Journal of Korean Society for Atmospheric Environment Vol. 36, No. 3, June 2020, pp. 346-359 https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.3.346 p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문



다양한 주행 사이클에서 발생하는 브레이크 마모 미세먼지 특성 Characteristic of Brake Wear Particles under Various Test Driving Cycles

우상희, 김용래, 이선엽, 최 영, 이석환* 한국기계연구원 환경시스템연구본부

Sang-Hee Woo, Yongrae Kim, Sunyoup Lee, Young Choi, Seokhwan Lee* Environment Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Republic of Korea 접수일 2020년 4월 14일 수정일 2020년 5월 8일 채택일 2020년 5월 11일

Received 14 April 2020 Revised 8 May 2020 Accepted 11 May 2020

*Corresponding author Tel : +82-(0)42-868-7050 E-mail : shlee@kimm.re.kr

Abstract Brake wear particles (BWPs) were measured using a brake dynamometer to understand the characteristics of fine dust generated by brake wear under various driving cycles. WLTC (word harmonized light-duty vehicle test cycle), Novel braking cycle which was specialized for brake particles measurement, and NIER (national institute of environment research) driving cycles which was used to determine the exhaust emission factor in Korea were utilized. The experimental results showed that emission factors of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in three driving modes were ranged with 0.21~0.61 mg/km/brake and 0.12~0.36 mg/km/brake, respectively. NIER driving cycle showed the highest number of braking among the three cycles, which caused the highest emission factor. However, the braking dissipation energy of each stop in the test cycle rather than the number of braking had a greater effect on the generation of BWPs. Although the same pad and disc were used, it was confirmed that the particle size distributions were different for each test cycle. The BWPs showed a unimodal distribution with mode diameter of around 2~3 µm based on aerodynamic diameter and showed a bimodal distribution with mode diameters of 600 nm and 2.8 µm based on optical diameter. Comparing the 15 NIER test cycles classified by average driving speed, the faster the speed, the smaller diameter of BWPs generated. The ratio of BWPs generated by brake drag varied by 4~53% according to the steps of NIER test cycle. Specialized new driving cycle or modified NIER driving cycle in consideration of the driving speed and brake dissipation energy are required to measure the emission factor of BWPs.

Key words: Non-exhaust particulate matter, Brake wear particles, Test driving cycle, Dissipation energy

1. 서 론

차량에서 배출되는 배기가스에 대한 규제가 점점 강화되면서 유해 배기가스 뿐만 아니라 입자상 물질 (particulate matter: PM)의 배출량도 큰 폭으로 감소 하고 있다. 유럽 및 우리나라에서는 최신 배기가스 규제인 EURO 6d가 공표됨에 따라 배기가스에 포함 된 PM은 디젤 및 가솔린 자동차에서 4.5 mg/km 이하 로 배출량이 규제되고 있다. 이렇게 배기가스에 포함 된 배기 PM (Exhaust PM)의 양이 크게 감소하면서, 상대적으로 비배기 발생원에 의한 PM (Non-exhaust PM)의 중요성이 커지고 있다. Tista *et al.*, (2018)에 따르면 최근 도로운송수단에 의해 배출되는 PM은 인 위적으로 발생되는 미세먼지의 8~11%라고 한다. 최 근 유럽 환경청 (European Environment Agency: EEA)에 따르면 도로운송수단으로 배출되는 PM₁₀과 PM_{2.5} 중 각각 33.9%와 26.7%가 자동차 타이어나 브 레이크 마모에 의해 발생한다고 보고하였다. 일반적 으로 배기가스에는 나노 크기의 입자가 많이 포함되 어 있고 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로 마모, 도로 재비산 먼지와 같은 비배기 발생원에서는 마이크로 크기의 입자가 주로 배출된다고 알려져 있다. 하지만 비배기 발생원에서 생성되는 PM은 마이크로 입자뿐 만 아니라 나노 입자 배출에도 기여하는 것으로 보고 되고 있다(Amato *et al.*, 2014; Kumar *et al.*, 2013). 또 한, 브레이크 마모 입자(BWPs, Brake wear particles) 는 다양한 금속성분으로 구성되어 있으며, 이는 인체 에 독성 효과를 일으킬 수 있다(Grigoratos and Martini, 2015). 이러한 중요성으로 인해 많은 연구자들이 비배기 발생원에서 발생하는 입자의 배출특성을 연 구해 왔다.

비배기에 의해 발생하는 PM은 타이어, 도로 및 브 레이크 마모와 재비산에 의해서 주로 발생하는데 (Grigoratos and Martini, 2015), 이 중에서 브레이크 마모에 의해 발생되는 PM은 비배기 부문에서 상당 히 큰 부분을 차지하고 있다. Harrison et al. (2012)은 도로운송수단 비배기 발생원 중에 55%의 무게비중 이 브레이크 마모로부터 배출된다고 하였다. 다른 연 구자들은 전체 도로운송수단 배출 PM10 중에서 21% 가 브레이크 마모에 의해서 발생한다고 발표하였다 (Lawrence et al., 2013; Gasser et al., 2009). Amato et al. (2009)은 도심 도로 대기 PM₁₀ 농도 40.3 μg/m³ 중 4.2 μg/m³이 BWPs에 의한 농도라고 발표하였다. 이 렇듯 차량의 운행 중에 배출되는 PM 중에서 브레이 크 마모입자가 차지하는 비중이 높기 때문에 BWPs 의 발생 특성이나 배출계수를 구하기 위한 연구가 많 이 이루어졌다. BWPs를 측정하기 위해서 Wahlstrom and Olofsson (2014), Hagen et al. (2019a), Kwak et al. (2013)은 실도로를 주행하는 차량의 브레이크 주변 에 흡입 장치를 설치하여 브레이크 마모로 생성되는 PM을 측정하였다. 하지만 실제 차량에서 직접 브레 이크 마모로 생성되는 PM을 흡입하는 것은 브레이 크 마모 미세먼지뿐만 아니라 다른 미세먼지 즉, 타 이어 마모 먼지, 도로 재비산 먼지 등도 함께 측정될 수 있다. 또한 운전자가 직접 운전을 하면 같은 주행 모드에서 시험하여도 운전자에 따라서 엔진 브레이 크의 사용여부, 제동 시기, 시간, 강도가 달라지며, 이 로 인한 발생량도 운전자에 따라서 달라진다 (Hesse and Augsburg, 2019). 따라서, 일반적으로 BWPs는 브 레이크 동력계를 이용해서 측정해왔다 (Perricone *et al.*, 2019; Liati *et al.*, 2019; Mamakos *et al.*, 2019; Hagen *et al.*, 2019b). 브레이크 동력계는 재현 신뢰성 이 높으며 타 발생원에서 발생하는 미세먼지를 차단 할 수 있기 때문에 BWPs를 측정하기 위해 보편적으 로 사용되고 있다. 브레이크 동력계 장치에 브레이크 디스크와 패드를 감싸는 챔버를 설치하고 챔버에 풍 동을 연결하거나, 측정장비 샘플링라인을 챔버에 연 결해서 브레이크에서 발생하는 입자를 측정한다. Hagen *et al.* (2019b)와 같이 입자 이송손실을 최소화 하고 등속흡인 시스템을 갖추는 등 최근 연구에서는 비교적 정확한 BWPs 측정이 브레이크 동력계에서 가능 해졌다.

하지만 시험 주행 사이클마다 BWPs의 배출량이 다르게 측정되기 때문에 BWPs의 배출계수를 평가할 표준방법이 현재는 부재한 실정이다. 기존 논문들은 3h-LACT (Los Angeles City Traffic) 사이클을 쓰거나 (Hagen et al., 2019b), WLTP (World harmonized Light-duty vehicle Test Procedure)에 규정된 WLTC (World harmonized Light-duty Test Cycle)을 이용하 였다(Mamakos et al., 2019). Hagino et al. (2016)의 경 우 일본 배기가스 측정 사이클(JC08, JE05)을 BWPs 를 발생하기 위한 측정 사이클로 사용하였다. Mathissen et al. (2018)은 BWPs를 측정하는 데 있어서 표준 방법론을 제시하기 위해서 Novel-real-world braking cycle을 제안하였다. 이 사이클은 4시간 24분의 긴 시 험시간을 가지며, 303번의 브레이크 이벤트가 있으 며, 192 km를 주행한다. 유엔 유럽경제회 산하의 PMP (Particle Measurement Program)그룹에서는 Novel braking 사이클의 브레이크 시간, 감속도, 정지 주기 등을 고려해서 한 시간 안에 브레이크 마모입자 를 측정할 수 있는 사이클을 제안하기도 하였다. 이 렇듯 많은 연구자들이 BWPs의 대표적인 배출계수 측정이 가능한 주행 사이클을 개발하고자 하는 노력 을 기울이고 있다. 국내에서는 자동차에서 배출되는



Fig. 1. Schematic of the brake dynamometer for measuring brake wear particles.

배기가스 및 배기 PM에 대하여 차량 속도에 따른 배 출계수를 구하고자 국내 시가지운전모드 (NIER)가 공식 시험법으로 사용되고 있다. 국내에서 BWPs 발 생량에 대한 규제를 도입하려고 할 때 Hagino *et al.* (2016)과 같이 기존에 존재하는 주행 사이클을 이용 한 시험법이 우선 고려될 수 있으며, 이러한 방법론 의 적합성에 대해 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 국내에서 기존 배기가스의 배출계수 측정 방법으로 사용되던 NIER 주행 사이클을 BWPs 배출계수 측정 방법으로 사용하였을 때, BWPs 배출 계수 특성이 어떻게 나타나는지 평가하였다. 또한 NIER 주행 사이클, WLTC 주행 사이클 및 Mathissen *et al.* (2018)이 제안한 Novel braking 사이클로 측정하 였을 때 BWPs 배출 특성의 차이점을 비교 분석하였 다. 그리고 NIER 주행 사이클이 BWPs 측정법으로써 적합한지 평가하고, 개선점에 대해서 제안하였다.

2. 연구 방법

2.1 브레이크 마모 미세먼지 측정 장치

브레이크 마모에 의한 미세먼지 생성을 평가하기 위해서 그림 1과 같이 브레이크 동력계가 사용되었 다. 브레이크는 구조적으로 디스크 브레이크와 드럼 브레이크로 나눌 수 있으며, 일반적으로 승용자동차 에서는 디스크 브레이크가 더 광범위하게 사용된다. 기존 BWPs를 연구한 논문들도 대부분 디스크 브레 이크를 중점적으로 연구하였다. 따라서 본 연구에서 도 디스크 브레이크를 대상으로 실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 브레이크 디스크는 지름이 30 cm로 15~16인치 크기의 휠에 사용되며 주철(cast iron) 재질로 구성되어 있다. 또한, 본 연구에서는 국 내에서 일반적으로 사용되는 비석면(NAO; Non-Asbestos Organic) 및 비철 섬유(NS; Non-steel) 재질 로 구성된 브레이크 패드를 사용하였는데, 이는 유럽 에서 사용되는 LS(Low-steel) 재질의 브레이크 패드 에 비해서 미세먼지 발생량이 적다고 알려져 있다 (Joo *et al.*, 2020; Sanders *et al.*, 2003).

브레이크 동력계에서는 차량의 운동에 대한 관성 을 반영하고자 지름 120 cm, 무게 280 kg의 회전추를 브레이크 디스크 축과 연결하여 50.4 kg·m²의 관성 모멘텀을 재현하였다. 브레이크 패드의 중심에서 5 mm 깊이에 열전대 센서를 장착하여 제동에 의한 패 드 온도 상승을 측정하였다. 브레이크 시스템 전체를 지름 600 mm, 두께 200 mm의 원형 챔버가 감싸고 있 다. 원형챔버로 HEPA 필터를 통과하여 입자가 걸러 진 깨끗한 공기가 공급되므로 순수하게 브레이크에 서 발생한 입자만 측정할 수 있었다. 챔버로부터 1.5

National Institute of Environmental Research mode	Novel real-world braking cycle	World harmonized light-duty test cycle
NIER (mode)	Novel braking	WLTC
Established by government institute of Korea	Brake duration, distance, number, initial velocity etc. data of WLTP	700,000 driving data of USA, Europe, Japan, Korea and India
Evaluating exhaust pollutant emission in Korea	Evaluating braking particle emission	Evaluating exhaust pollutant emission
6 hours (including soaking time)	9 hours (including soaking time)	30 minutes
146	191	23
3.1	1.6	2.5
2360	1978	404
	National Institute of Environmental Research mode NIER (mode) Established by government institute of Korea Evaluating exhaust pollutant emission in Korea 6 hours (including soaking time) 146 3.1 2360	National Institute of Environmental Research modeNovel real-world braking cycleNIER (mode)Novel brakingEstablished by government institute of KoreaBrake duration, distance, number, initial velocity etc. data of WLTPEvaluating exhaust pollutant emission in KoreaEvaluating braking particle emission6 hours (including soaking time)9 hours (including soaking time)1461913.11.623601978

Table 1. (Characteristics	of each	test cvcl	es
------------	-----------------	---------	-----------	----

m 길이로 지름 150 mm의 원형 풍동을 설치하였다. 풍동 길이를 충분히 주어 브레이크 디스크와 패드의 마찰에 의해서 생성된 입자가 난류에 의해 풍동 단면 에서 균일하게 분포되도록 하였다. 챔버로부터 1.5 m 하류에는 풍동 단면 유속과의 등속흡인 (Isokinetic sampling)을 고려해서 설계된 샘플링 포트가 각 측정 기기에 맞게 설치되었다. 각 샘플링포트 입구가 서로 영향을 받지 않도록 하기 위해서, 풍동 단면에서 보 았을 때 4개의 샘플링 포트 입구가 4분면에 나누어 배치되었다. 풍동의 유량은 샘플링 입구 뒤에 있는 피토관을 통해서 측정되었다. 단면 유속 5 m/s에 5300 LPM의 유량이 오차 범위 5% 이내로 유지되는 것이 관찰되었다. 풍동 유량에 의한 원형 챔버의 순 환 시간은 0.8초였다.

2.2 측정 장비

측정에 사용된 장비는 0.5~20 µm 입자의 공기역학 입경분포를 측정하는 aerodynamic particle sizer (APS, 3021, TSI, USA), 0.2~30 µm 입자의 광학 입경 분포를 측정하는 optical particle spectrometer (OPC, 1.109, Grimm, Germany), 광학방식으로 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁을 측정하는 dust monitor (DustTrak, DRX, TSI, USA)가 사용되었다. 중량법으로 입자 무게 농도를 측정하기 위해 테플론 필터와 PM₁₀과 PM_{2.5} 사이클 론(URG, USA)이 사용되었다. 중량법 측정결과는 입 자 측정장비의 무게농도 보정에도 사용되었다. WLTC 주행 사이클에서 중량법으로 사전 측정한 PM_{2.5} 값이 OPC와 DustTrak 보정에 사용되었다. OPC는 밀도 상수인 C-factor를 3으로 적용하였고, DustTrak은 광학보정은 1.57, 사이즈 보정은 4.795로 보정하였다. APS는 공기역학 입경(aerodynamic diameter)을 기준으로 측정하기 때문에 따로 보정없이 측정하였다.

2.3 주행 사이클

실험에는 WLTP를 기준으로 만들어진 WLTC 주행 사이클과 Mathissen et al. (2018)이 제안한 Novel braking 주행 사이클 및 NIER 주행 사이클이 사용되 었다. 표 1에 각 주행 사이클의 특성이 표기되어 있 다. WLTC 주행 사이클은 30분 동안 23.26 km의 주행 거리를 최대 131.3 km/h의 속도로 주행하게 되며 Novel braking 주행 사이클은 총 10개의 구간으로 이 루어져 있으며, 주행 시간만 4시간 24분이다. 하지만 Mathissen et al. (2018)이 제안한 Novel braking 주행 사이클은 10개의 구간 사이마다 브레이크와 패드의 상승한 온도를 식혀주는 휴식 시간이 존재하며 이를 포함하면 총 시험시간은 40시간이 넘는다. 이전 연구 들에서는 브레이크 마모에 의해 발생하는 마이크론 입자는 기계적 마찰로 생성되며, 나노 입자는 브레이 크 디스크와 패드 온도가 일정 온도 이상으로 도달하

J. Korean Soc. Atmos. Environ., Vol. 36, No. 3, June 2020, pp. 346-359

여야 발생한다고 보고하였다 (Hagen et al., 2019b; Namgung et al., 2016). Hagen et al. (2019b)의 경우 패 드와 디스크 온도가 160~170°C가 넘어가면 나노 입 자가 배출되기 시작한다고 하였다. 하지만 LS 패드를 사용한 Hagen et al. (2019b)와 달리 NS 패드를 사용한 본 연구에서는 최대 디스크와 패드 온도가 90°C 정도 에 불과하기 때문에 실제로 나노 입자의 배출은 매우 미미한 양만이 관측되었다. 따라서, 본 연구에서는 입 자의 무게농도를 중점적으로 측정하였으며, 나노 입 자 배출량이 무시할 만한 수준이므로 Mathissen et al. (2018)이 제안한 수준의 긴 휴식 시간이 필요하지 않 다. 본 연구에서는 10개 구간 사이의 휴식 시간을 30 분으로 제한하였기 때문에 Novel braking 주행 사이 클의 총 시험시간은 9시간이 되었다. NIER 주행 사이 클은 평균 시속 5 km/h인 1단계부터 최고 114 km/h 의 평균 속도를 가지는 15단계로 세분화되어 있다. NIER 주행 사이클에서도 15개의 모드 간 휴식 시간 을 10분 정도로 짧게 설정하였으며, 이로 인하여 총 시험시간은 6시간 10분이었다.

3. 결 과

3.1 주행 사이클 간 배출 특성 비교

필터에 포집된 BWPs의 무게를 측정하는 중량법과 광학 측정 장비로 측정한 입자농도를 비교한 결과가 그림 2에 나타나 있다. APS로 측정한 입자농도는 WLTC 주행 사이클에서는 중량법에 비해 과대 예측



Fig. 2. Comparison of particle mass concentration between gravimetric method and particle measurement instruments.



Fig. 3. NIER driving test cycle (a) schedule and temperature variation, and (b) part of particle concentration change according to elapsed time.

다양한 주행 사이클에서 발생하는 브레이크 마모 미세먼지 특성



Fig. 4. Novel braking driving test cycle (a) schedule and temperature variation, and (b) part of particle concentration change according to elapsed time.



Fig. 5. WLTC driving test cycle (a) schedule and temperature variation, and (b) part of particle concentration change according to time elapse.

되는 경향이 나타났으며, NIER나 Novel braking 주행 사이클에서는 과소 예측되었다. 하지만 OPC와 Dust-Trak은 보정계수를 적용하지 않을 경우 그림 2에 표 시된 값의 1/3 이하로 떨어지기 때문에 반드시 보정 이 필요하다. 반면, APS 측정값은 보정을 하지 않았 음에도 중량법 측정값과 비교적 일치하는 값을 보여

J. Korean Soc. Atmos. Environ., Vol. 36, No. 3, June 2020, pp. 346-359

주었다. OPC와 DustTrak의 PM_{2.5} 측정값은 WLTC 주행 사이클에서의 중량법 측정값을 이용하여 보정 하였기 때문에, OPC와 DustTrak의 WLTC 측정결과 는 중량법 측정결과와 거의 일치한 값을 보였다. 하 지만 Novel braking, NIER 주행 사이클에서는 중량법 과는 측정 편차가 크게 나타났다. OPC는 NIER나 Novel braking에서는 과대 예측되었으며, DustTrak은 PM₁₀이 WLTC 주행 사이클에서는 과대 예측되고, NIER와 Novel braking에서는 과소 예측되는 경향이 나타났다. 후술하겠지만, NIER나 Novel braking에서 는 WLTC에서 존재하지 않던 마이크로 입자가 크게 나타났으며, 이 입자들이 WLTC 주행 사이클에서 나 타난 입자들과 크기 분포 특성이 다르기 때문에 중량 법과 측정장비 간에 오차가 생긴 것으로 판단된다.

그림 3~5에는 NIER, Novel braking, WLTC 사이클 에서의 속도 프로파일, 패드 온도 변화 및 PM10 농도 변화를 나타내었다. APS는 10 µm 이하 입경 채널 무 게 농도를 합쳐서 PM10을 계산하였으며, OPC는 C-factor가 적용된 환경농도(environmental mode: OPC 자체 대기 보정) 측정 PM10이 나타나 있다. 그림 4(b) 및 그림 5(b)에서 확인할 수 있듯이 브레이크 시 스템을 감싼 원형 챔버의 입구에 있는 HEPA 필터 때 문에 브레이크가 작동하지 않을 때 농도는 대부분 0 이 기록되었다. 또한, 원형 챔버의 순환 시간이 매우 짧았기 때문에 제동이 발생한 시점에만 순간적으로 입자농도가 크게 상승하는 것을 확인할 수 있다. 상 승한 입자농도는 제동이 멈추면 2초 이내로 다시 제 로농도가 되었다. 대부분의 경우에 있어서 브레이크 가 작동한 시점에만 입자농도가 상승하였지만, 그림 4(b)처럼 매우 빠른 속도로 디스크가 가속하거나 등 속 운동을 할 때 브레이크가 작동하지 않았음에도 입 자농도가 상승하는 경우가 관찰되었다. 이는 가속 이 전에 낮은 속도에서 제동할 때 생성된 입자들이 충분 한 탈출속도를 가지지 못해서 디스크에 침착 되어 있 다가, 충분히 빠른 회전 속도로 디스크가 회전할 때 침착 된 입자들이 비산된 것으로 추측된다. Hagino et al. (2015)은 노출된 디스크 브레이크에 입자를 샘플

Table 2. Emission factors of PM ₁	o and PM _{2.5} for NIER, Novel
braking, and WLTC test cycles.	

mg/km	/brake	NIER 1-15	Novel braking	WLTC
	PM ₁₀	0.40	0.12	0.72
APS	PM _{2.5}	65.0%	66.7%	68.1%
	PM ₁₀	0.72	0.31	0.43
OPC	PM _{2.5}	0.33	0.11	0.32
	PM _{2.5} /PM ₁₀	45.8%	35.5%	74.4%
DustTrak	PM ₁₀	0.40	0.19	0.43
	PM _{2.5}	0.24	0.09	0.31
	PM _{2.5} /PM ₁₀	60.0%	47.4%	72.1%
Gravimetric method	PM ₁₀	0.61	0.21	0.41
	PM _{2.5}	0.30	0.12	0.36
	PM _{2.5} /PM ₁₀	49.2%	57.1%	87.8%

링 할 때 나타나는 입자농도 변화 특징이라고 하였으 며 Hesse and Augsburg (2019)도 브레이크 디스크에 서 침착 되어 있던 입자가 회전에 의해서 비산되는 것을 보고하였다. Hagen *et al.* (2019b)도 브레이크가 작동하지 않을 때 브레이크 드래그 (brake drag)에 의 해서 비산되는 입자가 전체 배출되는 BWP의 34%를 차지 한다고 보고하였다. 본 논문의 브레이크 시스템 에서도 제동하지 않을 때 배출된 미세먼지 양이 전체 BWPs의 30~40%로 나타났다.

일반적으로 차량에서 배출되는 미세먼지의 배출계 수는 주행거리(km)당 배출된 미세먼지의 양(mg)으 로 표현된다. 주행거리는 그림 3(a), 4(a), 5(a)의 속도 곡선을 적분하면 구할 수 있으며 그림 3(b), 4(b), 5(b) 의 측정 농도 곡선을 적분하면 총 BWPs 발생량(M) 을 계산할 수 있다. 총 BWPs 발생량을 계산한 식은 다음과 같다.

$$M = Q \sum_{i=start}^{end} \sum_{j=1}^{n} m_{i,j} dt$$
(1)

여기서 Q는 풍동의 유량이며, m_{i,j}는 시간 i에서 측정 한 측정장비 입경 채널 j에서 무게 농도, dt는 측정장 비의 샘플링 시간이며, n은 목표 범위 이하의 입경 채 (a) 0.08 널 개수이다. 표 2에는 각 주행 사이클별 측정한 Normalized dM / dlogd, 0.06 BWPs의 배출계수를 나타내었다. Novel braking 주행 0.04 사이클이 NIER 주행 사이클보다 BWPs 배출계수가 작은 것으로 나타났다. NIER 주행 사이클에서의 배 0.02 출량 값은 그림 3(a)에 표현된 1단계에서 15단계까지 0.00 0.26 의 스케줄에서 측정한 값을 전부 합한 값이다. NIER 주행 사이클의 배출계수가 유독 높은 것은, 브레이크 (b) 0.16 동력계의 한계로 인해서 그림 3(b)에 나타난 것처럼 Normalized *dM / d*log*d*_r 0.12 엔진브레이크나 바퀴의 구름저항 등으로 감속하여도 될 구간을 모두 제동을 하여 브레이크 빈도수가 급격 0.08 히 늘어난 것이 원인이다. 따라서 제동 빈도에서 0.04 Novel braking 주행 사이클(1.6번/km)이 NIER 주행 사이클(3.1번/km)에 비해서 낮기 때문에 배출계수도 0.00 0.26 작게 측정된 것이다. WLTC 주행 사이클의 경우 제동 빈도는 2.5번/km로 중량법 기준으로 NIER와 Novel braking 주행 사이클에서 측정된 BWPs 배출계수의 APS, and (b) OPC. 중간 수준으로 측정되었다. 하지만 APS나 DustTrak 기준으로는 WLTC 주행 사이클에서 BWPs의 배출계 수가 가장 높았다. 따라서 BWPs 배출계수는 제동 빈 도에만 영향을 받는다고 할 수 없으며, 다른 변수가 작용할 가능성이 있다. 동일한 제동이라도 제동이 작

3.2 주행 사이클 간 입자 분포 특성 비교

BWPs의 양이 달라질 수 있기 때문이다.

동하는 시작 속도나 제동기간에 따라서 배출되는

그림 6은 각 주행 사이클에서 APS와 OPC로 측정 한 평균 입경분포를 나타낸 그래프이다. 각 주행 사 이클마다 휴식 시간이 달라서 평균 농도 레벨에 차이 가 있었다. 그러므로 입자 무게농도 분포는 전체 무 게농도에서 각 입경채널이 차지하는 비율로 정규화 해서 표기하였다. APS로 측정한 결과에서는 3가지 주행모드 모두 입경의 최빈값이 2 µm로 비슷한 입경 분포를 보여주었다. 다만 최빈값 입경보다 큰 입자 비율이 Novel braking과 NIER 주행 사이클에서 더 높게 나타났다. 반면에 OPC로 측정한 결과에서는 WLTC의 경우 500~600 nm와 2.8 µm 두 곳에서 최빈



Fig. 6. Normalized particle mass concentration distribution of NIER, Novel braking and WLTC test cycles measured by (a) APS, and (b) OPC.

값을 가지는 bimodal 분포를 보여주었으며, Novel braking과 NIER에서는 2개의 최빈값에 더해서 5.8 µm에서도 또 다른 최빈값을 가지는 trimodal 분포를 보여주었다. 이러한 이유로 주행 사이클마다 입경분 포가 비슷하였던 APS는 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율이 항상 비 슷하였다. 반면에, OPC로 측정한 입경분포 중 WLTC 주행 사이클에서는 5.8 µm 입경에서 최빈값이 나타 나지 않아서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율이 높았다. 하지만 NIER나 Novel braking 주행 사이클에서는 5.8 µm 입 경에 나타난 최빈값으로 인하여 PM_{2.5}/PM₁₀ 비율이 낮았다.

OPC 측정결과에서 5.8 μm 입자들이 APS에서는 크 게 드러나지 않았다. 이는 OPC에서 2 μm 이상으로 측정된 입자들의 비중이 1보다 작아서 더 작은 공기 역학 입경으로 APS에 측정된 것으로 추측된다. Nosko and Olofsson (2017)에 따르면 BWPs는 주로 무거운 금속입자로 이루어져 있지만, 마모로 생성된 입자는 많은 공동을 포함하기 때문에 전체 밀도는

 $0.75 \pm 0.2 \text{ g/cm}^3 \odot \text{c}$ 낮다고 보고하였다. 따라서 2 µm 이상 크기 입자는 Nosko and Oloffson (2017)이 측정한 입자와 비슷한 밀도를 가졌을 것이라 추측된 다. 하지만 실제로 중량법으로 측정한 PM_{2.5}를 기준 으로 한 OPC의 보정 밀도는 5~6 g cm⁻³으로, Nosko and Oloffson (2017)이 제시한 밀도보다 굉장히 크다. 하지만 C-factor로 보정을 해야만 OPC 측정 PM_{2.5}가 중량법으로 측정한 PM_{2.5}와 비슷하였다. 따라서 C-factor가 실제 적용된 입자크기는 2 µm 이하 크기 이다. 입자의 밀도가 1.0 g cm⁻³ 이상이면 광학 입경 에서 공기역학 입경으로 변환하였을 때 입자 크기가 커진다. 그러므로 OPC 측정결과에서 500~600 nm 입 자들이 APS에서는 1~2 µm 공기역학 입경 입자로 측 정된 것이라 추측된다.

OPC로 측정한 500~600 nm 입자들과 2 µm 이상 입자들의 밀도가 다르다고 가정하면, 주행 사이클에 따라 OPC 측정값과 중량법 측정치가 달라진 이유가 설명된다. NIER나 Novel braking 주행 사이클에서는 OPC 분포가 500~600 nm는 비중이 작으며, 2 μm 이 상 입자들의 비중이 크다. WLTC 주행 사이클에서는 500~600 nm 입자 비중이 커서 C-factor를 적용한 결 과가 중량법과 잘 일치하였다. 하지만 NIER나 Novel braking 주행 사이클에서는 밀도가 낮을 것으로 예상 되는 2 µm 이상 입자들이 과도하게 보정 (C-factor: 3) 되어서 과대 예측하였기 때문에 OPC 측정 PM10 값 이 APS나 중량법보다 높았던 것으로 추정된다. 2.5 µm 이하 입자는 OPC에 입력한 C-factor가 적절한 500~600 nm 입경크기에만 영향을 미치기 때문에, NIER나 Novel braking에서 OPC로 측정한 PM25는 중량법으로 측정한 PM2.5와 비슷한 농도가 측정되었 다. DustTrak 측정결과도 광학보정을 적용한 PM, 5를 기준으로 중량법과 잘 일치하였으며, 사이즈 보정을 한 PMu은 주행 사이클에 따라 오차가 발생하였다.

정리하면, 브레이크 마모로 발생하는 광학 입경 0.5~2 µm 입자는 밀도가 큰(5 g cm⁻³ 이상) 입자가 주 성분으로 추측되며, 광학 입경이 2 µm 이상인 입자는 밀도가 작은(1 g cm⁻³ 이하) 입자가 주성분으로 추측 된다. WLTC 주행 사이클에서는 밀도가 큰 광학 입경 0.5~2 μm 입자 비중이 높았으며, NIER나 Novel braking 주행 사이클에서는 밀도가 작은 광학 입경 2 μm 이상 크기 입자의 비중이 높았다. 따라서 그림 6(b)에서 OPC의 2 μm 이상 분포는 과대 평가되어 있 을 수 있다. 여기서 WLTC 주행 사이클의 APS 측정 치가 중량법보다 과대 예측되는 원인을 찾을 수 있 다. Chent *et al.* (1990)에 따르면 APS는 입자 밀도가 2 g cm⁻³을 넘어가면 실제 입자보다 크게 측정될 수 있다고 하였다. WLTC 주행 사이클에는 입자의 밀도 가 큰 입자의 비중이 높았으며, APS에서는 실제 입자 의 공기역학 입경 크기보다 크게 측정하여서 무게 농 도가 중량법 대비 과대 예측된 것이다.

3.3 브레이크 마모 미세먼지와 소산에너지의 관계

NIER, Novel braking, WLTC의 세 가지 주행 사이 클에서의 BWPs 배출량은 각 주행 사이클에서의 소 산에너지와 밀접한 연관이 있다. Hagen et al. (2019a) 에 따르면 BWPs의 발생량은 제동으로 인하여 감소 한 운동에너지의 양, 즉 브레이크에서 열과 마찰로 소산되는 에너지와 비례한다고 하였다. 그림 7은 NIER, Novel braking, WLTC의 세 가지 주행 사이클 에서 제동으로 인한 소산에너지와 PM10과 PM25 발 생량과의 상관관계를 나타내고 있다. 세 주행 사이클 이 각각 서로 다른 제동빈도와 주행거리, 주행속도를 가지고 있다. 하지만 발생되는 BWPs의 양은 모두 제 동에 의한 소산에너지와 비례하는 것으로 나타났다. 따라서 각 주행 사이클에서의 BWPs 배출계수는 각 사이클의 속도 프로파일에 의해서 결정되는 제동 소 산에너지와, 주행거리에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 자동차의 배기가스에 포함된 PM 측정과는 다르게, BWPs 배출은 차량이 제동을 해야만 발생하므로, 주 행거리가 총 배출량과 항상 비례하지 않는다. 제동 횟수가 적고 등속주행거리가 증가하면 BWPs의 배출 계수는 감소한다. 따라서 차량의 주행 스타일을 보편 적으로 모사 하여야만 대표적인 BWPs의 배출계수를



Fig. 7. Comparison of braking dissipation energy and (a) PM_{10} , (b) $PM_{2.5}$ generated by brake wear of each stop.

산정할 수 있다. WLTC는 유럽, 미국, 인도, 한국, 일 본 다섯 지역의 74만 km 주행 표본을 바탕으로 만들 어진 주행 사이클이다. 하지만 WLTC는 차량 속도, 엔진 회전수 등을 바탕으로 만들어졌으므로, 제동 상 황에 대해서 WLTC 주행 사이클이 보편적인 사이클 인지는 판단하기 어렵다. Mathissen *et al.* (2018)이 제 안한 Novel braking 주행 사이클도 WLTC 주행 사이 클의 제동 속도, 시간, 평균 감속도 등을 바탕으로 만 들어진 주행 사이클이기 때문에 차량의 보편적인 제 동 특성을 반영하는지 알 수 없다. Hesse and Augsburg (2019)은 같은 주행 사이클도 운전자 습관에 따 라 제동 특성이 완전히 달라지며, 배출계수도 달라진 다고 하였다. 그러므로 주행 사이클의 속도 정보만 가지고 운전자들의 제동 습관의 대표성을 논하기 힘 들다. 마찬가지로 NIER 주행 사이클도 제동 특성이 반영된 주행 사이클이 아니기 때문에 이를 통해서 배 출계수를 산정하는 것은 합리적인 방법이 아니다. 알 려진 주행 사이클들을 BWPs 배출계수 산정용으로 사용하기 전에, 일반적인 차량의 주행에서 제동 빈도, 제동 시간, 제동 속도에 대한 조사가 먼저 이루어져 야 한다.

3.4 NIER 주행모드 분석

앞서 NIER 주행 사이클의 각 15단계에서 측정한 전체 평균값이 BWPs 배출계수를 대표할 수 없다고 하였다. 따라서 서로 다른 속도를 대표하는 NIER 사 이클의 각 단계가 차량 속도나 소산에너지를 기반으 로 해서 하나의 대표식으로 나타내어 질 수 있는지 살펴보았다.

NIER 주행 사이클을 사용하여 배출 PM의 배출계 수를 산정할 때는 NIER 사이클 각 단계별 평균속도 와 각 단계에서 측정된 배출계수를 그래프로 그려서 속도에 따른 배출계수를 근사식으로 표현한다. BWPs에 대해서도 NIER 사이클의 각 단계별 평균속 도에 대한 배출계수를 측정할 수 있는데, 이에 대한 결과값을 표 3과 그림 8에 나타내었다. BWPs 배출계 수는 NIER 1단계(평균속도 5 km/h)부터 6단계(평균 속도 19 km/h)까지는 감소하는 경향을 보이다가 7단 계 이후부터는 속도에 비례해서 증가하는 경향이 나 타났다. 하지만 몇몇 단계에서는 전체적인 경향성에 서 벗어나는 오차가 크게 나타난다. 이렇게 NIER 주 행 사이클 단계 순으로 BWPs 배출계수가 일정한 경 향성을 나타내지 않는 것은 NIER 주행 사이클이 평 균 속도 관점에서 설계된 주행 사이클이고 브레이크 횟수, 제동에 의한 소산 에너지량 등은 고려되지 않 았기 때문이다. 앞서 말한 것처럼 NIER 사이클의 단 계별 배출계수도 소산 에너지를 기준으로 정렬하면, 그림 9와 같이 지수함수적으로 비례하는 것이 확인 된다. 하지만 NIER1, NIER6 단계 등 몇몇 단계는 여 전히 경향성에서 어긋나는 BWPs 배출계수를 보여주 며, 이는 소산에너지 외에 다른 변수가 BWPs 배출에

	Dissipation energy (kJ)	F	PM ₁₀	I	PM _{2.5}	
		Total BWP mass (mg)	Ratio of brake drag	Total BWP mass (mg)	Ratio of brake drag	PM _{2.5} /PM ₁₀
NIER1	30.66	0.32	49%	0.11	53%	33%
NIER2	64.09	0.35	32%	0.17	28%	49%
NIER3	86.68	0.72	18%	0.37	11%	51%
NIER4	91.33	0.66	30%	0.37	24%	56%
NIER5	120.77	0.63	20%	0.37	18%	58%
NIER6	132.67	0.38	21%	0.21	19%	55%
NIER7	170.76	2.24	8%	1.09	7%	49%
NIER8	180.30	2.30	4%	1.10	4%	48%
NIER9	204.09	2.96	8%	1.69	7%	57%
NIER10	224.39	6.09	10%	3.43	8%	56%
NIER11	186.34	3.24	12%	2.03	12%	63%
NIER12	190.35	4.94	15%	3.42	14%	69%
NIER13	227.70	9.28	21%	6.35	17%	68%
NIER14	139.00	5.40	42%	3.90	39%	72%
NIER15	311.06	19.73	30%	14.28	25%	72%

Table 3. Information of brake wear particle characteristics and dissipation energy of each NIER test cycle steps.



Fig. 8. Emission factor of (a) PM_{10} and (b) $PM_{2.5}$ variation according to each NIER test cycle steps.

큰 영향을 미치는 것으로 추측된다.

특이한 점은 NIER1, NIER2 등 저속에서는 브레이 크 드래그에 의한 BWPs 생성량 비중이 30~40% 이상 으로 높았다. 이후 NIER7-9 단계에서는 브레이크 드 래그의 비중이 10% 이하로 낮아지지만, NIER15 단계



Fig. 9. Comparison of BWPs emission mass quantity and total braking dissipation energy of each NIER test cycle steps.

로 가면서 다시 브레이크 드래그의 비중이 30% 이상 으로 증가한다. 그림 3(b)에서 보듯이, NIER15 단계 에서는 처음 120 km/h로 가속시에 브레이크 드래그 로 인한 BWPs 배출이 크게 일어났으며, 그 후로는 가 속할 때는 BWPs 배출이 크지 않았다. 이는 이전 주행 단계에서 브레이크 디스크와 패드로부터 배출되지 못했던 입자들이 더 높은 회전속도를 가지는 15단계 가 처음 시작되자 대량으로 이탈하였으며, 이 후에는



Fig. 10. Normalized particle mass concentration distribution for each NIER test cycle steps measured by (a) APS and (b) OPC.

고속 회전에도 이탈할 입자가 남아 있지 않았던 것으 로 추측된다.

NIER 주행 사이클에서 평균 속도가 높아질수록, 즉 디스크 회전속도가 빨라질수록 PM25/PM10 비율 이 증가하였다. 이는 고속회전을 할수록 생성되는 입 자 크기가 작아진다는 것을 의미한다. 그림 10에 나 타나듯이, 평균 주행속도가 30 km/h 이하로 낮은 NIER1 단계에서는 광학 입경이 4 µm 이상인 입자가 굉장히 높은 비율로 배출되었으며, 공기역학적 입경 도 4~10 μm인 입자가 다수 측정되었다. 공기역학적 입경과 광학 입경이 비슷한 입자가 많이 측정된 것은 공동이 적은 입자가 큰 덩어리로 다량 배출되었다는 것을 의미한다. 주행속도가 60 km/h 이하인 NIER6 단계에서는 광학 입경이 4 µm 이상인 입자가 여전히 배출되면서, 500~600 nm의 광학 입경을 가지는 입 자들도 같이 배출되기 시작한다. 또한, 공기역학적 입 경은 크게 낮아져서 2.48 µm가 최빈값이 된다. 이 단 계부터는 앞서 그림 6에서 설명한 것처럼 광학 입경 4μm 이상의 크기를 가지는 입자들이 공동을 가지고

작은 밀도로 발생한다고 판단된다. 주행속도가 80 km/h 이하인 NIER12 단계와 130 km/h 이하인 15단 계에서는 공기역학적 입경의 최빈값이 1.8, 1.7 µm로 낮아지며, 500~600 nm의 광학 입경을 가지는 입자 비율이 증가하고 4 um 이상의 광학 입경을 가지는 입 자 비율이 감소한다. 제동력이 증가할수록 더 작은 마모 입자가 발생하는 것이다. 이처럼 평균속도를 기 반으로 브레이크 마모로 배출되는 입자의 특성이 뚜 렷하게 구분되기 때문에 WLTC나 Novel braking 주 행 사이클과 하나의 대표적인 사이클을 통해 BWPs 배출을 특정하는 것 외에, NIER 주행 사이클처럼 속 도별로 구간을 나누어서 평가하는 방법도 필요하다. 단, NIER 주행 사이클은 속도에만 중점이 맞춰져 있 고 BWPs 배출량에 직접적 관련이 있는 브레이크 소 산에너지는 고려되어 있지 않으므로, 이러한 부분을 개선할 필요가 있다.

4. 결 론

브레이크 동력계를 이용하여 Novel braking, NIER, WLTC의 세 가지 주행 사이클에 대해 브레이크 마모 입자의 배출 특성을 평가하였다. 본 측정에는 APS, OPC, DustTrak과 같이 실시간 입자농도 측정장비와 필터에 포집된 PM의 무게를 칭량하는 중량법이 동 시에 활용되었다. 측정결과 APS는 밀도 보정 없이 중 량법과 비슷한 측정결과를 보여주었지만, OPC와 DustTrak은 중량법을 통해 보정 계수를 적용하여야 한다. 단, 주행사이클에 따라 BWPs 발생 특성이 다르 게 나타났기 때문에 APS 측정결과도 중량법과 오차 가 있었으며, WLTC 기준으로 보정을 한 OPC와 DustTrak 측정결과도 다른 사이클에서는 중량법과 오차가 발생하였다. 3개의 주행 사이클에서 각 단위 제동 이벤트별 소산에너지와 BWPs 발생량이 지수적 으로 비례하였다. 배기가스의 배출계수를 산정할 때 이용되는 NIER 주행 사이클에서도 소산 에너지량에 비례해서 BWPs 배출량이 증가함을 확인하였다.

NIER 주행 사이클에 포함된 1~15단계에서의 각

BWPs 측정결과를 비교한 결과, 평균 주행속도에 따 라서 BWPs의 배출 특성이 달라짐을 확인하였다. 주 행속도가 빨라질수록 500~600 nm의 광학 입경을 가 지는 입자의 배출 비율이 증가하였으며, 4 μm 이상의 광학 입경을 가지는 입자의 배출이 감소하였다. 공기 역학적 입경도 속도가 빨라질수록 최빈값이 4.4 µm 에서 1.7 µm까지 감소하였다. 따라서 WLTC나 Novel braking 주행 사이클처럼 다양한 주행속도가 포함된 대표 주행모드를 통해 BWPs 배출계수를 측정하는 것과 더불어 NIER 주행 사이클처럼 속도별로 구간을 나누어서 평가하는 방법도 필요하다. 단, NIER 주행 사이클은 차량의 속도에만 중점이 맞춰져 있으므로, BWPs 배출량에 직접적 관련이 있는 브레이크 소산 에너지를 고려해서 속도 프로파일을 재구성할 필요 가 있다. 브레이크 마모입자를 평가하기 위한 보편적 인 사이클을 개발할 때 국가 및 지역별로 브레이크 빈도와 차량 속도 차이를 고려해야 한다. 또한, 도심, 교외, 고속도로 등의 운행 조건에서도 제동에 의한 소산에너지 차이가 발생하므로 이들을 종합적으로 고려한 주행 사이클을 개발하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부에서 지원하는 "글로벌탑 환경기 술개발사업(No.2016002070004)" 및 일부 2020년도 과학기술정보통신부에서 지원하는 "한국연구재단-기후변화대응기술사업(No.NRF-2019M1A2A21039 68)"의 수행 결과임.

References

Amato, F., Pandolfi, M., Escrig, A., Querol, X., Alastuey, A., Pey, J., Perez, N., Hopke, P.K. (2009) Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multilinear Engine: A comparison with PMF2, Atmospheric Environment, 43(17), 2770-2780. https://doi.org/ 10.1016/j.atmosenv.2009.02.039

- Amato, F., Cassee, F.R., Gon, H.A.C.D., Gehrig, R., Gustafsson, M., Hafner, W., Harrison, R.M., Jozwicka, M., Kelly, F.J., Moreno, T., Prevot, A.S.H., Schaap, M., Sunyer, J., Querol, X. (2014) Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions, Journal of Hazardous Materials, 275, 31-36. https://doi.org/10.1016/j. jhazmat.2014.04.053
- Chen, B.T., Cheng, Y.S., Yeh, H.C. (1990) A study of density effect and droplet deformation in the TSI aerodynamic particle sizer, Aerosol Science and Technology, 12(2), 278-285. https://doi.org/10.1080/0278682900 8959346
- Gasser, M., Riediker, M., Mueller, L., Perrenoud, A., Blank, F., Gehr, P., Rothen-Rutishauser, B. (2009) Toxic effects of brake wear particles on epithelial lung cells in vitro, Particle and Fibre Toxicology, 6(30). https:// doi.org/10.1186/1743-8977-6-30
- Grigoratos, T., Martini, G. (2015) Brake wear particle emissions: a review, Environmental Science and Pollution Research, 22, 2491-2504. https://doi.org/10.1007/ s11356-014-3696-8
- Hagen, F.H.F., Mathissen, M., Grabiec, T., Hennicke, T., Rettig, M., Grochowicz, J., Vogt, R., Benter, T. (2019a) On-road vehicle measurements of brake wear particle emissions, Atmospheric Environment, 217. https://doi. org/10.1016/j.atmosenv.2019.116943
- Hagen, F.H.F., Mathissen, M., Grabiec, T., Hennicke, T., Rettig, M., Grochowicz, J., Vogt, R., Benter, T. (2019b) Study of brake wear particle emissions: Impact of braking and cruising conditions, Environmental Science and Technology, 53(9), 5143-5150. https://doi.org/10. 1021/acs.est.8b07142
- Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S. (2015) Airborne brake wear particle emission due to braking and accelerating, Wear, 334-335, 44-48. https://doi.org/10.1016/j.wear.2015. 04.012
- Hagino, H., Oyama, M., Sasaki, S. (2016) Laboratory testing of airborne brake wear particle emissions using a dynamometer system under urban city driving cycles, Atmospheric Environment, 131, 269-278. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.014
- Harrison, R.M., Jones, A.M., Gietl, J., Yin, J., Green, D.C. (2012) Estimation of the contributions of brake dust, tire wear, and resuspension to nonexhaust traffic particles derived from atmospheric measurements, Environmental Science and Technology, 46(12), 6523-6529. https://doi.org/10.1021/es300894r
- Hesse, D., Augsburg, K. (2019) Real driving emissions measurement of brake dust particles, SAE Technical Paper,

2019-01-2138. https://doi.org/10.4271/2019-01-2138

- Joo, B.S., Jara, D.C., Seo, H.J., Jang, H. (2020) Influences of the average molecular weight of phenolic resin and potassium titanate morphology on particulate emissions from brake linings, Wear, 450-451, 203243. https://doi.org/10.1016/j.wear.2020.203243
- Kumar, P., Pirjola, L., Ketzel, M., Harrison, R.M. (2013) Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources A review, Atmospheric Environment, 67, 252-277. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.011
- Kwak, J., Kim, H., Lee, J., Lee, S. (2013) Characterization of nonexhaust coarse and fine particles from on-road driving and laboratory measurements, Science of the Total Environment, 458-460, 273-282. https://doi. org/10.1016/j.scitotenv.2013.04.040
- Lawrence, S., Sokhi, R., Ravindra, K., Mao, H., Prain, H.D., Bull, I.D. (2013) Source apportionment of traffic emissions of particulate matter using tunnel measurements, Atmospheric Environment, 77, 548-557. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.03.040
- Liati, A., Schreiber, D., Lugovyy, D., Gramstat, S., Dimopoulos Eggenschwiler, P. (2019) Airborne particulate matter emissions from vehicle brakes in micro- and nanoscales: Morhpology and chemistry by electron microscopy, Atmospheric Environment, 212, 281-289. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.037
- Mamakos, A., Arndt, M., Hesse, D., Augsburg, K. (2019) Physical characterization of brake-wear particles in a PM₁₀ dilution tunnel, Atmosphere, 10(11), 639. https:// doi.org/10.3390/atmos10110639
- Mathissen, M., Grochowicz, J., Schmidt, C., Vogt, R., Hagen, F.H.F., Grabiec, T., Steven, H., Grigoratos, T. (2018) A novel real-world braking cycle for studying brake wear particle emissions, Wear, 414-415, 219-226. https://doi.org/10.1016/j.wear.2018.07.020
- Namgung, H.G., Kim, J.B., Woo, S.H., Park, S., Kim, M., Kim, M.S., Bae, G.N., Park, D., Kwon, S.B. (2016) Generation of

nanoparticles from friction between railway brake disks and pads, Environmental Science and Technology, 50(7), 3453-3461. https://doi.org/10.1021/ acs.est.5b06252

- Nosko, O., Olofsson, U. (2017) Effective density of airborne wear particles from car brake materials, Journal of Aerosol Science, 107, 94-106. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.02.014
- Perricone, G., Matejka, V., Alemani, M., Wahlstrom, J., Olofsson, U. (2019) A test stand study on the volatile emissions of a passenger car brake assembly, Atmosphere, 10(5), 263. https://doi.org/10.3390/atmos10050263
- Sanders, P.G., Xu, N., Dalka, T.M., Maricq, M.M. (2003) Airborne brake wear debris: Size distributions, composition, and a comparison of dynamometer and vehicle tests, Environmental Science and Technology, 37(18), 4060-4069. https://doi.org/10.1021/es034145s
- Tista, M., Gager, M., Haider, S., Pucher, I., Ullrich, B. (2018) European Union Emission Inventory Report 1990-2016 under the UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP); 1977-8449. European Environment Agency. https://doi.org/10.2800/ 571876
- Wahlstrom, J., Olofsson, U. (2014) A field study of airborne particle emissions from automotive disc brakes, Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 229(6), 747-757. https:// doi.org/10.1177/0954407014550053

Authors Information

우상희(한국기계연구원 환경시스템연구본부 선임연구원) 김용래(한국기계연구원 환경시스템연구본부 책임연구원) 이선엽(한국기계연구원 환경시스템연구본부 책임연구원) 최 영(한국기계연구원 환경시스템연구본부 책임연구원) 이석환(한국기계연구원 환경시스템연구본부 책임연구원)