측정에 따른 주변 환경 요인과 전동차 운행시간 및 전동차 교행 등의 차이로 볼 수 있다(Lee *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2003).

표 2에 나타난 바와 같이 자연환기구조에서 평균 및 최대 유출속도는 외선에서 각각 7.2 ± 3.2 와 11.2 m/s로 나타났고, 내선에서는 각각 6.1 ± 2.8 과 9.2 m/s로 나타났다. 평균 및 최대 유입속도는 외선 5.6 ± 2.5 및 11.1 m/s와 내선 6.2 ± 3.4 및 12.4 m/s로 나타났다. 측정

대상인 자연환기구조가 본선 터널 중 외선에 바로 연결되어 있어 외선의 유출속도가 내선보다 1.1 m/s 높게 나타났다.

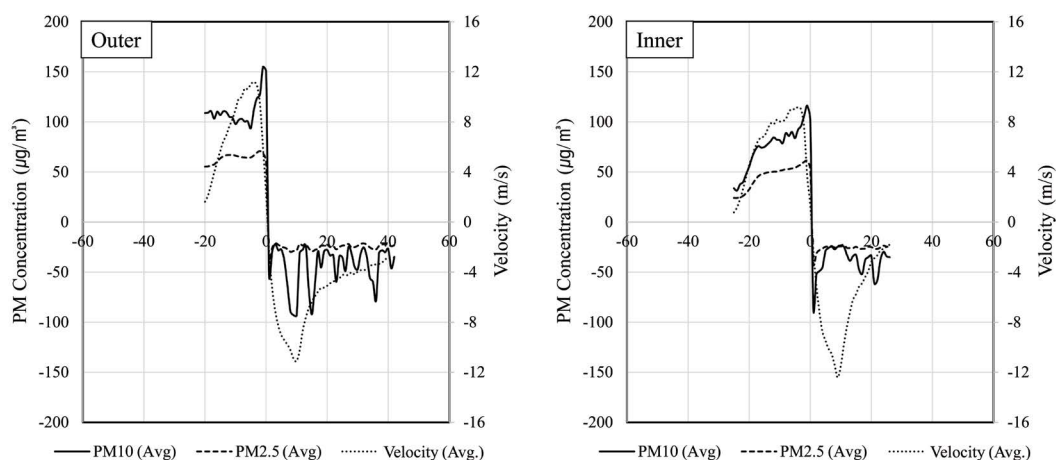
3.2 (초)미세먼지 측정 결과

그림 7은 내선 및 외선에 대한 (초)미세먼지의 농도와 풍속을 나타내었다. 내·외선 모두 열차풍에 의해 도심지의 공기가 터널로 유입될 때보다 터널 공기가 도심지로 유출될 때 (초)미세먼지 농도가 높게 나타났다. 또한 열차풍이 발생한 시점에서 유출속도가 높아질수록 (초)미세먼지의 농도가 증가하는 경향을 보

Table 2. The result of velocity and particulate matter at vent shaft #3.

Classification		Velocity (m/s)		PM ₁₀ (μg/m ³)		PM _{2.5} (μg/m ³)	
		Avg.	Max	Avg.	Max	Avg.	Max
Outer	Outflow	7.2 ± 3.2	11.2	111.7 ± 15.7	155.2	63.9 ± 4.5	70.9
	Inflow	5.6 ± 2.5	11.1	44.1 ± 20.8	93.4	24.9 ± 3.3	39.5
Inner	Outflow	6.1 ± 2.8	9.2	75.2 ± 22.4	116.3	45.6 ± 11.7	61.0
	Inflow	6.2 ± 3.4	12.4	39.0 ± 14.5	86.8	26.2 ± 3.7	42.2
RAQMS*		—	—	33	—	10	—

*RAQMS: Road Air-Quality Monitoring Station near Y station

**Fig. 7.** PM and Air velocity through the vent shaft #3.

였다. 이와 반대로 유입 시 속도변화에 따른 (초)미세먼지의 농도 변화는 크지 않았다. 이는 유출되는 (초)미세먼지가 자연환기구 상부로 직접 배출되며, 유입 시에는 배출된 공기 일부와 자연환기구 주변 공기를 흡입하여 이러한 차이를 나타내는 것으로 사료된다. 표 2에 나타난 바와 같이 유출되는 PM₁₀의 평균 및 최대농도는 각각 외선 111.7 ± 15.7 , $155.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 내선 75.2 ± 22.4 , $116.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, PM_{2.5}는 외선 63.9 ± 4.5 , $70.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 내선 45.6 ± 11.7 , $61.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 기존 문헌에서 본선 터널의 (초)미세먼지 농도는 PM₁₀ $213.7 \pm 50.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} $78.4 \pm 8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 (Lee et al., 2018) 본 연구의 최대 유출농도가 약간 낮았으나, 본선 터널의 (초)미세먼지가 외부로 유출되고 있

음을 확인할 수 있었다. 그리고 유입되는 PM₁₀의 평균 및 최대농도는 외선 44.1 ± 20.8 , $93.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 내선 39.0 ± 14.5 , $86.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, PM_{2.5}는 외선 24.9 ± 3.3 , $39.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 내선 26.2 ± 3.7 , $42.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었다. 해당 시간의 G역 인근 RAQMS에서는 PM₁₀ $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 수준으로 자연환기구에서 유입되는 (초)미세먼지의 농도가 약 1.3~2.6배 높아 자연환기구 인근의 공기질이 상대적으로 나쁜 것을 확인하였다. 이러한 결과는 고농도의 터널 (초)미세먼지가 자연환기구를 통해 배출되고 주변의 공기질에 영향을 미치고 있으며, 상대적으로 저농도의 외기 (초)미세먼지가 본선 터널로 유입되고 있음을 알 수 있었다.

#3번 환기구를 통해 유출 및 유입되는 (초)미세먼

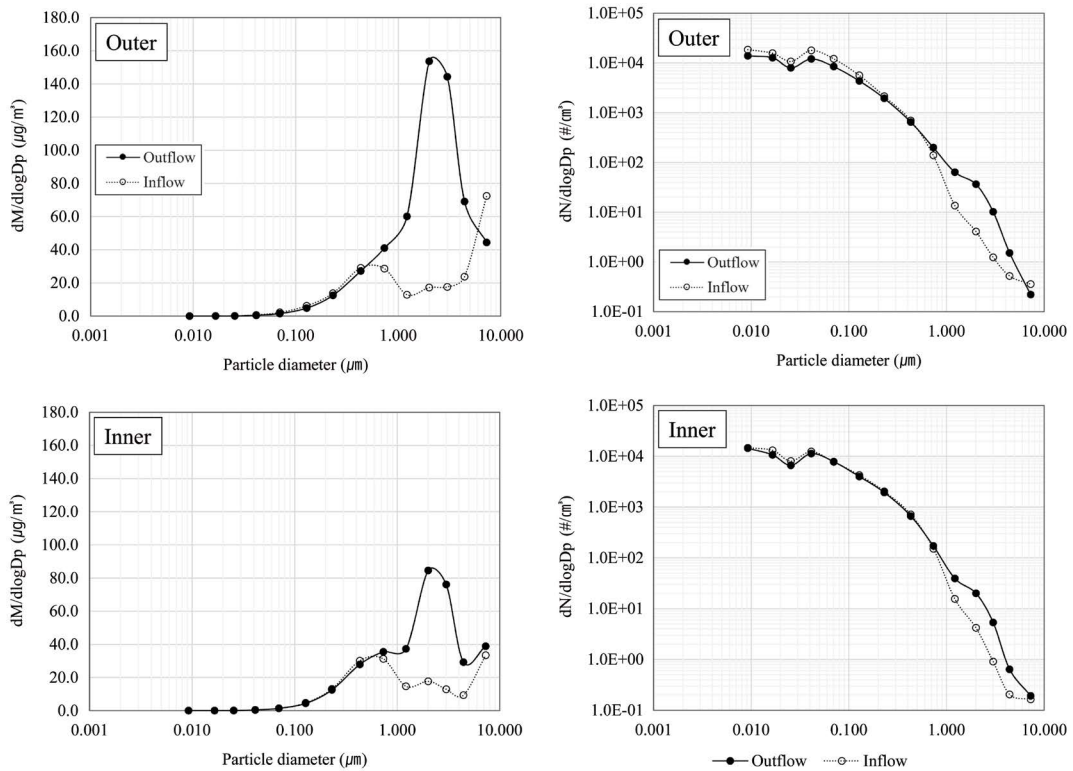


Fig. 8. Size distribution of Particulate matter and number each cases at vent shaft #3.

지의 질량 및 개수농도에 대한 입경분포를 log-normal로 그림 8에 나타내었다. 내선 및 외선 모두 0.733 μm 이상부터 유출 시 질량농도와 개수농도가 유입 시보다 두드러지게 높게 나타났으며, 2.007 μm 에서 유출 및 유입 질량농도의 차이가 136.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 크게 나타났다. 이는 터널 내 (초)미세먼지의 주요 오염원인 휠-레일-브레이크 마모에 의해 생성된 조대입자의 영향으로 파악된다(Lee *et al.*, 2019; Namgung *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2014). 그리고 0.431 μm 이하에서는 유입 시의 개수농도가 유출 시보다 외선 21,342개/ cm^3 , 내선 5,499개/ cm^3 만큼 약간 높았다. 특히 외선 및 내선에서 각각 0.041 μm 와 0.017 μm 의 입경에서 5,829.4개/ cm^3 와 1,405.8개/ cm^3 의 최대 차이를 나타내었다. 터널에서의 나노입자는 전동차 운행 시 휠-레일 마모, 전차선-판토그래프의 단락에 의한 아크방전 등에 의해 일부 생성되나(Lee *et al.*, 2019), 도로변 자동

차에서 배출되는 나노입자의 영향이 더 큰 것으로 보인다(Lee *et al.*, 2021; Belkacem *et al.*, 2020; Zeraati-Rezaei *et al.*, 2020).

3.3 자연환기구에서의 (초)미세먼지 유·출입량 산정

(초)미세먼지의 유·출입량을 산정하기 위해 #3번 환기구에서의 공기 유·출입량을 먼저 산출하였다. 표 3에 나타난 바와 같이 #3번 환기구에서 전동차 1대가 해당 구간을 공기 유출량 및 유입량은 외선 운행 시 666.7 m^3 와 1,029.4 m^3 로 나타났고, 내선 운행 시 각각 700.7 m^3 와 710.0 m^3 로 산정되었다. 수치해석을 통해 공기량을 산출한 이전 연구와는 내·외선에서의 공기 유·출입량이 0.6~1.4배의 차이를 보였지만 유입 및 유출 패턴은 유사하였다(Lee *et al.*, 2014). 결과적으로 전동차 운행 시 열차풍에 의한 #3번 환기구의 환기량

Table 3. The quantification of volume and mass of PM at the subway vent shift #3.

Classification		Flow rate (m ³ /s)	Total volume (m ³)		Total mass of PM ₁₀ (mg)*	Total mass of PM _{2.5} (mg)
			This study	Lee <i>et al.</i> , 2014		
Outer	Outflow (a)	31.7	666.7	490.42	74.4	42.6
	Inflow (b)	24.5	1,029.4	920.93	45.4	25.7
	(a)–(b)	–	–362.7	–430.51	29.1	16.9
Inner	Outflow (a)	26.9	700.7	498.96	52.7	32.0
	Inflow (b)	27.3	710.0	1,245.09	27.7	18.6
	(a)–(b)	–	–9.4	–746.13	25.0	13.4

*1 time of train passing at the subway vent shift #3

은 외선 및 내선 운행 시 362.7 m³와 9.4 m³으로 도심지의 공기가 터널로 유출되고 있음을 알 수 있었다.

식 (1)에 산출된 공기의 유·출입량을 적용하여 (초)미세먼지의 유·출입량을 산정하였다. #3번 환기구에 서의 (초)미세먼지 유출량은 외선 PM₁₀ 74.4 mg, PM_{2.5} 42.6 mg, 내선 PM₁₀ 52.7 mg, PM_{2.5} 32.0 mg으로 전동차 운행에 의해 생성된 마모입자들이 주로 배출되며, 유입량은 외선 PM₁₀ 45.4 mg, PM_{2.5} 25.7 mg, 내선 PM₁₀ 27.7 mg, PM_{2.5} 18.6 mg으로 외기로 배출된 일부 마모입자 및 자동차 배출 입자상물질 등이 유입되었다. 이는 환기량과는 상반된 결과로 도심지의 공기가 터널로 유입되고 있음에도 불구하고 본선 터널의 (초)미세먼지의 농도가 도심지보다 약 1.7~2.6배 높아 본선 터널에서 배출되는 (초)미세먼지가 유입 시보다 높았다.

결과적으로 전동차 1대가 G 역사에서 Y 역사로 이동하면서 #3번 환기구를 통해 PM₁₀ 25.0~29.1 mg, PM_{2.5} 13.4~16.9 mg을 배출하며, 2호선의 1일 평균 운행횟수인 540회를 적용하면 PM₁₀ 13.5~15.7 g/day, PM_{2.5} 7.2~9.1 g/day가 외기에 배출되어 도심지의 공기질에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

$$M_{in,out} = Q_{in,out} C_{in,out} T_{in,out} \div 1000 \quad (1)$$

Q: In- and outflow rate (m³/s), $Q = AV_{in,out}$

A: Shift #3 Area (4.4 m²)

V: Velocity (m/s)

M: Mass of Particulate matter (mg)

C: Concentration of Particulate matter (μg/m³)

T: Time of in- and outflow (s)

4. 결 론

본 연구에서는 외기 및 지하철 터널 간의 (초)미세먼지의 유입 및 유출 특성을 파악하기 위하여 본선 터널에 연결되어 있는 자연환기구에서 풍속, 차압, (초)미세먼지 농도 및 입경분포를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전동차 1회 운행 시의 열차풍에 의해 외선 운행 시 362.7 m³, 내선 운행 시 9.4 m³의 공기가 도심지에서 터널로 유입되나, 본선 터널의 (초)미세먼지 농도가 도심지보다 약 1.7~2.6배 높아 결과적으로 본선 터널의 (초)미세먼지가 더 많이 배출되었다.

(2) 유입 및 유출 시의 (초)미세먼지 입경분포 비교를 통하여 터널 내에서 마모에 의해 생성된 약 2 μm의 마모입자가 주로 도심지로 유출되었으며, 외기로 배출된 일부 마모입자 및 약 0.04 μm의 자동차 배출 입자상물질 등이 유입되고 있다.

(3) 대상 구간 내 6개 자연환기구 중 1개 지점의 자연환기구에서 전동차 운행으로 생성된 열차풍으로 PM₁₀ 13.5~15.7 g/day, PM_{2.5} 7.2~9.1 g/day가 배출되어 도심지의 공기질에 영향을 미치고 있는 것으로 판단되며, 이에 대한 대책 마련이 요구된다.

본 연구에서는 본선 터널의 6개 자연환기구 중 1개

지점만을 측정하여 해당 구간에 대한 전체 배출량 및 유입량을 산정할 수는 없었으나, 터널 내 생성된 (초)미세먼지가 자연환기구를 통하여 지속적으로 배출되고 도심지의 (초)미세먼지가 유입되고 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 이는 도시철도 터널의 고농도 (초)미세먼지가 지하역사의 실내공기질뿐만 아니라 서울 도심지의 공기질에도 악영향을 미치고 있으며, 터널 내 오염물질을 저감해야 하는 필요성을 보여주고 있다. 향후 도시철도 환기시스템의 환기량에 대한 추가 조사와 터널 내 (초)미세먼지의 다양한 저감기술이 적용된다면, 도심지 및 지하역사의 공기질 개선 대책 수립에 도움이 될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

서울특별시 서울산업진흥원 <서울글로벌챌린지 2021> 사업을 통해 우수 논문으로 선정되어 작성된 논문입니다.

References

- Belkacem, I., Khaldi, S., Helali, A., Slimi, K., Serindat, S. (2020) The influence of urban road traffic on nanoparticles: Roadside measurements, *Atmospheric Environment*, 242, 117786. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117786>
- Chung, Y.W., Kang, S.J., Matsubayashi, T., Sawada, Y., Ueda, M. (2016) The effectiveness of platform screen doors for the prevention of subway suicides in South Korea, *Journal of Affective Disorders*, 194, 80-83. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2016.01.026>
- Gonzalez, M.L., Vega, M.G., Fernández-Oro, J., Marigorta, E.B. (2014) Numerical modeling of the piston effect in longitudinal ventilation systems for subway tunnels, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.09.008>
- Gustavsson, P., Bigert, C., Pollan, M. (2008) Incidence of Lung Cancer Among Subway Drivers in Stockholm, *American Journal of Industrial Medicine*, 51(7), 545-547. <https://doi.org/10.1002/ajim.20584>
- Jung, H.J., Kim, B., Ryu, J., Maskey, S., Kim, J.C., Sohn, J., Ro, C.U. (2010) Source identification of particulate matter collected at underground subway stations in Seoul, Korea using quantitative single-particle analysis, *Atmospheric Environment*, 44, 2287-2293. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.04.003>
- Jung, H.J., Malek, B.A., Koo, Y.S., Jung, J.H., Son, Y.S., Kim, J.C., Kim, H.K., Ro, C.U. (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, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.006>
- Karlsson, H.L., Ljungman, A.G., Lindbom, J., Moller, L. (2006) Comparison of genotoxic and inflammatory effects of particles generated by wood combustion, a road simulator and collected from street and subway, *Toxicology Letters*, 165, 203-211. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2006.04.003>
- Karlsson, H.L., Nilsson, L., Moller, L. (2005) Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells, *Chemical Research in Toxicology*, 18(1), 19-23. <https://doi.org/10.1021/tx049723c>
- Kim, J.Y., Kim, K.Y. (2007) Experimental and numerical analyses of train-induced unsteady tunnel flow in subway, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(2), 166-172. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2006.06.001>
- Kim, J.Y., Kim, K.Y. (2009) Effects of vent shaft location on the ventilation performance in a subway tunnel, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 97(5-6), 174-179. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.06.002>
- Kim, K.H., Ho, D.X., Jeon, J.S., Kim, J.C. (2012) A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station, *Atmospheric Environment*, 49, 219-223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.058>
- Kim, S.D., Song, J.H., Lee, H.K. (2004) Estimation of Train - Induced Wind Generated by Train Operation in Subway Tunnels, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 16(7), 652-657, (in Korean with English abstract).
- Krasyuk, A.M., Lugin, I.V. (2007) Investigation of the dynamics of air flows generated by the disturbing action of trains in the metro, *Journal of Mining Science*, 43(6), 655-661. <https://doi.org/10.1007/s10913-007-0072-9>
- Lee, K.B., Park, J.S., Oh, M.D., Bae, S.J., Kim, S.D. (2014) Field measurement and estimation of ventilation flow rates by using train-induced flow rate through subway vent

- shafts, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(7), 2677-2686. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0624-2>
- Lee, K.-H., Kim, S.-M., Hu, C.-G. (2021) Roadside Aerosols Size Distribution Characteristics in Jeju City, *Journal of Environmental Science International*, 30(9), 727-739, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5322/JESI.2021.30.9.727>
- Lee, T.J., Jeon, J.S., Kim, S.D., Kim, D.S. (2010) A comparative study on PM₁₀ source contributions in a Seoul metropolitan subway station before/after installing platform screen doors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 26(5), 543-553, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2010.26.5.543>
- Lee, Y., Choi, K., Jung, W., Versoza, M.E., Barabad, M.L.M., Kim, T., Park, D. (2018) Generation Characteristics of Nanoparticles Emitted from Subways in Operation, *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 2230-2239. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0439>
- Lee, Y., Lee, Y.C., Kim, T., Choi, J.S., Park, D. (2018) Sources and characteristics of particulate matter in subway tunnels in Seoul, Korea, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11), 2534. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112534>
- Li, J.S.M., Chow, W.K. (2003) Numerical studies on performance evaluation of tunnel ventilation safety systems, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 435-452. [https://doi.org/10.1016/S0886-7798\(03\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0886-7798(03)00023-3)
- Liu, M., Zhu, C., Zhang, H., Zheng, W., You, S., Campana, P.E., Yan, J. (2019) The environment and energy consumption of a subway tunnel by the influence of piston wind, *Applied Energy*, 246, 11-23. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.026>
- Maher, B.A., Ahmed, I.A.M., Karloukovski, V., MacLaren, D.A., Foulds, P.G., Allsop, D., Mann, D.M.A., Torres-Jardon, R., Calderon-Garciduenas, L. (2016) Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 10797-10801. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605941113>
- Namgung, H.K., Song, J.H., Kim, S.Y., Kim, H.M., Kwon, S.B. (2016) Characteristics of indoor air quality in the overground and underground railway stations, *Journal of the Korean Academia-Industrial*, 17(5), 17-25, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.5.17>
- Park, D., Lee, T., Hwang, D., Jung, W., Lee, Y., Cho, K., Kim, D., Lee, K. (2014) Identification of the sources of PM₁₀ in a subway tunnel using positive matrix factorization, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64, 1361-1368. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.950766>
- Son, Y.S., Jeong, J.S., Lee, H.J., Ryu, I.C., Kim, J.C. (2014) Installation of platform screen doors and their impact on indoor air quality: Seoul subway trains, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(9), 1054-1061. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.923350>
- Son, Y.S., Rue, J.Y. (2018) Technological Advances for Particulate Matter Collection in Subway System, *Prospectives of Industrial Chemistry*, 21(2), 24-34. <https://doi.org/10.7464/ksct.2020.26.1.13>
- Son, Y.S., Salama, A., Jeong, H.S., Kim, S., Jeong, J.H., Lee, H., Sunwoo, Y., Kim, J.C. (2013) The effect of platform screen doors on PM₁₀ levels in a subway station and a trial to reduce PM₁₀ in tunnels, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 7(1), 38-47.
- World Health Organization (WHO) (2013) Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution - REVIHAAP Project: Technical Report; WHO: Copenhagen, Denmark.
- Zeraati-Rezaei, S., Alam, M.S., Xu, H., Beddows, D.C., Harrison, R.M. (2020) Size-resolved physico-chemical characterization of diesel exhaust particles and efficiency of exhaust aftertreatment, *Atmospheric Environment*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117021>

Authors Information

- 이용일 (한강유역환경청 환경감시단 환경연구사)
(freego83@korea.kr)
- 허재석 (한국철도기술연구원 교통환경연구실 연구원)
(jsheo1005@krri.re.kr)
- 박세찬 (주)나옴 빅데이터연구팀 과장) (sechani3871@naver.com)
- 김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소 책임연구원)
(kjb0810@cni.re.kr)
- 김정호 ((주)미세먼지연구소 소장) (jeonghoflux@naver.com)
- 정무현 (한국화학융합시험연구원 대기환경센터 책임연구원)
(dew1029@ktr.or.kr)
- 박덕신 (한국철도기술연구원 교통환경연구실 실장)
(dspark@krri.re.kr)