



A Variety of Particles Including Tire Wear Particles Produced on the Road

Ui Yeong Jung and Sung-Seen Choi[†]

Department of Chemistry, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05006, Republic of Korea

(Received April 22, 2021, 1st Revised May 4, 2021, 2nd Revised June 9, 2021, Accepted June 15, 2021)

Abstract: In this study, different types and shapes of various particles produced on the asphalt pavement road were analyzed. Road dust at a bus stop was collected and was separated as per their sizes by using a sieve shaker. Tire-road wear particles (TRWPs), asphalt pavement wear particles (APWPs), mineral particles, plant-related particles, glass beads, glass particles, road paint wear particles, plastic particles, and fibers were observed herein. The types and shapes of the particles varied depending on their sizes. TRWPs larger than 500 μm were not observed. TRWPs with a size of 212–500 μm were rarely present, but many TRWPs with a size smaller than 212 μm were observed. APWPs were observed for whole-particle sizes of below 1,000 μm . A variety of particles on the road would lead to lower friction between the tires and the road, thereby increasing the braking distance of vehicles. Most of the particles include mineral particles, glass particles, and APWPs with rough surfaces. Therefore, the abrasion of the tire tread would accelerate owing to friction with the tough particles.

Keywords: wear particles, road dust, tire-road wear particles, asphalt pavement wear particles, abrasion

Introduction

미세 플라스틱(micro plastic)은 일반적으로 크기 1–5,000 μm 이고 물에 불용성인 고체 입자 형태이며 여기에는 고무 입자도 포함된다.¹ 타이어와 도로 사이의 마찰에 의해 발생한 타이어 마모입자(타이어-도로 마모입자, tire-road wear particles, TRWPs)도 미세 플라스틱의 주성분 중 하나로 분류된다.^{2,3} 타이어 트레드의 마모는 도로 상태와 주행 조건 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 도로면이 거칠거나 도로 위에 거친 입자가 존재하면 타이어 트레드의 마모가 촉진되고 급발진과 급제동이 빈번할수록 마모율이 증가한다.⁴ 또한 굴곡이 심하거나 경사가 있는 도로에서 마모가 더욱 많이 발생한다.⁵ Gunawardana 등은 도로먼지 성분을 연구하였으며, 석영과 백운석 등의 무기물 입자가 60%, 브레이크와 타이어 마모입자, 아스팔트 마모, 연소 배출에 의한 오염 물질이 30%, 식물과 관련한 유기물이 2% 정도 존재한다고 보고하였다.⁶

도로 위 각종 입자는 타이어와 도로 간 마찰력을 감소시켜 자동차의 제동 거리를 길게 한다.⁴ 이는 곧 차량 주행 시 안전상의 문제로 작용할 수 있다. 또한 이들 입자는 타이어 트레드와 직접적으로 마찰하므로 타이어의 마모를 가속시켜 타이어 수명이 단축되며 타이어 마모입자의 생성을 촉진시킨다.⁷ 이러한 각종 입자들은 잘게 부셔져 미세입자화 되어 공기 중 미세먼지로서 대기오염원이 되거나 하수구 등으로 흘러

러 하천 및 해수 오염의 원인이 된다.⁸ 특히 TRWPs에는 자동차 배기 가스가 흡착되어 다환방향족탄화수소류(PAHs)가 포함되거나 외부 유입에 의해 중금속 성분이 포함될 수 있으며, 미세한 TRWPs가 호흡기를 통해 체내로 직접 유입되면 건강을 해칠 수 있다.^{9,10} 또한 TRWPs가 수생 환경에 유입되면 수생 생물의 생존과 번식에 교란을 일으키고 그것을 섭취함으로써 인간의 체내에도 축적될 수 있다.⁹

환경 오염 문제에 대한 인식이 커지면서 도로에서 발생하는 다양한 마모입자와 관련된 연구들이 진행되고 있으나, 실제 도로에 존재하는 마모입자 종류에 대한 상세한 연구는 아직 부족한 상황이다. 도로에서 발생한 각종 입자의 종류와 형상을 분석하는 것은 실제 도로에서 타이어 트레드가 마모되는 과정과 그 영향 인자를 규명하는데 도움이 될 것이다. 본 연구에서는 버스 정류장에서 입자(먼지)를 채취하여 크기 별로 분류하여 그 종류와 형상을 분석하였으며, 그 발생원을 조사하였다.

Experimental

도로에서 발생한 마모입자의 종류와 형상을 분석하기 위해 세종대학교 정문 버스 정류장(Figure 1, 37°32'58.9"N 127°04'31.8"E)의 경계석에 모인 도로먼지를 솔과 빗자루를 이용하여 채취하였다. 체 진동기(sieve shaker, Octagon 200, Endecotts Co., UK)를 이용하여 채취한 도로먼지를 크기 별로

[†]Corresponding author E-mail: sschoi@sejong.ac.kr

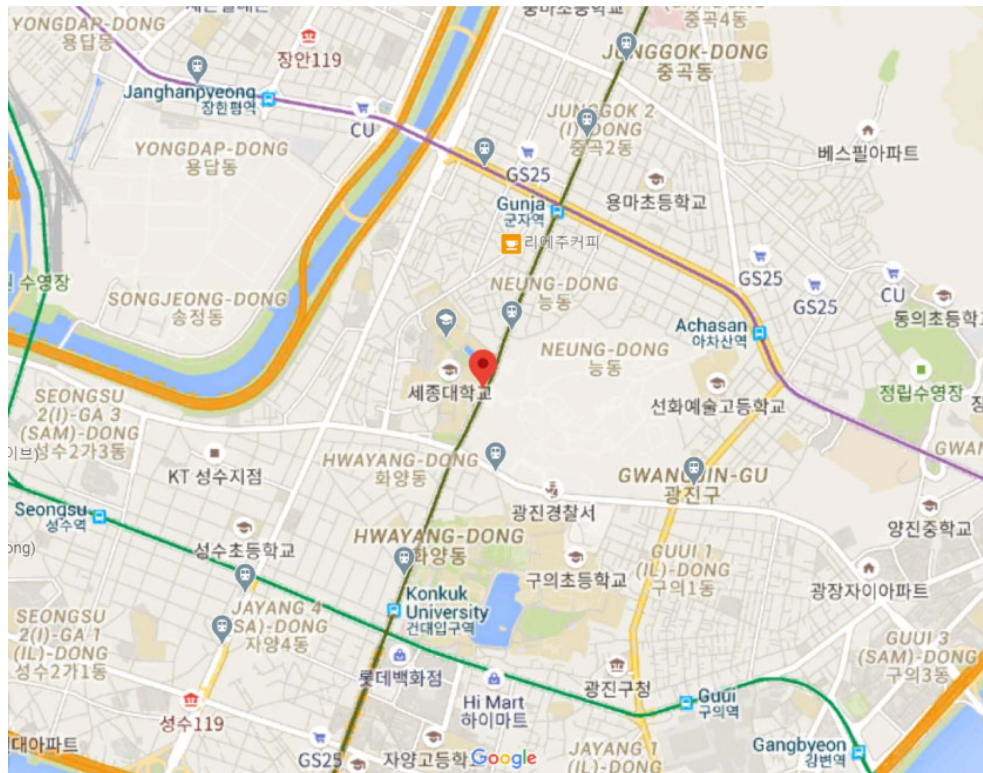


Figure 1. Map of the sampling site.

분류하였다. 사용한 체(sieve)는 1,000, 500, 212, 106, 63, 38, 20 μm 이었다. 영상 분석기(image analyzer, EGVM 35B, EG Tech., Republic of Korea)를 이용하여 입자의 형상을 관찰하고 핀셋을 사용하여 종류별로 분류하였다. 이때 각 입자 크기 범위 당 10-20 mg 정도를 분취하여 분석하였다.

불투명하고 아주 단단한 입자들은 무기물 입자(돌가루)로 분류하였고, 투명하고 단단한 입자들은 유리로 분류하였다. 유리 중 구 형태인 것들은 유리구슬(유리알)로 따로 분류하였고, 나머지는 유리 조각으로 분류하였다. 차선 도색에 사용하는 도료가 마모되어 생성된 입자들은 무기물 입자와 유사해 보이지만 누르면 잘 뭉개져 형태가 변하고 흰색 또는 노란색을 띠고 있어서 무기물 입자와 확연히 구별되었다. TRWPs는 아스팔트 도로 마모입자(asphalt pavement wear particles, APWPs)와 유사하게 검은색을 띠지만 고무의 탄성을 지니기 때문에 눌러도 뭉개지지 않는 차이점이 있다. 이와 달리 APWPs는 도로 차선용 도로 마모입자와 같이 입자가 쉽게 뭉개진다. APWPs에 압력을 가하면 뭉개지거나 부식지는 이유는 아스팔트 도로에 포함된 역청(bitumen) 때문이다. 따라서 검은색 입자 중 탄성을 가진 것은 TRWP로 분류하고, 탄성이 없고 뭉개지는 것은 APWPs로 분류하였다. 이외에도 나무 조각이나 나뭇잎 줄기가 보이는 것은 식물 관련 입자들로 분류하였으며, 색을 띠고 비교적 단단하며 납작한 것은 플라스틱 조각으로, 얇고 길면서 울이 풀린 형상을 보이는 것은 섬유로

분류하였다.

Results and Discussion

Figure 2는 채취한 도로먼지 중 가장 큰 입자인 1,000 μm 이상의 것으로 무기물 입자(mineral particles), 재귀반사용 유리알(glass beads), 그리고 나무 조각 등 식물과 관련된 입자(plant-related particles)만 주로 검출되었다. 유리알은 야간 주행 시 빛을 재귀반사하여 운전자의 시야 확보를 돕는 용도로 사용하며 도로 표지 도료에 포함된 것으로 차선이 마모되어 발생한 것이다.^{11,12} 도로공사 규격에 의하면, 도로 표지 도료용 유리알은 가호(106-850 μm), 나호(600 μm 이하), 다호(600-1,700 μm) 등 3가지가 사용되고 있다. 1,000 μm 이상의 유리알은 '다호'를 사용한 것을 의미한다. 무기물 입자는 날카로운 외관을 가지고 있어서 타이어 트레드와 접촉하여 마찰을 일으키면 타이어 마모를 가속시키는 역할을 할 것으로 예상된다.

Figure 3은 500-1,000 μm 범위의 입자로 1,000 μm 이상의 입자에서 관찰된 무기물 입자, 재귀반사용 유리알, 나무 조각 이외에 APWPs가 검출되었다. 1,000 μm 이상의 무기물 입자와 마찬가지로 500-1,000 μm 범위의 무기물 입자도 날카로운 외관을 가지고 있어서 타이어 마모를 가속시키는 역할을 할 것으로 예상된다. 500-1,000 μm 범위의 재귀반사용 유리알은

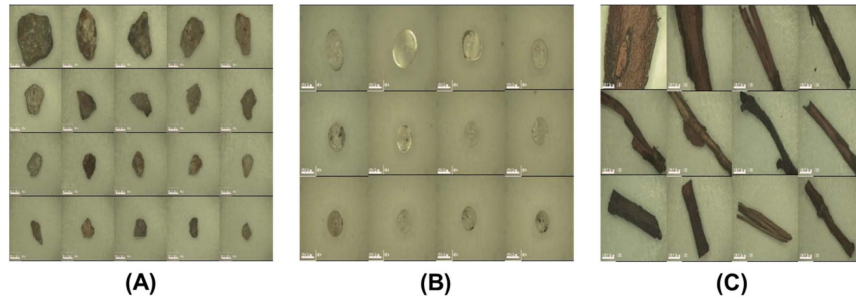


Figure 2. Magnified photos of the particles larger than 1,000 μm . (A) Mineral particles, (B) glass beads, and (C) plant-related particles.

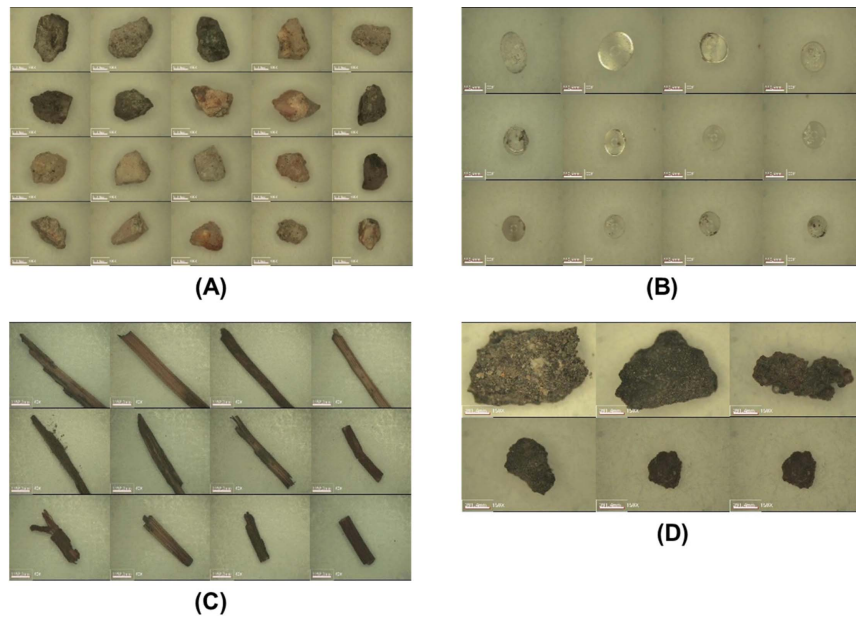


Figure 3. Magnified photos of the particles of 500-1,000 μm . (A) Mineral particles, (B) glass beads, (C) plant-related particles, and (D) asphalt pavement wear particles.

주로 600 μm 전후의 크기로 도로 표지 도료용 유리알 중 주로 ‘가호’에 해당하며 ‘다호’도 포함될 수 있다. 500-1,000 μm 범위의 APWPs는 대부분 약간 넓적한 형태를 보이며 표면이

거칠어 타이어 마모를 촉진시킬 가능성이 있을 것으로 예상된다.

Figure 4는 212-500 μm 범위의 입자로 500 μm 이상의 입

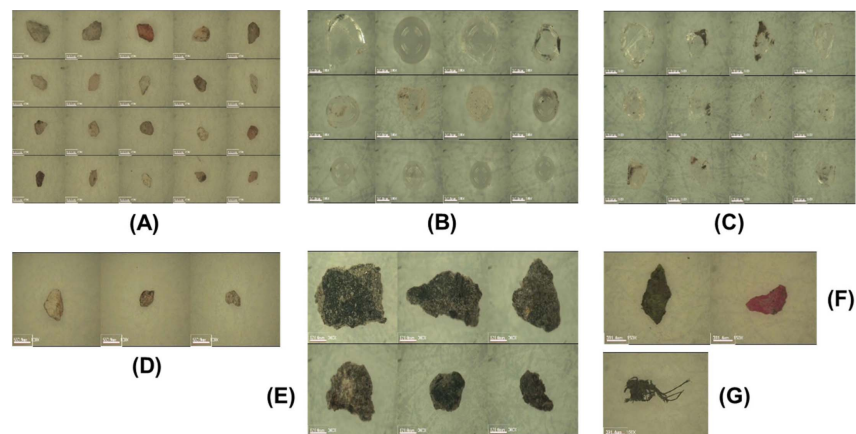


Figure 4. Magnified photos of the particles of 212-500 μm . (A) Mineral particles, (B) glass beads, (C) glass particles, (D) road paint wear particles, (E) asphalt pavement wear particles, (F) plastic particles, and (G) fibers.

자보다 더 다양한 입자가 검출되었다. 500 μm 이상의 입자에서 관찰된 무기물 입자, 재귀반사용 유리알, APWPs 이외에 도로 차선 도색에 사용하는 도료에서 발생한 마모입자(road paint wear particles), 플라스틱 조각(plastic particles), 그리고 섬유(fibers)가 추가로 검출되었으나 나무 조각은 검출되지 않았다. 212-500 μm 범위의 무기물 입자와 APWPs도 날카로운 외관을 가지고 있어서 타이어 마모를 가속시키는 역할을 할 것으로 예상된다. 212-500 μm 범위의 재귀반사용 유리알은 도로 표지 도료용 유리알 중 ‘가호’와 ‘나호’에 해당한다. 재귀반사용 유리알은 표면이 비교적 완전한 원형이나, 표면이 거친 유리 조각이 212-500 μm 범위의 입자에서 검출되었다. 표면이 거친 유리 조각도 타이어 마모를 가속시키는 역할을 할 것으로 예상된다. 유색인 플라스틱 조각과 뭉쳐진 섬유도 검

출되었다.

212-500 μm 범위의 입자에서는 500 μm 이상의 입자에서 검출되지 않았던 타이어 마모입자가 검출되었다 (Figure 5). 도로에서 발생한 타이어 마모입자는 단순히 타이어 트레드 마모입자가 아니라 도로 마모입자와 기타 무기물 입자가 함께 뭉쳐진 타이어-도로 마모입자(tire-road wear particles, TRWPs) 형태를 가진다. 일반적으로 TRWPs는 표면에 무기물 입자가 붙은 검은색의 길쭉한 모양의 입자로 정의하지만 그 크기와 모양, 무기물 입자의 함량은 마모 조건(주행 패턴, 도로 상태, 기상 조건 등)에 따라 달라질 수 있다.¹³ TRWPs는 APWPs와 유사하게 검은색을 띠지만 타이어 트레드 고무의 탄성을 지니기 때문에 눌러도 뭉개지지 않는 차이점이 있다. 212-500 μm 범위의 TRWPs는 대부분 종횡비(aspect ratio)가 매우 큰 입자

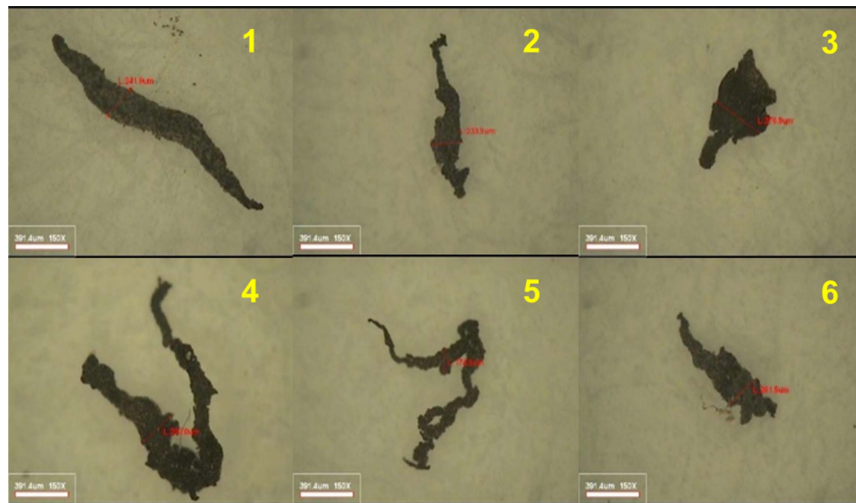


Figure 5. Magnified photos of TRWPs of 212-500 μm .

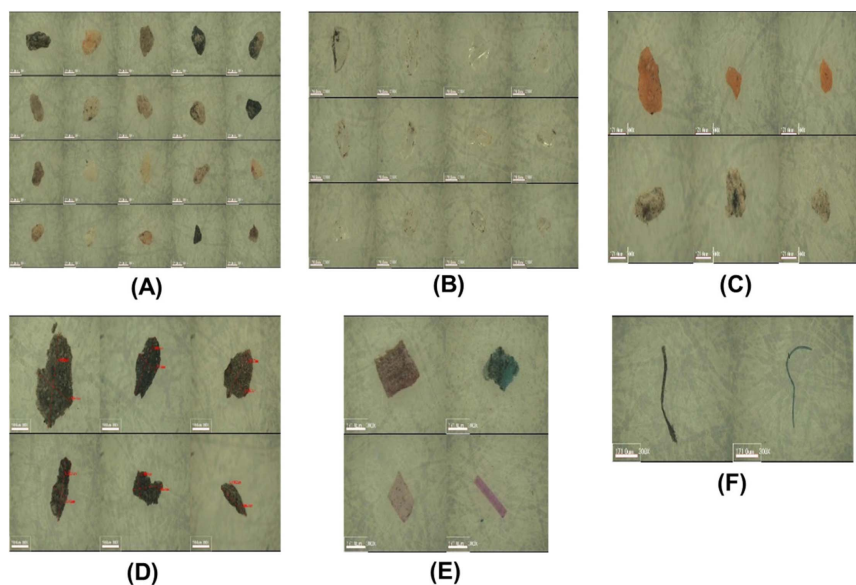


Figure 6. Magnified photos of the particles of 106-212 μm . (A) Mineral particles, (B) glass particles, (C) road paint wear particles, (D) asphalt wear particles, (E) plastic particles, and (F) fibers.

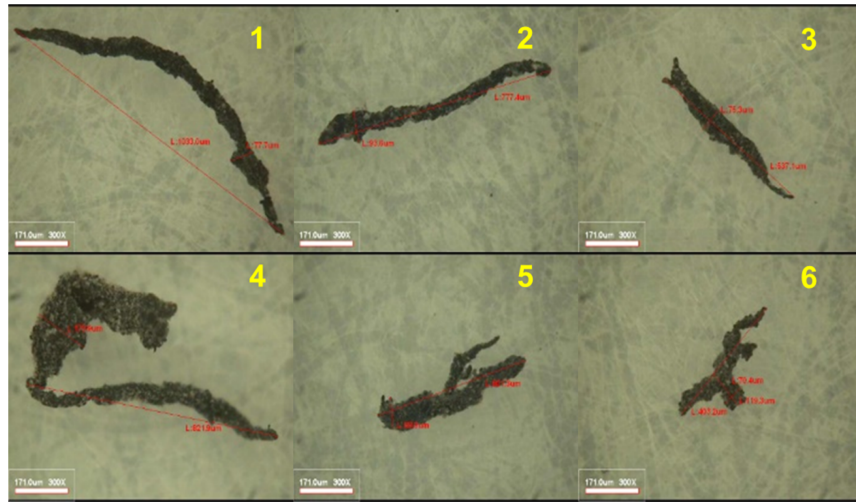


Figure 7. Magnified photos of TRWPs of 106-212 μm .

였으며 다양한 형상을 볼 수 있었다. 가지가 없고 꺾이지 않은 길쭉한 형태의 선형(linear)이 주로 검출되었으며, 꺾이거나 굴곡진 굴곡형(curved)도 관찰되었으나, 선형에 가지가 달린 가지형(branched)은 관찰되지 않았다. 굴곡형은 매우 큰 중횡비를 가진 입자로 마모 과정 중 접혀서 형성된 것으로 여겨진다. Figure 5의 3번 TRWP는 APWP와 유사하게 넓적한 모양이었다.

Figure 6은 106-212 μm 범위의 입자로 다양한 입자가 관찰되었다. 212-500 μm 의 입자에서 관찰된 재귀반사용 유리알과 500 μm 이상의 입자에서 관찰된 나무 조각은 검출되지 않았다. 도로 차선 도색에 사용하는 도료의 황색 도료와 백색 도료 마모입자가 모두 검출되었다. 106-212 μm 범위의 입자에서 검출된 무기물 입자와 유리조각 그리고 APWPs도 모두 날

카로운 모양이어서 타이어 마모를 가속시키는 역할을 할 것으로 예상된다. 106-212 μm 범위의 입자에서는 TRWPs가 다수 검출되었다. Figure 7에 TRWPs만 별도 정리하였다. 선형 TRWPs가 주종이며 가지형과 굴곡형도 검출되었다.

Figure 8은 63-106 μm 범위의 입자에서도 212-500 μm 의 입자와 마찬가지로 재귀반사용 유리알과 나무 조각은 검출되지 않았다. 도로 차선 도색에 사용하는 황색 도료와 백색 도료 마모입자가 모두 검출되었고, 다양한 형태의 플라스틱 조각도 검출되었으며 섬유는 뭉쳐진 것이 아니라 한 가닥으로 검출되었다. 63-106 μm 범위의 입자에서도 TRWPs가 다수 검출되었다(Figure 9). 입자 크기가 작아질수록 TRWPs의 검출 빈도는 높아지는 경향을 보였다.

TRWPs의 형상을 기본적으로 선형(linear), 가지형(branched),

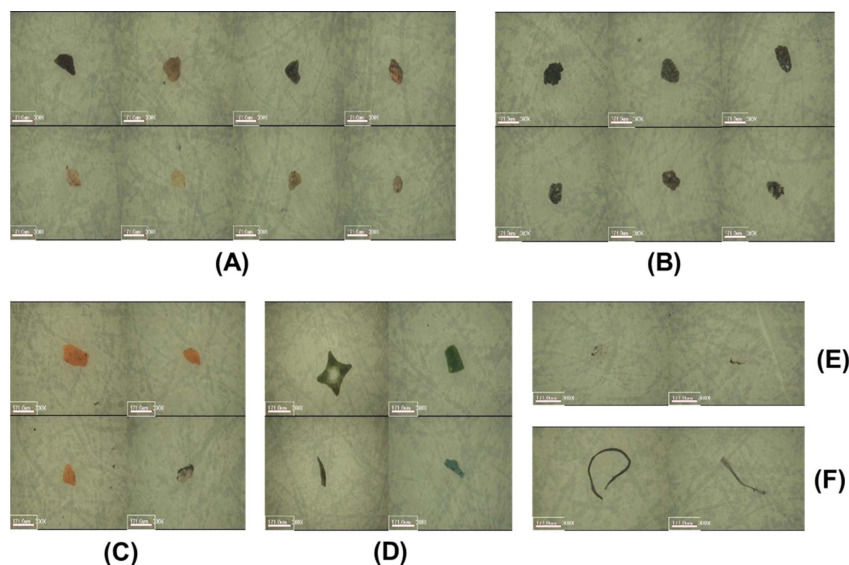


Figure 8. Magnified photos of the particles of 63-106 μm . (A) Mineral particles, (B) asphalt wear particles, (C) road paint wear particles, (D) plastic particles, (E) glass particles, and (F) fibers.



Figure 9. Magnified photos of TRWPs of 63-106 μm .

Table 1. Shapes of TRWPs According to the Size

Sample No.	Sample size (μm)		
	212-500	106-212	63-106
1	Linear	Linear	Linear
2	Linear	Linear	Linear
3	Others	Linear	Linear
4	Curved	Curved	Branched
5	Curved	Branched	Curved
6	Linear	Branched	Others

굴곡형(curved) 그리고 여기에 속하지 않은 기타(others) 등 4 가지로 분류하여 입자 크기 별 TRWP의 형상을 Table 1에 정리하였다. TRWP가 상대적으로 큰 경우(212-500 μm)에는 선형과 굴곡형은 있으나 가지형은 거의 검출되지 않았다. TRWP 크기가 106-212 μm 와 63-106 μm 인 경우에는 선형이 가장 많이 관찰되었다. 이는 타이어 마모입자의 형상은 그 크기에 따라 어느 정도 달라진다는 것을 의미한다.

도로에서 발생한 각종 입자의 발생 빈도를 입자 크기 별로 정리하여 Table 2에 요약하였다. 무기물 입자는 모든 크기의 입자에서 가장 많이 검출되었으나 나무 조각 등 식물과 관련

된 입자는 500 μm 이상의 큰 입자로만 검출되었으며 발생 빈도가 높은 편이었다. 재귀반사용 유리알은 212 μm 이상의 크기에서 검출되었고 발생 빈도가 높은 편이었으며, 특히 500-1,000 μm 크기에서 유리알의 발생 빈도는 매우 높았다. 미세 유리 조각은 재귀반사용 유리알보다 작은 크기인 500 μm 이하의 것에서 검출되었고 발생 빈도가 높은 편이었으며, 특히 106-500 μm 크기에서 발생 빈도가 매우 높았다. 도로 차선 도색에 사용하는 도료에서 발생한 마모입자도 유리 조각과 유사한 크기로 검출되었으나 유리 조각보다는 발생 빈도가 낮은 것으로 나타났다. 섬유와 플라스틱 조각은 500 μm 이하의 것으로 검출되었고 발생 빈도는 매우 낮은 편이었다. 도로에서 발생하는 마모입자 중 중요한 것은 TRWPs와 APWPs이다. TRWPs는 500 μm 이하의 크기에서 검출되었으며, 212-500 μm 의 크기는 드물게 발견되었으나 212 μm 이하에서는 다수 검출되었다. APWPs는 1,000 μm 이하의 크기에서 고르게 검출되었다.

도로에서 발생한 각종 입자의 예상 출처를 Table 3에 정리하였다. 무기물 입자는 도로의 마모나 흙 등의 외부 유입에 의해 발생한 것으로 판단된다. 도로 차선 도색용 도료 마모입자와 재귀반사용 유리알은 차선의 마모에 의해 발생한 것이고,

Table 2. Relative Occurrence Rates of the Particles According to the Size

Size range (μm)	Mineral particles	Glass particles	Road paint wear particles	Glass beads	Asphalt pavement wear particles	Tire-road wear particles	Fibers	Plant-related particles	Plastic particles
$\geq 1,000$	●			◎				●	
500-1,000	●			●	◎			◎	
212-500	●	●	◎	◎	◎	○	○		○
106-212	●	●	◎		◎	●	○		○
63-106	●	◎	◎		◎	●	○		○

● : Many, ◎ : Moderate, ○ : Few

Table 3. Possible Sources of the Particles

Particle type	Source of particles
Mineral particles	Wear of road and external inflow
Road paint wear particles	Wear of road paint
Glass beads	Wear of road paint
Glass particles	Wear of glass beads and external inflow
Asphalt pavement wear particles	Wear of asphalt pavement
Tire-road wear particles	Wear of tire tread
Fibers	External inflow
Plant-related particles	External inflow
Plastic particles	External inflow

유리 조각은 재귀반사용 유리알이 부서졌거나 외부에서 유입된 것으로 예상할 수 있다. APWPs와 TRWPs는 아스팔트 도로와 타이어 간의 마찰에 의해 발생한 것이다. 섬유와 식물과 관련된 입자 그리고 플라스틱 조각은 모두 외부에서 유입되었을 것으로 예상된다.

Conclusions

재귀반사용 유리알과 나무 조각은 500 μm 이상의 큰 입자에서만 검출되었다. 무기물 입자는 모든 크기의 입자에서 가장 많이 검출되었으며 표면이 거칠었다. 재귀반사용 유리알은 212 μm 이상의 크기에서 검출되었고 발생 빈도가 비교적 높은 편이었으며, 미세 유리 조각은 재귀반사용 유리알보다 작은 크기인 500 μm 이하의 것으로 검출되었고 106-500 μm 크기에서 발생 빈도가 매우 높았다. 도로 차선 도색 마모입자도 유리 조각과 유사한 크기로 검출되었으나 유리 조각보다는 발생 빈도가 낮았으며, 플라스틱 조각과 섬유는 500 μm 이하의 것으로 검출되었으나 발생 빈도는 매우 낮은 편이었다. TRWPs는 500 μm 이하의 크기에서 검출되었으며, 212-500 μm 의 크기는 드물게 발견되었으나 212 μm 이하에서는 다수 검출되었다. APWPs는 1,000 μm 이하의 크기에서 고르게 검출되었다. TRWP가 상대적으로 큰 경우(212-500 μm)에는 선형과 굴곡형은 있으나 가지형은 거의 검출되지 않았다. TRWP 크기가 106-212 μm 와 63-106 μm 인 경우에는 선형이 가장 많이 관찰되었다. 도로에서 발생하는 각종 입자는 타이어의 제동 거리를 길게 할 것으로 판단된다. 표면이 거친 무기물 입자, 유리 조각, APWPs는 타이어와의 마찰에 의해 타이어 트레드의 마모를 촉진시킬 것으로 여겨진다.

Acknowledgements

이 연구는 2020년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(과제번호 20010851).

References

1. I. Jarlskog, A. M. Stromvall, K. Magnusson, H. Galfi, K. Bjorklund, M. Polukarova, R. Garcao, A. Markiewicz, M. Aronsson, M. Gustafsson, M. Norin, L. Blom, and Y. A. Skold, "Traffic-related microplastic particles, metals, and organic pollutants in an urban area under reconstruction", *Sci. Total Environ.*, **774**, 145503 (2021).
2. I. Jarlskog, A. M. Stromvall, K. Magnusson, M. Gustafsson, M. Polukarova, H. Galfi, M. Aronsson, and Y. A. Skold, "Occurrence of tire and bitumen wear microplastics on urban streets and in sweepsand and washwater", *Sci. Total Environ.*, **729**, 138950 (2020).
3. M. L. Kreider, J. M. Panko, B. L. McAtee, L. I. Sweet, and B. L. Finley, "Physical and chemical characterization of tire-related particles: Comparison of particles generated using different methodologies", *Sci. Total Environ.*, **408**, 652 (2010).
4. 송영기, "타이어 이상 마모와 그 원인", 대한타이어공업협회, **154**, 46 (1991).
5. I. Park, H. Kim, and S. Lee, "Characteristics of tire wear particles generated in a laboratory simulation of tire/road contact conditions", *J. Aerosol Sci.*, **124**, 30 (2018).
6. C. Gunawardana, A. Goonetilleke, P. Egodawatta, L. Dawes, and S. Kokot, "Source characterization of road dust based on chemical and mineralogical composition", *Chemosphere*, **87**, 163 (2012).
7. M. Kovochich, M. Liong, J. A. Parker, S. C. Oh, J. P. Lee, L. Xi, M. L. Kreider, and K. M. Unice, "Chemical mapping of tire and road wear particles for single particle analysis", *Sci. Total Environ.*, **757**, 144085 (2021).
8. P. J. Kole, A. J. Lohr, F. G. A. J. V. Belleghem, and A. M. J. Ragas, "Wear and tear of tyres: A stealthy source of microplastics in the environment", *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **14**, 1265 (2017).
9. A. Wik and G. Dave, "Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment", *Environ. Pollut.*, **157**, 1 (2009).
10. F. Amato, F. R. Cassee, H. D. V. D. Gon, R. Gehrig, M. Gustafsson, W. Hafner, R. M. Harrison, M. Jozwicka, F. J. Kelly, T. Moreno, A. S. H. Prevot, M. Schaap, J. Sunyer, and X. Querol, "Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions", *J. Hazard. Mater.*, **275**, 31 (2014).
11. T. Grosge, "Retro-reflection of glass beads for traffic road stripe paints", *Opt. Mater.*, **30**, 1549 (2008).
12. 도로교통공단 교통과학연구원, "노면표시 반사성능 기준에 관한 연구", 2012.
13. B. B. Baltruschat, B. Kocher, F. Stock, and G. Reifferscheid, "Tyre and road wear particles (TRWP) - A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment", *Sci. Total Environ.*, **733**, 137823 (2020).