

## 도로이동오염원의 암모니아와 비배기 먼지 배출에 대한 고찰

최유진\*·김용표\*\*

### A Study on Ammonia and Non-Exhaust Dust Emissions from On-Road Vehicles

Yu-Jin Choi\*·Yong Pyo Kim\*\*

**요약**: 이 논문은 서울시 같은 국내 도시지역에서 문제가 되는 대기오염물질인 미세먼지(PM<sub>10</sub>) 및 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)와 해당 대기오염물질의 주요 관리 대상인 도로이동오염원에 주목하였다. 최근 국내외 핵심 환경 의제가 탄소중립이다. 우리나라도 전기차 등 친환경차 보급을 포함하는 '2050 탄소중립 시나리오안'을 발표하였고, 서울시를 포함한 지방정부도 관련된 계획을 발표하고 있다. 친환경차 보급계획이 순차적으로 이행되는 과정에서 도로이동오염원의 대기오염물질 배출 양상이 달라지고, 이에 따라 미세먼지, 초미세먼지 등 도시지역의 대기오염 관리 관점에서 주목해야 할 대기오염물질이 새롭게 등장할 수 있다. 이 논문은 새롭게 주목할 대기오염물질로 암모니아(NH<sub>3</sub>)와 비배기 먼지를 선정하고, 국내외 선행연구자료를 조사하고 수집하였다. 도시지역에서 도로이동오염원의 암모니아와 비배기 먼지 배출을 주목해야 할 이유를 정리하고, 두 대기오염물질을 관리할 방향을 배출 저감과 노출 저감으로 분리하여 제안하였다. 배출 저감 방향은 배출계수 저감과 총주행거리 저감으로 구분하여 제시하였다. 배출 저감 수단이 정착하는 데 장시간이 소요될 가능성을 고려하면, 도로이동오염원 배출로부터 노출을 최소화할 수 있는 수단도 함께 적용될 필요가 있다. 이에 특히 도로와 인접한 학교, 어린이집 등 건강민감계층 시설의 이용자가 도로이동오염원 배출로부터 노출을 최소화할 수 있는 방향을 제시하였다.

**주제어**: 도로이동오염원, 암모니아, 비배기 먼지, 미세먼지, 초미세먼지

**ABSTRACT**: This study focuses on on-road vehicles, which are the main management targets of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in urban areas like Seoul. Recently, the main environmental agenda is Net-Zero. Korean government has announced the 2050 Net-Zero Scenario Plan, which includes the supply of eco-friendly vehicles such as electric vehicles. Local governments including Seoul are also proposing related plans. The pattern of air pollutants emitted from on-road vehicles is highly likely to change in the process of sequentially implementing the eco-friendly vehicle supply plan. Accordingly, new air pollutants that require attention in terms of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> management in urban areas will emerge. In this study, ammonia(NH<sub>3</sub>) and non-exhaust dust were selected as newly emerging air pollutants from on-road vehicles. Through literature review, the reasons for paying attention to the two air pollutants were summarized, and the management directions for reducing the emission and exposure of two air pollutants were presented. The direction for reducing the emission was divided into emission factor and total Vehicle Kilometers Traveled(VKT). In particular, the direction for reducing the exposure was suggested to protect users of health-sensitive facilities adjacent to roads.

**KeyWords**: On-Road Vehicles, Ammonia(NH<sub>3</sub>), Non-Exhaust Dust, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>

\* 서울연구원 안전환경연구실 연구위원(Research Fellow, Dept. of Safety and Environment Research, The Seoul Institute). 교신저자 (E-Mail : yjchoi@si.re.kr, 02-2149-1182)

\*\* 이화여자대학교 화공신소재공학과 교수(Professor, Dept. of Chemical Engineering & Materials Science, Ewha Womans University)

## I. 서론

중·대규모 산업시설이 거의 없는 서울시와 같은 대도시에서는 자동차 등 도로이동오염원이 대기오염 물질의 주요 배출원으로 주목받았다. 그에 따라 자동차의 대기오염물질 배출을 줄일 목적으로 배출허용 기준 강화, 배출저감장치 부착, 공해차량 운행제한, 교통수요관리 등 다양한 정책적 수단이 발굴되어 적용되고 있다(서울시, 2021a; 서울시, 2021b).

우리나라가 국가대기환경기준을 설정하여 관리하는 대기오염물질은 8가지 항목이며, 이중 서울시에서 문제가 되는 대기오염물질은 오존( $O_3$ ), 이산화질소( $NO_2$ ), 미세먼지( $PM_{10}$ ), 초미세먼지( $PM_{2.5}$ )이다.  $O_3$ 는 질소산화물( $NO_x$ )과 휘발성유기화합물(VOC)이 대기 중에서 광화학 반응으로 생성되는 2차 생성 오염물질이지만,  $NO_2$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 는 배출원에서 직접 배출되기도 하고 대기 중에서 물리, 화학적 반응으로 생성되기도 하는 오염물질이다. 특히,  $NO_2$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 는 차량에서 직접 배출되기도 하므로 일반적으로 도로와 인접한 지역에서 해당 대기오염물질의 농도가 높다(서울시보건환경연구원, 2021).

서울시에는 도시 전반의 대기질을 모니터링하는 도시대기측정소와 자동차 운행에 따른 대기오염물질의 발생과 변화를 관찰하기 위한 도로변대기측정소가 운영되고 있다. 도시대기측정소는 서울시 자치구별로 1개소씩 25개소가 설치되어 있고, 도로변대기측정소는 자동차 통행이 많은 간선도로, 중앙차로 및 자동차 전용차로 등에 15개소가 설치되어 있다(서울시보건환경연구원, 2021).

〈그림 1〉은 서울시 도로변대기측정소와 도시대

기측정소에서 측정된 2010년부터 2020년까지의  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  연평균농도이다. 차량 운행의 영향을 직접 받는 도로변대기측정소의 오염도가 도시대기측정소보다 높음을 알 수 있다.  $PM_{10}$ ,  $NO_2$ 는 도시대기측정소와 도로변대기측정소에서 모두 감소 경향을 보인다.  $PM_{2.5}$ 는 도시대기측정소에서는 경향성을 찾기 어렵지만, 도로변대기측정소에서는 감소 경향이 뚜렷하다. 연평균농도의 추세선을 보면, 도로변의  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  농도 저감 추세가 도시대기측정소보다 더욱 뚜렷하게 확인돼, 지난 10년간 추진된 다양한 도로이동오염원 정책의 효과가 도로변 대기 측정 결과에 반영된 것으로 해석할 수도 있다.

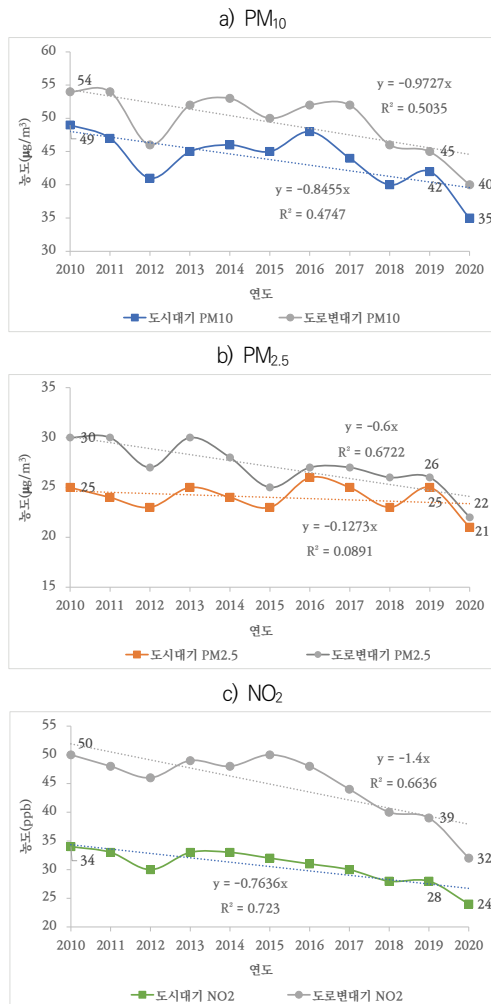
도로변의  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  농도가 뚜렷하게 줄어 도로이동오염원 관련 정책들이 효과를 보이고 있음은 긍정적이나 여전히 서울의  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$  농도는 세계보건기구(World Health Organization: WHO) 가이드라인과 비교하면 높은 수준이다. 더욱이 2021년 개정된 WHO 가이드라인에서  $PM_{10}$  연평균농도의 권고기준은  $20\mu g/m^3$ 에서  $15\mu g/m^3$ 로,  $PM_{2.5}$  연평균농도의 권고기준은  $10\mu g/m^3$ 에서  $5\mu g/m^3$ ,  $NO_2$  연평균농도 권고기준은 21ppb에서 5ppb 수준으로 대폭 강화되었다(WHO, 2021). WHO의 개정 전 권고기준과 코로나19의 영향에 따른 국내외의 사회경제적 활동 감소로 대기질이 좋았던 2020년 서울시의 오염도를 비교해도, 여전히 서울의 대기오염도는 높아 대기질 개선을 위한 지속적인 노력이 필요함을 알 수 있다. 특히 고밀 도시인 서울은 도로변의 대기오염도가 더 높지만, 주거시설, 학교 등 정온 시설이 차량 통행이 많은 도로변에 인접한 경우가 많은 것도 문제이다. 많은 도로 인접 시설의 이용자가 차량

운행에 따른 대기오염물질에 노출될 가능성을 고려하면, 도로이동오염원으로부터 시민의 건강을 보호하기 위한 추가적인 노력이 필요하다. 이를 위해서는 기존의 도로이동오염원 주요 배출 관리 대상 외에도 관리가 필요한 영역을 조사하여 발굴하고, 정교하게 정책과 제도를 설계할 필요가 있다.

〈그림 1〉 서울시 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub> 연평균농도의 변화 (2010~2020년)

출처: 서울시보건환경연구원, 2021, 2020년 서울 대기질 평가보고서 자료의 재구성

주) 각 점선은 추세선이며, 추세선의 수식(절편은 제외)과 결정계수(R<sup>2</sup>)를 표시



지금까지 국내 도로이동오염원의 대기오염물질 배출 관리는 연료연소와 관련된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub>를 줄이는 데에 초점이 맞춰져, 관련 기술, 정책, 제도들이 발굴되어 적용되었다. 예를 들면, 경유차의 연소에서 배출되는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 줄이기 위해 매연저감장치(Diesel Particulate Filter: DPF, Diesel Oxidation Catalyst: DOC), NO<sub>x</sub>를 줄이기 위해 Selective Catalytic Reduction(SCR) 등의 기술이 개발되어 제작차(배출허용기준 강화)와 운행차(저감장치 부착 사업)에 적용되고 있다(서울시, 2021b; 수도권대기환경청, 2019).

최근 도로이동오염원 배출 관리에서 관심이 상대적으로 적었지만 이슈로 떠오르는 부문이 있다. 첫 번째는 연료연소와 관련되지 않는 비배기(Non-Exhaust) 먼지로 타이어·브레이크·도로의 마모 먼지와 도로재비산먼지가 이에 해당한다. 두 번째는 상대적으로 배출량이 적은 것으로 알려져 관심에서 벗어나 있던 자동차 암모니아 배출이다. 도시 지역의 PM<sub>2.5</sub>에서 질산염이 PM<sub>2.5</sub> 고농도 시 가장 많이 증가하는 성분으로 조사되면서 질산염 생성의 전구물질인 암모니아(NH<sub>3</sub>)가 주목을 받고 있다. 더욱이 국외 연구에서 자동차 배출 암모니아의 과소평가가 지적되면서 자동차의 암모니아 배출이 또 다른 이슈로 떠오르고 있다.

도로이동오염원 관련 암모니아와 비배기 먼지 배출에 관한 연구는 중국, 유럽, 미국 등에서 다수 진행된 바 있다. 국내에서도 도로재비산먼지 배출량 추정을 위한 연구가 일부 진행된 바 있지만 암모니아 배출과 비배기 먼지 배출 전반의 관리에 대해 정책적인 측면에서 접근한 연구는 드물다.

이 논문에서는 도로이동오염원 운행과 관련하여 최근 논의가 깊어지고 있는 암모니아와 비배기

먼지 배출 이슈를 국내외 선행연구자료를 조사하여 고찰하였다. 서울시와 같은 고밀 도시에서 미세먼지와 초미세먼지 농도 개선을 이끌 새로운 관리 영역으로 암모니아와 비배기 먼지 배출을 주목하여 살펴보고 관리 방향을 제안하고자 하였다.

## II. 암모니아와 비배기 먼지 이슈

### 1. 도로이동오염원 관련 대기오염물질

우리나라의 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람 IV(국가미세먼지정보센터, 2020)에 따르면, 자동차 등 도로이동오염원과 관련된 대기오염물질 배출은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 자동차의 엔진 작동(엔진가열 모드, 엔진미가열 모드)에 따른 배출, 자동차의 정차와 주행 중의 휘발유 증

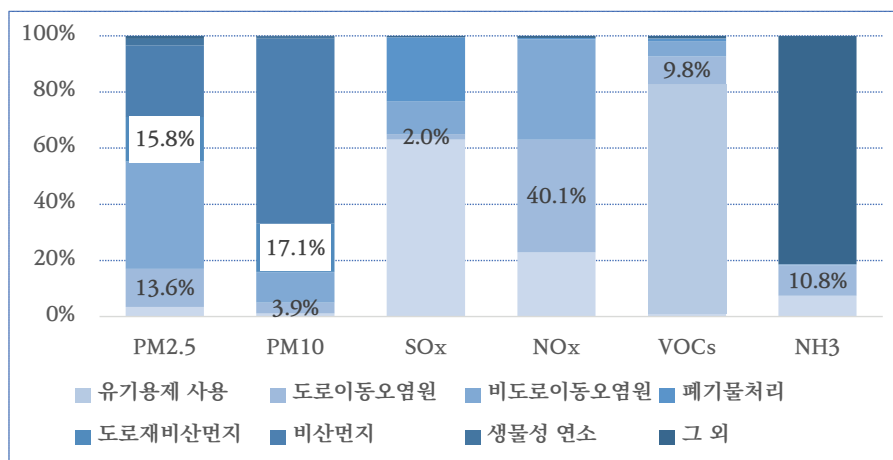
발 배출, 자동차의 도로운행에 따른 도로비산먼지(재비산 먼지, 타이어/브레이크/도로표면 마모 비산먼지) 배출이다.

자동차의 엔진 작동으로 배출되는 대기오염물질은 일산화탄소(CO), VOC, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, 황산화물(SO<sub>x</sub>), 암모니아이다. 휘발유 증발로 배출되는 대기오염물질은 VOC이며, 도로비산먼지로 배출되는 대기오염물질은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>이다.

앞서 언급한 바와 같이 서울을 포함한 국내에서 여전히 문제가 되는 기준성 대기오염물질은 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>이고 이와 관련이 깊은 전구물질은 VOC, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, SO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>이다. <그림 2>는 국가미세먼지정보센터가 공개한 최신 국가대기오염물질 배출량 자료인 2018년 CAPSS에서 발췌한 서울시 배출원별 배출량 비중이다. 도로이동오염원 관련 배출 비중을 도로이동오염원(엔진 작동 및 증발)과 도로비산먼지(도로재비산먼지)까지 합하면, PM<sub>10</sub>은 21%, PM<sub>2.5</sub>는 29.4%로 나타난다. 또한, NO<sub>x</sub>에서는 도로이동오염원의 배출

〈그림 2〉 2018년 기준 서울시 주요 대기오염물질 배출원별 배출 비중

자료: 국가미세먼지정보센터(<https://www.air.go.kr>), 2018년 CAPSS 자료의 재구성, 2021. 11. 16. 접속  
주) PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>의 누적 막대에서 흰 상자 안으로 표시된 비율은 도로재비산먼지에 대한 비중이고, 그 외의 숫자로 표기된 비율은 도로이동오염원에 대한 비중



비중이 40%로 높다. 즉, 도로이동오염원의 배출 비중이 높은 직접 배출 오염물질은 NOx, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>이다. 이에 따라 도로이동오염원의 배출 관리 는 주로 NOx, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>에 초점이 맞춰졌고, 이 중 특히 주목받고 관리가 집중되어 온 분야는 엔진 작동에 따른 연료연소로 배출되는 NOx, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>이다. 배출량이나 배출 비중이 적은 것으로 추정되는 도로이동오염원의 SOx, NH<sub>3</sub>, VOC와 배출 비중은 유의미하나 배출량에 대한 불 확실성이 큰 도로비산먼지에 대한 관리는 상대적으로 미비하다. 이 연구에서는 특히 서울의 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 문제와 관련되어 있으면서 새롭게 주목을 받는 도로이동오염원의 암모니아와 비배기 먼지 배출에 집중하였다.

## 2. 도로이동오염원의 비배기 먼지 배출 이슈

차량의 엔진 작동과 관련된 배기(Exhaust) 배출 오염물질에 대한 강화된 규제로 배기 배출 미세 먼지 발생량이 줄면서, 차량의 비배기 배출 미세먼 지가 주목받고 있다. 비배기 먼지는 엔진 작동에 따른 배기 배출과 관련되지 않은 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로 마모, 도로재비산에 따른 먼지 배출을 의미한다.

유럽위원회(European Commission)는 PM<sub>10</sub> 질량 농도의 28~59%는 도로재비산먼지이고, 브레이크 마모는 도시 도로에서는 16~55%, 고속도로 에서 3%를 차지하고, 타이어 마모는 5~30% 수준 이라고 보고 한 바 있다(EEA, 2019; Rienda & Alves, 2021). 차량의 비배기 미세먼지 배출량은 지역의 기상, 도로 노면의 상태 및 관리 수준, 교통

속도 및 차량 중량 등 많은 요인에 좌우된다. 배기 배출량보다 비배기 배출량에 대한 표준 측정 및 배 출평가 방법이 정립되지 않아 추정된 배출량의 범 위가 넓기는 하나 비배기 배출의 비중이 적지 않다는 의견에는 대부분의 연구자가 동의한다(Rienda and Alves, 2021).

또한, 전기, 수소차 등 엔진 관련 배기 배출이 없는 친환경차의 운행도 증가하고 있고, 국내의 정책 방향도 내연기관차의 퇴출과 친환경차로의 전환 으로 흘러가고 있다. 최근 우리나라 정부가 발표한 ‘2050 탄소중립 시나리오안’(관계부처합동, 2021c) 의 A안으로는 도로 부문 차량의 97% 이상을, B안 으로는 85% 이상을 전기·수소화할 목표를 제시하 였다.

미국 CARB(California Air Resources Board) 는 내연기관차의 퇴출과 친환경차로 전환에 의해 2030년 이후에는 비배기 배출이 도로이동오염원 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출량의 대부분을 차지할 것으로 내 다보았다(OECD, 2020). 배기 배출 미세먼지가 없 어 친환경차로 불리는 전기차, 수소차도 비배기 먼 지를 여전히 발생시킨다. 우려되는 점은 전기차의 경우 내연기관 차량보다 차량의 무게가 더 나가 비 배기 먼지 배출량이 더 클 수 있다는 것이다.

비배기 먼지의 발생은 차량의 중량과 밀접한 관 련이 있다. 차량 중량이 커지면 타이어 트레드와 노면의 마모율이 증가하여 더 많은 비배기 먼지가 발생한다. 브레이크 패드와 브레이크 디스크 사이 의 마찰로 발생하는 브레이크 마모도 차량 중량이 증가함에 따라 차속을 감속하기 위해 더 많은 에너 지가 소요되어 악화한다. 차량에 의한 난류로 발생 하는 도로먼지의 재비산도 차량 크기, 질량 및 공 기 역학에 의존하므로 더 무거운 차량이 더 강한

난기류를 유발하여 재비산을 증가시킨다(Liu et al., 2021a). Timmers and Achten(2016)은 Simons (2013) 등의 선행연구를 조사하여, 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로 마모에 대한 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출계수<sup>1)</sup>가 차량이 클수록 커지는 것을 보여주었다.

친환경차인 전기차는 배터리 중량 때문에 동급의 내연기관차에 비해 무게가 더 나가는 것으로 조사된다. Liu et al.(2021a)의 연구에서는 전기차의 무게가 약 20% 증가, Timmers and Achten (2016)은 24%, Beddows and Harrison(2021)은 21% 증가하는 것으로 보고하고 있어 비슷한 결과가 도출되었다.

Liu et al.(2021a)은 다양한 분류의 전기차와 동급 내연기관차의 비배기 배출원별 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 배출계수를 도시지역, 외곽지역, 고속도로로 나누어 비교한 바 있다. 조사 결과, 모든 비배기 배출원(브레이크 마모, 타이어 마모, 도로 마모, 도로재 비산)에서 전기차의 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 배출계수가 가장 높았다. 지역별로 보면, 가속 및 감속이 잦은 도시지역의 타이어와 브레이크 마모 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 배출계수가 가장 컸다.

다만, 회생제동 시스템(Regenerative Braking System: RBS)이 적용된 전기차는 브레이크 마모 배출을 25~100%까지 줄일 수 있는 것으로 추정되었다(Piscitello et al., 2021; Beddows and Harrison, 2021). 회생제동 시스템은 움직이는 차량의 속도를 늦추고 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 회수 시스템으로 주로 전기차에 적용되고 있다.

Liu et al.(2021a)의 조사 결과는 동급 전기차

의 비배기 배출 미세먼지가 내연기관의 모든 미세먼지 배출(배기와 비배기를 모두 포함)보다 클 가능성을 보여주었다. 다만, 완전 회생제동 시스템이 있는 경우 브레이크 마모 배출이 없어 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 배출계수가 특히 도시지역에서 동급 내연기관차의 배기 및 비배기를 합친 배출계수보다 낮아지는 것을 확인하였다.

배기 배출에 의한 미세먼지는 주로 PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>0.1</sub> 등 입자크기가 작은 먼지에서 비율이 높다. 반면, 비배기 배출 미세먼지는 주로 PM<sub>10</sub>에 많고 PM<sub>2.5</sub>에 더 적게 분포한다. 비배기 배출 미세먼지에는 아연(Zn), 구리(Cu), 철(Fe), 납(Pb) 등 중금속이 많이 포함된 것으로 알려져 있다. 미세먼지의 인체 유해성은 구성 성분과 크기에 좌우된다. 금속 성분을 많이 포함하는 미세먼지는 잠재적으로 DNA 염기의 다양한 변형을 유발하고 혈관 및 신경계 질환의 위험을 증가시킬 수 있는 것으로 조사된 바 있다(Piscitello et al., 2021). 지금까지 도로이동 오염원 관련 건강 영향은 주로 엔진 배기가스 및 입자(배기 배출)에 초점이 맞춰져 있어 향후 비배기 먼지 배출원에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

하지만 비배기 먼지 배출의 중요성에도 불구하고, 비배기 먼지 배출에 대한 규제는 없다. 비배기 먼지는 배출에 영향을 미치는 조건이 매우 다양하고 복잡하여 배출 조사를 위한 표준 측정 방법이나 조사 프로토콜이 없다는 것이 비배기 배출에 대한 규제 수준을 설정하여 관리하기 어려운 이유로 지적된다(Piscitello et al., 2021). 다만, 최근 유엔 유럽경제위원회(UN ECE) 산하 PMP(Particle Measurement Program) 그룹에서 비배기 배출에

1) 배출계수는 단위 활동도 당 배출량으로 도로이동오염원의 경우 주행거리(Km) 당 배출량을 의미

대한 정보를 구축하고 있고, 특히 브레이크 마모 먼지에 대한 구체적인 연구 결과가 나오면서 규제를 위한 움직임이 진행되고 있다(우상희 외, 2020).

### 3. 도로이동오염원의 암모니아 배출 이슈

전통적인 차량의 배기가스 규제물질인 탄화수소(HC), CO, NO<sub>x</sub>를 줄이고자 도입한 기술의 부산물로 암모니아가 발생한다. 삼원촉매장치(Three Way Catalytic Converter: TWC)가 1992년 휘발유차에 처음 적용된 이후 모든 휘발유차 및 LPG 차로 확장되었다. TWC는 CO, HC를 이산화탄소와 물로 산화시키는 동시에 NO<sub>x</sub>를 질소로 환원시키는 장치로 이 과정에서 암모니아가 생성된다(Wang et al., 2019).

SCR 장치는 경유차의 NO<sub>x</sub> 배출허용기준이 강화되면서 이를 줄이기 위해 2007년부터 EURO 4 기준이 적용된 일부 중대형 버스 및 트럭에 부착되기 시작하였다. 이후 2014년 EURO 6 기준이 적용되면서 모든 중대형 경유버스 및 트럭에 SCR 장치가 적용되었고, 2018년 9월부터는 실도로배출가스 규제(RDE)가 적용되면서 모든 EURO 6 경유차에 적용되고 있다(권상일, 2019). SCR 장치는 요 소수를 분사하여 암모니아 수용액을 환원제로 배기관 내에 공급하여 NO<sub>x</sub>를 질소와 물로 환원시키는 기술이다(권상일, 2019; 강석호 외, 2021). 이처럼 SCR이 암모니아를 환원제로 사용하기 때문에 NO<sub>x</sub>와 반응하지 못하거나 SCR 촉매에 흡착되지 못한 암모니아가 대기 중으로 방출되는 데 이를 암모니아 슬립(Slip)이라고 한다(강석호 외,

2021). 암모니아 슬립은 NH<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> 비율이 1 이상인 상황에서 발생하고, SCR 촉매에 흡착되어 있는 암모니아가 고온 조건에서 탈착되어 발생하기도 한다(강석호 외, 2021).

휘발유, LPG, 경유차에서 암모니아가 발생하는 것은 알려져 있었으나 암모니아 배출량의 대부분이 농축산 활동 등 농업 부문에서 발생하고 차량에서 배출하는 암모니아는 미미하여 관심과 관리의 대상이 되지 않았다.

〈그림 3〉은 2018년 기준 전국 및 서울시의 암모니아 배출원별 비중이다. 전국 암모니아 배출에서 농업 부문이 79%, 도로이동오염원이 1%를 차지하는 것을 알 수 있다. 더욱이 농축산 시설이 미미한 서울의 암모니아 배출은 전국 배출량의 1.1% 수준이다. 서울의 NO<sub>x</sub> 배출이 전국 배출의 7.7%, VOC 배출은 7.0%, PM<sub>2.5</sub> 배출은 4.0%, PM<sub>10</sub> 배출은 6.5%를 차지하는 것과 비교해도, 서울의 암모니아 배출은 상대적으로 적다. 더욱이 서울시 암모니아 배출원별 비중에서 기타(사람, 동물 등)가 70%로 서울시 암모니아 배출의 대부분을 차지하고 있고, 도로이동오염원은 11% 수준이다.

하지만 도시지역의 미세먼지 생성에서 차량 배출 암모니아의 역할을 중요하게 꼽는 다수의 연구가 최근 발표되고 있다. 도시지역에서는 차량에서 NO<sub>x</sub>와 NH<sub>3</sub>가 함께 배출된다. Sun et al.(2017)과 Farren et al.(2020)은 NO<sub>x</sub> 배출이 적은 농촌 환경에서 농축산 활동으로 배출되는 NH<sub>3</sub>에 비해, NO<sub>x</sub> 배출이 많은 도시 환경에서의 차량 배출 NH<sub>3</sub>가 NO<sub>x</sub>와 반응하여 질산암모늄과 같은 미세먼지를 생성하는 데에 더 효과적으로 작동할 수 있다고 보았다. Wang et al.(2020)은 기체상의 질산과 암모니아는 입자상의 질산암모늄과 평형을 이

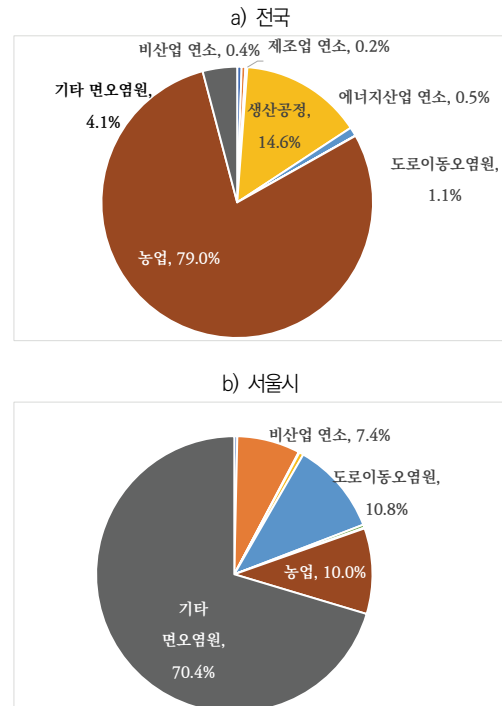
루는 경향이 있지만 과포화 상태에서는 약간의 섭동도 응축 성장을 위한 엄청난 열역학적 추진력을 유발하여 빠르게 질산암모늄을 생성할 수 있다고 보았다. 이러한 빠른 입자의 응축 성장을 촉진하는 상황은 기체상의 암모니아 및 질산이 입자상의 질산암모늄에 비해 지속적인 과포화가 유지되어 평형상태를 벗어나야 가능하다. 이러한 상태는 특히 겨울철 불균일한 도시 환경에서 발생하는데, 도시 지역에는 도로이동오염원처럼 강력한  $\text{NO}_x$ 와  $\text{NH}_3$  배출원이 있고 난류가 잘 형성되는 환경을 그 이유로 보았다. 즉, 질산과 암모니아가 나노입자에 응축되어 질산암모늄을 형성하는 것이 대기에서 중요한 미세먼지 형성 과정이고, 특히 온도가 낮은 겨울철에 질산과 암모니아의 급속한 응축 성장은 겨울철 도시지역에서 미세먼지 형성에 크게 기여할 수 있다는 것이다.

더욱이 Sun et al.(2017)과 Farren et al.(2020)은 각각 미국과 영국의 배출량 자료의 차량 암모니아 배출이 2배 이상 과소평가 되었다고 주장하였다. Farren et al.(2020)은 영국에서 2007년~2020년에 걸쳐 37개 지점에서 원격측정된 230,000대 이상의 승용차(120,000대 휘발유, 110,000대 경유차) 암모니아 자료를 활용하여 차량의 암모니아 배출량을 Bottom-up 방식으로 추정하고 Top-down으로 추정된 배출량 자료와 비교하였다. 비교 결과, 휘발유 승용차의 암모니아 배출량이 2018년 영국의 배출량 자료와 비교하여 약 2.6배 과소평가 되었고, 특히 도시지역의 차량 운행 환경에서는 승용차의 암모니아 배출이 17배 과소평가 되었다는 결과를 도출하였다. 단, 휘발유 승용차의 경우 EURO 배출허용기준이 강화될수록 암모니아 배출계수가 작아졌다. 경유차는 EURO 6

기준 적용 차량부터 암모니아가 배출되며, 동급의 휘발유차와 비교하면 1/30 정도로 암모니아 배출이 미미하다고 보았다.

### 〈그림 3〉 암모니아 배출원별 비중

자료: 국가미세먼지정보센터, 2018년 CAPSS 자료의 재구성, 2021. 11. 16. 접속



도시지역에서 암모니아 배출이 특히 높게 조사되는 것은 차량 속도와 관련되었을 가능성이 있다. Heeb et al.(2006)은 차량의 암모니아 배출과 차량 속도의 관계를 조사한 결과에서 공회전부터 60km/h의 차량 속도까지는 속도 증가와 함께 암모니아 배출이 가파르게 감소하고, 60km/h를 초과하면서부터는 차량 속도와 함께 암모니아 배출이 다시 증가한다고 밝혔다(Li et al., 2021). 공회전이 빈번하고 차량 속도가 높지 않은 도시지역에서 암모니아 배출이 지방도로나 고속도로보다 많은



이유 중 하나를 차량 속도로 추정할 수 있다.

Li et al.(2021)은 중국의 도시지역 터널에서 6 일 동안 Laser-absorption 측정법으로 약 40,000 대의 차량에 대한 암모니아를 측정하여 배출계수를 추정하였다. Li et al.(2021)의 연구 결과에서도 엄격한 배출허용기준을 적용받는 차량의 암모니아 배출계수가 낮았다. 이는 휘발유차의 배출허용기준이 엄격해질수록 엔진과 촉매 컨버터(catalytic converter)의 성능이 강화되고, 최신차일수록 공연비(air-fuel ratio)가 높아 나타난 현상으로 보고 있다. 휘발유차의 암모니아 배출은 공연비에 좌우되며, 높은 공연비에서 암모니아 배출이 현저히 낮아지는 것으로 설명하였다. 조사 결과, 휘발유차, LPG차, 대형 경유차의 평균 암모니아 배출계수는 각각 18.8, 15.6, 44.2 mg/km로 조사되었다. 휘발유차의 암모니아 배출은 엄격한 배출허용 기준을 충족하기 위해 엔진과 촉매 장치의 성능 향상으로 크게 줄었지만 대형 경유차는 SCR 적용으로 암모니아 배출이 새로운 문제로 대두될 것으로 지적하였다.

Zhang et al.(2021)도 2017년 1월 한 달 동안 중국 정저우 내에 있는 10개 지점의 원격측정 자료를 수집하여 암모니아 배출을 추정하였다. 1,589,598대의 차량에 대한 유효자료가 수집되었고, 이 중 96%가 휘발유차, 3%가 경유차, 기타가 1%를 차지하였다. 암모니아 배출계수를 추정한 결과, 휘발유차는 0.30~0.47g/kg, 경유차는 0.34~0.50g/kg, 그 외 차량 0.29~0.60g/kg 범위를 보였다. 휘발유차는 제작연도가 최근일수록 암모니아 배출계수가 감소하는 경향을 보였다. 반면, 경유차는 최근 중국 자동차 배출기준 IV/V부터 SCR이 부착되면서 암모니아 슬립에 따른 갑작스러운

높은 수준의 암모니아 배출이 나타나는 경우도 관찰되었다.

SCR이 적용된 경유차에 대한 암모니아 배출은 Farren et al.(2020)의 결과에서는 미미한 것으로 추정되었으나 Li et al.(2021), Zhang et al.(2021)의 조사에서는 휘발유 및 LPG차 수준과 유사하거나 더 높은 결과를 보여주었다. 연구자별 조사 시기, 조사 대상 경유차의 특성(유형, 연식, SCR 종류 및 노후도 등)이 달라 결과에 차이가 발생했을 가능성이 있다. 경유차의 암모니아 슬립 영향은 조사 지역에서 운행되는 주요 차량과 주행 특성 등이 반영되어야 해당 지역의 차량에서 배출되는 암모니아 수준을 파악할 수 있을 것이다.

이처럼 자동차에서 배출되는 암모니아 문제가 있지만, 국내외에서 자동차 배출 암모니아에 대한 규제와 관리는 일부 대형차에만 적용되고 있다. 우리나라에서는 휘발유 및 가스자동차는 2013년 1월 1일 이후, 경유차는 2014년 1월 1일 이후 제작된 대형 승용·화물 및 초대형 승용·화물차만 암모니아의 배출허용기준을 10ppm 이하로 설정하여 관리하고 있다(대기환경보전법 시행규칙 별표 17).

#### 4. 국내 친환경차 보급계획과 암모니아, 비배기 먼지 배출

국내외에서 환경규제 강화, 탄소중립 선언이 빠르게 진행되면서 전기차 등 친환경차로의 전환에도 속도가 붙을 것으로 전망된다. 2021년 2월 정부가 발표한 ‘제4차 친환경자동차 보급계획’에서 하이브리드차를 포함하는 친환경차 판매 비중을 2025년 51%, 2030년 83%로 설정하였다. 즉,

〈표 1〉 정부의 계획에 따른 친환경차 보급 전망

자료: 관계부처합동, 2021a; 1) 관계부처합동, 2021b; 2) 관계부처합동, 2021c

	2020년	2025년	2030년 <sup>1)</sup>	2050년 <sup>2)</sup>
하이브리드차	67.4만 대	150만 대	400만 대	A안) 전기·수소차 97% 이상 B안) 전기·수소차 85% 이상
전기차	13.5만 대	113만 대	362만 대	
수소차	1.1만 대	20만 대	88만 대	
친환경차 비중	3%	11%	31%	

2030년까지 전기·수소차는 385만 대, 하이브리차는 400만 대로 총 785만 대의 친환경차를 보급해 전체 차량의 30%까지 친환경차의 비중을 높일 것이라는 계획이다. 더 나아가 2021년 10월 발표한 ‘2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안’에서는 전기·수소차의 보급대수를 450만 대까지 확대하여 총 850만 대의 친환경차 보급계획을 강화하여 제시하였다. 정부의 계획대로 추진되면, 2020년 전체 차량 중 3%에 머물던 친환경차의 비중이 2030년에는 30% 이상으로 상승한다. 장기적으로 정부는 ‘2050 탄소중립 시나리오안’을 통해 2050년까지 전기·수소차의 비중을 85%(B안) 또는 97%(A안) 이상까지 높일 계획이다. 이처럼 장기적으로는 전기·수소차가 내연기관차를 대체할 것이나 2030년까지도 내연기관차의 비중은 70% 내외를 차지하면서, 엔진 가동에 따른 대기오염물질 배출 문제는 한동안 지속될 것으로 보인다.

내연기관차의 대기오염 영향 정도가 미미한 수준이 되기 전까지는 내연기관차의 엔진 가동으로 배출되는 오염물질의 관리는 여전히 중요할 것이다. 다만, 환경규제 대상의 중요도에 따라 퇴장하는 내연기관차는 유종별로 시기적인 차이가 있을 것으로 보인다. 최근까지도 초미세먼지 문제로 경유차에 대한 규제는 휘발유차나 LPG차에 비해 강

화되고 있어, 경유차의 퇴장이 우선하여 진행될 것이다. 이어 휘발유차나 LPG차의 운행이 줄어들면서 내연기관차의 시대가 가고 전기 및 수소차의 시기가 순차적으로 도래할 것이다.

다양한 동력원의 도로이동오염원이 공존하는 시기별 도시지역 대기오염의 관점에서 주목을 받는 대상도 변화할 가능성이 크다. EURO 5 기준 적용 이전의 경유차가 퇴장하고 SCR이 부착된 EURO 6 경유차와 휘발유 및 LPG차가 주류를 이루는 시기에는 연료연소로 직접 배출되는 미세먼지, 초미세먼지, NO<sub>x</sub> 외 암모니아 배출이 도시지역의 문제로 불거질 가능성이 있다. 또한, 도시지역 초미세먼지, 미세먼지 배출량에서 큰 비중을 차지하나 엔진 작동에 따른 배기 배출에 비해 관심 및 관리가 미흡했던 비배기 배출 문제도 차량 중량이 상대적으로 큰 전기차의 확산으로 주요 관리 대상으로 떠오를 가능성도 크다.

### Ⅲ. 암모니아와 비배기 먼지 배출 저감과 관리 방향의 고찰

이 연구의 주제인 도시지역 도로이동오염원의 암모니아와 비배기 먼지 배출에 초점을 맞추어, 국내외 선행연구 자료를 검토하고 해당 오염물질의 배출 저감을 위한 방향을 정리하여 제안하였다.

OECD(2020)는 도로 교통에서 발생하는 비배기 배출을 줄일 목적으로 두 가지 접근 방식을 취하였는데, 하나는 배출계수를 낮추는 것과 다른 하나는 차량의 총주행거리를 줄이는 것이다. 도로이동오염원의 대기오염물질 배출량이 배출계수(주행거리 당 배출량)와 총주행거리로 결정되는바, 이러한 구분은 도로이동오염원의 비배기 배출뿐 아니라 배기 배출에도 해당할 수 있다. 이에 <표 2>처럼 도로이동오염원의 암모니아와 비배기 먼지를 중심으로 배출 저감 방향을 배출계수 저감과 총주행거리 저감으로 구분하여 제시하였다.

우선 오염물질의 배출을 저감할 수단을 모색하여 신속하게 적용하는 것이 가장 바람직하지만, 많은 배출 저감 수단들이 정착하는 데에는 시간이 걸리는 것도 사실이다. 따라서 이러한 배출 저감 수단 외에도 도로이동오염원에서 배출된 오염물질에

대한 노출을 최소화하는 조치도 함께 고려되어야 한다. 이에 배출 저감 수단 외 고려할 수 있는 도로이동오염원 배출 오염물질로부터 노출을 최소화하는 방향도 검토하였다.

이 연구에서 제안한 방안 중 기술적 수단 외에 교통흐름이나 총주행거리 저감, 노출 저감 방안들은 암모니아와 비배기 먼지뿐 아니라 도로이동오염원과 관련된 배출 및 노출 관리 전반을 아우르는 수단이 될 수 있다.

#### 1. 배출 저감 방향: 배출계수 저감

##### 1) 암모니아 배출 저감 기술개발 및 제도 마련

차량에서 암모니아가 배출되는 정도는 여러 요인에 따라 달라진다. Wang et al.(2019)은 TWC의 열적 노화에 의한 Oxygen Storage Capacity (OSC)의 감소, 250~550°C의 배기 온도 범위, 낮은 공연비(Rich combustion 조건), Rich combustion 조건의 지속 시간 증가 등이 TWC 장착 차량에서 암모니아 생성을 높이는 조건으로 보았다. Liu et al.(2021b)은 주변 온도와 TWC 촉매 소재에 따른 휘발유 승용차의 암모니아 배출 특성을 실험하였다. 그 결과, 주변 온도가 14°C, 23°C인 조건에서

<표 2> 도로이동오염원 암모니아와 비배기 먼지 배출 저감을 위한 방향

	오염물질		배출 저감 방안
	암모니아		기술적 접근: 암모니아 발생을 최소화한 TWC, SCR
배출 계수 저감	비배기 먼지	타이어/브레이크/ 도로 마모 먼지	기술적 접근: 차량 경량화, 저마모 타이어/브레이크/도로포장 소재, 회생제동(브레이크 마모 저감) 시스템, 마모 배출 집진 장치
		도로 재비산먼지	기술적 접근: 차량 경량화, 도로청소
	배기 및 비배기 배출 오염물질		가감속 및 공회전 저감을 위한 원활한 교통흐름 관리
총주행거리 저감	배기 및 비배기 배출 오염물질		교통수요 관리, 차량 운행 최소화하는 도시공간 계획

는 휘발유차의 암모니아 배출이 각각 0.3mg/km, 1.3mg/km인 반면, 낮은 주변 온도(-7°C) 또는 높은 주변 온도(40°C) 조건에서는 각각 7.0mg/km, 26.9mg/km로 크게 높아졌다. 또한, TWC의 촉매가 Pd/Rh인 경우가 Pd인 경우보다 암모니아 생성이 적어 촉매 소재에 따라 암모니아 생성이 달라짐을 보였다.

박기영 외(2019)가 대형 경유차를 대상으로 SCR 성능을 평가한 결과에서는 SCR 장치의 보증거리(16만 km)가 초과된 경우 암모니아 슬립이 급격히 증가하였다. 즉, 주행거리 증가에 따라 SCR 촉매가 노후되면서 촉매의 암모니아 흡장능력이 저하되어 암모니아 슬립이 증가한다고 설명하였다(박기영 외, 2019).

이처럼, TWC이든 SCR이든 장치가 노후화될수록 암모니아 배출이 증가하고, 장치별로 특정 조건에서 암모니아 배출이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 과다 암모니아 생성 조건을 제어할 수 있는 기술 개선 및 적용으로 내연기관차에서 발생하는 암모니아 배출 문제가 완화될 수 있을 것으로 기대된다.

차량 암모니아 배출을 적절히 관리하기 위해서는 현재 일부 대형차에만 적용되고 있는 암모니아 배출허용기준을 전 차종으로 확대하여 제작단계부터 암모니아 배출이 적은 기술이 적용될 수 있도록 해야 한다. 더불어 장치의 노후도에 따라 암모니아 배출이 많이 증가하므로 운행차에 대해서도 장치의 암모니아 배출 문제를 점검할 제도도 마련하여 다량의 암모니아 배출 차량이 조치 없이 운행되는 것을 방지할 필요가 있다.

## 2) 비배기 먼지 배출 저감 기술개발 및 제도 마련

차량 중량이 비배기 배출의 중요한 요인이고, 앞으로 내연기관차를 대체할 것으로 전망되는 전기차가 기존 내연기관차보다 무겁다는 점까지 고려하면 차량 경량화는 비배기 배출 관리에 중요한 수단이다. 전기차뿐 아니라 내연기관차의 경량화는 비배기 배출 감소뿐 아니라 연료 효율 개선에도 영향을 미치므로 경량화 소재, 부품 등 관련 기술이 빠르게 개발되어 적용되도록 지원할 필요가 있다.

두 번째는 저마모 브레이크, 저마모 타이어, 저마모 도로포장 기술개발과 적용이다. 이 분야도 국내에서 연구들이 진행되어 일부는 적용되고 있다. 환경부 산하 친환경자동차기술개발사업단에서도 마모 성능이 20% 향상되고 연비와 제동 성능도 높은 저마모-저탄소 타이어를 개발해 2019년부터 중간 단계 성능의 제품을 국내외에 판매하고 있다(환경부 보도자료, 2021).

EU에서는 브레이크 마모 발생 미세입자 및 나노입자를 50% 이상 줄일 수 있는 저공해 브레이크 시스템 개발을 목표로 LOWBRASYS 프로젝트를 진행하고 있다. 향후, LOWBRASYS 프로젝트의 기술이 BAT(Best Available Technology) 후보가 될 것으로 보고 있다. 저마모 브레이크 소재 외 브레이크 마모 입자가 주변으로 방출되기 전에 입자를 가두는 기술개발도 시도되고 있다(OECD, 2020). 또한, 현재는 전기차에만 도입되고 있는 회생제동 시스템을 확대 적용하면 브레이크 마모 배출을 크게 줄일 수 있다.

도로재비산먼지는 재비산먼지의 주요한 원인인 마모성 비배기 배출이나 배기 배출이 근원적으로 줄면, 재비산먼지 배출도 줄 수 있다. 이러한 근원적 대책 외에 도로청소가 도로에 쌓인 먼지를 사전에

제거하여 재비산먼지의 발생을 줄이는 전통적인 관리대책으로 국내외에서 시행되고 있다. 다만, 분진흡입, 물청소 등 도로청소의 효과를 평가할 수 있는 표준방식이 없어 다양한 도로청소장비와 방식에 대한 미세먼지나 초미세먼지 저감효과에는 다양한 의견이 있다. 하지만 도로청소가 대기 중으로 비산될 수 있는 잠재적 미세먼지 배출원을 사전에 제거한다는 점에서 필요한 대책 중 하나라는 데에는 대다수가 동의한다. 중·장기적으로는 유럽, 북미 지역처럼 도로청소장비 인증제도와 체계를 갖추고, 단기적으로는 국내 분진흡입청소차의 성능에 대한 가이드라인을 마련해 도로먼지 제거에 효과적인 장비가 도입되어 운영될 수 있도록 해야 한다(최유진·김영은, 2018).

정부는 비배기 먼지 배출을 줄일 수 있는 다양한 기술개발을 지원하고, 개발된 기술은 공공분야에 우선 적용하면서 경제적, 법제도적 지원 방안도 마련하여 빠르게 관련 기술이 확산할 수 있도록 해야 한다. 친환경타이어 사용 촉진을 위한 인센티브를 도입하고 일정 기간 이후 친환경타이어 판매 및 사용 의무화로 제도를 단계적으로 강화하는 것이 한 예가 될 수 있다.

### 3) 원활한 교통흐름 관리

도시지역에서의 암모니아와 비배기 먼지 배출이 고속도로나 지방도로에 비해 많은 이유 중 하나가 공회전과 급가감속이 잦은 도시의 교통흐름, 차량 속도와 관련되었을 가능성을 앞서 소개하였다.

베를린에서는 속도제한을 50km/h에서 30km/h로 낮추고, 신호등을 동기화하여 30km/h 수준의 원활한 교통흐름을 보장하여 교통 관련 미세먼지 농도를 25%~30% 감소시켰다고 평가한 바 있다

(OECD, 2020). 즉, 일정 차량 속도의 원활한 교통흐름은 급가감속과 공회전 횟수 등을 줄여 마모로 인한 비배기 먼지와 암모니아 배출 등 배기 배출 저감에도 기여할 수 있다. 2014년 국내 연구진이 자동차의 마모 배출을 실험한 연구에서 정속주행에서는 극초미세먼지 발생이 증가하지 않지만, 브레이킹이 크게 증가하는 것을 확인하였다(Kwak et al., 2014; 국립환경과학원, 2020).

우리나라도 교통사고 예방 및 보행자 안전을 목적으로 차량 통행이 잦은 도시 간선도로 및 이면도로의 통행 속도를 제한하는 ‘안전속도 5030 제도’를 2021년 4월 17일부터 전국적으로 시행하고 있다. 고속·자동차전용도로 외 일반도로는 시속 50km로 낮추고 이면도로는 시속 30km로 제한하는 교통정책이다. 안전 목적으로 도입한 도시부 차량속도제한 정책이 가감속, 공회전을 줄이고 원활한 교통흐름과 대기오염물질 배출 저감에 어느 정도 영향을 줄지에 대한 평가는 필요하다. ‘안전운전 5030 제도’에 대한 안전 및 환경영향 평가와 함께, 제한된 속도 내에서 원활한 교통흐름이 유지될 수 있도록 도로환경, 교통신호체계를 개선하여 가·감속과 공회전이 줄 수 있도록 유도할 필요가 있다.

## 2. 배출 저감 방향: 총주행거리 저감

### 1) 교통수요관리

차량의 통행량을 줄이는 다양한 교통수요관리 수단으로 총주행거리를 줄일 수 있다. 우리나라의 ‘2050 탄소중립 시나리오안’에서도 교통수요관리 는 수송 부문에서 주요한 온실가스 감축수단이다. ‘2050 탄소중립 시나리오안’에서는 2018년 하루

승용차 통행량 59.6백만 대였던 것을 2050년까지 50.9백만 대로 낮추어 약 15%의 통행량 감축을 계획하고 있다. 대중교통 및 개인 모빌리티(자전거, 킥보드 등) 이용 확대, 화물 도로 운송의 철도·해운 운송으로의 전환, 공유차량 이용 확대, 드론 수송 등 무탄소 이동수단 활성화, 혼잡통행료 부과, 특별대책지역·저오염배출지역(Low Emission Zone) 지정 등 이동량 조정을 위한 규제 마련도 수단으로 제시하고 있다.

지금까지도 개인 차량 이용을 줄이고 대중교통과 무동력 이동수단(자전거, 걷기 등) 이용 확대를 위해 다양한 교통수요 정책들이 시행되고 있다. 도시철도와 광역철도망 구축, 간선급행 버스체계(BRT) 확대, 자전거 인프라 확대, 안전한 보행환경 조성을 위한 도로다이아트 등 도로 재개편도 꾸준히 서울 및 수도권에서 진행 중이다. 교통유발부담금 제도, 주차 제한제도, 녹색교통 마일리지 제도 등도 시민들이 승용차의 이용을 줄이고 대중교통과 무동력 이동수단 이용을 장려하는 정책 수단이다(서울시, 2021b).

이처럼 교통수요관리로 다양한 정책과 제도들이 지방정부 또는 중앙정부 차원에서 계획되어 추진되고 있다. 시간적 관점에서 단기적으로 실현 가능한 정책과 중장기적으로 접근해야 하는 정책들이 있고, 공간적 관점에서 지역적으로 도입 가능한 정책과 광역적으로 접근해야 하는 정책들이 있다. 각 정책의 시공간적 특성을 고려하여 자전거 공유, 나눔카 등 공유프로그램이나 자전거 구입 보조금 제공 등 지역에서 단기간에 도입 가능한 정책들은 빠르게 추진될 수 있도록 지원해야 한다. 더불어 현재의 교통수요 제도에서는 친환경차의 보급 확대를 위해 친환경차에 대해 혼잡통행료 면제, 주차

장 요금 할인 등의 혜택이 주어지고 있다. 앞서 지적한 것처럼 전기차도 비배기 먼지 배출에서는 중요한 배출원임을 고려하면, 교통수요관리 대책에서는 친환경차의 비배기 배출도 포함하여 보다 정교하게 제도를 설계할 필요가 있다.

## 2) 차량 운행 최소화하는 도시공간 계획

개인 차량 운행을 최소화하고 공공교통 중심으로 교통체계가 개편되기 위해서는 일자리, 주거, 여가문화 등 전반적인 경제 및 사회문화의 변화가 동반되어야 한다. 기후위기와 디지털 전환으로 이러한 변화가 서서히 시작되었다면, 최근의 글로벌 팬데믹은 이러한 전환을 가속화하여 일자리, 주거, 이동, 여가문화 등 전반적인 사회와 공간을 빠르게 변화시키고 있다. 서울연구원 보도자료(2021)에 따르면, 일자리는 최근 광역거점과 수도권 인접 도시를 중심으로 분산되는 다핵화 경향이 나타나고 있다. 또한, 주거는 비대면을 활용한 재택근무, 이러닝, 온라인 쇼핑 등이 증가하면서 그 기능이 다양해지고 있고, 소비활동도 주거지 인근으로 이동하고, 동네 단위의 문화·여가활동 및 자연·녹지에 대한 수요도 증가하고 있고 앞으로도 지속될 것으로 전망하였다. 이에 따라 주거, 상업, 공업, 녹지 등으로 구분되었던 기존의 배타적인 토지이용체계의 도시공간 구조가 다양한 기능을 융복합한 도시공간으로 재구조화될 필요가 있다고 보고 있다(서울연구원 보도자료, 2021).

이러한 융복합 토지이용체계에서는 대중교통 기반의 직주근접형 도시 형태가 가능한바, 예상보다 빠르게 도입되고 있는 디지털 전환 시대의 흐름에 맞춰 공공교통 기반의 교통체계를 갖춘 도시공간 구조를 계획하고 추진해야 할 것이다.

### 3. 배출 저감 외 노출 최소화를 위한 방향

도로이동오염원이 대기오염물질의 주요 배출원인 도시지역에서는 특히 도로변의 대기오염도가 높아 도로와 인접한 시설 이용자나 도로변을 따라 보행하는 시민들에게 미치는 건강적 영향은 더 클 것이다. 미국 EPA(Environmental Protection Agency)는 오염물질의 종류, 주변 지형 특성, 오전/오후 등 시간대에 따라 결과가 달라질 수 있음을 전제로 하고, 자동차 배출 오염물질이 도로로부터 500ft(약 150m) 이내까지는 높은 수준으로 영향을 미치고, 2,000ft(약 600m) 정도 이격되어야 주변 배경농도 수준으로 감소한다는 조사 결과를 소개한 바 있다(US EPA, 2015).

도로이동오염원의 배출을 원천적으로 줄이는 것이 근본적인 해결책이나 이에선 상당한 시간이 필요하다. 도로이동오염원의 배출을 줄이려는 노력과 함께 도로이동오염원 배출로 인한 피해를 최소화하려는 노력도 중요하다. 특히 도로변에 인접한 시설 중 어린이집, 유치원, 초등학교 등 건강취약계층이 장시간 이용하는 시설에 대해서는 도로이동오염원에서 배출된 오염물질에 노출되는 시간이나 강도를 줄이는 조치가 우선적으로 취해져야 한다.

미국 CARB는 2005년 'Air Quality and Land Use Handbook'을 통해 신축 학교는 일평균 통행량이 5만 대 이상의 도로와 500ft 이상 이격되어 설치할 것을 권고한 바 있다. 미국 South Coast Air Quality Management District도 학교 설치 가이드라인을 통해 학교와 주요 도로 사이에 500ft~1,000ft의 Buffer Zone을 둘 것을 권고하였다. 또한, 이미 도로와 인접하여 위치한 학교에 대해서는 고효율 필터를 장착한 기계환기 및 공기

정화설비 설치, 방음벽 설치 등으로 도로이동오염원에서 배출된 오염물질의 유입을 최소화할 것을 권고하였다(US EPA, 2015).

우리나라는 주택법 시행령의 '주택건설기준 등에 관한 규정'에 따라 소음, 유해물질 등으로부터 보호를 위해 공동주택·유치원·어린이집 등은 법으로 지정된 시설로부터 수평거리 50m 이상 떨어진 곳에 배치되어야 한다. 여기에서 법으로 지정된 시설은 대기오염물질이나 소음 등을 배출하는 공장시설이며, 교통량이 많은 도로는 해당하지 않는다. 즉, 우리나라에서는 어린이집이나 학교 신축시 도로와의 이격거리에 대한 기준이나 지침이 없는 상황이다.

따라서 우리나라도 주택재개발이나 재건축 등 대규모 개발사업이 진행되어 학교나 어린이집 등이 함께 신축되는 경우에는 주요 도로와의 이격거리를 최대한 확보하여 설치할 수 있도록 가이드라인을 마련할 필요가 있다. 미국 EPA의 150m 이격거리 권고기준이 서울시처럼 건물 밀도가 높은 대도시에도 적용될 수 있는지는 연구를 통해 밝히고, 국내 대도시 실정에 맞는 이격거리 권고기준을 설정해야 할 것이다.

연구조사로 설정된 이격거리 기준을 활용하여, 건강취약계층 이용시설이 신축될 때에는 이격거리 권고기준을 준수하도록 하고, 이미 설치된 시설에 대해서는 다른 조치로 도로이동오염원의 영향을 최소화할 수 있도록 해야 한다.

기존 취약계층 이용시설 중 이격거리 기준 이내에 위치한 시설들에는 시설의 주변 환경과 특성을 고려하여 기계환기, 방음벽 등 가능한 대책들을 우선적으로 적용해야 한다. 이후 단계적으로 이격거리 권고기준 적용 시설을 확대하는 등 도로이동

오염원 배출 오염물질에 노출되는 강도를 최소화하는 방향으로 정책과 제도가 설계되고 시행되어야 할 것이다.

## IV. 결론

이 논문은 서울시와 같은 도시지역에서 여전히 문제가 되는 미세먼지 및 초미세먼지와 해당 대기 오염물질의 주요 관리 대상인 도로이동오염원에 주목하였다. 최근 국내외에서 탄소중립이 주요 환경 의제로 떠오르면서 우리나라도 전기차 등 친환경차 보급을 포함하는 '2050 탄소중립 시나리오안'을 발표하였다. 이에 따라 중앙정부의 각 부처뿐 아니라 지방정부도 관련된 계획을 발표하고 있다.

친환경차 보급계획이 순차적으로 이행되는 과정에서 도로이동오염원의 대기오염물질 배출 양상이 달라지고 이로 인해 미세먼지, 초미세먼지 등 도시지역의 대기오염 관리 관점에서 주목해야 할 대기오염물질이 새롭게 등장할 수도 있다. 이 논문은 새롭게 주목해야 할 도로이동오염원 관련 대기오염물질로 암모니아와 비배기 먼지를 꼽고, 국내 외 선행연구자료를 조사하여 이 두 부문에 주목해야 할 필요성과 관리 방향을 도출하고 제안하였다.

이 논문의 한계는 국내 차량 종류의 구성, 도로 주행 특성, 도로 특성 등이 반영된 국내 배출 조사 결과가 아니라 국외 연구조사 결과를 기초하여 두 오염물질이 국내에서도 중요할 것으로 추정하고 평가한 데에 있다. 자동차의 암모니아 배출은 차량의 종류, 연식, 부착된 저감장치의 종류 등 자동차

의 특성 외에도 차량 속도, 급가감속 등 차량 주행의 특성에 따라라도 차이가 발생할 수 있다. 비배기 먼지도 자동차의 중량, 브레이크 및 타이어 소재뿐 아니라 차량의 주행 특성, 도로 상태에 따라서도 배출량의 차이가 클 수 있다. 국내 배출량 자료가 이러한 다양한 특성과 최근 다수의 국외 연구가 지적하는 이슈를 반영하여 산출된 것으로 보기는 어려워, 특히 도시지역에서 해당 오염물질의 배출량 과소평가 가능성이 크다. 향후 국내에서도 국내 도시지역의 상황을 고려한 암모니아와 비배기 먼지 배출을 면밀히 조사하여 해당 오염물질에 대한 보다 정확한 배출평가가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- 강석호·오승영·이민광·김훈명·강정호, 2021, "Urea-SCR System의 NH<sub>3</sub>Slip 저감을 위한 NOx Sensor 기반 페루프 제어기 개발에 관한 연구", 「한국자동차 공학회논문집」, 29(2): 103~109.
- 관계부처합동, 2021a, "제4차 친환경자동차 기본계획(2021~2025)".
- 관계부처합동, 2021b, "2030 국가 온실가스 감축목표(NDC) 상향안".
- 관계부처합동, 2021c, "2050 탄소중립 시나리오안".
- 국가미세먼지정보센터, 2020, 「국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(IV)」.
- 국립환경과학원, 2020, 「이동 오염원에서의 비배기계 평가 방법 연구(I)」.
- 권상일, 2019, "국내 자동차 SCR 요소수 부적정 사용 방지 법규", 「오토저널」, 41(6): 42~46.
- 대기환경보전법 시행규칙 별표 17 제작차배출허용기준(개정 2020. 4. 3)



- 박기영·권만재·정주영·송호영·김기호·이성욱, 2019, “대형 경유차량의 SCR 장치 내구성 및 성능변화 평가”, 「한국자동차공학회논문집」, 27(5): 405~409.
- 서울시, 2019, 「서울시 초미세먼지 상세모니터링 해석 연구」.
- 서울시, 2021a, 「서울의 환경(2020 환경백서)」.
- 서울시, 2021b, “2차 수도권 대기환경관리 기본계획 시행을 위한 서울시 시행계획(2020~2024)”.
- 서울시보건환경연구원, 2021, 「2020년 서울 대기질 평가보고서」.
- 서울연구원 보도자료, 2021. 10. 21., “위드 코로나시대, 서울의 도시전망”.
- 수도권대기환경청, 2019, 「수도권 대기환경관리 기본계획 추진실적 보고서(2016~2018)」.
- 이상희·김용래·최영·이선엽·이석환, 2020, “브레이크 마모에서 발생하는 비배기 미세먼지 측정법”, 「한국자동차공학회논문집」, 28(10): 701~710.
- 주택건설기준 등에 관한 규정(개정 2022.2.11.)
- 최유진·김영은, 2018, 「미세먼지 저감 위한 도로청소 개선 방안」, 서울연구원.
- 환경부 보도자료, 2021. 5. 28., “세계 시장 사로잡을 환경 기술 성과 돌아본다”.
- Beddows, D. C. and Harrison, R. M., 2021, “PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles”, *Atmospheric Environment*, 244: 117886.
- EEA, 2019, “Air quality in Europe-2019 report”, *Tech. rep.*
- Farren, N. J., Davison, J., Rose, R. A., Wagner, R. L., and Carslaw, D. C., 2020, “Underestimated Ammonia Emissions from Road Vehicles”, *Environmental Science & Technology*, 54(24): 15689~15697.
- Heeb, N. V. et al., 2006, “Three-way catalyst-induced formation of ammonia—velocity and acceleration-dependent emission factors”, *Atmospheric Environment*, 40(31): 5986~5997.
- Kwak, J., Lee, S., and Lee, S., 2014, “On-road and laboratory investigations on non-exhaust ultrafine particles from the interaction between the tire and road pavement under braking conditions”, *Atmospheric Environment*, 97: 195~205.
- Li, S. et al., 2021, “Emission factors of ammonia for on-road vehicles in urban areas from a tunnel study in south China with laser-absorption based measurements”, *Environmental Pollution*, 280: 116972.
- Liu, Y. et al., 2021a, “Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles”, *Journal of Hazardous Materials*, 420: 126626.
- Liu, Y., Ge, Y., Tan, J., Wang, H., and Ding, Y., 2021b, “Research on ammonia emissions characteristics from light-duty gasoline vehicles”, *Journal of Environmental Sciences*, 106: 182~193.
- OECD, 2020, *Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: an Ignored Environmental Policy Challenge*.
- Piscitello, A., Bianco, C., Casasso, A., Sethi, R., 2021, “Non-exhaust traffic emissions: Sources, characterization, and mitigation measures”, *Science of The Total Environment*, 766: 144440.
- Rienda, I. C., Alves, C. A., 2021, “Road dust resuspension: A review”, *Atmospheric Research*, 261: 105740.
- Simons, A., 2013, “Road transport: new life cycle inventories for fossil-fuelled passenger cars and non-exhaust emissions in ecoinvent v3”, *Int. J. Life Cycle Assess*, 1~15.

- Sun, K. et al., 2017, "Vehicle Emissions as an Important Urban Ammonia Source in the United States and China", *Environmental Science & Technology*, 51: 2472~2481.
- Timmers, V. and Achten, P., 2016, "Non-exhaust PM emissions from electric vehicles", *Atmospheric Environment*, 147: 492.
- US EPA, 2015, *Best Practices for Reducing Near-Road Pollution Exposure at Schools*.
- Wang, C. et al., 2019, "Ammonia Formation over Pd/Rh Three-Way Catalysts during Lean to-Rich Fluctuations: The Effect of the Catalyst Aging, Exhaust Temperature, Lambda, and Duration in Rich Conditions", *Environmental Science & Technology*, 53: 12621~12628.
- Wang, M. et al., 2020, "Rapid growth of new atmospheric particles by nitric acid and ammonia condensation", *Nature*, 581: 184~189.
- WHO, 2021, "WHO global air quality guidelines".
- Zhang, Q., Wei, N., Zou, C., and Mao, H., 2021, "Evaluating the ammonia emission from in-use vehicles using on-road remote sensing test", *Environmental Pollution*, 271: 116384.
- <https://www.air.go.kr>. (국가미세먼지정보센터, 2021)

원 고 접 수 일 : 2022년 2월 6일

1 차 심 사 완 료 일 : 2022년 3월 14일

최 종 원 고 채 택 일 : 2022년 3월 30일