

총 설

타이어 마모 입자에 기인한 6PPD 및 6PPD-Q: 환경 분포, 독성, 그리고 잠재적 건강 위험 분석

6PPD and 6PPD-Q from Tire Wear Particles: Environmental Distribution, Toxicity, and Potential Health Risks

유근혜, 전하정, 배민석*

국립목포대학교 환경공학과

Geun-Hye Yu, Hajeong Jeon, Min-Suk Bae*

Department of Environmental Engineering, Mokpo National University, Muan, Republic of Korea

접수일 2025년 1월 21일
수정일 2025년 2월 10일
채택일 2025년 2월 10일

Received 21 January 2025
Revised 10 February 2025
Accepted 10 February 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)61-450-2485
E-mail : minsbae@mnu.ac.kr

Abstract N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) and its quinone derivative, 6PPD-Q, primarily originate from tire wear particles. Recently, these compounds have been widely detected across various environmental media, including air, water, and soil, raising concerns about their ecological impacts. Notably, 6PPD-Q exhibits acute toxicity to aquatic organisms, such as coho salmon, even at low concentrations, and has also been detected in biological samples, such as human urine, indicating potential health risks. Despite advancements in research, significant gaps remain to be addressed, including the development of standardized monitoring protocols, elucidation of transformation mechanisms in the environment, and comprehensive risk assessments based on exposure pathways. Bridging these gaps is essential for mitigating environmental and health challenges and for exploring sustainable alternatives to 6PPD. This study summarizes the analytical methods for these two chemical substances across various media, including aerosols, and examines their relationship to human health risks. This review aims to evaluate analytical methods, concentration characteristics, toxicity, and risks of 6PPD and 6PPD-Q in the environment while identifying knowledge gaps and proposing future research directions

Key words: 6PPD, 6PPD-Q, Microplastic

1. 서 론

미세플라스틱 입자는 우리가 호흡하는 공기에서 우리가 먹는 음식에 이르기까지 환경의 어디에나 존재한다 (Koelmans *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2020; Ng *et al.*, 2018). 일반적으로 미세플라스틱은 길이나 지름이 5 mm 이하 크기의 플라스틱 입자를 의미하지만, 대기 중 미세플라스틱에 대한 정의는 표준화되지 않았다. 미세플라스틱은 1차 및 2차로 분류되며, 2차 미세플라스틱은 벗겨진 페인트 파편, 타이어 마모 등 의도치 않게 생성되는 물질이다 (An *et al.*, 2020). 주로 석유,

플라스틱을 가공해 만드는 합성고무를 주 원료로 하는 타이어는 자동차 도로 주행 시 미세플라스틱을 배출하며 대기 중 미세플라스틱의 84%가 도로에서 발생한다 (Hu *et al.*, 2022; Brahney *et al.*, 2021). 하지만, 대기 중 미세플라스틱에 대한 연구는 아직까지 활발하지 않다.

타이어 마모 입자 (Tire wear particles, TWPs)는 미세플라스틱의 특수한 원천으로, 최근 환경 전반에서 광범위한 주목을 받고 있다 (Luo *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2024). N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD)는 1960년대부터 타이어의 산화 및 오

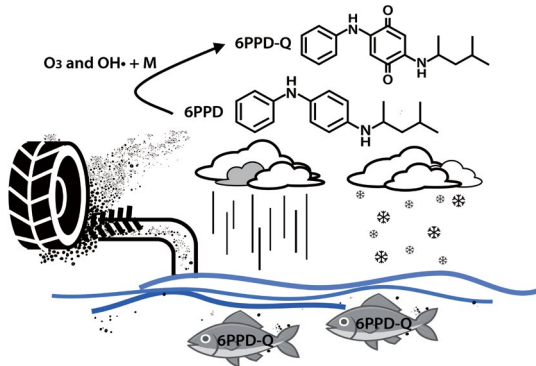


Fig. 1. Transport and hazards of N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) and its quinone derivative, 6PPD-Q from TWP.

존에 의한 손상을 방지하기 위해 사용되었고, 그림 1과 같이 타이어가 마모될 때 대기 중에 입자로 방출된다(Lane *et al.*, 2024; Sustainable Chemistry Catalyst, 2023; Seiwert *et al.*, 2020). 특히 교통량이 많은 도시 지역에서 이러한 화학물질이 대기 중에 부유하거나 주변 토양 및 물로 확산될 가능성이 매우 높다(Wagner *et al.*, 2018). TWP 내 6PPD는 복잡한 분해 및 변환 과정을 거치면서 새로운 독성 물질을 생성하며, 이후 표면 유출 및 대기 수송을 통해 전 세계의 다양한 생태계에 광범위하게 분포되어 생물에게 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Castan *et al.*, 2022). 6PPD가 대기 중에서 산화 과정을 통해 6PPD-quinone (6PPD-Q)로 변환되어, 2차 오염물질을 생성한다. 산화 과정은 주로 대기 중의 오존과의 반응을 통해 진행되며, 6PPD는 오존과 빠르게 반응하여 아미녹실 라디칼을 형성한 후, 최종적으로 퀴논 구조를 갖는 6PPD-Q로 산화된다(Hua and Wang, 2023). 또한, 6PPD의 산화는 오존에 의해 주로 촉진되지만, 다른 산화제에 의해서도 진행될 수 있다. 연구에 따르면 OH 라디칼($\cdot\text{OH}$), 질소 산화물(NO_x), 금속 이온(Fe^{3+} , Cu^{2+})과 같은 환경 내 산화제가 6PPD의 분해 및 전환 과정에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Zhao *et al.*, 2023; Tian *et al.*, 2022). 특히 OH 라디칼은 6PPD의 산화를 가속화하여 6PPD-Q를 포함한 다양한 산화 생성물을 형성할

수 있으며, 금속 이온은 촉매 역할을 하여 산화 속도를 증가시킬 수 있다. 6PPD가 대기 중 산화 반응을 통해 형성되는 6PPD-Q는 이미 국제적 생태계와 인간 건강에 미치는 심각한 영향을 제기한 바 있다(Seiwert *et al.*, 2022). 또한 Hiki *et al.* (2021) 연구에 의하면 실온에서 6PPD 반감기는 5시간인 반면 6PPD-Q의 반감기는 33시간으로 보고되었다. 최근 6PPD 및 6PPD-Q는 물, 대기, 토양 등 다양한 환경 시료에서 검출되어 수생태계 및 환경에 미치는 영향에 대한 우려가 제기되었다. Cao *et al.* (2022)은 도시 지역에서 유출수, 대기, 토양에서 등 모든 시료에서 6PPD-Q가 검출되었다고 보고하였다. 또한, 6PPD-Q는 우천 시 하천으로 방출되어 연어와 송어를 포함한 수중 생물의 대규모 폐사를 유발하는 주요 원인으로 밝혀졌다(Tian *et al.*, 2022, 2021). 코호 연어는 6PPD-Q에 극도로 민감하여 실험동물의 50%가 죽는 독성 물질의 농도를 의미하는 LC_{50} (반수 치사농도)은 $0.041\sim 0.095\ \mu\text{g/L}$ 수준이었다(Lo *et al.*, 2023; Tian *et al.*, 2022). 이러한 6PPD와 6PPD-Q의 광범위한 분포는 주로 높은 교통량으로 인해 생성되는 고무 타이어 입자에 기인한다. 이 외에도 의류, 놀이 시설, 스포츠 장비, 고무 파이프, 전선 및 케이블과 같은 여러 고무 관련 제품도 6PPD와 6PPD-Q의 잠재적 원천으로 간주된다. 여러 선행 연구에서는 6PPD와 6PPD-Q가 인체 건강과 환경에 미칠 수 있는 잠재적 위험성 때문에 심각한 우려가 제기되고 있다. 또한, 2023년 12월, 미국에서는 타이어에서 발생한 6PPD가 강과 바다를 오염시켜 연어 집단 폐사의 원인이 되고 있다며, 타이어 제조사들이 어업 환경 단체들로부터 피소되었다. 더 나아가, 인간(일반 성인, 어린이, 임산부) 소변 샘플에서도 이들의 존재가 보고되어 6PPD와 6PPD-Q가 환경뿐만 아니라 인체에서도 존재함이 확인되었다(Du *et al.*, 2022). 특히, 일반 성인 및 어린이보다 임산부 소변에서 더 높은 농도가 검출되었다. 또한, 6PPD는 간 대사에 의해 빠르게 소변에서 감소하는 반면, 6PPD-Q는 환경과 인체 내에서 더 안정적인 것으로 나타났다. 결과적으로 6PPD와 6PPD-Q 노출로 인한 잠재적 인체 건강 위험에 대한

긴급한 관심이 필요하다는 점을 보여준다. 현재 여러 연구에서는 어류, 척추동물 배아, 홍합 및 갑각류와 같은 생물에 대한 6PPD와 6PPD-Q의 독성 효과를 보고하고 있다(Jiang *et al.*, 2024; Lo *et al.*, 2023; Tian *et al.*, 2021). 따라서, 6PPD 및 6PPD-Q을 이해하기 위해 현재 이용 가능한 연구를 체계적으로 검토할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 먼지, 물, 공기 및 토양을 포함한 다양한 매체에서 이 두 화학 물질의 분석 방법을 요약하고, 인체위해성과의 관계를 검토하였다. 본 리뷰의 목적은 다음과 같다: 1) 환경 시료에서 6PPD와 6PPD-Q의 현재 분석 방법을 검토; 2) 이 두 화합물의 농도 특성 파악; 3) 6PPD와 6PPD-Q의 독성 및 위험 분석; 4) 현재 지식의 공백을 찾아내고 환경 내 6PPD와 6PPD-Q에 대한 향후 연구의 방향 및 관점을 제안하였다.

2. 분석 방법

2.1 시료 채취

6PPD는 고무 표면으로 확산되어 제조 및 사용 중에 6PPD-Q로 변환될 수 있으며, 이후 표면 유출수와 빗물을 통해 물로 유입되거나 대기 또는 토양에 존재한다(Wu *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2019). 이에 여러 연구에서는 대기, 물, 토양으로부터 시료를 채취해 6PPD와 6PPD-Q 농도를 분석하였다. 먼지 대기 시료는 도로변 대기 중 PM_{2.5}를 24시간 동안 석영 필터에 포집했다(Wang *et al.*, 2022a, 2022b; Liu *et al.*, 2016). 포집 전 석영 필터는 550°C에서 오염 물질을 제거 후, 냉동 보관하였다.

6PPD, 6PPD-Q가 TWP가 주요 배출원으로써 먼지 입자 내 6PPD-Q는 TWP 함량과 관련이 있는 것으로 입증되었으며, 이는 교통 관련 공급원에서 생성됨을 나타낸다(Klickner *et al.*, 2021). 도로 먼지 샘플은 도로에서 브러쉬 또는 진공청소기를 이용해 수집해 밀폐된 폴리에틸렌 백에 담았다(Luo *et al.*, 2024; Mao *et al.*, 2024; Jin *et al.*, 2023; Hiki and Yamamoto,

2022). 이때 시료 채취는 날씨의 영향을 받지 않기 위해 강우 전 맑은 날씨에 수행되었다. 수집된 도로 먼지는 스테인레스 메쉬 체망을 통해 돌, 나뭇가지, 낙엽 등 큰 입자를 제거한 후 저온(-40~-20°C) 보관 후, 6PPD 및 6PPD-Q 추출 실험에 사용되었다. Mao *et al.* (2024)은 체질한 시료에 1 mmol/L 글루타치온 용액 0.2 mL를 첨가하여 샘플 준비 중에 PPD의 잠재적인 산화적 변환을 방지했다.

물 시료는 대부분 강우 초기 유출수를 수집해 분석을 수행하였다(Helm *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2023; Cao *et al.*, 2022). 강우는 도로 먼지 및 TWP를 표면에서 하천 또는 지하수로 이동시키는 주요 원인으로 강우 초기 유출수가 오염물질의 주요 확산원으로 작용하기 때문이다. 햇빛 차단을 위해 갈색 유리병에 수집한 물시료는 추출 효율을 높이고, 안정성 유지 및 미생물 성장을 억제하기 위해 황산 또는 포름산 등 산성 용매로 산성화시킨 후 분석 전까지 냉장 보관하였다. 물 시료의 경우 대부분 48시간 이내 추출 및 분석이 수행되었다. Rauert *et al.* (2022) 연구는 고속도로 근교에 위치한 강에서 시료를 채취하였고, 시료채취 지점은 저밀도 주거, 환경 보전 구역, 레크리에이션, 공개 공간 지역으로 산업이나 폐수 유입이 없는 장소로 특정 배출원의 영향을 받지 않는 곳에서 수행하였다. 시료는 분석 전까지 -20°C 냉동 보관하였고, 실온해동 후 분석을 진행하였다. 유출수 외에도 폐수 및 식수와 같은 광범위한 수질 환경에 오염을 확산시킬 수 있다. Li and Kannan (2024) 연구는 폐수 처리 시설에서 유입수와 유출수를 자동 샘플러 펌프를 사용하여 수집했고, 폴리프로필렌(PP) 병에 담아 실험실로 옮겨 분석할 때까지 4°C에서 보관했다. Zhang *et al.* (2023) 연구는 중국 남부 광저우에서 6개 음용수 처리 구역에서 물을 채취했다. 이때 수집된 샘플은 pH 3.0으로 즉시 조정되었고, 미생물 성장을 억제하기 위해 5% 메탄올(v/v)을 첨가했다. 눈은 강수 형태 중 하나로 공기 중의 오염물질을 녹여내 수계와 생태계로의 오염물질 이동에 기여할 수 있다. Zhang *et al.* (2024)은 도로변에 쌓인 눈이 아닌 지면과 접촉하지 않는 눈을 포

집함으로써 대기 중 오염물질의 상태를 반영하고자 했다. 눈 시료는 비커에 담아 알루미늄 호일로 밀봉 후 분석 전까지 냉동 보관되었다.

2.2 6PPD, 6PPD-Q 추출

대부분 연구에서 Liquid Chromatography/Tandem Mass Spectrometry (LC/MSMS) 기기 분석법을 통해 농도를 정량화한 반면, 시료 추출 방법은 차이가 있다. 물, 대기, 토양 등에서 얻은 시료 내 6PPD와 6PPD-Q를 최적의 상태로 분석하기 위해 몇 가지 추출 과정을 수행한다. 6PPD 및 6PPD-Q 추출에는 주로 아세토니트릴 (Acetonitrile), 메탄올 (Methanol), 디클로로메탄 (Dichloromethane, DCM), 헥산 (Hexane) 등이 사용되었다. 아세토니트릴과 메탄올은 극성이 높아 수질 및 대기 시료에서의 회수율이 높은 반면, 디클로로메탄과 헥산은 비극성 오염물질을 효과적으로 용해하여 도로 먼지나 토양 시료에서 더 높은 추출 효율을 보이는 경향이 있다 (Zhang *et al.*, 2023; Hiki and Yamamoto, 2022). 또한, 혼합 용매를 사용하여 극성과 비극성 오염물질의 동시 추출을 최적화하는 방법을 제안하였다 (Mao *et al.*, 2024). 도로 먼지 시료는 용매를 첨가해 초음파 추출하고, 혼합액을 질소 가스 흐름 하에 농축한 후 필터 멤브레인으로 여과하였다 (Jin *et al.*, 2023; Hiki and Yamamoto, 2022; Huang *et al.*, 2021). 이때 시료 추출 용매는 연구자마다 약간씩 다르게 나타났다. Huang *et al.* (2021)과 Mao *et al.* (2024)은 아세토니트릴 두 번 추출하고 디클로로메탄/헥산 혼합물로 30분씩 두 번 초음파 처리했다. Hike and Yamamoto (2022)는 아세토니트릴과 아세톤/헥산 혼합 용액을 사용하여 초음파 추출을 진행하였고, 최종 추출물을 질소 가스 흐름 하에 건조시키고, 최종 용매로 재구성했다. 이때 최종 용매는 메탄올 0.5 mL (Hike and Yamamoto, 2022), 1 mL (Mao *et al.*, 2024), 내부표준물질 (Jin *et al.*, 2023; Huang *et al.*, 2021)을 5 ng 첨가 후 사용하였다.

PM_{2.5} 시료가 포집된 석영필터는 초음파 추출, 질소 농축, 용매 용해, 여과 순서로 시료 추출을 수행하였다

(Wang *et al.*, 2022a; Zhang *et al.*, 2021). 초음파 추출 과정에서 연구자마다 추출 용매를 약간 상이하게 사용했다. Wang *et al.* (2022a) 연구는 디클로로메탄 15 mL로 초음파 선 추출, 아세토니트릴 5 mL로 추가 추출하였고, Zhang *et al.* (2021)은 아세토니트릴 8 mL로 선 추출, 디클로로메탄/헥산 8 mL 후 추출하였다. Wu *et al.* (2020) 연구는 디클로로메탄/헥산으로 선 추출, 아세토니트릴/이소프로판 후 추출을 수행하였다. 모든 시료는 질소 농축 후 최종 용매는 아세토니트릴 (Wang *et al.*, 2022a), 메탄올 (Zhang *et al.*, 2021; Wu *et al.*, 2020)을 사용하였다. 최종 추출액은 동일하게 PTFE 필터에 여과 후 기기분석을 수행하였다. 또한, Wang *et al.* (2022a) 연구에서 아세토니트릴을 이용한 PM_{2.5} 시료 추출 시 6PPD 및 6PPD-Q의 회수율이 85~95%로 보고된 반면, 디클로로메탄 기반 추출의 경우 70~85%로 다소 낮은 값을 보였다. 이는 극성이 높은 6PPD-Q가 상대적으로 극성 용매에서 더 높은 회수율을 보일 가능성을 보여준다. 물 시료는 공통적으로 먼저 유리 섬유 필터로 여과해 부유 입자를 제거한 후, 내부 표준물질을 첨가한다. 그 다음 고체상 추출을 위해 물과 메탄올로 사전 조건화된 Oasis HLB 카트리지에 샘플을 로딩한 후, 건조 후 최종 용매로 재용해하여 분석 준비를 완료한다. Li and Kannan (2024)의 폐수 샘플은 50 mL씩 유리 섬유 필터를 사용하여 여과해 부유 입자를 제거한 뒤, 내부 표준물질을 첨가하고 혼합으로 균질화하였다. 이후, 메탄올 3 mL와 물 3 mL로 전처리한 Oasis HLB 카트리지에 샘플을 로딩하였으며, 진공 상태에서 5분간 건조한 후 메탄올 (3 mL)로 화합물을 용출하였다. 용출액은 질소 가스를 사용해 거의 건조 상태로 농축하였고, 잔여물은 메탄올 (250 µL)에 재용해 후 분석에 사용되었다. 냉동 보관한 눈 시료는 실온에서 해동 후 원심분리로 불순물을 제거하고 표준물질 benzophenone-d₁₀ 1 ng을 첨가했다 (Zhang *et al.*, 2024). 이후 시료를 동결건조하고, 메탄올 1 mL로 재용해 후 내부 표준물질 6PPDQ-d₅ 1 ng을 첨가해 기기분석을 수행하였다.

2.3 6PPD, 6PPD-Q 분석법

표 1과 같이 6PPD 및 6PPD-Q 농도는 주로 용매에 용해되는 이온이나 분자를 분리하는 데 사용되는 크로마토그래피 분석 기법 중의 하나인 LC 분석법 활용하여 정량화하였다(Deng *et al.*, 2022; Hiki *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). LC/MSMS는 액체 크로마토그래피와 질량 분석기의 결합으로 이루어진 고성능 분석 기법이다. Mao *et al.* (2024) 연구는 전기 분무 이온화 소스를 갖춘 삼중 사중극자 질량 분석법(UPLC-MS/MS-8050, Shimadzu Scientific Instruments, Maryland)을 갖춘 고성능 액체 크로마토그래피를 사용하여 6PPD 및 6PPD-Q를 정량화하였다. 크로마토그래피 분리는 Shimadzu Shim-pack GIST C18 컬럼(2.1 250 mm, 2 µm particle size)을 사용하여 수행했다. 이동상은 10 mmol 아세트산 암모늄을 함유한 물(A)과 메탄올(B)의 혼합물이었고 유속은 0.2 mL/분이었다. 1분 동안 90% A/10% B, 4분 동안 100% B로 증가시키고 3분 동안 100% B에서 유지한 다음 2분 이내에 90% A/10% B로 돌아가 총 실행 시간은 9분이다. 질량 분석기는 다중 반응 모니터링을 사용하여 양성 전기 분무 이온화 모드에서 작동했다. 카트리지를 진공 상태에서 5분간 건조하여 수분을 제거한 다음 3 mL MeOH로 용출했다. 용출액을 질소 흐름 하에 거의 건조될 때까지

증발시킨 후 잔류물을 250 µL MeOH에 재구성하고 화학 분석을 위해 유리 바이알에 옮긴다.

Wang *et al.* (2022a)에 의하면 PM_{2.5} 시료는 electrospray ionization (ESI), ultrahigh-resolution Orbitrap mass spectrometry (MS), 그리고 triple quadrupole MS를 조합하여 6PPD 및 6PPD-Q 분석을 수행하였다. 분석물질의 동정은 Q Exactive hybrid quadrupole-Orbitrap mass spectrometer (Thermo Scientific, USA)를 사용하였으며, 정량은 TSQ Altis MS system (Thermo Scientific, USA)을 사용하여 다중 반응 모니터링 모드에서 진행되었다. Zhang *et al.* (2023) 다중 반응 모니터링 모드에서 정전 분무 이온화(ESI) 소스(UPLC-ESI-MS/MS)가 있는 Xevo TQ-S 삼중 사중 극자 질량 분석기(Waters Co., USA)와 결합된 초고성능 액체 크로마토그래피를 사용하여 분석했다. ESI(+) 모드에서 분석했으며 이동상은 Milli-Q 물(0.1% 포름산 포함; A)과 메탄올(B)로 구성되었다.

3. 6PPD, 6PPD-Q 농도

그림 2와 표 2는 대기, 수질, 토양으로부터 검출된 6PPD 및 6PPD-Q에 대한 선행연구 결과를 정리하였

Table 1. Instrumental analysis conditions for 6PPD and 6PPD-Q.

Conditions	Wang <i>et al.</i> , 2022a	Seiwert <i>et al.</i> , 2022	Zhang <i>et al.</i> , 2023	Mao <i>et al.</i> , 2024
Instrument	UHPLC-MS (Orbitrap MS)	LC-HRMS (Q-TOF MS)	UPLC-MS/MS (Triple Quadrupole)	HPLC-MS/MS (Triple Quadrupole)
Column	Waters Acquity HSS T3 column (1.8 µm, 2.1 × 100 mm)	Acquity UPLC HSS T3 (100 × 2.1 mm, 1.7 µm)	Not specified	Shimadzu Shim-pack GIST C18 (2.1 × 250 mm, 2 µm)
Mobile phase	A: 0.1% formic acid B: Acetonitrile	A: 0.1% formic acid B: Methanol with 0.1% formic acid	A: 0.1% formic acid B: Methanol	A: Ammonium acetate B: Methanol
Flow rate	0.3 mL/min	0.45 mL/min	Not specified	0.2 mL/min
Column temperature	35°C	45°C	Not specified	45°C
Ionization mode	ESI, Positive	ESI, Positive	ESI, Positive	ESI, Positive
Scan mode	dd-MS2	Full Scan + Product Ion Scan	MRM	MRM
LOQ	0.25 pg/m ³ (6PPD) 0.08 pg/m ³ (6PPD-Q)	100 ng/L (6PPD) 25 ng/L (6PPD-Q)	0.12 ng/g (6PPD) 0.17 ng/g (6PPD-Q)	0.12 ng/g (6PPD) 0.08 ng/g (6PPD-Q)

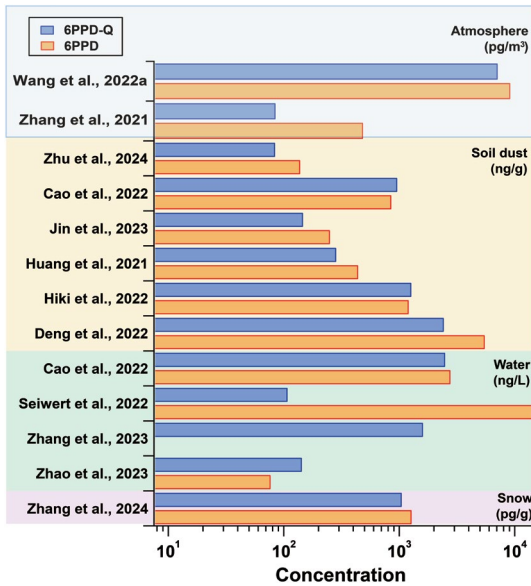


Fig. 2. Results of a previous study on 6PPD and 6PPD-Q concentrations in the atmosphere, soil dust, water, and snow.

다. 6PPD와 그 산화 생성물인 6PPD-Q의 농도가 지역 및 시료 유형에 따라 상당히 다르게 나타났다. 교통량이 많고 산업화된 지역에서 농도가 가장 높았고, 대기 중 PM_{2.5}, soil dust가 주요 오염 매개체임을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 도로 마모 입자의 발생과 6PPD 산화의 중요성을 강조하며, 환경 내에서의 전환과 이동 경로에 대한 추가 연구가 절실히 필요하다. 대기의 경우, PM_{2.5} 내 6PPD와 6PPD-Q 농도 범위가 다양하게 나타났다. Wang *et al.* (2022a)은 중국에 위치한 Taiyuan (TY), Guangzhou (GZ), Guangzhou road (RS) 3곳에서 PM_{2.5} 시료를 24시간 기준으로 채취한 결과, 6PPD 평균농도는 RS (4040 pg/m³), GZ (1820 pg/m³), TY (81 pg/m³)였고, 6PPD-Q 평균농도는 RS (2810 pg/m³), GZ (1100 pg/m³), TY (744 pg/m³)로 교통량이 높은 RS가 가장 높았다. 또한, 6PPD와 6PPD-Q는 높은 상관관계 ($r^2=0.84$)를 나타내 6PPD가 환경에서 6PPD-Q로 전환되었다.

강우 초기 유출수에서 6PPD-Q 농도의 급격한 증가가 관찰되었으며, 이는 도로 표면에서 씻겨 내려온 오염물질이 포함되었기 때문이다. 6PPD-Q의 농도는 도

Table 2. Results of previous studies on 6PPD and 6PPD-Q concentrations.

Type	Type of sample	Site	Unit	6PPD	6PPD-Q	Analysis	Reference
Atmospheric	PM _{2.5}	Hong Kong		0.82~6.30	0.54~13.8	UPLC-QqQ-MS/MS	Cao <i>et al.</i> , 2022
		Taiyuan, China		1.02~3190	2.44~1780		
		Guangzhou, China		22.2~6050	3.04~2350	UPLC-ESI-MS/MS	Wang <i>et al.</i> , 2022a
		Guangzhou, China		2.23~9340	2.96~7250		
		Guangzhou, China		-	1.5~64.4		
		Hangzhou, China		-	1.38~110		
		Shanghai, China		-	10.3~69.1		
		Taiyuan, China		-	1.38~41.0		
		Zhengzhou, China		-	2.6~21.3		
		Zhengzhou, China		-	0.3~32		
		Taiyuan, China		0.02~487			
		Hangzhou, China		0.1~6.0			
		Nanjing, China		0.4~78			
		Guangzhou, China		0.3~10			
		Shanghai, China		0.5~135			
						UHPCL-MS/MS	Zhang <i>et al.</i> , 2021
						UPLC/ESI-TQ MS	Wang <i>et al.</i> , 2022b

Table 2. Continued.

Type	Type of sample	Site	Unit	6PPD	6PPD-Q	Analysis	Reference	
Soil dust	Road	Guangzhou, China	ng/g	15.1~1508	10.5~509	LC-MS/MS	Deng <i>et al.</i> , 2022	
	Prking lot	Guangzhou, China		11.4~5359	4.02~2369			
	Road	Tokyo, Japan		45~1175	116~1238	LC-MS/MS	Hiki and Yamamoto, 2022	
	Road	Guangzhou, China		4.1~238	3.0~88.1	Triple TOF 5600+	Huang <i>et al.</i> , 2021	
	Vehicle	Guangzhou, China		5.0~41.9	17.9~146			
	House	Guangzhou, China		< LOQ~6.1	< LOQ~0.4			
	Prking lot	Guangzhou, China		13.5~429	5.7~277			
	Road	Hangzhou, China		0.46~245	0.46~143	UHPLC-ESI-MS/MS	Jin <i>et al.</i> , 2023	
	Driving school ground	Xiamen, China		0.47	150~990	HPLC-MS/MS	Luo <i>et al.</i> , 2024	
	Indoor dust	Hangzhou, China		0.48~135	0.33~82	HPLC-MS/MS	Zhu <i>et al.</i> , 2024	
Runoff water	Hong Kong	0.21~2.71	0.21~2.43	UPLC-QqQ-MS/MS	Cao <i>et al.</i> , 2022			
Water	Road snow	Leipzig, Germany	μg/L	4.4	0.105	UPLC-TOF-MS	Seiwert <i>et al.</i> , 2022	
	Rainfall	Leipzig, Germany	14.3	0.052				
	Surface water	Courtyards	ng/L	0.19~1.10	6.03~875	UPLC-ESI-MS/MS	Zhang <i>et al.</i> , 2023	
	Surface water	Roads		0.41~7.52	38.5~1562			
	Surface water	Farms		0.10~2.54	0.53~5.58			
	Roadway runoff	Washington, USA	75	140	LC-MS/MS	Zhao <i>et al.</i> , 2023		
	Atmospheric snow		Anyang, China	pg/g	11~85	1.2~62	LC-MS/MS	Zhang <i>et al.</i> , 2024
			Xinxiang, China		16~24	10~12		
			Zhengzhou, China		10~16	3.7~10		
			Luoyang, China		8.1~403	4.2~464		
		Pingdingshan, China	6.5~1247		4~1024			
		Nanyang, China	35~428		3.8~620			
		Xinyang, China	n.d.~11		n.d.~1.4			

로 유출수에서 최대 1562 ng/L로 기록되었으며, 6PPD보다 100배 이상 높게 나타났다(Zhang *et al.*, 2023). Zhujiang 강에서는 강우 후 농도가 평균 2.34 ng/L로 증가하였고, Dongjiang 강에서는 1.69 ng/L로 나타났다. 또한, 강우 후 시간이 지나면서 하천 내 오염물질 농도는 유량 증가에 따른 희석 효과로 인해 점차 감소하는 경향을 보였다. 결과적으로 강우 후 도로 먼지에서는 농도가 감소했지만, 하천 및 유출수에서는 농도가 증가하는 상반된 경향을 보였다. 이러한 결과는 강우가 오염물질의 이동과 분포에 중요한 영향을 미친다는 것을 의미한다. 캐나다 온타리오주 도로에서 흘러내리는 물에서 측정된 6PPD-Q의 농도는 0.05~0.20 (0.14) µg/L였고, 모든 샘플에서 6PPD-Q가 측정되었다(Prosser *et al.*, 2023). 중국의 7개 도시에서 수집하는 시료에서도 6PPD와 6PPD-Q가 모두 검출되었다(Zhang *et al.*, 2024). 평균농도는 Pingdingshan (6PPD: 237 pg/g, 6PPD-Q: 265 pg/g)과 Nanyang (6PPD: 246 pg/g, 6PPD-Q: 189 pg/g)이 가장 높았다. 또한, PPDs의 총 농도와 PPDQs의 총 농도 사이에 높은 상관성($r^2=0.63$)을 나타내 대기 중 PPDs가 산화 과정을 통해 PPDQs로 변환됨을 알 수 있다. Zhao *et al.* (2023)은 6PPD의 오존화로 인한 6PPD-Q 변환을 알아보고자 TWP 추출수의 오존 노출 전, air controls (오존이 없는 압축 제로그레이드 공기), 6PPD를 가스상 오존(330 ppbv)에 노출 후의 6PPD 및 6PPD-Q의 농도를 분석하였다(표 3). 그 결과, 오존 노출에 의해 다양한 전환 산물을 생성했으며, 6PPDQ는 가장 중요한 전환 산물 중 하나였다. 6PPD 농도는 오존 노출 전 평균 농

도는 1500 µg/g으로 가장 높아 TWP에 다량 존재함을 알 수 있었고, 오존 노출 후 610 µg/g으로 약 59% 감소했다. 6PPD-Q는 오존 노출 전 평균농도 12 µg/g으로 6PPD보다 굉장히 낮았지만 오존 노출 후 26 µg/g으로 2배 이상 증가했다. 이러한 결과는 6PPD-Q가 오존에 의해 형성되어 환경으로 배출됨을 확인할 수 있었다. 또한, 추가적으로 TWP 및 도로 유출수의 분석하였다. 도로 유출수에서 6PPD-Q (140 ng/L)가 6PPD (75 ng/L)보다 약 2배 높은 농도로 검출되었으며 이는 TWP의 오염원이 유출수에 노출된 후 산화 반응이 활발하게 일어났음을 나타낸다.

4. 독성 평가 및 인체 위해성과의 관계

6PPD-Q에 노출된 은연어(*Oncorhynchus kisutch*)가 급성 사망을 일으켜 6PPD-Q의 독성이 입증되어 주목을 받고 있다(McIntyre *et al.*, 2021; Tian *et al.*, 2021). Lo *et al.* (2023)은 은연어를 41 ng/L의 6PPD-Q에 24시간 노출시키면 어린 물고기의 사망률이 50% (LC₅₀)가 된다고 발표했다(표 4). Tian *et al.* (2022) 연구에서 발표한 6PPD-Q에 대한 LC₅₀ (95 ng/L)보다 더 낮은 농도였다. 6PPD-Q는 또한 도시 폭우 유출수에 따른 은연어의 대량 사망률과 관련이 있는 것으로도 알려져 있다(Tian *et al.*, 2021). Brinkmann *et al.* (2022)은 rainbow trout, brook trout, Arctic char, white sturgeon에 대한 6PPD-Q의 급성 독성평가를 수행하였다. brook trout와 rainbow trout의 LC₅₀은 각각 590, 1000 ng/L였고, 사망 직전에 특징적인 증상(수면 가까이 떠다니기, 가속된 아가미 운동, 혈떡거림, 나선형 운동 등)을 나타냈다. Arctic char, white sturgeon는 최대 농도 14.2 µg/L에서도 사망이 관찰되지 않았다. Hiki *et al.* (2021) 연구는 환경 위험 평가에서 모델 생물로 널리 사용되고 있는 Danio rerio (*D. rerio*), *Oryzias latipes* (*O. latipes*), *Daphnia magna* (*D. magna*), *Hyalella Azteca* (*H. Azteca*)를 사용하여 급성 독성 시험을 수행한 결과, 6PPD-Q에 대한 독성은 관찰되지 않았다. 이

Table 3. 6PPD and 6PPD-Q concentrations in TWP extract (before and after ozonated) and road runoff (Zhao *et al.*, 2023).

Sample type	Unit	6PPD	6PPD-Q	
TWP extract	Pre-ozonated	µg/g	1500 ± 40	12 ± 0.2
	Air control	µg/g	1500 ± 20	13 ± 1
	Ozonated	µg/g	610 ± 20	26 ± 2
Roadway runoff	ng/L	75 ± 40	140 ± 60	

러한 결과는 연어가 유출수에 상대적으로 민감한 것을 보여준다.

어류 외, 6PPD와 6PPD-Q가 상추의 뿌리와 잎에서 검출되었고, 6PPD와 6PPD-Q에 의해 유발된 독성은 식물의 탄수화물, 유기산, 아미노산 대사과 대사산물의 신호 전달 기능을 방해했다(Castan *et al.*, 2022). 이러한 결과는 식용 식물이 6PPD와 6PPD-Q의 지속적인 공급원 중 하나로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 유기 오염 물질, 미세플라스틱 및 중금속에 대한 생물 모니터로 사용되는 수생 식물(*Eichhornia crassipes* (*E. crassipes*))에 미치는 독성을 분석한 결과(Ge *et al.*, 2024), 6PPD-Q에 노출되면 6PPD보다 삼투 스트레스가 더 크게 유발됐다.

일반적으로 환경 오염물질은 섭취, 흡입, 직접 접촉 같은 몇 가지 공통적인 경로를 통해 인간에게 노출된다. 6PPD의 광범위한 사용과 인간이 6PPD-Q에 노출될 수 있는 환경 경로를 고려할 때 6PPD-Q가 초래하는 부작용과 인간 건강 위험을 인식하는 것이 중요하다. 최근 6PPD-Q의 발생과 수생 종에 대한 독성 효과에 초점을 맞춘 연구가 꾸준히 진행되고 있다. 6PPD-Q는 간, 폐, 신장 등 일부 장기에서 검출되어 잠재적으로 상응하는 병리적 손상을 유발하고, 인간 소변, 혈액 및 뇌척수액 샘플 등에서 검출되어 인간 건강에 잠재적인 위험을 초래한다(Liao *et al.*, 2024; Wan *et al.*, 2024; Fang *et al.*, 2023). Du *et al.* (2022)은 150명

(성인, 어린이, 임산부)의 소변 샘플을 수집하여 6PPD와 6PPD-Q를 분석했다. 6PPD-Q는 성인과 임산부의 모든 소변 샘플에서 검출되었고, 특히 임산부의 6PPD-Q (2.91 ng/mL)는 6PPD (0.068 ng/mL)보다 상당히 컸다. 또한, 성별에 따른 차이를 알아본 결과, 어린이는 유의미한 차이가 발견되지 않은 반면에 여성이 남성보다 높았다. 모유에서 6PPD-Q는 검출한계 미만으로 측정되었고, 6PPD가 검출되었다(Liang *et al.*, 2024). 생쥐를 대상으로 100 mg/kg 노출 되었을 때 간에 축적된 6PPD와 6PPD-Q 농도는 각각 681, 1,194 ng/g이었고(Fang *et al.*, 2023), 6PPD-Q를 경구로 투여하면 간에 염증을 발생했다(Yang *et al.*, 2024). Rainbow trout를 대상으로 6PPD-Q 노출 실험한 결과, 노출 농도가 높아질수록 뇌 조직에 6PPD-Q 농도가 증가했다(Liao *et al.*, 2024). 또한 6PPD-Q에 노출된 후, 최종적으로 생존한 Rainbow trout보다 죽어가는 Rainbow trout의 뇌에서 6PPD-Q 농도가 유의하게 더 높았다. 이러한 결과는 6PPD-Q가 더 많이 축적될수록 치명성이 높아지는 것을 추측할 수 있다. 6PPD-Q는 공기 중 입자에 흡착되어 흡입을 통해 인체에 유입되어 인간의 호흡 기관에 침전될 수 있다. 유해한 화학적 성분들로 구성된 입자상 물질은 항산화제를 고갈시키고 활성산소종(Reactive Oxygen Species, ROS)을 생성하는 산화 잠재력(Oxidative Potential, OP)이 내재되어 있다. 중국 5개 도시의 PM_{2.5}의 산화잠재력을 분석한

Table 4. Results of previous studies on LC₅₀ concentrations evaluated through toxicity tests using 6PPD-Q.

Species	Exposure period (h)	LC ₅₀ (ng/L)	Reference
D. rerio	96	-	Hiki <i>et al.</i> , 2021
O. latipes	96	-	
D. magna	48	-	
H. azteca	96	-	
Oncorhynchus kisutch	24	41	Lo <i>et al.</i> , 2023
Oncorhynchus tshawytscha	24	-	
Oncorhynchus kisutch	24	95	Tian <i>et al.</i> , 2022
Salvelinus leucomaenis pluvius	24	510	Hiki and Yamamoto, 2022
Brook trout	24	590	Brinkmann <i>et al.</i> , 2022
Rainbow trout	72	1960	

결과, Hangzhou (1.41 nmol/min·m³), Guangzhou (0.87 nmol/min·m³), Taiyuan (1.79 nmol/min·m³), Shanghai (1.71 nmol/min·m³), Zhengzhou (1.29 nmol/min·m³)였고, 흡착된 6PPD-Q의 산화 잠재력 기여도는, Hangzhou (5.2%) > Guangzhou (3.3%) > Taiyuan (3.1%) > Shanghai (2.9%) > Zhengzhou (1.1%) 순으로 높았다(Wang *et al.*, 2022b).

5. 제 언

본 총설 연구는 6PPD와 6PPD-Q의 광범위한 분포와 환경적 지속성, 급성 독성, 잠재적 건강 위험을 강조하였다. 선행연구들은 이들의 분포와 전환 경로를 밝히는 데 중요한 역할을 했으나, 여전히 해결해야 할 연구 공백이 존재한다. 또한, 타이어 제조에서 6PPD를 대체할 지속 가능한 대안을 찾는 것이 중요하다. 전 세계적인 차량 의존도와 타이어 마모로 인한 문제를 고려할 때, 이러한 연구 과제를 해결하는 것은 환경 및 건강상의 문제를 완화하는 데 필수적이다. 그러나 여전히 표준화된 분석 방법의 부족, 환경 내 운명과 전환 메커니즘에 대한 제한된 지식, 다양한 노출 경로를 고려한 종합적 위험 평가 등의 문제를 해결해야 한다. 이에, 국내 대기환경 특성에 맞춘 6PPD 및 6PPD-Q 연구 필요성을 제언하고자 한다. 국내 대기환경에서 6PPD 및 6PPD-Q에 대한 연구는 아직 진행되지 않고 있는 상황으로 (1) 대기 중 농도 및 분포 특성 분석, (2) 물·토양·먼지 등에서의 거동 평가, (3) 인체 노출 및 건강 위해성 연구가 필요하다. 특히, 국내 도심 및 도로 인근 지역에서의 6PPD 및 6PPD-Q 노출 수준을 평가하고, 이를 토대로 국민 건강 보호를 위한 환경 정책 마련이 요구된다. 따라서 국내 연구자들은 대기, 수질, 토양에서의 6PPD 및 6PPD-Q 오염 수준을 정밀하게 분석하고, 이를 기반으로 국내 환경 특성에 적합한 정책적 대응 방안 제시가 필요하다.

감사의 글

This research was supported by the FRIEND (Fine Particle Research Initiative in East Asia Considering National Differences) Project through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science & ICT (NRF-2023M3G1A1090662 & NRF-2020R111A3054851).

References

- An, L., Liu, Q., Deng, Y., Wu, W., Gao, Y., Ling, W. (2020) Sources of microplastic in the environment, *Microplastics in Terrestrial Environments: Emerging Contaminants and Major Challenges*, 143-159. https://doi.org/10.1007/698_2020_449
- Brahney, J., Mahowald, N., Prank, M., Cornwell, G., Klimont, Z., Matsui, H., Prather, K.A. (2021) Constraining the atmospheric limb of the plastic cycle, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(16), e2020719118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2020719118>
- Brinkmann, M., Montgomery, D., Selinger, S., Miller, J.G.P., Stock, E., Alcaraz, A.J., Challis, J.K., Weber, L., Janz, D., Hecker, M., Wiseman, S. (2022) Acute toxicity of the tire rubber-derived chemical 6PPD-quinone to four fishes of commercial, cultural, and ecological importance, *Environmental Science & Technology Letters*, 9(4), 333338. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00050>
- Cao, G., Wang, W., Zhang, J., Wu, P., Zhao, X., Yang, Z., Hu, D., Cai, Z. (2022) New evidence of rubber-derived quinones in water, air, and soil, *Environmental Science & Technology*, 56(7), 4142-4150. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07376>
- Castan, S., Sherman, A., Peng, R., Zumstein, M.T., Wanek, W., Huffer, T., Hofmann, T. (2022) Uptake, metabolism, and accumulation of tire wear particle-derived compounds in lettuce, *Environmental Science & Technology*, 57(1), 168-178. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c05660>
- Deng, C., Huang, J., Qi, Y., Chen, D., Huang, W. (2022) Distribution patterns of rubber tire-related chemicals with particle size in road and indoor parking lot dust, *Science of The Total Environment*, 844, 157144. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157144>

- Du, B., Liang, B., Li, Y., Shen, M., Liu, L.Y., Zeng, L. (2022) First report on the occurrence of N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) and 6PPD-quinone as pervasive pollutants in human urine from South China, *Environmental Science & Technology Letters*, 9(12), 1056-1062. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00821>
- Fang, L., Fang, C., Di, S., Yu, Y., Wang, C., Wang, X., Jin, Y. (2023) Oral exposure to tire rubber-derived contaminant 6PPD and 6PPD-quinone induce hepatotoxicity in mice, *Science of The Total Environment*, 869, 161836. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161836>
- Ge, Y., Liu, J., Shi, R., Li, X., Zeb, A., Wang, Q., Wang, J., Zhao, Y., Yu, M., Yin, C., Xiong, H., Liu, W. (2024) Environmental concentrations of 6PPD and 6PPD-Q cause oxidative damage and alter metabolism in *Eichhornia crassipes*, *Science of The Total Environment*, 951, 175736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175736>
- Helm, P.A., Raby, M., Kleywegt, S., Sorichetti, R.J., Arabian, G., Smith, D., Howell, E.T., Thibeau, J. (2024) Assessment of tire-additive transformation product 6PPD-quinone in urban-impacted watersheds, *ACS ES&T Water*, 4(4), 1422-1432. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00589>
- Hiki, K., Asahina, K., Kato, K., Yamagishi, T., Omagari, R., Iwasaki, Y., Watanabe, H., Yamamoto, H. (2021) Acute toxicity of a tire rubber-derived chemical, 6PPD quinone, to freshwater fish and crustacean species. *Environmental Science & Technology Letters*, 8(9), 779-784. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00453>
- Hiki, K., Yamamoto, H. (2022) Concentration and leachability of N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) and its quinone transformation product (6PPD-Q) in road dust collected in Tokyo, Japan, *Environmental Pollution*, 302, 119082. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119082>
- Huang, W., Shi, Y., Huang, J., Deng, C., Tang, S., Liu, X., Chen, D. (2021) Occurrence of substituted p-phenylenediamine antioxidants in dusts, *Environmental Science & Technology Letters*, 8(5), 381385. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00148>
- Hu, X., Zhao, H.N., Tian, Z., Peter, K.T., Dodd, M.C., Kolodziej, E.P. (2022) Transformation product formation upon heterogeneous ozonation of the tire rubber antioxidant 6PPD (N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine), *Environmental Science & Technology Letters*, 9(5), 413-419. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00187>
- Hua, X., Wang, D. (2023) Tire-rubber related pollutant 6-PPD quinone: A review of its transformation, environmental distribution, bioavailability, and toxicity, *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132265. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132265>
- Jiang, Y., Wang, C., Ma, L., Gao, T., Wāng, Y. (2024) Environmental profiles, hazard identification, and toxicological hallmarks of emerging tire rubber-related contaminants 6PPD and 6PPD-quinone, *Environment International*, 187, 108677. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108677>
- Jin, R., Wu, Y., He, Q., Sun, P., Chen, Q., Xia, C., Huang, Y., Yang, J., Liu, M. (2023) Ubiquity of amino accelerators and antioxidants in road dust from multiple land types: Targeted and nontargeted analysis, *Environmental Science & Technology*, 57(28), 10361-10372. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01448>
- Klckner, P., Seiwert, B., Wagner, S., Reemtsma, T. (2021) Organic markers of tire and road wear particles in sediments and soils: transformation products of major antioxidants as promising candidates, *Environmental Science & Technology*, 55(17), 1172311732. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02723>
- Koelmans, A.A., Redondo-Hasselerharm, P.E., Nor, N.H.M., de Ruijter, V.N., Mintenig, S.M., Kooi, M. (2022) Risk assessment of microplastic particles, *Nature Reviews Materials*, 7(2), 138-152. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00411-y>
- Kumar, M., Xiong, X., He, M., Tsang, D.C., Gupta, J., Khan, E., Harrad, S., Hou, D., Ok, Y.S., Bolan, N.S. (2020) Microplastics as pollutants in agricultural soils, *Environmental Pollution*, 265, 114980. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114980>
- Lane, R.F., Smalling, K.L., Bradley, P.M., Greer, J.B., Gordon, S.E., Hansen, J.D., Kolpin, D.W., Spanjer, A.R., Masoner, J.R. (2024) Tire-derived contaminants 6PPD and 6PPD-Q: Analysis, sample handling, and reconnaissance of United States stream exposures, *Chemosphere*, 363, 142830. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142830>
- Li, Z.M., Kannan, K. (2024) Mass Loading, Removal, and Emission of 1,3-Diphenylguanidine, Benzotriazole, Benzothiazole, N-(1,3-Dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine, and Their Derivatives in a Wastewater Treatment Plant in New York State, USA, *ACS ES&T Water*, 4(6), 2721-2730. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.4c00221>
- Liang, Y., Zhu, F., Li, J., Wan, X., Ge, Y., Liang, G., Zhou, Y. (2024) P-phenylenediamine antioxidants and their quinone derivatives: A review of their environmental occur-

- rence, accessibility, potential toxicity, and human exposure, *Science of The Total Environment*, 948, 174449. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174449>
- Liao, X.L., Chen, Z.F., Ou, S.P., Liu, Q.Y., Lin, S.H., Zhou, J.M., Wang, Y., Cai, Z. (2024) Neurological impairment is crucial for tire rubber-derived contaminant 6PPDQ-induced acute toxicity to rainbow trout, *Science Bulletin*, 69(5), 621-635. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.12.045>
- Liu, L.Y., Salamova, A., Venier, M., Hites, R.A. (2016) Trends in the levels of halogenated flame retardants in the Great Lakes atmosphere over the period 2005-2013, *Environment International*, 92-93, 442-449. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.025>
- Liu, R., Li, Y., Lin, Y., Ruan, T., Jiang, G. (2019) Emerging aromatic secondary amine contaminants and related derivatives in various dust matrices in China, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 170, 657-663. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.12.036>
- Lo, B.P., Marlatt, V.L., Liao, X., Reger, S., Gallilee, C., Ross, A.R.S., Brown, T.M. (2023) Acute toxicity of 6PPD-quinone to early life stage juvenile chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) and coho (*Oncorhynchus kisutch*) salmon, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 42, 815822. <https://doi.org/10.1002/etc.5568>
- Luo, Z., Wang, H., Wang, Z., Zhang, X., Yan, C., Yu, R., Zhang, H., Hu, G., Xing, B. (2024) Tire and road wear particles contribute highly to N-(1,3-dimethylbutyl)-N'-phenyl-p-phenylenediamine (6PPD) and heavy metals in road dust on driving school grounds and their risk implications in China, *Environmental Technology & Innovation*, 36, 103816. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103816>
- Mao, T., Liu, W., Deng, J., Chen, C., Jia, T., Li, H., Yin, F. (2024) p-Phenylenediamines and p-phenylenediamine quinone derivatives in rubber consumer products and typical urban dust: Sources, transformation profiles, and health risks, *Environment International*, 192, 109042. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.109042>
- McIntyre, J.K., Prat, J., Cameron, J., Wetzel, J., Mudrock, E., Peter, K.T., Tian, Z., Mackenzie, C., Lundin, J., Stark, J.D., King, K., Davis, J.W., Kolodziej, E.P., Scholz, N.L. (2021) Treading Water: Tire Wear Particle Leachate Recreates an Urban Runoff Mortality Syndrome in Coho but Not Chum Salmon, *Environmental Science & Technology*, 55, 11767-11774. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c03569>
- Ng, E.L., Lwanga, E.H., Eldridge, S.M., Johnston, P., Hu, H.W., Geissen, V., Chen, D. (2018) An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems, *Science of The Total Environment*, 627, 1377-1388. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.341>
- Prosser, R.S., Salole, J., Hang, S. (2023) Toxicity of 6PPD-quinone to four freshwater invertebrate species, *Environmental Pollution*, 337, 122512. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122512>
- Rauert, C., Charlton, N., Okoffo, E.D., Stanton, R.S., Agua, A.R., Pirrung, M.C., Thomas, K.V. (2022) Concentrations of tire additive chemicals and tire road wear particles in an Australian urban tributary, *Environmental Science & Technology*, 56(4), 2421-2431. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c07451>
- Seiwert, B., Klöckner, P., Wagner, S., Reemtsma, T. (2020) Source-related smart suspect screening in the aqueous environment: search for tire-derived persistent and mobile trace organic contaminants in surface waters, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412, 4909-4919. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02653-1>
- Seiwert, B., Nihemaiti, M., Troussier, M., Weyrauch, S., Reemtsma, T. (2022) Abiotic oxidative transformation of 6-PPD and 6-PPD quinone from tires and occurrence of their products in snow from urban roads and in municipal wastewater, *Water Research*, 212, 118122. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118122>
- Sustainable Chemistry Catalyst (2023) Collaborative innovation forum: functional substitutes to 6PPD in tires. Meeting Report, 1-23. <https://static1.squarespace.com/static/633b3dd649ed62926ed7271t/63ee6cd15eb30a0fd4f0630d/1676569810601/6PPD-in-Tires-Innovation-Forum-Meeting-Report.pdf>
- Tian, Z., Gonzalez, M., Rideout, C.A., Zhao, H.N., Hu, X., Wetzel, J., Mudrock, E., James, C.A., McIntyre, J.K., Kolodziej, E.P. (2022) 6PPD-quinone: Revised toxicity assessment and quantification with a commercial standard, *Environmental Science & Technology Letters*, 9(2), 140-146. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00910>
- 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. (2021) A ubiquitous tire rubberderived chemical induces acute mortality in coho salmon, *Science*, 371(6525), 185-189. <https://doi.org/10.1126/science.abd69>
- Wagner, S., Hffer, T., Klöckner, P., Wehrhahn, M., Hofmann, T., Reemtsma, T. (2018) Tire wear particles in the aquatic environment-a review on generation, analysis, occur-

- rence, fate and effects, *Water Research*, 139, 83-100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.051>
- Wan, X., Liang, G., Wang, D. (2024) Potential human health risk of the emerging environmental contaminant 6-PPD quinone, *Science of The Total Environment*, 949, 175057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175057>
- Wang, W., Cao, G., Zhang, J., Wu, P., Chen, Y., Chen, Z., Qi, Z., Li, R., Dong, C., Cai, Z. (2022a) Beyond substituted p-Phenylenediamine antioxidants: Prevalence of their quinone derivatives in PM_{2.5}, *Environmental Science & Technology*, 56(15), 10629-10637. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02463>
- Wang, W., Cao, G., Zhang, J., Chen, Z., Dong, C., Chen, J., Cai, Z. (2022b) p-Phenylenediamine-derived quinones as new contributors to the oxidative potential of fine particulate matter, *Environmental Science & Technology Letters*, 9(9), 712-717. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.2c00484>
- Wu, Y., Venier, M., Hites, R.A. (2020) Broad exposure of the North American environment to phenolic and amino antioxidants and to ultraviolet filters, *Environmental Science & Technology*, 54(15), 9345-9355. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04114>
- Xu, S., Wang, Q., Lao, J.Y., Cao, Y., Hong, P., Chen, C., Lam, E.Y., Fang, J.K.H., Lee, S., Leung, K.M. (2024) Typical Tire Additives in River Water: Leaching, Transformation, and Environmental Risk Assessment, *Environmental Science & Technology*, 58(42), 18940-18949. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c05449>
- Yang, Y., Sun, N., Lv, J., Chen, H., Wang, H., Xu, J., Hu, J., Tao, L., Fang, M., Huang, Y. (2024) Environmentally realistic dose of tire-derived metabolite 6PPD-Q exposure causes intestinal jejunum and ileum damage in mice via cannabinoid receptor-activated inflammation, *Science of The Total Environment*, 918, 170679. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170679>
- Zhang, H.Y., Huang, Z., Liu, Y.H., Hu, L.X., He, L.Y., Liu, Y.S., Zhao, J.L., Ying, G.G. (2023) Occurrence and risks of 23 tire additives and their transformation products in an urban water system, *Environment International*, 171, 107715. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107715>
- Zhang, X., Peng, Z., Hou, S., Sun, Q., Yuan, H., Yin, D., Zhang, W., Zhang, Y., Tang, J., Zhang, S., Cai, Z. (2024) Ubiquitous occurrence of p-Phenylenediamine (PPD) antioxidants and PPD-quinones in fresh atmospheric snow and their amplification effects on associated aqueous contamination, *Journal of Hazardous Materials*, 465, 133409. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133409>
- Zhang, Y., Xu, C., Zhang, W., Qi, Z., Song, Y., Zhu, L., Dong, C., Chen, J., Cai, Z. (2021) p-Phenylenediamine antioxidants in PM_{2.5}: the underestimated urban air pollutants, *Environmental Science & Technology*, 56(11), 6914-6921. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04500>
- Zhao, H.N., Hu, X., Tian, Z., Gonzalez, M., Rideout, C.A., Peter, K.T., Dodd, M.C., Kolodziej, E.P. (2023) Transformation products of tire rubber antioxidant 6PPD in heterogeneous gas-phase ozonation: identification and environmental occurrence, *Environmental Science & Technology*, 57(14), 5621-5632. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08690>
- Zhu, J., Guo, R., Jiang, S., Wu, P., Jin, H. (2024) Occurrence of p-phenylenediamine antioxidants (PPDs) and PPDs-derived quinones in indoor dust, *Science of The Total Environment*, 912, 169325. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169325>

Authors Information

유근혜 (국립목포대학교 환경공학과 연구교수)
(fanygh89@mnu.ac.kr)

전하정 (국립목포대학교 환경공학과 석사연구원)
(s214210@365.mokpo.ac.kr)

배민석 (국립목포대학교 환경공학과 교수)
(minsbae@mnu.ac.kr)