



Characteristics in Densities and Shapes of Various Particles Produced by Friction between Tire Tread and Road Surface

Uiyeong Jung and Sung-Seen Choi[†]

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

Received September 6, 2022, 1st Revised September 20, 2022, 2nd Revised September 21, 2022, Accepted September 23, 2022)

Abstract: A large amount of particles on the roads is produced by friction between the vehicles and the road surface and by inflow from outside. The type of these particles affects the abrasion behavior of tire tread. In this study, road dust collected at a bus stop was separated by size, and the particles with sizes of 106-212 μm were analyzed. The particles were separated by density using NaI and NaBr aqueous solutions with densities in the range of 1.10-1.80 g/cm^3 with the 0.10 g/cm^3 interval. In the road dust sample, the following particle types were found: tire-road wear particles (TRWPs), asphalt pavement wear particles (APWPs), plant-related particles (PRPs), road paint wear particles (RPWPs), and plastic particles (PPs). The densities of TRWPs, APWPs, PRPs, and RPWPs were 1.20-1.80, >1.60, >1.10, and >1.40 g/cm^3 , respectively, while PPs were found in all density ranges. Additionally, many small mineral particles were observed on the particles. Order of the relative content of the particles was PRP > TRWP > APWP ~ RPWP > PP. APWPs that were stuck to TRWP could be removed by chloroform treatment. The shapes of the particles were characterized using their magnified images.

Keywords: road dust, wear particles, density separation, tire-road wear particles, asphalt pavement wear particles

Introduction

타이어-도로 마모입자(tire-road wear particle, TRWP), 브레이크 마모입자(break wear particle, BWP), 아스팔트 도로 마모입자(asphalt pavement wear particle, APWP), 무기물 입자(mineral particle, MP), 식물관련 마모입자(plant-related particle, PRP), 차선도색 마모입자(road paint wear particle, RPWP), 유리비즈(glass beads), 유리조각(glass particle), 플라스틱 입자(plastic particle, PP) 등 다양한 입자들이 도로에서 발견된다.¹⁻³ 차량 운행 중 타이어 트레드와 도로 표면과의 마찰에 의해 TRWP와 APWP 등이 생성되며, 외부에서 나무 관련 성분이나 플라스틱 조각 등이 유입될 수 있다(Figure 1). TRWP는 타이어 마모입자(tire wear particle, TWP)에 도로에서 발생한 무기물 입자 등이 붙어 있는 것을 말한다.³⁻⁷ 도로에서 발견되는 입자의 대부분은 무기물 입자이며, 입자의 종류와 함량은 채취 장소와 시기마다 다르다.

도로에서 발생하는 유기물 입자인 TRWP, RPWP, PP 등은 미세 플라스틱으로 분류된다. 도로 위의 각종 입자는 타이어 트레드 마모를 촉진시키며 제동 거리를 길게 하는 요소로 작용하므로 도로 위 입자의 종류와 함량은 중요한 의미를 갖는다. 또한, 도로 위 입자들은 하천으로 흘러 들어 하천과 해수의 오염원이 되거나, 차량 운행에 의해 잘게 부서져 공기 중

대기오염원이 될 수 있다.⁸⁻¹⁰ 도로에서 발생하는 입자들은 종류도 다양하지만 밀도도 다양하다. 입자들의 밀도가 낮을수록 배수구에서 하천으로 그리고 바다로의 이동이 빨리 이루어지고 침전속도는 느리다. 따라서 도로 발생 입자들의 밀도는 중요한 특성이며, 도로 발생 입자들의 분리에 밀도차를 이용하는 방법이 사용되고 있다.^{2,3,5,6}

도로먼지는 크기에 따라 성분과 함량이 다르게 나타난다. 200 μm 이하의 도로먼지에는 TRWP와 APWP가 상대적으로 많이 존재하며, 다른 종류의 입자들도 잘 발견되는 경향이 있다. 본 연구에서는 현미경을 사용하여 직접 입자를 골라낼 수 있는 정도의 크기인 106-212 μm 도로먼지를 분류하여 밀도에 따른 입자의 종류와 함량을 조사하였다. 적용한 밀도 범위는 1.10-1.80 g/cm^3 으로, 0.10 g/cm^3 단위로 세분하여 조사하였다. 입자들의 형태학적 특징을 확대 이미지를 통하여 분석하였다.

Experimental

도로먼지는 세종대학교 인근 버스 정류장(37°32'58.9"N 127°04'31.8"E)에서 2021년 1월에 채취하였다. 체 진동기(sieve shaker, Octagon 200, Endecotts Co., UK)를 이용하여 채취한 도로먼지를 크기 별로 분류하여 106-212 μm 범위의 것을 분석에 사용하였다. 시료 양은 10 mg이었다. Figure 2는 본

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

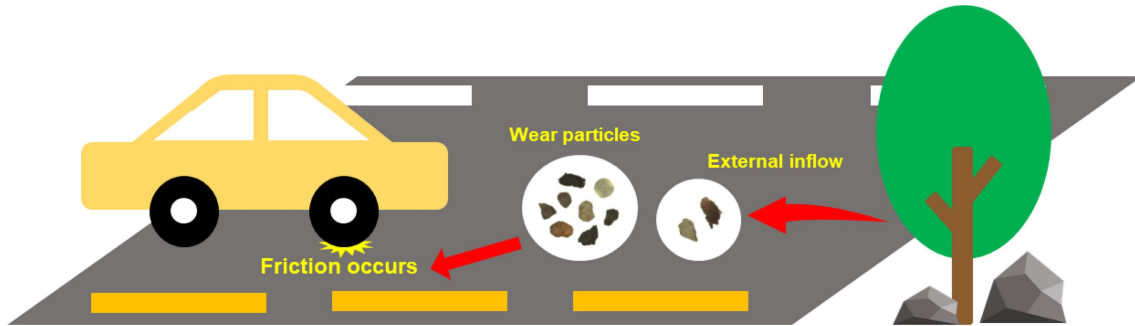


Figure 1. The wear particles generated by friction between tire tread and road.

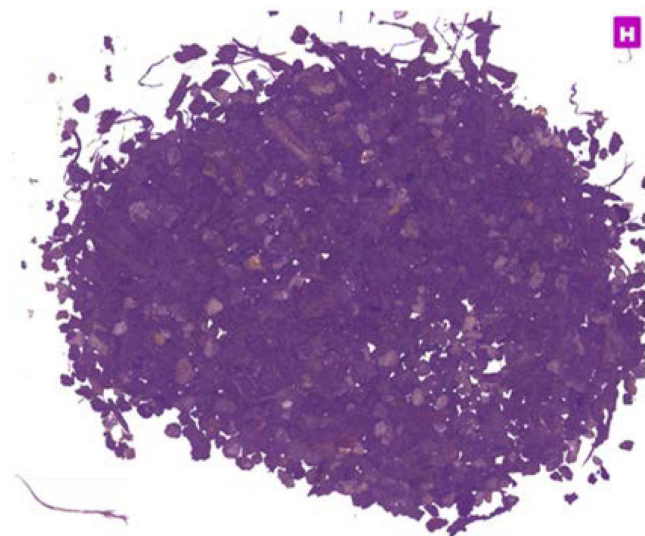


Figure 2. Magnified image of the road dust sample of 106-212 μm used in this study. The scale bar is 200 μm.

연구에서 사용한 106-212 μm 크기의 도로먼지 시료 10 mg에 대한 확대 사진이다.

밀도 분리에 사용한 용액은 1.10-1.80 g/cm³ 까지 0.1 g/cm³ 간격으로 총 8가지의 염 용액을 제조하였다(Table 1). 1.10-1.50 g/cm³ 밀도 수용액은 NaBr (Ducksan Co., Republic of Korea)을 사용하여 제조하였고, 1.60-1.80 g/cm³ 밀도 수용액

Table 1. Densities of the Aqueous Solutions Used in This Study

Salt	Density (g/cm ³)
Sodium bromide (NaBr)	1.10
	1.20
	1.30
	1.40
	1.50
Sodium iodide (NaI)	1.60
	1.70
	1.80

은 NaI (Ducksan Co., Republic of Korea)를 사용하였다. NaBr과 NaI의 밀도는 각각 3.21과 3.67 g/cm³이다. 지름 70 mm, 높이 40 mm의 비이커에 약 50 mL의 밀도 수용액을 넣고 밀도분리를 진행하였다.

Figure 3에 Table 1의 밀도 수용액을 사용하여 도로먼지에 있는 각종 입자들을 밀도별로 분리하는 과정을 묘사하였다. 밀도별 분리 과정은 다음과 같다. (1) 밀도 수용액이 담겨 있는 용기에 도로먼지 시료를 넣는다. (2) 입자들이 충분히 적셔지도록 동일한 밀도 수용액을 시료에 방울방울 가하고 30분 동안 방치한다. (3) 과정 (2)를 1회 반복한다. (4) 위에 떠 있는 입자들을 채취하여 증류수로 3회 세척하여 건조시킨다. (5) 가라앉은 입자들을 채취하여 증류수로 3회 세척하여 건조시킨다.

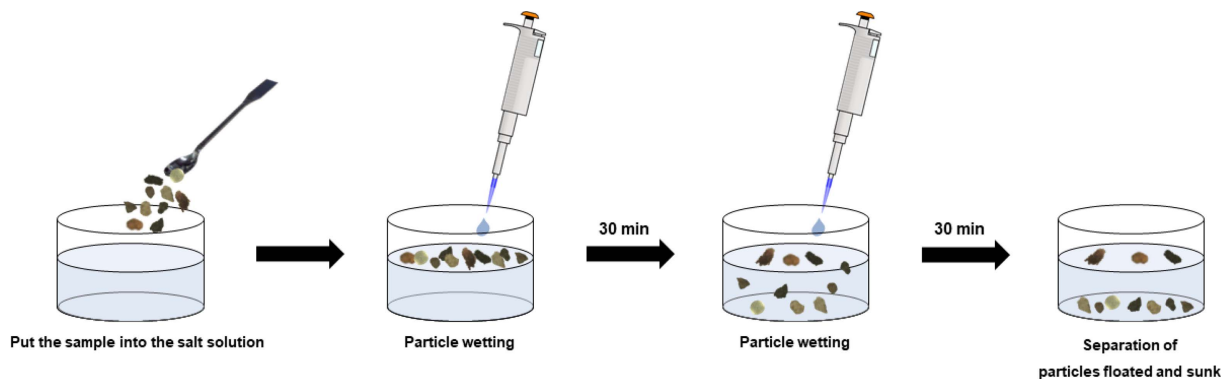


Figure 3. Density separation process of road dust.

밀도 수용액의 사용 순서는 가장 밀도가 높은 1.80 g/cm^3 의 수용액부터 시작하여 0.10 g/cm^3 씩 낮은 수용액을 순차적으로 사용하여 최종적으로 1.10 g/cm^3 의 수용액을 사용한다. 1.80 g/cm^3 의 수용액에서 가라앉은 입자들을 채취하여 증류수로 3회 세척하여 건조시키고, 위에 떠 있는 입자들은 채취하여 증류수로 세척 후 1.70 g/cm^3 의 수용액에 넣어 동일한 과정을 거친다. 최종적으로 1.10 g/cm^3 의 수용액에서 떠 있는 입자들은 채취하여 증류수로 세척하여 건조시키고, 가라앉은 입자들도 채취하여 증류수로 건조시킨다. 시료의 형상은 디지털 현미경(Leica DM4 M, Leica Microsystems, Germany)을 사용하여 관찰하였다.

입자의 종류는 현미경을 이용한 확대 영상을 보고 육안으로 분류하였다. 매우 단단하고 불투명한 입자는 MP로 분류하였고, 표면에 식물의 결이 보이고 나무 조각처럼 판판한 입자들은 PRP로 구분하였다. 도로의 차선 도색에는 흰색과 노란색이 사용되므로 흰색과 노란색을 띠고 핀셋으로 눌러 MP보다 무른 입자들은 RPWP로 분류하였다. PP는 비교적 단단하고 일부 색을 띠는 것이 있으며 일부는 표면이 늘어서 끊어진 것 같은 형상을 보였으므로 이를 충족하는 입자들은 PP로 분류하였다. APWP와 TRWP는 모두 검은색 입자이고 일부 형상이 유사한 것들이 있다. TRWP는 탄성이 있어서 핀셋으로 눌렀다 떼면 다시 원상 복귀하나, APWP는 탄성이 없으며 누르면 부스러지는 특성을 보였다. 이를 근거로 하여 TRWP를 APWP를 구분하였다.

Results and Discussion

채취한 도로먼지 중 $106\text{-}212 \mu\text{m}$ 크기의 입자들을 1.10 g/cm^3 부터 1.80 g/cm^3 까지 0.10 g/cm^3 간격으로 밀도별로 분리한 후, 입자 종류별로 분류하여 그 무게와 형태를 관찰하였다. Figure 4는 밀도 1.10 g/cm^3 미만에서 발견된 입자로 수많은 입자들 중 단 2개의 입자만이 발견되었다. 이들은 모두 플라스틱 입자(plastic particle, PP)로 표면에 묻은 무기물 입자도 매우 적었다. 이들 $200 \mu\text{m}$ 이하의 PP는 단순히 외부에서 유입된 것이 아니라 플라스틱 조각이 외부에서 도로로 유

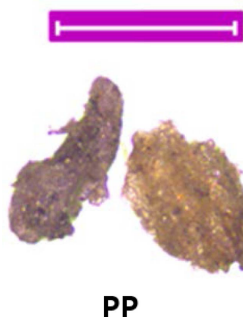


Figure 4. Magnified images of the particles separated by density ($< 1.10 \text{ g/cm}^3$). The scale bar is $200 \mu\text{m}$.

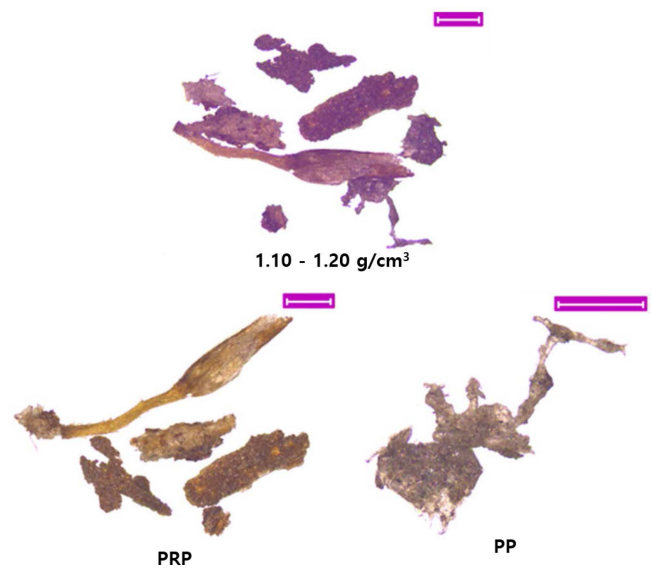


Figure 5. Magnified images of the particles separated by density ($1.10\text{-}1.20 \text{ g/cm}^3$). The scale bar is $200 \mu\text{m}$.

입되어 차량 통행에 의해 더 작은 조각으로 부서진 것으로 판단된다.

밀도 범위 $1.10\text{-}1.20 \text{ g/cm}^3$ 에서는 식물관련 마모입자(plant-related particle, PRP)와 PP만이 발견되었으며, 이들의 수도 매우 적었다(Figure 5). PRP의 형상은 다양했으며, 단순히 주변 나무에서 떨어진 조각이 아니라 차량 통행에 의해 작은 조각으로 부서진 것으로 여겨진다. 여기서 발견된 PP는 단 1개로 늘어지고 찢긴 형상을 나타내었다. 이러한 형상은 플라스틱 조각이 타이어 트레드와 도로 표면 사이에 놓여 이들의 반복적인 마찰에 늘어지고 찢겨 생긴 결과로 해석할 수 있다.

밀도 범위 $1.20\text{-}1.30 \text{ g/cm}^3$ 에서는 PRP와 PP 이외에 타이어 마모입자(tire wear particle, TWP)와 도로에서 발생한 무기물 등이 결합된 타이어-도로 마모입자(tire-road wear particles, TRWP)도 발견되었다(Figure 6). PRP보다 PP의 형상이 더 다양하게 나타났다. PRP는 종횡비(aspect ratio)가 2 이하였다. 이 밀도 범위의 TRWP는 종횡비가 비교적 작았고 표면에 묻은 무기물 입자도 많지 않았다.

Figure 6은 밀도 범위 $1.30\text{-}1.40 \text{ g/cm}^3$ 에서 발견된 입자들인데, 밀도 범위 $1.20\text{-}1.30 \text{ g/cm}^3$ 에서 발견된 입자 종류와 동일한 TRWP와 PRP 그리고 PP가 발견되었다. 밀도 범위 $1.20\text{-}1.30 \text{ g/cm}^3$ 의 TRWP보다 종횡비가 큰 것들이었으며 형상도 매우 다양하게 나타났다. 종횡비가 큰 TRWP는 차량의 타이어 트레드와 도로 표면과의 접촉 시간이 길 때 발생한 것으로 여겨진다. PRP와 PP도 다양한 형상으로 관찰되었다. 범용 플라스틱인 폴리에틸렌과 폴리프로필렌의 밀도는 1.0 g/cm^3 이하이다. 이들의 일반 제품에는 카본블랙이나 무기물 충전제 함량이 높지 않아 밀도 1.30 g/cm^3 이상의 PP가 발견된 것은 비교적 흥미로운 것이라 할 수 있다. 이는 PP 표면에 밀도

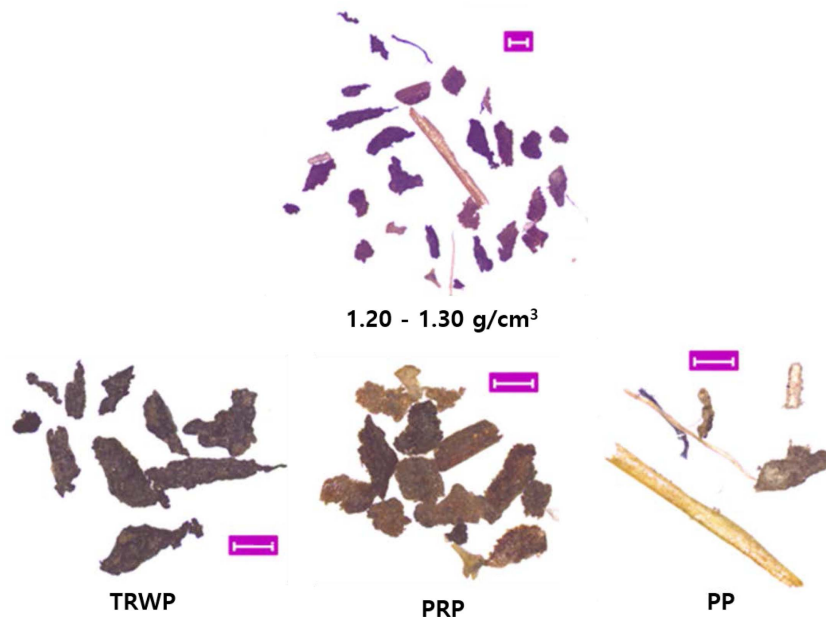


Figure 6. Magnified images of the particles separated by density (1.20-1.30 g/cm³). The scale bar is 200 μm.

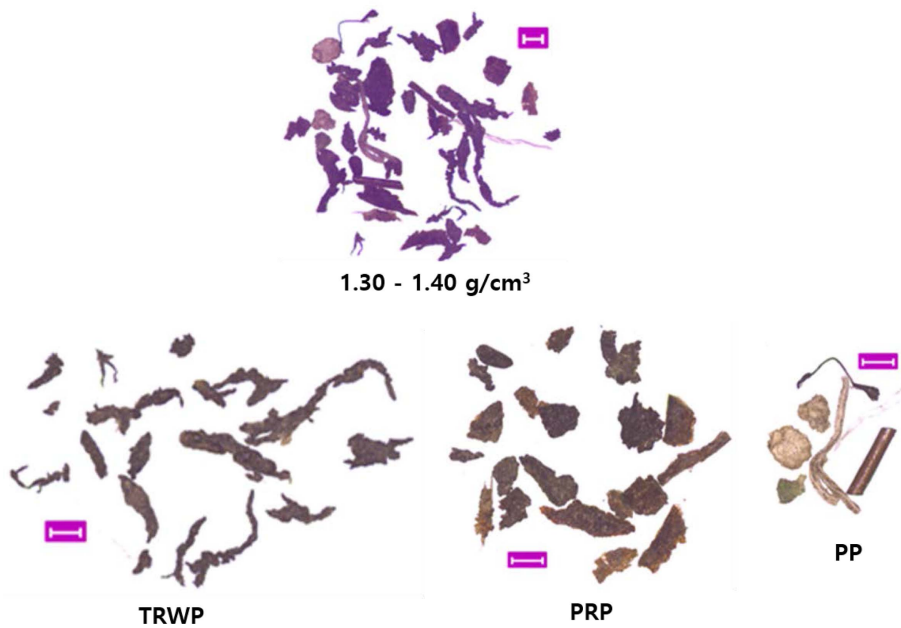


Figure 7. Magnified images of the particles separated by density (1.30-1.40 g/cm³). The scale bar is 200 μm.

가 높은 이물질인 무기물 입자 등이 부착된 것으로 해석할 수 있다.

밀도 범위 1.40-1.50 g/cm³에서는 TRWP, PRP, PP 이외에 차선도색 마모입자(road paint wear particle, RPWP)가 발견되었다(Figure 8). RPWP는 노란색과 흰색 등의 차선 부분과 타이어 트레드와의 마찰에 의해서 발생한 것이다. RPWP의 형상은 모난 작은 입자 형상으로 종횡비가 1.0에 가깝다. 종횡비와 형상이 다양한 TRWP를 확인할 수 있었으며, 다양한 형태의 PRP와 다양한 색의 PP가 발견되었다. RPWP는 4개, PRP

는 3개가 발견되었다.

Figure 9는 밀도 범위 1.50-1.60 g/cm³에서 발견된 입자들인데, 밀도 범위 1.40-1.50 g/cm³의 입자 종류와 동일한 TRWP, PP, RPWP, 그리고 PRP가 발견되었다. 종횡비가 매우 크고 갈라진 TRWP도 발견되었다. 노란색과 흰색의 RPWP가 5개 발견되었으며, 흰색 계통의 오염된 PP가 발견되었다. 이 밀도 범위에서 발견된 PRP의 색은 비교적 다양하였으며 종횡비는 대부분 1.0에 가까웠다.

밀도 범위 1.60-1.70 g/cm³에서는 TRWP, RPWP, PRP, PP 이

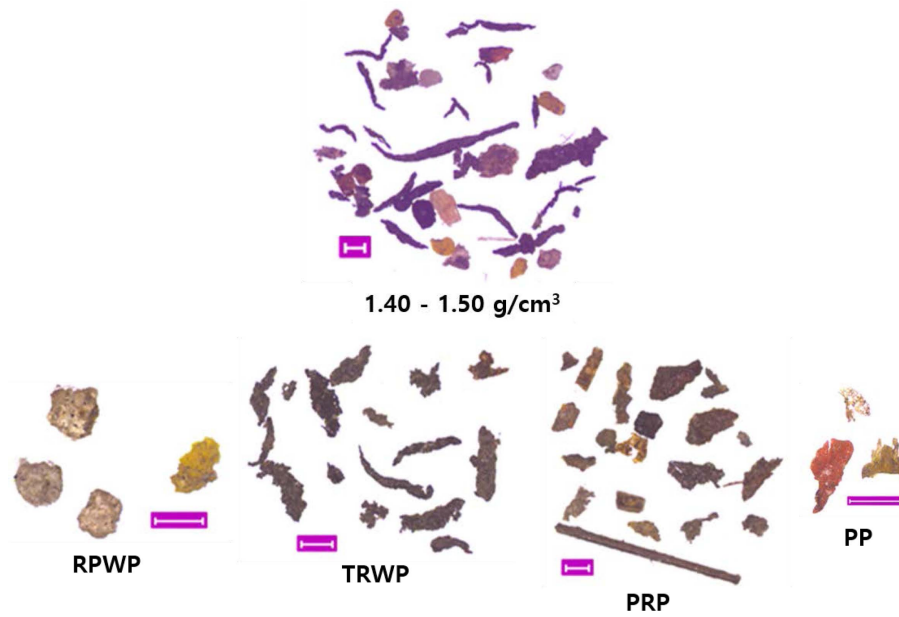


Figure 8. Magnified images of the particles separated by density (1.40-1.50 g/cm³). The scale bar is 200 μm.

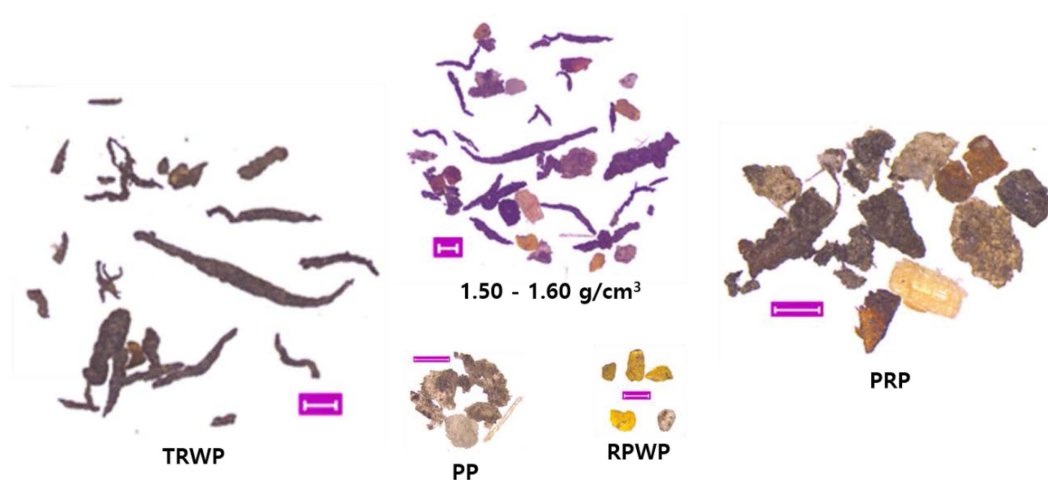


Figure 9. Magnified images of the particles separated by density (1.50-1.60 g/cm³). The scale bar is 200 μm.

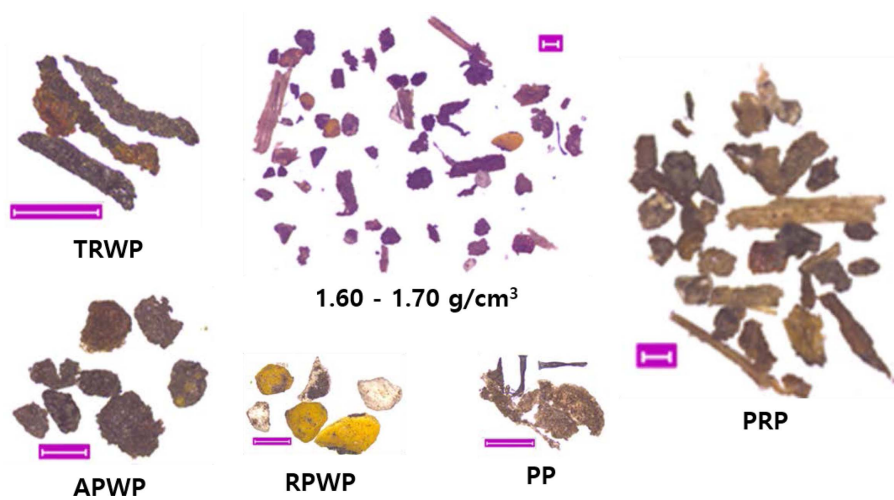


Figure 10. Magnified images of the particles separated by density (1.60-1.70 g/cm³). The scale bar is 200 μm.

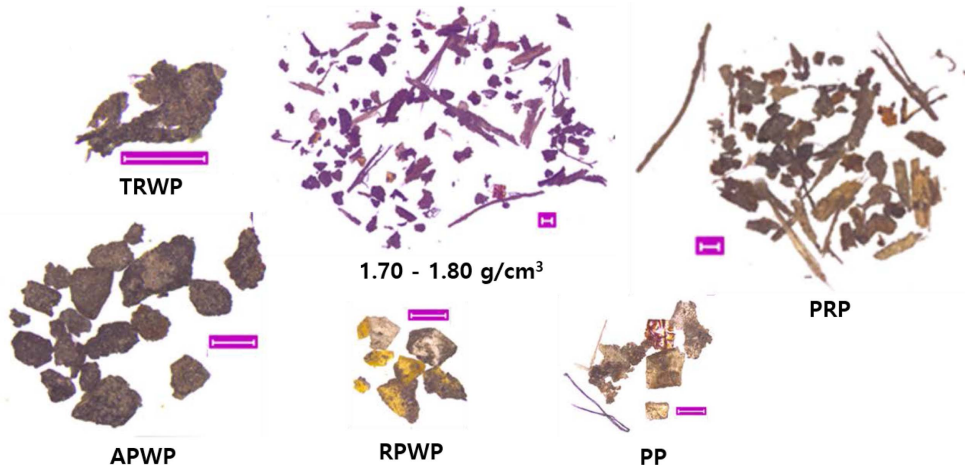


Figure 11. Magnified images of the particles separated by density (1.70-1.80 g/cm³). The scale bar is 200 μm.



Figure 12. Removing other components from TRWPs by chloroform treatment. (A) TRWP (1.60-1.70 g/cm³) and (B) TRWP combined with APWP and other particles (1.70-1.80 g/cm³). The scale bar is 200 μm.

외에 아스팔트 도로 마모입자(asphalt pavement wear particle, APWP)가 나타나기 시작했다(Figure 10). APWP는 검정색으로 종횡비가 작고 투박한 형상이었다. 이 밀도 범위에서 발견된 TRWP는 3개로 모두 기다란 막대 모양이었다. 노란색과 흰색의 RPWP가 6개 발견되었으며, 늘어진 형상의 PP와 오염되어 진한 색을 띠는 PP가 발견되었다. 다양한 형상과 크기의 PRP도 발견되었다.

밀도 범위 1.70-1.80 g/cm³에서는 APWP와 PRP가 주로 나타났다. APWP는 마모된 골재에 역청(bitumen)이 묻은 형태였다. 아스팔트 포장재에는 높은 밀도의 골재가 주성분이므로 높은 밀도의 APWP의 발견은 당연한 것이나, 밀도 범위 1.70-1.80 g/cm³의 PRP가 다수 발견된 것은 의외의 결과이다. 이는 PRP에 많은 무기물 입자가 흡착되었기 때문으로 해석할 수 있다. 또한, 고밀도의 PP의 출현도 무기물 입자의 흡착에 기인한 것으로 여겨진다. 이 밀도 범위 내에서 PRWP도 발견되었는데, PRWP의 수지 성분에 무기물 입자가 붙어서 밀도가 증가한 것으로 판단된다.

TRWP 중 다른 입자가 붙어 있는 것으로 보이는 형상을 갖는 2개를 클로로폼(chloroform)으로 처리하였으며, 그 결과를 Figure 12에 나타내었다. 밀도 1.60-1.70 g/cm³ 범위의 TRWP에 클로로폼을 방울방울 떨어뜨려도 특이한 변화가 나타나지 않았으나(Figure 12(A)), 밀도 1.70-1.80 g/cm³ 범위의 TRWP에 클로로폼을 방울방울 떨어뜨리면 붙어있던 다른 성분의 입자들이 분리되는 것을 볼 수 있다(Figure 12(B)). 밀도 1.70-1.80 g/cm³ 범위의 TRWP를 클로로폼 처리한 결과, 흡착된 이물질의 입자는 APWP로 판명되었으며, 클로로폼을 충분히 가하면 APWP에 포함된 작은 골재 성분이 역청에서 분리된 것을 볼 수 있다. 또한 클로로폼 처리에 의해 TRWP의 본래 형상을 확인할 수 있었으며, 밀도 1.70-1.80 g/cm³ 범위의 TRWP는 특이하게 갈라진 형태였다.

밀도 범위 1.10-1.80 g/cm³인 입자들의 밀도 분포와 함량을 Table 2에 정리하였다. 106-212 μm 크기의 도로먼지 중 밀도 범위 1.10-1.80 g/cm³인 입자들의 총함량은 6% 정도였으며, 94% 정도는 무기물 입자였다. 밀도 범위 1.10-1.80 g/cm³인 입

Table 2. Weight Percentages of the Particles Found in the Road Dust Sample According to the Density Range (wt%)

Density (g/cm ³)	TRWP	APWP	PRP	RPWP	PP	Sum
1.10-1.20	–	–	0.20	–	0.03	0.23
1.20-1.30	0.28	–	0.21	–	0.03	0.52
1.30-1.40	0.33	–	0.39	–	0.14	0.86
1.40-1.50	0.22	–	0.36	0.08	0.03	0.69
1.50-1.60	0.33	–	0.27	0.08	0.07	0.75
1.60-1.70	0.01	0.18	0.77	0.24	0.03	1.23
1.70-1.80	0.01	0.45	0.99	0.21	0.08	1.74
Sum	1.18	0.63	3.19	0.61	0.41	6.02

Table 3. Density Distribution of the Various Particles in the Road Dust

Particle	Density range (g/cm ³)
TRWP	1.20-1.80
APWP	> 1.60
PRP	> 1.10
RPWP	> 1.40
PP	all ranges
MP	> 1.80

자들에는 TRWP, APWP, PRP, RPWP, PP가 있었다. 입자 종류별 함량 순서는 PRP > TRWP > APWP ~ RPWP > PP로, PRP 함량이 가장 높았으며 PP 함량이 가장 낮았다. PP 함량이 0.4%로 가장 낮지만, 플라스틱 성분이 외부에서 유입된 것이므로 작은 플라스틱 조각이 도로에 존재한다는 것은 빗물 등에 의해 하천으로 유입될 수 있으므로 간과해서는 안될 사안으로 여겨진다. TRWP 함량이 APWP 함량보다 높다고 해서 타이어 트레드 마모가 아스팔트 포장 도로 마모보다 더 높게 일어난다고 할 수 없다. 그 이유는 90% 이상의 무기물 입자 중 상당 부분이 아스팔트 포장재 중 골재의 마모에 의해 발생한 것일 수 있기 때문이다.

도로면지에서 발견된 다양한 입자들의 밀도 분포를 Table 3에 정리하였다. TRWP, APWP, PRP, RPWP가 발견된 밀도 범위는 각각 1.20-1.80, > 1.60, > 1.10, > 1.40 g/cm³ 이었다. 1.80 g/cm³보다 밀도가 큰 입자들은 대부분 무기물이었다. PP는 1.10 g/cm³ 미만부터 1.80 g/cm³까지 전 구간에서 발견되었다. 범용 플라스틱 중 밀도가 높은 것으로 PET (polyethylene terephthalate)를 들 수 있는데, PET의 밀도는 1.38 g/cm³ (20°C)이다. 범용 플라스틱의 밀도가 그다지 높지 않은 것을 감안하면 예외적인 결과라 할 수 있다. 이는 앞서 PP의 확대 사진에서 보아 알 수 있듯이 표면에 작은 무기물들이 흡착되어 있어서 밀도가 증가한 것으로 설명할 수 있다.

TRWP가 발견된 밀도 범위는 1.20-1.80 g/cm³로 매우 다양하다. 일반적인 타이어 트레드 배합물의 밀도가 1.20 g/cm³ 미만인 것을 고려하면 흥미로운 결과로, 이는 TWP에 붙은 무

기물에 기인한 것이다. TWP에 붙은 무기물 함량이 증가할수록 TRWP의 밀도는 증가한다. 아스팔트 포장재의 성분 중 80% 이상이 무기물인 골재로 이루어졌으며 골재의 밀도는 2.0 g/cm³보다 높다. APWP가 발견된 밀도는 1.60 g/cm³ 이상으로 전체 아스팔트 포장재의 밀도보다 매우 낮다. 이는 1.80 g/cm³ 이하에서 발견된 APWP에는 골재보다 결합재로 사용하는 역청이 주성분으로 존재하는 것을 의미하며, 나머지 골재 부분은 마모되어 무기물 입자 형태로 존재하는 것으로 판단된다.

나무 관련 성분인 PRP는 1.10 g/cm³ 이상부터 발견되었는데, 나무의 구성 성분에 따른 밀도차도 있지만 나무 관련 성분에 붙은 무기물 함량에 따라서도 PRP의 밀도는 달라진다. 차선도색 마모입자인 RPWP는 밀도 1.40 g/cm³ 이상부터 발견되었다. 차선용 도료는 열경화성으로 수지로 주로 poly(methyl methacrylate) (PMMA)를 사용하고 있으며, 안료 이외에 무기물 충전제와 각종 첨가제가 함유되어 밀도가 비교적 높다. 차선용 도료의 주성분 중 밀도가 낮은 PMMA의 밀도는 1.18 g/cm³이다. RPWP도 외부의 무기물 입자가 많이 붙을수록 밀도가 증가한다.

Conclusions

도로에서 발생하는 다양한 마모입자를 밀도 범위 1.10-1.80 g/cm³에서 0.10 g/cm³의 간격으로 분리하여 입자별 밀도 범위와 형상, 그리고 함량을 분석하였다. 버스정류장에서 채취한 도로면지 중 106-212 μm 크기의 입자를 대상으로 진행하였다. 밀도 범위 1.10-1.80 g/cm³에서 타이어-도로 마모입자 (TRWP), 아스팔트 도로 마모입자(APWP), 식물관련 마모입자(PRP), 차선도색 마모입자(RPWP), 그리고 플라스틱 입자 (PP)가 발견되었다. 이들의 총함량은 6% 정도였으며, 나머지는 밀도 1.80 g/cm³을 초과하는 무기물 입자가 대부분이었다. 이들 무기물 입자는 외부 유입도 있지만 대부분 아스팔트 도로가 마모되어 발생한 골재 마모입자인 것으로 판단된다. TRWP, APWP, PRP, RPWP의 밀도 범위는 각각 1.20-1.80, > 1.60, > 1.10, > 1.40 g/cm³이다. PP는 1.10 g/cm³ 미만부터 1.80 g/cm³까지 전 구간에서 발견되었다. TRWP는 매우 다양한 형태와 중량비를 갖는 것으로 확인되었으며, APWP와 RPWP는 투박한 형상과 작은 중량비를 가졌다. 밀도 범위 1.10-1.80 g/cm³인 입자들의 함량 순서는 PRP > TRWP > APWP ~ RPWP > PP이다. 타이어 트레드와 아스팔트 도로 표면과의 마찰에 의해 TRWP와 APWP의 생성은 물론이고, 외부에서 유입된 식물 조각이나 플라스틱 조각이 더 잘게 부서져 작은 입자를 생성한다. 또한, 타이어 트레드와 차선도색과의 마찰에 의해 RPWP가 생성된다. 도로에서 발생한 각종 입자의 밀도 범위가 넓은 이유는 작은 무기물 입자가 흡착되는 정도가 다르기 때문이다.

Acknowledgements

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

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

References

1. 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).
2. U. Jung and S.-S. Choi, "Classification and characterization of tire-road wear particles in road dust by density", *Polymers*, **14**, 1005 (2022).
3. U. Jung and S.-S. Choi, "A variety of particles including tire wear particles produced on the road", *Elast. Compos.*, **56**, 85 (2021).
4. C. E. Son and S.-S. Choi, "Preparation and characterization of model tire-road wear particles", *Polymers*, **14**, 1512 (2022).
5. M. Kovochich, J. A. Parker, S. C. Oh, J. P. Lee, S. Wagner, T. Reemtsma, and K. M. Unice, "Characterization of individual tire and road wear particles in environmental road dust, tunnel dust, and sediment", *Environ. Sci. Technol. Lett.*, **8**, 1057 (2021).
6. P. Klöckner, T. Reemtsma, P. Eisentraut, U. Braun, A. S. Ruhl, and S. Wagner, "Tire and road wear particles in road environment - Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation", *Chemosphere*, **222**, 714 (2019).
7. 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).
8. P. J. Kole, A. J. Löhr, 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).

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