

# 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향과 관리방안

Air Quality Impact and Management of Non-Exhaust Emissions in the Transportation Sector

최기철 | 서정빈 | 한지현 | 한세현



## 저자

최기철, 서정빈, 한지현, 한세현

## 연구진

**연구책임자** 최기철 한국환경연구원 연구위원

**참여연구원** 서정빈 한국환경연구원 연구원

한지현 한국환경연구원 부연구위원

한세현 (주)랩솔레미스 대표

## 연구자문위원(가나다순)

고상철 국립환경과학원 연구사

문난경 한국환경연구원 선임연구위원

이규진 아주대학교 교수

이석환 한국기계연구원 박사

이정은 한국환경연구원 부연구위원

임윤성 국립환경과학원 연구관

임종원 환경부 사무관

한진석 한국환경연구원 선임연구위원

| 정책보고서 2025-09 |

### 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향과 관리방안

Air Quality Impact and Management of Non-Exhaust Emissions in the Transportation Sector

© 2025 한국환경연구원

발행인 김 홍 균

발행처 한국환경연구원

(30147) 세종특별자치시 시청대로 370

세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)

전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799

www.kei.re.kr

인 쇄 2025년 9월 25일

발 행 2025년 9월 30일

등 록 제 2015-000009호 (1998년 1월 30일)

ISBN 979-11-5980-736-7 93530

인쇄처 세일포커스(주) 02-2275-6894

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.

최기철 외(2025), 「수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향과 관리방안」, 한국환경연구원.

값 7,000원

# 서 언

미세먼지 없는 깨끗한 대기환경은 인간 삶의 질과 건강, 나아가 사회적 행복을 좌우하는 중요한 요소입니다. 수송 부문은 오랫동안 대기오염물질 배출의 주요 원인으로 지목되어 왔으며, 차량 배출가스 관리 및 다양한 저감 정책 또한 꾸준히 강화되어 왔습니다. 이러한 노력으로 배기계(exhaust) 배출이 눈에 띄게 저감된 데 반해, 최근에는 많은 연구를 통해 타이어·브레이크 마모, 도로재비산먼지 등과 같은 비배기(non-exhaust) 배출원이 미세먼지와 초미세먼지 발생의 주요한 원인이 밝혀지고 있습니다. 특히 전기차와 같은 무공해차의 보급 확대에도 불구하고 이러한 비배기 배출은 오히려 더 심화될 수 있다는 점에서 주목할 필요가 있습니다. 전 세계적으로 비배기 배출이 차지하는 비중은 점차 커지고 있으며, 이에 따른 인체 건강 피해와 생태계 영향 역시 새로운 사회적 문제로 부각되고 있습니다. 우리나라 역시 교통 밀집 지역을 중심으로 비배기 배출 관리의 필요성이 커지고 있음에도 불구하고, 기존 정책은 여전히 배기 배출에 초점을 맞추고 있어 제도적 보완이 시급한 상황입니다. 이에 본 연구는 국내외 비배기 배출의 발생 현황 및 영향, 관리 정책 사례의 종합적인 분석을 통해 우리나라의 대기질 개선 및 교통 부문 환경정책 강화에 기여할 수 있는 제도 개선 방향을 제시하고자 합니다. 본 연구가 비배기 배출에 대한 사회적 인식 제고와 함께 향후 효과적인 관리 체계 수립을 위한 기초 자료로 폭넓게 활용되기를 기대합니다.

끝으로 본 연구를 수행한 한국환경연구원 기후대기연구본부 대기환경연구실의 최기철 박사, 한지현 박사, 서정빈 연구원, 랩솔레미스 한세현 대표께 감사를 포함합니다. 바쁘신 와중에도 자문을 통해 연구에 도움을 주신 환경부 임종원 사무관, 아주대학교 이규진 교수, 한국기계연구원 이석환 박사, 국립환경과학원 임윤성 연구관, 고상철 연구사께 깊은 감사를 드립니다. 또한 우리 원의 문난경 박사, 한진석 박사, 이정은 박사의 자문에도 감사를 포함합니다.

2025년 9월  
한국환경연구원  
원장 김 홍 균



# 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향과 관리방안

최기철 외

## 1. 서론

자동차로부터 발생하는 대기오염물질은 오랫동안 배출가스 중심으로 관리되어 왔다. 배출가스 규제 강화, 연료 품질 개선, 배출저감장치 보급 확대, 전기차·수소차와 같은 무공해차 보급 확대를 통해 자동차 배기 오염물질은 꾸준히 감소하고 있으며, 특히 대도시 대기질 개선에 중요한 성과를 거두고 있다. 그러나 이와는 달리 도로 주행 과정에서 발생하는 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로재비산먼지 등 이른바 비배기 배출은 여전히 줄어들지 않고 있으며, 오히려 전체 교통 부문에서 차지하는 비중이 점차 확대되고 있다. 그러나 현재까지 국내 관리체계는 배출가스 위주로 설계되어 있어 비배기 배출에 대한 과학적 근거와 정책적 대응이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 수송 부문의 오염원으로 향후 그 영향이 증가할 것으로 예상되나 관리 사각지대에 있는 비배기 배출로 인한 대기질 영향을 검토하고, 이를 관리하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 우선 국내외 비배기 배출 관련 연구 현황과 정책 동향을 조사하였으며, 국내 수송 부문 중 비배기 부문 배출량 추정과 함께 이에 기반한 국내 미세먼지 농도 영향도 함께 검토하였다. 마지막으로 국내외 관련 연구 및 정책 동향에 대한 검토 결과와 전문가 자문 및 사업장 의견 등을 종합하여 배출 관리 수단 및 정책에 대한 국내 도입 타당성 검토 결과와 비배기 배출 관리를 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 국내외 비배기 배출 관련 정책 현황

### 2.1 국내 정책 현황

국내 수송 부문 비배기 배출 관련 정책들을 검토한 결과, 크게 탄소중립 정책과 대기환경 정책으로 나누어 볼 수 있다.

탄소중립 정책은 온실가스 감축을 위한 정책이나 국가 핵심 전략으로서의 중요성을 가지고 있음에 따라 수송 부문에 대한 정책 현황을 살펴보고 이를 바탕으로 비배기 배출 관리를 위한 정책적 방안을 검토할 필요가 있다. 수송 부문에 대한 대부분의 정책은 친환경차 보급 촉진을 중심으로 온실가스 감축 효과가 있는 에너지 효율 개선 및 전환(전기 및 수소 등)에 집중하고 있다. 이를 통해 내연기관차 운행 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 근본적으로 줄여나가기 위한 정책으로 판단되며, 다만 친환경차에서도 여전히 배출되는 비배기 배출에 대한 관리는 향후 중요한 정책적 의제로 판단된다.

탄소중립 정책 중 대중교통 활성화, 자가용 내연기관차 수요관리는 전반적인 활동도 자체를 제어한다는 측면에서, 온실가스뿐만 아니라 발생하는 비배기 배출량에도 영향을 미치는 동시감축 전략으로 판단된다.

또한 형태개선을 통한 경제·친환경 운전 문화 확산은 그 과정에서 에너지 절감을 통한 온실가스 감축뿐만 아니라 높은 수준의 비배기 배출이 이루어지는 행위(급가속, 급제동 등) 개선을 통해 유의미한 감축 성과를 이루어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

대기환경 정책은 크게 『제3차 대기환경개선 종합계획』, 『제2차 미세먼지 관리 종합계획』 및 『제2차 대기환경관리 기본계획』이 해당된다. 최근 대기환경 정책의 주요 특징은 동시감축을 위해 탄소중립 수단을 활용하기 시작했다는 점과 비배기 배출 저감을 위한 사후 대책으로 도로재비산먼지 저감을 위한 도로청소차 운영 강화 대책이 안정적으로 추진되고 있다는 점이다. 『제2차 미세먼지 관리 종합계획』에서는 무공해차 보급 확대를 중심으로 배출가스에서 발생하는 대기오염물질 저감을 유도하는 것이 핵심이나, 단순히 배기가스를 줄이는 것을 넘어 비배기 배출 관리의 필요성을 명시적으로 언급한 점이 주목된다. 전기차와 수소차의 확대를 통해 배기가스 배출량의 근본적 저감은 가능하나, 타이어와 브레이크 마모 등 비배기 배출은 여전히 발생한다는 문제에 대한 공감대를 가지고 정책 방향을 제시하고 있는 것으로 보인다. 그러나 이러한 내용은 주로 연구개발 쪽에 초점을 맞추고 있으며, 정책에 대한 구체적인 실행 방향은 담고 있지 못하는 것으로 평가된다. 『제2차 대기환경관리 기본계획』에서는 대부분 다른 정책의 수단들과 유사한 부분이 많으나, 권역별 맞춤형 대책을 준비하면서 집중관리도로 설정 및 재비산먼지 측정 시스템 확충 등은 비배기 배출 관리 강화를 위한 기초적인 체계 확보 측면에서 긍정적으로 평가된다.

현재 수송 부문에 대한 국내 정책의 경우, 일부 탄소중립 정책과 대기관리 정책의 수단으로 비배기 배출 저감을 위한 방안이 도입되어 있다. 정책 수단의 주요 내용은 수송 분야 수요관리와 형태개선, 도로 청소차 운영 강화 등이며, 이는 이미 배출된 비배기 먼지의 후처리 저감 수단이라 할 수 있다. 국내에 이미 도입된 이러한 정책 수단들을 활용할 경우, 신규 제도 도입에 따른 규제 저항을 최소화하며 비배기 배출로 인한 영향을 줄여나갈 수 있는 단기 대응 방안으로 활용 가치가 높다고 판단된다.

## 2.2 국외 정책 현황

유럽연합은 EURO 7 규정을 통해 브레이크 분진과 타이어 마모를 형식승인 항목에 포함하고, UNECE는 GTR No.24(브레이크), R117 개정(타이어)을 통해 시험법 표준화를 진행하고 있다. 우리나라가 이 제도를 조기에 도입한다면 국내 자동차 부품 산업은 국제 규제 대응력을 확보할 수 있고, 대기질 관리체계도 한층 정교해진다. 그러나 측정 장비, 시험 인프라 구축에 상당한 초기 비용이 필요하며, 산업계의 기술 대응 부담도 적지 않다. 다만 우리나라 자동차 산업은 EU 시장 비중이 크기 때문에 중장기적으로 도입은 불가피하며, 유럽연합에서 실질적인 제도가 시작된 이후 2030년 전후로 점진적 도입이 현실적이다.

미국 캘리포니아와 워싱턴은 브레이크 패드의 구리 성분을 단계적으로 제한하고 있으며, 2025년부터는 사실상 제로 수준으로 관리한다. 그밖에 납, 크롬, 수은 등의 중금속 함량에 대한 규제도 포함한다. 우리나라 역시 브레이크 분진 내 금속 성분이 수질·생태계에 미치는 영향을 고려하면 화학물질 규제와 대기관리의 교차점에서 접근할 필요가 있다. 장점은 규제의 명확성과 환경적 파급 효과이며, 단점은 대체 소재 개발 부담과 부품 가격 상승 가능성이다. 현실적으로 우리나라는 자동차 부품 산업의 기술력이 높고 이미 국외 수출 대응을 위한 기반이 갖추어져 있어, 비교적 단기적으로 도입이 가능한 수단이라 생각된다.

그밖에 미국의 일부 주에서 시행하고 있는 자동차 중량에 따른 등록세는 환경이 아닌 시설 유지 및 안전 등의 이유로 도입된 제도임에도 불구하고, 자동차 중량과 밀접한 관련이 있는 비배기 배출 저감을 위한 새로운 대안으로서 가치가 있다고 하겠다. 당장의 도입 현실성은 낮으나 자동차 시장에서 중량 기반의 소비자 행태 변화를 위한 대안으로써 검토할 수 있을 것으로 생각된다. 도로에 대한 제한속도 규정은 대기질 개선을 포함한 여러 목적으로 시행되고 있음에도 불구하고, 대기질 개선 측면에서 반대 연구도 존재하는 만큼 신중하고 면밀한 검토가 필요하다.

### 3. 수송 부문 비배기 배출과 대기질 영향 검토

수송 부문에서 비배기 배출 영향이 증가할 것으로 예상되는 만큼, 국내외적으로 브레이크 및 타이어 마모 등으로 인한 비배기 배출 관련 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 최근 관련 선행 연구를 살펴보고, 이를 바탕으로 비배기 배출로 인한 대기질 영향을 검토하였다.

#### 3.1 비배기 배출 관련 국내외 연구 현황

우리나라는 비배기 배출 특성 파악을 위한 실험적 연구, 국내 적용 배출계수 개발 관련 연구 및 미국, 유럽의 비배기 배출량 산정방식을 적용한 국내 비배기 배출량 산정 관련 연구 등 수송 부문 비배기 배출과 관련된 연구들을 수행해 왔다. 실험을 통해 타이어 조성, 브레이크 패드 및 차종에 따른 미세먼지 발생 경향을 분석함으로써 국내 비배기 배출 특성 등을 이해하고자 노력해 왔으며, 이러한 실험적 연구를 기반으로 국내 적용 가능한 배출계수를 제안하기도 하였다. 현재 공식적으로는 비배기 배출량을 산정하고 있지 않지만, 미국이나 유럽 등의 다양한 비배기 배출량 산정방식을 적용한 국내 비배기 배출량 산정 연구를 통해 배출량을 시범 산정하고 비교하는 등의 노력을 지속해 왔다. 또한 최근에는 이를 기반으로 자동차 비배기 배출 미세먼지 배출량 분류체계 및 산정방법을 마련하여 제시하기도 하였다.

미국, 유럽 등에서는 이미 국가 배출량 인벤토리 내에 비배기 배출량을 반영하고 있을뿐더러, 차종·브레이크 재질·주행 조건 등을 고려한 세분화된 배출계수 개발 등을 통해 인벤토리를 개선하기 위한 연구들이 지속적으로 수행되었다. 배출량 산정 외에도 국제적인 규제 도입에 앞서 비배기 배출량 측정을 위한 표준 시험법을 개발하기 위한 연구 및 저감 기술의 효과를 분석하는 연구 등의 다양한 연구가 수행되고 있다.

국내외 연구를 통해 타이어 및 브레이크 마모 등으로 인한 비배기 배출은 수송 부문 미세먼지 관리 측면에서 점차 비중이 증가하는 핵심 요인임을 확인할 수 있었으며, 효과적인 비배기 배출 관리를 위해 우선되어야 할 배출 현황 파악을 위해서는 국내 실정을 반영할 수 있는 국가 고유 배출계수 개발 및 국가 차원의 인벤토리 구축을 위한 노력이 필수적이다.

#### 3.2 국내 수송 부문 비배기 배출 기여 추정

대기환경 관점에서 국내 비배기 배출의 중요성과 관리 방안 마련에 필요한 주요 특징들을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 국내 비배기 미세먼지 배출량을 추정하고, 대기질 모델링을 통해 국내 초미세먼지 농도에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 비배기 배출량 산정 방안은 관련 연구 검토 결과, 신뢰도가 높으며 추후 적용 가능성이 높은 방안을 중심으로 선정하였으며, 최근 국가미세먼지정보센터에서 추진한 자동차 비배기 마모 배출량 산정 방안 관련 연구를 참고하여 2021년에 대한 시범 분석을 진행하였다. 배출량 추정 결과, 수송 부문 비배기 배출량의 배출 기여는 PM<sub>10</sub> 기준으로 전체 도로이동오염원 배출량 대비 약 125%, PM<sub>2.5</sub> 기준으로 약 29% 수준이며, 이에 기반하여 도로 이동오염원 전체 배출량에서 차지하는 기여가 적지 않음을 확인하였다. 비배기 배출량에 대한 시범 분석 결과, 주로 도로 배출로 인한 영향이 큰 수도권과 주요 도심지를 중심으로 상대적으로 더 큰 것으로 확인되었으며 이러한 지역들에 대한 비배기 배출 관리가 향후 중요해질 것으로 생각된다.

대기질, 특히 초미세먼지 농도에 미치는 영향을 추정하기 위하여 대기질 모델링 기법을 활용한 수송 부문 비배기 배출 유무에 따른 영향을 분석하였다. 그 결과, 비배기 배출량을 고려한 경우, 그렇지 않은 경우에 비해 관측 대비 초미세먼지 농도 모사 성능이 훨씬 우수하게 나타났으며, 이러한 결과는 비배기 배출량을 고려하는 것이 좀 더 현실에 근접할 가능성이 높음을 시사한다. 국내 비배기 배출 유무에 따른 국내 초미세먼지 농도에 대한 기여도 모델링 실험 결과, 연평균 초미세먼지 농도 수준의 약 2.4%를 차지하는 것으로

분석되어 수송 부문 비배기 배출이 국내 대기질 농도에 유의하게 기여함을 확인하였다. 이러한 결과는 대기환경 정책 관점에서 수송 부문 비배기 배출에 대한 관리가 필요함을 시사한다. 다만, 본 분석은 여러 가정을 포함한 추정 연구로서, 향후 국내 실정을 반영한 비배기 배출량 산정 및 개선과 이로 인한 대기질 영향 분석을 통해 향후 정책 추진의 근거를 마련하기 위해 보다 다각적이고 심층적인 노력이 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 비배기 배출로 인한 대기오염 관리방안

### 4.1 수송 부문 비배기 배출 관련 사업장 의견 검토

본 장에서는 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기오염 관리방안 제안에 앞서 국내 관련 사업장 의견을 함께 검토하였으며, 관련 의견은 별도 서면을 통해 수집하였다. 브레이크 마모 관련하여 국내 가장 배출이 높은 대표 업체 한 곳과 타이어 마모의 경우 대한타이어산업협회를 통해 의견을 검토하였다.

브레이크 부문과 관련하여 EURO 7 규제 대응을 위하여 국내 업체에서도 유럽형 분진저감형 마찰재를 개발하고 있으며, 회주철 디스크에 레이저 클래딩 처리를 통한 배출 저감을 유도하기 위한 기술을 개발하고 있다. 또한 브레이크 분진은 브레이크 부품 외 자동차 전체적인 설계에 영향을 크게 받으며, 이에 따라 유럽에서도 브레이크는 신차에 대한 기준을 적용하고 애프터마켓 제품에 대한 별도의 규정을 도입하지 않고 있다. 또한 차량 구동계를 내연기관에서 하이브리드 또는 전기로 변경하는 것만으로도 회생제동 적용 등에 따라 배출계수가 감소하여 규제 대응을 위한 하나의 전략으로 보고 있다.

국내 제도 도입과 관련하여, 현재까지 유럽에서도 규제치와 평가 방법에 대해서는 어느 정도 윤곽이 잡혔지만 최종 확정되지 않은 상황이며, 인증 방법 및 절차 역시 아직 확정되지 않은 상황이다. 배출분진 평가 장비 간 편차가 크고, 아직 공식 인증된 평가 장비가 없으므로 공식적으로 제도 도입을 결정하기는 어렵다고 보인다. 유럽 법규 실행 및 제도가 안정적으로 이행된 이후(EURO 7 적용 이후 2~3년 이후로 예상)에 국내 적용을 검토할 수 있다는 의견을 회신하였다.

타이어 부문과 관련하여 협회에서는 타이어 마모 입자의 대기 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) 기여는 매우 낮은 수준으로 관리의 필요성에 대한 의문이 존재하며, 대부분 도로 입자와 타이어 입자가 결합된 형태로 존재하여 장거리 이동이 쉽지 않다는 연구 결과들이 발표되어 있다. 타이어 마모 입자는 비의도적으로 발생하는 것으로서 도로상 비플라스틱 물질과 혼합체로 존재하기 때문에, 향후 규제 적용 시 충분한 유예기간 부여와 함께 중장기적 대책을 통해 관리되기를 요청한다는 의견을 제시하였다.

또한 타이어와 자동차 업계의 저감 노력뿐만 아니라 마모 먼지의 약 절반을 차지하는 도로마모 입자를 고려하여 도로 관련 정부 및 지자체의 노력, 운전 습관 개선을 통한 규제 및 교육이 병행될 필요가 있다는 의견 역시 제시하였다.

### 4.2 국내 비배기 배출 관리방안

타이어 마모 및 브레이크 마모 배출과 관련하여 여러 분야에 걸쳐 논의가 이루어지고 있다. 본 연구에서는 대기오염 관점에서의 수송 부문 비배기 배출 관리의 필요성을 검토하기 위하여 국내 적용 가능한 산정 방법을 바탕으로 2021년에 대한 수송 부문 비배기 배출량을 시범 산정하였으며, 그 결과를 바탕으로 대기질 모사를 통해 비배기 배출로 인한 미세먼지 농도 영향 역시 검토하였다. 그 결과, 비배기 배출로 인한 국내 초미세먼지 농도 기여는 연평균 약 2.4% 수준으로 대기오염 주요 배출원으로서 영향을 미치는 것으로 판단된다.

비배기 관리를 위한 기본 방안으로 현재 국가 대기오염물질 배출 목록에서 고려하고 있지 못하는 수송 부문 비배기 배출원에 대한 추가 고려와 신규 배출원에 대한 종합적인 대기질 영향 평가가 우선적으로 필요하다. 학술적 연구와 정책 입안을 위한 기초 자료로서 국가 대기오염물질 배출 목록은 그 가치가 높으며, 비배기 배출 관리 정책 도입의 필요성 그리고 기대 성과 등을 검토하기 위해 중요한 근거로 활용될 수 있다. 비배기 관련하여 현재 국가 배출 목록에는 도로재비산먼지만 공식적으로 산정하고 있으며, 타이어 및 브레이크 마모로 인한 배출은 배출원 분류체계는 갖추고 있으나 배출량 자체는 제시하고 있지 않은 상황이다. 이에 대한 부분 역시 함께 제공되었을 때, 비로소 학술적 분석과 정책 검토가 원활하게 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. 비배기 배출로 인한 대기질 영향과 위해성 등 보건학적 영향 조사를 위해서는 비배기 배출량에 대한 성분 자료 역시 필요하다고 판단되며, 국내 도로 주행 특성 및 환경 등을 고려한 배출계수 개발 역시 그 신뢰성을 높이기 위한 과업으로 판단된다.

단기적으로 브레이크 및 타이어 마모에 대한 구체적인 정책 수립과 이행에 앞서 비배기 배출 영향을 최소화하기 위한 방안으로, 기존 탄소중립 및 대기환경 정책을 활용한 수송 분야 수요관리 및 사후 저감 대책 강화를 제안한다. 현재 중요하게 검토하고 있는 EURO 7 제도의 경우, 도입 계획과 기본적인 로드맵을 제시하고 있으나 관련 기술 및 측정 기술 표준화 등 구체적인 사안에 대한 최종 확정과 실제 이행되는 과정을 통한 조정 과정이 필요하며, 국내의 경우 유럽에서 진행되는 논의에 함께 참여하며 관련 동향을 면밀히 검토하는 과정이 요구된다. 단기 대책은 근본적인 대책 수립 및 추진 이전에 관련 배출 영향을 최소화하기 위한 전략으로 필요하다고 판단되며, 기존 정책 수단을 활용함으로써 원활한 이행이 가능할 것으로 기대된다.

브레이크 및 타이어 마모 먼지의 구성 성분에 따른 규제 역시 검토가 필요하다. 마모 먼지의 위해성은 구성 성분에 따라 상이하며, 미국 일부 주와 유럽 국가들은 브레이크 패드 내 중금속 함량에 대한 규제를 시행하고 있다. 국외 사례를 바탕으로 국내에서 판매하고 있는 브레이크 성분(중금속 등)에 대한 규정 마련이 필요하며, 일반 자동차는 물론 이륜차를 포함한 전체적인 검토가 필요하다.

저중량 차량 사용 유도는 기타 검토 사항으로 제안하고자 한다. 고중량 차량은 차량 이동에 필요한 에너지를 증가시키고 비배기 배출량 증가의 원인으로 작용하기에 저중량 차량으로의 유도가 필요하다. 국외 사례와 같이 차량 무게에 따른 등록세 부과를 검토할 수 있으나, 고중량 차량에 대한 통행료 부과, 공공주차장 추가요금 징수 또는 활용 제한, 공공부문 저중량 차량 우선 구매 등의 간접적인 유도 대책이 현실적일 것으로 판단된다. 다만 전기차는 별도의 규정 마련이 필요하다.

중기 대책으로 저마모 타이어 및 브레이크 보급 확대 방안을 제안한다. 유럽을 중심으로 진행 중인 논의에 참여하여 관련 제도의 도입 및 기술 개발, 보급 현황에 따라 국내에도 관련 제도 도입을 순차적으로 검토해야 한다. 다만 이러한 논의는 관련 업계의 기술개발 현황, 국외 제도 및 기술 도입 상황 등을 종합적으로 고려하여 단계적으로 도입할 필요가 있다. 우선적으로 등급제도 시행을 통해 소비자 인식 확대와 관련 시장의 대응 여력 확보 방안을 검토할 것을 제안하며, 공공기관 및 버스·택시 등 장거리 운행 차량을 중심으로 저마모 타이어 설치를 권고 또는 의무화하는 제도도 함께 제안한다.

## 5. 결론 및 연구의 한계

### 5.1 결론

본 연구를 통해 수송 부문 비배기 배출로 인한 미세플라스틱의 발생과 그에 따른 보건학적 영향뿐만 아니라 대기질에 미치는 영향도 적지 않음을 확인하였다. 이러한 결과는 대기환경 정책을 통한 비배기 배출 감축 수단 추진의 당위성 및 근거를 확보하였다는 의미가 있다.

배출 관리를 위한 기본적인 방향으로 구성 성분을 포함한 비배기 배출량 산정을 통해 학술적·정책적 기반 마련이 필요하며, 비배기 배출 관련 측정, 분석, 배출계수 산정 등 관련 기초 연구 및 저감기술 개발 등의 기술적 관리기반 역시 필요하다 하겠다. 이는 『제2차 미세먼지 관리 종합계획』을 기반으로 구체화하여 추진할 수 있을 것으로 판단된다.

비배기 배출 관리를 위해서는 단기적으로는 사후처리 대책(도로청소차 운행 강화 등, 대기환경 정책)과 수송 부문 수요관리 정책(탄소중립 정책)을 전략적으로 추진하고, 마모 먼지로 인한 위해도 저감을 위한 성분(중금속 등) 규제와 비배기 배출 증가에 기여하는 고중량 차량을 저중량 차량으로 유도하기 위한 대책(전기차 별도 규정)을 함께 검토할 것을 제안한다. 중장기적으로는 저마모 타이어 및 브레이크 기술 개발 및 인증기준 마련, 보급 확대 정책을 유럽 등 국외 추진 현황을 고려하여 단계적으로 도입할 것을 제안한다.

### 5.2 연구의 한계

본 연구에서는 신뢰할 수 있는 자료와 분석 방법 등을 활용하여 합리적인 결론을 제시할 수 있도록 하였으나, 현 수준에서 검토가 가능한 자료와 연구 방법이 한정되어 있고, 적용된 가정 등으로 인해 그 결과를 해석하는 데 있어 아래와 같은 한계가 있음을 명시한다.

국외 정책 사례 검토 결과, 유럽의 EURO 7 제도는 현재 어느 정도 확정된 것으로 알려져 있음에도 불구하고, 세부적으로는 관련 규정과 측정 방법 그리고 이와 관련된 기술 표준화 등이 최종적으로 확정되지 않은 상황이다. 이러한 불확실성을 감안하여 정책 추진 방안을 제안하였음에도 불구하고 그 결론과 향후 방향에 충분히 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구 결과를 활용하는 데 있어 이를 최소화하기 위해서는 관련 최신 동향에 대한 추가적인 검토가 함께 이루어질 필요가 있다.

국내 수송 부문 비배기 배출량 추정과 대기질 영향 분석은 현재 적용 가능한 가장 합리적인 방안을 검토하여 적용하였음에도 불구하고, 비배기 배출원 특성상 가지고 있는 높은 불확실성에 의해 정량적인 산정 결과의 한계 역시 존재한다. 이를 극복하기 위해서는 향후 국내 환경에 적합한 배출계수 개발 및 산정 방법 개선 역시 함께 요구된다. 국내 초미세먼지 농도 영향 추정 결과, 비배기 배출이 국내 대기질에 유의미한 영향을 미치는 주요 배출원으로 확인하였으나, 구체적인 기여 수준에 대해서는 불확실성이 존재함을 유의할 필요가 있다.

본 연구에서 도출된 대기환경 관점에서의 결과는 이로 인한 시장 가격 변동 및 안전 규정 대응 등 다양한 파생 요소까지 고려하지 않았으며, 실제 제도 도입 시 이러한 종합적 영향을 염두에 두고 신중하게 접근할 필요가 있다.

**주제어** 수송, 비배기 배출, 타이어, 브레이크, 대기질



# CONTENTS

수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향과 관리방안

---

국문요약	i
------	---

---

제1장	서론	
	1. 연구의 배경 및 필요성	1
	2. 연구 목적 및 주요 내용	4

---

제2장	국내외 비배기 배출 관련 정책 현황	
	1. 국내 정책 동향	5
	2. 국외 정책 동향	11
	3. 소결	20

---

제3장	수송 부문 비배기 배출과 대기질 영향 검토	
	1. 비배기 배출 관련 국내외 연구 현황	22
	2. 국내 수송 부문 비배기 배출 기여 추정	45
	3. 비배기 배출로 인한 대기질 영향 검토	59
	4. 소결	63

---

<b>제4장</b>	<b>비배기 배출로 인한 대기오염 관리방안</b>	
	1. 수송 부문 비배기 배출 관련 사업장 의견 검토	65
	2. 국내 비배기 배출 관리방안	67

---


<b>제5장</b>	<b>결론 및 연구의 한계</b>	
	1. 결론	70
	2. 연구의 한계	71

---

<b>참고문헌</b>		73
-------------	--	----

---

<b>Executive Summary</b>		79
--------------------------	--	----



## 표차례

표 2-1	EURO 7 도입에 따른 브레이크 마모 배출 기준 설정	13
표 2-2	캘리포니아 및 워싱턴주의 브레이크 중금속 성분 규제	16
표 2-3	워싱턴 D.C.에서 시행하는 자동차 중량 기반 등록비 부과 기준	18
표 3-1	국내 비배기 배출 관련 선행 연구 목록	23
표 3-2	한국기계연구원(이석환 박사) 제안 차량 등급별 타이어 마모 먼지의 배출계수	28
표 3-3	한국기계연구원(이석환 박사) 제안 차량 등급별 브레이크 마모 먼지의 배출계수	29
표 3-4	유럽 EEA 배출량 산정방법(Tier1, Tier2)을 이용하여 산정한 타이어 및 브레이크 마모로 인한 차종별 TSP, PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5</sub> 배출량	30
표 3-5	타이어 및 브레이크 마모로 인한 국가별 PM <sub>2.5</sub> 배출량	31
표 3-6	국가별 배출계수를 적용하여 산정한 타이어 및 브레이크 마모로 인한 PM 배출량	31
표 3-7	국내 비배기 마모 먼지 배출량 시범산정 결과 비교(2020년 기준)	33
표 3-8	미국 EPA MOVES 3의 차종 분류에 따른 타이어 마모 평균 배출계수 (2017년 기준)	34
표 3-9	미국 EPA MOVES 3의 차종 분류에 따른 브레이크 마모 평균 배출계수 (2017년 기준)	35
표 3-10	Tier2 타이어 마모, 브레이크 마모 산정식 관련 인자	39
표 3-11	EU-27 지역 및 그 인근 교외 지역에서의 연평균 RoWP(도로 마모 입자) 및 TWP(타이어·도로 마모 입자)량과 이에 따른 에어로졸 농도 증가( $\Delta C$ , $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	43
표 3-12	국내 비배기(타이어, 브레이크) 마모 먼지 배출계수(차종 및 규모별)	47
표 3-13	국내 자동차 타이어 및 브레이크 마모 먼지 입경분율	48
표 3-14	타이어 마모 먼지 입경분율 비교	48
표 3-15	브레이크 마모 먼지 입경분율 비교	48
표 3-16	비배기 마모 평균 차량속도 구간별 보정계수	49
표 3-17	비배기 마모 친환경차 보정계수(친환경차 중량 및 회생제동 고려)	49
표 3-18	국내 비배기 마모 배출량 산정을 위한 차종 매칭	50
표 3-19	2021년 기준 자동차 주행거리 현황(CAPSS 기준)	51
표 3-20	2021년 기준 차량 분류에 따른 연료별 VKT 비중(%) 현황(CAPSS 기준)	52
표 3-21	2021년 기준 자동차 비배기(타이어, 브레이크) 마모 먼지 배출량 산정 결과(요약)	53
표 3-22	2021년 기준 CAPSS 도로이동오염원 및 도로재비산먼지 배출량	54
표 3-23	2021년 기준 비배기 배출량과 CAPSS 자료(도로이동오염원, 도로재비산먼지) 비교	54
표 3-24	자동차 소분류(차급)별 비배기 마모 먼지 배출량 산정 결과(2021년 기준)	55

표 3-25	자동차 연료 구분별 비배기 마모 먼지 배출량 산정 결과(2021년 기준) .....	57
표 3-26	시도별 자동차 비배기 마모 배출량 산정 결과(2021년 기준) .....	57



## ■ 그림차례

그림 1-1	전기차로 인한 대기오염 관련 최근 언론보도 현황	2
그림 2-1	국가 탄소중립·녹색성장 기본계획 비전 및 수송 부문 정책 과제	6
그림 2-2	『제3차 대기환경개선 종합계획』 추진전략 및 2027년까지 로드맵	7
그림 2-3	『제2차 미세먼지 종합계획』 목표 및 비배기계 배출 관리 목표 현황	9
그림 2-4	『제2차 수도권 대기환경관리 기본계획』 목표 및 비배기계 배출 관리 목표 현황	10
그림 2-5	EURO 7 도입에 따른 타이어 마모 인증 기준 적용 일정	12
그림 2-6	PM 및 PN 샘플링 프로브 배치도	14
그림 2-7	영국 웨일스 정부에서 발표한 속도제한을 통한 대기질 개선 사례 소개	19
그림 3-1	상용차용 타이어 트레드 처방에 따른 PM 발생량 및 타이어 마모율	24
그림 3-2	상용차용 타이어 트레드 처방에 따른 PM 발생량 및 타이어 마모율(좌), PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub> 비율(우)	24
그림 3-3	브레이크 패드 및 차량 유형별 총 PM 배출 특성(배기관 1차 배출 및 비배기 배출)	25
그림 3-4	브레이크 패드 및 차량 유형별 총 PM 배출 특성(배기관 1차·2차 배출 및 비배기 배출)	26
그림 3-5	동력원별 타이어 마모량 실험 결과	27
그림 3-6	1차·2차 실험에 따른 차량별 및 브레이크 패드 마모량 분석 결과	27
그림 3-7	2015~2019년 자동차 등록 대수 및 자동차로 인한 배기-비배기 국가 PM <sub>2.5</sub> 배출량	32
그림 3-8	EU-27 지역 도로수송에서의 배출가스, 비배기 배출 및 총 PM 배출의 변화와 전망	40
그림 3-9	브레이크 패드 및 저감 조치 종류, 차량 질량에 따른 PM <sub>10</sub> 배출량	41
그림 3-10	GTR 관성 다이노 벤치 시험에서의 배출 측정 다이어그램	42
그림 3-11	차량 사용 단계에서 발생하는 타이어 배출물에 대한 개념적 노출 모델(CEM)	44
그림 3-12	자동차 소분류(차급)별 비배기 마모 먼지 배출량(위: PM <sub>10</sub> , 아래: PM <sub>2.5</sub> ) 산정 결과(2021년 기준)	56
그림 3-13	시도별 비배기 마모 먼지 배출량(위: PM <sub>10</sub> , 아래: PM <sub>2.5</sub> ) 산정 결과 (2021년 기준)	58
그림 3-14	비배기 배출로 인한 대기질 영향 분석을 위한 모델링 구성	60
그림 3-15	기준연도(2021년)에 대한 전국 일평균 PM <sub>2.5</sub> 관측농도와 9km 격자 해상도 모델 모의농도 시계열 비교	61
그림 3-16	기준연도(2021년)에 대한 전국 일평균 PM <sub>2.5</sub> 관측농도와 9km 격자 해상도 모델 모의농도 산포도 및 통계지표 비교	61
그림 3-17	비배기 배출로 인한 2021년 연평균 PM <sub>2.5</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 농도 분포 및 변화	62

그림 3-18	국내 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 및 수송 부문 비배기 배출 기여 .....	63
그림 4-1	유럽의 타이어 라벨 제도 .....	69





# 제 1 장

## 서론

1. 연구의 배경 및 필요성
2. 연구 목적 및 주요 내용

### 1. 연구의 배경 및 필요성

자동차로부터 발생하는 대기오염물질은 오랫동안 배출가스를 중심으로 관리되어 왔다. 배출 가스 규제 강화, 연료 품질 개선, 배출저감장치 보급 확대, 전기차·수소차와 같은 무공해차 보급 확대를 통해 자동차 배기오염물질은 꾸준히 감소하고 있으며, 특히 대도시 대기질 개선에 중요한 성과를 거두고 있다. 그러나 이와는 달리 도로 주행 과정에서 발생하는 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로재비산먼지 등 이른바 비배기 배출은 여전히 줄어들지 않고 있으며, 오히려 전체 교통 부문에서 차지하는 비중이 점차 확대되고 있다(이석환, 2024). 배기 배출 규제가 강화될수록 상대적으로 관리 사각지대에 놓인 비배기 배출의 관리 중요성은 더욱 커지고 있으며, 이는 향후 대기질 관리와 국민 건강 보호 차원에서 반드시 해결해야 할 과제로 부상하고 있다.

비배기 배출은 그 성격상 저감이 쉽지 않은 특성을 가진다. 타이어 마모 입자는 차량과 노면의 마찰에서 발생하며, 차량의 중량, 주행 속도, 타이어 재질에 따라 발생량이 크게 달라진다. 브레이크 마모 입자는 제동 과정에서 금속 성분이 포함된 미세입자가 배출되며, 이는 대기 중 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>에 직접적으로 기여한다. 도로재비산먼지는 도로 표면에 쌓인 먼지, 토양, 건설 잔재물 등이 차량 통행과 풍속 조건에 따라 재비산되는 형태로 발생한다. 이러한 비배기 배출은 배기 배출과 달리 특정한 연소 과정이 아니라 기계적 마찰, 재비산과 같은 물리적 작용으로 인해 발생하기 때문에 기존의 배출저감장치 적용이 어렵고 관리방법 또한 제한적이다.

비배기 배출이 가지는 문제는 단순히 대기질 악화에 국한되지 않는다. 우선 미세먼지의 발생원으로서 기여도가 크다. 최근 여러 연구에 따르면 대도시 교통밀집 지역에서 측정되는 도로변 PM<sub>2.5</sub> 및 PM<sub>10</sub> 농도의 상당 부분이 배기 배출이 아닌 비배기 배출에서 기인하는 것으로 나타났다. 특히 차량 통행량이 많은 도심이나 물류 거점 지역에서는 도로재비산먼지가 일시적으로 고농도 오염을 유발하며, 이는 주민 건강 위해성과 직결된다. 또한 타이어와 브레이크 마모 입자는 단순한 입자가 아니라 중금속과 유기화합물을 포함하는 경우가 많다. 구리, 아연, 납, 카드뮴과 같은 금속 성분이 포함될 수 있으며, 이는 호흡기 질환, 심혈관계 질환을 유발할 가능성이 제기되고 있다. 나아가 타이어 마모 입자는 고무 성분으로 이루어진 미세플라스틱으로 분류될 수 있으며, 빗물이나 하수도를 통해 하천과 해양으로 유입될 경우 생태계에도 광범위한 영향을 미칠 수 있다. 미세플라스틱은 수질과 토양을 오염시키며, 먹이사슬을 통해 다시 인체로 유입될 가능성이 있다는 점에서 중요한 환경문제로 떠오르고 있다.

특히 전기차 보급 확대와 같은 교통 패러다임 전환 속에서 비배기 배출의 중요성은 더욱 커질 전망이다. 전기차는 배출가스가 없다는 점에서 친환경차로 불리지만, 배터리로 인한 차량 무게 증가로 인해 타이어 마모가 늘어날 수 있다는 지적이 많다. 실제로 동일한 주행 조건에서 전기차가 내연기관차보다 더 많은 타이어 마모 입자를 발생시킬 수 있다는 연구 결과도 제시되고 있다. 따라서 ‘무공해차 보급이 곧 대기질 개선’이라는 단순한 공식은 더 이상 유효하지 않으며, 배기 배출과 비배기 배출을 아우르는 종합적 관리가 필요하다. 그렇지 않을 경우, 배출가스는 줄어들더라도 여전히 미세먼지 문제는 개선되지 않는 역설적 상황에 직면할 수 있다.



그러나 현재 비배기 배출에 대한 연구와 관리체계는 여전히 부족하다. 국가 배출목록에서는 배기 배출에 비해 비배기 배출량의 산정 범위가 제한적이며, 차량 유형, 도로 조건, 운전 패턴에 따라 달라지는 배출량 변동성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 이로 인해 비배기 배출의 불확실성이 높으며, 대기질 예측과 정책효과 분석의 신뢰성을 떨어뜨리고 있다. 또한 타이어·브레이크 마모 입자의 물리·화학적 특성에 대한 데이터베이스도 미비하다. 도로재비산 먼지의 경우 기상 조건, 교통량, 도로 청소 상태 등에 따라 시공간적으로 변동성이 큰데, 이를 반영한 고해상도 모니터링 체계가 아직 구축되지 않았다.

건강과 환경 위해성 연구 역시 초기 단계에 머물러 있다. 단기 노출과 급성 영향에 대한 연구는 일부 존재하지만, 장기 노출에 따른 만성적 건강 피해에 대한 체계적 연구는 부족하다. 특히 교통노선 주변 거주민, 운수 종사자, 도로 작업자 등 취약 집단에 대한 역학 연구가 절실하다. 또한 미세플라스틱으로서의 타이어 마모 입자가 해양·토양 생태계에 미치는 장기적 영향, 수계 전이 경로, 생태계 축적과 같은 문제는 아직 본격적으로 연구가 이루어지지 않았다. 이와 같은 과학적 근거 부족은 정책 수립과 국제 협력에도 제약 요인으로 작용하고 있다.

국제적으로도 비배기 배출에 대한 관심은 점차 확대되고 있다. 유럽연합(EU)은 2025년 이후 비배기 배출 시험방법과 규제 도입을 추진하고 있으며, 타이어·브레이크 입자 배출 측정을 위한 표준화 연구가 활발히 진행되고 있다. 국제표준화기구(ISO) 또한 관련 시험법 마련을 위한 논의를 이어가고 있다. 이러한 흐름 속에서 우리나라가 선제적으로 대응하지 못한다면 향후 국제 규제 도입 시 기술적·정책적 대응에 어려움이 발생할 수 있다. 반대로 국내 연구를 통해 독자적 관리 기준과 저감 기술을 확보한다면 향후 글로벌 환경규제 강화 국면에서 선도적 위치를 차지할 수 있다.

따라서 비배기 배출에 대한 종합적 연구가 시급하다. 구체적으로는 첫째, 국내 실정에 맞는 배출계수 개발과 국가 배출목록 개선이 필요하다. 둘째, 타이어·브레이크 입자의 물리·화학적 특성을 규명하고 건강·환경 위해성 평가를 위한 기초자료를 축적해야 한다. 셋째, 측정 및 모니터링 기술을 고도화하여 지역별·시기별 배출 특성을 정밀하게 파악할 수 있는 기반을 마련해야 한다. 넷째, 저마모·저금속 타이어와 브레이크 소재 개발, 도로 관리 강화, 교통량 관리 등 다양한 저감 대책을 검토할 필요가 있다. 마지막으로, 국제 규제 동향에 대응하기 위해 표준화된 시험방법 개발과 정책적 협력 기반을 마련해야 한다. 본 연구는 수송 분야 비배기 배출 관련 국내외 연구 및 정책 추진 현황에 대해 조사하고, 비배기 배출로 인한 대기질 영향에 대한 진단과 함께 이를 관리하기 위한 향후 방향에 대해 제안하는 내용으로 구성하였다.

자동차 비배기 배출은 과거에는 상대적으로 주목받지 못했던 분야였으나, 배기 배출이 줄어드는 현재와 미래에는 대기질 악화의 핵심 요인으로 자리 잡을 가능성이 크다. 국민 건강

보호, 대기질 개선, 국제 환경규제 대응이라는 세 가지 측면에서 비배기 배출 연구는 반드시 선행되어야 하며, 이는 향후 국가 대기환경 관리체계를 한 단계 더 발전시키는 중요한 기반이 될 것이다.

## 2. 연구 목적 및 주요 내용

자동차에서 발생하는 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로재비산먼지 등 비배기 배출은 배출가스 규제 강화와 친환경차 보급 확대에도 불구하고 줄어들지 않고 있으며, 도시 대기질 악화의 주요 원인으로 부상하고 있다. 특히 전기차 보급 확대에 따라 차량 중량 증가로 타이어 마모량이 오히려 늘어날 가능성이 제기되고 있어, 향후 비배기 배출의 상대적 중요성은 더욱 확대될 것으로 예상된다. 그러나 현재까지 국내 관리체계는 배출가스 위주로 설계되어 있어 비배기 배출에 대한 과학적 근거와 정책적 대응이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 수송 부문의 오염원으로 향후 그 영향이 증가할 것으로 예상되나 관리 사각 지대에 있는 비배기 배출로 인한 대기질 영향을 검토하고, 이를 관리하기 위한 방안을 제시하고자 한다. 이를 위해 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향 분석을 통해 효과적인 비배기 배출 오염 관리를 위한 기초를 마련하고, 현재 별도의 저감 정책이 없는 비배기 오염원의 관리방안을 제안하여 새로운 대기환경 정책 기반을 제시하고자 한다.

이를 위해 본 보고서에서는 우선 국내외 비배기 배출 관련 연구 현황과 정책 동향을 조사하였다. 비배기 배출 관련하여 배출량 측정 및 산정, 저감 기술, 배출 영향 등에 관한 최근 연구 현황과 이를 관리하기 위한 최근 정책 동향, 특히 유럽을 중심으로 이루어지고 있는 주요 동향에 대해 조사를 수행하였다. 또한 국내 도입 가능성을 고려하여 비배기 배출 관련 가용한 정책 수단에 대해서도 검토하였다. 그 과정에서 국가 공식 배출목록에서 아직 반영하고 있지 않은 비배기 배출량에 대한 추정방안도 함께 검토하였다.

다음으로 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향에 대한 분석을 수행하였다. 앞서 검토한 배출량 산정방안에 따라 국내 수송 부문에서의 비배기 배출량을 추정하고, 이와 함께 실제 모델링 기법을 통해 국내 미세먼지 농도에 미치는 영향과 시사점을 분석하였다.

마지막으로 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기오염 관리방안에 대해 제안하였다. 국내외 관련 연구 및 정책 동향에 대한 검토 결과와 전문가 자문 및 사업장 의견 등을 종합하여 배출 관리 수단 및 정책에 대한 국내 도입 타당성 검토 결과와 비배기 배출 관리를 위한 방안에 대해 제시하였다. 본 연구의 결과를 바탕으로 향후 국내 비배기 배출 분야 관리를 통해 대기질 개선에 기여하고자 한다.

# 제 2 장

## 국내외 비배기 배출 관련 정책 현황

1. 국내 정책 동향
2. 국외 정책 동향
3. 소결

### 1. 국내 정책 동향

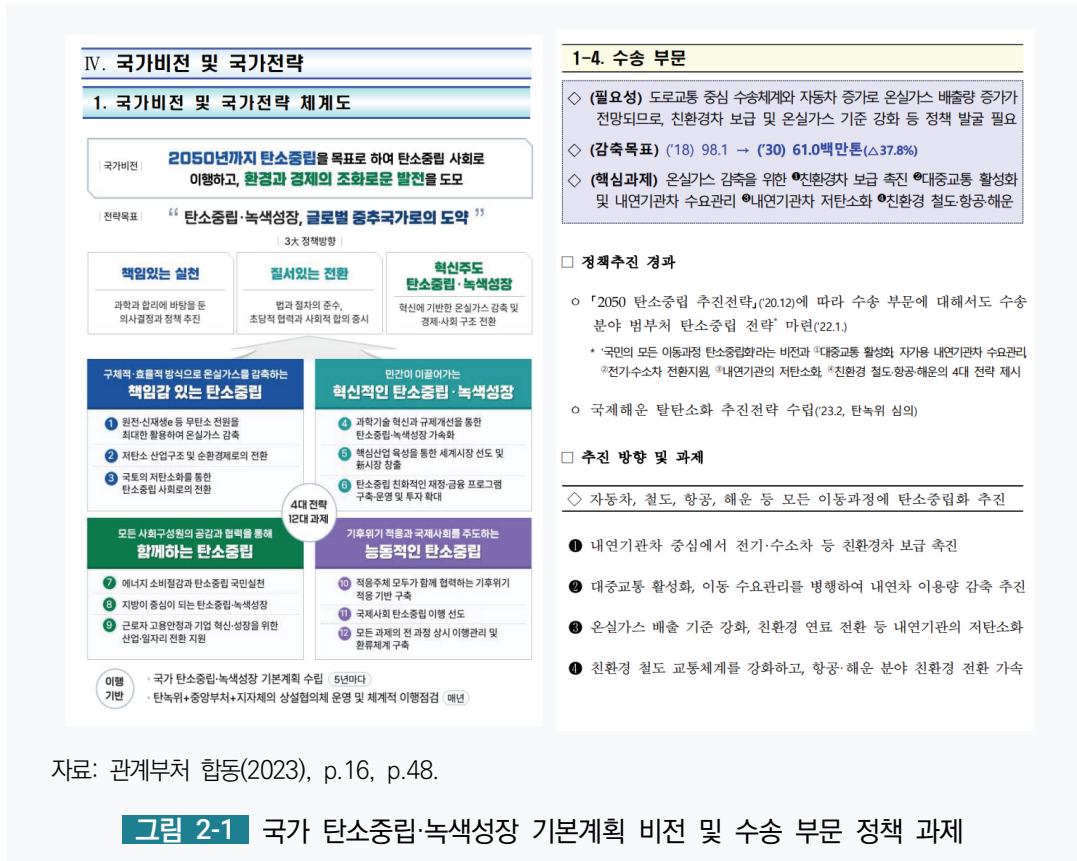
#### 가. 탄소중립 정책

우리나라는 2050년까지 탄소중립을 달성하겠다는 목표를 천명하고, 이를 달성하기 위한 중간 목표로 2021년 11월 ‘국가 온실가스 감축목표(NDC: Nationally Determined Contribution) 상향안(이하, 2030 NDC 상향안)’을 국제 사회에 발표하였으며, 이를 실천하기 위한 전략으로 2023년 3월 관계부처 합동으로 『국가 탄소중립·녹색성장 기본계획』을 수립하였다. 탄소중립 정책은 온실가스 감축을 위한 정책이나 국가 핵심 전략으로서의 중요성을 가지고 있음에 따라 수송 부문에 대한 정책 현황을 살펴보고 이를 바탕으로 비배기 배출 관리를 위한 정책적 방안을 검토하고자 한다. 본 장에서는 주로 『국가 탄소중립·녹색성장 기본계획』을 중심으로 살펴보았다.

수송 부문에 대한 탄소중립 정책의 첫 번째 전략은 전기·수소차 등 친환경차 보급 촉진이다(관계부처 합동, 2023). 세부적인 전략으로는 전기·수소차 구매 및 판매 촉진과 생산체계 구축 및 평가 기반 마련, 충전 기반 등 인프라 구축을 제시하고 있다. 이를 통해 내연기관차 운행 과정에서 발생하는 온실가스 배출을 근본적으로 줄여나가기 위한 정책으로 판단되며, 다만 서론에서 언급한 바와 같이 친환경차에서도 여전히 배출되는 비배기 배출에 대한 관리는 향후 중요한 정책적 의제로 판단된다.

두 번째 전략으로 대중교통 활성화, 자가용 내연기관차 수요관리를 제시하고 있다(관계부처 합동, 2023). 이는 공공교통과 비에너지 이동수단(자전거 및 도보 등) 장려, 시스템 및 제도

개선 등을 통해 온실가스 배출이 이루어지는 자동차 수요관리에 관한 것으로 해석된다. 활동도 자체를 제어하는 본 전략은 온실가스뿐만 아니라, 발생하는 비배기 배출량에도 영향을 미치는 동시감축 전략으로 판단된다.



자료: 관계부처 합동(2023), p.16, p.48.

**그림 2-1** 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획 비전 및 수송 부문 정책 과제

세 번째 전략으로 내연기관차의 저탄소화를 제시하였다(관계부처 합동, 2023). 이를 달성하기 위한 세부 내용으로 LCA(전 주기 평가)를 고려한 온실가스·연비 기준 강화, 환경친화적인 자동차 활성화를 위한 세제 개편 추진, 내연차의 무공해 전환 가속화 유도, 형태개선을 통한 경제·친환경 운전 문화 확산을 들 수 있다. 이러한 정책 수단들은 대부분 고효율 내연기관 및 친환경 차량으로의 전환을 장려하기 위한 것으로, 온실가스 감축에는 효과적이거나 비배기 배출 저감과는 크게 관련이 없는 것으로 해석된다. 다만 형태개선을 통한 경제·친환경 운전 문화 확산은 그 과정에서 에너지 절감을 통한 온실가스 감축뿐만 아니라 높은 수준의 비배기 배출이 이루어지는 행위(급가속, 급제동 등) 개선을 통해 유의미한 감축 성과를 이루어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

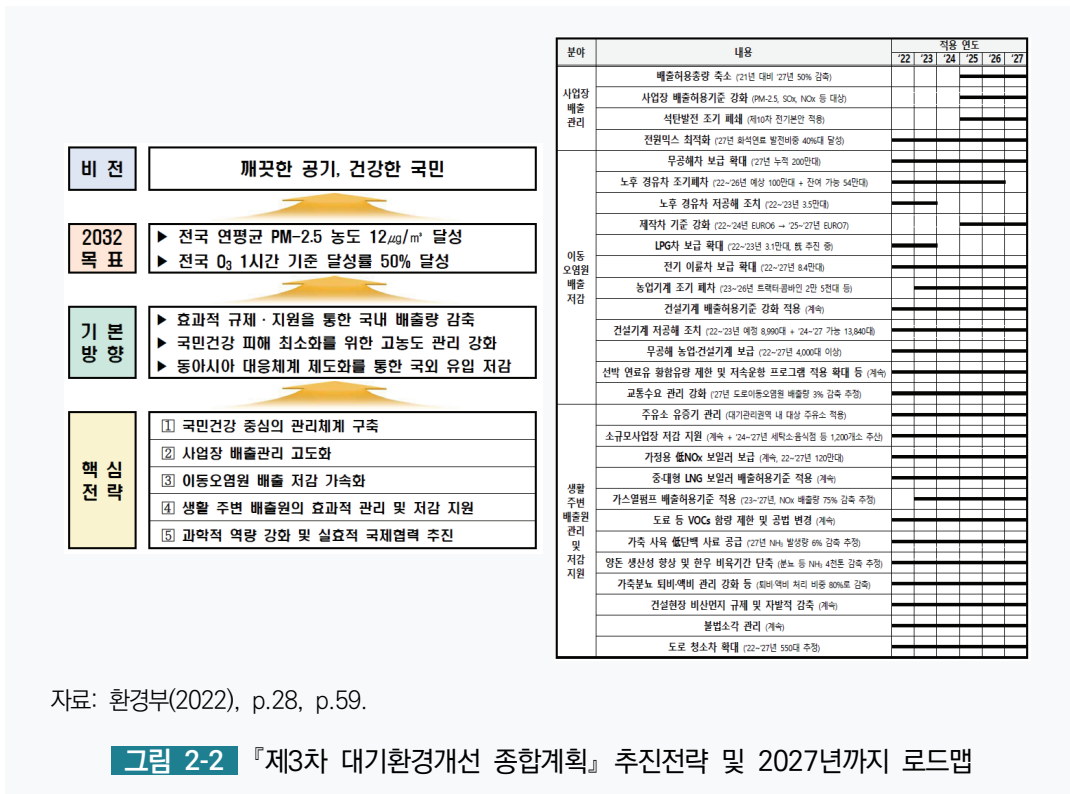
네 번째 전략은 친환경 철도·항공·해운으로, 도로교통 외 철도 및 항공, 해운에서 발생하는 온실가스를 감축하기 위한 전략이다(관계부처 합동, 2023). 다만 본 연구에서 다루고자 하는 수송 부문 비배기 배출 관리와 연관이 없어 해석에서 제외하였다.

이처럼 탄소중립 정책은 기본적으로 온실가스 감축을 주목적으로 수립된 것으로, 수송 부문 정책 역시 대부분 에너지 저감 및 전환에 집중하고 있다. 다만 일부 세부 정책(수요관리 및 행태개선 등)들은 정책 내용상 비배기 배출 저감에 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 비배기 배출 관리 전략의 효과적인 수단으로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

### 나. 제3차 대기환경개선 종합계획

국내 대기질 관리를 위한 장기 전략으로 대기환경개선 종합계획이 있다. 본 계획의 법적 근거는 「대기환경보전법」 제11조에 두고 있으며, 대기환경 개선을 위한 향후 10년간의 정책 방향과 대책 등을 제시하는 대기오염 분야 최상위 전국 단위 계획이라 하겠다. 수립 주체는 환경부 장관으로, 최근에 수립된 『제3차 대기환경개선 종합계획』(환경부, 2022)은 2023~2032년까지의 대기환경 정책을 제시하고 있다.

수송 부문은 대기오염에 기여가 높은 핵심 배출원으로 별도의 관리 전략을 수립하고 있다. 크게는 무공해차 전환 확대, 노후 경유차 등 퇴출 가속화, 내연기관차 관리 강화, 이륜차 및 농업·건설 기계 저감 확대, 해양항공 배출원 관리 강화, 교통 수요관리 강화로 구성되었다.



자료: 환경부(2022), p.28, p.59.

**그림 2-2** 『제3차 대기환경개선 종합계획』 추진전략 및 2027년까지 로드맵

대기환경개선 종합계획은 대기오염물질 배출량을 줄이기 위한 기본적인 목적에 충실하여 배출 우선순위가 높은 배출원을 중심으로 설계되었으며, 수송 부문의 경우 배출가스 저감을 위한 방안들이 핵심으로 자리 잡고 있다. 다만 도로 청소차 확대 도입 등 비배기 배출 저감을 위한 정책 수단들이 포함되어 있으며, 기존과 달리 탄소중립 수단들이 최초 도입되면서 비배기 배출 저감에 효과가 있을 것으로 예상되는 교통수요 관리 강화 정책이 수송 부문 핵심 전략 중 하나로 포함되었다.

## 다. 제2차 미세먼지 관리 종합계획

우리나라는 미세먼지 문제 해결을 위한 『제1차 미세먼지 관리 종합계획』(관계부처 합동, 2019) 수립 이후 빠르게 미세먼지 수준이 개선되면서 목표를 달성한 것으로 평가되며, 최근 제2차 계획까지 발표하며 장기적 관점에서 미세먼지 관리를 지속하고 있다. 『제2차 미세먼지 관리 종합계획』(관계부처 합동, 2024)은 관계부처 합동으로 수립된 국가 차원의 전략으로, 2025년부터 2029년까지 산업, 발전, 수송, 생활 등 주요 배출원을 포괄하여 미세먼지 저감을 추진하는 종합계획이다. 본 계획의 법적 근거는 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 제7조에 두고 있으며, 5년마다 계획을 수립하여야 한다. 본 계획의 관리 물질은 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>), 황산화물(SO<sub>x</sub>), 질소산화물(NO<sub>x</sub>), 휘발성유기화합물(VOCs), 암모니아(NH<sub>3</sub>)이며, 이에 따라 수송 부문 비배기 배출에 대해 초미세먼지 관점에서 전략 수립이 가능할 것으로 보인다. 종전과 달라진 부문으로는 미세먼지·온실가스 동시 감축을 통해 배출량 감축 성과를 높이고, 국민 생활 주변 미세먼지 집중 저감, 지역 맞춤형 정책 기반 마련 등이 있다. 이러한 정책의 목표 변화는 비배기 배출 관리의 필요성과도 일맥상통하는 것으로 보인다.

수송 부문에서의 정책 추진 내용들은 무공해차 보급 확대를 중심으로 배출가스에서 발생하는 대기오염물질 저감을 유도하는 것이 핵심이나, 단순히 배기가스를 줄이는 것을 넘어 비배기 배출 관리의 필요성을 명시적으로 언급한 점이 주목된다. 전기차와 수소차의 확대를 통해 배기가스 배출량은 근본적인 저감이 가능하나, 타이어와 브레이크 마모 등 비배기계 배출은 여전히 발생한다는 문제에 대한 공감대를 가지고 정책 방향을 제시하고 있는 것으로 평가된다. 이에 따라 종합계획에서는 자동차 비배기계 배출 관리기반 마련, 비배기계 배출량 산정체계 구축, 비배기계 배출 제작차 인증기준 마련 및 비배기계 배출 마모 먼지 저감기술 및 제거기술 연구개발에 대한 내용을 중요 정책 방향으로 제시하였다.

V. 비전 및 목표	
비전	미세먼지 걱정 없는 푸른 하늘, 건강한 국민
목표	2029년 전국 연평균 초미세먼지 농도 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 달성 ※ 2021년(18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 대비 연평균 초미세먼지 농도 27% 이상 저감
핵심 전략	중점 추진과제
1) 핵심배출원 미세먼지 및 온실가스 동시감축	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ (산업) 사업장 배출총량 축소 및 관리 고도화</li> <li>◆ (수송) 무공해차 보급 가속화</li> <li>◆ (발전) 석탄화력 감축 및 무탄소 전원 확대</li> <li>◆ (농축산) 축산 환경관리 및 사육방식 개선</li> </ul>
2) 국민 생활주변 미세먼지 집중관리	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 미세먼지로부터 안전한 실내환경 조성</li> <li>◆ 생활공간 주변 대기오염 취약지역 집중 저감</li> <li>◆ 휘발성유기화합물 관리 강화</li> </ul>
3) 민감·취약계층 건강보호	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 미세먼지 고농도시기 저감 강화</li> <li>◆ 민감·취약계층 건강보호 조치 다각화</li> </ul>
4) 과학적 기반 강화	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 미세먼지 측정·예보 고도화</li> <li>◆ 미세먼지 및 그 생성물질의 연구 및 기술 개발</li> <li>◆ 지역 맞춤형 미세먼지 관리 지원</li> </ul>
5) 실효적 국제협력 확대	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ 한·중·일 협력 내실화</li> <li>◆ 국제기구와 아시아 대기개선 협력</li> <li>◆ ODA 연계 등을 통한 대기산업 해외진출 지원</li> </ul>

- 자동차 배출가스 결합확인검사 대상 범위를 EU 수준으로 확대 (현행 5년 또는 10만km → 8년 또는 16만km)하여 제작사 생산 책임 강화
- 경유차 배출가스 관리 강화를 위해 질소산화물(NOx) 정밀검사 대상 지역을 현행 수도권에서 대기관리권역으로 확대 시행(25-)
- 자동차 타이어·브레이크 마모 등 비배기계 관리기반 마련
  - 자동차 배기가스에서 배출되는 오염원 외 타이어·브레이크 패드 마모먼지에 대한 자동차 비배기계 관리기반 마련
  - 실측 기반으로 국내 타이어·브레이크 패드 마모 배출량 배출계수 개발 등 국내 비배기계 부문 배출량 산정체계 구축(25)
  - EU기준 등 국제표준을 반영한 비배기계 제작 인종기준 마련 추진(27-)
  - 비배기계 마모먼지 저감기술 개발, 집진/흡입 성능평가 등을 위한 연구 및 기술개발\* 추진
    - \* Net-zero 미세먼지저감기술개발사업 내 전기차 비배기 미세먼지 집진 기술 개발(23~27)
- 내연기관차 온실가스 배출허용기준 개선
  - 2030 NDC, 해외동향 등을 고려한 '26~30년까지의 소형차 온실가스 배출허용기준 제검토(25)
    - ※ 관련 고시 의거 소형차 온실가스 기준(26~30)에 대한 적정성 여부 중간검토 실시
  - 중대형 상용차(3.5톤 이상)는 '25년까지 자발적 감축 기간'을 거쳐 관계부처, 업계협의 등을 통해 온실가스 의무 감축제도 도입(26)
    - \* (자발적 감축 현황) 기준 연도(21~22년) 대비 <sup>(23)</sup> 2% → <sup>(24)</sup> 4.5% → <sup>(25)</sup> 7.5% 감축

자료: 관계부처 합동(2024), p.23, p.38.

**그림 2-3 『제2차 미세먼지 종합계획』 목표 및 비배기계 배출 관리 목표 현황**

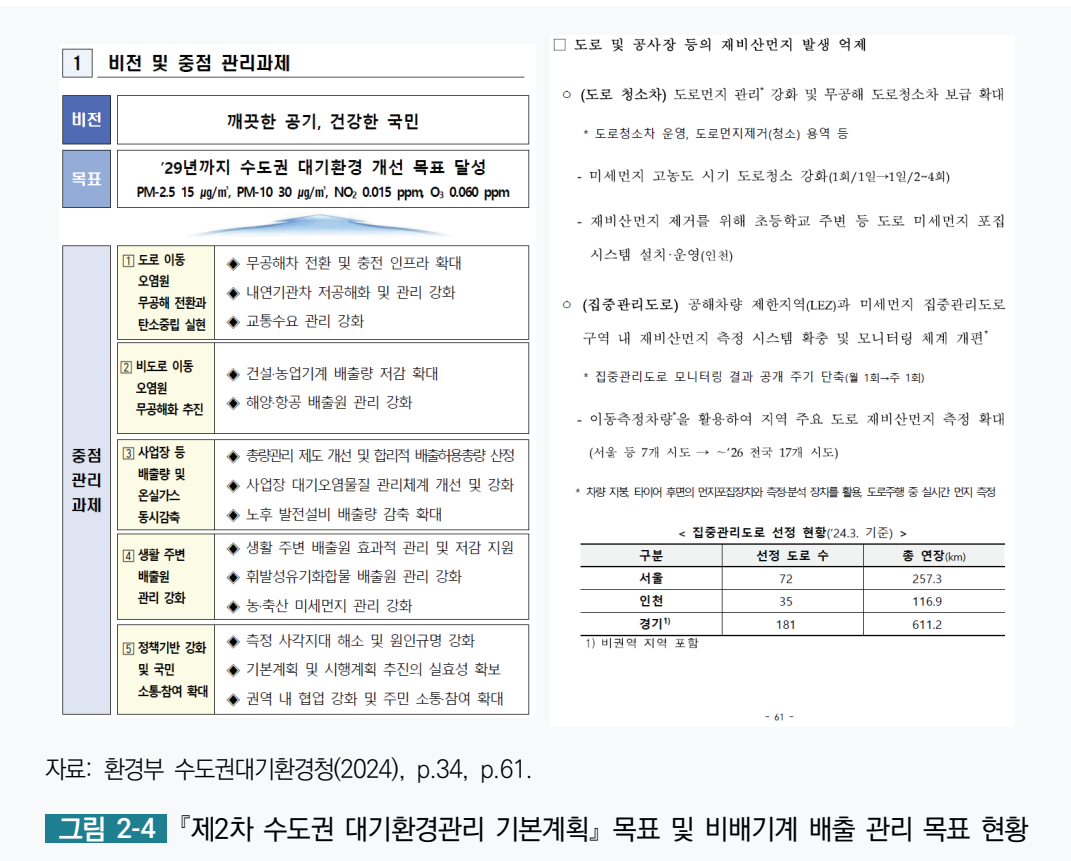
그러나 이러한 내용은 주로 연구개발 쪽에 초점을 맞추고 있으며, 정책에 대한 구체적인 실행 방향은 담고 있지 못하는 것으로 평가된다. 종합계획에서 비배기 배출은 전략적 과제로 제시되었지만, 구체적인 정책방안이나 예산 배분, 실행 로드맵은 제시되지 않았다. 따라서 현 단계에서는 비배기 배출 관리 필요성에 대한 정책적 인식이 공유된 수준으로 볼 수 있으며, 실질적인 효과를 거두기 위해서는 후속 세부계획이나 이행계획으로의 구체화가 필요하다. 특히 『제2차 미세먼지 관리 종합계획』에서 2029년까지 국내 초미세먼지 농도 수준을 13 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮추겠다는 강도 높은 목표를 제시한 상황임을 고려할 때, 향후 수송 부문에서 주 배출원으로 자리매김하고 있는 비배기 배출에 대한 보다 구체적인 영향 분석과 관리방안의 검토가 필요하다 하겠다.

## 라. 제2차 대기환경관리 기본계획

2025년부터 2029년까지 적용되는 『제2차 대기환경관리 기본계획』은 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법」 제9조에 따라 환경부 장관이 수립하는 법정 기초계획으로, 수도권을 포함한 대기관리권역에서 대기오염물질 농도를 과학적 기준과 목표하에 단계적으로 감축하는데 목적을 두고 있다. 주요 관리 대상은 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, VOCs로 설정되어 있으며, 수도권의 경우 PM<sub>2.5</sub> 연평균 목표치를 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하여 국민 건강과 생활환경

개선을 지향하고 있다(환경부 수도권대기환경청, 2024). 권역별 대기환경관리 기본계획은 각 권역의 조건에 맞추어 대기질 달성 목표와 목표 달성을 위한 중점과제를 설정하고 있어 권역(지역) 맞춤형 계획이라는 특징을 갖는다. 중점 추진방향으로 이동오염원 지속 관리 및 비산먼지·불법소각 등 생활오염원 집중 관리, 사업장 배출관리 고도화(최적방지시설 기준 등을 고려한 배출허용총량 합리적 산정, IoT 부착 단계적 의무화 등을 통한 감시 고도화), 과학적 대기관리 역량 강화를 통한 세밀한 배출원 관리, 지역 현안 해결을 위한 당사자 소통 강화로 실효적 정책 이행을 제시한다.

대기환경관리 기본계획에서는 수송 부문에 대한 관리 전략으로 무공해차 전환 및 충전 인프라 확대, 내연기관차 저공해화 및 관리 강화, 교통수요 관리 강화 등을 포함하고 있다. 이러한 전략을 통해 친환경차의 도입 확대와 함께 기존 내연기관 배출가스 관리 강화, 탄소중립 정책과 연계한 통합 전략 추진 등을 이루어낸 것으로 평가되며, 그 결과 배출가스 저감과 함께 일부 비배기 부문까지 포함한 전반적인 수송 부문 배출 감축을 유도한 것으로 평가된다.



도로이동오염원에 대한 관리 전략 외에도 비도로이동오염원, 건설, 농기계, 선박 등을 포함한 관리 전략을 포함하고 있으며, 이를 통해 이동오염원 전반에 걸쳐 대기오염물질 배출 저감을 이루어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

현 정책의 한계로는 비배기 배출 저감 관점에서 생활오염원으로 분류된 도로재비산먼지 배출 저감을 위한 도로청소차량 운영 등의 일부 사후 배출 감축 정책만을 제시한 것은 여전히 한계로 판단되며, 다만, 집중관리도로 설정과 재비산먼지 측정 시스템 확충 등은 비배기 배출 관리 강화를 위한 기초를 마련했다는 측면에서 긍정적으로 평가된다.

## 2. 국외 정책 동향

수송 부문 비배기 배출 관리 정책은 유럽연합에서 선도적으로 추진하고 있으며, 그 외 국가는 자국의 배출 저감보다는 유럽 수출 및 시장 대응을 고려하여 대응방안을 고려하고 있으며, 대부분 기초 연구 수준에서 진행되는 것으로 파악된다. 이에 따라 국외 정책 동향은 유럽연합 및 국가들을 중심으로 살펴보고, 그 외 국가들의 경우 비배기 배출 관리 관점에서 참고할 만한 주제별 정책 내용들을 검토하는 수준에서 다음과 같이 조사한 결과를 정리하였다.

### 가. 유럽연합 동향

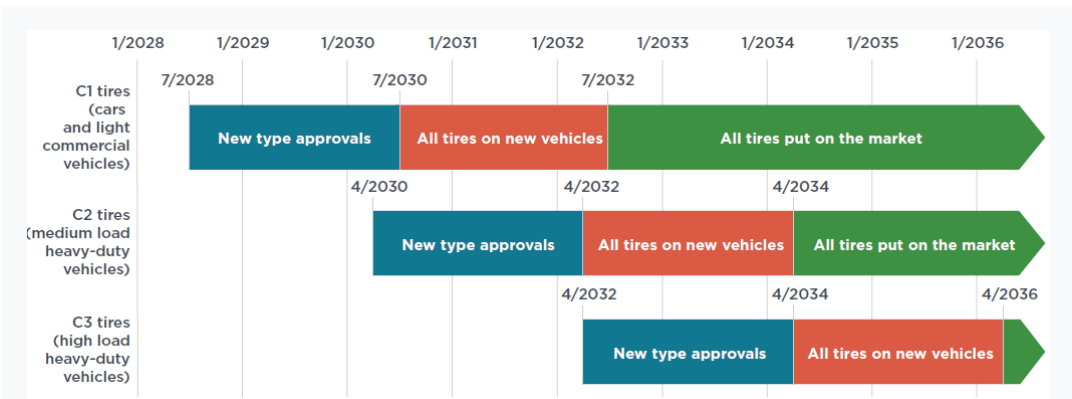
#### 1) 법·제도 도입 현황

유럽연합은 전 세계에서 최초로 자동차의 비배기 배출을 제도적으로 규제하는 체계를 마련하였다. 2024년 4월 최종 채택되어 같은 해 5월 발효된 EURO 7 규정은 기존의 EURO 6 체계를 대체하면서, 자동차 및 엔진뿐 아니라 브레이크와 타이어를 독립적인 형식승인 대상에 포함시켰다.<sup>1)</sup> 이는 단순히 연소 과정에서 발생하는 배기가스 관리에 머무르던 기존 접근에서 벗어나, 교통 활동 전체 과정에서 발생하는 입자성 오염물질까지 포함하겠다는, 수송 부문으로 인한 대기오염 관리의 새로운 패러다임 변화를 의미한다. 법·제도적 내용은 ICCT(The International Council on Clean Transportation) 정책보고서(Dornoff and Rodriguez, 2024)의 내용을 참고하여 다음과 같이 정리하였다.

EURO 7 규제는 차량 유형과 부품군별로 단계적 시행 일정을 설정하였다. 승용 및 경상용차(M1/N1)는 2026년 말 신형 차종(새로운 형식승인 차량)부터, 2027년 말부터는 신규 등록되는 모든 차량에 대해 EURO 7 규정이 적용된다. 대형 상용차(M2/M3/N2/N3)는 2028~2029년부터 적용되며, 신형 차종을 시작으로 최종적으로는 신규 등록되는 모든 차종에 대해 새로운 규정이 도입될 예정이다.

1) European Parliament and Council(2024), "Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on Type-Approval of Motor Vehicles and Engines and of Systems, Components and Separate Technical Units Intended for Such Vehicles, with Respect to Their Emissions and Battery Durability (Euro 7)", 검색일: 2025.7.5.

한편 EURO 7 규제에는 전통적인 배출가스 규제 외에도 비배기 배출에 대한 관리도 새롭게 도입된다. 타이어 마모 및 브레이크 마모 먼지 배출량으로 각각에 대해 별도의 규정과 도입 시기를 정의한다. 타이어 마모 규정의 경우 브레이크의 경우와 달리 타이어 자체가 형식승인 시험 대상으로 적용된다. 시험 절차와 기준은 현재 UNECE(United Nations Economic Commission for Europe)에서 개발 중이며, 차후 EURO 7 규정에 추가할 예정으로 알려져 있다. 규정이 일정 내 미채택되는 경우 EU 집행위원회가 자체적으로 시험 기준을 설정할 권한을 갖는다. 타이어 규제는 승용차용(C1) 타이어가 2028년, 중형 상용차용(C2) 타이어가 2030년, 대형 상용차용(C3) 타이어가 2032년부터 차례로 적용된다. 도입 시기별 또한 단계 별로 제도가 확대 적용된다. 1단계에는 EURO 7 규정을 충족한 신규 형식승인 타이어 모델에 적용되며, 2단계에서는 신차에 EURO 7 기준 충족 타이어 장착 의무화 규정 도입, 3단계에서는 시장에 판매되는 모든 타이어가 규정을 준수하도록 하고 있다. 이러한 단계적 로드맵은 산업계의 기술 준비와 국제 표준 정립 속도를 고려한 조치라 할 수 있다.



자료: Dornoff and Rodriguez(2024), p.6.

**그림 2-5** EURO 7 도입에 따른 타이어 마모 인증 기준 적용 일정

타이어와 달리 브레이크 배출 관리를 위한 방안에는 구체적인 배출량에 대한 한도를 제시하였다. 브레이크 배출 관리 규정은 기본적으로 전기차와 비전기차로 구분하였으며, 이러한 이유는 기본적으로 회생제동 등의 기술이 적용된 전기차의 경우 브레이크 마모 발생량에서 유리하다는 점을 고려하였기 때문으로 확인된다. 그 결과, 내연기관 차보다 낮은 한계치를 적용하였으며, 이에 따라 전기차와 같은 무공해차에는 주행거리 당 3mg/km, 내연기관 차량에는 7mg/km의 미세먼지 배출 기준을 설정하였고, 대형 경상용차 등 특정 차급에는 다소 완화된 수치가 적용된다. 그러나 2035년부터는 모든 파워트레인에 대해 3mg/km라는 단일 한도를 적용하도록 규정하여, 파워트레인 종류와 관계없이 모든 차종에 일관된 규제가 적용되도록 하고 있다.

표 2-1 EURO 7 도입에 따른 브레이크 마모 배출 기준 설정

Date	Powertrain type	Vehicle categories		
		M <sub>1</sub> / N <sub>1</sub> class I & II	N <sub>1</sub> class III	M <sub>2</sub> / N <sub>2</sub> and M <sub>3</sub> / N <sub>3</sub>
Until December 2029	Battery electric vehicles	3 mg/km	5 mg/km	none
	Other powertrain types	7 mg/km	11 mg/km	none
January 2030 - December 2034	Battery electric vehicles	tbd	tbd	tbd
	Other powertrain types	tbd	tbd	tbd
From January 2035	All powertrain types	3 mg/km	tbd	tbd

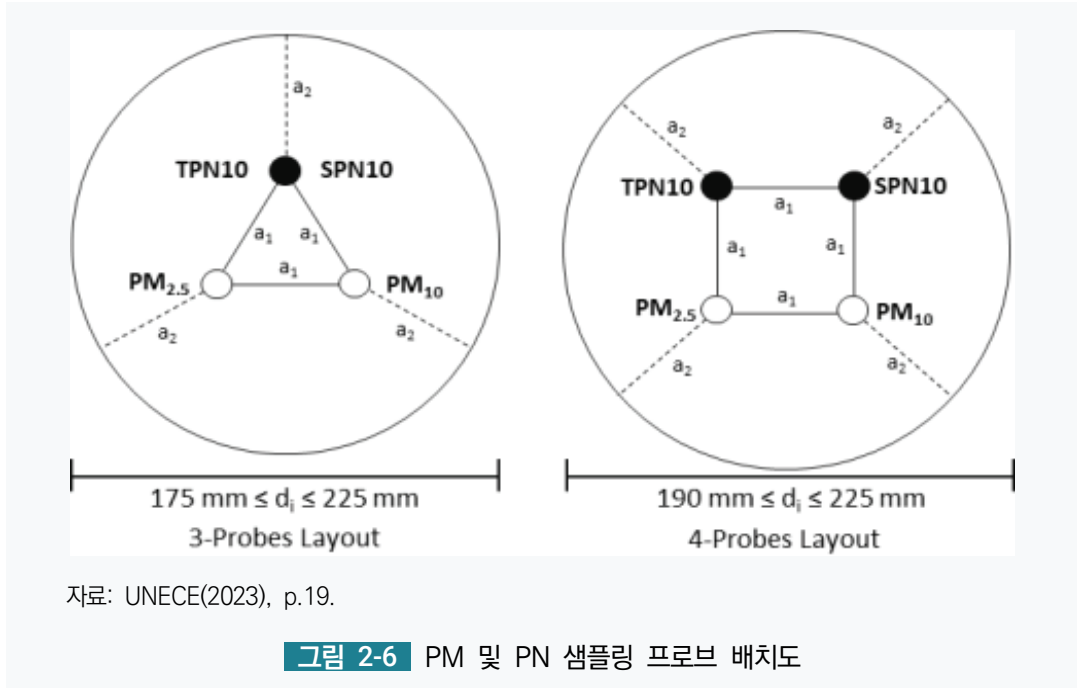
자료: Dornoff and Rodríguez(2024), p.5.

타이어 마모 부분의 경우, 현재 UNECE 차원의 시험방법 개발이 최종 확정되지 않았으며, 이에 따라 주요 일정 계획 외 구체적인 배출 규제치가 확정되지 않은 상황이다. 현 계획대로 라면, 2025년 내에 시험법이 최종 확정될 것으로 예상되며, 이후 로드맵에 따라 EU 집행 위원회에서 배출 한도를 제시하고 순차적으로 세부 규정을 확정할 것으로 예상된다. 브레이크 마모의 경우, UN Global Technical Regulation No.24를 기반으로 시험법이 발표되었으며, 다만 일부 세부 검토 등 조정 과정을 진행하고 있어 연내 최종 확정될 예정이다.

## 2) 기술 요건과 표준화

비배기 관련 규제가 전무했던 과거부터 오랜 기간 축적된 연구 결과와 함께 이에 근거한 측정 방법 및 저감 기술 개발 등이 이루어진 결과, 유럽연합이 비배기 배출을 규제 제도 내 반영할 수 있게 된 배경이 된 것으로 풀이된다.

브레이크 마모 배출 분석을 위해 도입된 UN GTR(Global Technical Regulation) No.24 (Laboratory Measurement of Brake Emissions for Light-Duty Vehicles)는 UNECE 에서 장기간 검토한 표준화된 시험 규정이다. 이는 EURO 7 시행에 따른 브레이크 마모 배출 기준 준수 여부를 평가하기 위한 방안으로 채택되었으며, 오랜 기간 개발과 검증 단계를 거쳐 전 세계적으로 일관된 표준화 방안을 제시한 것으로 평가된다. 본 문서에서는 브레이크 마모 배출 분석을 위한 시험 장비 구성과 시험 주기, 품질 관리 방안 등 시험방법 표준화를 위한 구체적인 내용을 기술하고 있다(UNECE, 2023). 이러한 표준화된 시험방법은 여러 국가와 제조사가 동일한 기준으로 데이터를 산출할 수 있게 하는 기반을 제공하며, 규제의 실효성을 보장하는 핵심 도구가 될 것으로 기대된다.



타이어 마모 시험은 2025년 8월 현재 확정되지 않았으며, UNECE에서 구체적인 논의를 진행 중이다. 기본적으로 UN Regulation No.117을 기반으로 다음 두 가지 시험방법 도입을 검토하고 있는 것으로 확인된다.

- 실도로 주행 시험(on-road convoy test): 실제 도로 조건에서 총 8,000km 주행 후 타이어 마모량 측정
- 실험실 드럼 실험(rolling drum test): 5,000km 주행거리에 해당하는 마모량을 롤링 드럼을 통해 모의

이 시험법은 Euro 7의 핵심 시험 근거로 채택되었고, 향후 승용차(C1) 타이어 마모 한도에 대한 규정으로 2025년 이내에 UN R117에 반영할 예정이다.<sup>2)</sup>

이러한 표준화 노력을 통해 글로벌 자동차 시장에서의 환경문제에 대한 기술적·정책적 대응을 선도하고, 국제 시장에서의 일관된 대응을 시행할 수 있는 중요한 수단이 될 것으로 보인다.

### 3) 산업·시장 파급효과와 시사점

수송 부문 비배기 배출원, 특히 브레이크와 타이어 마모 배출원에 대해서는 별도의 관련 규제가 없었으나 최근 유럽을 중심으로 EURO 7 기준이 도입되면서 자동차 산업 전반에

2) UNECE(2024.2.8), “UNECE to Introduce the First Ever Methodology to Measure Particle Emissions from Tyres”, 검색일: 2025.8.21.

결쳐 영향을 미치고 있는 것으로 파악된다. 자동차 제조사들은 EURO 7에서 새롭게 도입한 타이어 및 브레이크 마모 배출 기준을 만족하기 위해 관련 부품사와 함께 적극적인 대응 방안을 마련하여 신차에 대한 판매 승인을 준비해야 한다. 브레이크 제조사는 저분진 마찰재나 특수 코팅 디스크, 배출 저감 장치 등 기준 만족을 위한 새로운 기술을 개발해야 하며, 타이어 제조사 역시 저마모 컴파운드, 친환경 첨가제 대체물질 개발 등 마모 배출 기준 및 성분 규제에 대해 선제적으로 대응하기 위한 노력이 필요한 상황이다.

최근 비배기 배출과 관련해 논란이 되고 있는 전기차의 경우, 회생제동 등을 통해 내연기관차 대비 브레이크 분진은 줄어드는 것으로 알려져 있으나, 차량 중량 증가와 토크 특성으로 인해 타이어 마모 배출은 상대적으로 증가할 가능성이 있다. 이러한 문제의 해결과 새로운 시장 개척을 위해 전기차 전용 타이어가 개발되어 공급되고 있으며, 각 제조사는 타이어 성능을 만족하면서 마모 기준까지 충족할 수 있는 소재에 대한 개발을 지속하는 것으로 확인된다. 이러한 변화는 단순한 규제 대응을 넘어, 시장에서의 차별화 요소로 작용하고 있다.

사후적으로 이루어지는 배출 감축 정책 역시 EURO 7의 타이어 및 브레이크 마모 배출 규제를 보완하기 위한 단기적 대책이 될 것으로 판단된다. 국내뿐만 아니라 유럽 등 주요 선진국들에서는 비배기 배출량 감축을 위해 도로 청소 강화, 재비산먼지 억제형 포장재 도입, 차량 속도 관리 등 다양한 조치를 시행하고 있는 상황이다. 이는 중·장기적으로는 자동차 및 부품 단위의 배출 규제를 통해 근본적인 배출 감축을 위한 기술혁신을 촉진하고, 단기적으로는 당장의 비배기 배출 영향을 줄여가기 위한 배출 감축 정책들을 도입하여 즉각적인 대기질 개선을 체감할 수 있도록 하는 역할을 상호 보완적으로 추진할 것을 제안한다.

EURO 7 규정은 유럽연합이 수송 분야에서 전통적인 배출가스 관리와 함께 비배기 배출까지 대응하는 포괄적인 관리 체계를 새롭게 규정한 것으로 평가된다. 그러나 아직도 남아있는 과제가 존재한다. 우선, 타이어 마모 배출량에 대한 구체적인 규제치가 확정되지 않았다는 점이다. 이는 UNECE 논의 결과와 집행위의 후속 대응에 달려 있으며, 최종 배출 규제치와 표준화된 평가 방안이 합의되어야 규제가 완결된다. 또한 대형 차량에 대한 규제의 세부설계가 필요한 것으로 판단된다. 대형 상용차의 경우 실제 주행 조건에서의 배출 특성이 다르므로, 시험조건과 규제치 설계를 더 정교화할 필요가 있다.

이렇듯 아직 산적한 문제들이 있으나 EURO 7 규정의 도입은 이미 전 세계 자동차 산업의 기술 로드맵에 새로운 변화를 주고 있다. 제조사들은 비배기 배출 규정을 준수하기 위한 새로운 기술 및 부품 개발을 위해 지속적인 노력을 수행하고 있으며, 유럽 지역에 자동차 및 관련 부품을 수출하는 우리나라와 일본, 중국 등 주요 자동차 생산국도 사실상 동일 기준을 수용할 수밖에 없는 상황이다. 이는 중요한 시사점을 제공한다. 우리나라는 국제 규제 논의에

적극 참여하여 산업 경쟁력을 확보하고, 국내 배출 목록에 비배기 항목을 반영하며, 수송 부문 관리 정책과 연계해 종합적 대기질 개선 전략을 수립할 필요가 있다.

## 나. 그 외 국가의 관련 정책 동향

### 1) 미국 - 브레이크 성분 규제

미국에서는 현재 비배기 배출, 즉 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로 재비산먼지 등을 포함한 오염원에 대해 연방 차원에서의 직접적인 규제는 없는 상황이며, 일부 주정부 및 주 환경 당국이 제한적이거나 관련 조치를 시행하고 있다.

미국 환경보호청(US EPA: Environmental Protection Agency)은 수송 부문 배기 및 비배기 관련 연구를 통해 장기적으로 수송부문 미세먼지에서 비배기 배출의 기여도가 점차 증가할 것으로 예측한다. 관련 연구가 수행되고 그 결과가 발표되고 있음에도 불구하고 미국 전역을 통틀어 브레이크나 타이어 등 비배기 오염원을 규제하는 연방 규정은 없으며, 이는 측정이 어렵고 오염원이 복잡해 효과적 관리가 쉽지 않다는 현실적인 문제를 반영한 결과로 보인다.

다만 일부 주정부에서는 관련된 연구 수행과 함께 규정을 마련하고 있는 사례가 확인된다. 캘리포니아 대기자원위원회(CARB: California Air Resources Board)는 비배기 배출량 산정과 그 영향을 분석하여 향후 그 영향이 점차 중요해지는 것을 파악하고 있으며, 현재 비배기 오염원에 대해 연구 기반을 확대하고 있는 것으로 확인된다(OECD, 2020).

**표 2-2** 캘리포니아 및 워싱턴주의 브레이크 중금속 성분 규제

	Jan 2014	Jan 2021	Jan 2025
Copper	No limit	5.0% wt	0.5% wt
Chromium (VI), Lead, Mercury	0.1% wt	0.1% wt	0.1% wt
Cadmium	0.01% wt	0.01% wt	0.01% wt
Nickel, Antimony, Zinc	Currently none – Monitored and maybe regulated in the future		

자료: OECD(2020), p.113.

제도적 관점에서, 캘리포니아는 워싱턴주와 함께 브레이크 패드 내 구리 함량 제한 법안을 시행하고 있음이 확인된다. SB 346로 잘 알려진 브레이크 패드 관련 법령에 근거하여 2014년부터 일부 중금속과 석면 성분이 포함된 브레이크 패드 판매를 금지하고 있으며, 2021년까지 구리 함량을 최대 5%로 제한하고 있다. 이후 2025년까지 구리 함량을 최대 0.5% 이하로 규정하여 실질적인 함량을 강도 높은 수준으로 낮출 것을 목표로 하고 있다(California Senate, 2010). 워싱턴주 또한 관련 법령을 통해 유사한 수준의 성분 규제를 시행하고 있다. 판매되는 브레이크 소재의 구리 함량을 2021년까지 5% 이하로, 이후에는 0.5% 이하로 목표를

강화하도록 규정하였으며, 이러한 규정은 환경오염 물질로서 구리가 생태계로 유출되는 것을 줄이려는 목적으로 파악된다. 그 외에도 납, 크롬, 카드뮴, 수은 등의 함량 제한을 포함하고 있으며, 2014년 제도 도입 이후 지속적으로 규정을 유지하고 있다(Washington State Legislature, 2010).

타이어 성분과 관련하여서는, 첨가제로 주로 사용되는 6PPD에 대한 논의도 활발히 이루어지고 있는 것으로 확인된다. 타이어의 내구성을 높이기 위한 목적으로 주로 활용되는 6PPD는 마모를 통한 배출과 생태계 순환 과정에서 6PPD-quinone으로 변환될 수 있으며, 이 경우 연어와 같은 수생 생물에게 매우 낮은 농도에서도 치명적인 영향을 주는 것으로 확인된다(Tian et al., 2021). 캘리포니아와 워싱턴주에서는 이러한 문제의식에 따라 6PPD 함유 타이어를 우선 관리 제품으로 지정하고 제조사에게 보고 의무를 부여하는 조치를 시행하고 있다. USEPA에서는 6PPD에 대한 관련 연구 지원과 함께 대응 방안 마련을 위한 노력을 진행하고 있는 것으로 확인된다.<sup>3)</sup>

현재 미국의 경우 연방 수준에서 브레이크나 타이어 마모 배출원에 대해 직접적인 대기 오염원으로 규제하는 법·제도는 부재한 상황이다. 다만 일부 주정부에서는 생태계 환경 보호 관점에서 유해 성분 관리를 위한 조치를 취하고 있는 실정으로 확인된다.

전체적으로 미국 연방정부 차원에서는 수송 분야 비배기 배출을 현재 규제하고 있지 않으며, 향후 대응을 위한 연구 수행 및 관련 제도 검토 단계에 머물러 있는 것으로 확인된다. 일부 주(캘리포니아, 워싱턴)에서는 생태계 보호 관점에서 브레이크 소재, 특히 구리를 포함한 중금속 성분 규제와 6PPD 관리를 위한 체제 마련 등 화학적 유해성 기반 대응을 추진 중인 상황으로 보인다. 비배기 배출을 직접적으로 규제하는 정책 체계는 아직 구축되지 않았으며, 다만 미국 역시도 전기차에 대한 비중 증가 및 배기가스 배출 감소 추이를 고려할 때 향후 관리 필요성이 높아질 것으로 예상된다. 이러한 추세는 OECD 등의 보고서에서도 정책적 전환이 필요한 과제로 제안되고 있다.

## 2) 미국 - 자동차 중량 기반 등록비

미국에서는 연방정부가 아닌 주별로 자동차 등록에 대한 등록비 산정 기준을 수립하고, 그 기준에 따라 등록비를 부과하고 있다. 일부 주 정부에서는 차량 등록비에 대해 자동차 중량 기준 적용하는 사례가 있어 이를 소개하고자 한다. 콜로라도주의 경우 차량의 연식과 중량을 기준으로 등록비를 부과한다. 유타주에서는 중량 기준으로 등록비를 부과하며, 아이오와주

3) Washington State Department of Ecology, "6PPD - Tire Anti-Degradant (6PPD) and 6PPD-quinone (6PPDQ)", 검색일: 2025.9.21; Washington State Legislature, "Senate Bill Report: SB 5931", 검색일: 2025.7.5; US EPA, "6PPD-quinone", 검색일: 2025.7.8.

에서는 차량의 가격과 중량을 함께 고려하여 등록비를 부과하고 있다.

워싱턴 D.C.의 경우 비교적 최근인 2023년 10월부터 자동차 중량 기반 등록 수수료 부과를 시행하였다. 자동차 무게에 따라 등급을 구분하고, 일반 차량의 경우 최소 72달러에서 최고 500달러까지 부과하며, 트레일러의 경우 최소 50달러에서 850달러까지 부과하고 있다. 단, 배터리가 탑재된 전기차의 경우, 중량의 5,000lbs를 넘지 않는 경우 중량에서 배터리 무게를 감안하여 1,000lbs를 감면한 기준을 적용하고 있다.

**표 2-3** 워싱턴 D.C.에서 시행하는 자동차 중량 기반 등록비 부과 기준

Vehicle Type	Class	Weight Range (lbs)	Annual Fees Effective Oct. 1, 2023
Passenger	Class I	<= 3499	\$72.00
Passenger	Class II	3500 - 4999	\$175.00
Passenger	Class III	5000 - 5999	\$250.00
Passenger	Class IV	>= 6000	\$500.00
Passenger	Class V	Battery Electric Vehicles	\$36.00 <sup>1</sup>
Passenger	<b>A battery electric passenger vehicle other than a motorcycle or motor-driven cycle with a manufacturer's shipping weight &lt; 5000 lbs may subtract 1000 lbs from its manufacturer's weight.</b>		
Passenger	Class VI	>= 3500	\$72.00 <sup>2</sup>
Commercial	Class I	<= 3499	\$125.00
Commercial	Class II	3500 - 4999	\$175.00
Commercial	Class III	5000 - 6999	\$250.00
Commercial	Class IV	7000 - 9999	\$500.00
Commercial	Class V	> 10000	\$700.00
Commercial	Class V continued	>= 10000 + each 1000	\$700.00 + \$50.00
Trailer	Class I	<= 1499	\$50.00
Trailer	Class II	1500 - 3499	\$150.00
Trailer	Class III	3500 - 4999	\$275.00
Trailer	Class IV	5000 - 6999	\$500.00
Trailer	Class V	7000 - 9999	\$700.00
Trailer	Class VI	>= 10000	\$850.00
Trailer	Class VI continued	>= 10000 + each 1000	\$850.00 + \$75.00

자료: D.C. Department of Motor Vehicles(2023.10.1), "Vehicle Registration Fees", 검색일: 2025. 9.17.

자동차 중량에 대한 등록세 기준은 차량의 중량이 증가할수록 증가될 수 있는 비배기 배출 특성을 고려할 때 참고할 만한 정책으로 판단된다. 다만 미국에서 시행된 중량 기준 등록세 부과는 환경적 이유보다는 시설 유지보수 및 안전 문제를 이유로 제도가 시행된 것으로 확인된다.

### 3) 영국 웨일스 - 속도제한

영국 웨일스 정부는 2018년 대기질 개선을 위해 오염 수준이 높은 일부 도로에 대해 50mph (약 80km/h)로 속도제한 제도를 도입하였다. 그 결과 배출가스 저감과 함께 도로의 원활한 흐름을 유지하여 제동 및 가속 횟수를 줄이고, 도로재비산먼지 확산을 저감한 것으로 평가되고 있다.<sup>4)</sup> 유럽 국가들의 속도제한을 통한 대기질 개선 사례에는 독일 베를린, 뮌스터, 프랑스 파리 및 브뤼셀에서도 유사 사례가 존재하는 것으로 알려져 있다.



4) 영국 웨일스 정부 뉴스(2021.9.27), “50mph Schemes Successful in Driving Down Air Pollution”, 검색일: 2025.8.11.

다만 속도제한이 환경적인 측면에서 무조건 유리하지 않다는 반대 결과도 존재한다. 자동차 속도제한이 가져오는 영향에 대한 연구들(Williams and North, 2013; Jones and Brunt, 2017; Tang et al., 2019)에서는 안전과 소음 발생 억제 측면에서 속도제한이 가져오는 이점은 명확하나, 대기질 개선 관점에서는 그 효과가 반드시 비례하지 않으며, 실질적인 효과는 속도제한보다는 가감속이 억제되고 도로 소통이 원활할 때 이루어지는 것으로 평가된다.

이러한 연구 결과는 비배기 배출 저감을 포함한 대기질 개선 관점에서 무조건적인 속도제한 규정 도입보다는 가감속을 최소화할 수 있는 교통 흐름 개선이 중요함을 시사한다.

### 3. 소결

우리나라는 미세먼지와 온실가스 감축을 위해 여러 정책적 노력을 추진하고 있으며, 그 과정에서 실제 감축으로 이어지는 등 성과를 도출하고 있는 것으로 알려져 있다. 다만 수송 분야의 경우 온실가스 대책과 대기오염 대책 모두 친환경차 보급 확대를 중심으로 배기가스 감축을 위한 대책 위주로 추진되고 있다. 전기차·수소차 보급 확대에 따라 배기가스 배출은 줄어들 것으로 예상되나, 별도의 대책이나 저감 수단이 없는 타이어·브레이크 마모 및 도로재비산먼지 등 비배기 배출원은 유지되면서 상대적인 중요성이 높아지고, 이에 따라 새로운 배출원으로 부각될 가능성이 커진다. 이러한 필요성에 따라 본 장에서는 국내외에서 추진 중인 비배기 배출 관련 정책과 관리 수단들을 조사하고, 이를 바탕으로 우리나라에서 도입이 가능한 정책 방향에 대한 시사점을 검토하였다.

유럽연합은 EURO 7 규정 도입을 통해 브레이크 및 타이어 배출 규제를 자동차 오염 관리를 위한 제도 내에 포함하여 통합적인 관리 체계를 마련하였으며, UNECE는 GTR No.24(브레이크), R117 개정(타이어)을 통해 비배기 배출 규제 평가를 위한 시험법 표준화를 추진하고 있다. 우리나라가 이 제도를 조기에 도입한다면, 그 과정에서 국내 자동차·부품 산업의 국제 규제 대응력을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 선도적인 대기질 관리 체계 마련 및 조기 개선 성과 도출이 가능할 것으로 기대된다. 그러나 제도 도입을 위해서는 관련 평가를 위한 측정 장비 등 시험 인프라 구축에 상당한 비용이 필요할 것으로 예상되며, 산업계의 정책 대응 부담도 상당할 것으로 예상된다. 다만 우리나라 자동차 산업은 EU 시장 비중이 크기 때문에 중장기적으로 해당 제도의 도입은 필수 불가결하다고 판단되며, 유럽연합에서 실질적으로 제도가 정착된 이후인 2030년 전후에 점진적 도입이 현실적인 방안으로 판단된다.

미국 캘리포니아와 워싱턴은 브레이크 패드의 구리 성분을 단계적으로 제한하고 있으며, 2025년부터는 사실상 제로 수준으로 관리한다. 그밖에 납, 크롬, 수은 등의 중금속 함량에

대한 규제도 포함한다. 우리나라 역시 브레이크 분진 내 금속 성분이 수질·생태계에 미치는 영향을 고려하면 화학물질 규제와 대기 관리의 교차점에서 접근할 필요가 있다. 장점은 규제의 명확성과 환경적 파급효과이며, 단점은 대체 소재 개발 부담과 부품 가격 상승 가능성이다. 현실적으로 우리나라는 자동차 부품 산업의 기술력이 높고 이미 수출 대응을 위한 기반이 갖추어져 있어 비교적 단기적으로 도입이 가능한 수단이라 생각된다.

그밖에 미국의 일부 주에서 시행하고 있는 자동차 중량에 따른 등록세는 비록 환경이 아닌 시설 유지 및 안전 등의 이유로 도입된 제도임에도 불구하고, 자동차 중량과 밀접한 관련이 있는 비배기 배출 저감을 위한 새로운 대안으로서 가치가 있다고 하겠다. 당장의 도입 현실성은 낮으나, 자동차 시장에서 중량 기반의 소비자 행태 변화를 위한 대안으로 검토할 수 있을 것으로 생각한다. 도로에 대한 제한속도 규정은 대기질 개선을 포함한 여러 목적으로 시행되고 있음에도 불구하고, 대기질 개선 측면에서 반대 연구도 존재하는 만큼 신중하고 면밀한 검토가 필요하다 하겠다.

국내 정책에 대한 검토 결과, 일부 탄소중립 정책과 대기관리 정책의 감축 수단 중에서 수송 부문 비배기 배출 관리를 위해 활용 가능한 정책이 존재함을 확인하였다. 대표적으로 도로 청소차 운영 등을 통한 비배기 먼지 감축 방안과 수송 부문 수요관리, 행태개선 등을 통한 활동도 저감 정책이 이에 해당한다. 이러한 정책들은 이미 국내에서 시행된 경험이 있어 추가적인 기술 개발이나 신규 제도 마련이 필요하지 않으며, 상대적으로 정책 수용성이 높은 방안으로 비교적 손쉽게 전략화하기 용이할 것으로 판단된다. 또한 즉각적인 감축 성과를 낼 수 있다는 점을 고려할 때, 중장기적인 대응 방안과 함께 단기적인 대응 방안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

국내외 정책 사례 검토를 통해 도입 가능한 여러 정책 사례들을 검토하였다. 근본적으로는 비배기 배출을 억제하기 위한 방안이 우선이나, 국제적인 규제 제도의 도입과 시장의 변화에 발맞춘 대응이 필요하여 장기적인 전략이 요구된다. 여기에는 비배기 배출 관리를 위한 정책적·기술적 체계 마련이 필요하며, 관련된 기술 개발 및 지원, 연구수행 등 단계적인 정책 수립 방안 등을 포함한 종합적인 관리 전략이 조속히 마련될 필요가 있다.

# 제 3 장

## 수송 부문 비배기 배출과 대기질 영향 검토

1. 비배기 배출 관련 국내외 연구 현황
2. 국내 수송 부문 비배기 배출 기여 추정
3. 비배기 배출로 인한 대기질 영향 검토
4. 소결

### 1. 비배기 배출 관련 국내외 연구 현황

#### 가. 국내 비배기 배출 관련 연구 현황

수송 부문에서의 비배기 배출 영향이 증가할 것으로 예상되는 만큼, 국내에서도 브레이크 및 타이어 마모 등으로 인한 비배기 배출 관련 선행 연구들이 꾸준히 진행되어 온 바 있다. <표 3-1>과 같이 최근 선행 연구 대부분 비배기 배출량 산출 및 규명을 중심으로 이루어져 왔으며, 본 연구에서는 이를 바탕으로 비배기 배출로 인한 대기질 영향을 검토하고 관리 방안을 제안하고자 하였다.

선행 연구는 크게 비배기 배출 특성 파악을 위한 실험적 연구, 국내 적용 배출계수 개발 관련 연구 및 미국, 유럽의 비배기 배출량 산정방식을 적용한 국내 비배기 배출량 산정 관련 연구로 나눌 수 있다. 본 장에서는 주요 선행 연구에 대해 자세히 살펴보고자 한다.

표 3-1 국내 비배기 배출 관련 선행 연구 목록

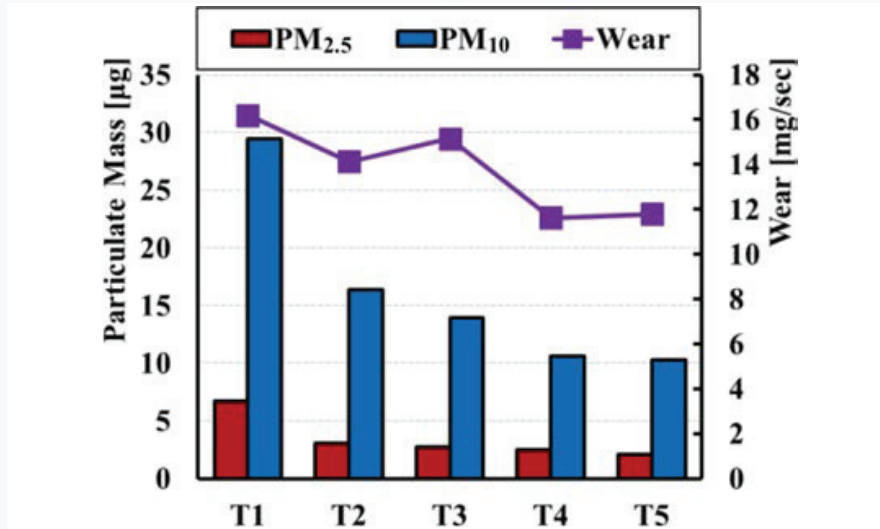
연구 제목	주요 내용
초미세먼지(PM <sub>2.5</sub> ) 배출원 인벤토리 구축 및 상세 모니터링	배출량 인벤토리 보안을 위해 유럽 EMEP/EEA 배출계수를 적용한 서울시 타이어 및 브레이크 마모 미세먼지 배출량 시범 산정
자동차 타이어 마모 미세먼지 배출량 산정 연구	기존 연구에서의 국내 적용 타이어 마모 미세입자 배출량 산정방법 검토 및 유럽 EMEP/EEA(CORINAIR)의 배출량 산정방법 적용을 통한 배출량 추정
자동차 비배기관에 의한 미세먼지 배출량 추정 및 추이 분석	유럽 EMEP/EEA 비배기 배출량 Tier1, Tier2 산정방법 적용을 통한 2019년 국내 비배기 배출량 추정 및 국외 배출량과의 비교·검토
서울시 친환경차량 환경성 강화 방안	유럽 EMEP/EEA(2023) 배출량 산정방법을 이용한 비배기 배출량 분석 및 전기차 등 친환경차량 보급에 따른 타이어 및 브레이크 마모 배출량 영향 분석
자동차 운행에 의한 도로재비산먼지 및 비배기관 배출량 산정방법 개선	자동차 비배기 배출 미세먼지 배출량 분류체계 및 산정방법 마련
교통 분야 비배기 배출량 산정 기반 구축 연구(1)	실도로 주행 간 타이어, 브레이크 마모 특성 분석 및 국제 표준화 대응방안 마련

자료: 서울특별시(2016); 환경부(2016); 최성우 외(2023); 서울연구원(2023); 국가미세먼지정보센터(2023b); 국립환경과학원(2025)(위에서 아래 순서).

### 1) 비배기 배출 특성 파악을 위한 실험적 연구

국내에서는 타이어 및 브레이크 마모로 인한 비배기 배출 특성을 규명하기 위한 실험적 연구들이 활발히 진행되어 왔다.

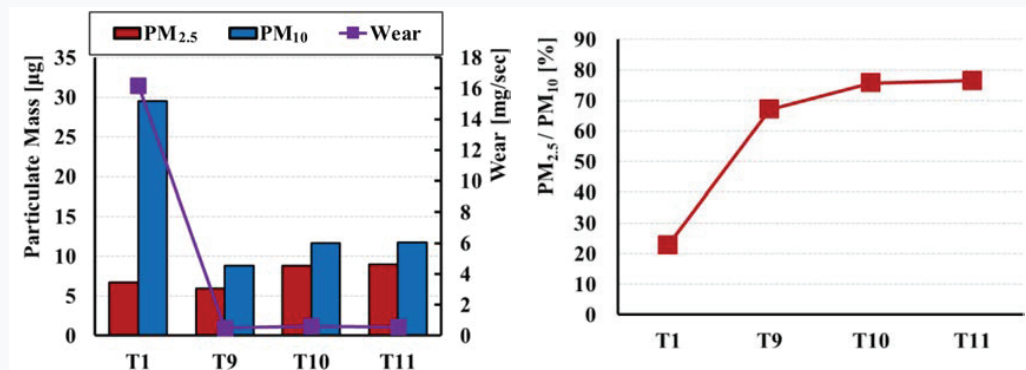
이현희 외(2020)는 상용차용 타이어 트레드 처방(카본블랙, 고무 조성 등)에 따른 미세먼지 발생 경향을 분석하였다. 카본블랙 종류(N220, N234, N134)의 변화만으로는 미세먼지 배출 특성에 뚜렷한 차이가 없었으나(그림 3-1, T1-3 참조), 카본블랙 함량을 높이는 경우 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>/마모량 모두 감소하는 경향을 나타냈다(그림 3-1, T3, T5 참조).



자료: 이현희 외(2020), p.306.

**그림 3-1** 상용차용 타이어 트레드 처방에 따른 PM 발생량 및 타이어 마모율

또한 천연고무로만 구성된 트레드 대비 부타디엔 고무를 첨가한 경우 PM<sub>10</sub> 배출량은 크게 감소하였으나, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비율은 크게 증가하는 결과가 나타났다. 이는 타이어 마모 과정에서 부타디엔 고무와 함께 카본블랙이 탈리되면서 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)가 증가하는 것으로 추정하였으며, 연구 결과를 통해 타이어 재료 조성이 미세먼지의 크기 분포에 영향을 줄 수 있음을 시사하였다.



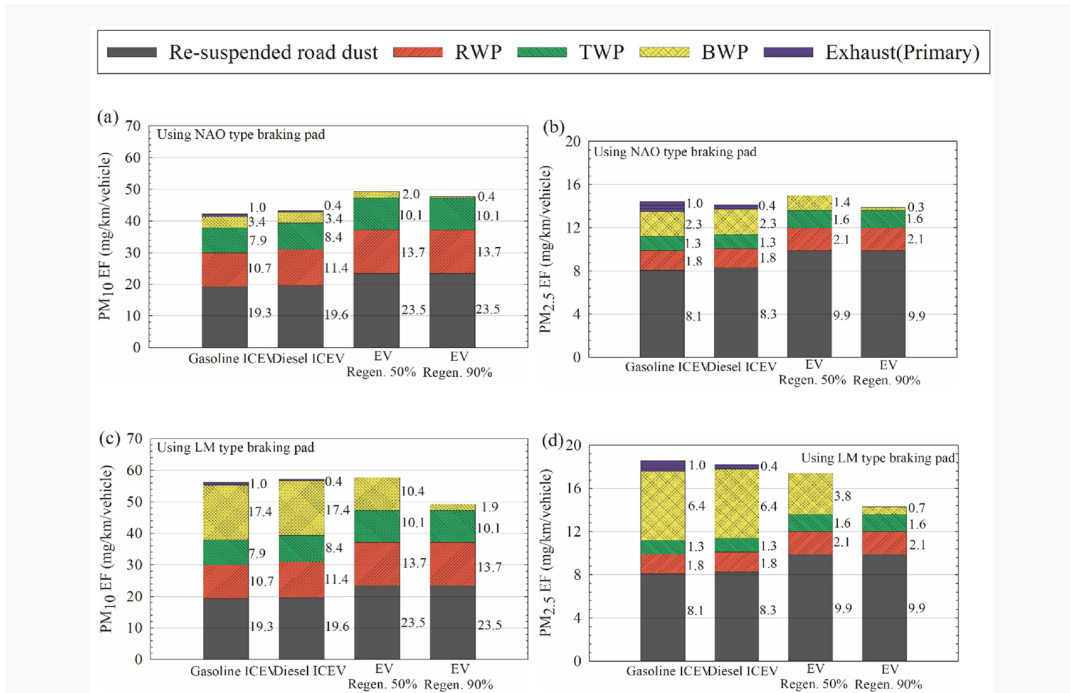
자료: 이현희 외(2020), p.307.

**그림 3-2** 상용차용 타이어 트레드 처방에 따른 PM 발생량 및 타이어 마모율(좌), PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비율(우)

배출가스가 없어 무배출 차량(zero emission vehicles)으로 간주되는 전기차 역시 브레이크 마모, 타이어 마모, 도로 마모, 도로재비산먼지 등의 비배기(non-exhaust) 입자상 물질(PM)을 배출한다. 특히 전기차의 경우 내연기관차보다 무거운 배터리를 탑재하고 있어 오히려 비배기

PM 배출량이 더 많을 수 있음이 지적되어 왔다. 이러한 상황과 맞물려 전기차 보급 확대와 관련하여 비배기 배출에 대한 실험적 연구 또한 활발하게 이루어져 왔다.

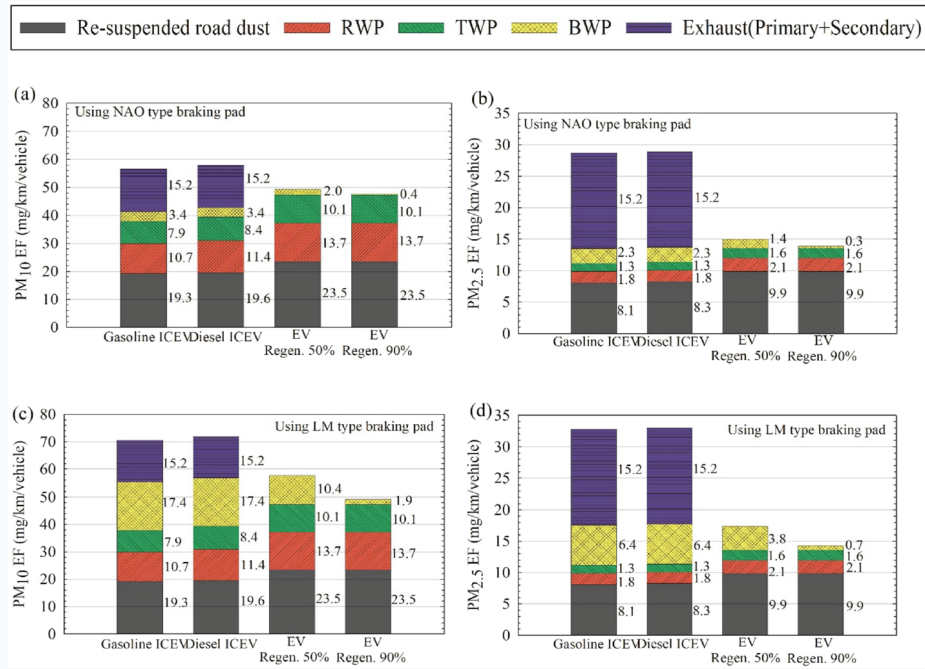
Woo et al.(2022)에서는 실제로 전기차가 내연기관차보다 많은 비배기 배출을 발생시키는지 확인하기 위해 동일한 차종에 서로 다른 동력원으로 구성된 휘발유 내연기관차, 디젤 내연기관차, 전기차를 활용한 실험을 수행하였다. 같은 조건에서 케이스별로 발생하는 배출가스 및 비배기 오염물질을 측정하여 분석하였다.



자료: Woo et al.(2022), p.10.

**그림 3-3** 브레이크 패드 및 차량 유형별 총 PM 배출 특성(배기관 1차 배출 및 비배기 배출)

NAO(비석면 유기질) 브레이크 패드를 장착한 실험에서 1차 배출가스만 고려해서 분석한 결과, 전기차에서의 총 PM<sub>10</sub> 배출계수는 휘발유 내연기관차(42.3 mg/V·km) 및 디젤 내연기관차(43.2 mg/V·km)보다 약 10~17% 높은 47.7~49.3 mg/V·km으로 나타났다. 이 결과는 타이어, 도로 마모 및 재비산먼지 배출이 높은 차량 중량을 갖는 전기차에서 더 많다는 선행 연구 결과를 뒷받침한다. 하지만 LM(저금속) 브레이크 패드 및 회생제동을 적용한 경우에 전기차의 총 PM<sub>10</sub> 배출계수는 휘발유, 디젤 내연기관차와 비슷하거나 오히려 더 낮게 나타났다.



자료: Woo et al.(2022), p.11.

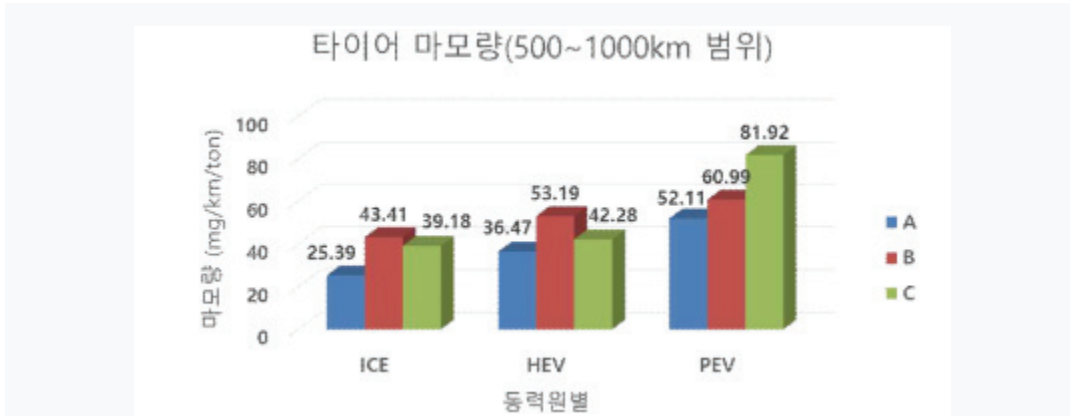
**그림 3-4** 브레이크 패드 및 차량 유형별 총 PM 배출 특성  
(배기관 1차·2차 배출 및 비배기 배출)

내연기관차는 연료 연소 과정에서 NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> 등의 전구물질을 배출하고, 배출된 전구 물질들은 대기 중 화학반응을 거쳐 2차 PM(Secondary PM)을 형성한다. 반면 전기차는 배출가스가 전혀 없기 때문에 전구물질을 배출하지 않으므로 사실상 2차 PM 기여도는 없다. 따라서 2차 PM을 포함한 총배출량으로 비교할 경우 전기차의 배출계수는 항상 내연기관차 보다 확연히 낮게 나타났다.

이 연구 결과는 전기차 역시 타이어, 도로 마모 및 재비산먼지 등으로 인한 비배기 오염물질을 배출하기 때문에 진정한 의미의 무배출 차량은 아니지만, 내연기관 대비 대기질 개선과 인체 건강 영향 완화에는 기여할 수 있음을 보여준다.

최근 국립환경과학원(2025)에서는 국제적으로 비배기계 배출 마모 배출 관련 규제가 강화되는 추세에 맞춰 비배기계 배출 마모 입자 측정 표준 시험법 마련, 배출계수 산정 및 저감방안 정책 마련을 위한 노력의 일환으로 한국형 타이어·브레이크 마모에 대한 연구를 추진한 바 있다. 해당 연구에서는 브레이크·타이어 마모 입자 배출량 규제 등 비배기계 배출 관리 정책의 국내 도입을 검토하고, 국제적으로 표준화된 시험방법 마련에 효과적으로 대응하기 위해 실도로 기반의 타이어 및 브레이크 마모 특성과 현재 수준을 분석하고, 실내 브레이크 다이 나모미터를 활용한 브레이크 마모 입자 분석을 통해 국내외 브레이크 배출 특성에 대한 데이터를 확보하였다.

동력원에 따른 차이 비교를 위해 동일 모델의 내연기관차(ICE), 하이브리드차(HEV), 플러그인 하이브리드차(PEV)와 유사한 모델의 국내외 타이어를 실험에 활용하였다. 실제로 주행을 기반으로 브레이크·타이어 마모 실험을 수행한 결과 차량 무게가 무거울수록 마모가 많이 일어나는 것을 확인하였다. 다만 타이어 배합 조건 및 제조 공정에 따라 마모량 차이를 보였다.



자료: 국립환경과학원(2025), p.45.

**그림 3-5** 동력원별 타이어 마모량 실험 결과

마찬가지로 실제 차량을 활용하여 국내산 브레이크 마찰재 2종에 대한 평가를 수행한 결과, 차량 중량이 증가하면 브레이크 패드 마모량도 증가하나 회생제동 적용 시 브레이크 패드 마모량이 현저하게 감소하는 것 또한 확인하였다. 다만 짧은 주행 마일리지로 마모 경향을 파악하는 데는 어려움이 있기 때문에 충분한 마일리지 확보 및 국외에서 제시된 운전자 교대 방법을 통한 마모량 비교가 필요하다.

코나 OS ICE, PEV 브레이크 패드 마모량 시험 결과						마모계수		
Type	시험전 (kg)	1차 측정 (kg)	2차 측정 (kg)	3차 측정 (kg)	총 주행거리 (km) (평균 500km/회)	마모량 (g)	마모량 (mg)	마모계수 (mg/km)
ICE (1.6 T)	0.9171	0.9168	0.9163	0.9157	1,505	1.4	1,400	0.93
PEV(64 kWh) *회생제동 0단계	0.9050	0.9050	0.9042	0.9033	1,504	1.7	1,700	1.13

코나 OS ICE, PEV 브레이크 패드 마모량 시험 결과								
Type	시험전(kg)	1차 측정(kg)	2차 측정(kg)	3차 측정(kg)	주행거리(km) (평균 500km/회)	마모량(g)	마모량(mg)	마모계수(mg/km)
ICE (1.6 T) LF	0.9154	0.9141	0.9135	0.9131	1,500	<b>2.3</b>	2300	<b>1.533</b>
ICE (1.6 T) RF	0.9162	0.9150	0.9143	0.9138	1,500	<b>2.4</b>	2400	<b>1.600</b>
HEV LF	0.9216	0.9212	0.9209	0.9208	1,500	<b>0.8</b>	800	<b>0.533</b>
HEV RF	0.9239	0.9236	0.9232	0.9231	1,500	<b>0.8</b>	800	<b>0.533</b>
PEV(64 kWh) LF *회생제동 2단계	0.9033	0.9028	0.9025	0.9023	1,500	<b>1.0</b>	1000	<b>0.667</b>
PEV(64 kWh) RF *회생제동 2단계	0.8984	0.8979	0.8975	0.8972	1,500	<b>1.2</b>	1200	<b>0.800</b>

자료: 국립환경과학원(2025), p.42, p.45.

**그림 3-6** 1차·2차 실험에 따른 차량별 및 브레이크 패드 마모량 분석 결과

해당 연구를 통해 확보한 데이터는 향후 한국형 비배기계 배출 마모 입자 측정 표준 시험법 마련을 위해 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 국내 현황에 맞는 고유의 배출계수 개발 등을 위해 이와 같은 실도로에서의 주행을 통한 실험 및 결과 분석이 지속적으로 이루어질 필요가 있다.

## 2) 국내 적용 배출계수 개발 관련 연구

한국기계연구원 이석환 박사 연구팀에서는 국내에서의 지속적인 타이어 및 브레이크 마모 관련 실험적 연구를 기반으로 국내 적용 가능한 배출계수를 제안하였다. 초미세먼지사업단 이슈 보고서인 '일차 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub> 관리)'에서 차종별 타이어·브레이크 마모 먼지의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출계수를 <표 3-2>, <표 3-3>과 같이 정리하여 제안하고, 국내 현실에 적합한 산정 근거를 제시하였다. 이는 향후 국내형 배출계수 마련에 중요한 기초자료로 활용되고 있다.

**표 3-2** 한국기계연구원(이석환 박사) 제안 차량 등급별 타이어 마모 먼지의 배출계수

(단위: mg/v·km)

차종	타이어 마모율	PM <sub>10</sub> 배출계수	PM <sub>2.5</sub> 배출계수	
승용차	경형(1,000cc 미만)	40	2.00	0.32
	소형(1,000~1,500cc)	50	2.50	0.40
	준중형(1,500~2,000cc)	63	3.15	0.50
	중형(2,000~3,000cc)	88	4.40	0.70
	대형(3,000cc 이상)	110	5.50	0.88
승합차	15인 이하	125.2	6.26	1.00
	25인 이하	135	6.75	0.08
	35인 이하	155	7.75	1.24
	50인 이하	192	9.60	1.54
화물차	1톤 이하	125.2	6.26	1.00
	5톤 미만	189	9.45	1.51
	12톤 미만	539	26.95	4.31
	12톤 이상	800	40.00	6.40
트랙터	25톤 이상	1,403	70.15	11.22

자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.93.

**표 3-3** 한국기계연구원(이석환 박사) 제안 차량 등급별 브레이크 마모 먼지의 배출계수

(단위: mg/v·km)

차종		PM <sub>10</sub> 배출계수	PM <sub>2.5</sub> 배출계수
승용차	경형(1,000cc 미만)	2.06	1.10
	소형(1,000~1,500cc)	2.57	1.37
	준중형(1,500~2,000cc)	3.24	1.73
	중형(2,000~3,000cc)	4.53	2.41
	대형(3,000cc 이상)	5.66	3.01
승합차	15인 이하	6.45	3.43
	25인 이하	6.95	3.70
	35인 이하	7.98	4.25
	50인 이하	9.88	5.26
화물차	1톤 이하	6.45	3.43
	5톤 미만	9.73	5.18
	12톤 미만	27.75	14.76
	12톤 이상	41.18	21.91
트랙터	25톤 이상	72.23	38.43

자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.92.

### 3) 배출량 산정 연구

비배기계 배출 특성을 파악하고 현실적인 배출계수를 개발하기 위한 실험적인 연구 외에도 국내 비배기 배출량 인벤토리 구축을 위한 계산적 연구 또한 지속되어 왔다.

2016년 서울시 ‘초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 배출원 인벤토리 구축 및 상세 모니터링’ 연구에서는 배출량 인벤토리 보안을 위해 유럽 EMEP/EEA 배출계수를 적용하여 2013년 서울시 타이어 및 브레이크 마모 배출량을 시범적으로 산정한 바 있으며, 적용 결과 2013년 기준 서울시의 타이어 및 브레이크 마모로 인한 PM<sub>10</sub> 배출량은 각각 약 317톤/연, 247톤/연으로 산정된 바 있다.

2016년 환경부에서도 ‘자동차 타이어 마모 미세먼지 배출량 산정 연구’를 통해 기존 연구에서의 국내 적용 타이어 마모 미세입자 배출량 산정방법을 검토하고, 유럽 EMEP/EEA(CORINAIR)의 배출량 산정방법을 적용하여 배출량을 추정하는 바 있다. 2013년 기준으로 타이어 및 브레이크 마모 PM<sub>10</sub> 배출량은 도로이동오염원 배출량(경유 배기관 배출) 대비 전국은 약 53.2%, 수도권은 약 63.3% 수준으로 산정되었으며, PM<sub>2.5</sub> 배출량의 경우 전국은 약 31.1%, 수도권은 약 36.8% 수준으로 산정되었다.

최성우 외(2023)는 유럽 EEA 배출량 산정방법을 활용하여 현재 국가 배출량 통계에 누락되어

있는 자동차 타이어 및 브레이크 마모에 의한 TSP(Total Suspended Particles, 총부유분진), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출량을 추정하고, 2015년부터 2019년까지의 배출량 추이를 분석하였다. 자동차의 차종별 대수, 주행거리 및 배출계수를 활용하는 Tier1 방법론을 활용하여 국내 타이어 및 브레이크 마모 배출량을 산정한 결과, 2019년 국가 배출량 대비 약 TSP 2.1%, PM<sub>10</sub> 3.8%, PM<sub>2.5</sub> 4.7% 증가하는 것으로 나타났다. 여기에 주행 속도별 보정계수를 추가로 적용하는 Tier2 방법론을 활용하여 산정한 경우에는 약 2.4%, 4.4%, 5.3% 증가하는 것으로 나타났으며, PM<sub>2.5</sub> 기준으로 승용차에서의 배출량이 가장 많은 것으로 나타났다.

**표 3-4** 유럽 EEA 배출량 산정방법(Tier1, Tier2)을 이용하여 산정한 타이어 및 브레이크 마모로 인한 차종별 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출량

Vehicle category	Tier 1 method			Tier 2 method (Tire/Brake)					
	TSP	PM-10	PM-2.5	TSP	PM-10	PM-2.5			
Two-wheel vehicles	226	174	92	342 174 168	269	104 165	138	73 66	
Passenger cars	5,880	4,725	2,388	7,130	3,374 3,756	5,705	2,024 3,681	2,882	1,417 1,465
Light-duty trucks	1,196	946	485	1,450	729 720	1,144	438 706	587	306 281
Heavy-duty vehicles	2,830	2,149	1,151	2,497	1,364 1,133	1,929	819 1,110	1,015	573 442
Total (A)	10,132	7,994	4,117	11,418	5,641 5,777	9,046	3,385 5,662	4,622	2,369 2,253
National air emissions in 2019(B)	484,527	207,866	87,618	484,527		207,866		87,618	
National air emissions in 2019 + emissions from brake and tire wear in 2019 (A + B)	494,659	215,859	91,735	495,945	490,168 490,304	216,912	211,251 213,527	92,241	89,988 89,871
Changes compared to 2019 national air emissions	2.1%	3.8%	4.7%	2.4%	1.2% 1.2%	4.4%	1.6% 2.7%	5.3%	2.7% 2.6%

자료: 최성우 외(2023), p.258.

유럽연합 및 국가에서는 ‘Road Transport’ 분류 내 ‘Tire and Brake wear’ 부문으로 타이어 및 브레이크 마모 배출량을 산정하여 공개하고 있다. 해당 연구에서 2019년 PM<sub>2.5</sub> 기준으로 총배출량 대비 타이어 및 브레이크 마모 배출량이 차지하는 비율을 비교 분석한 결과 EU는 약 2.6% 차지하는 반면, 우리나라의 경우 4.5%(Tier1), 5.0%(Tier2)로 비교적 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다.

표 3-5 타이어 및 브레이크 마모로 인한 국가별 PM<sub>2.5</sub> 배출량

(unit: thousand tons/yr)					
Country	PM-2.5 emissions			Road (B)/ Country (A)	Wear (C)/ Country (A)
	Total of country (A)	Total of road (B)	Wear (C) (Tire + Brake)		
EU-27	1,358.2	118.1	35.3	8.7%	2.6%
Spain	161.8	15.0	3.5	9.3%	2.1%
Italy	161.5	13.5	4.7	8.4%	2.9%
France	138.5	19.5	5.4	14.1%	3.9%
Germany	97.7	18.6	7.6	19.0%	7.8%
Republic of Korea*	Tier 1	91.7	10.3	11.2%	4.5%
	Tier 2	92.2	10.8	11.7%	5.0%

\*For European countries, national emissions and emissions from road transport involve emissions from tire and brake wear. Therefore, to compare the figures under the same conditions, domestic figures (emissions and ratio) include emissions from brake and tire wear emissions.

자료: 최성우 외(2023), p.260.

다만 EEA 외 국내 연구 및 타 기관의 배출계수를 인용하여 산정한 결과와 비교했을 때, EEA 배출계수를 인용한 배출량이 다소 높게 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 배출계수는 도로 유형 및 기후 조건, 차량 중량, 브레이크 패드 종류 등에 따라 편차가 달라질 수 있기 때문에 나타나는 차이로 다양한 차종과 국내 현실을 반영할 수 있는 배출계수 개발의 필요성을 재확인할 수 있었다.

표 3-6 국가별 배출계수를 적용하여 산정한 타이어 및 브레이크 마모로 인한 PM 배출량

(unit: tons/yr)						
Country	Tire + Brake wear		Tire wear		Brake wear	
	PM-10	PM-2.5	PM-10	PM-2.5	PM-10	PM-2.5
EEA (This study)	3,000	1,516	-	-	-	-
KOREA <sup>1)</sup>	1,842	587	1,288	212	554	375
CARB <sup>2)</sup>	1,586	360	811	203	775	157
United Kingdom <sup>3)</sup>	1,337	819	946	662	391	157
Netherlands <sup>4)</sup>	17,415	3,458	16,925	3,385	489	73

\*Source: <sup>1)</sup>Woo et al., 2022. Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles.

An experimental analysis

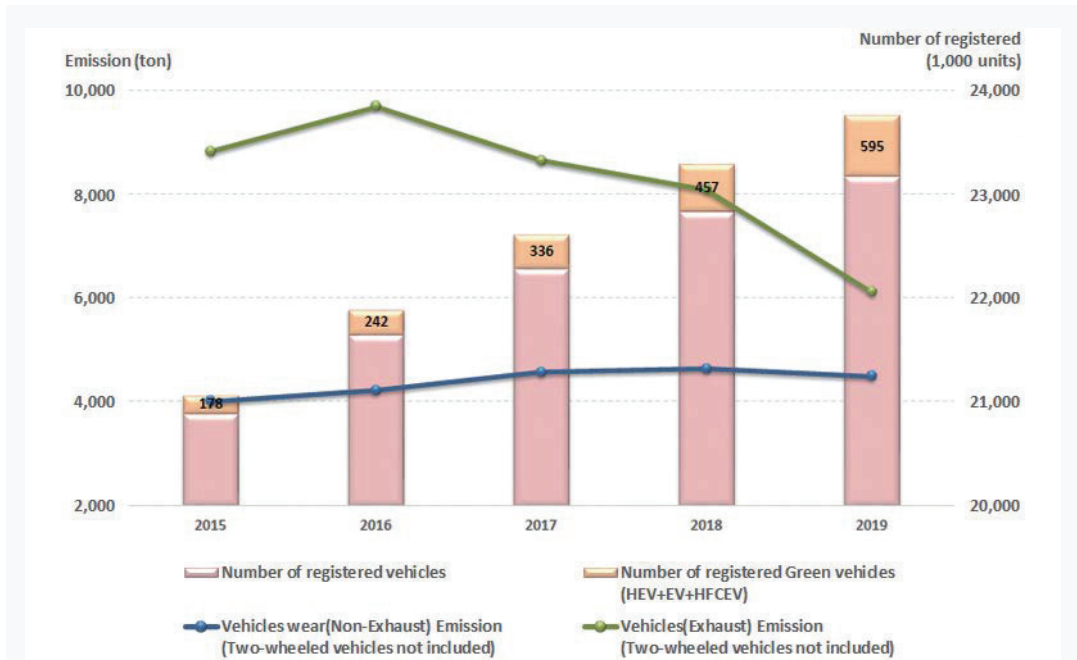
<sup>2)</sup>CARB, 2021. EMFAC2021 Volume III Technical Document DRISI, 2017. Brake Wear Emissions in Particulate Matter

<sup>3)</sup>UK EA, 2023. UK Informative Inventory Report

<sup>4)</sup>PBL, 2021. Methods for Calculating the Emissions of Transport in the Netherlands

자료: 최성우 외(2023), p.260.

또한 2015~2019년 연도별 추세 분석 결과, 친환경차 증가와 더불어 제작차-운행차 배출규제 강화, 노후 디젤차 감소 등에 따라 배기관에 의한 배출량은 꾸준히 감소하는 추세인 반면, 타이어 및 브레이크 마모 배출량은 증가하는 양상을 보였다. 향후에도 친환경 자동차의 지속적인 증가 및 자동차 배출가스 규제 강화에 따라 유사한 경향이 이어질 것으로 전망된다. 따라서 자동차 부문의 미세먼지 배출 저감을 위해서는 비배기 배출 관리가 필수적임을 시사한다.



자료: 최성우 외(2023), p.261.

**그림 3-7** 2015~2019년 자동차 등록 대수 및 자동차로 인한 배기-비배기 국가 PM<sub>2.5</sub> 배출량

이 외에도 서울연구원에서는 ‘서울시 친환경차량 환경성 강화방안(2023)’ 연구를 통해 내연 기관차와 친환경차의 배기성 및 비배기성 오염물질 배출량을 비교 분석한 바 있다. 유럽 EMEP/EEA(2023) 배출량 산정방법을 이용하여 비배기성 오염물질 배출량을 분석하였으며, 전기차 및 하이브리드차 등 친환경차량 보급에 따른 타이어 및 브레이크 마모 배출량 영향 또한 분석한 바 있다.

환경부 국가미세먼지정보센터 또한 ‘자동차 운행에 의한 도로재비산먼지 및 비배기관 배출량 산정방법 개선(I)(II)’ 연구를 2022~2023년에 걸쳐 수행하였다. 해당 연구에서는 국내외 도로재비산먼지 및 마모 입자 등 비배기관 배출 미세먼지의 국내외 배출량 산정방법론 조사 및 선행연구 결과를 분석하고, 자동차 비배기 배출 미세먼지 배출량 분류체계 및 산정방법을 마련하여 제시하였다.

**표 3-7** 국내 비배기 마모 먼지 배출량 시범산정 결과 비교(2020년 기준)

(단위: 톤/연)

구분	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	BC
도로이동오염원(기준)	4,088	4,088	3,761	2,184
[신규] 비배기 마모 (타이어, 브레이크) [MOVES 등 방법 적용]	11,072	4,191	907	77
Tire	9,334	2,800	420	64.3
Brake	1,738	1,391	487	12.7
[참고] EMEP 2023 적용 비배기 마모	11,738	9,296	4,752	1,043 (Tier2)
Tire	5,807	3,484	2,439	888
Brake	5,931	5,812	2,313	155
[참고] EMEP 2019 적용 비배기 마모*	9,393	7,163	3,825	927 (Tier2)
Tire	5,375	3,225	2,258	822
Brake	4,018	3,939	1,567	105

주: \*EMEP/EEA(2019): 친환경차 영향 고려 없음.  
 자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.147.

## 나. 국외 비배기 배출 관련 연구 현황

### 1) 비배기 배출량 인벤토리 산정 관련 연구

미국의 경우 US EPA 국가 배출량 인벤토리에서 도로이동오염원 배출량(on-road or highway vehicles)<sup>5)</sup>에 연료 연소에 의한 배기관 배출 입자 배출량과 함께 타이어 및 브레이크 마모 입자 배출량을 포함하고 있다. 도로 마모에 대해서는 별도로 배출량을 산정하지 않으며, 비산먼지 오염원에서 도로재비산먼지로 다룬다. 미국 EPA에서는 도로이동오염원에 대한 배출량 산정 모델을 과거 MOBILE에서 MOVES(MOTOR Vehicle Emission Simulator)<sup>6)</sup>로 대체하였으며, MOVES 2010에서 2014로 이어지는 개정 과정에서 타이어 및 브레이크 마모 입자 배출량 산정방법 및 평균 배출계수가 지속적으로 갱신되었다. MOVES 2014는 2014년 까지의 문헌조사 결과를 반영하여 브레이크·타이어 마모 계산식을 정비하였고, MOVES 3 (2020)을 통해 차종·규제 등급의 재정렬(LHD2b3 등)과 평균 배출계수 업데이트를 수행하였다.

5) 미국 국가 배출량 인벤토리에서 도로이동오염원(on-road or highway vehicles) 배출원으로 exhaust, extended idle, auxiliary power units, evaporative, permeation, refueling, brake and tire wear 를 포함하고 있다.

6) US EPA, "MOVES and Mobile Source Emissions Research", 검색일: 2025.9.8.

미국 EPA MOVES의 브레이크 마모 배출계수는 브레이크 재질, 브레이크 개수, 동력계 실험 차량의 제동력과 브레이크 마모 배출량의 상관관계, 도로별 제동력별 제동 분포, 차량 중량, 속도 구간별 제동력 분포, PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 분율 등을 고려하고 있다. 다만 브레이크의 재질별 분포를 확인할 수 없기 때문에 차량 브레이크 종류는 LM(Low Metallic), SM(Semi Metallic), NAO(Non-Asbestos Organic) 세 가지가 같은 분포로 존재한다고 가정하였다. 브레이크 개수는 전면 2개, 후면 2개로 총 4개이며, 브레이크의 제동력은 전면에 2/3, 후면에 1/3이 적용된다. PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 분율은 8.00(PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> = 0.125)으로 가정하고 있으며, 차종별 배출계수는 브레이크 마모 발생량(g/hr)이 차량 중량과 비례관계인 것으로 가정하여 추정한다.

타이어 마모의 경우 실도로 주행 시험 결과를 바탕으로 주행거리당 타이어 마모계수, 대기 중으로 배출되는 타이어 마모 입자 분율, PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 분율 등을 고려하여 배출계수를 산정하고 있다. 타이어 마모 배출계수의 경우 타이어 개수(차축 개수)에 의존하며, 또한 차량 중량의 영향을 받는다. 전면과 후면 타이어의 마모량이 다르지만 같다고 가정하였으며, 가속 및 회전은 고려하지 않고 실주행 기반의 타이어 마모계수와 마모 입자의 대기 중 PM<sub>10</sub> 배출 분율(8%), PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 분율(0.15), 타이어 마모계수와 주행 속도의 관계 등을 적용하여 속도 구간별 배출계수를 마련하였다. 또한 타이어 및 브레이크 마모는 연료 유형과는 관계가 없는 것으로 가정하고 있다.

**표 3-8** 미국 EPA MOVES 3의 차종 분류에 따른 타이어 마모 평균 배출계수(2017년 기준)

Source type name	평균 emission rate			
	(mg/veh-mile)		(mg/veh-km)	
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Motorcycle	0.64	4.29	0.40	2.66
Passenger Car	1.28	8.55	0.80	5.32
Passenger Truck	1.28	8.57	0.80	5.32
Light Commercial Truck	1.37	9.16	0.85	5.69
Intercity Bus	3.87	25.77	2.40	16.01
Transit Bus	2.35	15.68	1.46	9.74
School Bus	2.30	15.31	1.43	9.51
Refuse Truck	3.93	26.19	2.44	16.27
Single Unit Short-haul Truck	2.25	15.03	1.40	9.34
Single Unit Long-haul Truck	2.17	14.48	1.35	9.00
Motor Home	2.21	14.75	1.37	9.16
Combination Short-haul Truck	3.81	25.39	2.37	15.78
Combination Long-haul Truck	4.13	27.51	2.56	17.10

자료: US EPA(2020), p.30을 토대로 저자 작성.

표 3-9 미국 EPA MOVES 3의 차종 분류에 따른 브레이크 마모 평균 배출계수(2017년 기준)

Source type name	평균 emission rate			
	(mg/veh-mile)		(mg/veh-km)	
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
Motorcycle	1.58	12.61	0.98	7.83
Passenger Car	2.77	22.17	1.72	13.78
Passenger Truck	2.88	23.08	1.79	14.34
Light Commercial Truck	3.08	24.64	1.91	15.31
Intercity Bus	15.50	123.98	9.63	77.04
Transit Bus	9.45	75.62	5.87	46.99
School Bus	9.94	79.55	6.18	49.43
Refuse Truck	13.35	106.77	8.29	66.34
Single Unit Short-haul Truck	8.24	65.89	5.12	40.94
Single Unit Long-haul Truck	6.88	55.04	4.28	34.20
Motor Home	10.66	85.26	6.62	52.98
Combination Short-haul Truck	9.52	76.13	5.91	47.30
Combination Long-haul Truck	7.96	63.64	4.94	39.55

자료: US EPA(2020), p.21을 토대로 저자 작성.

최근에는 CARB 실험 결과 등을 반영하여 MOVES 5(US EPA, 2024)에서 타이어 및 브레이크 마모 배출량 산정방법을 추가 수정 보완하였다. 타이어 마모에 대해서 업데이트된 사항은 없으나, 브레이크 마모의 경우 차종 및 연료를 고려하여 배출계수를 세분화하고, 브레이크 패드 재질 분포를 변경하였다. EV 차량의 브레이크 패드는 100% NAO라 가정하고, 내연 기관차의 경우 82% NAO, 18% LM으로 가정하였으며, 브레이크 마모 경형 및 대형 차량의 PM<sub>10</sub>/PM<sub>2.5</sub> 분율을 최신 CARB 연구에 기반해 변경하고 브레이크 제동 분율을 변경하여 적용하고 있다.

미국 CARB(California Air Resources Board)는 EMFAC(Emission FACtors) 모델을 통해 도로이동원 배출량을 공식적으로 산정해 왔으며, EMFAC 2021 버전을 적용해 오다가 2025년에 EMFAC 2025 버전을 발표하였다. CARB에서는 최근 브레이크 마모 관련 연구(CARB No.17RD016, CalTrans No.65A0703 등)들을 통해 EMFAC 2021의 브레이크 마모 배출 계수 및 관련 산정 인자들을 고도화하였으며, 차량 카테고리 또한 'EMFAC 2021' 분류체계에 따라 기존 35종의 차량 분류에서 54종 차량으로 확대되었다(CARB, 2021a).

CARB는 EMFAC의 경량 차량(PC, LDT) 브레이크 마모 배출계수 업데이트를 위하여 CARB(2021b, ERG&LINK 수행) 연구를 통해 캘리포니아의 차량 연식에 따른 브레이크

마찰재 변화를 반영하고, 실제 주행 데이터를 기반으로 한 캘리포니아 주행 사이클(CBDC: California Brake Dynamometer Cycle)을 개발하였으며, 캘리포니아의 주행을 대표하여 선정된 차량 6종을 이용한 브레이크 동력계 실험 결과를 바탕으로 배출계수를 업데이트 하였다(CARB, 2021a, 2021b). CalTrans(2021) 연구에서는 경량 트럭 및 중량에 대한 기본 배출계수인 ZML(Zero Mile Level) 배출계수를 PM<sub>10</sub>에 대해 0.047~0.129g/mile (29.2~80.16mg/km)로 제시하고 있으며, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 입경분율은 0.35로 분석하여 제시하고 있다. 참고로 CARB EMFAC 2021에서 경량 차량에 대해서는 브레이크 재질 변화 등을 고려한 열화율(DR: Deterioration Rate)을 고려하여 배출계수를 보정하지만, 중량 차량에 대해서는 OES와 After-market의 브레이크 종류가 거의 같기 때문에 열화율을 고려하지 않는 것으로 밝히고 있다.

CARB EMFAC에서는 타이어 마모 배출계수의 경우 초기 모델부터 현재까지 타이어(휠) 1개당 대기 중으로 배출되는 PM을 2mg/mi-wheel로 가정하고 있고, 차종별로 타이어 개수를 고려해 배출계수를 제시하고 있다. 타이어 마모 입경분율은 TSP(PM<sub>30</sub>)의 100%가 PM<sub>10</sub>인 것으로 보고 있으며, 이 중 25%가 PM<sub>2.5</sub>인 것으로 적용하고 있다. 예를 들어 승용차 타이어 마모의 PM<sub>10</sub>(=TSP) 배출계수로 8mg/mi/vehicle(4.97mg/km/vehicle, 4개 타이어 적용)을 적용하는 형태이다.

결론적으로 CARB EMFAC 2021에서 적용하는 입경분율을 정리하면 다음과 같으며, PM<sub>10</sub> 배출계수를 기준으로 입경분율을 적용하여 PM<sub>2.5</sub> 배출계수 및 배출량을 산정하고 있는 것으로 파악된다.

- 타이어 마모: PM<sub>10</sub>/TSP 분율 = 1, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 분율 = 0.25
- 브레이크 마모: PM<sub>10</sub>/TSP 분율 = 0.98, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 분율 = 0.35

유럽 EMEP/EEA의 대기오염물질 배출량 인벤토리는 유럽 국가의 인위적 배출원과 자연적 배출원의 배출을 추정 및 보고하기 위한 지침서이다.

비배기관 마모의 경우 에너지 연소(1.A.)의 하위 분류에 속하고 있으며, 비배기관 마모는 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로 마모로 구분하고, 도로이동오염원으로 정하고 있다. 차량의 경우 승용 차량, 상업용 경량 트럭, 버스를 포함한 중량 차량, 오토바이 4종으로 구분하고, 차량의 범주는 연료 종류와 엔진 크기를 고려하여 총 61개로 세분화되어 있다.

자동차 비배기관 마모 배출량 산정식(Tier1)은 기본적으로 '배출량=활동도(주행거리, km) × 배출계수(mg/km)'의 구조로 배출량을 산정한다. 차속별 주행거리 등의 활동도 자료를 활용할 수 있는 경우에는 Tier2 방법론을 적용하여 배출량을 산정하며, 차속별 주행거리 등의

활동도를 활용할 수 없는 경우에는 Tier1을 적용한다. 이때 사용되는 배출계수는 Tier2의 타이어 및 브레이크 마모 기본(default) 배출계수를 합산한 값으로 차량 속도에 대한 보정값이 적용되지 않는다. 최근 2023년 EMEP/EEA는 Inventory Guidebook에서 개정된 Tier2 배출계수에 따라 Tier1의 LDV(PC, LDT) 차량에 대한 비배기관 마모 배출계수를 수정한 바 있다.

(EMEP/EEA, 2023) Tier1 배출량 산정식

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{i,j} \quad \text{식(3-1)}$$

- $TE$  : 총 배출량(총 TSP, 총 PM<sub>10</sub>, 총 PM<sub>2.5</sub> (g))  
 $N_j$  : 차량 수  
 $M_j$  : 차종별 주행거리 (km)  
 $EF_{i,j}$  : 배출계수 (g/km)  
 $i$  : TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>  
 $j$  : 차종

Tier2의 경우 차종에 따른 배출계수를 기존 PC, LCT 차종 2분류에서 승용 차량의 전기 차량 및 하이브리드 차량, 경량 트럭의 중량별 분류를 고려하여 총 16개의 차종 분류에 대한 배출계수를 새로 도입하였다. Tier2 방법론의 경우 차종에 대한 TSP 배출계수와 TSP 중 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 비율, 평균 주행 속도에 대한 보정, 중량 차량에 대한 적재 상태 등을 고려하여 배출량을 산정하게 된다.

TSP 배출계수는 1974~2002년 사이의 마모계수 및 TSP(또는 PM<sub>10</sub>) 배출계수 연구 문헌과 몇 가지 가정들을 통해 도출되었다. 배출계수 개발 당시 차종별 마모계수를 먼저 결정하고, 타이어 마모 입자 중 10%(1~10%의 상한값)가 대기 중 PM<sub>10</sub>으로 배출되며, 브레이크 마모 입자 중 50%(문헌의 30%와 70%의 평균값)가 대기 중 TSP로 배출(PM<sub>10</sub>의 경우 49%)되는 것으로 가정하였다.

입경분율의 경우 타이어 마모 PM<sub>10</sub>/TSP 분율은 0.6, 브레이크 마모 PM<sub>10</sub>/TSP 분율은 0.98을 적용하고 있으며, 타이어 마모의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 분율은 0.7, 브레이크 마모의 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 분율은 0.39를 적용하고 있다. 유럽 EMEP/EEA 입경분율은 미국 및 최근 연구자료에 비해 PM<sub>2.5</sub> 분율(특히 타이어 마모)이 상대적으로 높게 적용되고 있는 것으로 검토된다.

Tier2 기본 배출계수의 경우 평균 주행 속도가 타이어 마모의 경우 80km/hr, 브레이크 마모의 경우 65km/hr를 기준[즉 S(V)=1]으로 하고 있다. 차속 보정의 경우 평균 주행 속도 증가에 따라 타이어 및 브레이크 마모량이 감소하는 것으로 속도 보정식을 통해 적용하고

있는데, 예를 들어 평균 차속이 높은 고속도로 주행이 차속이 낮은 도심 주행보다 제동 및 코너링 빈도 등이 적은 경향을 반영한 것이며, 승용차 기준의 실험자료에서 도출된 식을 전 차종에 적용하고 있다.

이처럼 미국(MOVES), 유럽(EMEP/EEA) 모두 비배기계 배출량을 산정하고 있고, 현실적인 배출량 산정을 위한 노력을 지속하고 있다. 국내 역시 이러한 국제적인 흐름에 맞춰 국내 배출계수 개발 및 실도로 상황을 반영할 수 있는 산정체계 개선 등을 위한 노력을 지속해야 할 필요가 있다.

(EMEP/EEA) Tier2 배출량 산정식

$$TE = \sum_j N_j \times M_j \times EF_{TSP,s,j} \times f_{s,i} \times S_s(V) \quad \text{식(3-2)}$$

- $TE$  : 총 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> (g)
- $N_j$  :  $j$  차량 수
- $M_j$  :  $j$  차량 주행거리 (km)
- $EF_{TSP,s,j}$  :  $j$  차량에 대한 TSP 배출계수 (g/km)
  - \* 타이어 마모 평균 주행 속도 80km/hr 기준
  - \* 브레이크 마모 평균 주행 속도 65km/hr 기준
- $f_{s,i}$  : 입자 크기  $i$  의 TSP에 대한 질량 분율
- $S_s(V)$  : 평균 차량 주행 속도  $V$  에 대한 보정계수
- $j$  : 차종
- $s$  : 타이어 마모(T), 브레이크 마모(B)
- $i$  : TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>

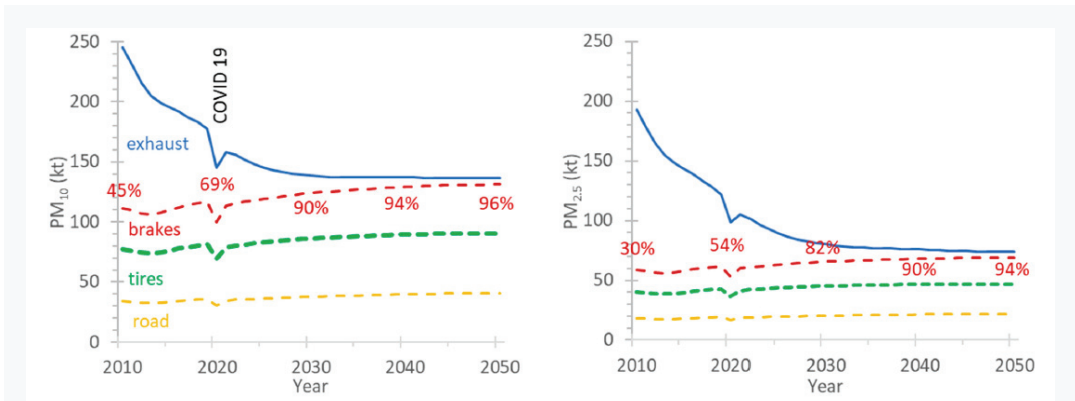
**표 3-10** Tier2 타이어 마모, 브레이크 마모 산정식 관련 인자

산정인자	구분	타이어 마모	브레이크 마모
TSP 배출계수 $EF_{TSP,s,j}$ (g/km)	Two-wheel vehicles 이륜차	0.0046	0.0037
	Passenger cars – ICE – Mini	0.0085	0.0082
	Passenger cars – ICE – Small	0.0096	0.0102
	Passenger cars – ICE – Medium	0.0107	0.0122
	Passenger cars – ICE – Large	0.0118	0.0143
	Passenger cars – Hybrid – Mini	0.0089	0.0065
	Passenger cars – Hybrid – Small	0.0100	0.0081
	Passenger Cars – Hybrid – Medium	0.0111	0.0097
	Passenger Cars – Hybrid – Large	0.0123	0.0114
	Passenger Cars – PHEV – Small	0.0101	0.0055
	Passenger Cars – PHEV – Medium	0.0112	0.0066
	Passenger Cars – PHEV – Large	0.0124	0.0077
	Passenger Cars – BEV – Small	0.0105	0.0030
	Passenger Cars – BEV – Medium	0.0116	0.0035
	Passenger Cars – BEV – Large	0.0127	0.0040
	Light-Commercial Vehicles (N1 – I)	0.0107	0.0122
	Light-Commercial Vehicles (N1 – II, III)	0.0169	0.0117
	HDV	$EF_{TSP,T,HDV}$ $= \frac{N_{axle}}{2} \cdot LCF_T \cdot EF_{TSP,T,PC}$	$EF_{TSP,B,HDV}$ $= 1.956 \cdot LCF_B \cdot EF_{TSP,B,PC}$
LCF	$1.41 + (1.38 \times LF)$	$1 + 0.79 \times LF$	
입경분율 $f_{s,i}$	TSP	1.000	1.000
	PM <sub>10</sub>	0.600	0.980
	PM <sub>2.5</sub>	0.420	0.390
	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>	0.700	0.397
	PM <sub>1,0</sub>	0.060	0.100
	PM <sub>0,1</sub>	0.048	0.080
	속도 보정계수 $S_s(V)$	V<40km/h	1.39
40km/h≤V≤90km/h		$-0.00974 \times V + 1.78$	$-0.0270 \times V + 2.75$
V>90km/h		0.902	0.185

자료: EMEP/EEA(2023), pp.18-22를 토대로 저자 작성.

## 2) 배출량 측정을 위한 표준 시험법 개발 및 저감 기술 효과 분석 연구

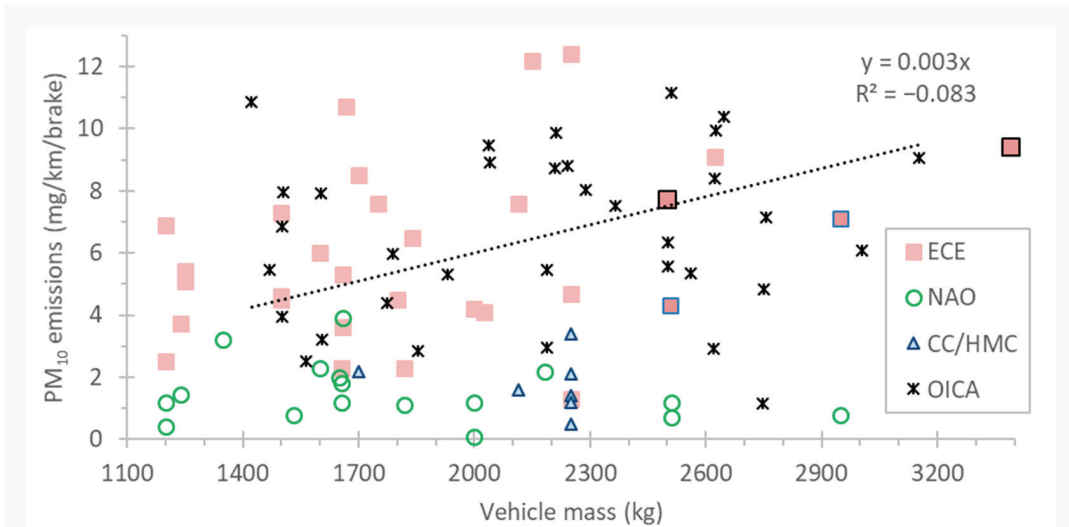
배출량 산정 외에도 Giechaskiel et al.(2024)은 경량차를 대상으로 한 브레이크 배출계수 연구를 종합 검토하면서, UN GTR 24 시험방법을 기반으로 한 최신 연구 결과를 제시한 바 있다. 연구에 따르면 브레이크 마모는 비배기 배출에서 2010년 기준으로 PM<sub>2.5</sub>의 약 30%, PM<sub>10</sub>의 약 40%를 차지하며, 배기관 저감 및 전동화 진행 등을 통해 비배기 배출의 비중이 2040년에는 90%를 초과할 것으로 전망되었다. 이는 Euro 7 규제 도입의 중요한 과학적 근거가 되었다.



자료: Giechaskiel et al.(2024), p.2.

**그림 3-8** EU-27 지역 도로수송에서의 배출가스, 비배기 배출 및 총 PM 배출의 변화와 전망

가장 보편적으로 활용되어 온 ECE 패드-주철 디스크 조합 조건으로 실험을 수행한 결과, 차량 1대당 평균 약 89mg/km 수준의 비배기 배출이 발생하는 것으로 나타났다. 반면, 브레이크 패드를 NAO(비석면 유기질)로 적용하는 경우에는 최소 60% 이상 배출량이 저감되는 것을 확인하였다. 디스크도 마찬가지로 주철 디스크가 아닌 코팅 디스크 및 카본 세라믹 디스크를 적용할 경우, 최소 60에서 최대 80% 정도의 추가적인 배출 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 브레이크 집진 필터를 사용하는 경우 역시 시스템 유형에 따른 차이는 있었지만 수동형 시스템 및 능동형 시스템 모두 각각 약 50%, 약 75% 수준의 저감효과를 나타내었다. 본 연구 결과에서도 많은 선행 연구에서 이미 밝혀진 바와 같이 차량 중량이 높은 전기차의 경우 브레이크 및 타이어로 인한 비배기 배출이 늘어날 수 있는 것으로 나타났으나, 회생 제동을 적용할 경우 최소 60%에서 최대 80%까지 브레이크 입자 배출이 저감될 수 있음을 다시 한번 확인하였다.



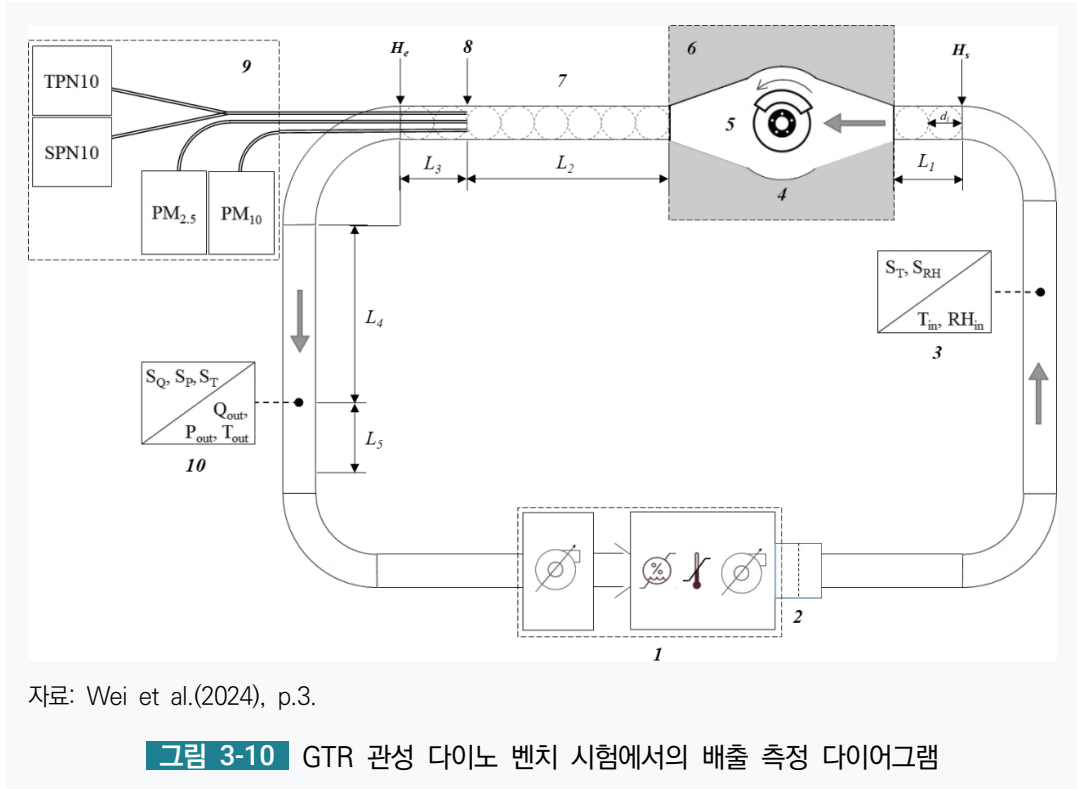
자료: Giechaskiel et al.(2024), p.12.

**그림 3-9** 브레이크 패드 및 저감 조치 종류, 차량 질량에 따른 PM<sub>10</sub> 배출량

도로변에서 실제 측정된 결과가 문헌조사 결과에 비해 낮은 값을 나타냈지만, 기존 배출 인벤토리인 OICA 자료와 비교했을 때 대체로 유사한 것으로 판단하였다. 본 연구에서는 이러한 연구 결과를 바탕으로 브레이크 패드로 인한 비배기 배출 관리를 위한 저감 기술의 효과성을 평가하기 위한 표준화된 시험방법의 마련이 필요함을 강조하였다. 더불어, Euro 7 규제가 도입됨에 따라 향후 더 정밀한 데이터가 축적될 수 있을 것으로 기대하였다.

Wei et al.(2024)에서는 배출계수의 종합적인 검토와 더불어 경량차 브레이크 마모 입자의 배출 시험방법에 대한 국내외 연구 동향을 조사·검토하였다. 앞서 소개한 연구와 같이 본 연구에서 또한 최초로 비배기 입자 배출이 Euro 7 규제의 대상으로 포함됨에 따라 배출 시험방법의 표준화가 시급하게 필요한 상황임을 강조하였다.

현재 UN GTR 24 시험방법으로는 관성 다이노 벤치 시험방법이 제정되어 있으며, 이 방법은 WLTP 브레이크 사이클 기반으로 제동 조건을 재현함으로써 실험실에서도 고도의 반복성·재현성을 확보할 수 있는, 현재로서 가장 신뢰성 있는 방법이다. 이에 따라 Euro 7 및 일본 JASO C 470:2020 표준에 채택된 바 있다.



반면, 운영 손실 밀폐 챔버 방법(CARB, 2016)은 타이어 마모·재비산면지까지 포함한 전체 비배기 배출 측정이 가능하다는 장점이 있지만, 정확성과 재현성이 충분히 검증되지 않았다는 한계가 있다. 실도로 기반 방법(휠 림 커버, 휠 엷지 직접 채취) 역시 배경 입자의 영향을 크게 받는 만큼 정량적 검증에는 한계가 있다는 문제점이 있으며, Pin-on-disc tribometer를 활용하는 방법의 경우에는 재료 특성 파악에는 유용하지만 실제 제동 조건과 차이가 크기 때문에 현재 주류 시험법으로는 적합하지 않았다.

위와 같이 살펴본 각 시험방법의 장단점을 기반으로 현재로서는 관성 다이노 벤치 기반의 GTR 24 절차가 가장 신뢰성 있는 브레이크 마모 입자 시험방법으로 자리 잡고 있으며, 다양한 국제 규제 및 표준 시험방법으로 활용되고 있다. 본 연구 결과를 통해 비배기 배출 관리 강화를 위해서는 표준화된 시험법의 정착과 국제적인 비교 가능성을 확보하기 위한 노력이 시급함을 알 수 있다.

최근 Muresan et al.(2025)에서는 실제 도로 조건을 고려하여 직접 배출되는 타이어 마모 입자(TWP)를 정량화하기 위한 방안으로 수은(Hg) 라벨링 기법을 적용한 실험을 수행한 바 있다. 실험은 Renault Clio 차량에 상용 여름용 타이어를 장착하고 도시, 교외, 순환도로, 농촌, 고속도로 등 다양한 도로를 실제 주행하는 형태로 수행하였으며, 주행 시 발생하는 직접 타이어 마모 입자(TWPD)를 추적하였다. 차량 후방에서 발생하는 입자(RoWP)를 수집하고, 수집된 입자들을 크기별로 나누는 후 수은 함량을 분석함으로써 특성을 정량화 하였다.

연구 결과, 직접 배출되는 타이어 마모 입자(TWPD)는 후방에서 배출되는 전체 입자(RoWP)의 약 1.9~7.5%를 차지하였으며, 평균 배출계수는  $4.0 \pm 2.9 \text{ mg/tire/km}$  (차량 단위당 약  $11 \text{ mg/km}$ )으로 산정되었다. 특히 초미세입자( $<0.39 \mu\text{m}$ )는 전체 직접 배출 타이어 마모 입자의 약 30~70%로 매우 높은 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 도로 유형별로 살펴본 결과, 도시 및 농촌 도로에서 배출량이 가장 많았으며, 순환도로 및 고속도로에서는 상대적으로 적은 배출이 나타났다.

**표 3-11** EU-27 지역 및 그 인근 교외 지역에서의 연평균 RoWP(도로 마모 입자) 및 TWP<sub>D</sub>(타이어·도로 마모 입자)량과 이에 따른 에어로졸 농도 증가( $\Delta C$ ,  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fraction ( $\mu\text{m}$ )	RoWP emissions				TWP <sub>D</sub> emissions			
	InputEU-27 ( $10^3 \text{ t/y}$ )	$\overline{\Delta C}_{\text{EU-27 stag./var.}}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Input(sub)urb ( $10^3 \text{ t/y}$ )	$\overline{\Delta C}_{(\text{sub)urb stag./var.}}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	InputEU-27 ( $10^3 \text{ t/y}$ )	$\overline{\Delta C}_{\text{EU-27 stag./var.}}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Input(sub)urb ( $10^3 \text{ t/y}$ )	$\overline{\Delta C}_{(\text{sub)urb stag./var.}}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
Total	625	13.2/1.47	195	120.4/13.60	28.3	1.21/0.09	8.7	9.54/0.71
PM <sub>10</sub>	552	13.2/1.47	177	120.4/13.59	25.2	1.21/0.09	7.6	9.54/0.71
PM <sub>2.5</sub>	342	13.0/1.33	116	119.1/12.47	20.9	1.21/0.09	6.1	9.51/0.69
PM <sub>1</sub>	271	12.7/1.15	91	116.4/10.82	18.1	1.20/0.08	5.2	9.41/0.63

자료: Muresan et al.(2025), p.11.

EU-27 지역을 대상으로 한 기여도 분석에서는 연간 약  $28 \pm 11 \text{ Gg}$ 의 TWP<sub>D</sub>가 발생하는 것으로 추정되었으며, 이는 연간 페타이어 질량의 약 3.8~14%에 해당하는 적지 않은 양임을 알 수 있다. 특히 도시 지역은 EU 전체 면적의 3%에 불과함에도 전체 TWP<sub>D</sub> 배출량의 약 20~40%로 높은 비중을 차지하는 것으로 분석되었으며 이로 인한 도시 지역에서의 인체 노출 위험과 대기질 악화 가능성이 가장 강도 높게 지적되었다.

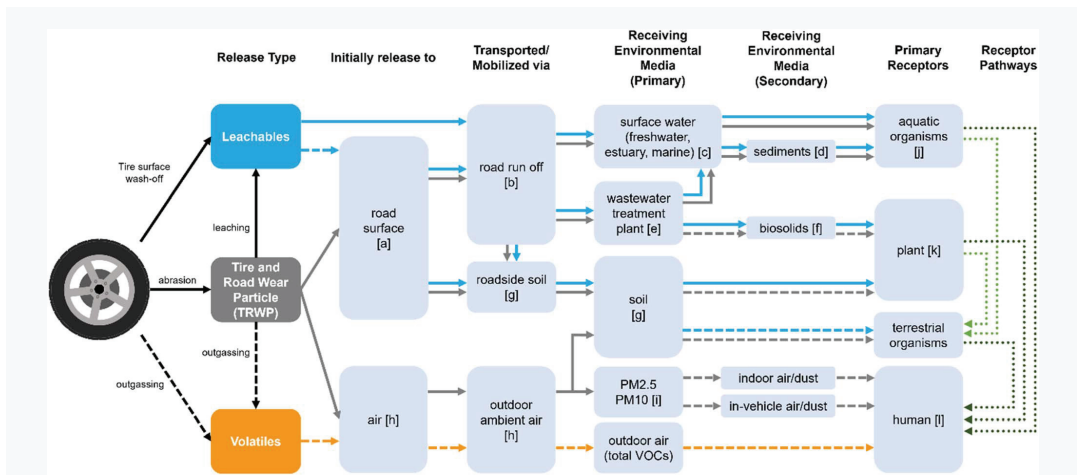
이 연구는 타이어 마모 입자를 실제 도로 주행 조건에서 직접 정량화한 최초의 시도 중 하나로서, 연구 결과를 바탕으로 도시 지역 중심의 관리 필요성과 표준화된 시험·분석 방법 개발의 시급성을 강조하였다.

마지막으로 Müller et al.(2025)은 1985년부터 2024년까지 발표된 문헌을 기반으로 수송 부문 비배기 배출 오염원의 핵심을 차지하는 타이어 사용 단계에서의 배출물에 대한 연구 동향을 종합적으로 검토하기 위한 연구를 수행하였다. 타이어 사용에 따른 배출물은 크게 타이어 마모 입자(TWP), 타이어·도로 마모 입자(TRWP)와 같은 입자상 배출, 강수 등과 같은 습윤 조건에서 타이어 또는 TRWP에서 용해되어 방출되는 화학물질인 용출물, 주행 및 고온 조건에서 증발하는 휘발성 물질로 구분한다.

국제적으로 비배기 배출 가능성 및 배출량 산정 등 관련 연구를 많이 수행해 왔지만, 주로 PM<sub>10</sub> 중심의 입자상 배출 중심으로만 이루어져 PM<sub>2.5</sub> 이하의 초미세입자, 용출물 및 휘발성

물질 등의 다른 물질들에 대한 연구는 상대적으로 미미한 상황이다. 그뿐만 아니라, 국제적으로 아직 표준화된 시험·분석 방법이 존재하지 않아 국가·연구별 배출량 산정 결과를 비교·분석하기 어렵다는 한계가 지속적으로 지적되고 있다.

기후변화로 인한 강우량 및 폭풍우 증가 등의 환경 변화에 따라 향후 타이어·도로 마모입자의 유입 및 확산 또한 늘어날 것으로 전망된다. 뿐만 아니라 전기차의 보급 확산 또한 차량 무게 증가와 높은 가속 성능 등을 수반하여 타이어 마모 입자의 배출량이 증가할 가능성도 존재한다. 이와 같은 변화 요인에 따라 타이어 배출 특성 및 배출 규모가 증가할 가능성이 큰 만큼, 국제 사회에서는 이에 적절하게 대응하기 위한 시험·분석 방법의 표준화와 더불어 장기적인 환경 영향을 평가할 수 있는 체계를 마련할 필요가 있다.



자료: Müller et al.(2025), p.1348.

**그림 3-11** 차량 사용 단계에서 발생하는 타이어 배출물에 대한 개념적 노출 모델(CEM)

## 2. 국내 수송 부문 비배기 배출 기여 추정

### 가. 국내 수송 부문 배출량 산정 현황

국내 CAPSS에서는 현재까지 '타이어 마모(SCC 코드 1202)'의 경우 비산먼지 중분류 목록으로 분류하고는 있으나 배출량은 산정하고 있지 않은 상황이며, 주로 유럽 EMEP/EEA 방법을 활용한 연구들이 수행되어 온 바 있다(서울특별시, 2016; 환경부, 2016; 최성우, 2023; 서울연구원, 2025).

최근 국가미세먼지연구센터 연구용역(2022~2023년)을 통해 미국 EPA MOVES 방법론 등을 기반으로 한 국내 자동차 비배기 마모(타이어, 브레이크) 배출량 산정방법을 마련하였으며, CAPSS 배출량 인벤토리를 위해 시범 산정하고 있는 것으로 파악된다.

### 나. 국내 수송 부문 비배기 배출량 추정 방안

본 연구에서는 최근 국내 국가미세먼지정보센터에서 마련한 자동차 비배기 마모 배출량 산정방법을 기반으로 2021년 기준의 국내 비배기 미세먼지 배출량을 산정하고, 향후 비배기 배출량 추정의 기초자료를 구축하고자 하였다. 자동차 비배기 마모 배출량 산정 대상은 타이어 마모와 브레이크 마모 입자를 대상으로 하였으며, 유럽에서 산정하고 있는 도로 표면 마모는 국내에서 산정하고 있는 포장도로재비산먼지 배출량에 포함된 것으로 간주하였다.<sup>7)</sup>

2021년도 전국을 대상으로 CAPSS 차종 분류상 이륜차를 제외한 승용차, RV, 택시, 승합차, 버스, 화물차, 특수차에 해당하는 차종을 대상으로 배출량을 추정하였다.

국내 적용 배출량 산정방법으로는 국외(미국, 유럽) 비배기 배출량 산정방법을 참고하여 국가미세먼지정보센터에서 마련한 국내 고유 산정방법을 활용하였다. 자동차 비배기(타이어, 브레이크) 마모 배출량은 활동도인 차종별 주행거리와 배출계수의 곱으로 계산하며, 비배기 배출계수는 마모 먼지 기본 배출계수( $EF_{i,w}$ )에 평균 차량속도 보정계수( $S(V)_w$ )와 친환경차의 영향(중량 증가, 회생제동)을 고려한 보정계수( $VCF_{i,w}$ )를 적용해 보정하여 적용한다. 타이어 마모와 브레이크 마모 배출량 산정식은 동일하나, 입경분율, 평균 차속 보정, 친환경차량 보정 등에 차이가 있다.

7) 참고로 유럽은 타이어, 브레이크, 도로 표면 마모 배출량을 산정하지만, 도로재비산먼지 배출량은 산정하지 않고 있다

$$E = VKT_i \times EF_{i,w,s} / 1000 \quad \text{식(3-3)}$$

- $E$  : 주행 과정에서 발생하는 자동차 마모 먼지 배출량 (kg/yr)
- $EF_{i,w,s}$  : 마모 먼지 배출계수 (mg/km) \* 차속 및 친환경차 보정 EF
- $VKT$  : 연간 차종별 주행거리 (km/yr)
- $1000$  : 단위 환산 인자 (1,000mg=1kg)
- $i$  : 차종
- $w$  : 마모 구분 (타이어(T), 브레이크(B))
- $s$  : 평균 차량속도 보정

$$EF_{i,w,s} = EF_{i,w} \times S(V)_w \times VCF_{i,w} \quad \text{식(3-4)}$$

- $EF_{i,w,s}$  : 마모 먼지 배출계수 (mg/km) \* 차속 및 친환경차 보정 EF
- $EF_{i,w}$  : 마모 먼지 기본 배출계수 (mg/km)
- $S(V)_w$  : 평균 차량속도 보정계수
- $VCF_{i,w}^*$  : 친환경차량 보정계수(차종·회생제동)

\* VCF: Vehicle-type Correction Factor(ICEV, HEV, BEV, FCEV 등)

국내 적용 자동차 비배기(타이어, 브레이크) 마모 먼지 배출계수는 <표 3-12>와 같다. 해당 배출계수는 기본적으로 미국 EPA MOVES 3(US EPA, 2020)의 배출계수(g/hr)를 주행거리 기반 배출계수(mg/km)로 변환하여 적용한 것으로, 유럽 EMEP/EEA의 승용차 세분류 배출계수 비율 등을 반영한 값이다.

표 3-12 국내 비배기(타이어, 브레이크) 마모 먼지 배출계수(차종 및 규모별)

구 분		타이어 마모(mg/km)			브레이크 마모(mg/km)		
		TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
승용차	경형	15.78	4.73	0.71	3.35	2.68	0.94
	소형	17.73	5.32	0.80	4.16	3.33	1.17
	중형	19.71	5.91	0.89	4.98	3.99	1.40
	대형	21.69	6.51	0.98	5.83	4.66	1.63
택시	소형	17.73	5.32	0.80	4.16	3.33	1.17
	중형	19.71	5.91	0.89	4.98	3.99	1.40
	대형	21.69	6.51	0.98	5.83	4.66	1.63
승합차	경형	19.71	5.91	0.89	5.64	4.51	1.58
	소형	27.20	8.16	1.22	5.71	4.57	1.60
	중형	29.44	8.83	1.33	15.73	12.59	4.41
	대형	39.42	11.83	1.77	27.89	22.31	7.81
	특수	29.44	8.83	1.33	15.73	12.59	4.41
버스	시내버스	39.42	11.83	1.77	27.89	22.31	7.81
	시외버스	39.42	11.83	1.77	27.89	22.31	7.81
	전세버스	39.42	11.83	1.77	27.89	22.31	7.81
	고속버스	39.42	11.83	1.77	27.89	22.31	7.81
	기타	34.24	10.27	1.54	22.40	17.92	6.27
화물차	경형	19.71	5.91	0.89	5.64	4.51	1.58
	소형	29.44	8.83	1.33	15.73	12.59	4.41
	중형	34.24	10.27	1.54	22.40	17.92	6.27
	대형	73.36	22.01	3.30	37.39	29.91	10.47
	특수	73.36	22.01	3.30	37.39	29.91	10.47
	덤프트럭	73.36	22.01	3.30	37.39	29.91	10.47
	콘크리트 믹서	73.36	22.01	3.30	37.39	29.91	10.47
특수차	구난차	29.44	8.83	1.33	15.73	12.59	4.41
	견인차	73.36	22.01	3.30	37.39	29.91	10.47
	기타	34.24	10.27	1.54	22.40	17.92	6.27
RV	소형	19.71	5.91	0.89	4.98	3.99	1.40
	중형	21.69	6.51	0.98	5.83	4.66	1.63
이륜차		9.84	2.95	0.44	3.17	2.54	0.89

자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.135.

국내 자동차 비배기(타이어, 브레이크) 마모 먼지 배출량 산정에 적용되는 입경분율은 <표 3-13>과 같다.

**표 3-13** 국내 자동차 타이어 및 브레이크 마모 먼지 입경분율

구분	마모 입자 중 PM <sub>10</sub>	입경분율(TSP=1)			
		TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>
타이어 마모	8%	1	0.30 <sup>1)</sup>	0.045	0.15
브레이크 마모	48% (60%, TSP)	1	0.80	0.28	0.35 <sup>2)</sup>

주: 1) EPA MOVES에서 PM10/TSP 분율이 제시되어 있지 않아, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 입경분율(0.15)을 인용한 원출처인 Kupiainen et al.(2005)의 동일한 실험 결과에서 제시된 입경분율(PM<sub>10</sub>/TSP=0.3)을 적용.  
 2) EPA MOVES에서 제시한 입경분율(0.125)은 추정 가정한 값으로, 최신 실험 결과를 반영한 CARB(EMFAC) PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 입경분율(0.35)을 국내에 적용.  
 자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.135.

**표 3-14** 타이어 마모 먼지 입경분율 비교

구분	마모 입자 중 PM <sub>10</sub>	입경분율(TSP=1)			
		TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>
US EPA(MOVES)	8%(1~15%)	1	(0.30)*	(0.045)	0.15*
CARB(EMFAC)		1	1	0.25	0.25
EMEP/EEA	10% (0.1~10%)	1	0.60	0.42	0.70
Dutch Inventory	5%	1	0.053	0.011	0.20
KIMM	5%				0.16
국내 산정방법(안) 〈표 3-13〉	8%	1	0.30*	0.045	0.15*

주: \*US EPA(MOVES3, 2020): PM 입경분율 인용 원출처 Kupiainen et al.(2005) 실험 결과 입경분율을 적용  
 - Kupiainen et al.(2005): PM<sub>10</sub>/TSP = 0.3, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> = 0.15  
 (참고) 미국 EPA MOVES 및 CARB EMFAC에서는 TSP(PM) 배출량 산정하지 않고 있음.  
 자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.137.

**표 3-15** 브레이크 마모 먼지 입경분율 비교

구분	마모 입자 중 PM <sub>10</sub>	입경분율(TSP=1)			
		TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>2.5</sub> /PM <sub>10</sub>
US EPA(MOVES)	60%(TSP) (PM <sub>10</sub> 48%)	1	0.80	0.10	0.125
CARB(EMFAC)	-	1	0.98	0.343	0.35*
EMEP/EEA	50%(TSP) (PM <sub>10</sub> 49%)	1	0.98	0.39	0.39
Dutch Inventory	49%	-	-	-	0.15
KIMM	32%	-	-	-	0.53
국내 산정방법(안) 〈표 3-13〉	60%(TSP) (PM <sub>10</sub> 48%)	1	0.80	0.28*	0.35*

주: \*미국 EPA MOVES에서 제시한 입경분율(0.125)은 추정 가정한 값으로, 최신 실험 결과를 반영한 CARB(EMFAC) PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 입경분율(0.35)을 국내에 적용하는 것으로 검토 및 제안.  
 (참고) CARB EMFAC 2021에서 LDV 기본 배출계수 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비는 0.200이나, 전체 차종에 대해 실험자료의 회귀분석 결과인 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비인 0.35를 적용하고 있음.  
 자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.142.

비배기 마모 먼지 배출계수의 평균 차속에 따른 보정계수는 <표 3-16>과 같으며, 이는 미국 EPA MOEVES의 차속 구간 배출계수 자료를 국내 활동도의 차속 구분 기준으로 적용하는 방식이다.

**표 3-16** 비배기 마모 평균 차량속도 구간별 보정계수

타이어 마모	브레이크 마모	
	평균 속도 구간	보정계수
$1.8127 \times \exp(-0.0092 \times V^*)$ *V: 도로 평균 차량속도(km/hr)	제동 모드(정지)	1 (국내 제동 모드 없음)
	< 40km/hr(저속 모드)	0.978
	40~80km/hr(중속 모드)	0.643
	> 80km/hr(고속 모드)	0.115

자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.139, p.144를 토대로 저자 작성.

비배기 마모 먼지 배출계수의 친환경차량 보정계수는 <표 3-17>과 같다. 친환경차량 보정계수는 미국 MOVES 및 국내 자료가 없어, 유럽 EMEP/EEA(2023)에서 제시한 친환경차의 중량 가중과 회생제동 영향을 고려한 배출계수 비율을 근거로 마련하였다. 하이브리드 차량은 PHEV, HEV 모두 HEV로 취급하여 적용하고(국내 대부분 HEV 차량), 수소차는 관련 자료가 없어 전기차(BEV)와 동일하게 적용하였다.

**표 3-17** 비배기 마모 친환경차 보정계수(친환경차 중량 및 회생제동 고려)

연료 구분	타이어 마모	브레이크 마모
ICE(내연기관)	1.000	1.000
Hybrid (하이브리드)	1.042	0.795
BEV(전기차) (*수소차 포함)	1.085	0.287

자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.140, p.145를 토대로 저자 작성.

참고로 비배기 마모 배출량을 산정하기 위해 마련된 국내 배출계수는 <표 3-18>과 같은 차종 매칭을 통해 제시되었다.

**표 3-18** 국내 비배기 마모 배출량 산정을 위한 차종 매칭

CAPSS 분류	EMEP/EEA(2023년)	MOVES3(2020년)
승용차-경형	Passenger cars - ICE - Mini	LDV1
승용차-소형	Passenger cars - ICE - Small	LDV2
승용차-중형	Passenger cars - ICE - Medium	LDV3(LDV)
승용차-대형	Passenger cars - ICE - Large	LDV4
택시-소형	Passenger cars - ICE - Small	LDV2
택시-중형	Passenger cars - ICE - Medium	LDV3(LDV)
택시-대형	Passenger cars - ICE - Large	LDV4
RV-소형	Passenger cars - ICE - Medium	LDV3(LDV)
RV-중형	Passenger cars - ICE - Large	LDV4
승합차-경형	Light-Commercial Vehicles (N1 - I)	LDT
승합차-소형	avg. of N1-1, 2, 3	LHD2b3
승합차-중형	Light-Commercial Vehicles (N1 - II, III)	LHD45
승합차-대형	Heavy-Duty vehicles (2축)	Urban Bus
승합차-특수	Light-Commercial Vehicles (N1 - II, III)	LHD45
버스-시내버스	Heavy-Duty vehicles (2축)	Urban Bus
버스-시외버스	Heavy-Duty vehicles (2축)	Urban Bus
버스-고속버스	Heavy-Duty vehicles (2축)	Urban Bus
버스-전세버스	Heavy-Duty vehicles (2축)	Urban Bus
버스-기타	Light-Commercial Vehicles (N1 - II, III)	MHD67
화물차-경형	Light-Commercial Vehicles (N1 - I)	LDT
화물차-소형	Light-Commercial Vehicles (N1 - II, III)	LHD45
화물차-중형	Heavy-Duty vehicles (3축)	MHD67
화물차-대형	Heavy-Duty vehicles (4축)	HHD8
화물차-덤프트럭	Heavy-Duty vehicles (4축)	HHD8
화물차-콘크리트믹서트럭	Heavy-Duty vehicles (4축)	HHD8
화물차-특수	Heavy-Duty vehicles (4축)	HHD8
특수차-구난차	Heavy-Duty vehicles (2축)	LHD45
특수차-견인차	Heavy-Duty vehicles (4축)	HHD8
특수차-기타	Heavy-Duty vehicles (3축)	MHD67
이륜차	Two-wheelers	MC

주: 미국 MOVES의 승용차량의 경우 단일 배출계수를 제시하고 있으나, 국내 CAPSS 활동도 등 산정체계와 친환경차 영향 등을 고려하기 위해 규모를 구분하여 적용할 필요성이 있어 승용차 중형(medium)을 기준으로 EMEP(2023) 규모별 배출계수 비율을 적용하여 세분화함(LDV1-경형, LDV2-소형, LDV3-중형, LDV4-대형).  
 자료: 국가미세먼지정보센터(2023b), p.111.

자동차 비배기 마모 배출량 산정을 위한 활동도로는 차종 분류별 주행거리(VKT, km) 자료가 활용되며, 평균 차속 보정을 위해 평균 차속 정보가 필요하다. 본 연구에서는 국내 CAPSS 도로이동오염원 배출량 산정에 적용되고 있는 2021년 기준의 행정구역 및 차량 분류(차종, 연료 등)별 주행거리 및 평균 차속 자료를 국가미세먼지정보센터에서 제공받아 적용하였다.

〈표 3-19〉는 본 연구에서 적용한 2021년 CAPSS 기준의 시도 및 차종별 VKT 현황을 정리하여 제시한 것으로, 시도별 주행거리는 경기 24.4%, 서울 10.0%, 경북 7.9% 등의 순으로 전국 총 354,426 백만km이다. 차종별 주행거리는 승용 52.2%, RV 24.0%, 화물차 17.4% 등의 순으로 나타났다.

**표 3-19** 2021년 기준 자동차 주행거리 현황(CAPSS 기준)

시도	VKT(106km)		차종	VKT(106km)	
	값	비율		값	비율
서울	35,552	10.0%	승용차	185,162	52.2%
부산	17,958	5.1%	RV	85,119	24.0%
대구	15,348	4.3%	택시	8,713	2.5%
인천	21,896	6.2%	승합차	6,641	1.9%
광주	8,910	2.5%	버스	6,401	1.8%
대전	8,917	2.5%	화물차	61,572	17.4%
울산	7,457	2.1%	특수차	818	0.2%
세종	2,614	0.7%	총합계	354,426	100.0%
경기	86,391	24.4%			
강원	14,698	4.1%			
충북	16,080	4.5%			
충남	20,258	5.7%			
전북	15,446	4.4%			
전남	17,683	5.0%			
경북	27,983	7.9%			
경남	27,301	7.7%			
제주	9,936	2.8%			
총합계	354,426	100.0%			

자료: 국가미세먼지정보센터(2025.7).

2021년 CAPSS 기준 자동차 주행거리를 승용, 승합, 화물/특수 분류에 따라 연료별로 살펴보면 〈표 3-20〉과 같은데, 승용(승용차+RV+택시)의 주행거리는 휘발유가 49.6%로 가장 크고, 친환경차의 경우 하이브리드 5.0%, 전기 1.1%, 수소 0.08%를 차지했다. 승합(승합차+버스)의 주행거리는 경유가 76.8%로 큰 비중을 차지하고, CNG가 18.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 친환경차의 경우 하이브리드 0.05%, 전기 0.4%, 수소 0.02%를 나타냈으며, 화물/

특수의 주행거리는 경유가 96.3%로 대부분을 차지하고, 친환경차의 경우 전기 1.2%를 나타내고 있다.

**표 3-20** 2021년 기준 차량 분류에 따른 연료별 VKT 비중(%) 현황(CAPSS 기준)

차량 분류	연료	VKT(%)
승용 (승용차+RV+택시)	경유	33.2%
	휘발유	49.6%
	LPG	11.0%
	하이브리드	5.0%
	전기	1.1%
	수소	0.08%
	승용 소계	100.0%
승합 (승합차+버스)	경유	76.8%
	휘발유	0.09%
	LPG	4.2%
	CNG	18.4%
	하이브리드	0.05%
	전기	0.4%
	수소	0.02%
승합 소계	100.0%	
화물/특수 (화물차+특수차)	경유	96.3%
	휘발유	0.02%
	LPG	2.4%
	CNG	0.03%
	하이브리드	0.001%
	전기	1.2%
	수소	0.00004%
화물/특수 소계	100.0%	

자료: 국가미세먼지정보센터(2025.7).

### 다. 국내 수송 부문 비배기 배출 기여 추정 결과

본 연구에서는 최근 국가미세먼지정보센터에서 마련한 국내 비배기 마모 먼지 배출량 산정 방법 및 국내 CAPSS 활동도 자료를 적용하여 2021년 기준 국내 자동차 비배기(타이어, 브레이크) 마모 먼지 배출량을 산정하였다. 결과는 <표 3-21>과 같이 타이어 마모 PM<sub>10</sub> 배출량이 약 2,876톤, 브레이크 마모 PM<sub>10</sub> 배출량이 약 1,387톤으로 비배기 합계 PM<sub>10</sub> 배출량은 약 4,262톤으로 산정되었다. 타이어 마모 PM<sub>2.5</sub> 배출량은 약 431톤, 브레이크 마모 PM<sub>2.5</sub> 배출량은 약 485톤으로 비배기 합계 PM<sub>2.5</sub> 배출량은 약 917톤으로 산정되었으며,

결과적으로 비배기 마모 PM<sub>10</sub> 배출량은 승용차 40.8%, 화물차 30.5%, RV 19.3% 순으로 높은 것으로 나타났다.

**표 3-21** 2021년 기준 자동차 비배기(타이어, 브레이크) 마모 먼지 배출량 산정 결과(요약)

차종	타이어 마모 (ton/yr)			브레이크 마모 (ton/yr)			비배기 마모(T+B) (ton/yr)		
	TSP (T)	PM <sub>10</sub> (T)	PM <sub>2.5</sub> (T)	TSP (B)	PM <sub>10</sub> (B)	PM <sub>2.5</sub> (B)	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
승용차	4,213.5	1,264.0	189.6	593.5	474.8	166.2	4,807.0	1,738.8	355.8
	44.0%	44.0%	44.0%	34.2%	34.2%	34.2%	42.5%	40.8%	38.8%
RV	1,975.9	592.8	88.9	289.1	231.3	80.9	2,264.9	824.0	169.8
	20.6%	20.6%	20.6%	16.7%	16.7%	16.7%	20.0%	19.3%	18.5%
택시	226.3	67.9	10.2	37.8	30.3	10.6	264.2	98.2	20.8
	2.4%	2.4%	2.4%	2.2%	2.2%	2.2%	2.3%	2.3%	2.3%
승합차	203.2	60.9	9.1	30.6	24.5	8.6	233.7	85.4	17.7
	2.1%	2.1%	2.1%	1.8%	1.8%	1.8%	2.1%	2.0%	1.9%
버스	303.9	91.2	13.7	134.3	107.4	37.6	438.2	198.6	51.3
	3.2%	3.2%	3.2%	7.7%	7.7%	7.7%	3.9%	4.7%	5.6%
화물차	2,629.9	789.0	118.3	640.3	512.2	179.3	3,270.1	1,301.2	297.6
	27.4%	27.4%	27.4%	36.9%	36.9%	36.9%	28.9%	30.5%	32.5%
특수차	33.8	10.1	1.5	7.7	6.1	2.1	41.5	16.3	3.7
	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%	0.4%
합계	9,586.4	2,875.9	431.4	1,733.2	1,386.5	485.3	11,319.6	4,262.4	916.7
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

자료: 저자 작성.

자동차 비배기 배출량의 비교를 위해 2021년 기준 CAPSS 도로이동오염원(배출가스)과 도로재비산먼지의 차종별 배출량을 살펴보면 <표 3-22>와 같다. 도로이동오염원 PM<sub>10</sub> 배출량은 약 3,416톤, PM<sub>2.5</sub> 배출량은 약 3,142톤이며, 화물차 배출량이 약 73.7%로 대부분을 차지하고 있다. 반면 도로재비산먼지 PM<sub>10</sub> 배출량은 약 32,803톤, PM<sub>2.5</sub> 배출량은 약 7,936톤이며, 승용차 배출량이 약 51.6%로 가장 큰 비중을 차지한다. 연소에 의한 도로이동오염원(배출가스) 배출량은 화물차가 가장 높은 배출량을 나타내는 한편, 도로재비산먼지, 타이어 및 브레이크 마모의 비배기 배출량은 주행거리가 가장 많은 승용차가 가장 높은 배출량 비중을 나타냄을 알 수 있다.

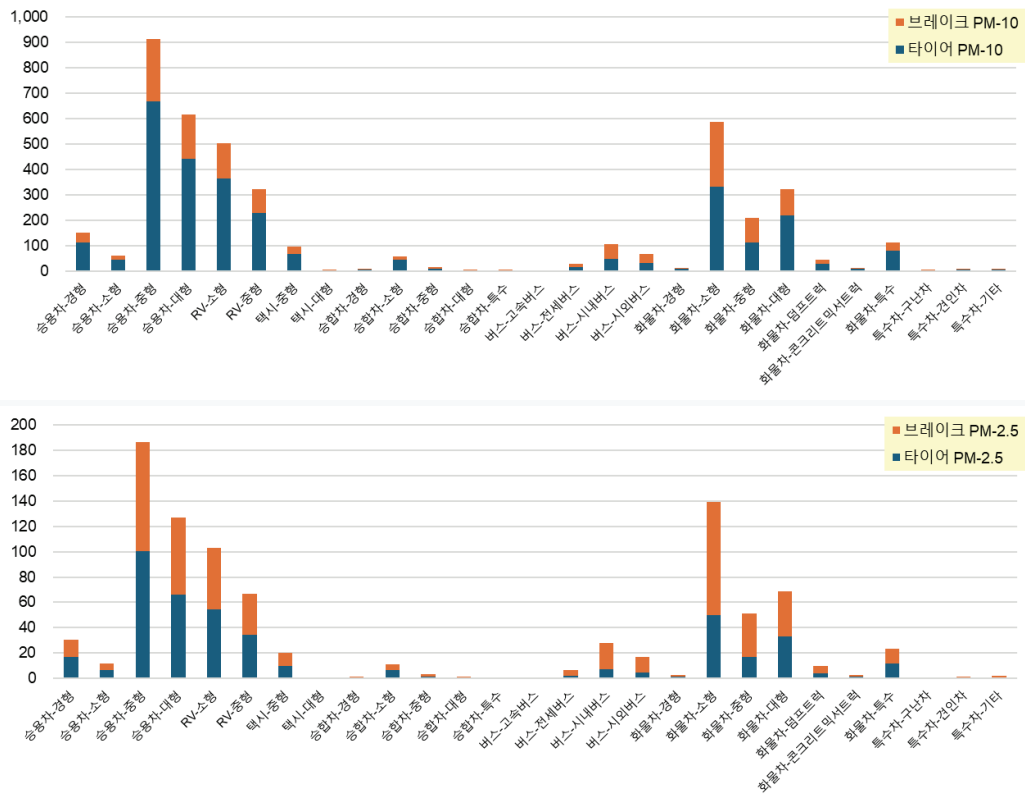


마지막으로, 자동차 세부 분류 및 시도별 비배기 마모 먼지 배출량 또한 산정하였다. <표 3-24>와 <그림 3-12>는 자동차 중분류(차종) 및 소분류(차급) 구분별 비배기 마모 먼지 배출량 산정 결과를 나타낸다. 자동차 소분류별 비배기 마모 PM<sub>10</sub> 배출량은 승용차-중형 21.4%, 승용차-대형 14.4%, 화물차-소형 13.8% 등의 순으로 높게 나타났으며, PM<sub>2.5</sub> 배출량은 승용차-중형 20.3%, 화물차-소형 15.2%, 승용차-대형 13.9% 등의 순으로 나타났다.

**표 3-24** 자동차 소분류(차급)별 비배기 마모 먼지 배출량 산정 결과(2021년 기준)

배출원 중분류-소분류	타이어 마모 (ton/yr)			브레이크 마모 (ton/yr)			비배기 마모(T+B) (ton/yr)		
	TSP (T)	PM <sub>10</sub> (T)	PM <sub>2.5</sub> (T)	TSP (B)	PM <sub>10</sub> (B)	PM <sub>2.5</sub> (B)	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
승용차-경형	372.6	111.8	16.8	48.8	39.0	13.7	421.4	150.8	30.4
승용차-소형	146.0	43.8	6.6	19.3	15.5	5.4	165.3	59.3	12.0
승용차-중형	2,226.5	668.0	100.2	307.4	245.9	86.1	2,533.9	913.9	186.3
승용차-대형	1,468.4	440.5	66.1	218.0	174.4	61.0	1,686.3	614.9	127.1
RV-소형	1,212.6	363.8	54.6	172.3	137.8	48.2	1,384.9	501.6	102.8
RV-중형	763.3	229.0	34.3	116.8	93.4	32.7	880.1	322.4	67.0
택시-중형	220.9	66.3	9.9	36.9	29.5	10.3	257.8	95.8	20.3
택시-대형	5.4	1.6	0.2	0.9	0.7	0.3	6.4	2.4	0.5
승합차-경형	11.4	3.4	0.5	2.0	1.6	0.6	13.4	5.0	1.1
승합차-소형	143.9	43.2	6.5	17.2	13.8	4.8	161.1	56.9	11.3
승합차-중형	30.4	9.1	1.4	7.6	6.1	2.1	38.0	15.2	3.5
승합차-대형	10.1	3.0	0.5	2.1	1.7	0.6	12.2	4.7	1.0
승합차-특수	7.4	2.2	0.3	1.7	1.4	0.5	9.1	3.6	0.8
버스-고속버스	0.09	0.03	0.00	0.03	0.02	0.01	0.12	0.05	0.01
버스-전세버스	45.6	13.7	2.1	15.8	12.7	4.4	61.5	26.4	6.5
버스-시내버스	153.6	46.1	6.9	75.8	60.7	21.2	229.4	106.7	28.1
버스-시외버스	104.6	31.4	4.7	42.6	34.1	11.9	147.2	65.5	16.6
화물차-경형	25.8	7.7	1.2	4.4	3.6	1.2	30.2	11.3	2.4
화물차-소형	1,109.7	332.9	49.9	319.9	255.9	89.6	1,429.5	588.8	139.5
화물차-중형	373.9	112.2	16.8	121.8	97.5	34.1	495.7	209.6	50.9
화물차-대형	731.4	219.4	32.9	127.4	101.9	35.7	858.8	321.4	68.6
화물차-덤프트럭	94.0	28.2	4.2	20.8	16.6	5.8	114.8	44.8	10.0
화물차-콘크리트 믹서트럭	27.0	8.1	1.2	5.2	4.1	1.4	32.2	12.2	2.7
화물차-특수	268.1	80.4	12.1	40.8	32.6	11.4	308.9	113.0	23.5
특수차-구난차	0.9	0.3	0.0	0.3	0.3	0.1	1.2	0.5	0.1
특수차-견인차	13.0	3.9	0.6	2.7	2.1	0.8	15.7	6.1	1.3
특수차-기타	19.9	6.0	0.9	4.7	3.7	1.3	24.6	9.7	2.2
합계	9,586.4	2,875.9	431.4	1,733.2	1,386.5	485.3	11,319.6	4,262.4	916.7

자료: 저자 작성.



자료: 저자 작성.

**그림 3-12** 자동차 소분류(차급)별 비배기 마모 먼지 배출량(위: PM<sub>10</sub>, 아래: PM<sub>2.5</sub>) 산정 결과(2021년 기준)

자동차 연료 구분별 비배기 마모 먼지 배출량 산정 결과는 <표 3-25>와 같다. 자동차 연료별로는 비배기 마모 PM<sub>10</sub> 배출량은 경유 55.7%, 휘발유 30.5%, LPG 7.8% 등의 순으로 배출 비중이 높게 나타났으며, PM<sub>2.5</sub> 배출량은 경유 57.2%, 휘발유 29.1%, LPG 7.5% 등의 배출 비중을 나타냈다.

**표 3-25** 자동차 연료 구분별 비배기 마모 먼지 배출량 산정 결과(2021년 기준)

자동차 연료 구분	타이어 마모 (ton/yr)			브레이크 마모 (ton/yr)			비배기 마모(T+B) (ton/yr)		
	TSP (T)	PM <sub>10</sub> (T)	PM <sub>2.5</sub> (T)	TSP (B)	PM <sub>10</sub> (B)	PM <sub>2.5</sub> (B)	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
휘발유	3,120.6	936.2	140.4	452.7	362.2	126.7	3,573.4	1,298.3	267.2
경유	5,105.5	1,531.7	229.8	1,052.7	842.1	294.7	6,158.3	2,373.8	524.5
LPG	779.5	233.8	35.1	120.8	96.6	33.8	900.3	330.5	68.9
CNG	128.3	38.5	5.8	63.1	50.5	17.7	191.4	89.0	23.4
하이브리드	343.2	103.0	15.4	38.6	30.9	10.8	381.9	133.9	26.3
전기	103.9	31.2	4.7	5.1	4.1	1.4	109.0	35.2	6.1
수소연료전지	5.3	1.6	0.2	0.2	0.2	0.1	5.5	1.7	0.3
합계	9,586.4	2,875.9	431.4	1,733.2	1,386.5	485.3	11,319.6	4,262.4	916.7

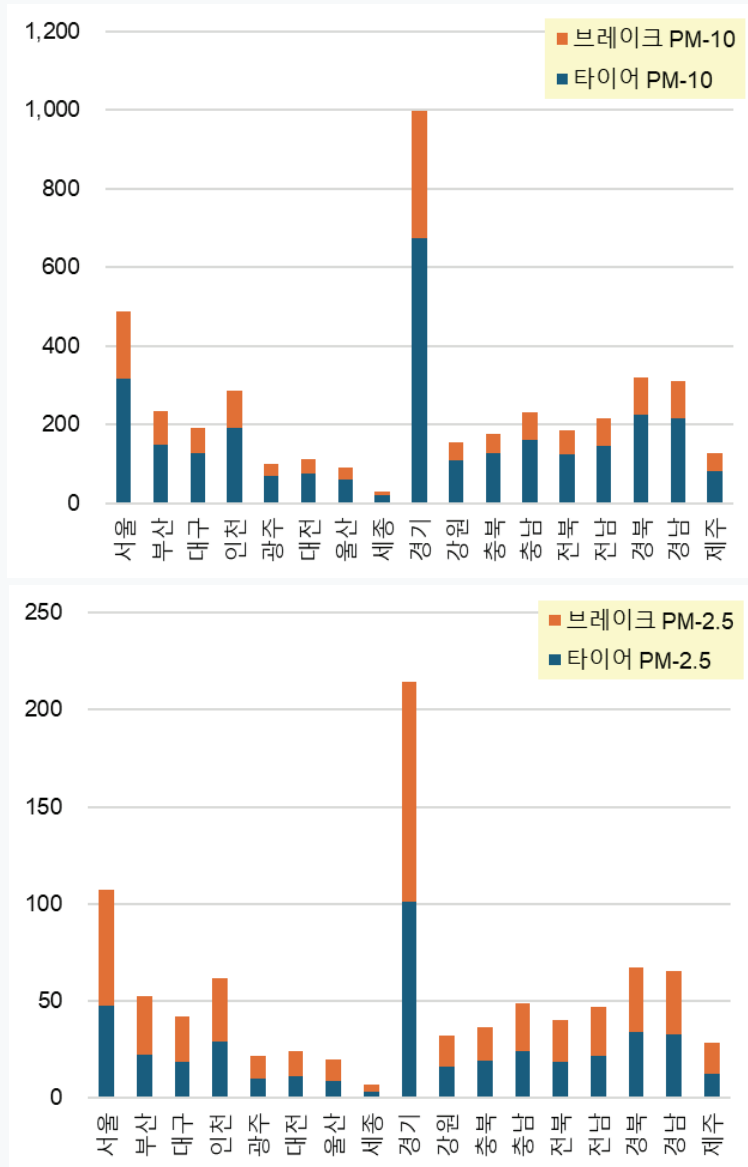
자료: 저자 작성.

〈표 3-26〉은 2021년 기준 시도별 자동차 비배기 마모 먼지 배출량 산정 결과를 나타낸 것으로, 비배기 마모 PM<sub>10</sub> 배출량은 경기 23.4%, 서울 11.4%, 경북 7.5% 순으로 높게 산정되었고, PM<sub>2.5</sub> 배출량 또한 경기 23.4%, 서울 11.7%, 경북 7.3% 순으로 높게 산정되었다.

**표 3-26** 시도별 자동차 비배기 마모 배출량 산정 결과(2021년 기준)

시도	타이어 마모 (ton/yr)			브레이크 마모 (ton/yr)			비배기 마모(T+B) (ton/yr)		
	TSP (T)	PM <sub>10</sub> (T)	PM <sub>2.5</sub> (T)	TSP (B)	PM <sub>10</sub> (B)	PM <sub>2.5</sub> (B)	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
서울	1,055	316	47	213	171	60	1,268	487	107
부산	502	150	23	106	85	30	608	235	52
대구	422	127	19	83	66	23	505	193	42
인천	642	192	29	118	94	33	759	287	62
광주	230	69	10	40	32	11	270	101	21
대전	248	74	11	48	38	13	295	112	24
울산	202	61	9	38	31	11	240	91	20
세종	69	21	3	13	11	4	82	31	7
경기	2,243	673	101	406	325	114	2,649	998	215
강원	366	110	16	56	45	16	422	155	32
충북	423	127	19	62	50	17	485	176	36
충남	533	160	24	89	72	25	622	231	49
전북	416	125	19	76	61	21	492	186	40
전남	482	144	22	91	73	26	573	217	47
경북	755	226	34	118	95	33	873	321	67
경남	725	217	33	118	94	33	843	312	66
제주	276	83	12	57	46	16	334	129	28
합계	9,586	2,876	431	1,733	1,387	485	11,320	4,262	917

자료: 저자 작성.



자료: 저자 작성.

**그림 3-13** 시도별 비배기 마모 먼지 배출량(위: PM<sub>10</sub>, 아래: PM<sub>2.5</sub>) 산정 결과(2021년 기준)

### 3. 비배기 배출로 인한 대기질 영향 검토

#### 가. 대기질 모델링 시스템 구축

본 연구에서는 비배기 배출량에 따른 대기질 영향을 분석하기 위해 CAPSS 2021년 자료를 기준으로 비배기 배출량을 산정하였다. 이에 따른 대기질 영향을 분석하기 위해 산정된 비배기 배출량을 제외한 대기오염물질 배출량 자료와 모두 포함한 배출량 자료를 활용한 대기질 모의실험을 수행하였다. 대기질 모의실험은 국내외적으로 널리 활용되는 WRF(기상모델)-SMOKE(인위적 배출량 모델)/MEGAN(식생 배출량 모델)-CMAQ(대기화학 모델) 모델링 시스템으로 구축된 환경에서 수행되었다. 본 연구에서는 국가미세먼지정보센터에서 구축한 안정적인 모델링 시스템의 구성을 기본적으로 적용하여 신뢰도를 확보하였다.

##### 1) 입력 자료

기준연도인 2021년 대기오염 농도 모의를 위해 국내외 인위적 배출량 및 자연배출량 정보를 활용하였다. 국외 인위적 배출량으로는 최근 중국 현황을 반영한 SIJACv2 배출 자료를 활용하였다. 국내 인위적 배출량의 경우는 설정된 기준연도에 따라 2021년 CAPSS 배출량 자료를 기반으로 하였으며,<sup>8)</sup> 식생배출량의 경우 MEGAN v2.1 모델 기반으로 산정된 배출량을 활용하였다.

2021년 기준연도 기상 자료는 국가미세먼지정보센터의 모델링 시스템을 통해 생산된 WRF v3.9.1 모델 자료를 활용하였다. 초기장으로는 연직층 35개로 구성된 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) FNL(Final) 자료를 활용하였으며, 수평 해상도의 경우 Lambert Conformal Conic 투영법을 사용하여 동아시아 27km, 국내 9km 격자 해상도 도메인으로 구성하였다. WRF 모델을 활용해 생산된 기상 자료는 MCIPv4.3을 활용한 처리 과정을 통해 CMAQ 모형 지원을 위해 필요한 자료 형태로 작성되었다.

기존 연구에서 개발된 SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emissions) 모델 기반의 동아시아(Woo et al., 2012) 및 국내 배출처리 모델(Kim, Moon, and Byun, 2008)을 활용하여 대기질 모델 지원을 위한 시공간 할당 및 화학종 분배 과정을 수행하였다. 또한 관련 연구(김순태 외, 2017)를 참고하여 일부 국내 배출원에 대해 개선된 시간할당계수를 적용하였으며, 최근 변경된 화학종 메커니즘(SAPRC07)으로의 대기모델링 수행 지원을 위해 관련 입력 자료 업데이트 및 처리 프로세스 보완을 수행하였다.

8) 국가미세먼지정보센터(2023a).

#### 대기오염 배출자료

- 최근 중국 현황을 반영한 SIJAQ v2 국외 배출자료, 국내 2021년 CAPSS 배출량 자료, 식생배출 MEGAN v2.1 모델 기반 산정 배출량 활용

#### 기상 모델

- WRF v3.9.1 모델 활용(2021년 기준연도 기상자료 생산)
- 기상 초기장: NCEP(National Centers for Environmental Prediction) FNL(Final) 자료 활용(수직층 35개)
- 수평 해상도: 동아시아 27km, 국내 9km 격자 해상도 도메인 구성 (Lambert Conformal Conic 투영법 사용)

#### 대기질 모델

- 최근 많은 연구에 활용되고 있는 CMAQ v5.3.2 활용
- 수행 옵션: EBI chemistry solver with SAPRC07 mechanism, ACM2 diffusion, PPM advection scheme, AERO6 aerosol module (국가미세먼지정보센터 설정 지원)
- 모델링 수행 범위 및 공간해상도: 동아시아(27km 격자) 및 한반도(9km 격자) 영역 모사 수행

자료: 저자 작성.

**그림 3-14** 비배기 배출로 인한 대기질 영향 분석을 위한 모델링 구성

## 2) 대기질 모델링

본 연구에서는 최근 많은 연구에서 활용되고 있는 CMAQ v5.3.2를 활용한 대기질 모델링을 수행하였다. 세부 수행 옵션으로는 EBI chemistry solver with SAPRC07 mechanism, ACM2 diffusion, PPM advection scheme, AERO6 aerosol module을 사용하였다. 총 22개의 연직층으로 설정하였으며, 동아시아 영역(27km 격자 해상도)의 모델링 수행을 위해 국가미세먼지정보센터 지원으로 확보된 초기 경계조건(boundary condition)<sup>9)</sup>을 활용하였다. 이후 국외 영향을 반영하기 위하여 27km 격자 해상도로 수행한 동아시아 영역의 모델링 결과를 국내 도메인(9km 격자 해상도) 영역의 경계조건으로 활용하였다.

구축된 모델링 시스템을 활용하여 기준연도인 2021년을 대상으로 비배기 배출량을 제외한 대기오염물질 배출량(wNEE)와 비배기 배출량을 포함한 대기오염물질 배출량(woNEE)에 따른 대기질 모의실험을 수행하였다.

### 나. 비배기 배출로 인한 대기질 영향

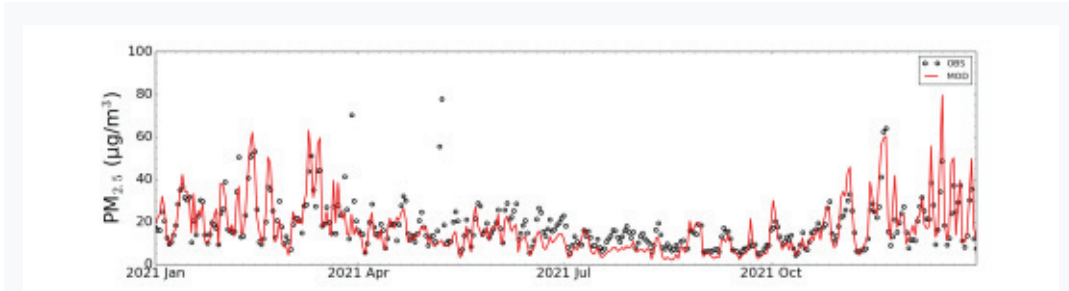
#### 1) 기준연도 모의 결과

비배기 배출로 인한 대기질 영향을 분석하기에 앞서, 구축된 모델링 시스템을 활용하여 기준연도인 2021년 대기질 모의를 수행하고 그 결과를 분석하였다. 분석 결과는 9km 격자 모델링

9) 국가미세먼지정보센터(2025.2).

결과를 기반으로 하였다.

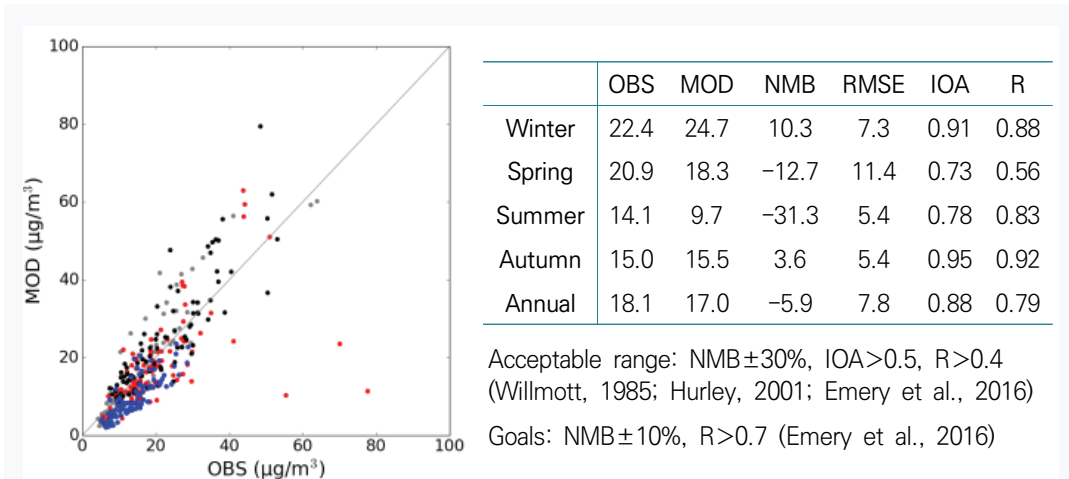
〈그림 3-15〉는 전국 도시대기측정망에서 관측된 PM<sub>2.5</sub> 일평균 농도와 모델 모의 결과를 시계열로 비교한 것이다. 전체적으로 관측농도 수준과 변화 추이를 모델이 적절하게 모의하는 것으로 나타났다.



주: 관측농도는 흑색 원(OBS), 모델 모의농도는 적색 선(MOD)으로 표기함.  
 자료: 저자 작성.

**그림 3-15** 기준연도(2021년)에 대한 전국 일평균 PM<sub>2.5</sub> 관측농도와 9km 격자 해상도 모델 모의농도 시계열 비교

〈그림 3-16〉은 전국 도시대기측정망에서 관측된 PM<sub>2.5</sub> 일평균 농도와 모델 모의농도 결과를 산포도 및 계절별 통계 지표로 비교한 것이다. 계절에 따른 차이가 있으나, 연평균 농도를 기준으로 우수한 모의 성능(NMB±10%, R>0.7)을 보여주는 것을 확인할 수 있었다.



자료: 저자 작성.

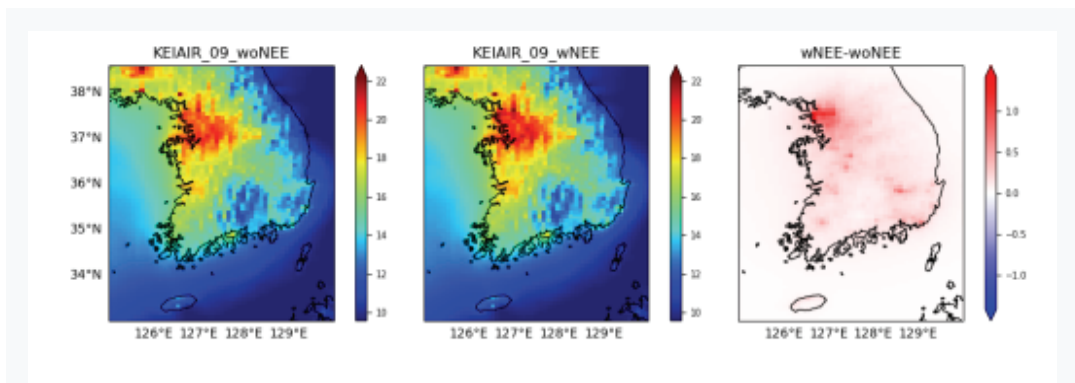
**그림 3-16** 기준연도(2021년)에 대한 전국 일평균 PM<sub>2.5</sub> 관측농도와 9km 격자 해상도 모델 모의농도 산포도 및 통계지표 비교

## 2) 비배기 배출에 따른 대기질 영향 분석

기준연도 2021년에 대해 모의실험 수행 결과를 통해 구축된 모델링 시스템이 국내 대기질 농도를 우수하게 모의하는 것을 확인한 후, 비배기 배출량을 제외한 대기오염물질 배출량(wNEE)과 비배기 배출량을 포함한 대기오염물질 배출량(wNEE)에 따른 대기질 모의실험 차이를 통해 비배기 배출이 대기질에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

〈그림 3-17〉은 배기 배출을 제외한 배출량(wNEE)과 배기 배출을 포함한 배출량(wNEE)에 따른 전국 연평균  $PM_{2.5}$  농도 분포 및 그 차이를 분석한 것이다. 전반적인 공간 분포 패턴은 비슷하게 나타났지만, 비배기 배출량을 포함한 경우에 수도권, 충청, 대전·세종 인근에서 농도가 더 높아진 것을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 교통이 밀집되어 있고, 교통량이 많은 지역일수록 비배기 배출의 기여가 크다는 것을 알 수 있다. 두 실험 간의 차이를 나타낸 그림(wNEE-woNEE)에서 이를 더 분명하게 확인할 수 있는데, 붉은색으로 나타난 부분은 비배기 배출로 인해 초미세먼지( $PM_{2.5}$ ) 농도가 증가한 지역이다. 특히 대도시 혹은 교통량이 많은 서울·경기권과 충청 일부 지역에서 약  $1\sim 2\mu g/m^3$  정도 증가하는 패턴이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 남부와 해안 지역에서는 상대적으로 증가 폭이 작게 나타난다.

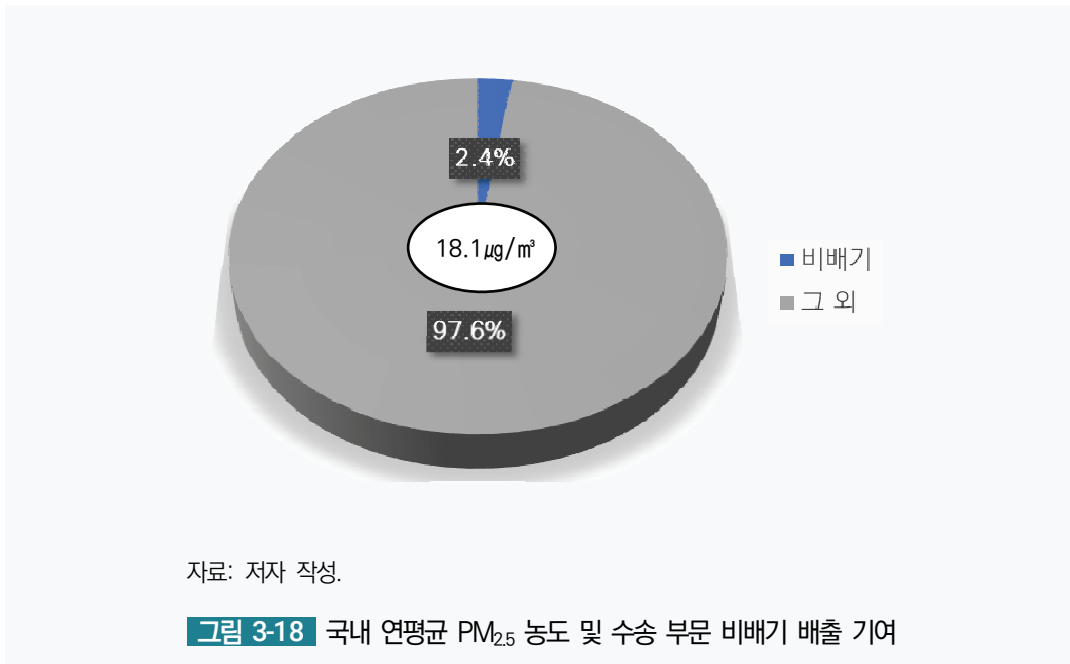
결론적으로 비배기 배출이  $PM_{2.5}$  농도에 직접적인 기여를 하고 있으며, 특히 교통량이 집중된 수도권 및 주요 도시에서 기여도가 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 정책적으로 배출 규제 강화만으로는 한계가 있으며, 비배기 배출 관리도 함께 고려해야 함을 시사한다.



자료: 저자 작성.

**그림 3-17** 비배기 배출로 인한 2021년 연평균  $PM_{2.5}(\mu g/m^3)$  농도 분포 및 변화

국내 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도를 기준으로 분석한 결과, 수송 부문 비배기 배출이 전국 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도인 18.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  중 약 2.4%를 차지하는 것으로 나타났다(그림 3-18 참조).



#### 4. 소결

비배기 배출 관련 국내외 연구 동향을 살펴본 결과, 타이어 및 브레이크 마모 등으로 인한 비배기 배출은 수송 부문 미세먼지 관리 측면에서 점차 비중이 증가하는 핵심 요인임을 알 수 있었다. 미국·유럽 등에서는 이미 국가 배출량 인벤토리 내에 비배기 배출량을 반영하고 있으며, 차종·브레이크 재질·주행 조건 등을 고려한 세분화된 배출계수 적용 등 개선된 인벤토리 구축을 위한 노력을 지속하고 있다.

국내에서는 미국, 유럽의 비배기 배출량 산정방안을 기반으로 국내 비배기 배출량을 산정하는 연구들이 주로 수행되어 왔다. 본 연구에서 최근 국가미세먼지정보센터에서 마련한 자동차 비배기 배출량 산정 방안을 활용하여 2021년 기준 브레이크 및 타이어 마모 배출량을 산정해 본 결과, PM<sub>10</sub> 기준으로는 전체 도로배출량 대비 약 125%, PM<sub>2.5</sub> 기준 약 29% 수준으로 도로이동오염원 전체 대비 상당한 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 특히 교통 밀집 지역에서 그 영향이 더욱 두드러지는 것을 알 수 있었으며, 이는 이후 모델링 결과를 통해서도 확인할 수 있었다. 이와 같이, 국내 비배기 배출량 산정 결과를 통해 현재 시점에서도 비배기 요인으로 인한 배출량은 적지 않음을 확인할 수 있을뿐더러, 향후 기후변화로 인한 기온 상승, 강수 패턴 변화 등으로 더욱 증가할 가능성이 큰 것으로 알려진 만큼 정책적으로 시급하게 고려해야 할 필요가 있는 관리 대상임을 명확하게 알 수 있었다.

효과적인 비배기 배출 관리를 위한 기반 마련을 위해서는 정확한 배출 현황 파악이 우선적으로 이루어져야 한다. 하지만 국내의 경우 아직 공식적으로 비배기 배출량을 산정하고 있지 않을 뿐더러, 지금과 같이 단순히 국외에서 사용되는 배출계수를 적용하여 배출량을 산정할 경우, 우리나라의 기후 조건, 도로 유형, 차량 특성 등을 반영하지 못해 비배기 배출량이 과대/과소 산정될 가능성이 있음이 선행 연구들을 통해 밝혀진 바 있다. 따라서 국내 실정을 반영한 국가 고유의 배출계수를 개발하고 이를 활용하여 국가 차원의 배출 인벤토리를 구축하기 위한 노력이 필요하다. 국가 고유 배출계수 개발을 위해서는 국내의 다양한 환경에 기반한 실험 연구가 지속적으로 수행될 필요가 있다. 이를 통해 자체적으로 개발된 국가 고유 배출 계수를 활용하여 배출량 인벤토리를 고도화하고 향후 비배기 배출 관리를 위한 정책 수립의 기초자료로 활용할 필요가 있다.

마지막으로 비배기 배출로 인한 대기질 영향을 평가하기 위한 모델링을 수행한 결과, 현재 비배기 배출량을 고려하지 않은 공식 배출량으로 모델링했을 때보다 오히려 관측치와 더 유사한 초미세먼지 농도를 모사하는 것을 확인할 수 있었다. 이 분석 결과를 통해 비배기 배출량을 고려하는 것이 기존에 고려하지 않은 경우보다 현실적인 대기질 모사가 가능하게 할 뿐만 아니라, 대기질 모사 정확도에 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 향후 국내 실정을 충분히 반영할 수 있을 정도로 비배기 배출 인벤토리를 고도화하고, 이를 대기질 예측을 위한 모델링에 활용할 수 있다면 정확도 향상에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 더 나아가 비배기 배출량을 고려한 대기질 모델링을 통해 배출 특성별 기여도 평가뿐만 아니라 지역·차종 등의 보다 세부적인 특성을 고려한 맞춤형 관리 대책 마련도 가능할 것이다.

결론적으로, 다수의 국내외 선행 연구에서 확인된 바와 같이 비배기 배출은 중요한 대기 오염원이며, 향후 기후변화와 교통 구조 등의 변화에 따라 그 비중 및 중요도가 더욱 높아질 것으로 전망된다. 따라서 비배기 배출 관리가 필수적이며, 실질적이고 효과적인 비배기 배출 관리를 위해서는 국내 현실을 반영한 배출계수 개발, 국가 차원의 인벤토리 구축, 고도화된 비배기 배출량을 활용한 대기질 평가를 위한 노력이 시급하다.

# 제4장

## 비배기 배출로 인한 대기오염 관리방안

1. 수송 부문 비배기 배출 관련 사업장 의견 검토
2. 국내 비배기 배출 관리방안

### 1. 수송 부문 비배기 배출 관련 사업장 의견 검토

본 장에서는 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기오염 관리방안 제안에 앞서 국내 관련 사업장의 의견을 함께 검토하고, 주요 내용을 다음과 같이 정리하였다. 관련 의견은 별도 서면을 통해 수집하였으며, 브레이크 마모와 관련하여 국내 가장 배출이 높은 대표 업체 한 곳과 타이어 마모의 경우 대한타이어산업협회를 통해 의견을 조사하였다.

#### 가. 브레이크 마모 먼지 관련

현재 국내에 공급하고 있는 브레이크 패드의 경우 대부분 NAO(Non-Asbestos Organic) 재질이며, 북미 수출 제품과 유사하고, 유럽 수출 제품은 low steel 재질로 제작하고 있다. 디스크 재질은 회주철로 동일하며, 분진 발생량은 유럽형 low steel 재질이 내수 및 북미 수출용인 NAO 재질에 비해 높다.

EURO 7 규제에 대응하기 위해 국내 업체에서도 유럽형 분진저감형 마찰재를 개발하고 있으며, 회주철 디스크에 레이저 클래딩 처리를 통한 배출 저감을 유도하는 기술도 개발되고 있다. 또한 브레이크 분진은 브레이크 부품 외 자동차의 전체적인 설계에 영향을 크게 받으며, 이에 따라 유럽에서는 브레이크 관련 규제/기준을 신차에 한해 적용하고 있으며, 애프터마켓 제품에 대해서는 별도의 규정을 두고 있지 않고 있다. 또한 차량 구동계를 내연기관에서 하이브리드 또는 전기로 변경하는 것만으로도 회생제동 적용 등에 따라 배출계수가 감소하여 규제 대응을 위한 하나의 전략으로 보고 있다.

국내 제도 도입과 관련하여, 현재까지 유럽에서도 규제치와 평가방법에 대해서는 어느 정도 윤곽이 잡혔지만 아직 최종 확정되지 않은 상황이며, 인증방법 및 절차 역시 아직 확정되지 않은 상황이다. 배출 분진 평가 장비 간 편차가 크고, 공식적으로 인증된 평가 장비가 부재한 상황이어서 현시점에서 제도 도입을 결정하기에는 한계가 있는 것으로 판단된다. 따라서 유럽 법규 실행과 제도가 안정적으로 이행된 이후(EURO 7 적용 이후 2~3년 경과 시점으로 예상)에 국내 적용을 검토할 수 있다고 생각한다.

한편 애프터마켓 부품에 대한 규제 제도 도입과 관련하여, 브레이크의 경우 부품 외 차량 단위에서 배출 특성이 크게 결정되기 때문에 제작차(신차) 외 애프터마켓 부품에 대한 제도 도입까지는 불필요하다고 생각한다.

그 외에 EURO 7 기준을 국내에 도입할 경우 수입되는 차량 국가별(북미·일본 등) 규정이 달라 무역분쟁 발생이 우려된다는 의견이 있었다. 또한 브레이크 배출 관련 인증 주체는 차량 제조사가 되어야 할 것으로 의견을 제시하였다.

## 나. 타이어 마모 먼지 관련

타이어 마모 입자의 대기 중 미세먼지(PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) 기여는 매우 낮은 수준으로 관리의 필요성에 대한 의문이 존재한다. 관련된 연구에 따르면(Panko et al., 2013, 2019), 타이어 마모로 인한 배출량은 존재하나, PM<sub>10</sub> 기여도는 연구에 따라 0.14~2.8%, PM<sub>2.5</sub>의 경우 0.1~0.68% 수준으로 매우 낮은 수준이다.<sup>10)</sup>

타이어 주행 중 도로와의 마모로 발생하는 입자의 대부분은 PM<sub>10</sub>보다 훨씬 큰 입자 크기를 나타내며, 도로 입자가 타이어 입자와 결합된 형태로 존재하고 밀도도 물보다 크기 때문에 대기 중으로 방출되더라도 장거리 이동이 쉽지 않다는 연구 결과들이 발표되어 있다.

국외 동향과 관련해 유럽경제위원회(UNECE: United Nations Economic Commission for Europe) ‘자동차 국제 기준 제정 기구 회의(WP.29: World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations)’ 산하의 ‘소음 및 타이어 분과(GRBP, Noise and Tyres)’에서 1921년 ‘타이어 마모 태스크 포스(TF TA: Task Force on Tyre Abrasion)’를 결성하였다. 타이어 마모를 측정하고 제한하기 위한 표준화된 방법론을 개발 중이며, 향후 전 세계 관련 기업들을 대상으로 실차 시험법을 확산할 예정이다.

타이어 마모 입자는 비의도적으로 발생하는 것으로서 도로상 비플라스틱 물질과 혼합체로 존재하기 때문에, 향후 규제 적용 시 충분한 유예기간 부여와 함께 중장기적 대책을 통해

10) 그럼에도 불구하고 논문에서는 비배기 배출 관리의 중요성이 향후 커질 것으로 전망한다.

관리되기를 요청한다는 의견을 제시하였다.

또한 타이어와 자동차 업계의 저감 노력뿐만 아니라 마모 먼지의 약 절반을 차지하는 도로마모 입자를 고려하여 도로 관련 정부 및 지자체의 노력, 운전 습관 개선을 통한 규제 및 교육이 병행될 필요가 있다는 의견 역시 제시하였다.

## 2. 국내 비배기 배출 관리방안

### 가. 대기오염 관점에서의 비배기 배출 관리 필요성

타이어 마모 및 브레이크 마모 배출과 관련하여 여러 분야에 걸쳐 논의가 이루어지고 있다. 특히 미세플라스틱 관점에서 타이어 마모 먼지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 마모 먼지의 구성 성분으로 인한 인체 위해성 및 생태계 영향 관점에서 관련 연구와 정책의 필요성에 대한 논의가 지속되고 있다.

본 연구에서는 대기오염 관점에서의 수송 부문 비배기 배출 관리의 필요성을 검토하기 위하여 국내 적용이 가능한 산정방법을 바탕으로 2021년에 대한 수송 부문 비배기 배출량을 시범 산정하였으며, 그 결과를 바탕으로 대기질 모사를 통해 비배기 배출로 인한 미세먼지 농도 영향 역시 검토하였다.

그 결과 직접배출량 기준으로, 타이어 및 브레이크 마모 배출량은 PM<sub>10</sub> 기준 전체 도로배출량(배기가스) 대비 약 125%, PM<sub>2.5</sub> 기준 약 29% 수준이며, 도로재비산먼지까지 포함하는 경우에는 배기 배출량을 훨씬 상회하는 상황이다. 또한 비배기 배출로 인한 국내 초미세먼지 농도 기여는 연평균 약 2.4%로 현재 주요 배출원으로 판단된다. 따라서 비배기 배출은 미세플라스틱, 유해물질 관점에서도 중요하나, 대기질에 영향을 미치는 주요 배출원으로서 역시 관리가 필요하다. 특히 비배기 배출은 뚜렷한 계절적 특성이 존재하지 않는 배출원으로 확인되는 만큼, 상시 관리가 가능한 대책으로 추진할 필요가 있다.

### 나. 비배기 배출로 인한 대기오염 관리방안

#### 1) 비배기 배출로 인한 대기 배출량 산정 및 대기질 영향 평가 필요

유럽을 중심으로 본격적인 규제가 도입되고 있으나, 아직까지 구체적으로 확정되지 않은 사항이 많아 제도 도입의 불확실성이 높은 상황이다. 배출량 자료는 학술적·정책적 분석의 근간이 되는 정보로, 비배기 배출 관리의 필요성과 예상 성과 등을 검토하기 위해서는 필수적으로 마련할 필요가 있다. 현재는 도로재비산먼지만 국가 공식 배출량으로 산정되고 있다.

대기질 및 보건학적 영향 등을 세부적으로 검토하기 위해서는 배출량에 대한 세부 성분 자료 구축 또한 필요하다. 국외 사례 등을 검토하여 배출량 추정이 가능하나, 궁극적으로는 국내 도로 및 주행 환경을 고려한 국가 고유의 배출계수 개발이 필요하며, 정책 추진의 필요성 및 추진 방향 설정을 위해서는 비배기 배출로 인한 국내 대기질 영향에 대한 세부적인 평가가 추가적으로 필요하다.

## 2) 대기오염 개선을 위한 사후처리 대책 강화

근본적으로 배출 발생량을 줄일 필요가 있으나, 우선 도로청소차량 운행 강화 등의 사후처리 대책을 통해 발생하는 도로 비배기 먼지를 저감하고, 향후 기술개발 수준에 맞추어 단계적으로 저감 대책을 강화할 필요가 있다. 사후처리 대책은 국내외적으로 이미 널리 활용되고 있어 손쉽게 정책 이행이 가능하고 그 효과 또한 높을 것으로 기대하며, 대기환경 정책을 중심으로 관련 대책 추진이 가능할 것으로 사료된다.

## 3) 수송 부문 수요관리를 통한 비배기 배출 저감 유도

대중교통 활성화, 경제적 인센티브, 보행 환경 개선 및 제도 보강 등 교통수요 관리를 통해 근본적인 배출 감축을 유도할 필요가 있다. 수송 부문에 대한 일정 수준의 수요가 존재함에 따라 감축 성과의 한계가 존재하겠지만, 탄소중립 기본계획을 통해 일정 부분 이행이 가능할 것으로 기대된다.

## 4) 브레이크 성분(중금속)에 대한 규제 필요

브레이크 마모 먼지의 위해성은 구성 성분에 따라 그 영향이 다르다. 미국 일부 주와 유럽 국가들은 패드 내 중금속 함량에 대한 규제를 실시하고 있다. 국외 사례를 바탕으로 국내에서 판매하고 있는 브레이크 성분(구리, 납, 카드뮴 등)에 대한 규정 마련이 필요하며, 일반 자동차는 물론 이륜차를 포함한 전체적인 검토가 필요하다.

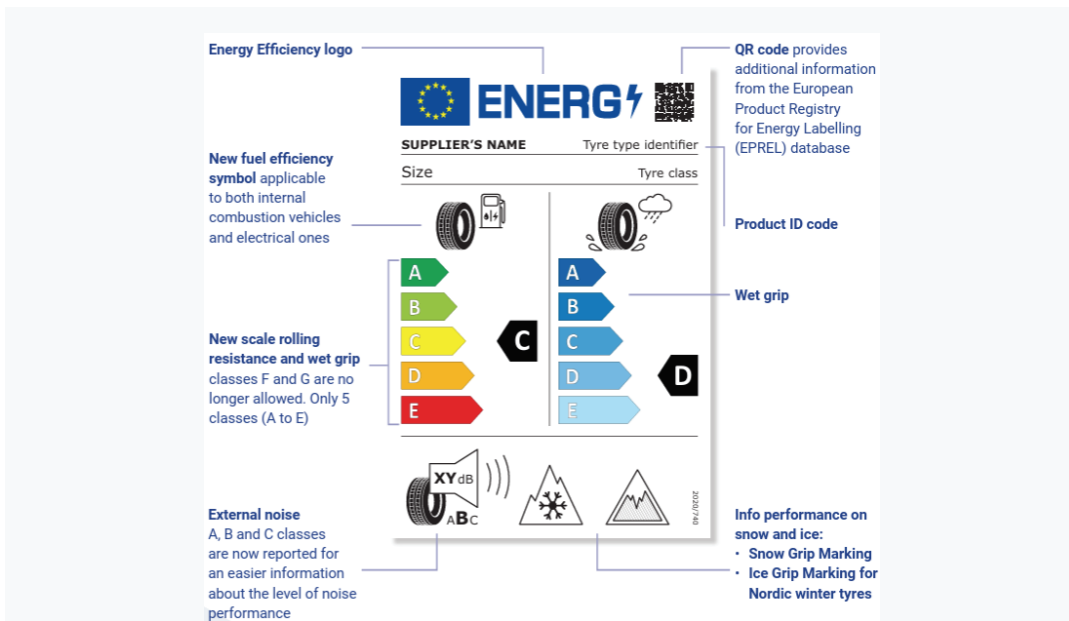
## 5) 저중량 차량 사용 유도

고중량 차량은 차량 이동에 필요한 에너지를 증가시키고 비배기 배출량 증가의 원인으로 작용하기에 저중량 차량으로의 유도가 필요하다. 국외 사례와 같이 차량 무게에 따른 등록세를 검토할 수 있으나, 고중량 차량에 대한 통행료 부과, 공공주차장 추가요금 징수 또는 활용 제한, 공공부문 저중량 차량 우선 구매 등의 간접적인 유도 대책이 현실적일 것으로 판단된다. 다만 전기차는 별도의 규정 마련이 필요하다.

저중량 차량 유도는 유의미한 저감 효과를 직접적으로 도출하기보다는 고중량 차량 보급에서 저중량 차량 중심으로 시장 변화를 유도하기 위한 정책적 메시지로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 6) 저마모 타이어 및 브레이크 보급 확대

저마모 타이어 및 브레이크 도입을 통해 비배기 배출 발생량을 근본적으로 감축할 필요가 있다. 현재 관련 규정 및 측정 기준이 최종 확정되지 않았음을 고려하여 우선적으로 등급제도 시행을 통해 소비자 인식 확대 및 관련 시장 대응 여력을 확보한 이후, 추후 관련 규정 도입이 필요하다. 마모도를 포함한 제품의 등급 평가를 통해 소비자의 선택권을 확보하고, 공공기관 및 버스, 택시 등 장거리 운행 차량을 중심으로 저마모 타이어 설치를 권고 또는 의무화하는 제도를 검토해 볼 필요가 있다.



자료: ETRma, "Ensuring Tyre Safety through Robust & Comprehensive Regulations", 검색일: 2025.9.8.

**그림 4-1** 유럽의 타이어 라벨 제도

본 연구의 결론으로 6가지 관리 방안을 제안하였다. 정책의 기반을 마련하기 위해서는 우선 비배기 배출량(대기오염물질 및 중금속 등 유해물질 모두 포함) 산정 및 영향에 대한 연구가 추진될 필요가 있으며, 즉각적인 배출 관리를 위해 2, 3번 방안 역시 우선적으로 추진될 필요가 있다. 해당 방안은 이미 미세먼지 관리 종합계획과 탄소중립 계획에 기반영되어 있어 정책적 기반이 이미 마련된 상황으로, 상대적으로 수월하게 추진할 수 있을 것으로 판단된다. 장기적으로는 저마모 타이어 및 브레이크 보급 확대가 필요하다고 판단되나, 이는 국내의 관련 기술 개발, 정책 및 시장 동향에 맞추어 추진되어야 한다.

# 제 5 장

## 결론 및 연구의 한계

1. 결론
2. 연구의 한계

### 1. 결론

본 연구를 통해 수송 부문 비배기 배출로 인한 미세플라스틱, 보건학적 영향과 함께 대기질에 미치는 영향 역시 적지 않음을 확인하였다. 이러한 결과는 대기환경 정책을 통한 비배기 배출 감축 수단 추진의 당위성 및 근거를 확보하였다는 의미가 있다.

비배기 배출 관리를 위한 첫 단추로 국가 대기배출 목록에 비배기 배출량 반영 및 대기질 영향 평가가 필요하다. 배출량 자료는 학술적·정책적 분석의 근간이 되는 정보로, 비배기 배출 관리의 필요성과 예상 성과 등을 검토하기 위해서는 필수적으로 마련할 필요가 있다. 현재는 도로재비산면지만 국가 공식 배출량으로 산정되고 있으나, 타이어 및 브레이크 마모 배출 역시 고려가 필요하다. 배출 관리를 위한 기본적인 방향으로 구성 성분을 포함한 비배기 배출량 산정을 통해 학술적·정책적 기반 마련이 필요하며, 비배기 관련 측정, 분석, 배출계수 산정 등 관련 기초 연구 및 저감기술 개발 등의 기술적 관리 기반 역시 필요하다 하겠다. 이는 『제2차 미세먼지 관리 종합계획』을 기반으로 구체화하여 추진할 수 있을 것으로 판단된다.

비배기 배출 관리를 위한 단기(우선) 대책으로 기존 탄소중립 및 대기환경 정책을 활용한 수송 부문 수요관리 및 사후처리 대책 강화를 제안한다. 유럽에서 시행되는 제도 도입 계획과 관련 기술 및 측정 기술 표준화에는 그 완성을 위해 여전히 시간이 필요하며, 국내의 경우 유럽에서 진행되는 논의에 함께 참여하며 단계적인 제도 입안을 추진할 필요가 있다. 단기 대책은 그 전에 관련 배출 저감을 위해 필요하며, 기존 정책에 기반함으로써 정책 수용성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

브레이크 및 타이어 마모 먼지의 구성 성분에 따른 규제 역시 검토가 필요하다. 마모 먼지의 위해성은 구성 성분에 따라 그 영향이 다르다. 미국 일부 주와 유럽 국가들은 패드 내 중금속 함량에 대한 규제를 실시하고 있다. 국외 사례를 바탕으로 국내에서 판매하고 있는 브레이크 성분(중금속 등)에 대한 규정 마련이 필요하며, 일반 자동차는 물론 이륜차를 포함한 전체적인 검토가 필요하다.

저중량 차량 사용 유도는 기타 검토 사항으로 제안하고자 한다. 고중량 차량은 차량 이동에 필요한 에너지를 증가시키고 비배기 배출량 증가의 원인으로 작용하기에 저중량 차량으로의 유도가 필요하다. 국외 사례와 같이 차량 무게에 따른 등록세를 검토할 수 있으나, 고중량 차량에 대한 통행료 부과, 공공주차장 추가요금 징수 또는 활용 제한, 공공부문 저중량 차량 우선 구매 등의 간접적인 유도 대책이 현실적일 것으로 판단된다. 다만 전기차는 별도의 규정 마련이 필요하다.

중장기적으로는 저마모 타이어 및 브레이크 기술 개발 및 인증 기준 마련, 보급 확대 정책을 유럽 등 국외 추진 현황을 고려하여 단계적으로 도입할 것을 제안한다. 유럽을 중심으로 진행 중인 논의에 참여하여 관련 제도의 도입 및 기술 개발, 보급 현황에 따라 국내에도 관련 제도 도입을 순차적으로 검토한다. 다만 이러한 논의는 관련 업계의 기술 개발 현황, 국외 제도 및 기술 도입 상황 등을 종합적으로 고려한 단계별 도입이 필요하다. 우선적으로 등급제도 시행을 통해 소비자 인식 확대 및 관련 시장 대응 여력을 확보하는 방안을 검토할 것을 제안하며, 공공기관 및 버스, 택시 등 장거리 운행 차량을 중심으로 저마모 타이어 설치를 권고 또는 의무화하는 제도를 함께 제안한다.

## 2. 연구의 한계

본 연구에서는 가능한 신뢰할 수 있는 근거와 평가방법론 도입을 통해 합리적인 결론을 도출할 수 있도록 추진하였으나, 그 결과를 해석하는 데 있어 다음과 같은 한계가 있음을 명시한다.

유럽의 EURO 7 제도는 현재 어느 정도 확정되었음에도 불구하고 세부 사항과 규정, 측정 방법 및 기술 표준화 등이 아직 확정되지 않은 상황이다. 이러한 현황은 본 연구의 결론에 영향을 줄 수 있는 불확실성을 가지고 있으며, 관련 동향에 대한 추가적인 검토와 함께 해석이 필요하다.

국내 수송 부문 비배기 배출량 추정과 대기질 영향 분석은 가급적 합리적인 방안을 도입하였음에도 불구하고 배출원 특성상 높은 불확실성을 가지고 있으며, 이에 따라 국내 환경에 적합한

배출계수 개발 및 산정방법 개선 역시 함께 요구된다. 산정 결과에 따라 대기질에 미치는 유의미한 영향에 대해서는 확인하였으나, 구체적인 기여 수준에 대해서는 불확실성이 존재함을 유의할 필요가 있다.

본 연구에서 도출된 대기환경 관점에서의 결과는 비용 효과적인 검토와 제도 도입으로 인한 시장 가격 변동 및 안전 규정 대응 등 다양한 파생 요소까지 고려하지 않았으며, 실제 제도 도입 시 이러한 종합적 영향을 염두에 두고 신중하게 접근할 필요가 있다.

# 참고문헌

## [국내문헌]

- 관계부처 합동(2019), 「제1차 미세먼지 관리 종합계획」.
- 관계부처 합동(2023), 「국가 탄소중립·녹색성장 기본계획」, pp.16-48.
- 관계부처 합동(2024), 「제2차 미세먼지 관리 종합계획」, pp.23-38.
- 국가미세먼지정보센터(2023a), 「2021년 대기오염물질 배출량 통계」.
- 국가미세먼지정보센터(2023b), 「자동차 운행에 의한 도로재비산먼지 및 비배기관 배출량 산정방법 개선(II): 타이어 및 브레이크 패드 마모 등을 중심으로」, pp. 92-93, p.111, p.135, p.137, pp.139-140, p.142, pp.144-145, p.147.
- 국가미세먼지정보센터(2025.2), 내부자료.
- 국가미세먼지정보센터(2025.7), 내부자료.
- 국립환경과학원(2025), 「교통분야 비배기계 배출량 산정기반 구축 연구(I)」, pp.42-45.
- 김순태 외(2017), “수도권 초미세먼지 농도모사: (II) 오염원별, 배출물질별 자체 기여도 및 전환율 산정”, 「한국대기환경학회지」, 33(4), pp.377-392.
- 서울연구원(2023), 「서울시 친환경차량 환경성 강화방안」.
- 서울연구원(2025), 「서울시 친환경차량 환경성 강화방안」.
- 서울특별시(2016), 「초미세먼지(PM-2.5) 배출원 인벤토리 구축 및 상세모니터링 연구」.
- 이석환(2024), “브레이크 및 타이어 입자 배출에 대한 EURO 7 배기규제”, 「오토저널」, 한국자동차 공학회, 46(2), pp.31-34.
- 이현희 외(2020), “상용차 타이어 제조 처방에 따른 미세먼지 발생 경향 연구”, 「한국대기환경학회지」, 36(2), pp.306-307.
- 최성우 외(2023), “자동차 비배기관에 의한 미세먼지 배출량 추정 및 추이 분석: 타이어 및 브레이크 마모 배출량 중심으로”, 「한국대기환경학회지」, 39(2), p.258, pp.260-261.
- 환경부(2016), 「자동차 타이어 마모 미세먼지 배출량 산정 연구」.
- 환경부(2022), 「제3차 대기환경개선 종합계획」.

환경부 수도권대기환경청(2024), 「제2차 수도권 대기환경관리 기본계획」. pp.34-61.

### [국외문헌]

Caltrans(2021), *Brake Wear Particulate Matter Emissions Modeling*, CalTrans Project No.65A0703(ERG & LINK).

CARB(2021a), *EMFAC2021 Volume 3 Technical Document*.

CARB(2021b), *Brake and Tire Wear Emissions (Final Report, Revision 2)*, CARB Project 17RD016.

Willmott, C. J. et al.(1985), “Statistics for the Evaluation and Comparisons of Models”, *Journal of Geophysical Research*, 90(C5), pp.8995-9005.

EMEP/EEA(2023), *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023*, 1.A.3.b.vi. Road Transport: Automobile Tyre and Brake Wear, pp.18-22.

Giechaskiel, B. et al.(2024), “Light-Duty Vehicle Brake Emission Factors”, *Atmosphere*, 15(1): 97, pp.2-12.

Dornoff, J. and F. Rodriguez(2024), *Euro 7: The New Emission Standard for Light- and Heavy-Duty Vehicles in The European Union*, The International Council on Clean Transportation(ICCT).

Emery, C. et al.(2016), “Recommendations on Statistics and Benchmarks to Assess Photochemical Model Performance”, *Journal of the Air and Waste Management Association*, 67(5), pp.582-598.

Hurley, P. J., A. Blockley, and K. Rayner (2001), “Verification of a Prognostic Meteorological and Air Pollution Model for Year-Long Predictions in the Kwinana Industrial Region of Western Australia”, *Atmospheric Environment*, 35(10), pp.1871-1880.

Jones, S. and H. Brunt(2017), “Twenty Miles per Hour Speed Limits: A Sustainable Solution to Public Health Problems in Wales”, *Journal of Epidemiology and Community Health*, 71(7), pp.699-706.

Kim, S., N. Moon, and D. W. Byun(2008), “Korea Emissions Inventory Processing Using the U.S. EPA’s SMOKE System”, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, Vol. 2-1, pp.34-46, DOI: 10.1007/BF03654888.

Kupiainen, J. K. et al.(2005), “Size and Composition of Airborne Particles from Pavement-Tyre Interaction (Tyre Wear Particles)”, *Environmental Science & Technology*, 39(3), pp.699-706.

Müller, K., K. Unice, and J. Panko(2025), “Tire Emissions During The Use Phase of Tires – Current and Future Trends”, *Environmental Science: Advances*, 4(9), p.1348.

- Muresan, C. et al.(2025), “A Study of The Direct Emission of Tire Wear Particles on Different Types of Roads”, *Science of the Total Environment*, Vol.958: 178018. p.11.
- OECD(2020), *Non-Exhaust Particulate Emissions from Road Transport*, p.113.
- Panko, J. M. et al.(2013), “Measurement of Airborne Concentrations of Tire and Road Wear Particles in Urban and Rural Areas of France, Japan, and the United States”, *Atmospheric Environment*, Vol.72, pp.192-199.
- Panko, J. M. et al.(2019), “Evaluation of Tire Wear Contribution to PM<sub>2.5</sub> in Urban Environments”, *Atmosphere*, 10(2), p.99.
- Tang, J. et al.(2019), “Assessing the Impact of Vehicle Speed Limits and Fleet Composition on Air Quality Near a School”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(1), p.149.
- Tian, Z. et al.(2021), “A Ubiquitous Tire Rubber-Derived Chemical Induces Acute Mortality in Coho Salmon”, *Science*, Vol.371, pp.185-189.
- UNECE(2023), *UN Global Technical Regulation No.24*.
- US EPA(2020), *Brake and Tire Wear Emissions from Onroad Vehicles in MOVES3*, pp.21-30.
- US EPA(2024), *Brake and Tire Wear Emissions from Onroad Vehicles in MOVES5*.
- Wei, Y., X. Zhang, and H. Li(2024), “Test Method for Particulate Matter Emissions from Brake Wear of Light-Duty Vehicles: A Review”, *E3S Web of Conferences*, 522, 01001. p.3.
- Williams, D. and R. North(2013), *An Evaluation of The Estimated Impacts on Vehicle Emissions of A 20mph Speed Restriction in Central London*.
- Woo, J. H. et al.(2012), “Development of An Anthropogenic Emissions Processing System for Asia using SMOKE”, *Atmospheric Environment*, Vol.58, pp.5-13, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.10.042.
- Woo, S. H. et al.(2022), “Comparison of Total PM Emissions Emitted from Electric and Internal Combustion Engine Vehicles: An Experimental Analysis”, *Science of the Total Environment*, Vol.842: 156961, pp.10-11.

### [온라인 자료]

- 국가법령정보센터, “대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법”, <https://www.law.go.kr/법령/대기관리권역의대기환경개선에관한특별법>, 검색일: 2025.9.17.
- 국가법령정보센터, “대기환경보전법”, <https://www.law.go.kr/법령/대기환경보전법>, 검색일: 2025.9.17.

국가법령정보센터, “미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법”, <https://www.law.go.kr/법령/미세먼지저감및관리에관한특별법>, 검색일: 2025.9.17.

매일경제(2024.5.19), “전기차 질주의 ‘그늘’…타이어 분진에 미세먼지 30% 증가”, <https://www.mk.co.kr/news/world/11018992>, 검색일: 2025.9.8.

영국 웨일스 정부 뉴스(2021.9.27), “50mph Schemes Successful in Driving Down Air Pollution”, <https://media.service.gov.wales/news/50mph-schemes-successful-in-driving-down-air-pollution>, 검색일: 2025.8.11.

쿠키뉴스(2024.8.5), “‘전기차가 미세먼지 늘린다’… 타이어 마모도 대책 마련 시급”, <https://www.kukinews.com/article/view/kuk202408020122>, 검색일: 2025.9.8.

California Senate(2010), “Senate Bill No. 346 (Brake Pad Law), Chapter 307, Statutes of 2010”, California Legislative Information, [https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billTextClient.xhtml?bill\\_id=200920100SB346](https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billTextClient.xhtml?bill_id=200920100SB346), 검색일: 2025.7.17.

D.C. Department of Motor Vehicles(2023.10.1), “Vehicle Registration Fees”, <https://dmv.dc.gov/node/155452>, 검색일: 2025.9.17.

ETRma, “Ensuring Tyre Safety through Robust & Comprehensive Regulations”, <https://www.etrma.org/key-topics/tyre-regulations/>, 검색일: 2025.9.8.

European Parliament and Council(2024), “Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on Type-Approval of Motor Vehicles and Engines and of Systems, Components and Separate Technical Units Intended for Such Vehicles, with Respect to Their Emissions and Battery Durability (Euro 7)”, *Official Journal of the European Union*, pp.1-196, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1257>, 검색일: 2025.7.5.

MBC 뉴스투데이(2024.11.6), “전기차가 친환경?...타이어가 미세먼지 뿜어낸다”, [https://imnews.imbc.com/replay/2024/nwtoday/article/6654804\\_36523.html](https://imnews.imbc.com/replay/2024/nwtoday/article/6654804_36523.html), 검색일: 2025.9.8.

UNECE(2024.2.8), “UNECE to Introduce the First Ever Methodology to Measure Particle Emissions from Tyres”, <https://unece.org/media/press/388139?>, 검색일: 2025.8.21.

US EPA, “MOVES and Mobile Source Emissions Research”, <https://www.epa.gov/moves>, 검색일: 2025.9.8.

US EPA, “6PPD-quinone”, <https://www.epa.gov/chemical-research/6ppd-quinone>, 검색일: 2025.7.8.

Washington State Department of Ecology, “6PPD – Tire Anti-Degradant (6PPD) and 6PPD-quinone (6PPDQ)”, <https://ecology.wa.gov/waste-toxics/reducing-toxic-chemicals/addressing-priority-toxic-chemicals/6ppd>, 검색일: 2025.9.21.

Washington State Legislature(2010), “Revised Code of Washington 70.285 – Better Brakes Law”, <https://app.leg.wa.gov/rcw/default.aspx?cite=70.285>, 검색일: 2025.7.5.

Washington State Legislature, “Senate Bill Report: SB 5931 – An Act Relating to Addressing 6Ppd in Motorized Vehicle Tires through Safer Products for Washington”, <https://lawfilesexternal.wa.gov/biennium/2023-24/Pdf/Bill%20Reports/Senate/5931%20SBR%20ENET%20TA%2024.pdf>, 검색일: 2025.7.5.



# Air Quality Impact and Management of Non-Exhaust Emissions in the Transportation Sector

Choi, Ki-Chul et al.

## 1. Introduction

Air pollutants emitted from automobiles have long been managed primarily through exhaust emissions. Strengthened emission regulations, improvements in fuel quality, the widespread adoption of emission control technologies, and the expansion of zero-emission vehicles such as electric and hydrogen-powered cars have contributed to a steady decline in tailpipe emissions. These measures have led to significant improvements in urban air quality in particular.

In contrast, non-exhaust emissions—arising from tire wear, brake wear, and road dust resuspension during vehicle operation—have not shown a similar decline. On the contrary, their relative contribution to the overall transport sector is steadily increasing. However, the current domestic management framework remains largely focused on exhaust emissions, leaving scientific understanding and policy responses to non-exhaust emissions insufficient.

This study aims to examine the air quality impacts of non-exhaust emissions, which are expected to become increasingly significant sources in the transport sector but remain outside the current scope of regulatory management. To this end, the research first reviews the status of domestic and international studies and policy trends related to non-exhaust emissions. It then estimates non-exhaust emissions from the domestic transport sector and evaluates their contribution to ambient particulate matter concentrations. Finally, drawing on both the review of global research and policy developments, as well as expert consultations and stakeholder feedback, this study assesses the feasibility of introducing emission management measures in Korea and proposes strategies for the effective management of non-exhaust emissions.

## 2. Current Status of Korean and International Non-Exhaust Policies

### 2.1 Korean policy

A review of Korean transport-sector policies related to non-exhaust emissions reveals two main categories: carbon neutrality policies and air quality management policies.

Korea's carbon neutrality policies, as core national strategies for greenhouse gas reduction, warrant closer examination in the transport sector to identify pathways for integrating non-exhaust emission management. Most transport-related measures focus on promoting eco-friendly vehicles, emphasizing energy efficiency improvements and fuel transitions (e.g., electrification and hydrogen). These approaches fundamentally aim to reduce greenhouse gas emissions from internal combustion engine (ICE) vehicles. However, it is important to note that even eco-friendly vehicles continue to generate non-exhaust emissions, which should therefore emerge as a critical policy agenda in the coming years.

Among Korea's carbon neutrality measures, policies promoting public transportation and demand management for private ICE vehicles function as co-reduction strategies, reducing both greenhouse gases and non-exhaust emissions by curbing overall vehicle activity. Similarly, behavioral interventions promoting eco-driving practices not only enhance energy efficiency but also mitigate high-emission driving behaviors (e.g., rapid acceleration and sudden braking), thereby offering meaningful reductions in non-exhaust particle generation.

Korea's air quality policies are primarily embedded within the 3rd Comprehensive Plan for Air Quality Improvement, the 2nd Comprehensive Fine Dust Management Plan, and the 2nd Basic Plan for Air Environment Management. Recent policy trends highlight two key features: the integration of carbon neutrality strategies into air quality management for co-benefits, and the stabilization of road-cleaning programs as a post-management measure to reduce road dust resuspension. The 2nd Comprehensive Fine Dust Management Plan, while largely focused on expanding zero-emission vehicles to curb exhaust-related pollutants, explicitly acknowledges the necessity of addressing non-exhaust emissions—underscoring the recognition that tire and brake wear remain unresolved sources even under electrification scenarios. However, these considerations are primarily linked to research and development, without concrete implementation pathways.

Meanwhile, the 2nd Basic Plan for Air Environment Management echoes many measures found in other policies, but also emphasizes region-specific strategies, such as the designation of priority management roads and the expansion of monitoring systems for resuspended road dust. These efforts represent important foundational steps toward a more systematic management of non-exhaust emissions.

In sum, Korean policies addressing non-exhaust emissions are primarily embedded within certain carbon neutrality and air quality frameworks, focusing on demand-side management, behavioral improvements, and post-treatment measures such as road-cleaning operations. These approaches generally demonstrate high policy acceptability, as they do not require extensive technological development or new institutional frameworks, and can deliver immediate emission reduction benefits.

## 2.2 International policy

The European Union (EU) has taken the lead by incorporating brake particle emissions and tire abrasion into type-approval requirements under the forthcoming Euro 7 regulation. In parallel, the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) has advanced standardization of testing methodologies through Global Technical Regulation (GTR) No. 24 (brakes) and revisions to Regulation No. 117 (tires). Early adoption of these measures in Korea would not only enhance the regulatory readiness of the domestic automotive and parts industry for international markets but also strengthen national air quality management systems. However, such adoption entails significant upfront investment in measurement equipment and testing infrastructure, as well as technical compliance burdens on industry. Given the large share of EU markets in Korea's automotive exports, gradual implementation aligned with the EU's regulatory timeline—around 2030—is considered realistic and ultimately unavoidable.

In the United States, states such as California and Washington have imposed progressive restrictions on copper content in brake pads, targeting near-zero levels by 2025, alongside limits on heavy metals such as lead, chromium, and mercury. Considering the ecological impacts of metallic constituents in brake dust on water and ecosystems, Korea could adopt a similar cross-sectoral approach at the intersection of chemical regulation and air quality policy. While the advantages lie in regulatory clarity and significant environmental benefits, the challenges include material substitution burdens and potential increases in component costs. Nonetheless, Korea's strong technological capacity in automotive parts manufacturing, coupled with export-oriented readiness, suggests that near-term adoption is relatively feasible.

Other noteworthy measures include weight-based vehicle registration fees, implemented in some U.S. states. Although primarily motivated by infrastructure maintenance and safety rather than environmental goals, such policies provide a valuable reference for non-exhaust management, given the close correlation between vehicle weight and non-exhaust emissions. While immediate adoption in Korea may face practical limitations, weight-based pricing could be considered as a longer-term alternative to influence consumer behavior in the automotive market.

Finally, speed regulations on roadways are widely implemented across countries for various purposes, including safety and air quality improvement. However, research remains divided on the net air quality benefits of speed restrictions, indicating the need for careful, evidence-based evaluation before pursuing such measures in Korea.

### 3. Review of Non-Exhaust Emissions and Air Quality Impacts in the Transport Sector

As non-exhaust emissions from the transport sector are expected to increase, research related to brake and tire wear has been actively conducted both in Korea and abroad. This section reviews recent studies and, based on them, examines the impacts of non-exhaust emissions on air quality.

#### 3.1 Korean and international research trends on non-exhaust emissions

In Korea, studies related to non-exhaust emissions from the transport sector have included experimental research to understand their characteristics, the development of emission factors applicable to domestic conditions, and efforts to estimate domestic non-exhaust emissions using methodologies adopted in the U.S. and Europe. Through experiments, researchers have analyzed fine particle generation trends depending on tire composition, brake pad materials, and vehicle types in order to better understand domestic non-exhaust emission characteristics, and in some cases have proposed emission factors applicable to Korea.

Although non-exhaust emissions are not yet officially included in Korea's national inventories, pilot estimations and comparative studies have been conducted by applying various U.S. and European methodologies. More recently, a classification system and estimation methods for non-exhaust particulate emissions from vehicles have been proposed as a result of these efforts.

In the U.S. and Europe, non-exhaust emissions are already reflected in national emission inventories, and further research has been undertaken to improve these inventories by developing detailed emission factors that consider vehicle types, brake materials, and driving conditions. Beyond emission estimation, a wide range of studies have focused on developing standardized testing methods for measuring non-exhaust emissions and analyzing the effectiveness of mitigation technologies, particularly in anticipation of forthcoming international regulations.

Through these domestic and international studies, it has become clear that tire and brake wear emissions are emerging as key factors in transport-related particulate matter management. For effective control of non-exhaust emissions, it is essential to establish nationally representative emission factors and to build a national inventory that reflects Korean circumstances.

#### 3.2 Estimated contribution of non-exhaust emissions in Korea's transport sector

In this study, the estimation method for vehicle non-exhaust wear emissions recently developed by the National Fine Dust Information Center was applied to calculate Korea's non-exhaust particulate matter (PM) emissions for 2021, and their impacts were analyzed through air quality modeling.

The results indicate that non-exhaust emissions account for approximately 125% of total on-road PM<sub>10</sub> emissions and about 29% of PM<sub>2.5</sub> emissions, showing that they represent a substantial proportion of all mobile source emissions. This confirms that even at present, non-exhaust sources contribute significantly to emissions, particularly in traffic-dense areas where their impacts are more pronounced, highlighting the need for management measures tailored to local characteristics.

Moreover, when the estimated non-exhaust emissions were included in air quality modeling, the simulated fine particulate concentrations showed closer alignment with observed data. This demonstrates that the precision of non-exhaust emission inventories directly contributes to improving air quality predictions. Looking forward, incorporating Korea-specific non-exhaust emission data into air quality modeling is expected to enable not only source-specific contribution assessments but also the development of more precise, region- and vehicle-type-specific management strategies.

## **4. Management Strategies for Air Pollution from Non-Exhaust Emissions**

### **4.1 Review of industry stakeholder opinions**

Prior to presenting management strategies for non-exhaust emissions in the transport sector, opinions from relevant domestic industry stakeholders were collected through written consultations. For brake wear, feedback was obtained from a leading domestic brake manufacturer, and for tire wear, input was provided by the Korea Tire Manufacturers Association.

In the brake sector, domestic manufacturers are developing low-dust friction materials modeled after European technologies in preparation for the Euro 7 regulation. Additional measures, such as laser cladding of gray cast-iron brake discs, are being explored to reduce emissions. Industry stakeholders emphasized that brake dust emissions are significantly influenced not only by brake components themselves but also by overall vehicle design. Accordingly, even in Europe, regulations apply to newly manufactured vehicles rather than aftermarket products. Furthermore, the transition of drivetrains from internal combustion engines to hybrids or electric vehicles inherently reduces brake emissions through regenerative braking, providing an additional compliance strategy.

Regarding the introduction of domestic regulations, stakeholders noted that while the general framework for limits and testing methods in Europe is becoming clearer, final decisions have not yet been made. Certification procedures and approved testing equipment remain under development, and significant discrepancies between measurement devices persist. As no officially certified evaluation equipment currently exists, stakeholders advised that Korea should wait until

European regulations are fully implemented and stabilized (expected two to three years after Euro 7 enforcement) before considering domestic adoption.

In the tire sector, the industry association expressed skepticism regarding the necessity of regulation, highlighting research findings that tire wear particles contribute minimally to ambient  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ , with most particles existing in combination with road dust and demonstrating limited long-range transport potential. The association requested that, if regulations are introduced, sufficient lead times and long-term strategies should be provided, given that tire wear particles are generated unintentionally and typically exist as composite particles mixed with non-plastic road materials.

Additionally, industry representatives stressed that beyond tire and automotive industry efforts, policy measures should also account for road surface wear particles, which contribute approximately half of total wear-related dust. They suggested that road maintenance efforts by governments and municipalities, along with driver education and behavioral improvement programs, must complement technical measures to effectively reduce non-exhaust emissions.

#### **4.2 Korea's management strategies for non-exhaust emissions**

Discussion on managing tire and brake wear emissions is ongoing across multiple domains. To assess the necessity of domestic regulation from an air quality perspective, this study conducted a pilot estimation of 2021 non-exhaust emissions from the transport-sector using available methodologies. The results were incorporated into air quality modeling to evaluate their contribution to ambient particulate matter concentrations. Findings indicated that non-exhaust emissions contributed approximately 2.4% to the annual average  $PM_{2.5}$  concentration, confirming their significance as a major pollution source.

A critical first step in managing non-exhaust emissions is the integration of non-exhaust sources into the National Air Pollutant Emission Inventory and the subsequent inclusion of such data in air quality assessments. Emission inventories provide the foundational data for both scientific and policy analyses. Currently, only resuspended road dust is included in the official inventory; tire and brake wear emissions must also be systematically incorporated. In addition, detailed compositional data are necessary to assess air quality and health impacts, while the development of nationally representative emission factors tailored to domestic road and driving conditions is proposed as a priority task.

In the short term, this report recommends leveraging existing carbon neutrality and air quality policies, particularly those focusing on transport demand management and post-treatment measures. Since European regulatory frameworks and associated testing technologies are still under development, Korea should engage in ongoing international discussions and pursue phased

regulatory introduction. In the meantime, demand-side and behavioral measures can yield early reductions with high policy acceptability.

Composition-based regulation should also be considered, as the toxicity of wear particles depends heavily on their chemical composition. Drawing on international precedents in the United States and Europe, which regulate heavy metal content in brake pads, Korea should establish domestic regulations on brake components (e.g., heavy metals) sold in the market, extending considerations to include both passenger vehicles and motorcycles.

The promotion of lightweight vehicles is another proposed measure. Heavier vehicles require more energy to operate and produce higher non-exhaust emissions. While weight-based registration fees, as seen in some international examples, could be evaluated, more practical measures may include imposing tolls or parking surcharges on heavy vehicles, restricting their access to public parking facilities, and prioritizing lightweight vehicles in public procurement. Special considerations will be needed for electric vehicles, given their higher average weight profiles.

In the medium term, the introduction and expansion of low-wear tires and brakes should be prioritized. Korea should actively participate in ongoing European regulatory discussions to align with emerging standards, technological developments, and deployment practices. A phased approach is recommended, beginning with the introduction of grading and labeling schemes to enhance consumer awareness and support market readiness. Public sector fleets and high-mileage vehicles, such as buses and taxis, should be prioritized for adopting low-wear tires, with mandatory installation or strong recommendations forming part of the strategy.

## **5. Conclusions and Limitations of the Study**

### **5.1 Conclusions**

This study confirmed that non-exhaust emissions from the transport sector contribute not only to microplastic pollution and adverse health impacts but also significantly affect ambient air quality. These findings provide a scientific basis and policy rationale for pursuing non-exhaust emission reduction measures within the broader framework of air quality management.

A fundamental direction for emission management is the establishment of an academic and policy foundation through the estimation of non-exhaust emissions, including their compositional characteristics. In parallel, there is a need to strengthen the technical management infrastructure, encompassing measurement, analysis, emission factor development, and research into emission reduction technologies. Such efforts can be concretized and advanced under the framework of the 2nd Comprehensive Fine Dust Management Plan.

As a short-term (priority) measure for managing non-exhaust emissions, this study proposes to strengthen transport demand management and end-of-pipe control measures within the framework of existing carbon neutrality and air quality policies. Since the introduction of related regulations, technologies, and standardized measurement methods currently under discussion in Europe will still require time to be fully established, Korea should participate in these discussions and pursue a stepwise institutional development. Before such systems are implemented, short-term actions based on existing policies are necessary to reduce related emissions while enhancing policy acceptability.

It is also necessary to examine regulations on brake and tire wear particles based on their chemical composition. The toxicity of wear particles varies depending on their components. Some U.S. states and European countries have already established restrictions on heavy metal content in brake pads. Based on these international examples, Korea needs to develop regulations on brake material composition (e.g., heavy metals) for products sold domestically, including not only passenger cars but also motorcycles.

Encouraging the use of lightweight vehicles is suggested as an additional consideration. Heavier vehicles require more energy for movement and are a significant cause of increased non-exhaust emissions; therefore, incentives for lighter vehicles are necessary. While weight-based registration fees similar to those in other countries could be considered, indirect measures such as toll charges for heavy vehicles, additional parking fees, restrictions on public parking, or preferential procurement of lightweight vehicles in the public sector may be more realistic. However, separate provisions for electric vehicles will be required.

As a medium-term measure, this study proposes promoting the distribution of low-wear tires and brakes. Korea should participate in the ongoing European regulatory and technical discussions to introduce relevant systems and technologies in a phased manner, taking into account industry R&D progress and the status of international policy adoption. Initially, introducing a grading system could raise consumer awareness and enhance market readiness. Additionally, it is recommended to mandate or encourage the installation of low-wear tires for public institutions and high-mileage vehicles such as buses and taxis.

## 5.2 Limitations of the study

While this study sought to adopt the most reliable evidence and methodologies available to reach reasonable conclusions, several limitations must be acknowledged:

Although the Euro 7 framework has been partially finalized, many details—such as regulatory thresholds, testing procedures, and technical standardization—remain unsettled. This creates uncertainties that may affect the interpretation of this study's findings and necessitates

continuous monitoring of regulatory developments.

The estimation of Korea's transport-sector non-exhaust emissions and their air quality impacts, despite being conducted using the most rational approaches available, carries inherent uncertainties due to the nature of the emission sources. Consequently, the development of Korea-specific emission factors and improved estimation methodologies is essential. While the study confirmed that non-exhaust emissions have a meaningful impact on ambient air quality, uncertainties remain regarding the precise magnitude of their contribution.

**Keywords** Transportation, Non-Exhaust Emissions, Tyre, Brake, Air Quality

## 저자약력

### 최기철(연구책임)

건국대학교 대기공학 박사  
한국환경연구원 연구위원(현)  
kcchoi@kei.re.kr

#### 주요 연구실적

- 탄소중립 이행 촉진 및 대기오염 동시 감축을 위한 대기관리체계 전환 방안 (2025)
- 탄소중립 전략 이행에 따른 2030 미세먼지 대기질 전망 및 동시 감축 정책 방향 연구(II) (2023)

### 서정빈

한국환경연구원 연구원(현)  
jbseo@kei.re.kr

### 한지현

한국환경연구원 부연구위원(현)  
jhhan@kei.re.kr

### 한세현

(주)랩솔레미스 대표(현)  
airhansh@labsolemis.kr

※ 본 책자는 환경표지 인증을 받은 용지로 인쇄되었습니다.



## 수송 부문 비배기 배출로 인한 대기질 영향과 관리방안