

도로에서 해양 환경까지 이동하는 타이어 마모입자의 농도를 예측하기 위한 실험적 연구

An Experimental Study to Predict the Concentration of Moving Tire and Road Wear Particles from Road to Ocean Environment

강태우¹ · 지원현^{2*}

Tae-Woo Kang¹ · Won-Hyun Ji^{2*}

(Received May 17, 2024 / Revised June 4, 2024 / Accepted June 4, 2024)

In this study, sample collection and quantification analysis of Tire and Road Wear Particles (TRWP) from the road surface were conducted to predict the amount of TRWP generated on the road surface moving by environmental compartment depending on rainfall intensity. Samples were collected from TRWP remaining on the road surface two days after the 3 days average rainfall (0-60 mm/day) occurred and the road surface was completely dry. Only TRWP were separated from the collected samples through size and density separation, and the difference in the content of TRWP remaining on the road surface after rainfall was based on the value of 60.2 g of TRWP on a day without rain (0 mm/day). By calculating, it was confirmed that 0-49.4 g of TRWP can move to the environmental compartment depending on the intensity of rainfall. In addition, it was confirmed that when the rainfall intensity was 60 mm/day, the amount of TRWP moving to each environmental section was 3.75 times higher compared to 5 mm/day, and using the results of previous research, the total amount of TRWP that can be transported to the environmental compartment by rainfall from the domestic road environment annually is 9,592 tons, and 288 tons of this can be affected by marine microplastics. However, this study has limitations in terms of limited space and predicted results, but it would like to mention the need to improve the domestic road environment and sewage treatment system to reduce TRWP. In the future, we plan to conduct sample collection and concentration analysis studies of TRWP in real environmental compartments to verify the results of this study.

키워드 : 타이어 마모입자, 강우, 미세플라스틱, 하수처리시스템

Keywords : Tire and road wear particles(TRWP), Storm water, Microplastic, Sewage treatment system

1. 서론

2023년 12월, 유럽연합이사회(European Council)와 유럽의회(European Parliament)는 도로 환경에서 자동차에 의해 발생하는 환경 문제를 개선하고자, 유럽연합집행위원회(European Commission)에서 제안한 유로 7 규제 정책을 잠정적으로 합의했으며, 유럽연합(European Union) 회원국의 공식 승인 절차 후, 2025년 7월 규제가 발효될 예정이다(MacLeod et al. 2021; Borrelle et al. 2020).

유로(Euro) 규제 정책은 1992년 유로 1에서 출발해 2013년 유로 6까지 단계적으로 질소산화물(NO_x)과 입상물질의 크기

(particulate matter)와 수(particulate number) 등을 포함한 자동차 배기기관의 배출가스(exhaust emission) 규제를 강화하고 있는데, 유로 7에서는 배기기관의 배출가스 뿐만 아니라 비배기기관의 배출(non-exhaust emission)인 브레이크패드와 타이어의 마모로부터 발생 하는 마모입자인 미세먼지(fine dust)와 미세플라스틱(microplastic)의 생성 함량 제한 항목까지 포함되어(Rødland et al. 2023; Chamas et al. 2020; Hermabessiere et al. 2017), 자동차에 의해 발생하는 도로 환경 규제가 더욱 강화되었다.

자동차의 비배기관인 타이어는 주행 과정 중 타이어의 최외각 부위인 트레드 고무와 노면의 표층면간 접촉으로 마찰력이 발생하기 때문에, 타이어뿐만 아니라 노면의 마모가 발생한다. 이때 생성

* Corresponding author E-mail: greenidea@hoseo.edu

¹금호타이어 중앙연구소 연구원 (R&D Center, Kumho Tire, Yongin, 17076, Korea)

²호서대학교 에너지기후환경융합기술학과 교수 (Department of E&CE Fusion Technology, Hoseo University, Asan, 31499, Korea)

된 각각의 타이어 입자(TP: Tire Wear Particles)와 노면 입자(RP: Road Wear Particles)가 지우개 가루 형태의 혼합물로서 타이어 마모입자(TRWP: Tire & Road Wear Particles)가 생성되며(Kang and Kim 2021), 혼합 비율과 생성량은 Kang and Kim(2023a)의 연구에 따르면 Fig. 1과 같이 운전자의 운전 습관(driving style)과 도로 환경(road curviness & topology, surface), 자동차 성능(vehicle design), 타이어 성능(tire design), 날씨(weather) 순으로 더 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다(Kang and Kim 2023b),

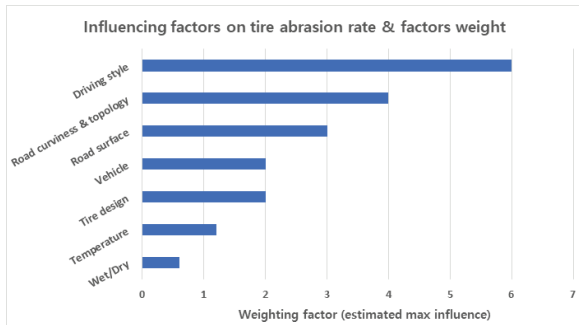


Fig. 1. The estimated graph of influencing factors on tire abrasion rate & weight loss

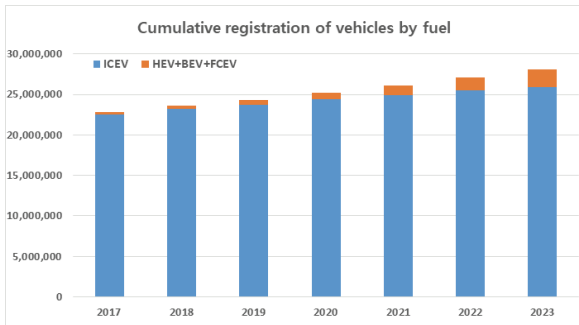


Fig. 2. The number of registered eco-friendly vehicles by year

최근, 국토교통부의 자동차 누적 등록 현황(2024)에 의하면 Fig. 2와 같이 국내 친환경 자동차의 등록대수는 매년 25% 이상 증가하고 있다. 일반적으로 친환경 자동차는 하이브리드 자동차(HEV: Hybrid Electric Vehicle)와 전기 자동차(BEV: Battery Electric Vehicle), 수소연료전지 자동차(FCEV: Fuel Cell Electric Vehicle)등이 포함되며, 이동 과정 중 배기기관에서 오염원을 배출하지 않아 친환경 자동차라 정의되지만, 종래 내연기관 자동차(ICEV: Internal Combustion Engine Vehicle)와 비교하여 높은 토크(torque)와 에너지 저장 장치인 배터리 팩(battery pack)으로 인한 하중 증가로 비배기관 장치인 브레이크 패드와 타이어의 마모

로 인해 발생하는 미세먼지와 미세플라스틱 오염원은 더욱 증가할 수도 있다(Tamis et al. 2021). 미세플라스틱은 아직 표준화된 정의는 없지만 열가소성수지 및 고무 조각, 합성 섬유 등을 포함한 5 mm 이하 크기의 고분자 복합체로 정리되고 있어, 생성된 타이어 마모입자의 대부분은 5 mm 이하 크기로 생성되기 때문에 미세플라스틱으로 정리할 수 있다(Hartmann et al. 2019).

자동차의 주행 과정 중 자동차와 타이어에 문제가 없다면, 타이어는 자동차의 주행 성능과 운전자의 안전을 위해 타이어 마모입자를 반드시 생성한다. 그리고 생성된 타이어 마모입자는 입자 크기에 따라 생성과 동시에 2-3%는 대기 중으로 비산되며, 97-98% 노면에 분산되어 존재하는데 바람과 빗물, 눈 같은 환경 작용에 의해 도로변과 토양, 지표수, 하천, 강, 바다 순서대로 이동하며, 다양한 환경 구획에 퇴적되어 존재하는 것으로 알려져 있다(Knight et al. 2020; Thompson et al. 2004).

또한, 최근 연구 결과에 의하면 타이어 마모입자가 빗물에 의해 다양한 환경 구획으로 이동하기 위해서는 적어도 5 mm/day 강우의 강도가 필요한 것으로 알려져 있으며(Ziajahromi et al. 2020), 강우에 의해 도로 및 인접 표면에 존재하는 마모입자의 전량이 다른 환경 구획으로 이동할 수 없으며 전량 중 일부만이 이동할 수 있는 것으로 연구됐다(Rasmussen et al. 2024; Liu et al. 2019). 또한, 전 세계 수역에 널리 분포된 미세플라스틱 중 5-10%는 타이어에서 배출되는 것으로 알려져 있다(Mattsson et al. 2023; Wagner et al. 2018).

2020년, 미국 워싱턴 대학교 연구진은 수십 년 전부터 미국 캘리포니아 지역의 북서부해안에서 발생하는 은연어(coho salmon) 폐사 사건을 조사한 결과, 타이어의 재료인 노화방지제(6PPD: N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine)가 원인이라는 사실을 발표했다(Tian et al. 2020). 또한, 공기에 노출된 '6PPD'는 오존(O₃)과 반응하여 '6PPD-quinone'으로 변형(transformation)되며, '6PPD'와 비교하여 생태계에 더욱 치명적인 독성 물질로 작용할 수 있다고 연구 결과를 발표함에 따라(Klöckner et al. 2021a), 최근 타이어 마모입자에 대한 이해관계자의 관심이 더욱 증가하고 있다.

타이어 산업에서는 타이어 고무조성물(compound)에 다양한 종류의 고무 재료와, 카본 블랙(carbon black) 및 실리카(silica) 보강제, 화학물질을 주요 재료로서 사용한다. 이 중 발암성 및 돌연변이성, 생식독성, 잔류성, 생물농축성, 내분비장애성 등을 발생할 수 있는 고위험우려화학물질(SVHC: Substance of Very High Concern)도 일부 포함되어 있는데 '6PPD' 또한 고위험우려화학물질로서 타이어가 노면과 마찰했을 때 발생하는 열에 의한 제품의

손상(safety)과 수명 하락(economic feasibility) 방지를 위해 필수적으로 사용되어야만 하는 재료지만, 아직 대체 화학물질이 존재하지 않아 당분간 문제가 지속적으로 나타날 수도 있다 (Olubusoye et al. 2023).

지난 30년 동안 타이어 산업은 타이어 마모입자에 의해 발생하는 해양 생태계 환경과 인간 건강 문제를 해결하고자, 마모 성능이 향상된 타이어 제품을 개발하고 제품화하여 타이어 마모입자의 생성량 감축을 위해 노력하고 있다. 하지만, 타이어 마모입자는 이동수단에 의해 타이어와 노면 간 접촉에 의해 생성되기 때문에 자동차 성능과 도로 환경도 같이 개선되어야만 한다. 또한, 타이어 마모입자는 강우에 의해 다양한 환경 구획으로 이동하며, 이동 중 일부는 환경에 퇴적되어 생태계와 이를 섭취하는 인간 건강에 부정적 영향을 끼치기 때문에 우수하수관(storm sewer)의 처리 시스템 개선에 대한 고민 또한 필요하다.

본 연구에서는 도로 노면에서 생성된 타이어 마모입자의 이동 경로에 포함된 환경 구획별 타이어 마모입자의 농도를 예측하고자, 타이어 마모입자의 이동에 영향을 주는 빗물에 대한 관심을 갖게 되었고, 강우의 강도 차이에 따라 강우 이후 도로 노면에 남아 있는 타이어 마모입자의 샘플 포집과 농도 분석 연구를 수행했다. 또한, 환경 구획별 이동된 타이어 마모입자의 농도 비율은 선행 연구 결과를 활용해 산출하였다. 본 연구 결과는 해양에 유입될 수 있는 도로 환경의 미세플라스틱 저감을 위한 연구에 활용할 수 있을 것이다.

2. 실험 방법

본 연구는 2023년 장마 기간에 충청남도 천안시 고속버스터미널 주변 지역의 우수구가 있는 도로 노면에서 샘플 포집을 수행했고, 포집된 샘플은 입자 크기 및 밀도 분리를 통해 타이어 마모입자만을 분리해 정량화했고, 화학적 분석 수행을 통해 분리 결과 검증을 수행했다. 또한, 정량화 결과와 Unice et al.(2019)의 선행 연구 결과를 활용해 타이어 마모입자의 이동 경로에 포함된 환경 구획별 이동량을 산출했다.

2.1 타이어 마모입자 샘플 포집

강우 강도 차이에 의한 타이어 마모입자의 이동 경로에 포함된 환경 구획별 농도를 예측하기 위해, Table 1과 같이 3일 평균 강우 (0-60 mm/day) 발생 후 도로 노면이 완전히 건조된 2일 후, 도로 노면에 남아 있는 타이어 마모입자의 샘플을 포집했다.

Table 1. Sampling date and average rainfall 5days ago

Date	7/20	7/29	8/6	8/14	8/19	8/26	9/1
Average rainfall (mm/day)	60	0	10	30	2	15	5

샘플 포집 위치는 Fig. 3과 같이 시간당 약 1,300대의 차량 이동이 있는 고속버스터미널 주변에서 우수구가 존재하는 도로 노면 6곳을 선정하여, 40일간 새벽 3-4시 사이에, 100-110 m 간격으로 10-20 m 범위에서 진공청소기(Dyson V8, 115 AW)와 브러쉬(brush)를 이용해 1,000 g 의 샘플을 포집했다. 또한, 포집된 샘플의 수분을 제거를 위해 100 °C 오븐에서 48시간 동안 전처리 작업을 실시했다.



Fig. 3. The picture of sample collection locations (on the road) around the express bus terminal

2.2 샘플 분리와 정량 측정

본 연구의 신뢰도 높은 실험 결과 도출을 목적으로 도로 노면에서 포집된 타이어 마모입자의 샘플에서 이물질을 제거하고자, 선행 연구로서 수행된 실험 방법을 이용해 타이어 마모입자만을 분리했다(Kang and Kim 2022). 또한, 다양한 환경 구획에 존재하는 타이어 마모입자의 크기는 1,000 μm 이하로 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 50-1,000 μm 범위의 체분리시험기를 이용하여, 샘플에 대해 입자 크기 분리 작업을 수행했다 (Kovochich et al. 2021).

체분리시험기를 통해 분리된 샘플은 밀도 분리 전처리를 통해 순수한 타이어 마모입자만을 분리했다. Jung and Choi(2022)의 연구 결과에 의하면 타이어 마모입자의 밀도는 1.3-1.6 g/cm³으로 알려져 있어 1.3 g/cm³이하와 1.6 g/cm³이상의 이물질 제거를 위해(Jung and Choi 2022), 밀도 값이 2.497 g/cm³인 다이브로모메탄(Dibromomethane)과 밀도 값이 1.256 g/cm³인 트랜스-1,2-다이클로로에틸렌(Trans-1,2-Dichloroethylene)을 분리 시약으로 사용했다.

Kang and Kim(2022)의 연구 방법에 따라 식 (1)을 이용해 트랜스-1,2-다이클로로에틸렌과 다이브로모메탄을 100:0 wt% 및 70:30 wt%, 40:60 wt% 비율로 혼합해 밀도가 1.26 g/cm³ 및 1.63 g/cm³, 2.0 g/cm³인 혼합액을 제조하여, 3단계의 밀도 분리를 통해 타이어 마모입자만을 분리했다.

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

A_{density}와 A_{ratio}는 다이브로모메탄의 밀도 값인 2.497 g/cm³와 혼합 비율을, B_{density}와 B_{ratio}는 트랜스-1,2-다이클로로에틸렌 밀도 값인 1.256 g/cm³와 혼합 비율을 의미한다. 또한, 0.997은 물의 밀도를 의미합니다. 제조된 혼합액은 액체 비중 측정기를 이용해 밀도 값을 확인했고, 샘플 5 g당 혼합액 100 g을 넣고 48시간 동안 방치한 후 밀도 편차에 의한 층의 분리를 확인한 뒤, 상층부(혼합액 밀도가 1.6 g/cm³이상일 경우) 또는 하층부(혼합액 밀도가 1.3 g/cm³이하일 경우)의 타이어 마모입자가 포함된 부분만을 분리하고, 100 °C 오븐에서 48시간 동안 건조 처리를 통해 수분을 완전히 제거하고, 무게 측정을 통해 정량화 작업을 수행했다.

2.3 샘플 분리 결과 검증

주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope)과 에너지분산형 엑스선분광기(EDX: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy), 열중량분석기(TGA: Thermo Gravimetric Analyzer)를 이용하여, 형상과 화학 성분 분석을 통해 샘플 분리 결과 검증을 수행했다(Rosso et al, 2023; Rausch et al, 2022).

2.4 환경 구획별 타이어 마모입자의 이동량 예측

강우 차이에 의한 국내 도로 환경에서 생성된 타이어 마모입자에 대한 환경 구획별 이동량을 산출하고자, Fig. 4와 같이 환경 구획별 타이어 마모입자의 이동량에 대한 선행 연구 결과(Unice et al, 2019)를 이용했다. 단, 국내는 국외와 달리 도로 환경의 물질은 우수관을 통해 하천으로 즉시 방출되기 때문에 하수처리장(18%)을 제외하고, 비산(2%) 또한 제외했다. 제외된 환경 구획을 배제하고, 타이어 마모입자의 환경 구획별 이동량의 비율은 도로 노면(100%) → 토양(76%), 하천(24%) → 강(21%), 하천 퇴적층(3%) → 바다(3%), 강 퇴적층(18%)로 설정했다.

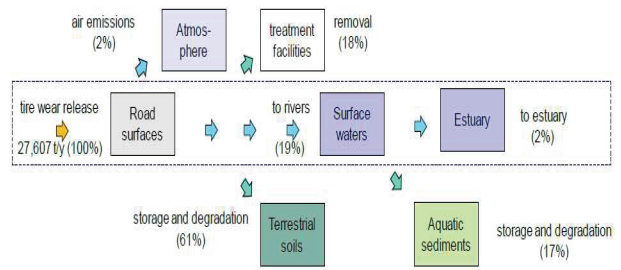


Fig. 4. The picture of movement amount of tire & road wear particles by environmental location in the Seine river

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 강우 이후 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자의 정량적 결과를 이용하여, 강우 강도에 따라 이동되는 타이어 마모입자량을 산출했다. 산출된 타이어 마모입자량은 Unice et al.(2019)의 환경 구획별 이동량의 선행 연구 결과를 이용하여, 국내 도로 환경에서 강우 강도에 따른 타이어 마모입자의 이동량에 대한 예측 값을 도출했다.

3.1 샘플 분리와 정량 측정 결과

본 연구에서는 강우 강도에 따라 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자의 정량적 측정을 위해, 포집된 42개 샘플에서 이물질 제거를 위해 수행한 입자 크기와 밀도 분리 결과를 Table 2에 나타냈다.

Table 2 결과에 따르면, 강우 이후 0 mm/day, 2 mm/day, 5 mm/day, 10 mm/day, 15 mm/day, 30 mm/day, 60 mm/day 강도에 따라, 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자를 포함한 먼지 함량이 평균 309.8 g, 289.3 g, 217.2 g, 160.3 g, 143.6 g, 127.4 g, 115.7 g으로 확인했다. 또한, 본 연구의 최대 강우(60 mm/day)와 강우(0 mm/day) 영향이 없을 경우를 비교하면 타이어 마모입자를 포함한 먼지 함량이 62.66% 감소하는 것으로 확인했다. 이는 타이어 마모입자를 포함한 먼지가 빗물에 의해 다양한 환경 구획으로 더 많이 이동할 수 있음을 의미한다.

또한, 강우 이후 0 mm/day, 2 mm/day, 5 mm/day, 10 mm/day, 15 mm/day, 30 mm/day, 60 mm/day 강도에 따라, 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자는 평균 60.2 g, 60.1 g, 47.0 g, 37.6 g, 24.4 g, 20.2 g, 10.8 g으로 확인했다. 이는 강우 강도가 강할수록 더 많은 타이어 마모입자가 환경 구획으로 이동할 수 있음을 의미한다. 반면에 강우 영향이 2 mm/day와 경우 영향이 없는 0 mm/day의 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자 함량을

Table 2. The amount of dust and tire & road wear particles by the separation of the size and specific

Date	Rainfall_AVG (mm/day)	No.1 (g)		No.2 (g)		No.3 (g)		No.4 (g)		No.5 (g)		No.6 (g)	
		Size	Specific	Size	Specific	Size	Specific	Size	Specific	Size	Specific	Size	Specific
7/20	60	116.44	10.8	114.12	10.84	113.49	10.73	116.68	10.76	115.26	10.82	118.2	10.74
7/29	0	304.84	60.44	314.38	60.38	308.43	60.1	307.87	59.97	310.11	60.49	313.25	59.73
8/6	10	164.98	37.63	159.57	37.25	158.69	37.42	162.96	37.83	157.62	37.69	158.13	37.91
8/14	30	126.56	20.12	128.72	20.04	127.36	20.32	127.33	20.31	127.24	20.28	127.32	20.24
8/19	2	285.52	60.12	290.58	60.14	291.64	59.68	287.83	59.81	290.66	60.62	289.47	60.29
8/26	15	144.44	24.28	145.52	24.54	140.37	24.49	143.18	24.26	145.57	24.55	142.64	24.48
9/1	5	214.55	46.85	218.42	46.94	213.76	47.32	216.64	46.62	221.75	47.25	217.88	47.16

비교했을 경우 차이가 없었는데, 이는 미미한 강우(5 mm/day이하)에서는 도로 환경의 타이어 마모입자 이동이 없음을 의미한다.

3.2 샘플 분리 결과 검증 결과

도로 노면에서 포집된 샘플에 대해 크기 및 밀도 분리 결과의 검증을 위해 주사전자현미경을 이용해 형상 분석을 수행했고, 그 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 크기에 의해 분리된 샘플에는 다양한 무기물과 타이어 마모입자를 포함한 유기물이 존재하기 때문에 무정형 형상을, 밀도에 의해 분리된 샘플에는 타이어 마모입자만 존재하기 때문에 지우개 가루 형상으로 나타났는데(Kreider et al. 2010; Camatini et al. 2001), 이는 분리 작업에 문제가 없음을 의미한다.

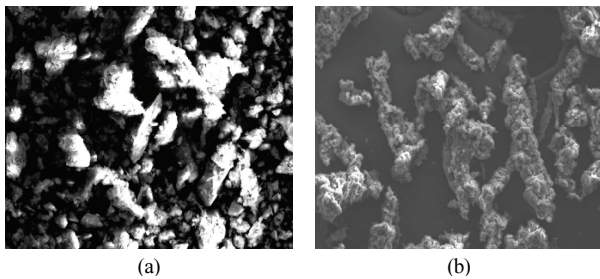


Fig. 5. The pictures of the road sample by the separation of the size and specific by the SEM measurement : (a) result of separation of the size, (b) result of separation of the specific

또한, 에너지분산형 엑스선분광기의 분석 결과는 다음 Table 3과 같으며, 타이어 고무는 S와 Zn, Na, Si, K, Mg, Ca, Al로, 도로 표층면은 C와 O, Si, K, Mg, Ca, Al로, 타이어 마모입자는 S와 Zn, Na, C, O, Si, K, Mg, Ca, Al로 화학적 구성 성분을 확인했다. 타이어 마모입자는 타이어 고무와 도로 표층면의 마모 혼합물로 구성되어 있기 때문에, S와 Zn, Na는 타이어 고무에서, C와 O는 도로 표층면에서 유래한 것으로 예상된다(Klößner et al. 2021b; Ozaki et al. 2004; Adachi et al. 2004).

Table 3. Overview of key analytical results for EDX mapping

Material	Elemental map
Tire tread compound	S, Zn, Na, Si, K, Mg, Ca, Al
Road surface	C, O, Si, K, Mg, Ca, Al
Tire & road wear particles	S, Zn, Na, C, O, Si, K, Mg, Ca, Al

Kang and Kim(2023a)의 타이어 마모입자의 열중량분석기 분석의 선행 연구 결과에 의하면, 타이어 마모입자는 타이어와 도로 성분이 각각 30 %, 70 %로 비율로 구성된 것으로 연구됐다. 또한, 본 연구의 열중량분석기 분석 결과는 Table 4와 같으며, 열중량분석을 위해 일정량 이상의 시료가 필요하기 때문에 샘플 포집 일자와 관계없이 동일 장소에서 포집되어 분리된 타이어 마모입자를 혼합해 분석에 이용했다.

분석 결과에 의하면 타이어 고무는 유기물(organic & polymer)과 카본블랙(carbon black)이 약 80.72 %로, 도로 표층면은 약 94.56 %가 무기물로, 타이어 마모입자는 유기물과 카본블랙이 약 17.56 %, 무기물이 약 82.44 %로 구성됨을 확인했다. 이는 생성된 타이어 마모입자에는 타이어 성분 보다 도로 성분이 더 많이 포함되어 있음을 의미한다.

또한, 본 연구에서 타이어 마모입자의 타이어와 도로 성분 비율을 산출하기 위해서는 식 (2), (3)을 이용했다. 그리고 해당 산출 결과를 Table 5에 나타냈다.

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

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

T_r 는 타이어 마모입자 내, 타이어 성분의 추정 비율, R_r 은 도로 성분의 추정 비율, CR_t 는 타이어 고무조성물의 마커의 해당 구성분

Table 4. Result of component of the marker and tire & road wear particles by using the TGA analysis equipments

	Materials		Tire & road wear particles (TRWP)					
	Tire	Road	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Organic (%)	10.32	0.94	3.78	3.71	3.62	3.75	3.73	3.69
Polymer (%)	51.54	2.12	7.57	7.63	7.68	7.64	7.59	7.62
Carbon black (%)	18.86	2.38	6.12	6.21	6.32	6.28	6.17	6.26
Ash (%)	19.28	94.56	82.53	82.45	82.38	82.33	82.51	82.43

Table 5. Calculation result of component of materials and TRWP by using the equation (2), (3)

	Materials		Tire & road wear particles (TRWP)											
			No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6	
	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road	Tire	Road
Organic (%)	0.92	0.08	3.46	0.32	3.40	0.31	3.32	0.30	3.44	0.31	3.42	0.31	3.38	0.31
Polymer (%)	0.96	0.04	7.27	0.30	7.33	0.30	7.38	0.30	7.34	0.30	7.29	0.30	7.32	0.30
Carbon black (%)	0.89	0.11	5.43	0.69	5.51	0.70	5.61	0.71	5.58	0.70	5.48	0.69	5.56	0.70
Ash (%)	0.17	0.83	13.98	68.55	13.96	68.49	13.95	68.43	13.94	68.39	13.97	68.54	13.96	68.47
Total (%)			30.15	69.85	30.21	69.79	30.26	69.74	30.29	69.71	30.16	69.84	30.22	69.78

의 값, CR_r은 도로 표층면의 마커의 해당 구성분의 값, TRWP_r는 타이어 마모입자 내 타이어 고무의 구성 성분 비율 값, TRWP_r은 도로 표층면의 구성 성분 비율 값, CR_{TRWP}는 분리된 타이어 마모입자의 해당 화학적 구성분의 값을 의미한다.

분석 마커와 타이어 마모입자의 열중량분석 결과 값과 식 (2), (3)으로 계산하여 도출된 결과로부터, 샘플 포집 장소와 관계없이 도로 환경에서 생성되는 타이어 마모입자는 타이어 성분이 30 %, 도로 성분이 70 %로 산출됐다. 이는 앞서 타이어 마모입자 생성에 영향을 주는 우선순위 요인과 같이 도로 환경이 타이어 성능 보다 타이어 마모입자 생성에 더 많은 영향을 끼칠 수 있음을 의미한다.

3.3 환경 구획별 타이어 마모입자의 이동량 예측 결과

본 연구의 강우 차이에 의한 환경 구획별 타이어 마모입자의

이동량을 산출하기 위해서, Table 2 결과를 이용하여 강우가 없는 날씨의 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자의 정량적 측정 결과를 기준으로, 강우 이후 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자의 정량적 측정 결과의 차이를 산출하면, Table 6과 같이 0 mm/day, 2 mm/day, 5 mm/day, 10 mm/day, 15 mm/day, 30 mm/day, 60 mm/day 강우 강도에 따라 평균 0 g, 0.08 g, 13.16 g, 22.56 g, 35.75 g, 39.97 g, 49.40 g로 각각의 강우 강도 차이에 의한 환경 구획으로 이동할 수 있는 타이어 마모입자의 이동량을 산출할 수 있다. 또한, 선행 연구 결과의 환경 구획별 이동 비율에 Table 6의 이동 가능한 타이어 마모입자 함량을 적용하면, Table 7과 같이 환경 구획별 타이어 마모입자의 이동량과 퇴적량을 산출할 수 있다.

강우가 60 mm/day일 경우 도로 환경에서 환경 구획별로 이동할 수 있는 타이어 마모입자 49.40 g을 기준(100 %)으로, 토양(76

Table 6. The result of the calculated of weight of tire & road wear particles movement using the table (2)

Date	Calculation equipment	No.1 (g)	No.2 (g)	No.3 (g)	No.4 (g)	No.5 (g)	No.6 (g)
7/20	0-60	49.64	49.54	49.37	49.21	49.67	48.99
7/29	0-0	-	-	-	-	-	-
8/6	0-10	22.81	23.13	22.68	22.14	22.8	21.82
8/14	0-30	40.32	40.34	39.78	39.66	40.21	39.49
8/19	0-2	0.32	0.24	0.42	0.16	-	-
8/26	0-15	36.16	35.84	35.61	35.71	35.94	35.25
9/1	0-5	13.59	13.44	12.78	13.35	13.24	12.57

Table 7. The result of calculated predicting amount of tire & road wear particles movement each various environments

Date	TRWP_AVG (g)	Soil (g)	Fresh water (g)	Fresh water sediment (g)	River (g)	River sediment (g)	Ocean (g)
7/20	49.40	37.55	11.86	1.48	10.37	8.89	1.48
7/29	-	-	-	-	-	-	-
8/6	22.56	17.15	5.42	0.68	4.74	4.06	0.68
8/14	39.97	30.37	9.59	1.20	8.39	7.19	1.20
8/19	0.08	0.06	0.02	-	0.02	0.01	-
8/26	35.75	27.17	8.58	1.07	7.51	6.44	1.07
9/1	13.16	10.00	3.16	0.39	2.76	2.37	0.39
Average	22.99	17.47	5.52	0.69	4.83	4.14	0.69

%)과 하천(24 %)으로 37.55 g과 11.86 g 이동하며, 토양으로 이동한 타이어 마모입자의 대부분은 토양 환경에 퇴적되며, 하천으로 이동한 타이어 마모입자 중 12.5 %인 1.48 g만이 하천에 퇴적(3 %)되며, 하천에서 강으로 이동(21 %)할 수 있는 타이어 마모입자는 10.37 g으로 산출됐다. 이 중 84.7 %인 8.89 g이 강에 퇴적(18 %)되며, 최종 종착지인 해양(3 %)에 1.48 g만이 유입되는 것으로 산출됐다.

만약, 도로 노면의 타이어 마모입자가 환경 구획으로 이동할 수 있는 최소 강우 강도(5 mm/day)에서는 도로 노면(13.16 g) → 토양(10.00 g), 하천(3.16 g) → 하천 퇴적층(0.39 g), 강(2.76 g) → 강 퇴적층(2.37 g), 바다(0.39 g)로 강우 강도(60 mm/day)일 경우와 비교해 3.75배 감소했다.

3.4 환경 구획별 타이어 마모입자의 연간 이동량 예측 결과

본 연구 결과를 응용해 연간 국내 도로 환경에서 환경 구획별 이동 가능한 타이어 마모입자의 정량 산출이 가능하다. Table 7과 같이 도로 100 m 당 도로 노면(22.99 g) → 토양(17.47 g), 하천(5.52 g) → 하천 퇴적층(0.69 g), 강(4.83 g) → 강 퇴적층(4.17 g), 바다(0.39 g)로 산출할 수 있다.

또한, 연구 결과를 국내 총 도로 길이 114,314 km에 적용하면 도로 노면(26.28 ton) → 토양(19.97 ton), 하천(6.31 ton) → 하천 퇴적층(0.79 ton), 강(5.52 ton) → 강 퇴적층(4.73 ton), 바다(0.79 ton)로, 이를 연간 일수로 적용하면 도로 노면(9,592 ton) → 토양(7,290 ton), 하천(2,302 ton) → 하천 퇴적층(288 ton), 강(2,014 ton) → 강 퇴적층(1,727 ton), 바다(288 ton)로 산출할 수 있다. 즉, 연간 국내 도로 환경에서 강우에 의해 환경 구획으로 이동 가능한 타이어 마모입자의 총량은 9,592 ton이며, 이 중 288 ton이 해양 미세플라스틱으로 영향을 줄 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 이동수단에 의해 도로 환경에서 생성되는 오염원 중, 비배기관장치인 타이어 마모입자의 강우 강도에 의한 환경 구획별 이동량을 예측하기 위해 연구를 수행했다. 천안시 고속버스터미널 주변 도로에서 샘플을 포집해, 입자 및 밀도 분리를 통해 강우 이후 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자만을 정량화할 수 있었다. 정량 결과와 Unice et al.(2019)의 선행 연구 결과를 이용해 환경 구획별 타이어 마모입자의 이동량을 예측했으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 샘플 포집은 3일 평균 강우(0-60 mm/day) 발생 후, 완전히 건조된 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자를 샘플링했다. 포집된 샘플은 크기와 밀도 분리를 통해 50-1,000 μm 범위의 타이어 마모입자 10.8-60.2 g만을 분리했다.
2. 타이어 마모입자의 분리 결과와 환경 구획별 이동 비율의 선행 연구 결과를 이용해, 강우 강도에 따라 환경 구획별 이동되는 타이어 마모입자 함량을 산출할 수 있었다. 60 mm/day 강우 강도에서는 5 mm/day일 경우와 비교해 타이어 마모입자 이동량이 3.75배 증가했다.
3. 또한, 타이어 마모입자의 화학적 분석을 통해, 타이어 마모입자는 S와 Zn, Na, C, O, Si, K, Mg, Ca, Al 원소로, 타이어와 도로 성분이 30 %와 70 %로 구성됨을 확인했다.

단, 본 연구의 결과는 한정적인 장소에서 수행된 연구이며, 예측 계산을 위해서 동일한 시험 환경이란 제약적 한계가 있다. 다만 본 연구를 통해 도로 환경에서 생성된 타이어 마모입자와 해양 미세플라스틱 저감을 위해서는, 타이어의 마모 및 마일리지 성능 향상, 국내 도로 표층면의 내구성과 거칠기 등을 포함한 도로 환경

과 하수처리시스템의 개선이 반드시 필요하다. 향후 실제 환경 구획에서 샘플을 포집해 분석을 통해 본 연구의 예측 결과에 대한 검증 연구를 진행할 계획이다. 또한, 기존 SBS 첨가제 도로 대비 건식 펠릿형 페타이어 개질 첨가제를 적용한 도로 환경에서의 타이어 마모입자 생성량 저감 효과를 검증할 계획이다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구로 수행되었습니다(과제번호 : RS-2023-00258092).

References

- Adachi, K., Tainosho, Y. (2004). Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust, *Environment InterNational*, **30(8)**, 1009–1017.
- Borrelle, S.B., Ringma, J., Law, K.L., Monnahan, C.C., Lebreton, L., McGivern, A., Murphy, E., Jambeck, J., Leonard, G.H., Hilleary, M.A., Eriksen, M., Possingham, H.P., De Frond, H., Gerber, L.R., Polidoro, B., Tahir, A., Bernard, M., Mallos, N., Barnes, M., Rochman, C.M. (2020). Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution, *Science*, **369(6510)**, 1515–1518.
- Camatini, M., Crosta, G.F., Dolukhanyan, T., Sung, C., Giuliani, G., Corbetta, G.M., Cencetti, G.M., Regazzoni, C. (2001). Microcharacterization and identification of tire debris in heterogeneous laboratory and environmental specimens, *Materials Characterization*, **46(4)**, 271–283.
- Chamas, A., Moon, H.J., Zheng, J., Qiu, Y., Tabassum, T., Jang, J.H., Abu-Omar, M., Scott, S.L., Suh, S.W. (2020). Degradation rates of plastics in the environment, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, **8(9)**, 3494–3511.
- Hartmann, N.B., Huffer, T., Thompson, R.C., Hassellöv, M., Verschoor, A., Daugaard, A.E., Rist, S., Karlsson, T., Brennholt, N., Cole, M., Herrling, M.P., Hess, M.C., Ivleva, N.P., Ivleva, A.L., Wagner, M. (2019). Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris, *Environmental Science & Technology*, **53(3)**, 1039–1047.
- Hermabessiere, L., Dehaut, A., Paul-Pont, I., Lacroix, C., Jezequel, R., Soudant, P., Duflos, G. (2017). Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: a review, *Chemosphere*, **182**, 781–793.
- Jung, U.Y., Choi, S.S. (2022). Classification and characterization of tire–road wear particles in road dust by density, *Polymer*, **14(5)**, 1005.
- 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.
- 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.
- Kang, T.W., Kim, H.J. (2023a). An experimental study on fine dust emissions near special modified asphalt pavement and conventional asphalt pavement, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, **11(3)**, 282–288.
- Kang, T.W., Kim, H.J. (2023b). 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., Reemtsma, T., Wagner, S. (2021a). The diverse metal composition of plastic items and its implications, *Science of the Total Environment*, **764**, 142870.
- Klößner, P., Seiwert, B., Wagner, S., Reemtsma, T. (2021b). Organic markers of tire and road wear particles in sediments and soils: transformation products of major antiozonants as promising candidates, *Environmental Science & Technology*, **55(17)**, 11723–11732.
- Knight, L.J., Parker–Jurd, F.N., Al–Sid–Cheikh, M., Thompson, R.C. (2020). Tyre wear particles: an abundant yet widely unreported microplastic?, *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 18345–18354.
- Kovochich, M., Liang, M., Parker, J.A., Oh, S.C., Lee, J.P., Xi, L., Kreider, M.L., Unice, K.M. (2021). Chemical mapping of tire and road wear particles for single particle analysis, *Science of the Total Environment*, **757**, 144085.
- Kreider, M.L., Panko, J.M., McAtee, B.L., Sweet, L.I., 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.
- Liu, F., Olesen, K.B., Borregaard, A.R., Vollertsen, J. (2019). Microplastics in urban and highway stormwater retention ponds, *Science of the Total Environment*, **671**, 992–1000.
- MacLeod, M., Arp, H.P.H., Tekman, M.B., Jahnke, A. (2021). The global threat from plastic pollution, *Science*, **373(6550)**, 61–65.
- Mattsson, K., de Lima, J.A., Wilkinson, T., Järnskog, I., Ekstrand, E., Sköld, Y.A., Gustafsson, M., Hassellöv, M. (2023). Tyre and road wear particles from source to sea, *Microplastics and Nanoplastics*, **3(1)**, 14.
- Olubusoye, B.S., Cizdziel, J.V., Bee, M., Moore, M.T., Pineda, M., Yargeau, V., Bennett, E.R. (2023). Toxic tire wear compounds (6PPD-Q and 4-ADPA) detected in airborne particulate matter along a highway in mississippi, USA, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **111(6)**, 68.
- Ozaki, H., Watanabe, I., Kuno, K. (2004). Investigation of the heavy metal sources in relation to automobiles, *Water, Air, and Soil Pollution*, **157**, 209–223.
- Rasmussen, L.A., Liu, F., Klemmensen, N.D.R., Lykkemark, J., Vollertsen, J. (2024). Retention of microplastics and tyre wear particles in stormwater ponds, *Water Research*, **248**, 120835.
- Rausch, J., Jaramillo-Vogel, D., Perseguers, S., Schnidrig, N., Grobéty, B., Yajan, P. (2022). Automated identification and quantification of tire wear particles (TWP) in airborne dust: SEM/EDX single particle analysis coupled to a machine learning classifier, *Science of The Total Environment*, **803**, 149832.
- Rødland, E.S., Gustafsson, M., Jaramillo-Vogel, D., Järnskog, I., Müller, K., Rauert, C., Rausch, J., Wagner, S. (2023). Analytical challenges and possibilities for the quantification of tire-road wear particles, *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **165**, 117121.
- Rosso, B., Gregoris, E., Litt, L., Zorzi, F., Fiorini, M., Bravo, B., Barbante, C., Gambaro, A., Corami, F. (2023). Identification and quantification of tire wear particles by employing different cross-validation techniques: FTIR-ATR Micro-FTIR, Pyr-GC/MS, and SEM, *Environmental Pollution*, **326**, 121511.
- Tamis, J.E., Koelmans, A.A., Drège, R., Kaag, N.H., Keur, M.C., Tromp, P.C., Jongbloed, R.H. (2021). Environmental risks of car tire microplastic particles and other road runoff pollutants, *Microplastics and Nanoplastics*, **1**, 1–17.
- Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W., McGonigle, D., Russell, A.E. (2004). Lost at sea: where is all the plastic?, *Science*, **304(5672)**, 838–838.
- Tian, Z., Zhao, H., Peter, K. T., Gonzalez, M., Wetzel, J., Wu, C., Hu, X., Prat, J., Mudrock, E., Hettlinger, R., Cortina, A.E., Biswas, R.G., Kock, F.V.C., Soong, R., Jenne, A., Du, B., Hou, F., He, H., Lundeen, R., Gilbreath, A., Sutton, R., Scholz, N.L., Davis, J.W., Dodd, M.C., Simpson, A., McIntyre, J.K., Kolodziej, E.P. (2020). A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon, *Science*, **371(6525)**, 185–189.
- Unice, K.M., Weeber, M.P., Abramson, M.M., Reid, R.C., Van, G.J., Markus, A.A., Vethaak, A.D., Panko, J.M. (2019). Characterizing export of land-based microplastics to the estuary – Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed, *Science of The Total Environment*, **646**, 1639–1649.
- Wagner, S., Hüffer, T., Klöckner, P., Wehrhahn, M., Hofmann, T., Reemtsma, T. (2018). Tire wear particles in the aquatic environment—a review on generation, analysis, occurrence, fate and effects, *Water Research*, **139**, 83–100.
- Ziajahromi, S., Drapper, D., Hornbuckle, A., Rintoul, L., Leusch, F.D. (2020). Microplastic pollution in a stormwater floating treatment wetland: detection of tyre particles in sediment, *Science of the total environment*, **713**, 136356.

도로에서 해양 환경까지 이동하는 타이어 마모입자의 농도를 예측하기 위한 실험적 연구

본 연구에서는 노면에서 생성된 타이어 마모입자가 강우 강도에 따라 환경 구획별로 이동하는 양을 예측하고자, 도로 노면에서 타이어 마모입자의 샘플 포집과 정량화 분석 연구를 수행했다. 샘플 포집은 3일 평균 강우(0-60 mm/day) 발생 후 도로 노면이 완전히 건조된 2일 후, 도로 노면에 남아있는 타이어 마모입자의 샘플을 포집했다. 포집된 샘플은 크기와 밀도 분리를 통해 타이어 마모입자만을 분리했고, 강우가 없는 날(0 mm/day)의 타이어 마모입자 60.2 g 값을 기준으로 강우 이후 노면에 남아있는 타이어 마모입자의 함량의 차이를 산출하면, 강우 강도에 따라 0-49.4 g의 타이어 마모입자가 환경 구획으로 이동할 수 있는 것으로 확인했다. 또한, 강우 강도가 60 mm/day 일 때 5 mm/day와 비교해 타이어 마모입자의 환경 구획별 이동하는 양이 3.75배 높음을 확인했고, 선행 연구 결과를 활용하여 연간 국내 도로 환경에서 강우에 의해 환경 구획으로 이동 가능한 타이어 마모입자의 총량은 9,592 ton이며, 이 중 288 ton이 해양 미세플라스틱으로 영향을 줄 수 있다는 연구 결과를 도출했다. 단, 본 연구는 한정적 공간과 예측된 결과란 한계가 있으나, 타이어 마모입자의 저감을 위해서 국내 도로 환경과 하수 처리시스템 개선의 필요성을 언급하고자 한다. 향후 본 연구 결과의 검증을 위해 실제 환경 구획에서 샘플 포집과 타이어 마모입자의 농도 분석 연구를 수행할 계획이다.