

논문

건설기계 대기오염물질 저감기술 적용으로 인한 국내 미세먼지 개선 효과 분석

Analysis of PM_{2.5} Concentrations Improvement by Application of Reduction Technology for Construction Vehicle

최현진, 서지현, 송영훈¹⁾, 문난경*

한국환경연구원 환경평가본부, ¹⁾한국기계연구원 플라즈마연구실

Hyun-Jin Choi, Jihyun Seo, Young-Hoon Song¹⁾, Nankyung Moon*

Environmental Assessment Group, Korea Environment Institute, Sejong, Republic of Korea

¹⁾Department of Plasma Engineering, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2023년 10월 10일

수정일 2023년 11월 6일

채택일 2023년 12월 5일

Received 10 October 2023

Revised 6 November 2023

Accepted 5 December 2023

*Corresponding author

Tel : +82-(0)44-415-7607

E-mail : nkmoon@kei.re.kr

Abstract The purpose of this study is to evaluate the PM_{2.5} concentrations improvement by application of reduction technology such as plasma DPF and hydro carbon SCR (HC-SCR) for construction vehicles. To do this, we have built a 3D air quality modeling system (WRF-SMOKE-CMAQ) and investigated emission characteristics for construction vehicles. At first, we have estimated PM_{2.5} based on 2016 national emission inventory, and we evaluate the reduction amount of air pollutants (PM₁₀ and PM_{2.5}, NO_x) by application of plasma DPF and HC-SCR. The reduced concentration for PM_{2.5} due to the application of each technology were analyzed with various application scenarios. As a result, we found that the application of plasma DPF was more efficient to reduce the PM_{2.5} concentrations in the metropolitan area (Seoul 0.83 µg/m³, Gyeonggi 0.56 µg/m³, Incheon 0.54 µg/m³). However, in the case of Jeonbuk and Jeonnam, Gyeongbuk and Gyeongnam, the effective reduction of PM_{2.5} concentrations by construction vehicles emissions can be expected when plasma DPF and HC-SCR are applied simultaneously (Jeonbuk 0.30 µg/m³, Jeonnam 0.20 µg/m³, Gyeongbuk 0.33 µg/m³, Gyeongnam 0.33 µg/m³). We expect the results of this study can provide a valuable scientific background in developing air pollutant control technology, and policies for air quality improvement.

Key words: Construction vehicle, PM_{2.5} concentration improvement, 3D air quality model, Plasma DPF, HC-SCR

1. 서론

국내 초미세먼지(PM_{2.5}; Particulate matter of which diameter is less than 2.5 µm) 농도는 코로나19 발생 및 기상 영향, 부문별 배출량 저감 노력 등으로 소폭 개선되었으나(Kim *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2020), 여전히 빈번한 고농도 사례의 발생으로 국민건강을 위협하고 있으며(Kang *et al.*, 2021), 많은 지역에서 국내 연평균 환경기준인 15 µg/m³를 달성하지 못하고 있다(Kim *et al.*, 2021). 이러한 PM_{2.5} 문제의 해결을 위해 정부는 그간 다양한 정책을 수립하여 시행해왔

으며(You *et al.*, 2020), 이는 노후 석탄화력발전 시설의 가동 중단, 사업장 총량 관리지역의 확대, 다량 배출사업장 등에 대한 배출허용기준 강화, 노후 경유 차량에 대한 저공해화 확대 등을 포함한다(Kang *et al.*, 2021; MOE, 2019). 아울러 정부는 전술한 정책적 노력과 함께 미세먼지 대응력 제고를 위한 연구개발을 지속해서 추진·지원하였으며, 이는 다양한 배출원에 대한 측정 및 감시, 배출 저감 등의 영역에서 관련 기술과 소재의 개발, 실증을 통한 성과 창출을 이루어 왔다(MOE, 2019). 특히 부문별 대기오염물질 저감기술의 경우 제철소, 중소사업장과 같은 사업장

미세먼지 배출 저감을 위한 저온 탈질기술과 여과집진시스템 등 관련 기술개발 및 실증을 지속해서 추진해왔으며 (Center for particulate air pollution and health, 2021), 도로 이동오염원의 경우 수도권 대기환경개선 특별법이 본격 시행된 2005년 이후 노후 경유 차량을 대상으로 DPF (Diesel Particulate Filter) 등을 장착하고 있다 (Kim and Eom, 2013). 또한 국내·외적으로 선박의 대기오염물질 배출 규제가 점차 강화됨에 따라 선박용 집진·탈황·탈질 기술개발 역시 지속해서 추진되고 있다. 그러나 개발된 기술과 소재의 적용 및 보급으로 인한 국내 미세먼지 개선 효과는 장기적 관점에서 지속적인 모니터링이 필요한 사항이라 할 수 있으며, 특히 저감기술의 개발과 적용으로 인한 국내 미세먼지 개선 효과 및 영향에 대한 정량적인 검증과 분석이 이루어진 연구는 현재로서는 미진한 상황으로 볼 수 있다 (Kim *et al.*, 2016).

한편 다양한 국내 대기오염물질 배출원 중 건설기계 및 농업기계, 특수차량과 같은 비도로 이동오염원에서의 $PM_{2.5}$ 및 NO_x 배출량은 2016년 국가대기오염물질 배출량 (Clean Air Policy Support System: CAPSS) 자료 기준 국가 전체 배출량의 14.3%, 24.8%를 차지하고 있어 관리의 중요성이 지속해서 커지고 있다 (Kwon, 2020). 그러나 전술한 다양한 배출원별 배출 저감 정책에도 불구하고 비도로 이동오염원은 타 배출 부문 대비 정책적 실효성이 떨어지는 사각지대로 언급되고 있다. 이를 해결하기 위해 2019년 과학기술정보통신부는 추경 사업을 통해 “특수차량 PM 저감 신기술 실증 및 NO_x 저감 신기술 개발” 연구과제를 지원하였다. 이를 통해 건설기계, 군용트럭 등의 운행으로 배출되는 미세먼지 및 질소산화물을 효과적으로 저감하기 위한 플라즈마 DPF (Song *et al.*, 2023, 2022, 2021; Choi *et al.*, 2021)와 탄화수소계 SCR에 대한 기술개발이 이루어졌다.

이에 본 연구에서는 지금까지 대기오염물질 배출 저감이 어려웠던 비도로 이동오염원 중 건설기계를 대상으로 플라즈마 DPF와 탄화수소계 SCR 기술이 적용되었을 경우를 고려한 대기오염물질 감축 효과

를 정량적으로 산정하고, 3차원 모델링 기법을 활용하여 배출량 감소가 주변 지역 및 국내 미세먼지 개선에 미치는 영향을 살펴보았다. 특히 저감시설 적용 전·후에 대한 미세먼지 기여도를 분석하여 저감기술 적용으로 인한 국내 미세먼지 개선 효과를 정량적으로 고찰하였으며, 기술의 종류 및 효율, 지역을 고려한 세부적인 분석을 수행하였다. 연구를 통해 도출된 결과를 통해 건설기계로부터 기인한 미세먼지의 실질적인 개선을 위해 요구되는 저감기술의 수준을 가늠해 볼 수 있을 것이며, 지자체별 배출량 분포 특성을 토대로 효과적인 미세먼지 개선을 위한 기술 적용 및 보급의 우선순위 결정에 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 이와 같은 저감기술의 개발·적용으로 인한 국내 대기질 개선 효과의 정량적 분석·검증 결과는 추후 추진될 관련 기술개발에 대한 당위성 확보와 더불어 대기오염물질 저감기술 개발 관련 정책 및 제도 등의 추진과 시행을 위한 과학적 근거자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

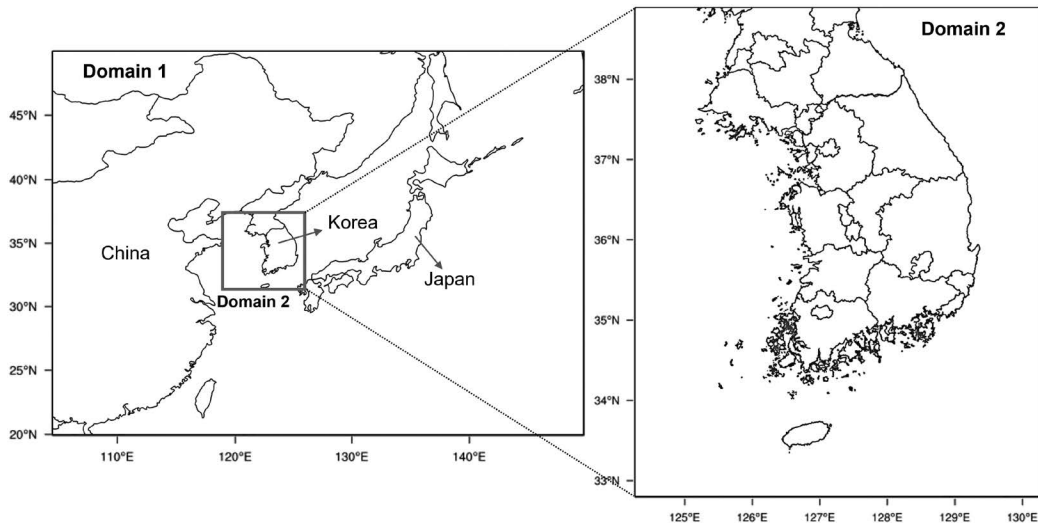
2. 연구 방법

2.1 저감기술 적용에 의한 배출량 산정

본 연구에서는 비도로 이동오염원 중 건설기계를 대상으로 플라즈마 DPF와 탄화수소계 SCR 기술이 적용되었을 경우를 고려한 국내 미세먼지 개선 효과를 정량적으로 파악하고자 하였다. 이에 우선하여 해당 기술들의 적용 시나리오를 수립하였으며, 표 1에 본 연구에서 고려한 시나리오 목록을 정리하였다. 1) 플라즈마 DPF의 적용으로 인한 PM_{10} 및 $PM_{2.5}$ 저감 (시나리오 1, 2), 2) 탄화수소계 SCR 적용으로 인한 NO_x 저감 (시나리오 3), 3) 플라즈마 DPF와 탄화수소계 SCR의 병행 적용으로 인한 PM_{10} · $PM_{2.5}$ · NO_x 동시 저감 (시나리오 4, 5)의 시나리오로 구성하였다. 기술별 저감효율의 경우 선행연구 (Song *et al.*, 2021; Barrabas *et al.*, 2017; Mrad *et al.*, 2015; Arve *et al.*, 2005)를 통해 보고된 저감효율과 전술한 연구과제의

Table 1. Reduction technology and efficiency by scenario for emission reduction of air pollutants from construction vehicle.

Scenario	Reduction material	Reduction technology	Reduction efficiency
1	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Plasma DPF	80%
2	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Plasma DPF	90%
3	NO _x	HC-SCR	60%
4	PM ₁₀ , PM _{2.5} NO _x	Plasma DPF HC-SCR	90% 60%
5	PM ₁₀ , PM _{2.5} NO _x	Plasma DPF HC-SCR	95% 60%

**Fig. 1.** Nested domains for WRF and CMAQ modeling.

수행과정에서 확보된 기술의 저감효율을 각각 적용하였으며, 이에 관한 내용은 아래의 연구 결과 부문에 기술별로 구분하여 더욱 상세하게 기술하였다. 저감기술 적용 전 배출량은 CAPSS 2016년 배출원 분류에 따른 총 11종의 건설기계 배출량을 활용하였으며(표 4 참조), 해당 배출량에 대해 물질별·기술별 저감효율 적용에 따른 저감량을 산정하여 삭감 후 배출량으로 적용하였다.

2.2 대기질 모델링

저감기술 적용으로 인한 미세먼지 개선 효과를 분

석하기 위하여 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) v.4.7.1 3차원 대기질 모델링을 사용하였으며, CMAQ 적용 시 필요한 기상자료는 WRF (Weather Research and Forecasting) v.3.9.1.1, 배출량 자료는 SMOKE (The Sparse Matrix Operator Kernel Emission) v3.1을 사용하였다. 모델링 도메인은 그림 1과 같이 동지화(Nesting) 기법을 적용하여 27 km 수평 해상도의 동아시아 영역과 9 km 해상도의 한반도 영역으로 설정하였다.

표 2는 WRF와 CMAQ 모델 수행 시 사용한 물리 옵션을 나타낸다. 기상모의를 위해 초기·경계 입력

Table 2. Description of physical/chemical options for (a) WRF, (b) CMAQ modeling.

(a) WRF option

Physics	Selected option	Reference
Microphysics	WSM 3-class simple ice scheme	Hong, Dudhia, and Chen, 2004
Longwave radiation	RRTM scheme	Mlawer <i>et al.</i> , 1997
Shortwave radiation	Dudhia scheme	Dudhia, 1989
Land surface	Unified Noah land-surface model	Chen and Dudhia, 2001
Planetary boundary layer	YSU scheme	Hong, Noh, and Dudhia, 2006
Cumulus parameterization	Kain_Fritsch scheme	Kain, 2004

(b) CMAQ option

Category	Selected option	Reference
Chemical mechanism	SAPRC99	Carter, 1999
Advection scheme	PPM	Colella and Woodward, 1984
Horizontal diffusion	Multiscale	Louise, 1979
Vertical diffusion	Eddy	Louise, 1979

자료는 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 6시간 단위의 자료를 사용하였으며, 대상 도메인의 지형 및 고도 자료는 Moon *et al.* (2012)의 선행연구를 통해 구축된 고해상도 3s (90 m) 지형고도 자료 및 토지이용자료를 사용하였다. 대기질 모델링에 사용된 배출목록은 국립환경과학원의 CAPSS (Clean Air Policy Supporting System) 2016을, 국외 배출량은 CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment) 2015를 사용하였으며, 자연배출량의 경우 MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature)을 이용하여 산정하였다.

2.3 미세먼지 기여도 및 전환율 산정

건설기계의 대기오염물질 배출로 인한 미세먼지 영향 평가는 BFM (Brute Force Method) 기법을 적용하였으며, BFM은 현재 배출량에 대한 모의 농도와 변화된 배출량의 모의 농도의 차이를 계산하는 방법이다. 이는 다수의 선행연구에서 배출량에 대한 영향 분석 시 사용되었으며 (Kang *et al.*, 2021; Moon *et al.*, 2021; You *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2017), 구체적으로 아래 식 1과 같다 (Moon *et al.*, 2021).

$$\text{기여농도 (ZOC, mg/m}^3\text{)} = \frac{C_b - C_{s, \text{ratio}}}{\Delta e_{i, \text{ratio}}} \quad (1)$$

ZOC = Zero-Out contribution

$C_{s, \text{ratio}}$ = Sensitivity simulation concentration

C_b = Base concentration

$\Delta e_{i, \text{ratio}}$ = Emission change ratio at i emission source

식 1에서 C_b 는 기본 모의 농도, $C_{s, \text{ratio}}$ 는 기본 배출량을 일정 비율(ratio)로 삭감한 배출량에 대한 모의 농도, ZOC는 기본 농도와 배출량 삭감된 모의 농도의 차이를 해당 배출원의 배출량 변화 비율 $\Delta e_{i, \text{ratio}}$ 로 나눈 값이다.

3. 연구 결과

3.1 대기질 모델링 평가

건설기계 저감기술 적용에 따른 미세먼지 개선 효과를 분석하기에 앞서 본 연구에서 구축된 모델링 시스템 결과에 대한 통계적 유의성을 확인하였다. 아래 그림 2의 (a)와 (b)는 2018년 전국 기상대 95개 지점의 기온 및 풍속 관측값과 모의값을 시계열 그래프로 나타낸 결과이다. 기온의 경우 사계절에 걸쳐 관측값

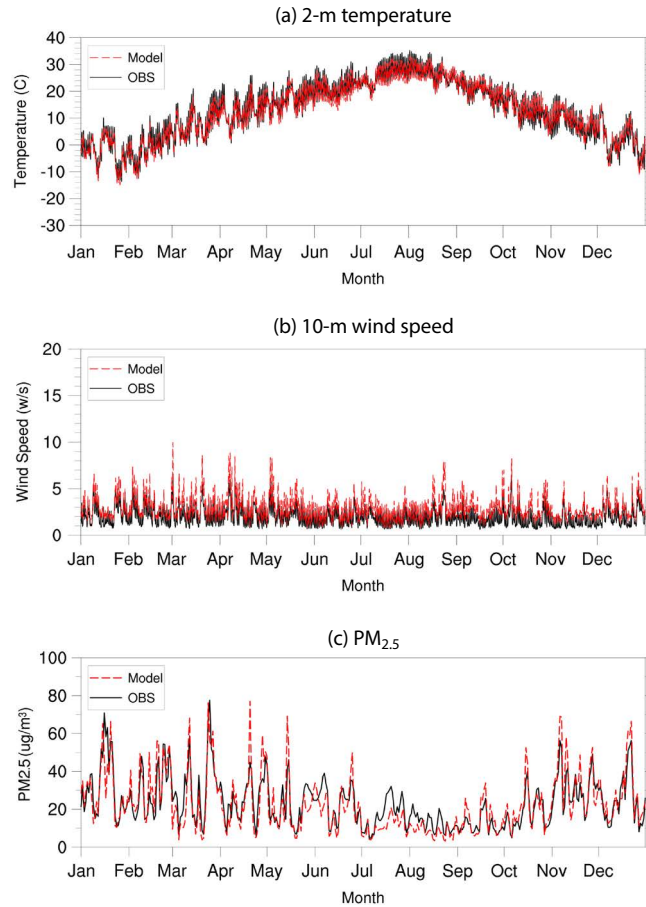


Fig. 2. WRF and CMAQ model performance evaluation over South Korea in 2018.

을 유사하게 모의하는 것으로 확인되었으며, 풍속도 관측 결과의 패턴과 유사하게 모의하나, 모의 결과가 관측 결과 대비 일부 과대 모의하는 경향을 보이는 것으로 확인된다. 그림 2의 (c)는 $PM_{2.5}$ 에 대해 전국 측정소 304개소의 관측 자료와 모델링 결과를 시계열로 비교한 결과이다. 모델 결과와 관측값의 일 변동성은 비슷하지만, 7~8월을 제외한 기간에는 모델 결과가 관측값보다 과대 모의하였다. 표 3은 모델링 결과의 통계적 유의성을 확인하기 위해 기상 모델링과 대기질 모델링 결과를 Emery and Tai (2001), McNally (2009), Emery *et al.* (2017)에서 제안된 모델링 평가 기준을 적용하여 요소별 전국 평균 통계분석 결과를 나타낸 것이다. IOA, RMSE, R은 관측값과 모

델값을 서로 비교하여 오차의 정도를 나타내며, IOA는 1에 가까울수록, RMSE는 0에 가까울수록 모델 결과와 관측 결과의 통계적 유의성이 높다는 것을 의미한다. R은 1 또는 -1에 가까울수록 높은 상관성을 나타낸다. 기상 모델링 결과는 표 3과 같이 기온의 경우 IOA가 0.99, Bias가 $-0.69^{\circ}C$, 풍속의 경우 IOA가 0.77, Bias가 0.85 m/s로 나타나 통계적으로 유의성을 보이며, 대기질 모델링 결과는 $PM_{2.5}$ 의 R이 0.69로 농도 모의 결과가 신뢰할 만한 것으로 평가되었다.

3.2 건설기계 배출량 및 미세먼지 기여도 분석

CAPSS 2016년도 배출원 분류에 따르면 건설기계는 총 11종으로 구분하고 있다. 이 중 덤프트럭과 콘

Table 3. Statistical model performance evaluation of WRF and CMAQ over South Korea in 2018.

	Mean		R	Bias	RMSE	IOA	Criteria
	Observed	Modeled					
2-m temperature	13.00°C	12.32°C	0.98	-0.69°C	2.48°C	0.99	Bias $\leq \pm 5$ (°C) ¹⁾ IOA ≥ 0.8 ¹⁾
10-m wind speed	2.00 m/s	2.85 m/s	0.66	0.85 m/s	1.80 m/s	0.77	Bias $\leq \pm 0.5$ (m/s) ¹⁾ IOA ≥ 0.6 ¹⁾ RMSE ≤ 2 (m/s) ¹⁾
PM _{2.5}	23.12 µg/m ³	22.19 µg/m ³	0.69	-0.92 µg/m ³	13.92 µg/m ³	0.81	R > 0.4 ²⁾

¹⁾Emery *et al.* (2001), McNally (2009)²⁾Emery *et al.* (2017)**Table 4.** Annual emission amounts of primary PM₁₀, PM_{2.5} and NO_x by construction vehicle.

(Unit: TPY, %)

Category I	Category II	Category III	PM ₁₀	PM _{2.5}	NO _x
Non-road transport	Construction vehicle	Bulldozer	114 (2%)	105 (2%)	2,104 (2%)
		Loader	473 (7%)	435 (7%)	8,725 (7%)
		Forklift	2,488 (38%)	2,289 (38%)	43,496 (33%)
		Excavator	2,274 (34%)	2,092 (34%)	41,208 (31%)
		Crane	393 (6%)	362 (6%)	10,044 (8%)
		Concrete pump	81 (1%)	74 (1%)	3,425 (3%)
		Road roller	132 (2%)	121 (2%)	2,328 (2%)
		Air compressor	141 (2%)	130 (2%)	3,629 (3%)
		Pile driver	77 (1%)	71 (1%)	1,975 (1%)
Road transport	Truck	Dump truck	353 (5%)	325 (5%)	12,251 (9%)
		Concrete mixer	97 (1%)	90 (1%)	3,382 (3%)
		Total	6,624	6,094	132,567

크리트믹서 트럭은 도로이동오염원으로 구분되며, 그 외 9종은 비도로 이동오염원으로 구분되어 배출량을 산정하고 있다. 기술 적용에 따른 저감 대상 물질에 대해 건설기계 유형별 배출량을 정리하여 표 4에 나타내었다. CAPSS 2016년도 기준 11종의 건설기계로 인한 PM_{2.5} 연 배출량은 총 6,094톤으로 전국 PM_{2.5} 배출량의 약 6%를 차지한다. 비도로이동오염원에서 5,679톤 (93%), 도로이동오염원에서 415톤 (7%)이 배출되며, 이 중 지게차 2,289톤 (38%), 굴삭기 2,092톤 (34%)으로 2종의 건설기계가 4,381톤 (72%)을 배출하여 건설기계 전체 배출량 중 상당히 높은 비율을 차지하고 있음을 알 수 있다. 또한, 건설기계 11종에 의한 국내 NO_x 연 배출량은 132,567톤

으로 전국 NO_x 배출량의 약 11%를 차지한다. 비도로 이동오염원 부문에서 116,934톤으로 전체 건설기계 배출량의 약 88%가 배출된다. 도로이동오염원의 경우 15,633톤으로 약 12%의 배출량을 차지하며, NO_x의 경우에도 PM_{2.5}와 마찬가지로 지게차 및 굴삭기 2종의 건설기계에서 각각 43,496톤 (33%), 41,208톤 (31%)을 배출하여 전체 배출량의 64%를 차지하는 것으로 확인된다.

건설기계로 인한 지자체별 PM_{2.5}와 NO_x 배출량을 그림 3과 4에 나타내었다. PM_{2.5}와 NO_x 모두 경기도에서 각 2,058톤 (34%), 44,431톤 (35%)으로 가장 큰 배출량을 보이며, 이는 경기도 PM_{2.5} 배출량의 18%, NO_x 배출량의 22%를 차지하는 것으로 나타났다. 그

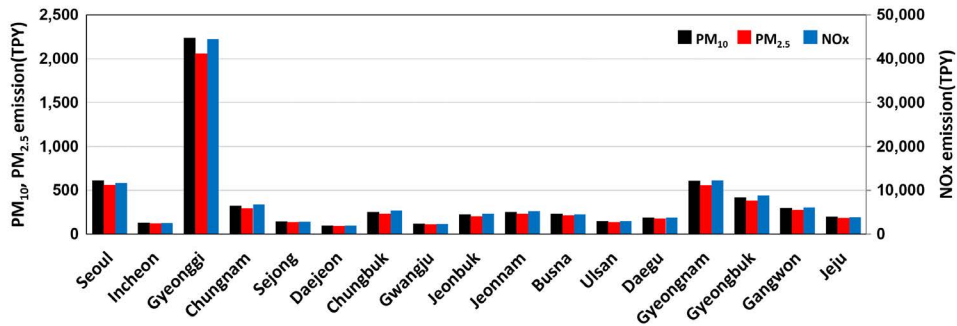


Fig. 3. Annual emission amounts of primary PM₁₀, PM_{2.5} and NO_x from construction vehicle by local government.

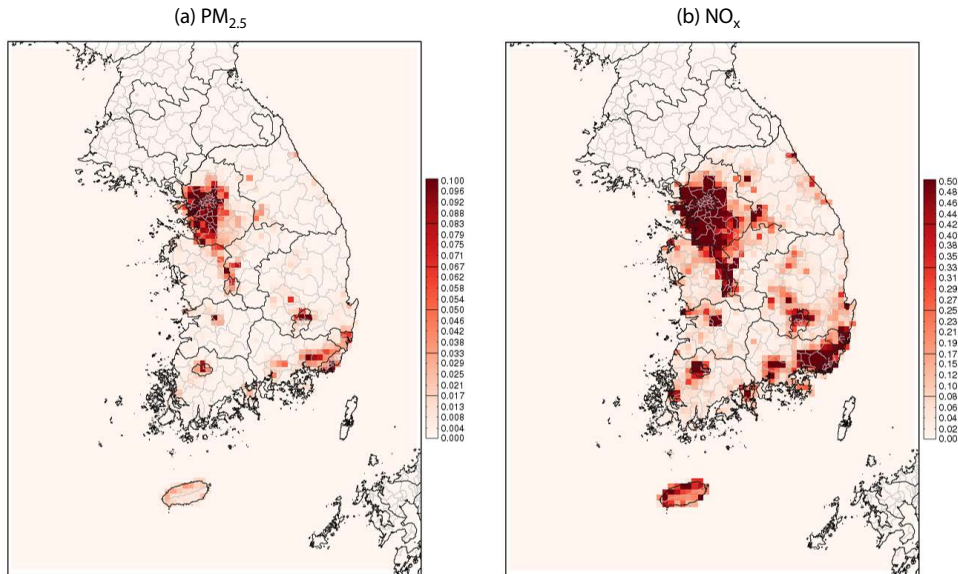


Fig. 4. PM_{2.5} and NO_x annual emissions from construction vehicle (Unit: TPY).

뒤를 이어 경남에서 PM_{2.5} 556톤(9%), NO_x 12,218톤(9%)으로 경남 PM_{2.5} 배출량의 10%, NO_x 배출량의 12%를 차지하는 것으로 나타났다. 이처럼 지자체별 대기오염물질 배출 특성에 따라 건설기계로 인한 배출량이 차지하는 비중이 다르게 나타남을 확인할 수 있다.

국내 건설기계에서 배출되는 대기오염물질이 전국 및 각 지자체 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여도를 살펴본 결과 전국 기여농도는 연평균 0.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (연 최대 1.37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났으며, 해당 영향은 타 지역 대비

인구가 밀집된 수도권 지역에서 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다(그림 5 참조). 이는 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)에서 제시한 미세먼지 전략적 목표의 연간 평균 미세먼지 저감 목표농도 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 19%에 해당되는 수준이며(MOE, 2019), Moon and Seo (2019)에서 산정된 국내 석탄화력발전소 운영으로 인한 PM_{2.5} 기여농도 0.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 유사한 수준이다. 이러한 점들을 고려하였을 때, 국내 건설기계 배출로 인한 미세먼지 영향은 결코 적지 않으며, 국가 미세먼지 관리 계획에서 주요하게 고려되어야 할

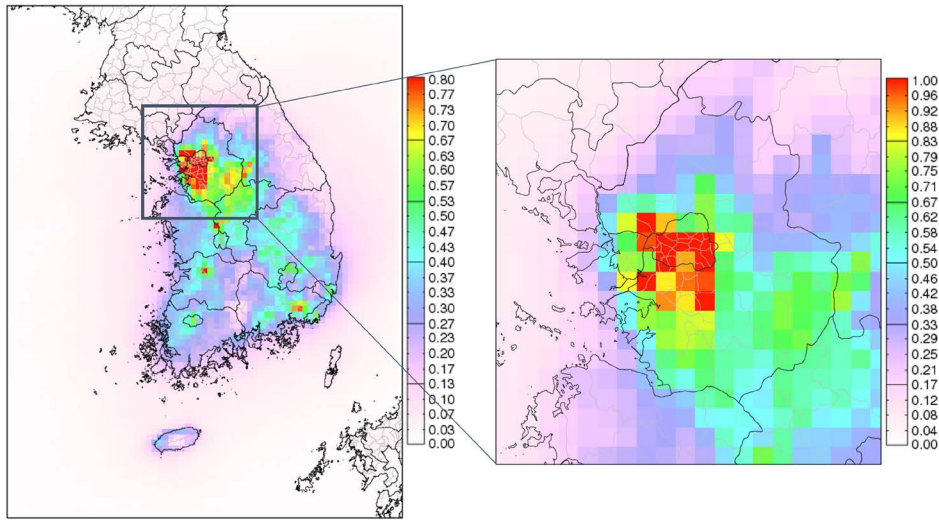


Fig. 5. Contribution of construction vehicle emissions to annual mean $PM_{2.5}$ concentrations.

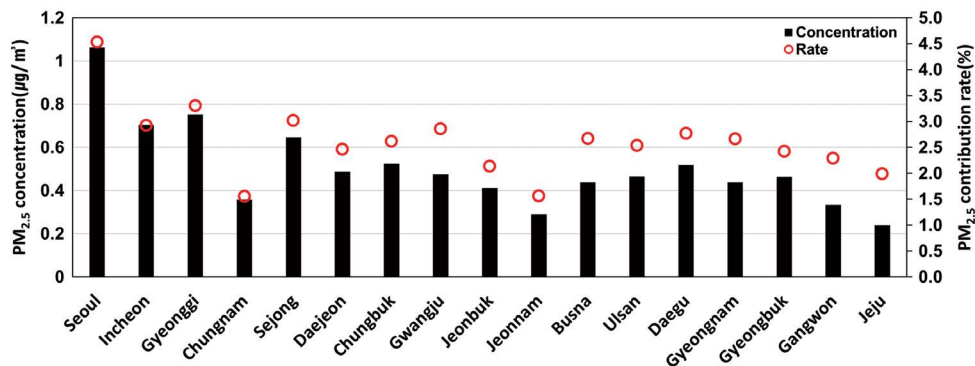


Fig. 6. Concentration and contribution rate of construction vehicle emissions to annual mean $PM_{2.5}$ concentration by local government.

오염원으로 판단된다.

그림 6은 국내 건설기계에서 배출되는 대기오염물질에 따른 전국 17개 광역자치체의 연평균 $PM_{2.5}$ 기여도와 각 지자체 $PM_{2.5}$ 농도에 어느 정도 기여하는지를 현황농도 대비 비율로 함께 나타낸 결과로, 서울 ($1.06 \mu g/m^3$, 4.6%), 경기 ($0.75 \mu g/m^3$, 3.0%), 인천 ($0.7 \mu g/m^3$, 3.2%), 세종 ($0.65 \mu g/m^3$, 3.1%) 순으로 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 배출원이 집중되어 위치한 수도권 지역에서의 운영으로 인한 영향과 더불어, 근래 택지개발 사업 등과 같은 공사가 지속적

이고 활발히 진행 중인 세종지역에서의 건설기계 운영으로 인한 대기질 영향이 반영된 결과로 추정된다.

3.3 저감기술 적용으로 인한 미세먼지 개선 효과 분석

3.3.1 플라스마 DPF 적용

플라스마 DPF의 적용에 따른 국내 미세먼지 개선 효과 분석을 위해 적용된 플라스마 DPF의 저감효과와 이에 따른 적용 전·후 배출량을 표 5에 정리하여

나타내었다. 해당 기술의 저감효율은 환경부의 제1종 배출가스 저감장치의 인증기준으로 요구되는 최소 효율인 80%와 문헌을 통해 보고된 플라즈마 DPF의 PM 저감효율 94.2%에 대해 보수적인 조건을 고려하여 90%를 적용하였다(Song *et al.*, 2021).

전국 건설기계를 대상으로 저감효율 80%의 플라즈마 DPF를 적용하였을 경우 이로 인한 국내 미세먼지 개선 효과를 분석한 결과, 건설기계 배출로 인한

국내 PM_{2.5} 기여농도인 0.58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 0.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소시키는 것으로 확인되며, 이는 건설기계 배출량에 따른 미세먼지 영향을 100%라고 가정하였을 때 해당 배출원으로 인한 영향을 61.8% 저감하는 효과로 산정된다. 해당 결과를 전국 17개 광역자치체별로 구분하여 살펴보면 서울(0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 경기(0.56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 인천(0.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 세종(0.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 감소하는 것으로 확인되었으며, 플라즈마 DPF가 배출원으로부터 직접적으로 배출되는 입자상 오염물질을 저감하는 기술임을 고려할 때(Song *et al.*, 2021), 배출원이 밀집된 수도권에서 개선 효과가 가장 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다(그림 7(a) 참조). 지역별 농도 저감률 역시 서울, 인천, 경기지역에서 각각 78.3%, 76.3%, 74.9%로 상대적으로 높은 저감효과가 나타났으며, 이어서 세종, 부산, 대전 순으로 높게 나타났다. 플라즈마 DPF를 통해 특히, 국내 인구가 밀

Table 5. Reduction amounts of PM₁₀ and PM_{2.5} from construction vehicle by Plasma DPF application. (Unit: TPY)

Reduction efficiency	Reduction material	Before reduction	After reduction
80%	PM ₁₀	6,623	1,325
	PM _{2.5}	6,094	1,219
90%	PM ₁₀	6,623	662
	PM _{2.5}	6,094	609

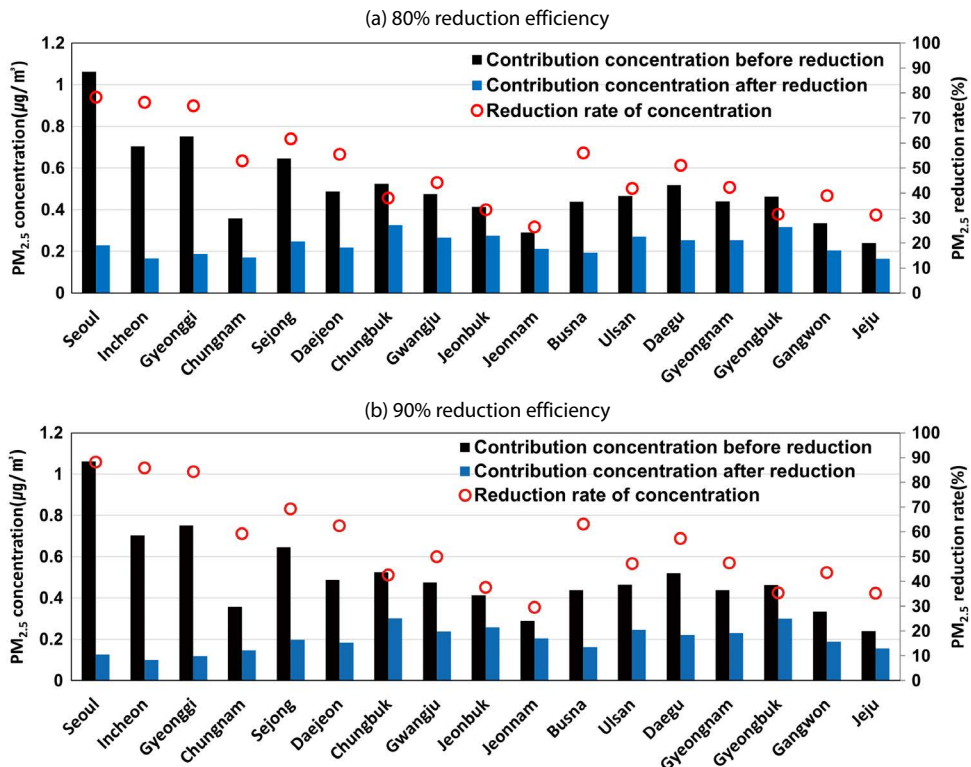


Fig. 7. Reduced concentration and reduction rate of PM_{2.5} by local governments after plasma DPF application, (a) Reduction efficiency: 80%, (b) Reduction efficiency: 90%.

집된 수도권권을 중심으로 $PM_{2.5}$ 배출량이 감소되었고, 이로 인해 해당 지역의 $PM_{2.5}$ 농도가 상대적으로 크게 개선되는 것을 명확히 확인할 수 있었다.

저감효율을 90%로 상향하여 적용하였을 경우 이에 따른 국내 미세먼지 개선 효과를 17개 광역자치체별로 구분하여 살펴보면(그림 7(b) 참조), 80%의 효율 적용 시와 같이 서울($0.94 \mu g/m^3$), 경기($0.64 \mu g/m^3$), 인천($0.61 \mu g/m^3$), 세종($0.45 \mu g/m^3$) 순으로 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하는 것으로 확인되었으며, 마찬가지로 배출원이 밀집된 수도권에서 개선 효과가 가장 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다. 전국 건설기계 배출로 인한 $PM_{2.5}$ 기여농도 대비 저감효율 90%의 플라즈마 DPF 적용에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 저감률은 전국 평균 69.2%로 나타났으며, 특히 서울, 인천, 경기 등 주요 지역의 경우 84~88%로 저감효과가 상향됨을 확인하였다.

3.3.2 탄화수소계 SCR 적용

탄화수소계 SCR 적용으로 인한 미세먼지 개선 효과 분석을 위해 적용된 탄화수소계 SCR의 저감효율

과 이에 따른 기술 적용 전과 후의 배출량을 표 6에 나타내었다. 저감효율의 경우 환경부의 제2종 배출가스 저감장치의 인증기준(저감효율 50%)과 탄화수소계 SCR과 관련하여 선행연구(Barrabas *et al.*, 2017; Mrad *et al.*, 2015; Arve *et al.*, 2005) 내 다수 보고된 저감효율 등을 고려하여 60%로 설정하였다.

그림 8은 전국 건설기계를 대상으로 저감효율 60%의 탄화수소계 SCR을 적용하였을 경우를 가정하여 미세먼지 개선 효과를 지자체별로 구분하여 나타낸 결과이다. 앞 절의 플라즈마 DPF를 통한 $PM_{2.5}$ 의 직접적인 저감은 배출원이 밀집된 수도권에서 그 효과가 두드러지게 나타났지만, 탄화수소계 SCR 적용을 통해 NO_x 를 저감할 경우 전남($0.12 \mu g/m^3$), 전북($0.14 \mu g/m^3$), 경북($0.16 \mu g/m^3$)과 같은 지역에서 $PM_{2.5}$ 개선 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 건설기계 배출량에 따른 미세먼지 영향을 100%라고 가정하였을 때 전국 건설기계 배출로 인한 $PM_{2.5}$ 기여농도 대비 탄화수소계 SCR 적용에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 저감률을 살펴본 결과, 전국 평균 13%의 저감효과를 갖는 것으로 확인된다. 지자체별로 세분하여 살펴보면 수도권은 해당 수치가 최대 3% 이내로 매우 미미하였지만, 전남 40%, 전북 35%, 경북 36%로 수도권 대비 기술 적용으로 인한 미세먼지 개선 효과가 상대적으로 큰 것으로 나타난다.

건설기계로 인한 배출량은 지자체별로 차이가 크며, 타 지역 대비 경기도를 포함한 수도권의 배출량

Table 6. Reduction amounts of NO_x from construction vehicle by HC-SCR application. (Unit: TPY)

Reduction efficiency	Reduction material	Before reduction	After reduction
60%	NO_x	132,567	53,027

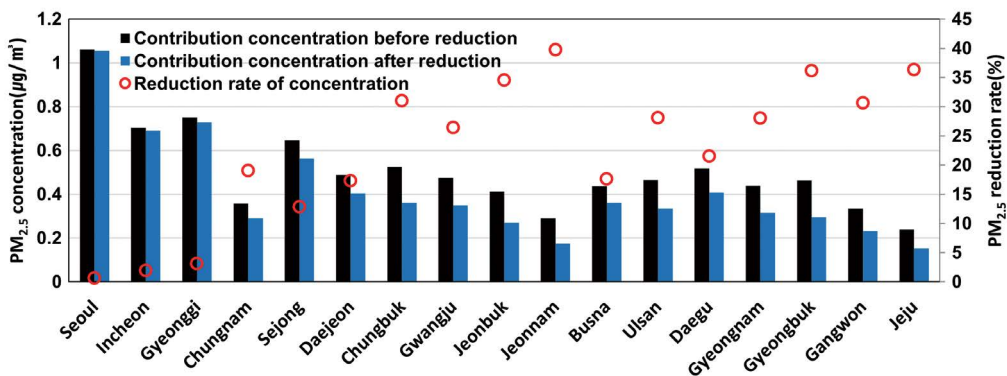


Fig. 8. Reduced concentration and reduction rate of $PM_{2.5}$ by local governments after HC-SCR application.

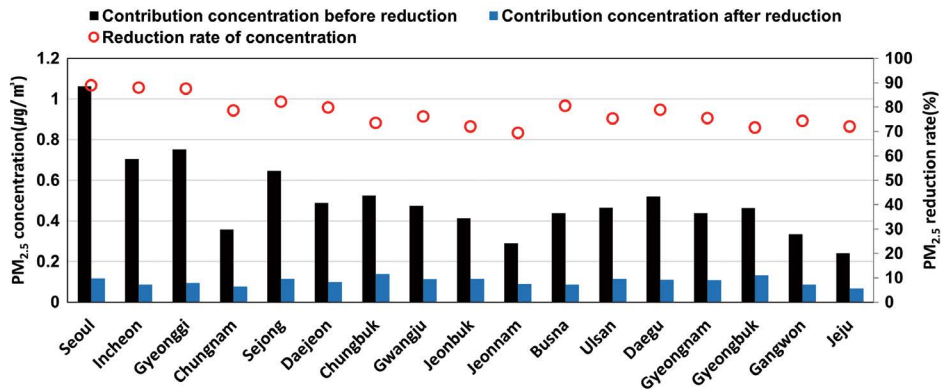


Fig. 9. Reduced concentration and reduction rate of PM_{2.5} by local governments after plasma DPF (90%) and HC-SCR (60%) application.

이 가장 큰 것으로 확인된다. 플라즈마 DPF의 경우 건설기계로부터 배출되는 PM_{2.5}를 직접 저감하는 기술이기 때문에 배출량이 큰 수도권 지역에서의 저감 효과가 두드러진 것으로 확인된다. 질소산화물의 경우는 수도권 대비 전남, 전북, 경북 등의 지역에서 저감효과가 큰 것으로 확인되는데, 이는 수도권의 경우 다른 지역 대비 도로이동오염원 등에서의 NO_x 배출이 크므로 건설기계의 NO_x 저감만으로는 미세먼지 개선에 대한 효과가 미미하게 나타날 수 있으나, 전남, 전북, 경북 등의 지역은 수도권과는 다른 대기오염물질 배출 특성을 갖기 때문에 미세먼지 개선 효과가 상대적으로 높게 나타나는 것으로 추정된다.

3.3.3 플라즈마 DPF 및 탄화수소계 SCR 동시 적용

앞 절에서 플라즈마 DPF 적용으로 인한 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 배출 저감과 탄화수소계 SCR 적용에 따른 NO_x 저감으로 인한 국내 미세먼지 개선 효과를 각각 살펴 보았다면, 본 절에서는 해당 기술들의 동시 적용으로 인한 PM_{2.5} 개선 효과를 분석하였다. 기술별 적용된 저감효율은 플라즈마 DPF의 경우 90%와 95% (지속적인 연구개발을 통한 효율 상향을 가정), 탄화수소계 SCR은 60%로 설정하였다. 우선 90%의 효율을 갖는 플라즈마 DPF와 60% 효율의 탄화수소계 SCR을

동시 적용하였을 때 건설기계 배출로 인한 국내 PM_{2.5} 기여농도 0.58 µg/m³을 0.48 µg/m³ (플라즈마 DPF 95% 적용 시 0.50 µg/m³)로 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 건설기계 배출량에 따른 국내 PM_{2.5} 영향을 100%로 가정하였을 시 전국 평균 82.3%의 저감효과가 있음을 의미한다. 기술의 동시 적용으로 인한 PM_{2.5} 개선 효과를 지자체별로 구분하여 살펴보면 (그림 9 참조), 서울 0.95 µg/m³, 경기 0.66 µg/m³, 인천 0.62 µg/m³, 세종 0.53 µg/m³의 기여농도가 감소하는 것을 알 수 있다. 농도 저감률의 경우 서울 90%, 인천 88%, 경기 87%, 세종 82%로 수도권 지역에서 약 90%에 가까운 PM_{2.5} 저감률이 나타나며, 플라즈마 DPF의 저감효율을 95%로 상향하였을 경우 해당 수치는 서울 94%, 인천 93%, 경기 92%, 세종 86%로 상승하는 것으로 확인된다. 이는 전술한 바와 같이 플라즈마 DPF의 적용으로 인한 PM_{2.5}의 직접적인 저감으로 배출원이 밀집된 수도권 지역과 최근 공사가 활발한 세종지역에서의 개선 효과가 큼을 시사한다고 볼 수 있다. 아울러, 수도권 지역 외에도 전북, 전남, 경남, 경북 등의 지역 역시 PM_{2.5} 개선 효과가 큰 것으로 나타나며, 비수도권 지역에서의 PM_{2.5} 농도 저감률은 경남 78%, 전북 74%, 경북 73%, 전남 71%의 순으로 확인된다. 이는 탄화수소계 SCR의 적용에 따른 NO_x 저감으로 인한 효과로 볼 수 있다. 즉, 플라즈마 DPF

와 탄화수소계 SCR을 동시 적용하였을 경우 배출원이 밀집된 수도권 지역 외에도 국내 전반에 걸쳐 건설기계로 인한 $PM_{2.5}$ 영향을 개선할 수 있음을 시사한다.

그림 10은 건설기계의 대기오염물질 저감을 통한 국내 $PM_{2.5}$ 개선 효과를 기술별·지역별로 살펴보기 위하여 전국 평균, 서울 및 경기, 전남과 경북지역을 대상으로 기술 적용 시나리오에 따라 감소되는 $PM_{2.5}$ 의 기여농도를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯

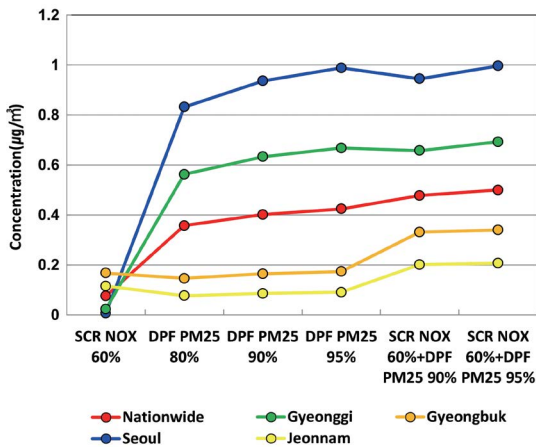


Fig. 10. Improvement of $PM_{2.5}$ contribution concentration in major region with application of reduction technology for construction vehicle.

이 플라스마 DPF 적용으로 인한 건설기계의 $PM_{2.5}$ 개선 효과는 수도권에서 상대적으로 높게 나타나고, 탄화수소계 SCR의 경우 다른 지역 대비 전남, 경북 등의 지역에서 $PM_{2.5}$ 개선 효과가 상대적으로 높게 나타난다. 건설기계 저감기술 적용으로 인한 $PM_{2.5}$ 농도 저감률을 지자체별로 구분하여 살펴보면(그림 11 참조), 수도권 지역(서울·경기·인천)에서의 건설기계 $PM_{2.5}$ 영향을 저감하기 위해서는 플라스마 DPF의 적용이 더욱 효율적이고 효과가 큰 것으로 확인되었다. 반면 전북 및 전남, 경남 및 경북, 제주지역 등의 경우 플라스마 DPF와 탄화수소계 SCR이 병행 적용되어야 건설기계의 대기오염물질 배출에 따른 $PM_{2.5}$ 의 효과적인 저감·개선 효과를 기대할 수 있는 것으로 확인된다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 지금까지 대기오염물질 배출 저감이 어려웠던 건설기계를 대상으로 플라스마 DPF와 탄화수소계 SCR의 개발·적용에 따른 대기오염물질 배출량 감축 효과를 정량적으로 분석하고, 3차원 모델링 기법을 활용하여 배출량 저감 시 주변 지역 및 국내 미세먼지 개선에 미치는 영향을 다양한 시나리

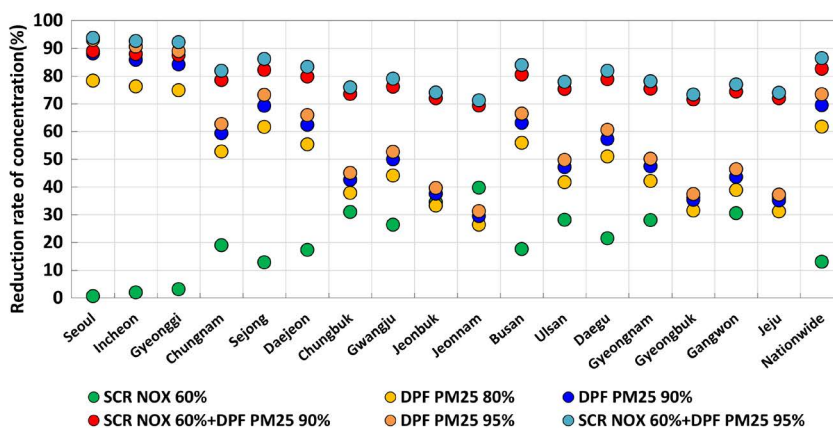


Fig. 11. Reduction rate of $PM_{2.5}$ concentration with application of reduction technology for construction vehicle by local governments.

오를 통해 고찰하였다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 를 직접적으로 저감하는 플라즈마 DPF를 대상으로 80~90%의 저감 효율을 적용하여 국내 $PM_{2.5}$ 개선 효과를 살펴본 결과 건설기계 배출로 인한 국내 $PM_{2.5}$ 기여농도를 61.8~69.2% ($0.36 \sim 0.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 감소시킬 수 있는 것으로 확인되었으며, 특히 인구가 밀집된 수도권 지역에서 그 효과가 두드러짐을 알 수 있었다. 탄화수소계 SCR 적용을 통해 건설기계로부터 배출되는 NO_x 를 60% 저감하였을 경우 건설기계 배출로 인한 국내 $PM_{2.5}$ 기여농도를 전국 평균 13% ($0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 저감하는 것으로 확인되었으며, 전남·경북·경남과 같은 비수도권 지역에서 개선 효과가 상대적으로 큰 것을 알 수 있었다. 플라즈마 DPF와 탄화수소계 SCR이 전국 건설기계에서 동시 적용될 경우 건설기계 배출량에 따른 국내 $PM_{2.5}$ 영향을 82% ($0.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 저감할 수 있을 것으로 산정되었으며, 배출원이 밀집한 수도권 지역과 비수도권 지역에서 그 효과가 고루 나타난 것으로 확인되었다. 또한 수도권 지역(서울, 경기, 인천)에서의 건설기계로 인한 $PM_{2.5}$ 영향을 저감하기 위해서는 플라즈마 DPF의 적용이 더욱 효율적이고 효과가 큰 것으로 확인되었으며, 전북 및 전남, 경남 및 경북, 제주지역 등의 경우 플라즈마 DPF와 탄화수소계 SCR이 병행 적용될 때 건설기계의 대기오염물질 배출에 따른 $PM_{2.5}$ 의 효과적인 저감·개선을 기대할 수 있을 것으로 확인되었다.

본 연구에서 사용된 CAPSS 건설기계 배출량은 Tier 1~3으로 구분된 배출계수를 적용하여 산정되었으며, 배출허용기준에 따라 구분되는 Tier 1~3의 배출계수에는 대기오염물질에 대한 저감효율이 일정 수준 반영되어 있다(Jin *et al.*, 2014). 그러나 본 연구는 CAPSS 건설기계 배출량을 기반으로 시나리오별 저감기술에 따른 저감효율을 적용한 바, 저감효율이 일부 중복 적용되어 실제 $PM_{2.5}$ 저감효과 대비 과대 평가되었을 가능성이 한계점으로 존재한다. 따라서 향후 지자체별 수준의 저감 대책 수립 시 해당 지역의 건설장비 등록 정보를 기반으로 저감효율을 적용할 경우 더욱 현실적인 저감효과 분석이 가능할 것

로 기대된다.

다만 본 연구에서 제시된 각 저감기술 적용에 따른 초미세먼지 농도 변화는 대기질 모사에 사용되는 배출량뿐만 아니라 기상 조건, 모델 화학 메커니즘(오염물질 생성 과정 등) 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 향후 대기질 모사에 활용되는 입력자료들에 대한 검토와 개선이 필요할 것이다.

본 연구를 통해 도출된 저감기술의 개발·적용으로 인한 국내 대기질 개선 효과의 정량적 분석·검증 결과는 추후 추진될 관련 기술개발에 대한 당위성 확보는 물론 대기오염물질 저감기술개발 관련 정책, 제도 등의 추진과 시행을 위한 과학적 근거자료로 폭넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 2019년도 과학기술정보통신부(과제번호: NO. 2019M1A2A2104115)의 지원을 받아 한국환경연구원이 수행한 “맞춤형 저감기술 적용에 따른 미세먼지 개선 효과 분석(2019-099)” 사업의 연구결과로 작성되었습니다.

References

- Arve, K., Klingstedt, F., EräNnen, K., Lindfors, L.-E., Murzin, D.Y. (2005) Engineering HC-SCR: Improved low temperature performance through a cascade concept, *Catalysis Letters*, 105(3-4), 133-138. <https://doi.org/10.1007/s10562-005-8682-9>
- Barrabas, S.B., Baini, R., Sutan, N.M., Yakub, I., Anwar, K., Zauzi, N.S.A., Wahab, N.A., Sulaiman, H. (2017) HC-SCR: NO_x Reduction using Mn and Cu Catalysts Impregnated in Coconut and Palm Kernel Shell Activated Carbon, *MATEC Web of Conference*, 87, 03004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20178703004>
- Carter, W.P.L. (1999) Documentation of the SAPRC-99 Chemical Mechanism for VOC Reactivity Assessment; Air Pollution Research Center and College of Engineering Center for Environmental Research and Technology

- University of California: Riverside, CA, USA; Available online: <https://intra.engr.ucr.edu/~carter/pubs/s99doc.pdf>
- Center for particulate air pollution and health (PM Center) (2021) Representative achievements of center for particulate air pollution and health. <https://pmcenter.kist.re.kr/main/> (Accessed on Feb. 14, 2023).
- Chen, F., Dudhia, J. (2001) Coupling an advanced land surface-hydrology model with the penn state-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity, *Monthly Weather Review*, 129(4), 569-585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2)
- Choi, S., Kang, H., Kim, K.-T., Song, Y.-H., Lee, D.H. (2021) Ignition Process of Diesel Spray Based on Behavior of Rotating Gliding Arc in Plasma Reformer, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(4), 1021-1037. <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10164-9>
- Colella, P., Woodward, P.L. (1984) The piecewise parabolic method (PPM) for gasdynamical simulations. *Journal of Computational Physics*, 54, 174-201. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(84\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0021-9991(84)90143-8)
- Dudhia, J. (1989) Numerical Study of Convection Observed During the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46, 3077-3107. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1989\)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2)
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5), 582-598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- Emery, C., Tai, E., Yarwood, G. (2001) Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Report to the Texas Natural Resources Conservation Commission, International Corporation, Novato, CA.
- Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132<0103:ARATIM>2.0.CO;2)
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes, *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Jin, H., Lee, T., Park, H., Son, J., Kim, S., Hong, J., Jeon, S., Kim, J., Choi, K. (2014) An estimation of age-, Power-, and type-specific emission inventories for construction equipments using improved methodologies and emission factors, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(6), 555-568, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.6.555>
- Kain, J.S. (2004) The kain-fritsch convective parameterization: an update, *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2)
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016 using CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.017>
- Kang, Y.-H., You, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Bae, C., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020) The impacts of COVID-19, meteorology, and emission control policies on PM_{2.5} drops in Northeast Asia, *Scientific Reports*, 10(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79088-2>
- Kim, J.-S., Eom, M.-D. (2013) Air pollutions control technique trends for transportation sources in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(4), 477-485, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.4.477>
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 139-158, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.139>
- Kim, S., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, M., Son, K. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (III) Jeollanamdo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 206-230, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.206>
- Kim, Y.-J., Jeong, H.-S., Kim, S., Ma, Y.-I., Lee, W.-K., Kim, J., Sunwoo, Y. (2016) Seasonal Nitrogen Oxides Improvement due to On-road Mobile Air Pollution Source Emission Control Plan in Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society of Environmental Engineering*, 38(5), 269-278, (in Korean with English

- abstract). <https://doi.org/10.4491/KSEE.2016.38.5.269>
- Kwon, S. (2020) The New Standard of Domestic Construction and Agricultural Equipments, *Auto Journal*, 42(9), 24-26. https://www.ksae.org/journal/journal_auto.php?htarget=1 (Accessed on Feb. 1, 2023).
- Louise, J.F. (1979) A Parametric Model of Vertical Eddy Fluxes in the Atmosphere, *Boundary-Layer Meteorology*, 17, 187-202.
- McNally, D.E. (2009) 12km MM5 Performance Goals. Presentation to the Ad-Hoc Meteorology Group. 25-June.
- Ministry of Environment (MOE) (2019) Fine Dust Management Comprehensive Plan. https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=7399 (Accessed on Nov 6, 2023)
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97JD00237>
- Moon, N., Bong, C., Lee, Y., Shim, C., Seo, J., Hong, C., Kim, Y., Song, G., Kim, A. (2012) Establishment of data disclosure system to provide air quality modeling information data, *National Institute of Environmental Research*, pp. 28-33.
- Moon, N., Seo, J. (2019) Analysis System for Regional Environmental Status to Support Environmental Assessment: PM_{2.5} Contribution for Shipping and Power Plant, *Korea Environment Institute*, (in Korean with English abstract).
- Moon, N., Seo, J., Kim, S. (2021) Estimation of Contribution and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rate by Each Local Government for Policy Support, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 891-906, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.6.891>
- Mrad, R., Aissat, A., Cousin, R., Courcot, D., Siffert, S. (2015) Catalyst for NO_x Selective Catalytic Reduction by Hydrocarbons (HC-SCR), *Applied Catalysis A: General*, 504, 542-548. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.10.021>
- Song, Y.-H., Kang, H., Lee, D.H., Oh, K.-C., Lee, C.-B. (2023) An Innovative Diesel Burner for Thermal Management of Exhaust Emission Control System. *SAE Technical Paper*, Accepted.
- Song, Y.-H., Lee, D.H., Kang, H., Oh, K., Lee, C., Choi, K. (2022) Reduction Technology on White Smoke of Decrepit Construction Vehicles with Plasma Burner, *Journal of The Korean Society Combustion*, 27(3), 41-54, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15231/jksc.2022.27.3.041>
- Song, Y.-H., Lee, D.H., Lee, B.K. (2021) Reduction of vehicle exhaust gas applied with plasma technology for civil and military, *Defense Technology*, 514, 96-107.
- You, S., Bae, C., Kim, H., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.785>

Authors Information

- 최현진 (한국환경연구원 공공인프라평가실 연구위원)
(hjchoi@kei.re.kr)
- 서지현 (한국환경연구원 환경평가모니터링센터 전문연구원)
(jhseo@kei.re.kr)
- 송영훈 (한국기계연구원 플라즈마연구실 책임연구원)
(yhsong@kimm.re.kr)
- 문난경 (한국환경연구원 국토정책평가실 선임연구위원)
(nkmooon@kei.re.kr)