

# 특수개질 및 일반 아스팔트 포장체 도로변의 미세먼지 발생에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on Fine Dust Emissions near Special Modified Asphalt Pavement and Conventional Asphalt Pavement

강태우<sup>1</sup> · 김혁중<sup>2\*</sup>

Tae-Woo Kang<sup>1</sup> · Hyeok-Jung Kim<sup>2\*</sup>

(Received September 17, 2023 / Revised September 22, 2023 / Accepted September 22, 2023)

In this study, we analyzed the amount of roadside fine dust generated from newly constructed specially modified asphalt pavement and general asphalt pavement from existing roads. We collected the 1,000 g (100 g/day) of dust samples from the roadside of the express bus terminal and commercial facility area in Chungcheongnam-do's C site at three-day intervals during the summer of 2022 and 2023. The collected samples were separated from fine dust according to size in the 75-150  $\mu\text{m}$  range and, were separated only from Tire and Road Wear Particles through density separation. No.1-3 are general asphalt pavement section as an existing road. Fine dust and Tire and Road Wear Particles in No.1-3 were 24.27 g, 24.36 g, 0.53 g, and 0.53 g, respectively, and the quantitative results for 2022 and 2023 were similar. On the other hand, No.4-6 are newly constructed specially modified asphalt pavement section. Fine dust decreased by 14.8 % and tire and road wear particles decreased by 29.6 % in 2023 compared to 2022 in No.4-6. In addition, according to the results of thermogravimetric analysis, Tire and road wear particles in No.1-3 are tire and road components at 30 % and 70 %, respectively. And Tire and road wear particles in No.4-6 are tire and road components at 35 % and 65 % in 2023, respectively. From these results, it was confirmed that the newly constructed specially modified asphalt pavement can be effective in reducing roadside fine dust and Tire and Road Wear Particles. However, there may be some shortcomings in conclusive research results due to limited space and sample collection period. In the future, we plan to conduct various case studies.

**키워드** : 배수성 아스팔트 포장체, 제강슬래그 아스팔트 포장체, 미세먼지, 타이어와 도로 마모 입자

**Keywords** : Drainage asphalt pavement, Steel slag asphalt pavement, Fine dust, Tire and Road Wear Particles

## 1. 서론

버스와 승용차, 트럭 등을 포함한 이동 수단의 발전은 인간의 이동 편리성을 향상 시켰지만, 의도치 않게 미세먼지(PM)와 미세 플라스틱(micropastic)을 포함한 환경 문제를 발생시키고 있다 (Baensch-Baltrusch et al. 2021). 이에 유럽연합(EU)은 이동 수단에 의해 발생하는 환경 문제를 개선하고자 자동차의 배기가스 규제인 유로(EURO) 정책을 실시하고 있는데, 1992년 유로 1에서 출발해 2013년 유로 6까지 단계적으로 자동차의 배출가스 규제를 강화했다.

최근, 유럽연합집행위원회(EC)는 Table 1과 같이 2024년 유로 7 시행 계획을 발표했다. 유로 7은 기존 유로 6와 비교해 질소산화물(NOx)과 미세먼지(PM), 일산화탄소(CO) 규제 허용치가 더욱 강화됐다. 또한 위험성이 높은 대기오염 물질인 비메탄유기가스(NMOC)와 암모니아(NH<sub>3</sub>), 이산화질소(N<sub>2</sub>O)를 신규 관리 항목으로 추가했다. 특히, 기존 유로 6의 규제가 내연기관자동차의 배기 기관으로 한정된 것과 달리, 유로 7은 내연기관 및 친환경자동차의 비배기관인 브레이크패드와 타이어의 마모로부터 발생하는 미세먼지와 미세플라스틱에 대한 규제도 새롭게 추가될 예정이다.

\* Corresponding author E-mail: ceasare@hknu.ac.kr

<sup>1</sup>금호타이어 중앙연구소 선임연구원 (Kumho Tire R&D Center, 215-21, Saeun-ro, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 17076, Korea)

<sup>2</sup>한경국립대학교 산학협력단 산학협력중점교수 (Industry-Academic Cooperation Foundation, Hankyong National University, Anseong, 17579, Korea)

Table 1. The draft Euro 7 emissions regulations (unit: g/kWh)

Regulated substance	Euro 6	Euro 7
NOx	0.4	0.09
PM	0.01	0.008
CO	1.5	0.2
NMOG	-	0.05
NH <sub>3</sub>	-	0.065
N <sub>2</sub> O	-	0.1
CH <sub>4</sub>	-	0.35
Brake Wear Particle Emissions	-	7 (mg/km)
Tire & Road Wear Particles	-	TBD

일반적으로 친환경자동차는 종래 내연기관자동차와 달리, 배기기관에서 오염원을 배출하지 않아 친환경자동차라 정의되지만, 구동 중 높은 토크(torque)와 배터리 팩(battery pack)으로 인한 하중 증가로 비배기기관 장치인 브레이크패드 및 타이어의 마모로 인해 발생하는 오염원이 증가할 수도 있는 문제점을 갖고 있다 (O'Connor et al, 2020).

그 중, 타이어는 자동차의 주행 과정에서 도로 간 마찰로 인해 마모 현상이 발생되는데, 이때 타이어 고무 마모입자와 도로 포장체 마모입자 및 도로의 먼지가 함께 혼합되어 발생한다(Kang and Kim 2023). 이를 타이어와 도로 마모입자(TRWPs)라고 정의하며, 운전자의 습관과 도로 환경, 날씨, 자동차 및 타이어 구조 등을 포함한 다양한 조건에 의해 발생량이 달라지는 것으로 알려져 있다(Lee et al, 2013).

도로에서 발생한 타이어와 도로 마모입자는 입자 크기에 따라서 1,000 μm 이하의 경우에는 대기 중으로 비산되고, 이 중 10 μm이하의 입자는 미세먼지에 포함된다(Panko et al, 2019). 이는 타이어와 도로 마모입자의 발생량 중 약 2-3 % 수준이며, 대부분은 5 mm이하의 미세플라스틱으로 발생되어 바람과 빗물 같은 환경 작용에 의해 도로변과 토양, 강, 해양 환경으로 이동하며 (Klöckner et al, 2021), 생태계에 영향을 주는 것으로 연구되고 있다(Panko et al, 2013).

환경 문제를 개선하고자, 지난 30년 동안 국·내외 타이어 전문가들은 도로 환경에서 발생하는 타이어와 도로 마모입자 감축을 위해 마모 성능이 향상된 타이어 제품 개발을 하고 있다. 하지만, 타이어와 도로 마모입자는 복합 혼합물로 발생되기 때문에 타이어 제품의 성능 향상만으로는 현실적으로 한계가 있어, 타이어와 도로 마모입자의 발생량 감축을 위해서는 도로 환경의 아스팔트 포장체 개발이 필요하다.

본 연구에서는 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체로써 배

수성아스팔트 및 제강슬래그 아스팔트혼합물로 시공된 도로에서 생성되는 도로변 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 저감 효과를 검토하고자 하였다. 이에 충청남도 C 지역에서 인구 밀집과 차량 통행이 많은 고속버스터미널 도로변을 중심으로, 실제 도로변 환경에서 발생하는 미세먼지의 현장 샘플을 채집하여 분석 실험에 연구의 초점을 맞추었다. 그리고, 2023년에 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체와, 기존 일반 아스팔트 포장체의 도로변 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자 발생량에 대한 정량적 분석 연구를 수행했다.

## 2. 실험 방법

본 연구를 수행하기 위해 샘플 채집은 Fig. 1과 같이, 신규 도로 건설 계획 구간과 기존 도로의 운영 구간에 해당하는 충청남도 C 지역의 고속버스터미널 정류장 부근 6곳의 도로변에서 2022년 및 2023년 하절기(28 ± 3 °C) 기간 동안 수행하였다. 채집된 샘플은 입자 크기 및 밀도 분리를 통해 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자만을 정밀하게 분리하여 정량적으로 측정하고, 구성 성분 분석을 위해 열중량분석(TGA)을 수행하였다.

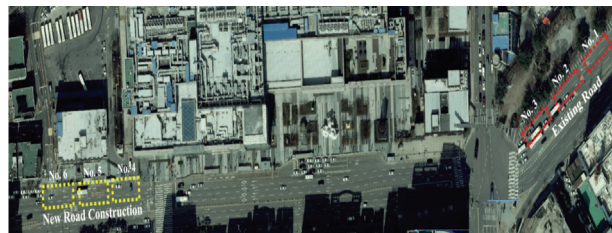


Fig. 1. Locations of dust sampling along the roadside near the express bus terminal of C area, Korea

### 2.1 실험 재료

본 연구에서 채집된 도로변 먼지 샘플에 대해 타이어와 도로 마모입자의 분리를 위한 전처리 시약으로 다이브로모메탄 (Dibromomethane, Cas no : 74-65-3)과 트랜스-1,2-다이클로로에틸렌(Trans 1,2-Dichloroethylene, Cas no : 156-60-5)을 사용하였다.

### 2.2 도로변 먼지 샘플 채집

본 연구에 사용된 도로변 먼지 샘플 채집은 시간당 약 1,300대 정도 교통량을 나타내는 고속버스터미널 및 상업 시설의 도로변에

서 수행하였다. 샘플링은 진공청소기(Dyson V8, 115 AW)를 이용하여 3일 간격으로 1개월 동안 1,000 g(100 g/day)의 샘플을 채집하고, 수분을 제거하기 위해 100 °C 오븐에서 48시간 동안 전처리 작업을 실시하였다.

### 2.3 도로변 먼지 샘플의 크기 및 밀도 분리

본 연구의 신뢰도 높은 실험 결과 도출을 목적으로 선행연구로써 수행된 실험 방법으로 다음과 같이 도로변 먼지 샘플을 분리하고 분석하였다. 일반적으로 환경에 존재하는 타이어와 도로 마모입자는 75–150 μm 범위의 분포가 높기 때문에 본 연구에서는 체 분리시험기를 이용하여 75–150 μm 미세먼지만을 크기 분리하여 실험에 사용하였다(Kovochich et al, 2021).

분리된 미세먼지에서 타이어와 도로 마모입자만을 분리하고자 밀도 분리를 수행하였다. 밀도 분리의 전처리 단계는 다음과 같다. 식 (1)을 이용하여 다이브로모메탄 43.5 %와 트랜스-1,2-다이클로로에틸렌 56.5 % 비율로 혼합하여 밀도가 1.8 g/cm<sup>3</sup>인 혼합액을 제조하여, 밀도가 1.2–1.6 g/cm<sup>3</sup>인 타이어와 도로 마모입자만을 분리하였다.

$$Density = ((A_{density} \times A_{ratio}) + (B_{density} \times B_{ratio})) \div 0.997 \quad (1)$$

A<sub>density</sub>와 A<sub>ratio</sub>는 다이브로모메탄의 밀도 값인 2,497 g/cm<sup>3</sup>와 혼합 비율을, B<sub>density</sub>와 B<sub>ratio</sub>는 트랜스-1,2-다이클로로에틸렌 밀도 값인 1.256 g/cm<sup>3</sup>와 혼합 비율을 의미한다. 또한, 0.997은 물의 밀도를 의미한다. 제조된 혼합액은 액체 비중 측정기를 이용해 밀도 값을 확인하였고, 샘플 5 g당 혼합액 100 g을 넣고 48시간 동안 방치한 후 밀도 편차에 의한 층의 분리를 확인한 뒤, 상층부의 타이어와 도로 마모입자만을 분리하고, 100 °C 오븐에서 48시간 동안 건조 처리를 통해 수분을 완전히 제거하였다.

### 2.4 타이어와 도로 마모 입자 분석

본 연구에서는 타이어와 도로 마모입자의 형상과 구성 성분 분석을 위해 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)과 열중량분석기(TGA: Thermo Gravimetric Analyzer)를 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 신규 건설된 특수 개질 아스팔트 포장체와 기존 도로로써 일반 아스팔트 포장체의 도로변에서 발생하는 미세먼지

및 타이어와 도로 마모입자의 발생량을 정량적으로 비교하였고, 형상 분석과 타이어와 도로 마모입자의 구성 성분을 분석하여 그 결과를 도출하였다.

### 3.1 도로변 먼지 샘플의 크기 및 밀도 분리 결과

본 연구는 기존 도로로써 일반 아스팔트 포장체와, 2023년에 신규 건설된 특수 개질 아스팔트 포장체의 도로변 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 정량적 변화를 분석하였다. 도로 현장에서 채집된 먼지 샘플에 대한 체분리시험기를 이용하여 크기 분리된 75–150 μm 범위의 미세먼지와, 미세먼지에서 밀도 분리된 타이어와 도로 마모입자의 정량 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

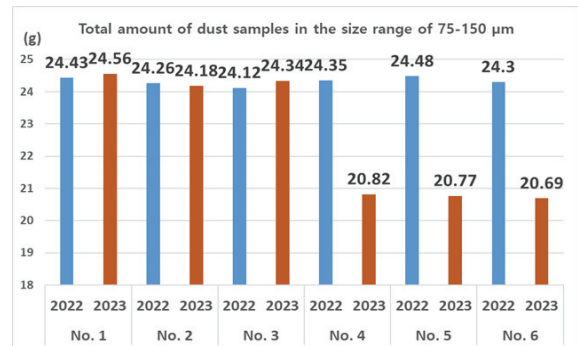


Fig. 2. The graph of total amount of dust samples in the size range of 75-150 μm for 2022 and 2023

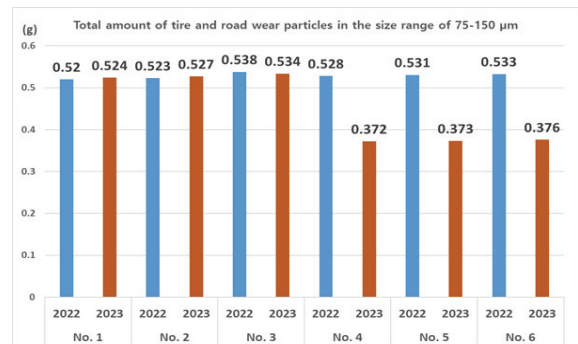


Fig. 3. The graph of total amount of Tire & Road Wear Particles in the size range of 75-150 μm for 2022 and 2023

기존 도로로써 일반 아스팔트 포장체 구간인 No.1–3 구역에서 채집되어 분석된 75–150 μm 범위의 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 평균은 각각 24.27 g과 24.36 g, 0.53 g과 0.53 g으로 분석되어 2022년과 2023년이 유사한 정량 결과 값을 나타내었다. 반면에, 2023년에 신규 건설된 특수 개질 아스팔트 포장체 구간인

No.4-6 구역에서는 2022년과 비교할 때 2023년 미세먼지는 14.8 % (24.38 g → 20.76 g), 타이어와 도로 마모입자는 29.6 % (0.53 g → 0.37 g) 감소한 정량 결과 값을 나타내었다. 이러한 결과로부터 신규 건설된 특수 개질 아스팔트 포장체에서 도로변 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자 발생 저감에 효과를 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 일반 아스팔트 포장체와 비교해 특수개질 아스팔트 포장체는 10 mm 골재를 사용하기 때문에 표층면이 균일하고 평탄성이 높다. 이에 자동차 주행 중 타이어와 포장체 간 균일한 접지 분포를 갖게 되어 이상 마모가 발생하지 않아, 타이어 및 도로 포장체 각각의 마모가 적게 발생하기 때문에 미세먼지와 타이어와 도로 마모입자 발생량이 감소하였다(Gruber et al. 2011).

### 3.2 타이어와 도로 마모 입자 분석 결과

도로변에서 채집된 샘플은 크기 및 밀도 분리 결과의 검증을 위해 주사전자현미경을 이용해 형상 분석을 수행하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 일반적으로 크기에 의해 분리된 샘플(미세먼지)은 다양한 무기물과 타이어와 도로 마모입자가 포함된 유기물이 존재하기 때문에 무정형 형상을, 밀도에 의해 분리된 샘플은 타이어와 도로 마모입자만이 존재하기 때문에 지우개가루(mig-wish) 형상으로 나타남에 따라 샘플 분리가 잘 수행되었음을 확인하였다.

또한, 타이어와 도로 마모입자와 이를 구성하는 타이어와 도로 구성 성분의 분석 전, 타이어와 도로 표준 샘플의 제조와 각각의 성분을 확인하여 마커(marker)로 활용해야만 한다. 이에 Table 2와 같이 타이어는 국내에서 일반적으로 사용되는 승용차용 및 소형트럭용, 버스(대형트럭)의 타이어 트레드 고무 부위만을 분리하였고, 액체질소를 사용하여 극저온 분쇄 전처리 작업으로 분말화

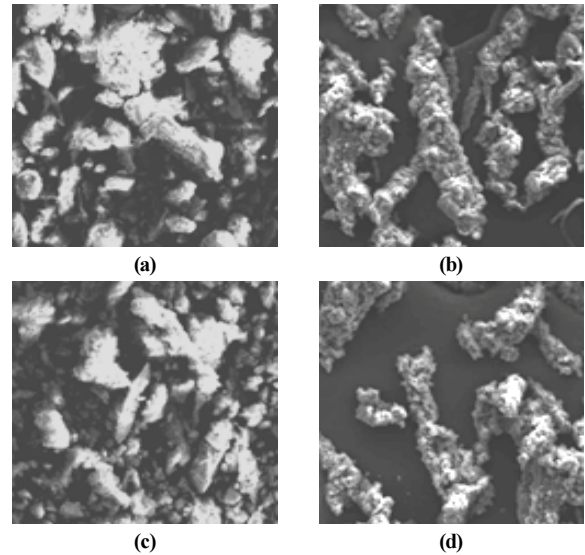


Fig. 4. The pictures of fine dust and TRWPs for 2022 and 2023 by the SEM measurement : (a) fine dust 2022, (b) TRWPs 2022, (c) fine dust 2023, (d) TRWPs 2023

하였다. 타이어 표준 샘플 제조를 위해 국내 자동차 등록 현황을 조사하여 소형차, 소형트럭 및 버스(대형트럭) 비율인 7:1:2로 혼합하여 타이어 표준 샘플을 제조했다. 도로 표준 샘플은 국내에서 사용되는 도로 포장 규격인 고온 아스팔트 혼합물의 기본 배합으로써 골재 92.9 %, 잔골재 5 %, 아스팔트 2 % 및 충전재 0.1 % 등 도로 포장체의 표준 샘플로써 제조하였다. 표준 샘플의 열중량 분석 결과로부터, 타이어는 유기물(polymer)과 카본블랙(carbon black)이 약 80.4 %이며, 도로는 약 94 %가 무기물로 구성되어 있음을 확인하였고, 분석 결과 값은 마커로 활용하였다.

본 연구에서 분리된 타이어와 도로 마모입자에 대한 열중량 분석 결과는 Table 3에 나타내었다. 또한, 타이어 및 도로 표준 샘플

Table 2. Types of tire products included in the standard samples of tire tread rubber compound

Passenger Car (PCR)			Light Truck (LTR)			Truck / Bus (TBR)		
Size	Brand	Season	Size	Brand	Season	Size	Brand	Season
205/55R16	SOLUS TA21	A/S	145R13C	VENTRA DT	A/S	275/70R23	S-City AU06	-
225/55R17	NFERA AU5	A/S	195R15C	VENTRA LT	A/S	12/R23	KRA53	-
245/45R18	VENTUS S2	A/S						
235/60R18	CRUGEN HP71	A/S						
225/40R18	ECSTA PS91	Summer						
245/40R19	SOLUS TA91	A/S						
235/55R19	DYNAPRO RA43	A/S						
245/40R20	ECSTA PS71	Summer						

Total : 12 / PCR : LTR : TBR = 7 : 1 : 2

의 분석 결과를 기반으로, 식 (2), (3)을 이용해 타이어와 도로 마모 입자 내 타이어와 도로 성분 비율을 계산하여 Table 4와 Table 5에 나타내었다.

$$T_r = \frac{CR_t}{CR_t + CR_r} \quad (R_r = 1 - T_r) \quad (2)$$

$$TRWP_t = T_r \times CR_{TRWP} \quad (TRWP_r = R_r \times CR_{TRWP}) \quad (3)$$

$T_r$ 은 타이어와 도로 마모입자 내, 타이어 성분의 추정 비율,  $R_r$ 은 도로 성분과 주변 환경물(먼지)의 추정 비율,  $CR_t$ 은 타이어 표준 샘플의 해당 구성 성분의 값,  $CR_r$ 은 도로 표준 샘플의 해당 구성분의 값,  $TRWP_t$ 는 타이어와 도로 마모입자 내 구성분에 대한 타이어

성분 비율 값,  $TRWP_r$ 은 도로 성분 비율 값,  $CR_{TRWP}$ 는 미세먼지 샘플에 대한 분리된 타이어와 도로 마모입자 샘플에 대한 해당 구성분의 값을 의미한다.

타이어와 도로 마모입자의 열중량분석 결과 값과 식 (2), (3)으로 계산된 결과로부터, 기존 도로로서 일반 아스팔트 포장체는 샘플 채집 장소와 관계없이 도로변에 분산된 타이어와 도로 마모입자는 타이어 성분이 30 %, 도로 성분이 70 %로 분석되었다. 반면에, 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체는 타이어 성분이 35 %, 도로 성분이 65 %로 분석되었다. 이는 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체는 골재 간 높은 결합력과 부착력으로 포장체 내 구성이 향상되어, 자동차 주행 중 파손과 마모가 적게 발생하여 타이어와 도로 마모입자 내 비율이 감소한 것으로 유추된다(Han et al. 2020).

**Table 3. Result of standard samples and TRWPs components acquired using TGA**

	Standard samples		No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6	
	Tire	Road	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023	2022	2023
Organic (%)	10.38	0.98	3.64	3.54	3.65	3.64	3.62	3.48	3.59	4.44	3.72	4.56	3.52	4.52
Polymer (%)	51.54	2.12	9.02	9.12	9.04	8.92	9.08	9.26	9.12	12.34	8.96	12.11	9.13	12.26
Carbon black (%)	18.52	2.48	4.22	4.25	4.28	4.32	4.32	4.18	4.31	7.14	4.3	7.08	4.28	7.12
Ash (%)	19.56	94.42	83.12	83.09	83.03	83.12	82.98	83.08	82.98	76.08	83.02	76.25	83.07	76.1

**Table 4. Tire and road composition in TRWPs of general asphalt pavement calculated using the equations (2) and (3)**

Materials	Standard samples		No.1				No.2				No.3			
	Tire	Road	2022		2023		2022		2023		2022		2023	
			Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road		
Organic	0.91	0.09	3.33	0.31	3.23	0.31	3.34	0.31	3.33	0.31	3.31	0.31	3.18	0.3
Polymer	0.96	0.04	8.66	0.36	8.76	0.36	8.68	0.36	8.57	0.35	8.72	0.36	8.89	0.37
Carbon black	0.88	0.12	3.72	0.50	3.75	0.50	3.77	0.51	3.81	0.51	3.81	0.51	3.69	0.49
Ash	0.17	0.83	14.26	68.86	14.26	68.83	14.25	68.78	14.26	68.86	14.24	68.74	14.26	68.82
Total (%)			29.98	70.02	30.00	70.00	30.04	69.96	29.97	70.03	30.08	69.92	30.02	69.98

**Table 5. Tire and road composition in TRWPs of specially modified asphalt pavement calculated using the equations (2) and (3)**

Materials	Standard samples		No.1				No.2				No.3			
	Tire	Road	2022		2023		2022		2023		2022		2023	
			Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road		
Organic	0.91	0.09	3.28	0.31	4.06	0.38	3.40	0.32	4.17	0.39	3.22	0.30	4.13	0.39
Polymer	0.96	0.04	8.76	0.36	11.85	0.49	8.61	0.35	11.63	0.48	8.77	0.36	11.78	0.48
Carbon black	0.88	0.12	3.80	0.51	6.30	0.84	3.79	0.51	6.24	0.84	3.77	0.51	6.28	0.84
Ash	0.17	0.83	14.24	68.74	13.06	63.02	14.25	68.77	13.09	63.16	14.26	68.81	13.06	63.04
Total (%)			30.08	69.92	35.26	64.74	30.04	69.96	35.13	64.87	30.02	69.98	35.24	64.76

## 4. 결론

본 연구에서는 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체와 기존 도로로써 일반 아스팔트 포장체의 도로변에서 발생하는 미세먼지를 분석하였다. 미세먼지 측정 장소로써 충청남도의 C 도시는 인근에 고속버스 터미널과 상업 시설 지역이 위치하고 있으며 차량 통행과 인구 유동이 많은 교통 중심의 도심지이다. 이러한 위치적 조건을 대상으로 도로변 미세먼지 샘플을 채집하였고, 크기와 밀도 분리 및 형상과 성분 분석을 실시하여 도로변 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 함량과 구성 성분 비율을 도출하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 신규 도로 건설 계획 구간과 기존 도로의 운영 구간에 해당하는 충청남도 C 지역의 고속버스터미널 정류장 부근 6곳의 도로변에서 2022년 및 2023년 하절기(28 ± 3 °C) 기간 동안 미세먼지 샘플링 작업 및 전처리 작업을 수행하였다. 채집된 먼지 샘플은 1,000 g의 크기로서 밀도 분리하여 75–150 μm 범위의 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자를 분리하였다.
2. 기존 도로로써 일반 아스팔트 포장체 구간인 No.1–3 구역의 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자는 각각 24.27 g과 24.36 g, 0.53 g과 0.53 g으로, 2022년과 2023년에 분석된 정량적 결과가 유사하였다. 반면에, 2023년 신규 건설된 특수 개질 아스팔트 포장체 구간인 No.4–6 구역은 2022년 대비 2023년 미세먼지는 14.8 %, 타이어와 도로 마모입자는 29.6 % 감소되었다.
3. 열중량분석 결과에 의하면, No.1–3 구역의 타이어와 도로 마모입자는 타이어와 도로 성분이 각각 30 %와 70 %로 분석되었고, 2023년 No.4–6 구역에서의 발생된 각각의 성분은 35 %와 65 %로 분석되었다.
4. 특수개질 아스팔트 포장체는 일반 아스팔트 포장체와 비교시 10 mm 골재 사용으로 표면의 평탄성 개선, 개질아스팔트 사용에 따른 골재부착력 증진 및 고밀도의 제강슬래그 골재 사용에 따른 내구공용성 증진 등 도로포장체에서 발생될 수 있는 도로 마모입자로서 미세먼지 발생량 저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

본 연구는 도심지 도로변에서 발생하는 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 저감 효과를 기대할 수 있는 아스팔트 포장체에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 그러나, 다양한 환경 및 기후적 변수를 고려한 공간적 제약 및 샘플 수집 기간의 한계로부터 추후 지속적인 연계성을 확보한 연구가 필요하다고 판단된다. 따라서,

향후에는 미세먼지를 저감할 수 있는 아스팔트 포장체의 기술적 접근과 도심지 도로변에서 발생하는 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 정량적 분석에 대한 다양한 사례 연구를 진행할 계획이다.

## Conflicts of interest

None.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (과제번호 : RS-2019-KA152342)

## References

- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Kochleus, C., Stock, F., Reifferscheid, G. (2021). Tyre and road wear particles—a calculation of generation, transport and release to water and soil with special regard to German roads, *Science of the Total Environment*, **752**, 141939.
- Gruber, P., Sharp, R.S., Crocombe, A.D. (2011). Normal and shear forces in the contact patch of a braked racing tyre, part 2: development of a physical tyre model, *Vehicle System Dynamics*, **50(3)**, 339–356.
- Han, S., Yao, T., Han, X., Hongwei, Z., Yang, X. (2020). Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture, *Construction and Building Materials*, **249**, 118835.
- Kang, T.W., Kim, H.J. (2021). A basic study on the generation of tire & road wear particles by differences in tire wear performance, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **9(4)**, 561–568 [in Korean].
- Kang, T.W., Kim, H.J. (2022). A study on the collection and analysis of tire and road wear particles(TRWPs) as fine dust generated on the roadside, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **10(3)**, 293–299 [in Korean].
- Kang, T.W., Kim, H.J. (2023). An experimental study on the component analysis and variation in concentration of tire and road wear particles collected from the roadside, *Sustainability*, **15(17)**, 12815.
- Klößner, P., Seiwert, B., Weyrauch, S., Escher, B. I., Reemtsma,

- T., Wagner, S. (2021). Comprehensive characterization of tire and road wear particles in highway tunnel road dust by use of size and density fractionation, *Chemosphere*, **279**, 130530.
- Kovochich, M., Parker, J.A., Oh, S.C., Lee, J.P., Wagner, S., Reemtsma, T., Unice, K.M. (2021). Characterization of individual tire and road wear particles in environmental road dust, tunnel dust, and sediment, *Environmental Science & Technology Letters*, **8(12)**, 1057–1064.
- Lee, S., Kwak, J., Kim, H., Lee, J. (2013). Properties of roadway particles from interaction between the tire and road pavement, *International Journal of Automotive Technology*, **14**, 163–173.
- O'Connor, J.D., Mahon, A.M., Ramsperger, A.F., Trotter, B., Redondo-Hasselerharm, P.E., Koelmans, A.A., Lally, H.T., Murphy, S. (2020). Microplastics in freshwater biota: a critical review of isolation, characterization, and assessment methods, *Global challenges*, **4(6)**, 1800118.
- 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.
- Panko, J.M., Hitchcock, K.M., Fuller, G.W., Green, D. (2019). Evaluation of tire wear contribution to PM<sub>2.5</sub> in urban environments, *Atmosphere*, **10(2)**, 99.

### 특수개질 및 일반 아스팔트 포장체 도로변의 미세먼지 발생에 대한 실험적 연구

본 연구에서는 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체와 기존 도로로써 일반 아스팔트 포장체의 도로변 미세먼지의 발생량을 분석하였다. 충청남도 지자체로써 차량 통행이 높은 C 도시의 고속버스터미널과 상업 시설 지역에 위치한 도로변에서 2022년과 2023년 하절기 동안 3일 간격으로 1,000 g(100 g/day)의 먼지 샘플을 채집하였다. 채집된 먼지 샘플은 크기와 밀도 분리를 통해 75–150  $\mu\text{m}$  범위의 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자로 전처리하여 분리하였다. 기존 도로로써 일반 아스팔트 포장체 구간인 No.1–3 구역의 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 평균은 각각 24.27 g과 24.36 g 및 0.53 g과 0.53 g으로, 2022년과 2023년의 미세먼지 발생량 데이터를 비교할 때 정량적 결과가 유사하게 분석되었다. 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체 구간인 No.4–6 구역은 2022년 분석 결과와 비교할 때 2023년 미세먼지는 14.8 %, 타이어와 도로 마모입자는 29.6 % 감소되었다. 또한, 열중량분석 결과에 의하면, No.1–3 구역의 타이어와 도로 마모입자는 타이어와 도로 성분이 각각 30 %와 70 %로 분석되었다. 그러나, No.4–6 구역의 2023년에는 타이어와 도로 성분이 각각 35 %와 65 % 분석되었다. 이러한 결과로부터 신규 건설된 특수개질 아스팔트 포장체에서 도로변 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자 발생을 낮출 수 있는 미세먼지 저감 효과를 확인 할 수 있었다. 그러나, 다양한 환경 및 기후적 변수를 고려한 공간적 제약 및 샘플 수집 기간의 한계로부터 추후 지속적인 연계성을 확보한 연구가 필요하다고 판단된다. 따라서, 향후에는 미세먼지를 저감할 수 있는 아스팔트 포장체의 기술적 접근과 도심지 도로변에서 발생하는 미세먼지 및 타이어와 도로 마모입자의 정량적 분석에 대한 다양한 사례 연구를 진행할 계획이다.