



## • 특집 • 삶의 질 향상을 위한 환경 모니터링 정밀 측정 기술 (Precision Measurement Technology for Environmental Monitoring to Improve Quality of Life)

# 휠-레일 접촉 시험기를 활용한 다양한 열차 속도에서의 살수 방법의 공기 질 향상 효과 측정 및 분석

## Measurement and Analysis of Air Quality Improvement Effects of Applying Water Methods at Various Train Velocities Using a Twin-disk Rig

이현욱<sup>1,2,#</sup>  
HyunWook Lee<sup>1,2,#</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 교통환경연구실 (Department of Transportation Environmental Research, Korea Railroad Research Institute)

<sup>2</sup> 과학기술연합대학원대학교 교통시스템공학부 (Transportation System Engineering, University of Science and Technology)

# Corresponding Author / E-mail: hwlee@krii.re.kr, TEL: +82-31-460-5690

ORCID: 0000-0001-7142-6744

KEYWORDS: Air quality (공기 질), Train velocity (열차 속도), Nano-sized wear particles (나노 마모 입자), Applying tap water (수돗물 살수), Airborne wear particles (미세 마모 입자), Wheel-rail contacts (휠-레일 접촉)

*This study investigated the effectiveness of tap water application in reducing nano-sized wear particles at a wheel-rail contact interface and its impact on air quality at different train velocities. Airborne wear particles (AWPs) were simulated using a twin-disk rig at 500, 800, and 1,300 RPM. Mass concentration of nano-sized wear particles was measured using a fast mobility particle sizer (FMPS) at a sampling frequency of 1 Hz. To simulate various vehicle dynamics and contact conditions, the slip rate was incrementally increased from 0 to 3%. During wet conditions, water was applied at a rate of 7 L/min. PM0.1 and PM0.56 under dry and wet conditions were compared to evaluate the method's effectiveness. The analysis showed that the tap water application method improved the air quality by reducing PM0.56 by at least 74% and PM0.1 by approximately 80%. In conclusion, the water application method can effectively improve air quality by reducing generation of nano-sized wear particles. The train velocity affected the generation of nano-sized wear particles under both conditions.*

Manuscript received: June 25, 2024 / Revised: July 23, 2024 / Accepted: July 26, 2024

### 1. 서론

지하철 시스템의 공기는 철도 차량 운행 중 발생하는 비 배기(Non-exhaust) 미세 먼지(Particulate Matter, PM), 즉 마찰면에서 발생하는 미세 마모 입자(Airborne Wear Particles)에 의해 심하게 오염되어 있다. 국내 철도 차량은 회생 제동을 주로 사용하므로 이러한 비 배기 미세 먼지의 주된 원인은 휠-레일 접촉(Wheel-rail Contact)면에서 발생하는 미세 마모 입자들이다.

이러한 미세 마모 입자들은 다양한 중금속을 포함하고 있어 인체에 유해하다[1-5]. 입자는 작을수록 인체 침투가 용이하고 장기에 쌓여 다양한 질병의 원인이 될 수 있어[6-8] 미세 마모 입자 저감 기술 개발을 통해 지하철 시스템의 공기 질을 향상시키는 것은 승객 및 작업자의 건강 향상을 위하여 아주 중요하다.

미세 먼지 저감 연구는 주로 필터(Filter) 또는 집진기(Dust Collector) 개발 등 발생된 미세 마모 입자를 줄이는 후처리(Post-processing) 기술 연구가 대부분으로, 지하철 미세 마모 입자

저감 연구 또한 다르지 않다. 이 방법이 효과를 보기 위해서는 지하철 터널 전라인에 연속적으로 설치를 해야 한다. 이는 비용(설치 및 유지 보수) 및 새로운 인력 투입 등 다양한 현실적인 문제에 부딪혀 실제 적용하지 못하고 있다. 또한, 후처리 방법만으로는 열차 주행 중 지속적으로 발생하고[9,10] 있는 미세 마모 입자를 제거하는데 한계가 있다. 따라서, 미세 마모 입자 발생 자체를 줄일 수 있는 전 처리(Pre-processing) 기술 개발이 반드시 필요하다.

전 세계적으로 휠-레일 접촉 미세 마모 입자 발생 관련 연구는 아주 드물다. 또한, 저감 관련 전 처리 기술 연구는 본 저자가 유일하다. Lee는 열차 속도[9] 및 하중[10]이 미세 마모 입자 발생량 및 발생 특성에 미치는 영향을 확인하였다. 또한, Lee[11,12]는 1 μm 이하의 입자들이 열적 마모(Thermal Wear) 과정[13]에서 주로 발생하는 것에 착안하여, 휠-레일 접촉면에 물을 뿌려 접촉 온도를 낮추는 방법의 효과를 Twin-disk 시험기를 활용하여 수 농도(Number Concentration, Unit: #/cm<sup>3</sup>) 관점에서 확인하였다. 이를 통해 살수 방법이 미세 마모 입자 발생 수 농도 저감에 효과가 있음을 확인하였고, 특히 마이크로 마모 입자 발생 저감에 매우 효과적임을 확인하였다.

공기 질(Air Quality)의 관점에서는 수 농도가 아닌 질량 농도(Mass Concentration, Unit: μm/m<sup>3</sup>)가 사용된다. 일반적으로 입자가 작을수록 발생 수는 많지만 질량에서 차지하는 비중은 작다. 마이크로 마모 입자의 경우 입자 수는 절대적으로 매우 적게 발생하지만, 전체 발생 입자의 질량에서 차지하는 비중은 거의 대부분을 차지한다. 따라서, 질량 농도의 특성은 수 농도 특성과는 다른 경향을 보인다.

최근 미세 먼지가 사회적 이슈가 되고 있어 공기 질에 대한 국민적 관심이 높아지고 있다. 또한, 작은 입자, 특히 작은 미세 마모 입자의 인체 유해성이 부각됨에 따라 공기 질 모니터링은 PM10에서 PM1으로까지 이어지고 있다. 참고로, PM10은 10 μm 이하 입자들의 질량 농도 합을, PM1은 1 μm 이하 입자들의 질량 농도 합을 의미한다. 따라서, 본 연구는 미세 마모 입자 발생 저감 전 처리 기술인 수도물 살수 방법의 나노 마모 입자 발생 저감 효과를 공기 질 측면에서 확인하고, 이에 대한 열차의 속도 영향도 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

본 논문은 참고 문헌[14]의 연속 연구로써 다양한 회전 속도에서의 공기 질 향상 특성을 확인한 연구이다. 따라서, 본 논문에서는 실험 방법에 대해서 간략히 설명하였다. 자세한 내용은 참고 문헌들[9-12,14]을 참고하길 바란다.

2.1 휠-레일 접촉 시험기 및 시편

Fig. 1에 나타나 있는 Twin-disk 시험기 및 고탄소강(SSW-Q1R)으로 만들어진 3000의 휠 및 레일 시편을 이용하여 휠-레일

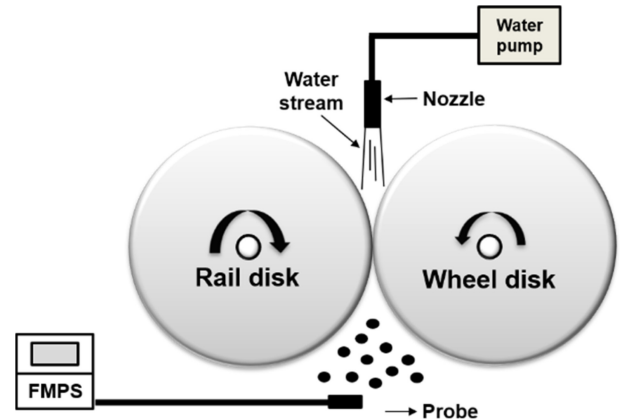


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Chemical compositions of the wheel and rail disks [14] (Adapted from Ref. 14 on the basis of OA)

Chemical compositions [wt%]	
Wheel & rail	
C	0.62
Si	0.25
Mn	0.80
P	0.016
S	0.017
Cu	0.07
Ni	0.04
Cr	0.10
Mo	0.02

Table 2 Hardness and Initial surface roughness of the wheel and rail disks [14] (Adapted from Ref. 14 on the basis of OA)

	Hardness (HB)	Initial surface roughness (Ra)
Wheel	285	0.24±0.05 μm
Rail	293	0.26±0.08 μm

접촉면에서의 미세 마모 입자 발생 모사 시험을 수행하였다. 휠 시편은 편평한(Flat) 한 트레드(Tread)를 가지고 레일 시편은 UIC60 헤드 프로파일(Head Profile)을 가진다. 시편의 화학 조성 및 경도, 초기 거칠기 정보는 Tables 1 및 2에 각각 나타나 있다.

2.2 실험 셋업

Fig. 1에 실험 셋업이 나타나 있다. 프로브(Probe)를 휠-레일 접촉 점 바로 아래에 위치시켜 접촉면에서 발생하는 미세 마모 입자들을 바로 흡입하여 질량 농도를 측정할 수 있도록 하였다. 동적으로 변하는 시험 조건에서 발생하는 미세 마모 입자의 질량 농도 측정을 위해서 Fast Mobility Particle Sizer (FMPS) (TSI 3091, USA)를 활용하여 센서의 최대 측정 속도(Sampling

Frequency)인 1 Hz로 질량 농도를 측정하였다. FMPS는 입자 운동성(Mobility) 특성의 차이를 이용하여 5.6-560 nm 범위의 입자들을 32개의 채널로 나누어 측정하는 센서이다.

2.3 실험 조건

전 처리 기술인 수돗물 살수 방법의 공기 질 효과를 검증하기 위하여 건조 조건(Dry Condition) 및 살수 조건(Wet Condition)에서 미세 마모 입자 발생 모사 시험을 수행하였다. 열차 속도에 따른 영향을 확인하기 위하여 회전속도 500, 800 및 1300 RPM에서 시험을 수행하였다. 각 회전 속도는 열차 속도 28, 45, 73 km/h에 해당한다. 직선 및 곡선 주행, 브레이킹(Breaking) 등 다양한 철도 차량 동역학 조건은 슬립률(Slip Rate)로 대표하여 표현할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 조건에서의 미세 마모 입자 발생 모사를 위하여 슬립률을 0-3%까지 선형으로 연속적으로 변화시켜 실험을 진행하였다. 참고로, 0-3%의 슬립률은 구름/미끄럼 접촉(Rolling/Sliding Contact) 및 순수 미끄럼 접촉(Pure Sliding Contact) 모두를 모사할 수 있으므로, 위에서 언급한 다양한 철도 차량 동역학 조건들이 포함되는 슬립 조건이다. 슬립률은 식(1)과 같이 정의된다.

$$Slip\ rate = \frac{V_w - V_r}{V_r} \times 100 \tag{1}$$

여기서,  $V_w$  및  $V_r$ 은 각각 휠 및 레일 시편의 선속도를 의미한다. 15 kN의 하중이 인가되었고, 이때 발생하는 최대 Hertzian 압력(Maximum Hertzian Pressure)는 약 1,200 MPa이다. 수돗물은 실험 시작과 동시에 7 L/min의 양으로 접촉면에 뿌려졌다.

2.4 실험 절차

실험 절차는 다음과 같다.

- a) 이미 존재하는 주변 미세 먼지의 영향을 제거하기 위하여 15초간 주변 미세 먼지 질량 농도를 각 입자 크기별로 측정(백그라운드 영역)
  - b) 두 시편 접촉 후 30초 동안 두 시편의 회전 속도를 500, 800, 1300 RPM 등의 타깃 회전 속도까지 선형으로 증가(가속 영역)
  - c) 타깃 회전 속도에 도달 후 레일 시편 회전 수는 타깃 RPM 유지, 휠 시편 회전 속도는 각 회전 속도의 슬립률 3%에 해당하는 515, 824, 1,339 RPM까지 120 초 동안 증가 (슬립 영역)
  - d) 45초간 두 시편의 회전 속도 감속 후 정지(감속 영역)
- 위의 절차대로 건조 및 살수 조건에서 실험은 두 번씩 반복 수행하였다.

2.5 데이터 분석

본 연구에서는 차량 동역학과 연관된 슬립 구간이 관심 영역이므로, 슬립 구간에서 측정된 입자의 질량 농도 데이터만 분석에 활용하였다. 백그라운드 영역에서 15초 동안 측정된 각 입자 크기에서의 질량 농도 평균값을 슬립 구간에서 측정된 각 입자

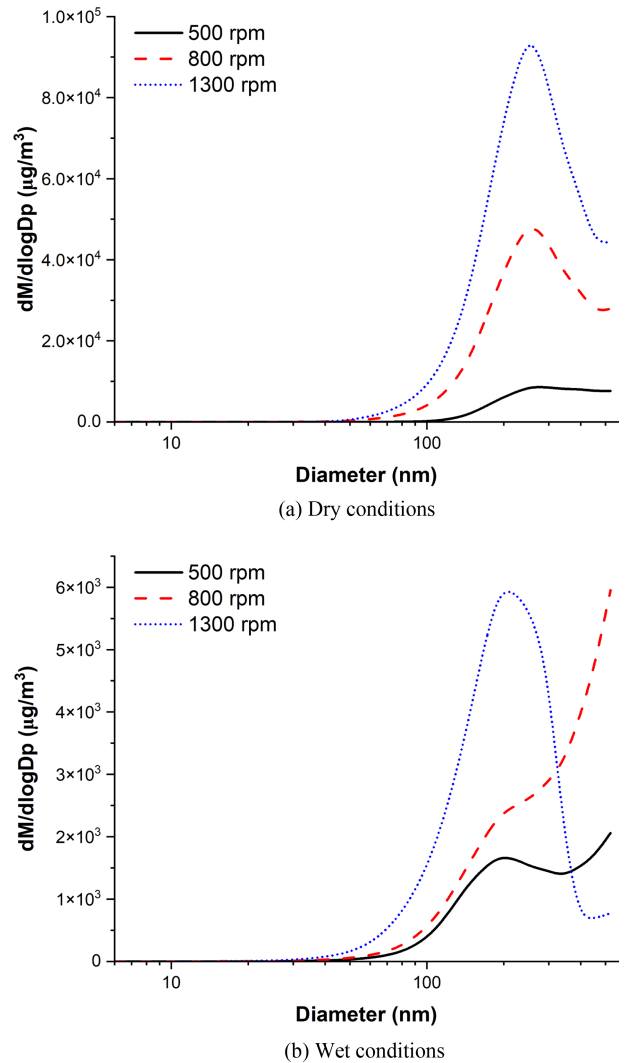


Fig. 2 Particle size distribution for dry and wet conditions

크기에서의 질량 농도에서 빼 주어 시험 전에 존재했던 미세 먼지의 영향을 제거하였다. 두 번 반복 수행된 시험 결과의 평균값을 구하여 미세 마모 입자 발생 저감 효과 분석을 수행하였다. 발생 감소율은 식(2)를 활용하여 계산하였다. 각 입자 크기에서의 발생 감소율은 PM 대신 각 입자 크기에서의 질량 농도를 활용하여 계산하였다.

$$Reduction\ rate = \frac{PM_{dry} - PM_{wet}}{PM_{dry}} \times 100 \tag{2}$$

3. 실험 결과

3.1 입자 크기 분포 분석

Fig. 2에 건조 및 살수 조건에서 측정된 질량 농도에 대한 입자 분포(Particle Size Distribution)가 나타나 있다. 건조 조건에서는 회전 속도가 증가함에 따라 질량 농도도 같이 증가하였다.

입자 피크(Peak)는 500 및 800 RPM에서는 약 11 및 255 nm 에서 동일하게 발생하였다. 1,300 RPM에서는 약 255 nm 에서만 발생하였다. 살수 조건에서도 질량 농도는 회전 속도에 영향을 받았다. 입자 피크는 500 RPM에서는 약 12, 19, 190 nm 에서, 800 RPM에서는 약 12, 19 nm에서, 1,300 RPM에서는 약 190 nm에서 발생하였다. 특히하게도 500 및 800 RPM에서는 100 nm 이상 입자에서도 지속적으로 질량 농도가 증가하였고, 1,300 RPM에서는 약 190 nm 이후 감소하는 경향이 나타났다. 건조 조건의 각 회전 속도에서 100 nm 이상에서의 질량 농도는 살수 조건에 비해 상당히 높게 나타났는데 이를 통해 살수 방법이 100 nm 이상의 입자 발생 저감에 효과가 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3은 살수에 따른 질량 농도 감소율을 보여준다. 빨간 점선을 기준으로 위쪽은 발생량 감소, 아래쪽은 발생량 증가를 의미한다. 500 RPM에서는 약 100 nm 이상의 입자에서 대체로 질량 농도 감소가 나타났다(Fig. 3(a)). 800 및 1,300 RPM에서는 약 30-40 nm 이상의 입자에서 질량 농도 감소가 나타났다(Figs. 3(b) and 3(c)). 여기서, 질량 농도가 증가한 이유는 뿌려진 물이 순간적인 높은 마찰열에 의해 증발하여 생긴 수증기와 수돗물에 포함된 미네랄 크리스탈의 영향으로 판단된다 [11,12,15]. 100 nm 이상의 입자에서는 모든 회전 속도에서 대체로 높은 질량 농도 감소율을 보였는데, 이는 뿌려진 물이 접촉면에 윤활층을 만들어 표면 요철(Surface Asperity)의 접촉을 줄인 결과, 마찰 및 마찰열이 감소하여 나타난 결과로 판단된다. 이를 통해 살수 방법은 100 nm 이상의 입자 발생 저감에 아주 효과적임을 알 수 있다.

3.2 질량 농도 분석

건조 및 살수 조건에서 발생한 입자의 PM0.1 및 PM0.56의 평균(Average) 및 범위(Range)를 비교해서 Fig. 4에 보였다. 또한, 살수에 의한 질량 농도 감소율, 즉 공기 질 향상율을 Table 3에 %로 보였다. PM0.1 및 PM0.56 모두 건조 조건에서 질량 농도가 월등히 높은 것을 알 수 있다. 또한, 건조 및 살수 두 조건 모두에서 회전 속도가 증가할수록 질량 농도가 증가하였다. 500 RPM PM0.1의 경우 특히하게 살수 조건에서 더 높은 수치가 나타났는데, 이는 Fig. 3(a)에 나타나 있듯이 약 100 nm 정도의 입자까지 질량 농도가 살수 조건에서 더 높게 나타났기 때문이다. 대체적으로, 살수 시 PM0.1의 경우 약 80%의 공기 질 향상 효과가, PM0.56의 경우 최대 약 98%의 공기 질 향상 효과가 나타났다(Table 3).

건조 조건에서 PM0.1이 PM0.56에서 차지하는 비중은 500, 800, 1,300 RPM에서 각각 약 0.2, 2.0, 2.5%였다. 살수 조건에서는 각각 4.0, 16.1, 7.8%였다. 살수 조건에서 상대적으로 PM0.1의 비중이 높은 이유는 살수에 의해 미세 마모 입자 발생량은 줄었으나, 건조 조건과 달리 살수에 의해 발생했을 것으로 예상되는 수증기 및 미네랄 크리스탈의 영향 때문으로 판단된다.

건조 조건의 경우 PM0.1이 PM0.56에 비해 무시할 수 있을

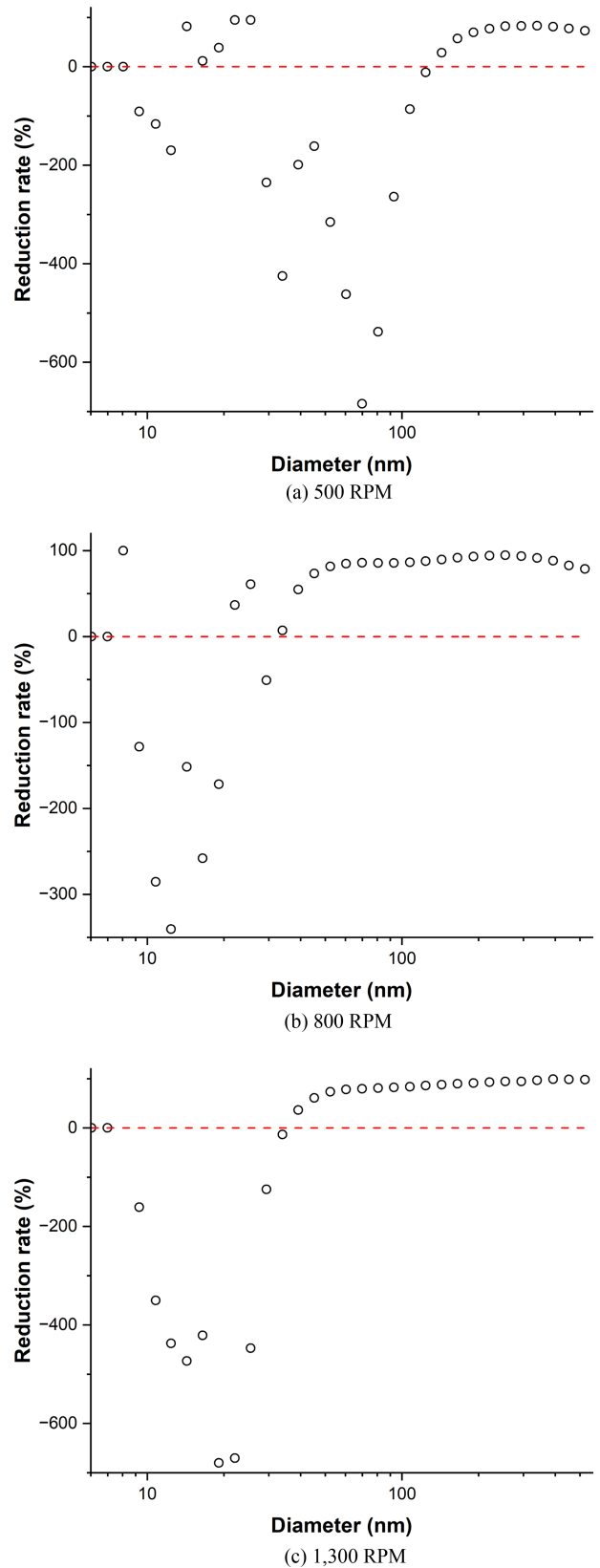


Fig. 3 Reduction rate at each particle size for each rotational speed

정도로 적다는 것을 알 수 있다. 또한, 살수 조건의 경우 수증기 및 미네랄 크리스탈의 영향을 배제한다면, 아마도 건조 조건과

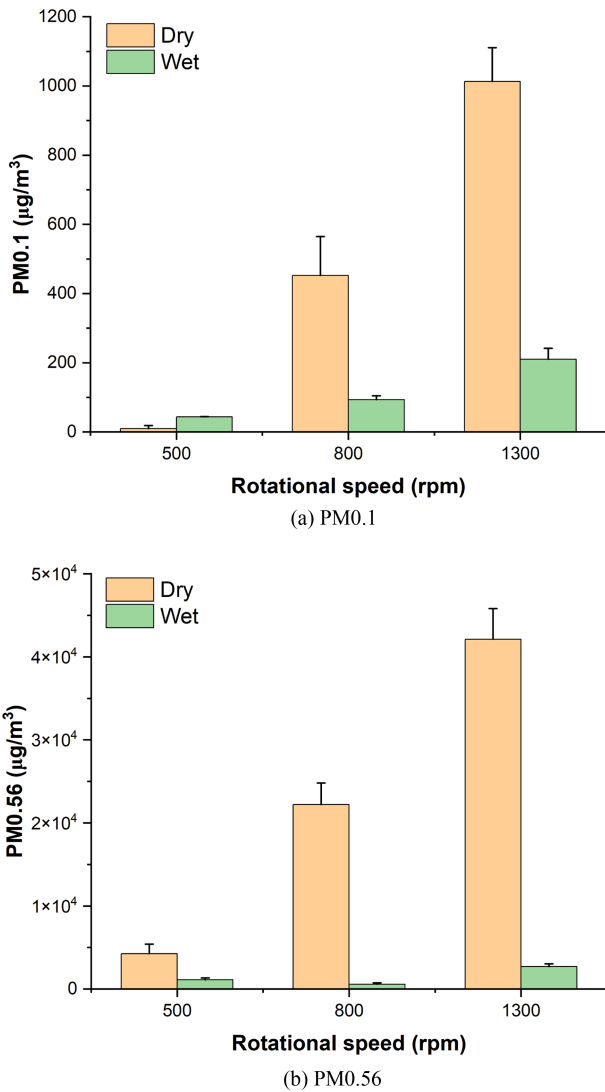


Fig. 4 Averages and ranges of PM0.1 and PM0.56 at each rotational speed and their reduction rates

Table 3 Reduction rates at each rotational speed

RPM	Reduction rate [%]	
	PM0.1	PM0.56
500	-349.9	73.9
800	79.5	97.4
1,300	79.3	93.6

마찬가지로 비중이 무시할 정도로 적을 수 있을 것으로 생각된다. 따라서, 이를 통해 본 연구에서 측정된 560 nm 이하 입자들의 공기 질에서 100 nm 이상의 입자들이 지배적으로 영향을 미칠 수 있다. 실제 터널에서 입자를 측정해보면 1-10 µm 크기의 마이크로 입자들의 수 농도는 거의 무시할 수준으로 적게 측정되지만 질량 농도는 PM10에서 대부분을 차지한다. 따라서, 공기 질의 측면에서는 입자 크기가 미치는 영향이 지배적이라고 할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 살수 방법의 나노 입자들에 대한 공기 질 향상 효과 및 이에 대한 열차 속도 영향 연구를 위해 Twin-disk 시험기를 활용하여 세 가지 회전 속도, 500, 800, 및 1,300 RPM에서 미세 마모 입자 발생 모사 시험을 수행하였다. 다양한 철도 차량 동역학을 모사하기 위해 슬립률을 0에서 3%까지 연속적으로 변화시켜 이때 휠-레일 접촉면에서 발생한 미세 마모 입자의 질량 농도를 측정하고 이를 분석하였다. 본 연구를 통해 아래의 결론을 도출할 수 있다.

1. 살수 시 PM0.56의 감소율은 최소 약 74% 및 최대 약 97.5%로, 살수 방법은 나노 입자 공기 질 향상에 효과가 있는 것으로 판단된다.
2. 건조 및 살수 조건 모두에서 회전 속도가 증가함에 따라 PM0.1 및 PM0.56이 증가함을 보였다. 이를 통해 열차 속도는 접촉면에서 발생하는 미세 마모 입자의 공기 질에 영향을 미칠 수 있다.
3. 살수 조건에서 나타난 작은 입자 들에서의 음의 감소율, 즉 발생량 증가는 살수 시 발생한 수증기 및 미네랄 크리스탈의 영향으로 의심되는바, 이에 대한 확인 연구가 필요하다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 한국철도기술연구원 기본사업인 “역사 플랫폼 인근 터널 지속가능 부유 분진 저감장치 기술 개발(PK2404B1E)”의 연구 결과를 활용하여 작성되었음.

#### REFERENCES

1. Karlsson, H. L., Nilsson, L., Möller, 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.
2. Pope III, C. A., Thun, M. J., Namboodiri, M. M., Dockery, D. W., Evans, J. S., Speizer, F. E., Heath Jr., C. W., (1995), Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 151(3), 669-674.
3. Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris Jr., B. G., Speizer, F. E., (1993), An association between air pollution and mortality in six U.S. cities, *The New England Journal of Medicine*, 329(24), 1753-1759.
4. Abbasi, S., Jansson, A., Olofsson, U., Sellgren, U., (2013), Particle emissions from rail traffic: A literature review, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(23), 2511-2544.

5. Martins, V., Moreno, T., Minguillon, M. C., van Drooge, B. L., Reche, C., Amato, F., de Miguel, E., Capdevila, M., Centelles, S., (2016), Origin of inorganic and organic components of PM<sub>2.5</sub> in subway stations of Barcelona, Spain, *Environmental Pollution*, 208, 125-136.
6. Bigert, C., Alderling, M., Svartengren, M., Plato, N., de Faire, U., Gustavsson, P., (2008), Blood markers of inflammation and coagulation and exposure to airborne particles in employees in the Stockholm underground, *Occupational and Environmental Medicine*, 65(10), 655-658.
7. 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.
8. Karlsson, H. L., Ljungman, A. G., Lindborm, 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(3), 203-211.
9. Lee, H., Namgung, H.-G., Kwon, S.-B., (2018), Effect of train velocity on the amount of airborne wear particles generated from wheel-rail contacts, *Wear*, 414-415, 296-302.
10. Lee, H., (2019), Generation of airborne wear particles from wheel-rail contacts during rolling/sliding and pure sliding contact, *Wear*, 426-427, 1797-1806.
11. Lee, H., (2020), Generation of airborne wear particles from the wheel-rail contact under wet conditions using a twin-disk rig, *Wear*, 448-449, e203236.
12. Lee, H., (2020), The effect of water lubricant on reducing the generation of airborne wear particles from wheel-rail contacts under various train velocities, *Tribology International*, 150, e106393.
13. Zimmer, A. T., Maynard, A. D., (2002), Investigation of the aerosols produced by a high-speed, hand-held grinder using various substrates, *The Annals of Occupational Hygiene*, 46(8), 663-672.
14. Lee, H., Lee, Y., (2024), Study on the effectiveness of applying tap water method in reducing generation of nano-sized wear particles from the railway wheel-rail contact: air quality analysis, *Journal of the Korea Society for Precision Engineering*, 41(9), 681-686.
15. See, S. W., Balasubramanian, R., (2006), Physical characteristics of ultrafine particles emitted from different gas cooking methods, *Aerosol and Air Quality Research*, 6(1), 82-92.

**HyunWook Lee**

Senior Researcher in the Department of Transportation Environmental Research, Korea Railroad Research Institute and Associate Professor in the Transportation System Engineering, University of Science and Technology. His research interests are wear, friction, wheel-rail contact, airborne wear particles, vehicle dynamics, and vibration.  
E-mail: hwlee@krii.re.kr