

ORIGINAL ARTICLE

교통량별 가로변 토양특성 및 타이어 마모 입자(TWPs) 분석

이선영 · 주진희 · 윤용한*

건국대학교 녹색기술융합학과

Analysis of Roadside Soil Characteristics and Tire Wear Particles(TWPs) According to Traffic Volume

Sun Yeong Lee, Jin Hee Ju, Yong Han Yoon*

Department of Green Technology Convergence, College of Science Technology, Konkuk University, Chungju 27478, Korea

Abstract

Tire wear particles(TWPs), regarded as a microplastic, is generated in significant quantities each year and exist in various spaces and have a negative impact on the surrounding environment. Particularly, roadside environments fall within the direct influence of TWPs, necessitating proactive investigation for contamination management and response. Therefore, this study aimed to investigate the soil acidity and electrical conductivity(EC) and TWPs in the roadside soil of six sites based on traffic volume. The analysis revealed that the soil in all sites exhibited subacidity, and there were no significant differences in EC. Microscopic and FT-IR analysis revealed the presence of microscopic particles in soil samples that exhibited common visual characteristics of TWPs. In the road with the highest traffic volume, 48,300 TWPs were detected per unit area. Furthermore, a proportional relationship between traffic volume and TWPs particles was established. However, influences other than traffic volume on TWPs particle count within the soil were observed. Therefore, for the management of TWPs contaminated roadside soil, a proactive response is necessary in areas with high traffic volumes. However, in order to effectively address the factors contributing to the generation and dispersion of TWPs, further research is required with a multidimensional approach.

Key words : Microplastics, Contamination, Soil pollution, FT-IR

1. 서론

미세플라스틱(Microplastic)은 정의가 표준화되지 않았으나 일반적으로 크기가 5 mm 이하인 고체 합성 고분자 미립자를 지칭하며(Kang and Kim, 2022) 섬유(fibers), 파편(fragments), 필름(films), 비즈(beads)를 포함한 다양한 형태를 가진다(Frias and Nash, 2019). 타이어 마모 입자(Tire Wear Particles,

이하 TWPs)는 합성고분자와 가황제, 익스텐더(fillers) 등을 포함하여 미세플라스틱의 주요 범주로 여겨지며(Baensch-Baltrusch et al., 2020) 전 세계적으로 연간 6백만 톤(ton) 이상이 발생한다(Kole et al., 2017). 발생된 TWPs는 대기 중으로 비산 또는 도로변으로 분산되며, 빗물이나 바람과 같은 환경작용에 의해 다양한 공간에 존재하면서 주변 환경에 영향을 미친다(Baensch-Baltrusch et al., 2020). 이는 주로 부정

Received 28 August, 2023; Revised 14 September, 2023;

Accepted 20 September, 2023

*Corresponding author : Yong Han Yoon, Department of Green Technology Convergence, Konkuk University, Chungju 27478, Korea
Phone : +82-43-840-3512
E-mail : yonghan7204@kku.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적 영향이며 TWP_s 자체의 독성뿐만 아니라 중금속 또는 다른 화학물질이 표면에 부착됨에 따라 부가적인 오염원이 될 수 있다(Liu et al., 2018).

TWP_s는 일반적으로 타이어와 도로면의 마찰과정에서 발생하며 이는 주행거리, 차량의 무게, 주행속도, 타이어의 종류, 도로포장재의 차이 등 다양한 요인에 영향을 받는 것으로(Basensch-Baltrusch et al., 2020) 알려져 있으나 이중 TWP_s 발생의 규모는 자동차의 수와 깊은 관련이 있다(Di and Wang, 2018). Lee et al.(2020)은 연구에서 국내의 자동차 수가 매년 증가함에 따라 30개의 OECD 국가들 가운데 면적 대비 네 번째로 많은 수의 자동차를 보유하고 있다는 점을 언급하여 이로 인해 많은 양의 TWP_s가 발생할 것으로 추정하였다. 실질적으로 도로의 분산 먼지 상의 TWP_s를 분석한 연구(Gao et al., 2022)에 따르면 교통량이 많은 도로일수록 분산 먼지 내의 TWP_s 입자수가 많은 것으로 나타났다. 도로에서 발생한 TWP_s는 주로 공기로 운반되거나 강우 유출을 통해 토양으로 유입되며(Kole et al., 2017) 일반적인 개선 기술로 제거가 어려워 토양 내 지속적인 축적이 발생한다(Xiang et al., 2022). 이를 통해 교통량이 토양 내부의 TWP_s 축적정도에 영향을 미칠 것으로 가정할 수 있으나 실증적 연구 없이는 가설에 불과하다. 특히, 가로변 토양은 TWP_s의 발생지에서 물리적 거리상 직접적인 영향권에 속해 있어 오염관리와 대응을 위해서는 관련 연구가 선행되어야 한다.

토양 내에 존재하는 미세플라스틱 분석연구는 초기 단계이며(Zhang and Liu, 2019), 주로 라만분광법(Raman Spectroscopy) 또는 퓨리에 변환 적외선 분광법(FT-IR)과 같은 기법이 적용되어 왔다. FT-IR은 특정한 파장의 적외선을 조사했을 때 물질에 따라 산란하는 정도가 다를 수 이용하여 카르보닐기(carbonyl group)와 같은 극성의 기능기를 분석하는 비파괴검사법으로 토양 샘플에 IR 빔(beam)을 조사하여 흡수 및 투과되는 IR 신호를 다른 IR 파장(wavelengths)에 대조하여 스펙트럼의 형태로 측정하는 방법이다. 따라서 미세플라스틱의 정성에 있어 FT-IR이 어떠한 시각법(visual method)보다 효과적이라고 할 수 있다(Song et al., 2015).

이에 본 연구는 교통량에 따라 대상지를 구분하여 토양의 산도 및 전기전도도를 측정하여 가로변 토양의 상태를 파악하고 FT-IR 기법을 적용한 정성분석을 통해 가로변 토양의 TWP_s 존재 여부를 확인하고자 하였다.

또한, 교통량에 따른 대상지 토양 내의 TWP_s 입자수를 정량화하여 교통량과 TWP_s 입자수 간의 관계를 밝힘으로써 가로변 환경의 TWP 오염도양 관리 및 대응을 위한 기초적 자료를 제공하고자 하였다.

2. 범위 및 방법

2.1. 연구대상지

본 연구를 위한 대상지는 도로교통량분석장치(차량감응 검지기 시스템)가 설치된 충주시 5곳의 도로변과 자동차의 통행이 통제된 공원 내부로 선정하였다. 충주시의 차량감응 검지기는 총 14개 설치되어 있으며 이중 도심지에 차량의 통행이 많은 사거리를 중심으로 5개 설치되어 있어 교통량의 객관적인 산출이 가능하다. 대상지의 모든 도로는 아스콘 포장이며 도로면과 토양샘플 채취공간 간의 약 20 cm의 단차가 있다. 또한 대상지의 토성은 전반적으로 사양토 또는 사질식양토로 모래의 비율이 약 63%, 미사의 비율이 약 27%, 점토의 비율이 약 20% 정도를 차지한다.

대상지별 일평균교통량(Average daily traffic; ADT)은 K도로가 10,024.2 vehicles·a day⁻¹로 대상지 가운데 가장 많은 구간이며 자동차의 통행이 제한된 공원 내부를 제외하고 C도로가 5,061 vehicles·a day⁻¹로 자동차의 통행이 가장 적은 도로이다. 이밖에 G도로와 F도로, S도로의 ADT는 각 7,433.6, 5,855, 5,167.3 vehicles·a day⁻¹이다.

Table 1. Average daily traffic of the soil sampling sites in Chungju-si

Soil sampling sites	ADT (vehicles·a day ⁻¹)
Park	0
K	10,024.2
F	7,433.6
S	5,855
G	5,167.3
C	5,061

2.2. 토양샘플링 및 전처리

토양 내 미세플라스틱 분석연구의 경우 시료의 채취, 전처리 및 분석과정이 표준화되어 있지 않아(Prata et al., 2019) 기존 연구(Klöckner et al., 2019)를 참고하

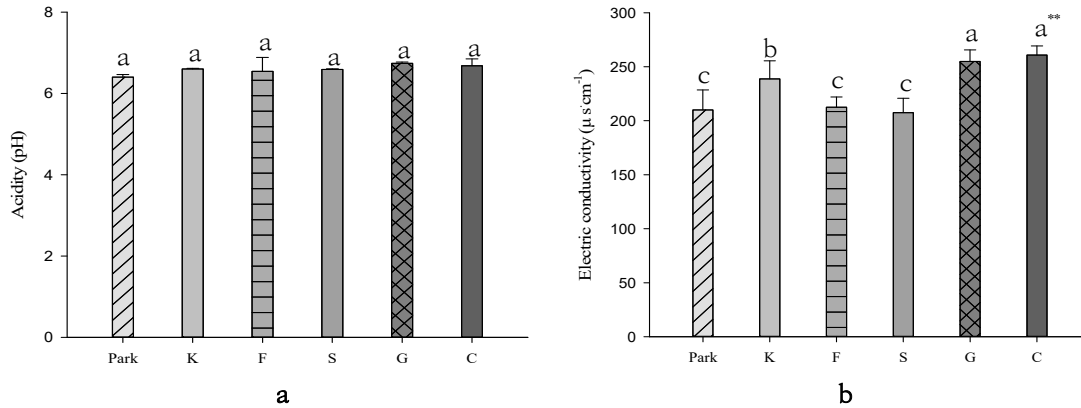


Fig. 1. Comparison on a: acidity and b: electric conductivity of the soil samples of each experimental sites per unit area. Park: 0 vehicles·a day⁻¹, K: 10,024.2 vehicles·a day⁻¹, F: 7,433.6 vehicles·a day⁻¹, S: 5,855 vehicles·a day⁻¹, G: 5,167.3 vehicles·a day⁻¹, C: 5,061 vehicles·a day⁻¹. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ using Duncan's test. **: $p < 0.01$.

여 방법을 설정하였다. 대상지 가로변 토양의 샘플링은 3차로 나누어 2달간의 간격을 두고 채취 전 약 5일간 강우가 없는 날을 선정하여 농촌진흥청의 토양시료채취 방법(Rural development administration, 2018)에 따라 이루어졌다. 각 대상지별 15개의 20x20 cm 크기의 샘플링 구획을 두고 삽으로 채취 부위의 겉흙을 약 1-2 cm 걷어낸 후 옆면 작토 부위의 10-15 cm 정도를 다른 종류의 미세플라스틱 오염을 방지하기 위해 종이 봉투에 약 150 g씩 채취하였다.

채취한 토양샘플은 실험실 내로 옮겨 전처리 수행 전, 대상지별로 균일하게 섞어 채취 위치 및 깊이의 차이에 따른 오차를 줄이고자 하였다. 모든 토양샘플을 공통적으로 2 mm 표준체(Standard sieve, 10mesh, Chung Gye Industrial MFG., Co., Korea)와 핀셋을 이용하여 큰 자갈 및 나무뿌리 등을 제거한 후 드라이오븐(C-DF, Changshin Sci. Co., Korea)을 이용하여 70°C에서 72시간 열풍건조 시켰다. 토양샘플의 산도와 전기전도도 분석을 위해 건조된 토양과 증류수를 1:5 비율로 희석하여 약 7시간 침전시킨 후 5B여과지(4 µm Quantitative filter paper, ADVANTEC, Japan)를 이용하여 여과하였다. TWPs 정성 및 정량분석을 위해 건조된 샘플에 포화 염화나트륨 포화용액(Sodium Chloride saturated solution, 58.44M)을 처리한 후 24시간 정제하였고 이후 여과지(공극 20 µm,

Whatman 41, Cytiva, Belgium)로 여과하는 밀도차 선별(Thompson et al., 2004)을 실시하였다. 여과지에 걸러진 입자에 30% 과산화수소수(H₂O₂, 100 mL)를 처리하고 72시간 정제하여 샘플 내 유기물을 제거한 후 공극 20 µm 여과지로 여과하였다.

2.3. 측정 및 결과분석 방법

대상지별 토양샘플의 산도 및 전기전도도는 각 pH meter(ST-3100pH, Ohaus Corp., USA)와 EC meter(ST-3000C, Ohaus Corp., USA)를 사용하여 측정하였다. TWPs의 형태를 관찰하기 위해 도립위상차 현미경(Inverted microscope, Ezscope I-900PH, MACROTECH, Korea)을 사용하였고 연결된 카메라(Ezscope DCM510 digital camera, MACROTECH, Korea)를 통해 고정된 이미지를 얻었다. 전처리를 통해 검출된 물질 중 TWP로 추정되는 흑색조각을 대상으로 주파수 4000-500 cm⁻¹로 스캔시간을 16초 이상, 주파수 해상도는 ≤4 cm⁻¹로 한 푸리에변환적외선분광법(Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR)을 사용하여 피크(peak)를 확인 후 정성하였다. 토양과 같은 고상 시료 중의 미세플라스틱의 농도는 단위부피 또는 면적당 입자의 개수로 나타낼 수 있다(Lee and Kim, 2017). 대상지별 TWPs의 정량을 위해 20-250 µm 크기의 입자를 기준으로 단위면적 당 입자수로 나타내었다.

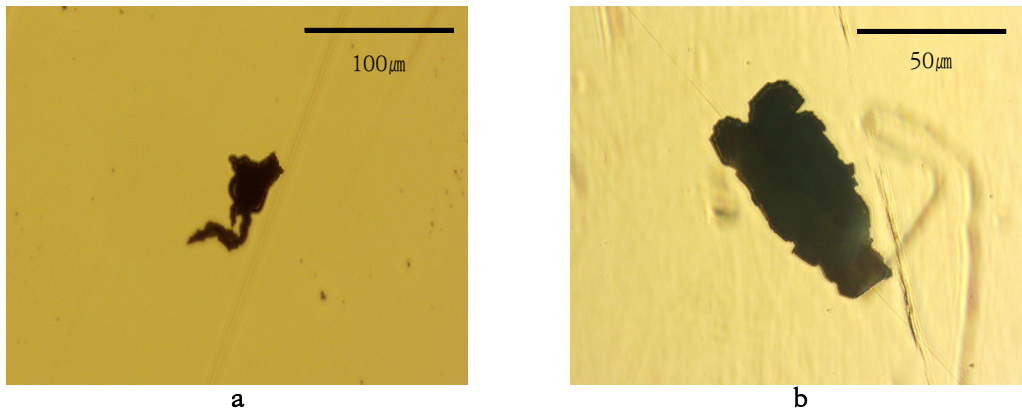


Fig. 2. Images of microparticles suspected as TWP microplastics. a: imaged microparticle in soil sample from site C, b: from site S.

산출된 값을 기준으로 PASW statistics 18(SPSS Inc., USA)를 이용하여 던컨(Duncan)의 다중범위검정을 통해 평균값의 차이를 확인하고 TWP의 입자수와 교통량 간의 상관분석(Pearson correlation)을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양산도 및 전기전도도

대상지별 토양의 산도 및 전기전도도를 분석한 결과, 토양 산도는 G에서 6.74로 가장 높았으며 자동차의 통행이 통제된 공원 내부의 토양 샘플이 6.4로 가장 낮았다. 그러나 모든 토양 샘플이 pH6-7 범위 내의 약산성을 띠었으며 교통량에 따른 가로변 토양 산도 간의 유의미한 평균값의 차이는 보이지 않는 것으로 나타났다. 전기전도도는 C > G > K > F > Park > S 순으로 260.6 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 254.8 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 238.6 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 212.5 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 210.0 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$, 207.4 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ 의 수치를 보였다. 모든 대상지의 전기전도도는 기존 조정설계기준(The Korean institute of landscape architecture, 2002)에 수목 생육에 크게 유해하지 않은 수준으로 언급된 1.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (1,000 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$) 이하로 나타나 가로변 토양의 전기전도도가 주변 식생에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 판단된다.

3.2. 토양샘플 내 TWP 정성분석

3.2.1. 현미경분석

교통량별 대상지의 각 토양샘플 내 TWP 추정 입자를 이미지화한 결과는 Fig. 2와 같다. 길쭉하며 비교적 불규칙하게 찢겨진 형태의 검은색 조각이 모든 대상지의 토양샘플에서 균일하게 확인되었다. 이는 기존 연구(Milani et al., 2004; Chae et al., 2021; Kovoichich et al., 2021)를 통해 밝혀진 TWP의 외형적 형태와도 부합하는 것으로 나타났다. TWP의 경우 고유의 독특한 외형적 형태와 표면의 특징으로 현미경을 통해 다른 미세입자와 구분이 가능하다. TWP는 밝은 색과 각진 모양을 가진 다른 무기입자와는 다르게 검은색이며(Chae et al., 2021) 소시지모양 또는 콩팥모양의 길쭉한 형태를 가진다(Kovoichich et al., 2021). 이러한 외형적 특징을 기준으로 현미경분석을 통해 확인된 입자를 TWP로 추정 가능하였다.

3.2.2. FT-IR 분석

전처리 과정을 통해 분리된 입자 가운데 검정색 조각을 대상으로 FT-IR 분석한 결과 995-1,052 cm^{-1} 에서 가장 강한 피크를 보였으며 457-478 cm^{-1} , 524-547 cm^{-1} , 3,388-3,490 cm^{-1} 에서도 피크가 나타났다. 타이어의 성분으로는 합성고무(SR), 천연고무(NR) 등의 고무류와 보강, 충전제인 카본블랙(carbon black) 또는 실리카(silica), 오일, 가황제(vulcaizing) 등이 있으며 합성고무로 스티렌부타디엔(Styrene Butadiene Rubber; SBR)과 폴리부타디엔(poly butadiene rubber; BR)이 주로 사용된다(Rafique, 2012). 폴리부타디엔 고무는 *cis*-1,4-unit(720-740 cm^{-1}),

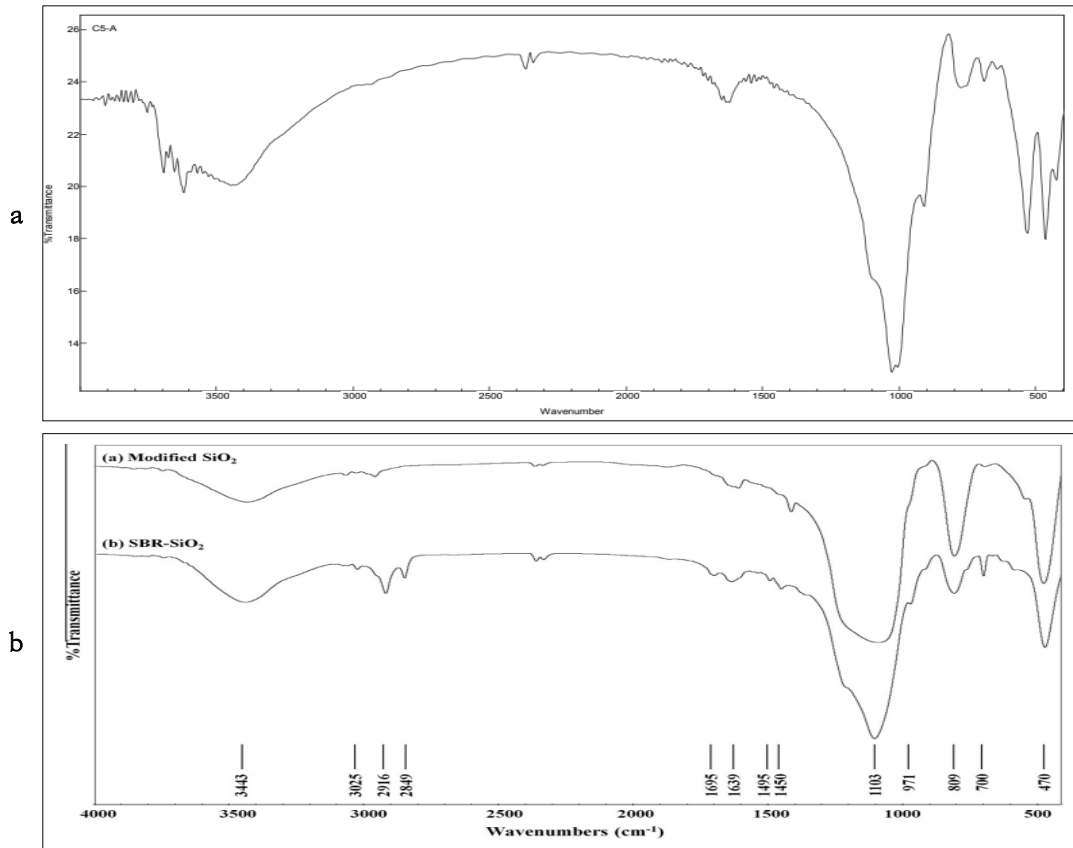


Fig. 3. FT-IR spectrum of a; black microparticles in soil samples and b; SBR-SiO₂(Tancharenrat et al., 2014).

trans-1,4-unit(967 cm⁻¹), 1,2-unit의 3가지 미세 구조를 가지고 있으며 흡수 파장이 모두 다르다(Choi, 2019). Tancharenrat et al.(2014)의 연구에서 밝힌 스티렌부타디엔 공중합체(SBR-SiO₂)의 FT-IR 스펙트럼을 토양샘플 내 검정색 조각의 FT-IR 스펙트럼과 비교하였을 때 유사한 양상을 보였으며 흡수파장을 통해 폴리부타디엔을 확인하였다. 스펙트럼 간의 미세한 차이는 외부환경에 노출된 TWPs에서 흔히 나타나며 제조과정과 타이어 구성성분 등에 의해 발생할 수 있다(Leads and Weinstein, 2019). 따라서 교통량에 따라 구분한 대상지의 토양샘플 내에서 공통적으로 확인된 검정색 입자는 TWPs인 것으로 판단된다.

3.3. TWPs 정량분석

ADT가 10,024인 대상지 K의 경우 1차 측정 시 단 위면적 당 48,300개의 TWPs가 검출되었으며 이는 대상지 가운데 가장 많은 수인 것으로 나타났다. 하루평균 교통량이 두 번째로 많은 도로인 F를 제외하고 S(45,400개) > G(43,100개) > C(31,700개) 순으로 교통량이 적은 도로일수록 적은 수의 TWPs 입자수가 검출되었다. TWPs는 발생과정의 특성상 시간이 경과 함에 따라 점진적으로 이루어지는데 대상지 F의 경우 가로 정비가 비교적 최근에 이루어져 37,433개라는 상대적으로 적은 수의 TWPs가 검출된 것으로 사료된다.

전체적으로 교통량과 토양샘플에서 검출된 단위면적당 TWPs 입자수는 0.877*의 정(+)의 상관계수를 보였으며 유의확률 95% 이내의 상관관계가 확인되었다. 따라서 교통량이 증가할수록 토양 내에서 검출되는 TWPs의 수가 많아질 것으로 예측할 수 있다.

Gunawardana et al.(2012)은 하루평균 약 8천대의 트럭이 지나는 도로에서 약 7천대의 트럭이 지나는 도로보다 많은 양의 TWP가 검출되었다고 하였으며, 이는 교통량의 차이에 기인한 결과인 것으로 시사하였다. Kim et al.(2021)은 도로 주변에서 검출된 미세플라스틱의 입자수는 kg당 4,987개로 2,673개가 검출된 공원보다 현저히 많다고 하였고, 분석된 미세플라스틱 입자의 경우 흑색조각(TWPs로 추정함)의 비율이 가장 높았다고 밝혔다. 또한, Yoon et al.(2021)은 서로 다른 용도지역의 도로변 비산먼지내 TWP 검출량을 분석하였을 때, 산업지역에서 거주지역에 비해 약 2.5배의 TWP가 확인되었다고 하였으며 이는 교통량과 깊은 상관관계가 있다고 하였다.

한편 자동차의 통행이 통제된 공원 내부의 토양에서도 약 479개의 TWP가 확인되었다. TWP는 환경조건 또는 외부요소에 따라 비산되어 도로로부터 수 킬로미터 떨어진 곳까지 이동이 가능하다(Wagner et al., 2018). 토양샘플이 채취된 공원 내 공간은 가장 가까운 도로로부터 약 150 m 가량 떨어진 곳으로 TWP가 비산하여 공원 내 토양에 유입된 것으로 사료된다.

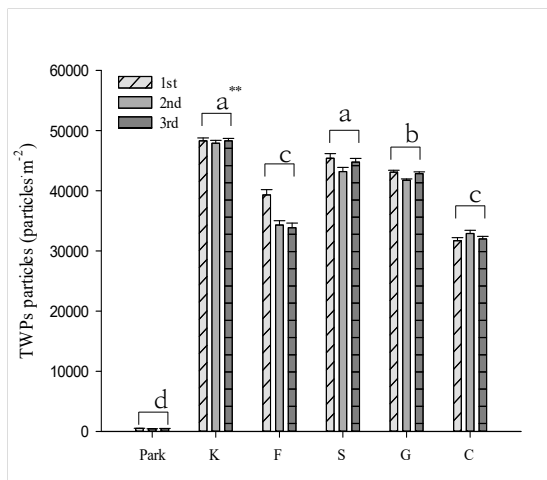


Fig. 4. Comparison on TWP particles(20-250 μ m) in the soil samples of each experimental sites per unit area. Park: 0 vehicles·a day⁻¹, K: 10,024.2 vehicles·a day⁻¹, F: 7,433.6 vehicles·a day⁻¹, S: 5,855 vehicles·a day⁻¹, G: 5,167.3 vehicles·a day⁻¹, C: 5,061 vehicles·a day⁻¹. Different letters indicate significant differences at $p < 0.05$ using Duncan's test. **: $p < 0.01$.

Table 2. Result of Pearson correlation analysis for traffic volume and TWP particles per unit

Variables	TWP particles	
	<i>r</i>	
Traffic volume	<i>r</i>	.877*
	<i>p</i>	.05
	N	60

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

4. 결론

본 연구는 교통량에 따른 가로변 토양의 TWP 오염 정도를 파악하여 관리 및 대응을 위한 기초적 자료를 제공하는 것을 목적으로 6개 대상지의 토양특성과 토양 내 TWP를 정성 및 정량 분석하였으며 결과는 다음과 같다.

교통량에 따른 가로변 토양산도는 대상지별 차이가 나타나지 않았으며 동일하게 pH6-7 범위의 약산성을 띠었다. 전기전도도의 경우 대상지별 유의한 차이를 보였다.

모든 토양 샘플 내에서 공통적으로 TWP의 외형적 특징인 검은색이며 길게 찢겨진 형태의 미세입자가 확인되었다. 또한 해당 입자는 스티렌부타디엔, 폴리부타디엔 등 타이어의 주요 구성 요소가 가지는 흡수파장과 유사한 양상을 보임에 따라 종합적으로 TWP로의 추정이 가능하였다.

교통량이 가장 많은 도로에서 단위면적당 48,300개의 TWP가 검출되었으며, 교통량이 감소할수록 확인되는 TWP 입자수가 적은 것으로 나타났다. 교통량과 가로변 토양 내 TWP 입자수와 높은 상관관계를 보여 교통량이 많은 도로일수록 가로변 토양 내 TWP 오염도가 높을 것으로 판단됨에 따라 선제적인 오염관리의 필요성을 가진다. 비교적 최근에 조성된 F 도로변의 경우 두 번째로 많은 교통량을 가짐에도 불구하고 37,433개로 상대적으로 적은 수의 TWP가 검출되었으며, 교통이 통제된 공원 내부에서도 TWP가 확인됨에 따라 조성 시기 또는 비산거리 등 교통량 외의 요인이 토양 내 TWP 입자수에 미치는 영향이 시사되었다.

따라서 본 연구를 통해 교통량과 가로변 토양의 TWP 입자수의 상관관계가 밝혀짐에 따라 토양의 주요오염원인 TWP 관리를 위해 교통량이 많은 도로의 가로변의 경우 번거로운 TWP검출과정을 배제한 우선 대응의 필요성을 가진다. 본 연구의 결과는 향후 가로변

토양의 TWPs 오염관리를 위한 기초자료로 적용이 가능하나, TWPs 발생 및 확산 요인에 관하여 다각도로 접근하여 해석될 수 있도록 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 건국대학교 KU학술연구비 지원에 의한 결과임

REFERENCES

- Baensch-Baltruschat, B., Kocher, B., Stock, F., Reifferscheid, G., 2020, Tyre and road wear particles (TRWP)-A review of generation, properties, emissions, human health risk, ecotoxicity, and fate in the environment, *Science of the Total Environment*, 733, 137823.
- Chae, E., Jung, U., Choi, S.S., 2021, Quantification of tire tread wear particles in microparticles produced on the road using oleamide as a novel marker, *Environmental Pollution*, 288, 117811.
- Choi, S. S., 2019, Infrared (IR) Spectroscopy-Based Technique for Raw Material Analysis of Rubber Materials, *Rubber Technology*, 20(3), 26-37.
- Di, M., Wang, J., 2018, Microplastics in surface waters and sediments of the three Gorges reservoir, China, *Science of Total Environment*, 616, 1620-1627.
- Frias, J. P. G. L., Nash, R., 2019, Microplastics: Finding a consensus on the definition, *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147.
- Gao, Z., Cizdziel, J. V., Wontor, K., Clisham, C., Focia, K., Rausch, J., Jaramillo-Vogel, D., 2022, On airborne tire wear particles along roads with different traffic characteristics using passive sampling and optical microscopy, single particle SEM/EDX, and μ -ATR-FTIR analyses, *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1022697.
- Gunawardana, C., Goonetilleke, A., Egodawatta, P., Dawes, L., Koko, S., 2012, Source characterisation of road dust based on chemical and mineralogical composition, *Chemosphere*, 87(2), 163-70.
- 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, *J. Rec. Const. Resources*, 10(3), 293-299.
- Kim, B. H., Yoon, J. H., Kim, K. H., 2021, Distribution of microplastics in soil of Seoul according to land use, *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, 245.
- Klöckner, P., Reemtsma, P., Eisentraut, P., Braun, U., Ruhl, A. S., Wagner, S., 2019, Tire and road wear particles in road environment - Quantification and assessment of particle dynamics by Zn determination after density separation, *Chemosphere*, 222, 714-721.
- Kole, P. J., Löhr, A. J., Van Belleghem, F. G. A. J., Ragas, A. M. J., 2017, Wear and tear of tyres: a stealthy source of microplastics in the environment, *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 14(10), 1265.
- Kovochich, M., Liong, 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.
- Leads, R. R., Weinstein, J. E., 2019, Occurrence of tire wear particles and other microplastics within the tributaries of Charleston Harbor Estuary, South Carolina, USA, *Marine Pollution Bulletin*, 145, 569-582.
- Lee, H. S., Kim, Y. J., 2017, Consideration on quantitative and qualitative analysis for microplastic in various media, *J. of Korea Society of Waste Management*, 34(6), 537-545.
- Lee, H. S., Ju, M. S., Kim, Y. J., 2020, Estimation of emission of tire wear particles(TWPs) in Korea, *Waste Management*, 108, 154-159.
- Liu, X. S., Wang, J. M., Ghenni, A., el Gawady, M. A., 2018, Reduced zinc leaching from scrap tire during pavement applications, *Waste Management*, 81, 53-60.
- Milani, M., Pucillo, F. P., Ballerini, M., Camatini, M., Gualtieri, M., Martino, S., 2004, First evidence of tyre debris characterization at the nanoscale by focused ion beam, *Materials Characterization*, 52(4-5), 283-288.
- Prata, J. C., da Costa, J. P., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T., 2019, Methods for sampling and detection of microplastics in water and sediment: A critical review, *Trends in Analytical Chemistry*, 110, 150-159.
- Rafique, R. M. U., 2012, Life cycle assessment of waste car tyres at Scandinavian environmental system, Master's thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- Rural development administration, 2018, Agriculture technology direction, 103, 94.
- Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Rani, M., Lee, J., Shim, W. J., 2015, A Comparison of microscopic and spectroscopic identification methods for analysis of microplastics in environmental samples, *Marine Pollution Bulletin*, 93(1-2), 202-209.

- Tancharernrat, T., Rempel, G. L., Prasassarakich, P., 2014, Preparation of styrene butadiene copolymer-silica nanocomposites via differential microemulsion polymerization and NR/SBR-SiO₂ membranes for pervaporation of water-ethanol mixtures, *Chemical Engineering Journal*, 258, 290-300.
- The Korean institute of landscape architecture, 2002, Landscape architecture plan standard.
- 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*, 1(139), 83-100.
- Xiang, Y., Jiang, L., Zhou, Y., Luo, Z., Zhi, D., Yang, J., Lam, S., 2022, Microplastics and environmental pollutants: Key interaction and toxicology in aquatic and soil environments, *Journal of Hazardous Material*, 422, 126843.
- Yoon, C. W., Yoon, Y. S., Hong, S. Y., Jeon, T. W., Shin, S. K., 2021, Hazardous characteristics of dust waste from metal manufacturing industries in South Korea, *Waste Management and Research*, 39, 1471-1479.
- Zhang, G. S., Liu, Y. F., 2018, The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China, *Science of the Total Environment*, 642, 12-20.
-
- Doctor. Sun-Yeong Lee
Department of Green Technology Convergence,
College of Science Technology, Konkuk University
dianau@kku.ac.kr
 - Professor. Jin-Hee Ju
Department of Green Technology Convergence,
College of Science Technology, Konkuk University
jjhkkc@kku.ac.kr
 - Professor. Yong-Han Yoon
Department of Green Technology Convergence,
College of Science Technology, Konkuk University
yonghan7204@kku.ac.kr