



논문

실험실 운전 조건에서 타이어 마모 지수가 타이어 마모 입자의 물리적 특성에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of Tire Treadwear Rate on the Physical Characterization of Tire Wear Particles in Laboratory Measurements

이석환*, 이선엽, 김용래, 최 영, 이상희

한국기계연구원 환경시스템연구본부

Seokhwan Lee*, Sunyoup Lee, Yongrae Kim, Young Choi, Sang Hee Woo

Environment System Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2019년 10월 9일
 수정일 2019년 11월 16일
 채택일 2019년 11월 18일

Received 9 October 2019
 Revised 16 November 2019
 Accepted 18 November 2019

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

Abstract Vehicles are one of the main sources of particulate matter (PM) in urban areas. The interest in the human health effects of PM associated with road traffic has been studied to characterize the particles and sources. Many researches focused on exhaust emissions, but recent studies have reported that non-exhaust sources such as road dust, tire wear particles (TWPs) and brake wear particles (BWPs) account for an equal amount of exhaust emissions. Tires generally wear out due to the friction between the tire and the road pavement. Minimizing the tire wear could reduce the non-exhaust emission from the tire. Typically, tire treadwear rate (TWR) is an indicator of the PM from tires. Tires that wear out quicker will produce higher tire PM than a more durable tire. In this study, the effects of tire treadwear rate on the physical properties of TWPs were investigated in laboratory measurements such as tire simulator and chassis dynamometer. A tire simulator installed in an enclosing chamber was employed to eliminate artifacts caused by interfering particles during the generation and measurement of TWPs. The results showed that the higher tire treadwear rate generated lower PM under constant speed conditions. However, there is no obvious correlation between the treadwear rate and PM under slip conditions. Notably, formation of ultrafine particles were observed during the slip conditions.

Key words: Tire wear particles (TWPs), Tire treadwear rate (TWR), Particulate matter (PM), Tire simulator, Chassis dynamometer

1. 서 론

대기 중에 존재하는 입자상물질 (PM)은 인체 위해성을 가질 뿐만 아니라 가시거리 및 기후 변화에도 큰 영향을 준다 (Valavanidis *et al.*, 2008; Pope *et al.*, 2002; Pilinis *et al.*, 1995). PM은 다양한 크기와 화학 성분으로 구성된 입자들로 이루어져 있으며, PM 농도의 경우 현재 공기질을 판단하는 기준으로 사용되고 있다 (Harrison and Yin, 2000). 대기 중에 존재하는 입자들

은 다양한 배출원에서 생성되는데 특히 도로 이동 오염원의 경우 도심 지역의 PM 형성에 중요한 기여를 하는 것으로 알려져 있다 (Harrison *et al.*, 2012; Thorpe and Harrison, 2008). 차량에서 배출되는 PM은 배출원에 따라 엔진배출 (Exhaust) 및 비배출 (Non-exhaust) PM으로 구분할 수 있다. 배출 PM은 불완전한 연료 연소 및 윤활유의 휘발에 의해 생성될 수 있는 반면에 (Vouitsis *et al.*, 2009) 비배출 PM은 타이어, 브레이크, 도로 마모뿐만 아니라 도로 먼지 재비산을

통해 생성될 수 있다(Grigoratos and Martini, 2014; Abu-Allaban *et al.*, 2003). 근래 강화되는 배기규제를 만족하기 위하여 엔진 연소 기술 및 후처리 장치 기술의 경우 비약적인 발전이 이루어졌으며 이로 인하여 배출 PM의 양은 감소하고 있는 반면에 타이어, 브레이크 및 도로 마모 등에 의해서 생성되는 비배출 PM의 상대적인 기여도는 증가하는 추세이다(Timmers and Achten, 2016; Amato *et al.*, 2014).

실험실 모사 조건 및 실도로 주행 조건에서 비배출 PM의 물리, 화학적 특성을 규명하기 위한 다양한 연구들이 수행되었다(Kim and Lee, 2018; Kwak *et al.*, 2013; Mathissen *et al.*, 2011; Gustafsson *et al.*, 2008; Dahl *et al.*, 2006). 하지만 타이어 마모 입자 관련 연구의 경우 실도로 주행 조건에서는 도로입자와 타이어 마모 입자를 실시간으로 구분할 수 없으며 실험실 조건에서는 실제 도로와 타이어와의 마모 상황을 정확하게 모사하기 어렵다는 기술적 한계로 인하여 제한적인 연구만 이루어졌다. 더욱이 다양한 연구자들이 보고한 타이어 마모 입자의 물리적 특성의 경우에도 실험방법 및 측정장비의 다양성으로 인하여 서로 다른 결과를 나타내었으며 심지어는 서로 상반된 결과를 나타내기도 하였다(Grigoratos and Martini, 2014). 타이어 마모 미세먼지는 도심 미세먼지 및 초미세먼지의 주요 배출원이라고 보고한 연구자도 있는 반면에(Foitzik *et al.*, 2018; Kwak *et al.*, 2014; Mathissen *et al.*, 2011; Dahl *et al.*, 2006) 타이어 마모 미세먼지는 도로먼지와 함께 혼입되어 배출되므로 입경이 매우 커지게 되어 PM₁₀, PM_{2.5} 범주에 속하는 미세먼지의 비율은 매우 낮다고 주장하는 연구자들도 있다(Panko *et al.*, 2013; Kreider *et al.*, 2010).

타이어는 수명 기한 내에 1.0~1.5 kg의 트레드가 마모되며 그 중에서 10% 미만의 입자가 PM₁₀ 범주에 속하는 것으로 알려져 있다(Barlow, 2014; Boulter *et al.*, 2006). 따라서 타이어 트레드가 빨리 마모되는 타이어의 경우 저마모 타이어에 비하여 미세먼지 배출량이 높다고 보고되었는데(Barlow, 2014; Crosta, 2011) 이에 대한 실험적 근거가 빈약하며 타이어 마모 입자의

크기분포에 대한 결과의 신뢰성이 낮아서 논란의 여지는 있다. 최근 Grigoratos *et al.* (2018)은 스웨덴 vTi 연구소의 도로 시뮬레이터를 사용하여 타이어 마모 지수에 따른 PM 배출량을 측정하였는데 타이어 마모 지수와 PM 배출량은 별다른 상관관계가 없다고 보고하였다. 하지만 Grigoratos *et al.* (2018)의 연구에서는 도로 마모 및 대기 중 입자 등 외부 요인으로 발생하는 입자들을 완전하게 차단하지 못하였으므로 외부 요인에 의한 미세먼지가 타이어 마모에 의한 미세먼지 발생보다 더 큰 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 외부 요인에서 발생하는 대기 입자를 차단하고 타이어 마모 입자만을 측정하기 위해 클린 챔버를 사용하였다. 또한, 타이어 입자의 발생은 일반적으로 전단력(Shear force)이 발생하는 정속 운전 조건의 경우 조대입자가 발생하고 마찰열(Frictional heat)이 발생하는 슬립 운전 조건의 경우 미세입자가 발생하므로 이를 독립적으로 운전할 수 있는 타이어 시뮬레이터를 사용하여 타이어 마모 지수와 PM 배출량과의 상관관계를 평가하였다. 추가적으로 실제 차량에서 발생하는 타이어와 도로의 마모 상황을 모사하기 위하여 차대동력계를 이용하여 타이어 마모 지수에 따른 PM 배출량을 측정하였다. 타이어에서 발생하는 초미세입자의 경우 타이어에 전달되는 마찰열에 의해서 발생하게 되므로 타이어 표면온도 변화와 초미세입자의 발생 관계를 주의 깊게 살펴보았다.

2. 실험 방법

2.1 대상 타이어

타이어의 성능을 표기하는 방법의 하나로 사용되는 UTQG (Uniform Tire Quality Grading) 등급은 미 운수국과 고속도로 안전협회가 미국 내에서 판매되는 타이어에 대한 마모, 제동, 내열성능을 수치로 표시하도록 한 제도이다. 우리나라에서 판매하는 타이어에서도 동일한 방식의 등급이 표시되어 있으며 이 중 타

Table 1. Specifications of test tires.

Tires	Type	Size	UTQG		
			TWR	Traction	Temperature
Tire A	All season	205/65R16 95T	460	A	A
Tire B	All season	205/65R16 95H	500	A	A
Tire C	All season	P205/65R16 95V	560	A	A
Tire D	All season	P205/65R16 94H	640	A	A
Tire E	All season	205/65R16 95H	720	A	A

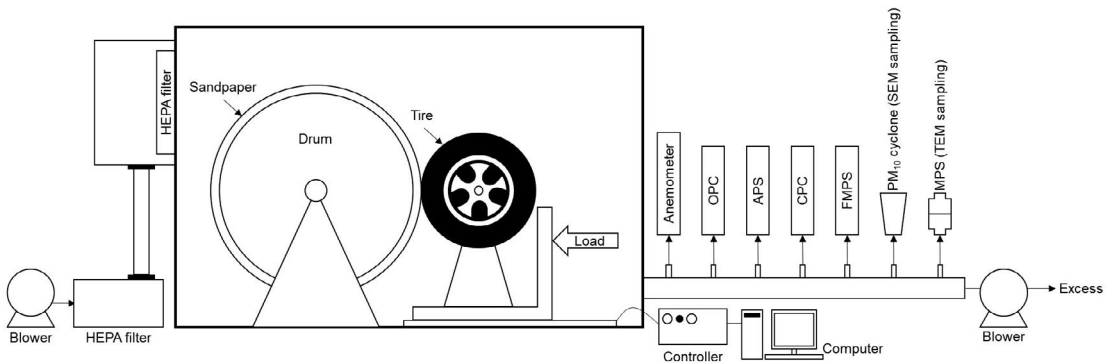


Fig. 1. Schematic of the tire simulator operated within the enclosing chamber and the measurement setup (Kim and Lee, 2018).

이어 마모 지수로 사용될 수 있는 TWR (Treadwear rate)가 마모성능을 판단할 수 있는 기준이 된다. 즉, 마모 지수가 높을수록 타이어 트레드가 천천히 마모 되는데 타이어 트레드 마모와 미세먼지 발생량과의 상관관계가 매우 중요하다. 본 연구에서는 대상 타이 어로 타이어 마모 지수가 460~720을 가지는 5종의 사계절 타이어를 선정하였으며 각 타이어의 사양은 표 1과 같다. 타이어 크기에 따른 영향을 배제하기 위하여 동일한 크기의 타이어를 선정하였으며 공기압은 36 psi (2.482 bar)로 고정하였다.

2. 2 타이어 시뮬레이터

그림 1에서는 본 연구에서 사용한 타이어 시뮬레이 터 (NEOPLUS Inc., Daejeon, Korea)의 개략도를 보여 주고 있는데 크게 회전 드럼, 테스트 타이어 및 제어 시스템으로 구성되어 있다 (Kim and Lee, 2018). 타이 어 시뮬레이터는 횡 방향 하중 (100~8,000 N), 드럼 속 도 (20~180 km/h), 슬립 속도 (-20~20 km/h) 및 킬팅

각도 (-6~6°)를 1초 단위로 제어하고 저장할 수 있다. 회전 드럼의 직경은 1.2m이며 드럼 표면은 80방 규격 의 사포로 감싸서 아스팔트 도로의 거칠기를 모사하 였다 (Foitzk et al., 2018; Park et al., 2018). 본 연구에서 사용한 사포가 비록 아스팔트 도로의 거칠기를 모사 할 수 있지만 실제 도로 주행 조건에서 발생하는 마모 현상에 비하여 적은 양의 마모를 발생시킨다고 보고 되고 있다 (Dall'Osto et al., 2014). 또한, 타이어 시뮬레 이터 자체도 타이어 접촉 부하, 하중 전달 방향 (수직 대 수평), 공기역학적 조건 등 실제 도로 주행 상황을 정확하게 모사할 수 없기 때문에 마모 특성 자체도 다 른 가능성이 존재하지만 현재 상황에서는 이에 대한 해결책이 마땅히 없는 실정이다.

2. 3 클린챔버 및 측정장비

실도로 주행 조건에서는 도로 먼지 및 대기 중 미세 먼지가 같이 유입되므로 타이어 마모 미세먼지만을 단독으로 측정하는 것이 불가능하다. 타이어 시뮬레

이터를 사용하는 실내 조건에서도 외부 공기에 의한 간섭을 차단하기 위하여 본 연구에서는 클린챔버(길이: 3.5 m × 너비: 2.4 m × 높이: 2.2 m)를 구축하여 타이어 시뮬레이터를 챔버 안에서 구동되도록 하였다. 고효율 미립자 공기(HEPA) 필터를 통해 입자가 없는 깨끗한 공기를 일정 유량($110 \pm 9 \text{ L min}^{-1}$) 챔버 내로 공급하였으며 챔버 내의 공기가 완전히 깨끗해진 상태에서 실험을 시작하였다.

챔버 하단의 샘플링 포트에는 여러 입자 측정 장비가 설치되었는데 입자의 손실을 최소화하기 위하여 전도 튜브를 사용하여 포트와 장비들을 연결하였다. PM은 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 미세먼지(PM_{10}), 즉 공기역학적 직경이 각각 $2.5 \mu\text{m}$ 및 $10 \mu\text{m}$ 미만인 입자로 구분할 수 있는데 흔히 필터 또는 기관에 수집된 먼지를 중량 분석을 통해 평가하거나 광산란법을 통하여 실시간으로 PM 농도를 측정하게 된다. 본 연구에서

는 실시간 기법이 PM 수준의 급격한 변화를 측정하는데 더 적합하기 때문에 후자의 방법을 사용하였다. PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 임팩터가 각각 장착된 2대의 Dusttrak (model 8533, TSI) 및 OPC (Optical particle counter, model 1.180, Grimm)를 사용하여 미세먼지 및 초미세먼지의 농도를 측정하였다. 타이어 마모 미세먼지의 입경에 따른 중량농도 분포는 APS (Aerosol particle sizer, model 3321, TSI)를 이용하여 $0.37 \sim 20 \mu\text{m}$ 크기의 공기역학적 입경 (Aerodynamic diameter)을 가지는 입자에 대한 농도 분포를 측정하였다. 측정 시 발생하는 입자의 손실을 최소화하기 위하여 장비와 샘플링 포트의 유량을 고려하여 등속흡입(Isokinetic) 조건을 구현하였다. 광산란법을 사용하는 PM 측정기기의 경우 일반적으로 Arizona dust를 사용하여 교정을 하게 되므로 다양한 발생원에서 생성되는 PM을 측정하는 경우 오차가 발생할 수 있다. 이를 보정하기 위

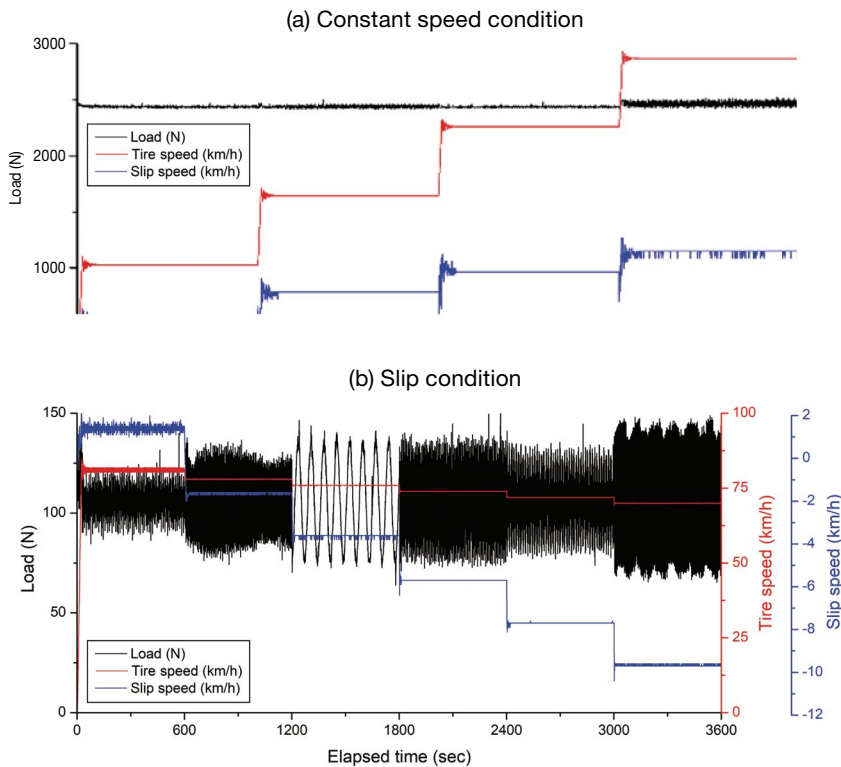


Fig. 2. Tire simulator operating conditions, (a) constant speed, (b) slip.

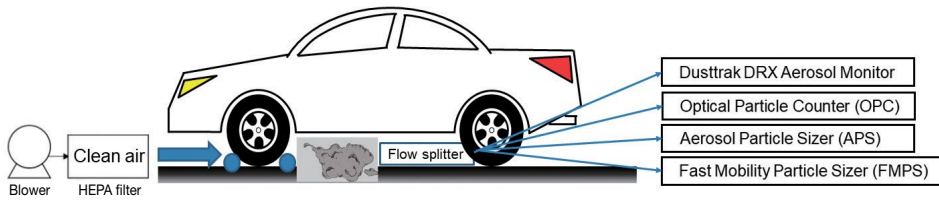


Fig. 3. Schematic of a laboratory measurement setup using chassis dynamometer.

한 방법으로 캐스케이드 임팩터 (Cascade impactor, Dekati)를 사용하여 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 중량을 측정 후 각 측정기기와의 상호 비교를 통하여 환산계수 (Scale factor)를 구하였다. 타이어 마모로 인하여 발생하는 초미세입자의 수농도 및 입경분포를 측정하기 위해서는 5.6~560 nm 범위의 입자 측정이 가능한 FMPS (Fast mobility particle sizer, model 3091, TSI)를 사용하였다.

실험 중 타이어는 회전하게 되므로 타이어 트레드 표면온도를 열전대를 사용하여 측정하기는 불가능하다. 따라서 비접촉 방식의 적외선 온도계 (model VT04, Fluke)를 사용하여 타이어 트레드 표면온도를 측정하였다.

2.4 운전조건

타이어 입자의 발생은 전단력이 발생하는 정속 운전 조건과 마찰열이 발생하는 슬립 운전 조건에 따라서 입자의 특성이 상이하므로 두 가지 운전조건 하에서 실험을 수행하였다. 우선 정속 운전 조건의 경우 2,500 N의 하중에서 드림 속도를 50, 80, 110, 140 km/h로 변경하면서 각 10분간 유지하였다. 같은 사이클을 총 4회 반복하였으며 160분 동안 운전하면서 총 253 km의 거리를 주행하였다. 슬립 조건의 경우 드림에 장착된 모터와 타이어 휠 부분에 장착된 모터를 제어하여 인위적으로 슬립을 주는데 100 N의 하중, 80 km/h의 속도 조건하에서 슬립속도를 0~10 km/h 범위에서 2km/h씩 각 10분간 총 60분 동안 구동하였다. 그림 2에서는 본 연구에서 사용한 두 가지 운전조건을 나타내었다.

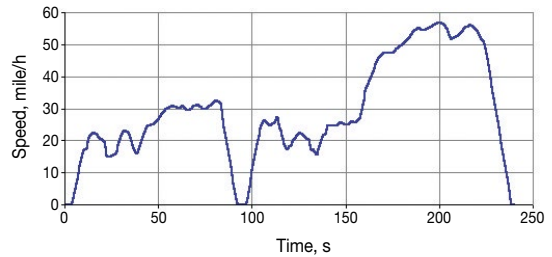


Fig. 4. Inspection & Maintenance driving cycle of IM240.

2.5 차대동력계 실험

타이어 시뮬레이터를 사용하는 경우 실제 차량에서 발생하는 타이어와 노면의 마찰 현상을 정확하게 모사하기 힘들다. 이를 보완하기 위하여 타이어 시뮬레이터 실험과는 별도로 차대동력계상에서 실제 차량을 이용하여 타이어 마모 입자를 측정하는 실험을 수행하였다. 그림 3에 차대동력계 실험 장치의 개략도를 표현하였는데 타이어 시뮬레이터 실험처럼 차량 및 롤러 전체를 챔버로 감싸기는 여건상 불가능하므로 차량의 앞 타이어 부근으로 고효율 미립자 공기 필터를 통과한 입자가 없는 깨끗한 공기를 불어 넣어주었다. 타이어 시뮬레이터 실험과 동일하게 아스팔트 노면의 거칠기를 모사하기 위하여 차대동력계의 드림에 80방 규격의 사포를 부착하였다. 이전 실험과 동일한 측정 장비를 사용하여 타이어 마모 입자의 PM 배출 특성을 평가하였다. 대상 차종은 2,000 cc 가솔린 엔진이 장착된 중형 승용차로 공차중량은 1,560 kg이다.

차대 동력계 실험은 미국 에너지환경청(EPA; Environmental Protection Agency)이 차량의 검사 및 유

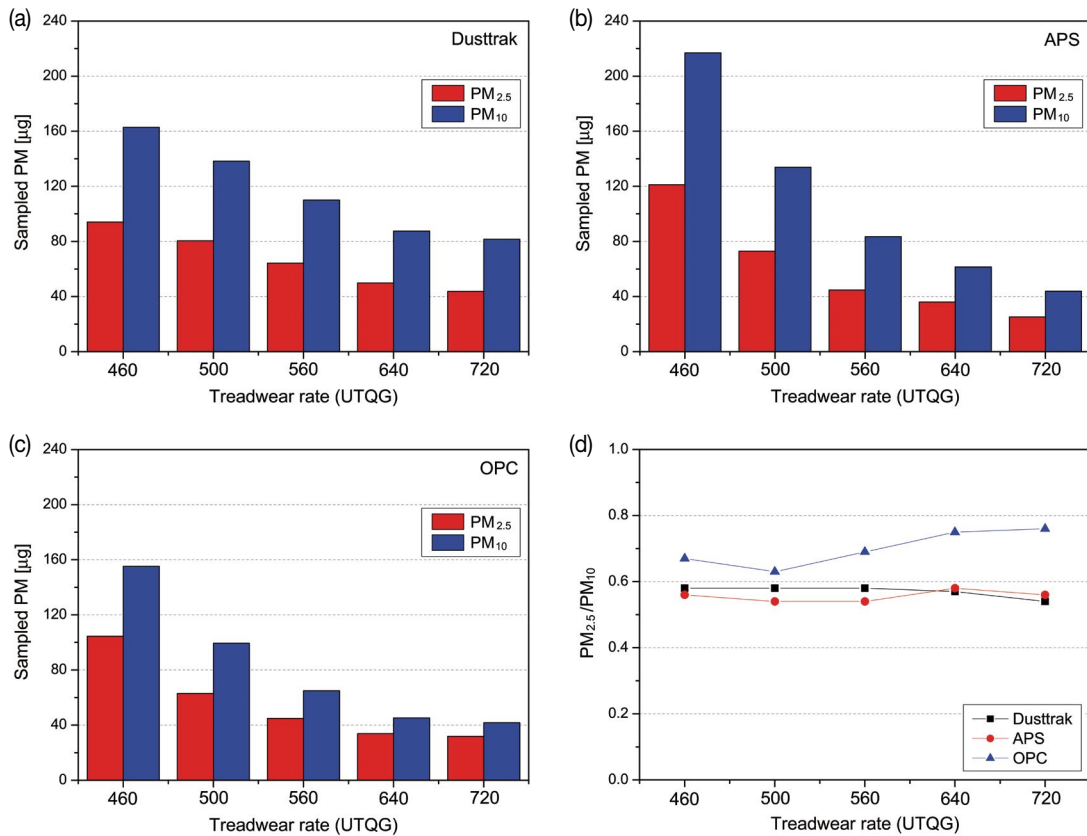


Fig. 5. Sampled PM_{2.5} and PM₁₀ of TWPs using various instruments under constant speed condition: (a) Dusttrak, (b) APS, (c) OPC, (d) PM_{2.5}/PM₁₀.

지보수를 위해 FTP-75 사이클을 기반으로 개발한 IM240 주행 사이클 상에서 수행되었다. 그림 4에 나타난 바와 같이 IM240은 평균속도가 47.3 km/h이고 최대 속도가 91.2 km/h로 3.1 km 구간을 240초 동안 운행하는 비교적 짧은 주행 사이클이다.

3. 실험 결과

3.1 정속 운전 조건에서 타이어 마모 지수에 따른 미세먼지 발생 특성

타이어의 속도를 50, 80, 110, 140 km/h로 변화시키는 정속 운전 조건하에서 각 측정 장비별로 측정된 PM_{2.5}과 PM₁₀의 중량 및 PM_{2.5}/PM₁₀을 그림 5에 나

타내었다. 본 결과에서 나타난 PM 수치는 동일한 사이클이 4번 반복되는 160분 동안의 운전 조건하에서 측정된 미세먼지의 배출량을 모두 적산한 값에 환산 계수를 적용한 것이다. 각 장비별로 포집된 PM의 절대값은 다르지만 타이어 마모 지수 증가에 따라서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 배출량이 감소하는 경향은 모든 장비에서 확연하게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 타이어 마모 지수가 증가하게 되면 타이어 트레드 마모량이 감소하게 되며 이는 타이어 트레드 마모량의 감소로 인하여 결론적으로 미세먼지가 저감될 수 있다는 결과를 얻었다. PM_{2.5}/PM₁₀을 비교해 보면 PM₁₀, PM_{2.5} 임팩터를 장착한 Dusttrak 결과와 APS의 결과가 비슷한 수준으로 평가되었고 OPC의 경우 다소 높은 결과값을 보였다. 이는 Dusttrak과 APS에서 측정

한 미세먼지의 입경값은 공기역학적 입경 (Aerodynamic diameter)에 기반 한 값이지만 OPC의 경우 광학적 입경 (Optical diameter)에 기반한 결과이므로 차이가 발생할 수 있다. 또한, OPC의 경우 장비 자체적으로 입경이 커질수록 검출 감도가 약간 떨어지게 되므로 PM₁₀의 상대적인 농도값이 다른 장비에 비해 낮다고 판단된다.

타이어 마모에 의한 미세먼지 배출량이 가장 많은 Tire A의 경우라고 하더라도 주행 거리당 PM₁₀ 배출량은 차량 1대당 2.4~3.2 µg/km 수준으로 6~10 mg/km가 배출된다는 기존 문헌에 비해서 매우 낮은 수준을 보이고 있다 (Grigoratos and Martini, 2014). 이는 차량의 정속 운전 조건에서는 타이어와 도로의 마찰이 거의 발생하지 않으므로 타이어 마모 미세먼지의 배출량이 미미하다는 기존의 연구결과와 동일하다 (Kim and Lee, 2018; Kwak *et al.*, 2013; Mathissen *et al.*, 2011). 또한, 타이어 시뮬레이터에서 아스팔트를 모사한 Grit paper를 이용하여 타이어를 마모시키는 경우 실제 상황에서 발생하는 마모 (Abrasion) 상황과 다른 연삭 (Grinding) 형태의 마모 상황이 발생하므로 실제 도로 주행 중에 발생하는 타이어 마모 미세먼지와 특성이 다를 수 있다. 그림 5(d)에 나타낸 PM_{2.5}/PM₁₀ 결과를 살펴보면 그 값이 APS 기준 0.55~0.59 수준을 나타내고 있는데 이는 PM_{2.5} 범위에 속하는 입자들이 55~59% 정도 포함되어 있다는 것이다.

그림 6은 정속 운전 조건에서 APS에 의해 측정된 타이어 마모 지수에 따른 타이어 마모 입자의 입경별 질량농도분포를 나타낸 것이다. 사이클별로 농도 차이가 크게 나타나므로 미세먼지의 농도가 가장 크게 측정되는 첫 번째 사이클에서의 마모 입자 농도를 평균한 결과를 나타내었다. 전체적으로 타이어 마모 입자는 약 3~4 µm 부근에서 최빈값 (mode diameter)을 나타내고 있으며 타이어 마모 지수가 높을수록 질량 농도가 감소하는 경향을 가지는 것으로 나타났다. 동일한 시험장치를 이용하여 속도별 타이어 마모 입자를 측정하는 기존 연구에서는 동일하게 3~4 µm 부근에서 최빈값을 나타냈지만 단봉 형태의 질량농도분포

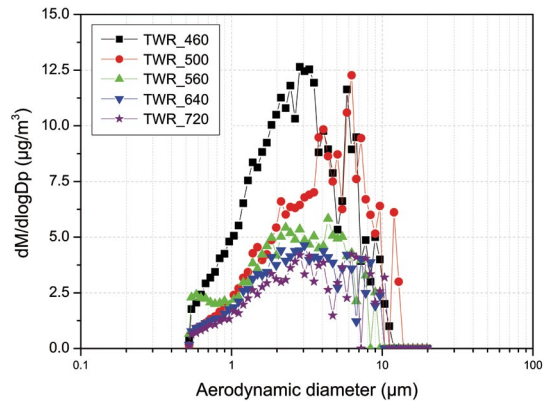


Fig. 6. Average mass size distributions of TWPs according to tire wear rate under constant speed condition.

를 나타냈으며 10 µm 이상의 크기를 가지는 입자들이 검출되지 않았다 (Kim and Lee, 2018). 하지만 본 연구에서는 5~20 µm 정도의 입경 크기를 가지는 조대입자들도 검출이 되었는데 이는 타이어의 속도가 변하는 순간 타이어와 드럼 사이에 마찰이 발생하며 이로 인하여 상대적으로 큰 입자들이 순간적으로 발생하는 것이다. 특히, 타이어 마모 지수가 낮은 Tire A와 Tire B의 경우 5~6 µm 부근에서 또 하나의 최빈값을 보이는 양봉 형태의 분포를 나타내었다. 이는 마모 지수가 낮은 타이어의 경우 상대적으로 고무의 경도가 낮아서 속도 변화 구간에서 마찰에 의한 큰 입자들의 발생량이 많은 것이다. Gustafsson *et al.* (2008)은 로드 시뮬레이터 장치를 이용하여 타이어 마모 입자의 물리적 특성을 관찰하였는데 입경별 질량농도 분포를 측정하는 결과 최빈값이 studded tire에서 3~4 µm, friction tire에서 2~4 µm, summer tire의 경우 2 µm 이하인 것으로 보고하였다. Thorpe and Harrison (2008)은 타이어 트레드의 마모에 의해 발생하는 입자는 주로 2.5 µm보다 큰 범위에 존재한다고 보고하였으며, Boulter *et al.* (2006)은 그의 보고서에서 타이어 마모 입자의 미세먼지와 조대입자의 상대적인 질량분포는 샘플링 조건에 따라 그 결과값이 달라질 수 있다고 설명하였다. 본 연구에서 사용된 시험장치 및 실험조건이 기존 연구자들이 수행한 방법과 동일하지 않지

만 최빈값이 나타나는 입경은 유사한 수준으로 나타났다.

정속 운전 조건에서는 50, 80, 110, 140 km/h의 속도

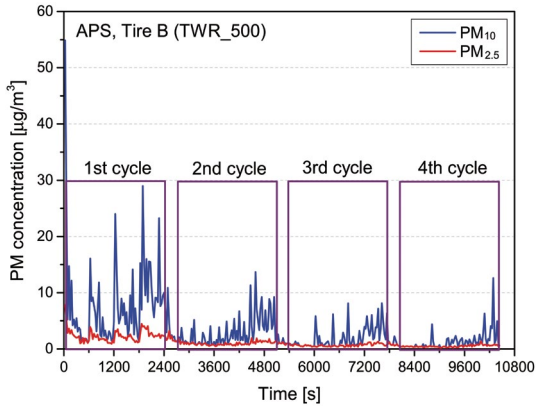


Fig. 7. PM concentrations of TWPs from Tire B under constant speed driving cycle.

로 10분씩 총 40분 동안 운전한 조건을 한 사이클로 설정하여 총 네 사이클 160분을 운전하게 된다. 그림 7에는 Tire B를 대상으로 APS를 사용하여 네 사이클 동안 측정된 타이어 마모 미세먼지의 PM 배출농도를 나타내었다. 첫 번째 사이클에서는 속도 변화에 따른 PM 농도 변화가 명확하게 구분이 되며 비교적 많은 미세먼지가 발생하지만 두 번째 사이클부터는 미세먼지의 발생량이 매우 낮아지며 네 번째 사이클에서는 마모 미세먼지의 농도가 매우 낮음을 확인할 수 있다.

이는 일반적으로 Summer & All Season용 타이어의 경우 트레드 고무의 온도가 상승함에 따라 타이어 성능(연비/제동/마모)이 향상되는데 (Conant, 1971), 이로 인하여 타이어를 구동시킬수록 타이어 트레드의 온도가 상승하므로 사이클이 진행됨에 따라 미세먼지의 농도가 낮아지는 것이다. 그림 8은 정속 운전 조

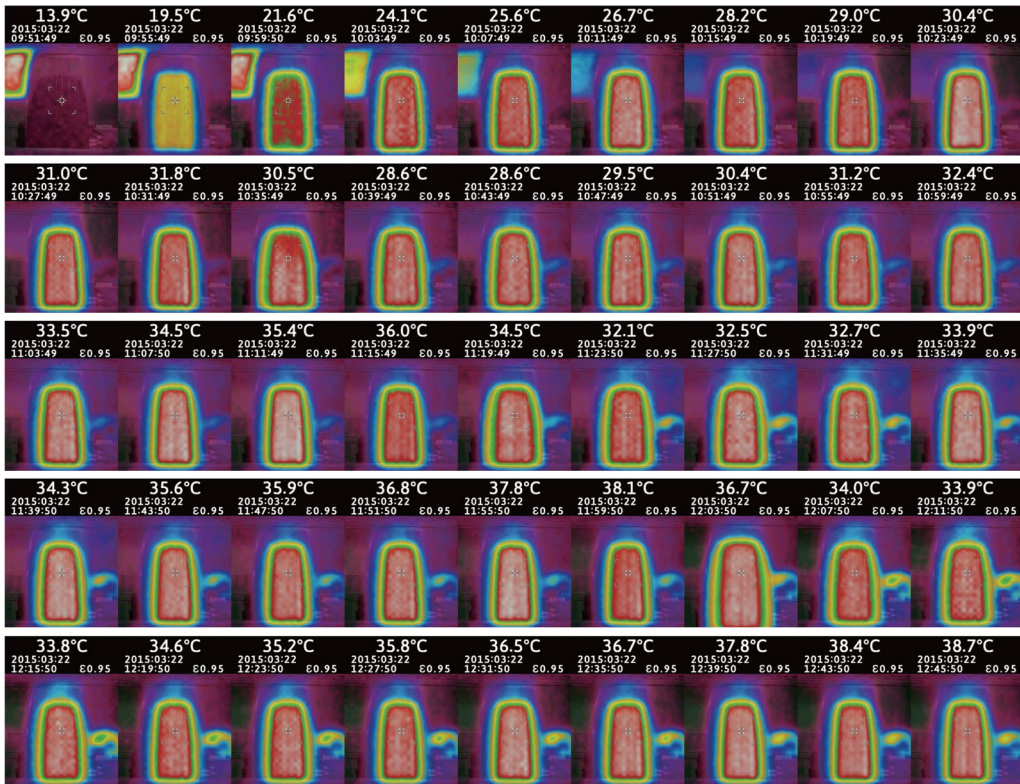


Fig. 8. Surface temperature variation of Tire A under four consecutive constant speed driving cycle.

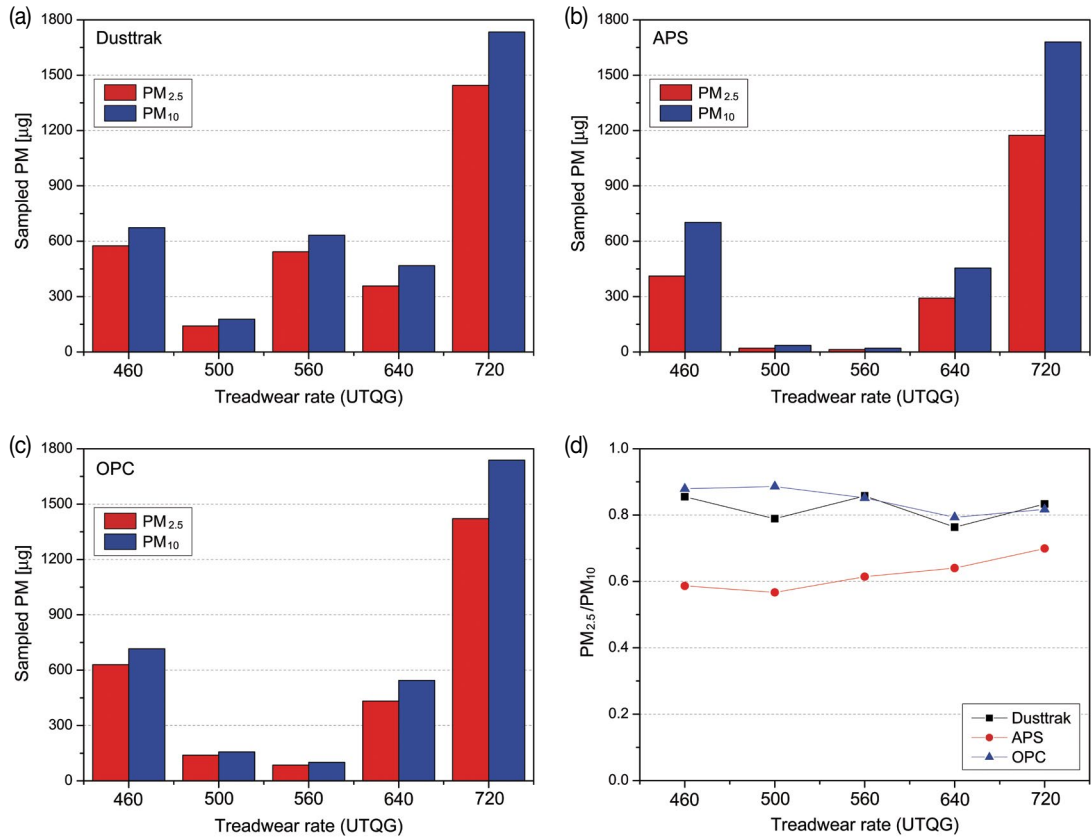


Fig. 9. Sampled PM_{2.5} and PM₁₀ of TWP using various instruments under slip condition: (a) Dusttrak, (b) APS, (c) OPC, (d) PM_{2.5}/PM₁₀.

건에서 비접촉식 적외선 온도계로 촬영한 Tire A의 표면온도 변화를 시간별로 나타내고 있다. 실험 전 상태에 비하여 마모 실험을 수행하는 경우 시간이 지날수록 표면온도가 높아지며 총 네 사이클 실험을 수행한 후에는 타이어 트레드 표면온도가 25°C 가까이 상승한 것을 확인할 수 있다.

3.2 슬립 운전 조건에서 타이어 마모 지수에 따른 미세먼지 발생 특성

타이어와 드럼에서 미끄럼이 발생하는 슬립 조건에서 타이어 마모 지수에 따른 미세먼지 발생 특성을 평가하기 위해 타이어 시뮬레이터의 하중을 100 N, 속도를 100 km/h로 고정시킨 뒤 10분 간격으로 슬립 속도를 0~10 km/h까지 2 km/h 간격으로 변화시켰다.

그림 9에서는 각 측정 장비별로 측정된 PM_{2.5}과 PM₁₀의 중량 및 PM_{2.5}/PM₁₀ 값을 나타내었다. 본 결과에서 나타낸 PM 수치는 60분 동안의 슬립 운전 조건하에서 측정된 미세먼지의 배출량을 모두 적산한 값에 환산계수를 적용한 것이다. 정속 운전 조건에서는 타이어 마모 지수 증가에 따라서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 배출량이 감소하는 경향을 나타내었지만 슬립 운전 조건에서는 타이어 마모 지수에 따른 영향이 나타나지 않았으며 오히려 마모 지수가 가장 높은 Tire E에서 모든 측정 장비에서 미세먼지 발생량이 가장 높게 측정되었다. 일반적으로 타이어 마모 지수가 높은 타이어의 경우 트레드 고무가 딱딱한 성질을 가지고 있는데 이로 인하여 슬립 조건에서 발생하는 연삭 형태의 마모에서는 오히려 마모 지수가 높을수록 타이어 마모 미

세먼지의 발생량이 많아질 가능성이 있다. 슬립 조건에서 APS로 측정된 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 값은 정속 운전 조건의 0.55~0.59에 비해서 높은 0.57~0.70 수준을 나타내고 있는데 이는 더 미세한 입자들이 슬립 조건에서 많이 배출되고 있음을 알 수 있다.

전체적으로 정속 운전 조건에 비하여 슬립 운전 조건에서는 타이어 마모에 의한 미세먼지 배출 농도가 매우 높게 측정되고 있는데 미세먼지 배출량이 가장 많은 Tire E의 경우주행 거리 당 PM_{10} 배출량은 차량 1대당 $72 \mu\text{g}/\text{km}$ 수준으로 측정되었다. 정속 운전 조건에 비해서 높은 수치이지만 여전히 $6\sim 10 \text{ mg}/\text{km}$ 가 배출된다는 기존 문헌에 비해서는 매우 낮은 수준이다.

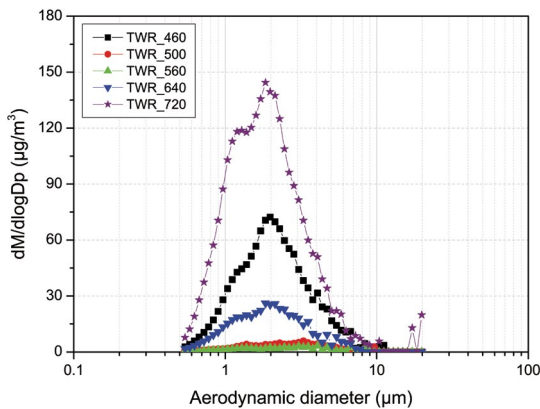


Fig. 10. Average mass size distributions of TWPs according to tire wear rate under slip condition.

그림 10은 슬립 운전 조건에서 APS에 의해 측정된 타이어 마모 지수에 따른 타이어 마모 입자의 입경별 질량농도분포를 나타낸 것이다. $0\sim 10 \text{ km}/\text{h}$ 의 슬립 조건에 대한 결과를 모두 평균하였기 때문에 불확도 구간은 크게 나타났으며 그림에서는 따로 표시하지 않았다. 타이어 마모 지수가 500, 560인 타이어에서는 마모가 거의 발생하지 않았으며 나머지 타이어의 경우 단봉 형태의 입경 분포를 나타내고 있으며 최빈값은 $2 \mu\text{m}$ 부근에 위치하고 있다. 정속 운전 조건에 비하여 최빈값이 작으며 $10 \mu\text{m}$ 보다 입경이 큰 조대입자는 발생하지 않는 것을 확인할 수 있는데 이는 연삭 마모로 인하여 작은 크기의 입자들이 배출되고 있음을 다시 확인시켜 준다.

정속 운전 조건의 경우에는 FMPS로 측정된 결과 $5.6\sim 560 \text{ nm}$ 이하의 입경을 가지는 미세입자들이 거의 발생되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 정속 운전 조건의 경우 타이어와 노면 사이에 슬립 현상이 발생하지 않으므로 실제로 주행 조건과 시뮬레이터 운전 조건 모두에서 미세입자가 발생하지 않는다는 기존의 연구 결과와 동일하다(Foitzik *et al.*, 2018; Kim and Lee, 2018; Kwak *et al.*, 2014; Mathissen *et al.*, 2011). 하지만 슬립 운전 조건의 경우 슬립 속도의 증가에 따라서 미세입자들이 최대 $2.5 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 수준으로 다량 발생하는 것이 관찰되었다. 그림 11은 $0\sim 10 \text{ km}/\text{h}$ 의 슬립 속도 변화에 따라 FMPS로 측정된 타

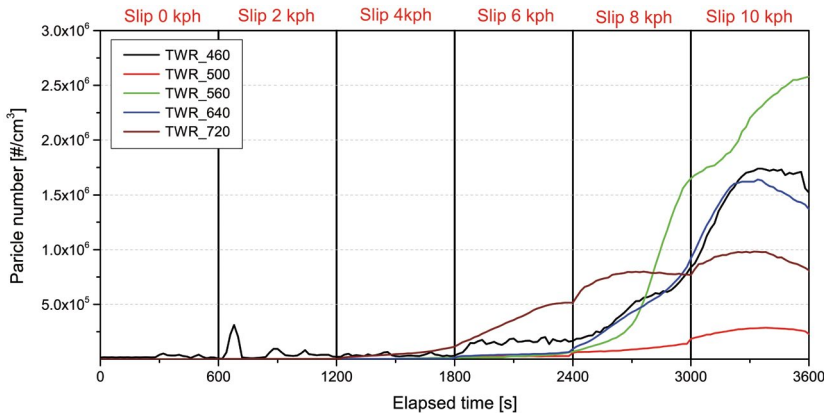


Fig. 11. Particle number of TWPs according to tire wear rate under slip condition.

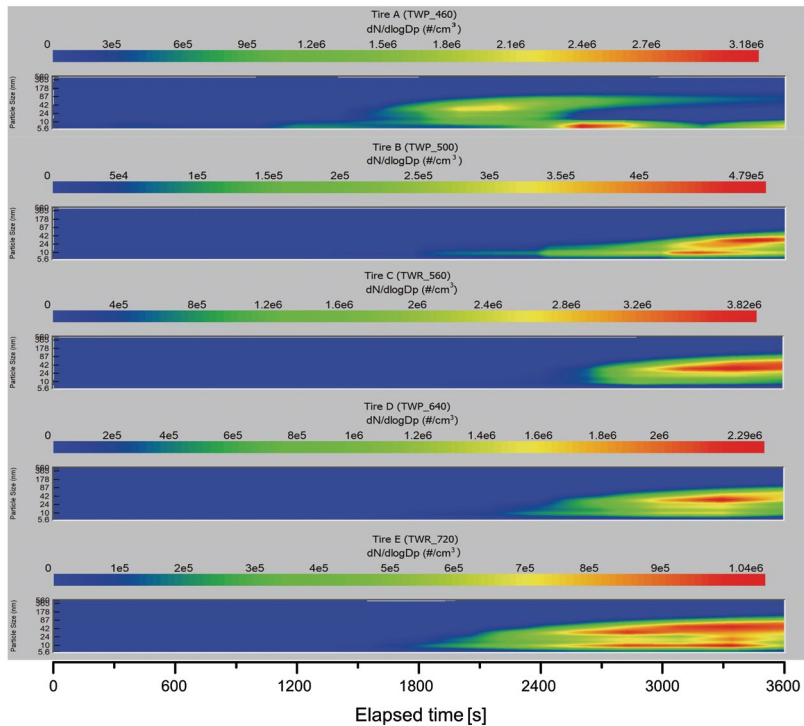


Fig. 12. Particle number size distributions of TWPs according to tire wear rate under slip condition.

이어 마모 미세입자의 수농도를 나타낸 그래프이다. 각 타이어별 미세입자 발생 특성이 동일하지는 않지만 슬립속도가 4 km/h 이하인 조건에서는 미세입자가 거의 발생하지 않고 슬립속도가 6 km/h 이상인 조건에서는 다량의 미세입자들이 발생하고 있음을 알 수 있다. 타이어 마모 지수에 따른 미세입자의 수농도 결과는 그림 9에서 나타낸 미세먼지의 중량 측정 결과와 일치하지 않는다. PM이 가장 많이 배출되는 Tire E (TWR 720)보다 상대적으로 낮은 양의 PM을 배출하는 Tire C (TWR 560)에서 더 많은 미세입자가 배출되고 있다.

그림 12에서는 슬립 운전 조건에서 발생하는 미세입자들의 입경별 수농도 분포를 타이어 마모 지수별로 나타내었다. 슬립 속도의 증가에 따라서 갑자기 많은 양의 미세입자들이 발생하고 있으며 대부분의 입자들은 입경의 크기가 100 nm 이하인 초미세입자로 판명되었다. 타이어에서 발생하는 초미세입자의

경우 기계적인 마모가 아닌 타이어와 노면의 마찰열로 인하여 타이어에 포함되어 있는 유기화합물 및 오일류의 휘발 및 응축 현상에 의해서 생성되는 것으로 알려져 있다 (Park *et al.*, 2017; Mathissen *et al.*, 2011; Dahl *et al.*, 2006). 따라서 기계적인 마모로 결정되는 타이어 마모 지수는 휘발에 의해서 결정되는 미세입자의 수농도와는 별다른 상관성이 없는 것으로 파악된다. 본 연구에서 사용된 타이어들의 고무 성분 및 화학 성분에 대한 정보가 없으므로 타이어 별 미세입자 배출 특성을 정확하게 판단하기는 어렵다.

타이어에서 발생하는 초미세입자의 경우 마찰열과 매우 밀접한 관계가 있으므로 슬립 조건 실험 전후의 타이어 표면온도를 적외선 온도계로 측정하였으며 그림 13에 나타내었다. 이전 연구에서는 주변 온도가 200°C 이상 되는 조건에서 타이어의 유기화합물 및 오일류의 휘발에 의해서 초미세입자가 발생한다고 하였다 (Park *et al.*, 2017). 또한 초미세입자의 발생은 주







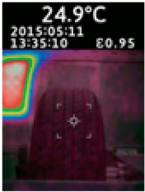



Tire sample	Tire surface temperature (°C)		
	Before experiment	After experiment	Difference
Tire A (TWR_460)			9.0
Tire B (TWR_500)			11.2
Tire C (TWR_560)			8.9
Tire D (TWR_640)			11.1
Tire E (TWR_720)			12.2

Fig. 13. Surface temperature difference of test tires before and after the slip experiment.

변 온도보다는 타이어의 국부적인 표면에 가해지는 열전달이 더욱 중요한 인자라고 보고하였다. 그림 13의 결과를 살펴보면 슬립 실험 후 타이어 표면온도는 40°C 미만이며 실험 전·후의 온도 차이도 9~12°C 수준으로 휘발 현상이 발생할 수 있는 조건보다 상당히 낮은 수준의 온도 분포를 보이고 있다. 타이어 표면 온도는 높지 않지만 초미세입자가 다량 발생하고 있는 것으로 보아 매우 짧은 시간에 타이어 표면에 마

찰열이 전달되고 있으며 높은 열전달로 인하여 타이어 표면에 국부적으로 휘발 현상이 발생하고 있는 것으로 판단된다(Kole *et al.*, 2017).

특이하게 적외선 온도계 이미지를 살펴보면 Tire A와 Tire E의 경우 드럼과 맞닿은 부분의 면적이 비교적 넓게 분포하고 있음을 알 수 있는데 이로 인하여 넓은 부분에서 마모 현상이 발생하게 되고 이는 높은 PM 배출량의 하나의 요인으로 작용할 수 있을 것이

다. 이는 타이어의 트레드 패턴에 따라서 타이어 마모 미세먼지의 배출량이 영향을 받을 수도 있다는 것을 의미한다.

3.3 차대동력계 주행 조건에서 타이어 마모 지수에 따른 미세먼지 발생 특성

그림 14는 차대동력계 상에서 실제 차량으로 IM240 주행 사이클을 운전하는 경우 APS로 측정된 타이어 마모 지수에 따른 미세먼지 발생 특성을 나타낸 그래프이다. 그림 14(a) 결과를 살펴보면 타이어 시뮬레이터에서 정속 운전 조건에서 측정된 결과와 동일하게 타이어 마모 지수가 높아질수록 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도 모두 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. PM_{2.5}/PM₁₀의 값은 타이어 종류와 상관없이 0.80 수준을 보였는데 이는 타이어 시뮬레이터에서의 정속 및 슬립 운전 조건에서 측정된 값보다 높은 수준으로 입경이 작은 입자들이 많이 배출된다는 의미이다. 차대 동력계를 이용해서 IM240 주행 사이클 상에서 차량을 운행하는 경우 가속 및 감속 조건에서 타이어와 드럼 사이에 슬립 현상이 발생하는데 차량의 가속 토크 및 브레이크 토크로 인하여 타이어 시뮬레이터 조건보다 훨씬 큰 마찰력이 타이어와 드럼 사이에 발생하게 되고 이로 인하여 타이어 트레드의 연마 현상이 심해지게 되어 미세입자의 발생량이 많아진다. 그림 14(b)의 입경별 질량 분포를 살펴보면 타이어 종류와 상관없이 단봉 형태의 사이즈 분포를 보였고 약 2 μm 부근에서 최빈값을 가지고 있다. 아스팔트나 콘크리트와 같은 실제 도로 표면을 사용하여 타이어/도로 마모 입자(TRWPs; Tire/Road wear particles)를 측정된 기존 연구에서는 대부분의 마모 입자가 10 μm보다 큰 초대입자라고 보고하였는데 이는 본 연구에서 측정된 결과와는 완전히 다른 경향을 가진다(Kreider *et al.*, 2010). 실제 도로 주행 조건에서 타이어 마모는 도로와의 마찰에 의해서 발생하며 도로 먼지에 포함된 암석 성분과 혼합되어서 발생하게 되므로 아스팔트 거칠기를 단순히 모사한 사포가 아닌 실제 도로 표면 조건에서 연구가 수행되어야 할 것이다.

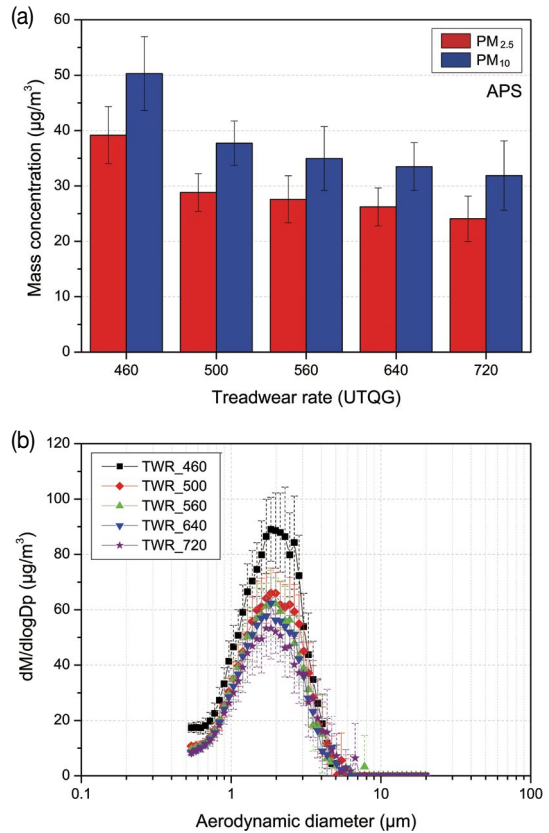


Fig. 14. PM behaviors of TWP using APS under IM240 driving cycle in a chassis dynamometer: (a) PM_{2.5} & PM₁₀ concentrations, (b) averaged mass size distributions.

그림 15는 IMT240 주행 사이클을 4회 반복 실험하는 경우 Tire A에서 발생하는 초미세입자의 발생 특성과 타이어 표면온도 변화를 나타내고 있다. 실험이 진행될수록 타이어의 표면온도가 점차적으로 상승하는 현상을 관찰하였으며 3회 실험 시점부터 50 nm 이하의 입경을 가지는 초미세입자들이 갑자기 대량 발생하는 것이 확인되었다. 실험 종료 시점에서 타이어 표면온도는 40.2°C였으며 실험 전·후의 온도 차이는 14°C에 불과하였다. 이전의 타이어 시뮬레이터에서 수행한 슬립 운전 조건과 마찬가지로 타이어 표면온도가 유기화합물 및 오일류의 휘발이 발생할 수 있는 적정 온도에 미치지 못 하였지만 순간적으로 가해지는 열전달로 인하여 타이어의 국부적인 영역에서 휘

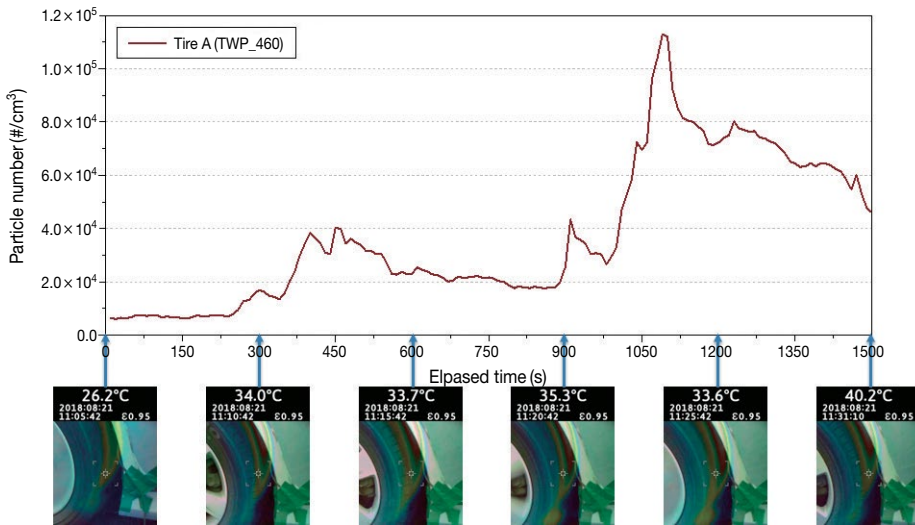


Fig. 15. TWPs number concentration and surface temperature of Tire A under 4 consecutive IM240 driving cycle in a chassis dynamometer.

발이 발생한다고 판단된다. 초미세입자는 입자의 크기가 매우 작아서 미세먼지의 중량에는 크게 기여하지 못하지만 상대적으로 표면적이 크고 효과적으로 인체 폐포까지 깊숙이 침투가 가능하기 때문에 인체 위해성에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다고 보고되고 있다. 따라서 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 와 같은 미세먼지뿐만 아니라 타이어 마모 과정에서 발생하는 초미세입자에 대한 연구도 향후 심도 있게 진행되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 외부 요인에서 발생하는 대기 입자를 차단하고 타이어 마모 입자만을 측정하기 위해 클린 챔버를 사용하였다. 또한, 타이어 입자의 발생은 일반적으로 전단력이 발생하는 정속 운전 조건의 경우 조대입자가 발생하고 마찰열이 발생하는 슬립 운전 조건의 경우 미세입자가 발생하므로 이를 독립적으로 운전할 수 있는 타이어 시뮬레이터를 사용하여 타이어 마모 지수와 PM 배출량과의 상관관계를 평가하였다. 추가적으로 차대동력계를 이용한 실제 차

량 운전 상황에서 타이어 마모 지수에 따른 PM 배출량을 측정하였다. 타이어에서 발생하는 초미세입자의 경우 타이어에 전달되는 마찰열에 의해서 발생하게 되므로 타이어 표면온도 변화와 초미세입자의 발생관계를 주의 깊게 살펴보았다. 실험결과, 정속 운전 조건에서는 타이어 마모 지수 증가에 따라서 PM의 배출량이 감소하는 경향을 보이며 마모 입자의 최빈값은 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 에서 관찰되었다. 하지만 슬립 운전 조건에서는 타이어 마모 지수와 PM 배출량의 상관관계가 나타나지 않았으며 오히려 마모 지수가 가장 높은 타이어의 PM 배출량이 가장 높았다. 또한, 슬립 조건의 경우 타이어 트레드 국부 영역에 마찰열이 전달되고 이로 인하여 타이어에 포함된 유기물질의 휘발에 의해 초미세입자들이 발생하는 것이 관찰되었다. 차대동력계 상에 실제 차량을 이용하여 IMT240 사이클을 주행하는 경우에도 타이어 마모 지수가 높아질수록 PM 배출량은 감소하는 경향을 보였다. 타이어 마모 지수가 높은 타이어를 사용하는 경우 정속 운전 조건과 IMT240 사이클에서는 PM 저감 효과가 있었지만 슬립 조건에서는 이에 대한 효과를 정확하게 판단하기 어렵다. 향후 실제 차량 운전 조건과 유

사한 운전 조건을 추가하여 더욱 신뢰성 있는 결과를 도출하여야만 타이어 마모 지수와 PM 배출량과의 상관성을 정확하게 판단할 수 있을 것으로 사료된다. 타이어와 도로의 마모에 의해서 발생하는 타이어 마모 입자는 PM₁₀, PM_{2.5}와 같은 미세먼지만 아니라 나노 사이즈의 초미세입자까지 생성할 수 있으며 이는 인체 위해성이 심각한 영향을 초래할 수 있으므로 더 많은 연구들이 심도 있게 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 환경부에서 지원되는 “친환경 자동차 개발사업”의 연구비로 수행되었으며, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

References

- Abu-Allaban, M., Gillies, J.A., Gertler, A.W., Clayton, R., Proffitt, D. (2003) Tailpipe, resuspended road dust, and brake-wear emission factors from on-road vehicles, *Atmospheric Environment*, 37(37), 5283-5293, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2003.05.005>.
- Amato, F., Cassee, F.R., Denier van der Gon, H.A.C., 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>.
- Barlow, T. (2014) Briefing paper on non-exhaust particulate emissions from road transport, Client Project Report CPR1976. TRL limited, Wokingham.
- Boulter, P.G., Thorpe, A.J., Harrison, R.M., Allen, A.G. (2006) Road vehicle non-exhaust particulate matter: final report on emission modelling, Published project report PPR110. TRL limited, Wokingham.
- Conant, F.S. (1971) Tire temperatures, *Rubber Chemistry and Technology*, 44(2), 397-439, <https://doi.org/10.5254/1.3547374>.
- Crosta, G.F. (2011) Morphological classification and microanalysis of tire tread particles worn by abrasion or corrosion, *Proc. SPIE 8036, Scanning Microscopies 2011: Advanced Microscopy Technologies for Defense, Homeland Security, Forensic, Life, Environmental, and Industrial Sciences*, 80360H (1 June 2011), <https://doi.org/10.1117/12.883231>.
- Dahl, A., Gharibi, A., Swietlicki, E., Gudmundsson, A., Bohgard, M., Ljungman, A., Blomqvist, G., Gustafsson, M. (2006) Traffic generated emissions of ultrafine particles from pavement-tire interface, *Atmospheric Environment*, 40(7), 1314-1323, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.029>.
- Dall'Osto, M., Beddows, D.C.S., Gietl, J.K., Olatunbosun, O.A., Yang, X., Harrison, R.M. (2014) Characteristics of tyre dust in polluted air: Studies by single particle mass spectroscopy (ATOFMS), *Atmospheric Environment*, 94, 224-230, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.026>.
- Foitzik, M.J., Unrau, H.J., Gauterin, F., Dörnhöfer, J., Koch, T. (2018) Investigation of ultra fine particulate matter emission of rubber tires, *Wear*, 394-395, 87-95, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.09.023>.
- Grigoratos, T., Martini, G. (2014) Non-Exhaust Traffic Related Emissions: Brake and Tyre Wear PM, Report EUR 26648. Publications Office of the European Union, <https://doi.org/10.2790/21481>.
- Grigoratos, T., Gustafsson, M., Eriksson, O., Martini, G. (2018) Experimental investigation of tread wear and particle emission from tyres with different treadwear marking, *Atmospheric Environment*, 182, 200-212, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.049>.
- Gustafsson, M., Blomqvist, G., Gudmundsson, A., Dahl, A., Swietlicki, E., Bohgard, M., Lindbom, J., Ljungman, A. (2008) Properties and toxicological effects of particles from the interaction between tyres, road pavement and winter traction material, *Science of the Total Environment*, 393(2-3), 226-240, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.12.030>.
- Harrison, R.M., Yin, J. (2000) Particulate matter in the atmosphere: Which particle properties are important for its effects on health? *Science of the Total Environment*, 249(1-3), 85-101, [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00513-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00513-6).
- Harrison, R.M., Jones, A., Gietl, J., Yin, J., Green, D. (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>.
- Kim, G., Lee, S. (2018) Characteristics of tire wear particles gener-

- ated by a tire simulator under various driving conditions, *Environmental Science and Technology*, 52(21), 12153-12161, <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b03459>.
- Kole, P.J., Löhr, A.J., Van Belleghem, F.G.A.J., Ragas, A.M.J. (2017) Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment, *International Journal of Environmental Resources Public Health*, 14(10), 1265, <https://doi.org/10.3390/ijerph14101265>.
- Kreider, M.L., Panko, J.M., McAtee, B.L., Sweet, L.L., Finley, B.L. (2010) Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies, *Science of the Total Environment*, 408(3), 652-659, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.016>.
- Kwak, J., Kim, H., Lee, J., Lee, S. (2013) Characterization of non-exhaust 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>.
- Kwak, J., Lee, S., Lee, S. (2014) On-road and laboratory investigations on non-exhaust ultrafine particles from the interaction between the tire and road pavement under braking conditions, *Atmospheric Environment*, 97, 195-205, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.08.014>.
- Mathissen, M., Scheer, V., Vogt, R., Benter, T. (2011) Investigation on the potential generation of ultrafine particles from the tire-road interface, *Atmospheric Environment*, 45(34), 6172-6179, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.032>.
- Panko, J.M., Chu, J., Kreider, M.L., Unice, K.M. (2013) Measurement of airborne concentrations of tire and road wear particles in urban and rural areas of France, Japan, and the United States, *Atmospheric Environment*, 72, 192-199, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.040>.
- Park, I., Lee, J., Lee, S. (2017) Laboratory study of the generation of nanoparticles from tire tread, *Aerosol Science and Technology*, 51(2), 188-197, <https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1248757>.
- Park, I., Kim, H., Lee, S. (2018) Characteristics of tire wear particles generated in a laboratory simulation of tire/road contact conditions, *Journal of Aerosol Science*, 124, 30-40, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2018.07.005>.
- Pilinis, C., Pandis, S.N., Seinfeld, J.H. (1995) Sensitivity of direct climate forcing by atmospheric aerosols to aerosol size and composition, *Journal of Geophysical Research*, 100(D9), 18739-18754, <https://doi.org/10.1029/95JD02119>.
- Pope, C., Burnett, R., Thun, M., Calle, E., Krewski, D., Thurston, G. (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution, *Journal of American Medical Association*, 287(9), 1132-1141, <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>.
- Thorpe, A., Harrison, R.M. (2008) Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review, *Science of the Total Environment*, 400(1-3), 270-282, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.06.007>.
- Timmers, V., Achten, P. (2016) Non-exhaust PM emissions from electric vehicles, *Atmospheric Environment*, 134, 10-17, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.03.017>.
- Valavanidis, A., Fiotakis, K., Vlachogianni, T. (2008) Airborne particulate matter and human health: Toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms, *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, 26(4), 339-362, <https://doi.org/10.1080/10590500802494538>.
- Vouitsis, E., Ntziachristos, L., Pistikopoulos, P., Samaras, Z., Chrysikou, L., Samara, C., Papadimitriou, C., Samaras, P., Sakellariopoulos, G. (2009) An investigation on the physical, chemical and ecotoxicological characteristics of particulate matter emitted from light-duty vehicles, *Environmental Pollution*, 157(8-9), 2320-2327, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.03.028>.

Authors Information

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