

상용차 타이어 제조 처방에 따른 미세먼지 발생 경향 연구

이현희 · 엄찬혁 · 정선경 · 고윤기 · 이평찬 · 이현욱 · 하진욱[†]

한국자동차연구원 소재기술연구본부

(2020년 11월 26일 접수, 2020년 12월 19일 수정, 2020년 12월 22일 채택)

Study on the Generated Particular Matters of TBR Tire with Different Tread Rubber Formulation

Hyun Hee Lee, Chan Hyuk Um, Sun Kyoung Jeoung, Youn Ki Ko, Pyoung Chan Lee, Hyun Wook Lee, and Jin Uk Ha[†]

KATECH, 303 Pungse-ro, Cheon An, Chungnam 31214, Korea

(Received November 26, 2020; Revised December 19, 2020; Accepted December 22, 2020)

초록: 자동차 비배기계 미세먼지는 브레이크 및 타이어 마모에 의해 주로 발생하는 것으로 알려져 있다. 배기계 미세먼지와 달리 도로상에서 타이어 마모에 의해 발생하는 미세먼지는 대기중 농도가 낮으며, 성분분석을 위한 추적 물질의 부재 등으로 인하여 정확한 분석이 매우 어려운 실정이다. 본 연구에서는 타이어 마모와 미세먼지 발생량의 연관성을 분석하기 위하여, 각기 다른 배합조건으로 타이어 시료를 준비하고, 강제적으로 마모하여 이때 발생하는 미세먼지의 함량과 경향을 분석하였다.

Abstract: It is known that particular matter from the vehicle's non-exhaust emission is mainly generated by wear of brakes and tires. Unlike particular matters from exhaust system, the one generated by tire wear on the road is very difficult to accurately analyze due to the absence of traces and low concentration in the atmosphere. In this study, in order to analyze the relationship between tire wear and the amount of particular matters generated, samples were prepared with various recipes and under different mixing conditions. Generated particular matters by abrading tires or specimens were analyzed by aerodynamic particle sizer.

Keywords: particular matter, truck & bus radial (TBR), tire, rubber, tread, fine dust.

서 론

미세먼지는 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상 물질(particulate matter, PM) 중 지름이 10 μm 보다 작은 먼지를 의미한다.¹ 대기 중에 존재하는 입자상 물질은 다양한 배출원에서 생성되는데, 특히 도심 지역의 경우 도로 이동 오염원(자동차)이 주요 배출원으로 알려져 있다.^{2,3}

자동차에 의해 발생하는 미세먼지는 배기계와 비배기계 미세먼지로 구분된다. 배기계 미세먼지는 불완전한 연료의 연소 및 윤활유의 휘발에 의해 생성되고, 비배기계 미세먼지는 타이어, 브레이크, 도로의 마모 및 도로 먼지를 통해 생성된다. 강화되는 배기규제를 만족하기 위해 엔진 연소 기술 및 후처리 기술 등의 경우는 비약적인 발전으로 배기계 미세먼

지는 감소하는 반면에 상대적으로 국민적인 인식이 부족한 비배기계 미세먼지의 상대적인 기여도는 증가하고 있는 추세이다.⁴ 비배기계 미세먼지는 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로 마모가 원인으로 발생되고, 각각의 기여도 비율은 마모 과정 및 다양한 조건(도로, 환경, 주행 조건 및 타이어 특성)에 따라 상이하하다.⁵ 타이어 마모는 타이어와 도로의 계면에서의 전단력으로 발생되고, 이 중 일부가 대기 중에 비산되어 마모 입자 및 미세먼지가 발생한다. 마모 과정 초기에 타이어와 도로 계면에 큰 전단력이 발생하여 타이어 부분의 기계적인 마모가 발생하여 이때 조대 입자가 발생하고, 그 이후에는 전단력이 안정화되어 타이어와 도로 계면에서 열이 발생되며 이 열로 화학적인 마모가 발생되어 미세입자가 발생한다.⁶

주행시 타이어에서 발생하는 마모 입자 및 미세먼지를 연구하기 위해 주행 조건 및 실험 종류에 대한 다양한 연구들이 진행되었다.⁶⁻¹³ Kreider은 실제 도로 주행 시험과 도로 시뮬레이터 모사 시험을 진행하여 발생하는 입자상 물질을 도로 입자(roadway particles, RP), 타이어 마모 입자(tire wear

[†]To whom correspondence should be addressed.
juha@katech.re.kr, ORCID[®]0000-0001-5902-8655
©2021 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

particles, TWP), 트레드 입자(tread particles, TP)를 구분하고, 이 입자들의 성분 및 형태를 분석하였다.⁶ Kwak은 동일 차량을 이용하여 실제 도로 시험과 실험실 모사 시험에서 제동 조건일 때 발생한 타이어 입자상 물질을 포집하여 TEM 분석 및 발생 경향을 연구하였다.⁷ Alves는 스웨덴 VTI연구소 도로 시뮬레이터를 이용하여 타이어 미세먼지 발생 경향 분석 및 화학적 성분 분석을 진행하였다.⁸ 해당 연구에서는 화학적 성분 분석을 진행하기 위해 로드 시뮬레이터에 고공량 공기 채집기를 이용하여 미세먼지를 포집하였다. 성분 분석 결과 타이어 트레드에서 발생하는 Zn과 S 및 도로 시뮬레이터의 도로에서 발생하는 미네랄 등이 분석되었고, 실제 운행 조건에서 미세먼지의 성분은 도로 노면, 대기, 타이어 성분 등 다양한 조건에 따라 다르다는 것을 확인하였다. Grigoratos는 스웨덴의 도로 시뮬레이터를 이용하여 다양한 브랜드와 트레드 마모 계수(tread wear rating, TWR)에 따른 미세먼지 발생 경향 연구를 진행하였다.⁹ 시험결과, 일부 브랜드 타이어에서 트레드 마모 계수가 낮을수록 트레드 마모물과 PM₁₀ 발생량이 증가하는 것을 발생하는 것을 확인하였다. 앞의 연구들 분석 결과, 실제 도로주행 상황에서의 타이어에서 발생하는 TWP, RP, TP에서 동일한 성분이 발생하여 구분하기 어려운 문제점이 발생하였고 이를 해결하기 위해 실험실에서의 타이어 마모 시뮬레이터를 사용하여 분석을 하였지만 실제 도로 주행 조건 모사의 어려움이 발생하였다.

Choi와 Chae 연구팀은 천연고무(natural rubber, NR)와 부타디엔 고무(butadiene rubber, BR)의 함량 및 비율에 따른 마모 입자의 크기를 분석하였고, 그들은 NR100 대비 NR에 BR이 첨가된 트레드에서 더 작은 마모입자가 발생하는 것을 확인하였다.^{14,15} 하지만, 이 결과는 마모시험으로 진행된 것이 아니라, 분쇄시험으로 진행되었다는 점에서 마모 결과와 상이할 수 있다. 이처럼 타이어 미세먼지 및 마모 입자에 관련한 연구는 꾸준히 진행되었지만, 분석을 위한 화학성분의 추적이 다양한 노이즈와 함께 발생하고 발생하는 함량에 적어 분

석에 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 상용차용 타이어 처방에 따른 미세먼지 발생 경향을 연구하기 위해, 다양한 처방의 타이어 트레드 시편을 강제적으로 마모하였고 이때 발생하는 미세먼지를 분석하였다. 상용차용 타이어의 트레드와 유사한 처방으로 제조된 시편을 마모 시험기를 이용하여 인위적으로 마모하였다. 처방 변경은 카본블랙 및 상용화제 종류 및 함량 변경, NR과 BR의 비율을 변경하여 이에 따른 미세먼지 함량과 발생 경향을 분석하였다. 본 실험은 인위적으로 매우 가혹한 환경에서 시료를 마모하여 이 때 발생하는 미세먼지의 양을 분석하는 방식을 취하였기 때문에, 실제 타이어가 도로상에서 주행 시 발생하는 미세먼지 환경을 정확히 모사할 수는 없으며, 주행에서 본 실험과 같이 동일한 미세먼지가 발생한다고 단정할 수는 없다.

실 험

타이어 트레드 시편 준비. 실험에 사용된 타이어 트레드 모사 시편은 내마모성 향상을 위해 처방을 다르게 하여 제작하였다. 시험에 사용된 트레드 시편의 배합표를 Table 1에 나타내었고, 시험에 사용된 트레드 시편의 크기는 25×25×10 mm³를 사용하였다.

카본블랙의 그레이드 변화 및 카본블랙 투입량에 따른 미세먼지 경향을 분석하기 위해 N220, N234, N134 등급[ASTM]의 카본블랙과 함량을 조절하였다.¹⁶ NR(천연고무)를 메인 고무로 카본블랙을 필러로 사용하여 시편을 제작하였다. 배합에 따른 시편을 T1부터 T5로 명명하였다. 시편 T1을 기준으로 각각의 제조 처방을 변경하였다.

커플링제(coupling agent) 적용 및 가교조건 변경에 따른 미세먼지 경향을 분석하기 위해 커플링제 SUMILINK100과 SUMILINK200(Figure 1)을 적용하였고, 가교조건은 TBBS(*N-tert-butyl-benzothiazole sulfonamide*)를 감량하여 변경하였다.

Table 1. Formulation of Tire Tread Specimen (phr)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
N220	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N234	0	55	0	75	0	0	0	0	55	55	55
N134	0	0	55	0	75	55	55	55	0	0	0
SUMILINK100	0	0	0	0	0	1.1	0	1.1	0	0	0
SUMILINK200	0	0	0	0	0	0	1.1	0	0	0	0
NR	100	100	100	100	100	100	100	100	80	80	80
NdBR40	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	10
Narrow NdBR60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0
CNT MB	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11

phr: parts per hundred resin. NdBR: High-cis BR.

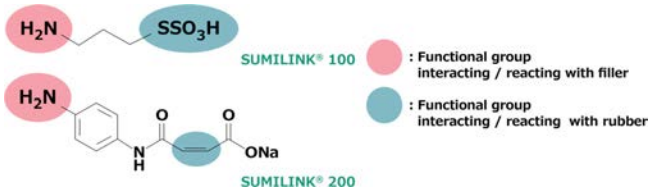


Figure 1. Chemical formulae of the SUMILINK.

커플링제는 고무 시편 가교 시 메인 고무(NR)와 필러(카본블랙) 사이의 상호작용을 높일 수 있도록 사용하였다.

연구에서 사용된 커플링제 SUMILINK(Sumitomo Chemical, 일본)는 두 개의 작용기 구조를 가지고 있으며, 한 쪽은 고무와 나머지 다른 한 쪽은 필러와 상호작용을 하며 자세한 구조는 Figure 1에 나타내었다. TBBS는 고무 가황 시 반응 시간 단축을 위해 사용되는 가황촉진제이다. 커플링제 적용 및 가교 조건 변경에 따른 시편을 T6-T8로 명명하였다.

NR에 BR 첨가 및 CNT 적용에 따른 미세먼지 경향을 분석하기 위해 NdBR40과 narrow NdBR60, CNT를 적용하였다. NdBR은 무니점도 40을 가지는 BR을 의미하고, narrow NdBR60은 무니점도 60을 가지는 BR을 의미한다. BR 배합에 따른 시편 및 CNT 첨가에 따른 시편을 T9부터 T11로 명명하였다.

타이어 트레드 마모 실험. 제조된 시편의 마모 실험은 마모 시험기(NEOPULS)를 사용하였고, 개략도는 Figure 2에 나타내었다. 상기 마모시험기는 트레드 시편과 사포벨트를 접촉시킨 상태에서 시편에 수직 방향으로 하중을 가하고, 사포벨트를 회전시켜 마모시키는 시험 장비이다. 마모 시험기는 수직 방향 하중(0-300 N), 사포벨트 속도(0-300 m/min)로 제어 가능하나, 사포벨트 그레이드는 아스팔트 도로 거칠기를 모사하는 입도 80을 사용하였다.^{17,18}

본 시험에서는 내마모성 향상에 따른 미세먼지 발생 경향을 분석하기 위해 앞서 처방에 따른 트레드 조각 시편의 마모 실험을 진행하였다. 시험 조건은 수직 하중 50 N, 속도 50 m/min을 진행하였고, 시험 모습 개략도를 Figure 3에 나타내었다. 본 시험기 시편이 고정되어 있는 상태에서 사포벨트를 회전시켜 마모시키는 과정으로 타이어 주행 모드 중 슬립과 슬라이드 현상이 발생하는데, 이중 타이어는 회전하지 않고 자동차가 슬립되어 이동하는 현상인 이중 슬립 상황에 대한 모사만 가능하다. 그리고 실험에서 실제 타이어 사용이 아닌 트레드 조각으로 사용하여, 실제 도로 주행 상황보다 가혹한 조건으로 실제 타이어 마모보다 많이 가혹한 실험조건이다.

타이어 트레드 미세먼지 측정. 마모 시험기를 사용하는 실내 조건에서 외부 공기에 의한 간섭을 차단하기 위하여 본 연구에서는 에어필터(filtered air supply, TSI 3074B, USA)와 울파필터(ULPA)를 통해 수분 및 입자가 없는 깨끗하고 건조

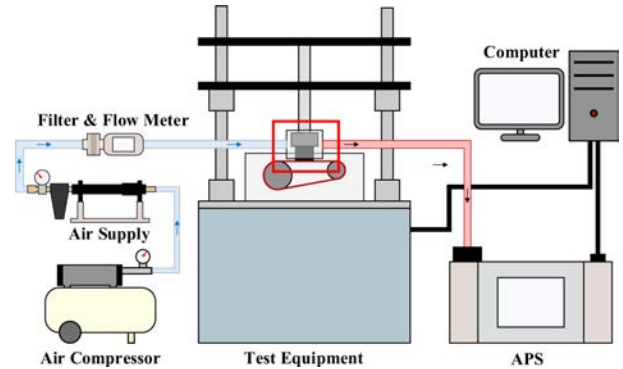


Figure 2. Schematic of the tire wear tester and the measurement set up.

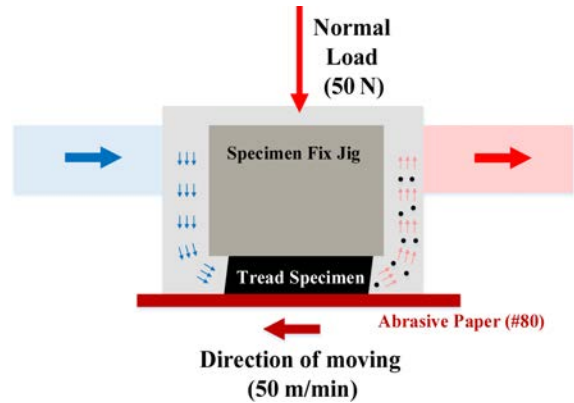


Figure 3. Schematic of the tread specimen set up.

한 공기를 유량계(flow meter, TSI 5300, USA)로 측정하여 일정 유량(5 LPM) 챔버 내로 공급하였다.

챔버 하단의 샘플링 포트에는 입자 측정 장비가 설치되었는데 입자의 손실을 최소화하기 위하여 전도 튜브(conductive tube)를 사용하여 포트와 장비를 연결하였다.

타이어 트레드 마모 미세먼지의 질량, 수 농도 및 입경분포도를 측정하기 위하여 aerodynamic particle sizer(APS, TSI 3321, USA) 및 휴대용 질량농도 측정기를 사용하였다. APS를 이용하여 유량 1 LPM으로 0.37~20 μm 크기의 입자를 측정하였고, 그 결과를 휴대용 질량 농도 측정기와 비교하여 실험값으로 사용하였다. 또한 카본블랙 측정을 위해서 블랙카본 측정기(Aethlabs, AE-51, USA)를 사용하였다.

결과 및 토론

카본블랙 그레이드 및 함량 변화에 따른 미세먼지 배출 특성. 카본블랙 그레이드 및 함량을 변화시킨 시편을 마모시키며 그때 발생하는 미세먼지를 APS를 이용하여 측정하였다. 이때 발생된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 질량 및 마모량을 Figure 4와 Figure 5에 나타내었다. 결과에서 사용된 미세먼지 질량은

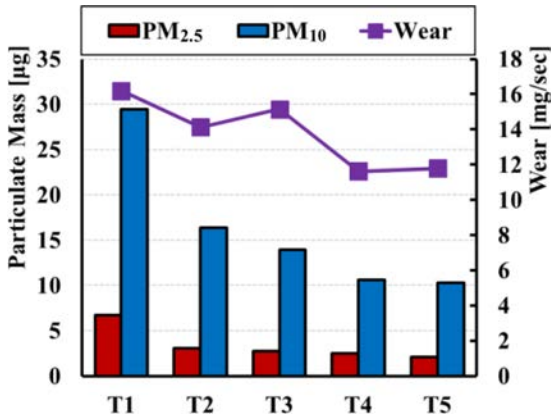


Figure 4. PM mass and wear rate of T1-T5 tread using APS.

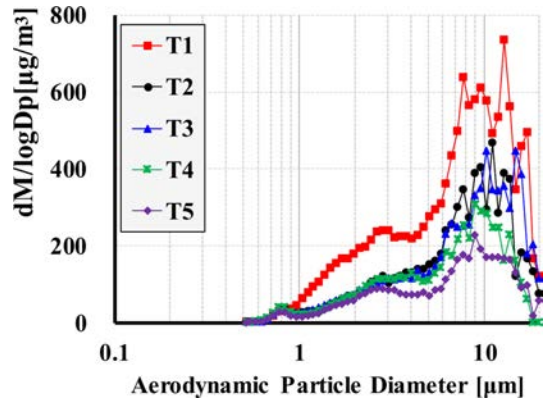


Figure 6. Average mass size distributions of T1-T5 tread.

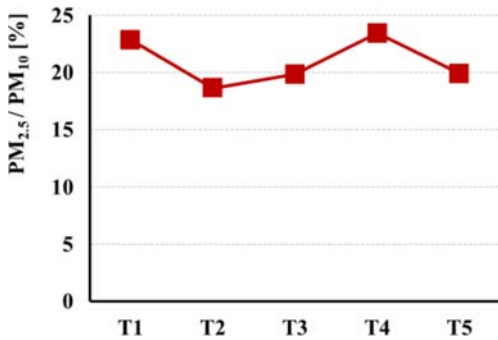


Figure 5. Ratio of PM_{2.5} and PM₁₀ of T1-T5 tread.

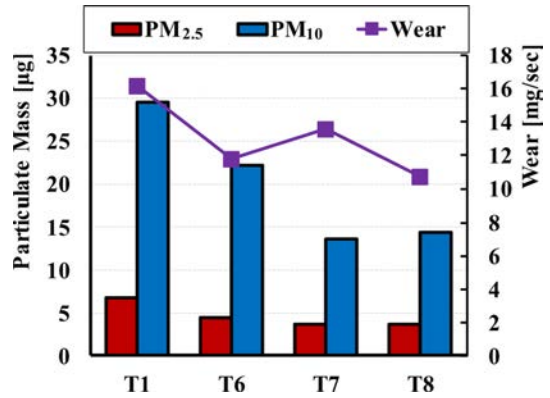


Figure 7. PM mass and wear rate of T6-T8 tread using APS.

시험 시간 동안 발생한 미세먼지의 총 누적량을 사용하였다. 시험에 사용된 카본블랙 N220, N234, N134는 ASTM에 규격된 카본블랙의 종류이고, 카본블랙 그레이드가 증가할수록 입자사이즈는 증가하고 비표면적(BET)은 감소한다. 시험결과, 카본블랙 그레이드 변화에 따른 미세먼지 질량 농도 변화에는 뚜렷한 특징이 발생되지 않았다. 그러나 카본블랙 함량을 증가시켰을 때는 미세먼지 질량 및 마모량에서 감소하는 경향을 확인하였다. 함량을 증가하였을 때(T3→T5) PM_{2.5}와 PM₁₀은 약 26% 감소하였고, 마모량은 22% 감소하였다. 카본블랙 그레이드 및 함량 변화에 따라 미세먼지 배출량은 변화가 발생하였다. 그러나 PM_{2.5}/PM₁₀은 20% 내외로 동등한 비율로 초미세먼지와 미세먼지가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 질량 농도 입경 분포도를 각각 Figure 6에 나타내었다. 전체적으로 질량 농도 기준으로는 약 10 µm 부근에서 최대 입경을 나타내었다.

커플링제 적용 및 가교조건 변경 따른 미세먼지 배출 특성. 커플링제 적용 및 경화조건을 변화시킨 시편을 마모시키며 그때 발생하는 미세먼지를 APS를 이용하여 측정하였다. 이때 발생된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 질량 및 마모량을 Figure 7과 Figure 8에 나타내었다. 결과에서 사용된 미세먼지 질량은 시험 시간 동안 발생한 미세먼지의 총 누적량을 사용하였다.

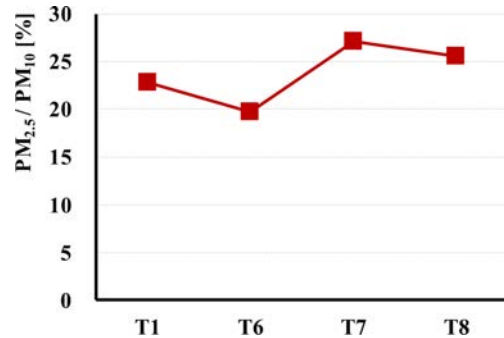


Figure 8. Ratio of PM_{2.5} and PM₁₀ of T6-T8 tread.

시험결과, 커플링제 적용 및 가교조건 변화에 따른 PM 배출량이 감소하였다. 커플링제(T6, T7) 사용하였을 때 기준 시편 T1 대비 PM_{2.5}는 34.8%, 45.4% 감소하였고 PM₁₀은 24.6%, 53.9% 감소하였다. 위의 제조 처방 변경에 따라 PM 배출량은 감소하였지만 PM_{2.5}/PM₁₀은 약 25% 수준의 동등한 비율로 미세먼지와 초미세먼지가 발생하였다. 질량 농도 입경 분포도를 각각 Figure 9에 나타내었다. 전체적으로 질량 농도 기준으로는 약 10 µm 부근에서 최대 입경을 나타내었다.

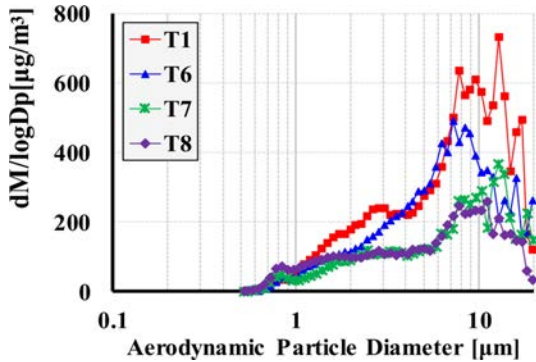


Figure 9. Average mass size distributions of T6-T8 tread.

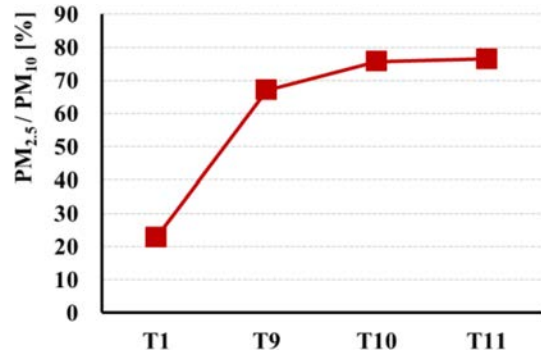


Figure 11. Ratio of PM_{2.5} and PM₁₀ of T9-T11 tread.

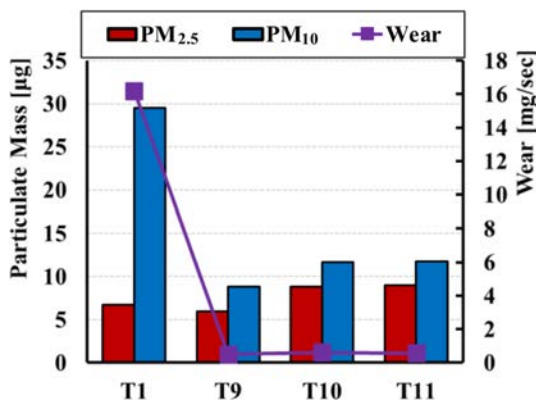


Figure 10. PM mass and wear rate of T9-T11 tread using APS.

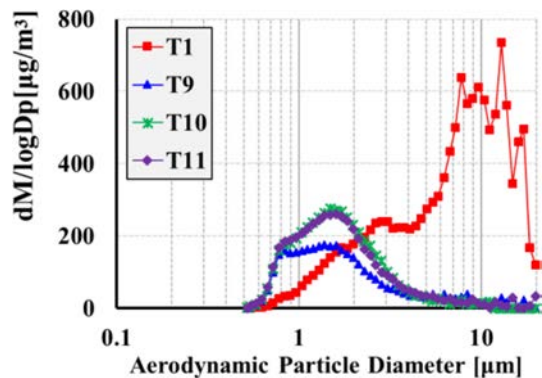


Figure 12. Average mass size distributions of T9-T11 tread.

부타디엔 고무 조합 및 CNT 처방에 따른 PM_{2.5}, PM₁₀ 변화 경향. 기존의 NR만 첨가된 트레드에 BR을 첨가하여 만든 시편을 마모시키며 그 때 발생하는 PM을 APS를 이용하여 측정하였다. 이때 발생한 PM_{2.5}와 PM₁₀의 질량 및 마모량을 Figure 10과 Figure 11에 나타내었다. 결과에서 사용된 PM 질량은 시험 시간 동안 발생한 총 누적량을 사용하였다. 시험 결과, BR 첨가 시 NR만 첨가되어 있는 트레드 대비 PM₁₀의 배출량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 PM_{2.5}/PM₁₀의 비율을 보면 BR 첨가하였을 때 PM_{2.5}의 비율이 NR 100 phr 트레드에서의 약 20% 수준이었던 값이 약 75% 수준으로 증가하였다. 즉, BR 첨가 시 총 PM 배출량은 감소하지며, PM_{2.5}은 소폭 증가하지만, PM₁₀의 농도가 크게 감소하는 결과를 보여주었다. 이 결과를 자세히 확인하기 위해, 입경별 질량 농도 분포를 확인하였다(Figure 12).

분석 결과, BR 첨가 시 약 1~2 µm 부근에서 가장 높은 농도를 보였다. 이 결과는 NR과 BR의 마모 시험 시, BR 시편이 작은 입자를 잘 형성한다는 결과와 유사하다.^{14,15} 이를 확인하기 위해, 시중에 판매되고 있는 타이어 중 BR이 첨가된 외국 브랜드의 상용 타이어의 마모 시험을 진행하였고, 그 결과를 Figure 13에 나타내었다. NR 처방에 BR 첨가에 따른 PM_{2.5} 발생 증가 경향의 원인은 시편이 마모되었을 BR과 함

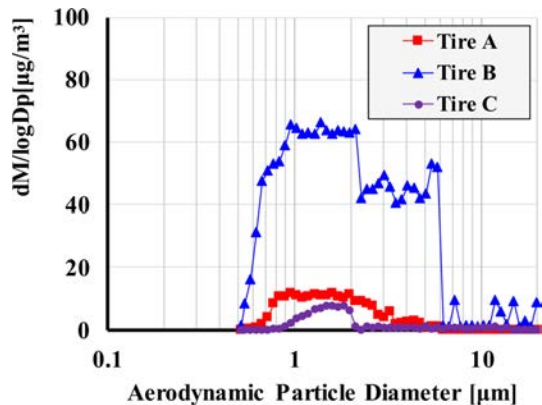


Figure 13. Average mass size distributions of TBR.

께 카본블랙의 탈리가 주요 원인으로 예상되고 추후 NR과 BR이 첨가된 시편을 TEM, AFM 및 AE51 분석을 통한 해당 입경의 미세먼지 주요성분을 분석할 예정이다.

결론

본 연구에서는 상용차용 타이어 처방에 따른 미세먼지 발생 경향을 연구하였으며, 처방 변화에 따른 미세먼지 발생량 및 질량 입경 분포도에서 차이가 발생하는 것을 확인하였다.

타이어 트레드 시편 제작 시 사용되는 카본블랙 함량을 증가하였을 때 미세먼지 발생량이 감소하는 것을 확인하였다. 타이어 트레드 시편에 BR 첨가하였을 때 NR100 phr 시편 대비 PM_{10} 발생량 감소를 확인하였다. 기존의 NR100에서 타이어 처방을 변경하여 시험을 진행하였을 때 PM_{10} 발생량과 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 에서 차이는 동일한 수준으로 확인되었으나, BR을 첨가하였을 때 PM_{10} 발생량 감소와 그에 따라 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 가 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 현상이 발생하는 원인을 분석하기 위해 시편 분석 및 미세먼지 포집 성분 분석을 추가적으로 진행할 예정이다.

감사의 글: 본 연구는 산업핵심개발사업(Grant No. 10052896)의 연구지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참고 문헌

- World Health Organization, "Air Quality Guidelines", 1987.
- Harrison, R. M.; Jones, A. M.; Gietl, J.; Yin, J.; Green, D. C. Estimation of the Contributions of Brake Dust, Tire Wear, and Resuspension to Nonexhaust Traffic Particles Derived from Atmospheric Measurements. *Environ. Sci. Technol.* **2012**, *46*, 6523-6529.
- Thorpe, A.; Harrison, R. M. Source and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. *Sci. Total. Environ.* **2008**, *400*, 270-282.
- 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. Urban Air Quality: The Challenge of Traffic Non-exhaust Emissions. *J. Hazard. Mater.* **2014**, *275*, 31-36.
- Wagner, S.; Hüffer, T.; Klockner, P.; Wehrhahn, M.; Hofmann, T.; Reemtsma, T. Tire Wear Particles in the Aquatic Environment - A Review on Generation, Analysis, Occurrence, Fate and Effects. *Water. Res.* **2018**, *139*, 83-100.
- Kreider, M. L.; Panko, J. M.; Mcafee, B. L.; Sweet, L. I.; Finley, B. L. Physical and Chemical Characterization of Tire-related Particles: Comparison of Particles Generated Using Different Methodologies. *Sci. Total. Environ.* **2010**, *408*, 652-659.
- Kwak, J. H.; Lee, S. Y.; Lee, S. H. On-road and Laboratory Investigations on Non-exhaust Ultrafine Particles from the Interaction Between the Tire and Road Pavement under Braking Conditions. *Atmos. Environ.* **2014**, *97*, 195-205.
- Alves, C. A.; Vicente, A. M. P.; Calvo, A. I.; Baumgardner, D.; Amato, F.; Querol, X.; Pio, C.; Gustafsson, M. Physical and Chemical Properties of Non-exhaust Particles Generated from Wear Between Pavements and Tyres. *Atmos. Environ.* **2020**, *224*, 117252.
- Grigoratos, T.; Gustafsson, M.; Eriksson, O.; Martini, G. Experimental Investigation of Tread Wear and Particle Emission from Tyres with Different Treadwear Marking. *Atmos. Environ.* **2018**, *182*, 200-212.
- Lee, S. H.; Lee, S. Y.; Kim, Y. R.; Choi, Y.; Woo, S. H. Effect of Tire Treadwear Rate on the Physical Characterization of Tire Wear Particles in Laboratory Measurements. *Korean. Soc. Atmos. Environ.* **2019**, *35*, 741-756.
- Kim, G. B.; Lee, S. H. Characteristics of Tire Wear Particles Generated by a Tire Simulator under Various Driving Conditions. *Environ. Sci. Technol.* **2018**, *52*, 12153-12161.
- Panko, J.; Kreider, M.; Unice, K. Review of Tire Wear Emissions. In *Non-Exhaust Emissions*; Amato, F., Ed.; Academic Press: New York, USA, 2018; pp 147-160.
- Huang, M.; Guibert, M.; Thévenet, J.; Fayolle, C.; Chaussée, T.; Guy, L.; Vanel, L.; Loubet, J. L.; Sotta, P. A. New Test Method to Simulate Low-severity Wear Conditions Experienced by Rubber Tire Materials. *Wear* **2018**, *410-411*, 72-82.
- Choi, S. S.; Yang, S. R.; Chae, E. J.; Son, C. E. Influence of Carbon Black Contents and Rubber Compositions on Formation of Wear Debris of Rubber Vulcanizates. *Elast. Compos.* **2020**, *52*, 108-113.
- Chae, E. J.; Son, C. E.; Choi, S. S. Preparation of Rubber Particulates for Micro Dust Study Using Cryogenic Crushing. *Elast. Compos.* **2019**, *54*, 330-334.
- ASTM D1765, Standard Classification System for Carbon Blacks Used in Rubber Products.
- Foitzik, M. J.; Unrau, H. J.; Gauterin, F.; Dörnhöfer, J.; Koch, T. Investigation of Ultra Fine Particulate Matter Emission of Rubber Tires. *Wear* **2018**, *394-395*, 87-95.
- DIN ISO 6344-1, Coated abrasives – grain size analysis – part 1: Grain size distribution test.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.