

PMF 모델을 이용한 서울지역 온실가스와 미세먼지의 공통 발생원 및 기여율 추정 연구

문광주^{*†} · 엄효진^{**} · 김은정^{***} · 박승명^{****} · 강소현^{****} · 이대균^{*****} · 이종천^{*****} · 이승묵^{*****} · 정수중^{*****} · 박찬열^{*****} · 최현숙^{*****}

^{*}국립환경과학원 기후탄소연구부 기후변화연구과 환경연구관, ^{**}국립환경과학원 기후탄소연구부 기후변화연구과 환경연구사,
^{***}국립환경과학원 기후탄소연구부 기후변화연구과 전문위원, ^{****}국립환경과학원 대기환경연구부 대기환경연구과 전문위원,
^{*****}국립환경과학원 기후탄소연구부 기후변화연구과 과장, ^{*****}국립환경과학원 기후탄소연구부 부장, ^{*****}서울대학교 보건대학원 교수,
^{*****}서울대학교 환경대학원 교수, ^{*****}국립산림과학원 생활권도시숲연구센터장, ^{*****}서울시보건환경연구원 연구사

Source apportionment of greenhouse gases and PM_{2.5} in Seoul using positive matrix factorization

Moon, Kwang-Joo^{*†} · Eom, Hyo-Jin^{**} · Kim, Eunjung^{***} · Park, Seung-Myung^{****} · Kang, Sohyeon^{****} · Lee, Daegyun^{*****}
· Lee, Jongcheon^{*****} · Lee, Seung-Muk^{*****} · Jeong, Sujong^{*****} · Park, Chan-Ryul^{*****} and Choi, Hyunsuk^{*****}

^{*}Senior Researcher, Climate Change Research Division, Climate Change and Carbon Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

^{**}Researcher, Climate Change Research Division, Climate Change and Carbon Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

^{***}Research Fellow, Climate Change Research Division, Climate Change and Carbon Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

^{****}Research Fellow, Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

^{*****}Director, Climate Change Research Division, Climate Change and Carbon Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

^{*****}Director, Climate Change Research Division, Climate Change and Carbon Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

^{*****}Professor, Graduate School of Public Health, Seoul National University, Seoul, Korea

^{*****}Professor, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University, Seoul, Korea

^{*****}Director, Livable Urban Forest Research Center, National Institute of Forest Science, Seoul, Korea

^{*****}Researcher, Department of Atmospheric Environment Research, Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment, Seoul, Korea

ABSTRACT

As urban areas increasingly support carbon neutrality goals, understanding localized greenhouse gas (GHG) emissions is critical. This study investigates GHG concentrations and their emission sources in Seoul using high-resolution monitoring data of CO₂ and CH₄, along with co-emitted air pollutants including CO, NO₂, and PM_{2.5}. The concentrations of CO₂ and CH₄ exhibited notable spatial and temporal variability and were strongly correlated with CO and NO₂, suggesting the predominance of combustion-related sources in the region. Positive matrix factorization (PMF) was applied to time-resolved air quality data collected at the Seoul supersite, identifying 11 distinct emission sources contributing to GHG levels. Among these, gasoline

[†]Corresponding author : iamian@korea.kr (22689, National Institute of Environmental Research, 42 Hwangyeong-ro Seo-gu, Incheon, Korea. Tel. +82-32-560-7327)

ORCID 문광주 0000-0002-9873-3223 이종천 0000-0002-6222-9543
엄효진 0009-0008-3797-7460 이승묵 0000-0001-6333-4399
김은정 0009-0007-8725-2487 정수중 0000-0003-4586-4534
박승명 0000-0003-3597-4465 박찬열 0000-0003-3543-387X
강소현 0009-0008-7379-2754 최현숙 0009-0009-9948-7229
이대균 0000-0001-6012-7757

and diesel vehicles were the dominant contributors to both GHG and PM_{2.5} concentrations. This result highlights the significant impact of traffic-related emissions in densely populated urban areas and is consistent with existing GHG emission inventories for Seoul, reinforcing the utility of monitoring-based source apportionment. The statistical analysis of integrated GHG and air pollutant data demonstrates the effectiveness of data-driven approaches in identifying key emission sources. These findings provide a scientific basis for prioritizing emission reduction efforts and support the formulation of comprehensive mitigation strategies. Ultimately, the results contribute to the development of science-based, region-specific carbon neutrality policies that address both air pollution and climate change in major metropolitan regions such as Seoul.

Key words : Source Apportionment, Urban Greenhouse Gas, Integrated Monitoring Network

1. 서론

2020년 신기후체제 출범 이후, 유엔기후변화협약(UNFCCC)은 모든 당사국이 자발적인 온실가스 감축 목표(NDC)를 수립하고 이행함으로써 전 지구적 기후변화 대응에 기여하도록 요구하고 있다. 또한 감축 공약의 이행 여부를 객관적으로 평가하기 위한 측정·보고·검증(MRV, Measurement, Reporting, Verification) 체계를 도입하여 감축 및 기후변화 적응 행동의 결과를 객관적이고 투명하게 평가하기 위한 방법을 마련해 가고 있다(Lee, 2011; Wu et al., 2018). 이와 함께 IPCC 6차 보고서에서 환경기준물질을 포함한 대기오염물질을 단기체류 기후변화 유발물질(SLCFs, Short-lived climate forcers)로 규정하면서 온실가스와 대기오염물질의 통합관리 필요성도 함께 강조하고 있다(IPCC, 2022). 두 물질은 발생원에서 에너지, 산업, 주거, 수송 부문 화석연료 사용과 같은 인간의 사회적, 경제적 활동 부산물로 배출된다는 점에서 효율적인 배출 관리 전략 수립을 통해 동시에 저감하면서 상호 보완적인 공편익을 창출할 수 있다(Song et al., 2011).

도시지역은 인구, 교통량, 에너지 소비, 상업 및 산업시설이 집중된 공간으로, 다양한 대기오염물질과 함께 전 세계 온실가스 배출량의 약 62~72%를 차지하는 주요 배출원이다(Churkina, 2016; Duren and Miller, 2012). 2015년 파리협정 이후 도시지역의 탄소중립 달성과 온실가스 감축의 중요성이 대두되면서, 지역 특성을 고려한 탄소중립 전략을 수립하고, 그 이행 효과를 과학적으로 평가하기 위한 수단으로 온실가스 측정이 주목받고 있다(Levin et al., 2011; Lim, 2024; WMO, 2022). 또한 배출원의 공간분포 파악, 배출 영향 분석, 지역 인벤토리 검증 등을 위한 목적으로 과거 배경지역 중심으로 이루어졌던 온실

가스 측정이 점차 도시지역으로 확대되는 추세이다(German et al., 2021; Xiong et al., 2023; Yadav et al., 2023).

우리나라는 2020년 2050 탄소중립 선언 이후 2021년 9월 탄소중립·녹색성장 기본법을 제정하여 탄소중립 이행의 법적 근거를 마련하였다. 이어 2023년 4월에는 제1차 국가 탄소중립·녹색성장 기본계획(2023~2028)을 수립하여 실질적인 감축 이행 방안과 비전을 구체화 하였고, 같은 해 6월 발표한 제3차 국가 기후위기 적응 강화대책을 통해 국가 차원의 기후위기 적응 기반 고도화를 추진하고 있다. 이에 따라 환경부는 지상과 위성관측에 기반한 도시지역 온실가스 입체 관측망을 구축하고 있으며, 배출원과 흡수원에 대한 상시 감시를 통해 국가와 지역 단위 MRV 고도화와 함께 지역 맞춤형 온실가스 감축, 기후위기 적응을 위한 기초자료를 제공할 계획이다(GOK, 2023; MOE, 2023). 국립환경과학원은 환경부의 위임을 받아 2022년 수도권 시범 관측을 시작으로, 2025년 현재 권역별 주요 도시에 국가 기준 측정지점 10개소를 설치하여 운영 중이며, 17개 광역자치단체로 측정망을 확대하기 위한 상세 계획을 수립 중에 있다. 특히 온실가스와 대기오염물질의 통합 모니터링을 위해 기존 대기오염 측정 인프라를 활용한 측정망 구축을 추진하고 있으며, 공정시험기준 마련을 통한 온실가스 측정방법의 표준화, 품질관리 체계 확립, 측정망 설치·운영지침 마련 등을 통해 신뢰도 높은 국가 통계자료의 생산·관리 기반을 마련하고 있다.

본 연구는 국가 온실가스측정망 중 하나인 서울시 불광동에 위치한 수도권 대기환경연구소에서 1년간 상시 측정 한 온실가스와 대기오염물질 성분 농도를 기반으로, 두 물질의 공통 배출원과 그 기여율을 비교·분석함으로써 향후 서울 지역 탄소중립 전략 수립과 기후-대기 통합관리 방안 마련에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 실시간 온실가스 측정방법

본 연구에서는 서울지역 온실가스 농도 변화 특성을 분석하기 위해 국립환경과학원에서 운영 중인 국가 온실가스 측정망 10개소 중 서울 불광동에 위치한 수도권 대기환경연구소와 유관 연구기관들로 구성된 온실가스 관측 연구협의체에서 공유된 2023년 1월부터 12월까지 1년 동안의 1시간 간격 측정자료를 사용하였다. 서울 지역 6개 측정지점과 측정항목, 측정지점 주변 환경, 측정기관과 사용된 측정장비는 Table 1과 같고, 각 지점의 결측률은 2.6 ~ 28.9% 수준으로 결측자료는 분석에서 제외하였다. 이때 도시지역과 배경지역 온실가스 농도 수준 및 변화 특성과 비교하기 위해 서울의 풍상측에 위치한 기상과학원에서 운영하는 안면도 지구대기감시소 자료를 함께 사용하였다. 이때 수도권 대기환경연구소의 CO₂, CH₄ 측정 방법으로는 레이저흡수분광법 중 공동광자감쇠분광법 (CRDS, Cavity Ring-Down Spectroscopy)을 사용하였고, 시료가스 내 수분 제거를 위해 나피온 드라이어 방식의 제습장치를 사용하였다. 측정장비는 한국표준과학연구원의 제로가스와 측정농도 범위의 40%, 80% 수준의 2개의 표준가스를 사용해서 2주 간격으로 검교정을 수행하였다. 그 외 같은 지점에서 측정한 환경기준항목 6종(CO₂, O₃, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5})과 Ambient Ion Monitor (URG Co., URG 900D), Semi-continuous carbon aerosol analyzer (Sunset Laboratory Inc., SOCEC), online X-ray

fluorescence (Cooper Co., Xact 620)를 사용해 1시간 간격으로 측정된 PM_{2.5}의 이온 성분(SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) 및 탄소(OC, EC), 미량원소 성분(S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Pb) 농도도 함께 사용하여 통계모형에 적용하였다(Park et al., 2018).

2.2. PMF (Positive Matrix Factorization) 분석

대기 중 온실가스 농도는 인위적 배출원뿐만 아니라 다양한 자연 배출원의 영향을 받으므로 도시지역 온실가스 농도에 영향을 주는 인위적 배출 영향을 파악하기 위해 먼저 측정농도에서 배경농도를 제거하였다. 배경농도로는 서울 지역 풍상측 국가 배경지역인 안면도 측정농도를 사용하였다.

$$\Delta CO_2 = CO_2^{Location} - CO_2^{Background} \quad (1)$$

PMF 분석은 대상물질의 농도 데이터를 기반으로 개별 측정자료의 가중치와 측정 불확도를 고려해 수식 (2), (3) 으로부터 잔차를 최소화하는 목적함수 Q의 최소 해를 구하는 인자분석법이다(Heo et al., 2009).

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{jk} \cdot f_{kj} + e_{ij} \quad (2)$$

Table 1. Summary on the monitoring sites and measurement method

No.	Sites		Items		Spatial type (%)	Managing authority	Installation	Instrument	Method
	Location	Abb.	CO ₂	CH ₄					
1	Bulgwang	BGW	O	O	Traffic (35), Residential (19)	NIER	2023	Picarro G2301	CRDS
2	Yongsan	YSB	O	-	Traffic (48), Residential (17)	Seoul National University	2019	Licor LI-850	NDIR
3	Namsan Tower (High altitude)	NSH	O	-	Forest (85)		2018	Licor LI-850	NDIR
4	Namsan Tower (Low altitude)	NSL	O	-	Forest (85)	Seoul RIPHE*	2019	Picarro G2131-I	CRDS
5	Songpa (Olympic park)	OLP	O	O	Traffic (33), Grass (21)		2020	Picarro G2131-I	CRDS
6	Gwanak (Guksubong)	GSB	O	-	Forest (68)	NIFoS**	2021	Licor LI-850	NDIR

* Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment

** National Institute of Forest Science

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{(x_{ij} - \sum_{k=1}^b g_{ij} \cdot f_{kj})}{\sigma_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

수도권 대기환경연구소에서 측정된 온실가스와 가스상, 입자상 대기오염물질 농도에서 배경농도를 제거한 인위적 배출 영향농도를 EPA PMF (ver.5.0)에 적용하여 분석하였다. 이때 인자의 수는 모델의 반복 수행을 통해 Q 값과 회전자유도를 최소화하도록 선택하였다. 산출된 배출원 분류표(f)와 기존 연구결과에서 검증된 배출원별 주요 지표성분을 고려해 온실가스와 미세먼지의 공통 배출원을 추정하고, 각 배출원별 기여농도(g)를 산정하였다 (Heo et al., 2018).

3. 연구결과

3.1. 서울지역 온실가스 농도 변화 특성

서울지역 6개 지점별 2023년 연평균 농도(Table 2)는 같은 기간 안면도의 연평균 CO₂, CH₄ 농도인 427.6 ppm, 2,025 ppb 보다 각각 17.3 ~ 35.4 ppm, 128 ~ 213 ppb 높은 수준으로, 6개 지점 중 송파구에서 가장 높고, 남산 타워에서 가장 낮은 농도 수준을 나타낸다. 이때 CO₂와 CH₄의 지점별 농도 분포(Fig. 1)에서 상업시설과 교통이 밀집된 서울 용산과 올림픽 공원에서 상대적으로 평균농도의 편차가 높은 반면, 남산과 관악산 국수봉과 같은 산림지에서 비교적 농도가 낮고 농도 편차도 상대적으로 작은

Table 2. Annual mean concentration of CO₂ and CH₄ measured at 6 sites in in 2023

Site	CO ₂ (ppm)				CH ₄ (ppb)			
	AVG	STD	MAX	MIN	AVG	STD	MAX	MIN
2023								
BGW	454.1	22.4	614.1	407.2	2153	102	2744	1960
YSB	460.6	29.5	628.8	255.8	-	-	-	-
NSH	445.8	17.8	575.3	333.0	-	-	-	-
NSL	444.9	18.8	617.2	399.9	-	-	-	-
OLP	463.0	31.7	628.0	402.7	2238	262	4154	1826
GSB	452.0	20.8	579.8	363.5	-	-	-	-

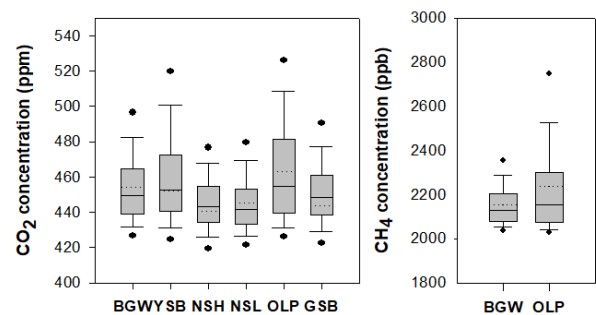


Fig. 1. Comparison of GHG concentrations measured at urban sites in Seoul

것을 확인하였다. 이와 같이 서울 내에서도 측정 지점의 주변 환경에 따라 농도차가 발생함을 확인할 수 있다.

CO₂ 농도의 월변화(Fig. 2)는 전반적으로 난방이나 에너지 소비가 많은 겨울철에 높고, 강우량이 많고 식물활동이 증가하는 여름철 감소하는 경향을 공통적으로 나타낸다. 올림픽 공원의 경우, 10월 급격한 CH₄ 농도 증가가

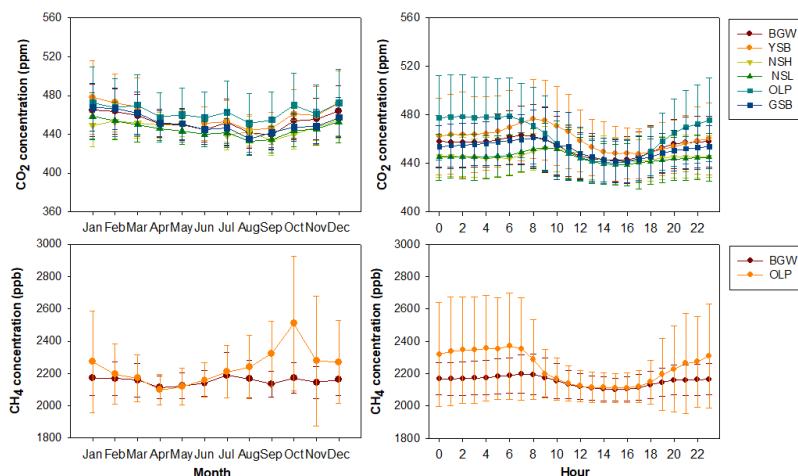


Fig. 2. Monthly and diurnal variation of CO₂ and CH₄ concentrations at urban sites in Seoul

관찰되어 주변 대형 상업시설 등 주변 배출원의 영향을 추가적으로 분석할 필요가 있다. CO₂ 농도의 일변화 경향은 모든 지점에서 공통적으로 낮시간대 혼잡고 증가에 따른 감소가 관찰되었다(Mahata et al., 2017). 특히 교통량이 밀집된 용산에서 사람의 활동량이 증가하는 오전 8시 전후 출근 시간대에 뚜렷한 농도 증가가 관찰되는데 이러한 경향은 중국 상하이, 일본 도쿄와 같은 대도시 지역에서 공통적으로 관찰되는 특성이다(Imasu and Tanabe, 2018; Wei et al., 2020).

3.2. 온실가스 농도 영향인자 분석

도시지역 온실가스와 대기오염물질 농도의 연관성을 살펴보기 위해 서울 불광동에 위치한 수도권 대기환경연구원에서 동시에 측정한 온실가스 2종과 환경기준항목 6종 농도간 상관관계를 분석하였다. 먼저 CO₂, CH₄ 농도간 상관계수는 0.76으로 이 지역 온실가스 성분은 배출원이 유사하거나 대기 중 유사한 물리·화학적 작용의 영향을 받는 것으로 판단된다. 온실가스와 대기오염물질 간 상관분석 결과는 1년치 시간 평균농도를 사용한 결과 상관계수의 절대값은 작지만 다른 항목에 비해 CO₂와 CO, NO₂ 농도의 상관성이 비교적 높게 나타났다. 특히 성분별 시간평균 농도의 시계열에서 CO₂의 주요 피크들이 CO나 NO₂ 농도 피크와 상당부분 일치하는 것을 확인하였다. 일반적으로 CO는 화석연료의 불완전 연소과정에서, NO₂는 자동차 등 내연기관의 고온 연료 연소 시 주로 배출되므로 서울 도심지역 온실가스 농도는 자동차 배출원과 같은

화석연료 연소의 영향을 주로 받는 것을 짐작할 수 있다.

그 외에도 기상인자의 영향을 살펴보기 위해 기상여건이 다른 계절별 온실가스와 대기오염물질, 기상인자와의 상관관계(Fig. 3)를 분석하였다. 그 결과, 계절별로는 여름철과 가을철에 온실가스와 CO, NO₂ 농도와의 상관계수가 증가하였다. 기상인자 중에서는 기온과 기압의 영향을 확인하였고, 식물의 생장이 활발한 봄철을 제외하면 기온이 낮아질수록 에너지 소비 증가 등의 영향으로 온실가스 농도가 증가하였다. 이때 Fig. 2와 같이 다른 계절에 비해 온실가스 농도가 높은 겨울철에 온실가스와 대기오염물질, 기상 인자와의 상관성이 상대적으로 낮아지는데 이는 국지적 오염물질 배출이나 기상에 의한 영향보다 겨울철 전 지구적인 온실가스 배경농도 증가가 더 큰 영향을 주기 때문으로 판단된다.

3.3. 온실가스 및 미세먼지 배출원 추정 결과

서울 불광동에 위치한 수도권 대기환경연구원에서 측정한 온실가스와 미세먼지 성분조성, 가스상 오염물질 농도를 사용해 PMF 분석을 수행하였다. 이때 측정된 성분별 농도값에서 안면도 배경농도를 제거한 배출원 영향 농도를 산정할 때 대기 중 광화학반응에 의한 이차 생성 영향이 큰 PM_{2.5}, O₃ 농도는 배경농도를 제거하지 않은 측정값을 그대로 사용하였다. 그 결과, CO₂, CH₄과 PM_{2.5}의 공통 배출원으로 총 11종의 배출원 영향이 확인되었고, PMF 분석을 통해 도출된 예측값과 실제 측정값 사이의 결정계수(R²)는 0.91로 분석 결과가 측정값을 잘 설명하

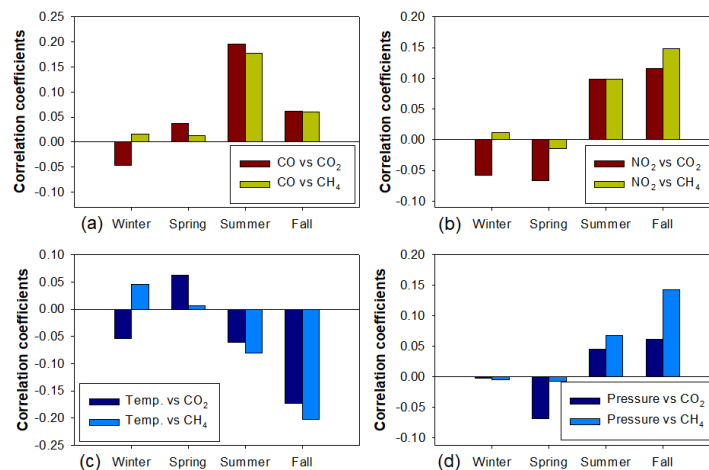


Fig. 3. Seasonal variation of correlation coefficients between the concentrations of GHGs (CO₂, CH₄) and (a) CO, (b) NO₂, (c) temperature, (d) pressure at Seoul Air Quality Research Center

고 있음을 확인하였다. 이때 Fig. 4와 같이 기존 PM_{2.5} 발생원 추정 연구에서 사용된 발생원별 주요 지표 성분으로 각 배출원을 구분하였다(Moon et al., 2011). 서울 불광동 대기 중 PM_{2.5} 농도에 대한 배출원별 기여도(Fig. 5)는 이전 연구와 유사하게 대기 중 광화학 반응에 의한 이차생성 질산염과 황산염을 포함하는 이차 생성 기여율이 50%로 가장 높고, 가솔린과 디젤을 포함한 자동차 배출 기여율(12.1%), 생체연소(11.1%), 폐기물 소각(10.6%) 순으로 나타났다(Cheong et al., 2024). 반면, CO₂나 CH₄ 농도에 대한 배출원별 기여율은 일차 배출원의 영향이 지배적인 것으로 나타났다. CO₂와 CH₄에 대한 주요 배출원별 기여도는 Fig 5와 같이 가솔린 자동차(58.1 ~ 59.1%) > 디젤 자동차(10.1 ~ 14.3%) 순으로 동일하고, 자동차 배출원의 영향이 전체 농도의 약 70% 가량 차지하여 교통량이 집중된 서울 지역 특성 상 가솔린, 디젤 차량의 연료 연소 배출이 이 지역 온실가스의 주요 배출원임을 확인할 수 있었다. 이때 CO₂, CH₄ 농도에 대한 이차생성 질산염, 황산염의 기여율은 9.7 ~ 10.4% 수준으로, 이차생성 물질이 온실가스의 직접적인 발생원은 될 수 없지만 대기 중 질소산화물이 CO나 CH₄의 대기 중 산화에 영향을 주어

CO₂ 생성에 기여하는 복잡한 화학반응의 영향과, 기존 서울지역 PM_{2.5} 발생원 추정 결과와 유사하게 외부로부터 유입된 온실가스 영향을 반영하는 것으로 판단된다(Park et al., 2012; Zhang et al., 2023).

이와 같이 PMF로 산출된 서울 지역 대기 중 온실가스 농도에 대한 배출원별 기여도와 주요 순위는 환경부 온실가스종합정보센터에서 발표하는 2021년 서울 지역 평균 온실가스 부문별 배출량 통계(Fig. 6)와 비교적 유사함을 확인하였다(GIR, 2024). 다만, PMF 분석 결과에서는 온실가스와 미세먼지의 공통배출원에 대한 기여율만 추정했기 때문에 폐기물의 매립이나 생물학적 처리, 에너지 생산시설, 하폐수처리시설 등에서의 탈루와 같이 온실가

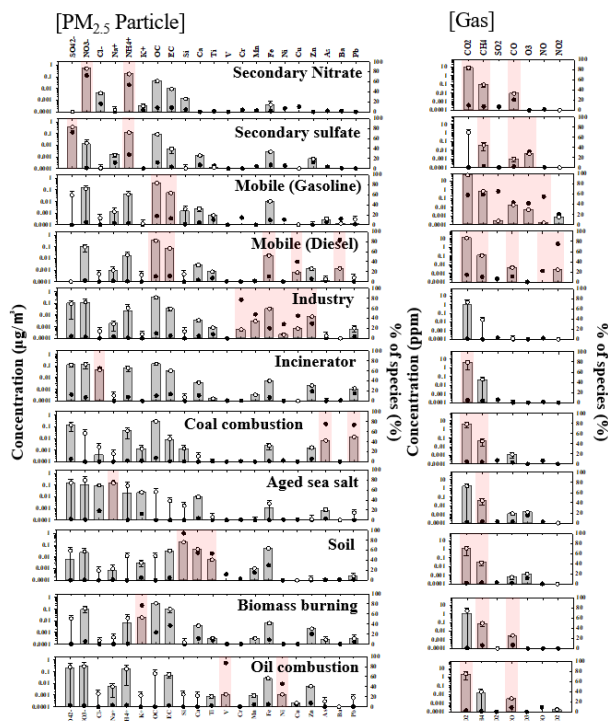


Fig. 4. Source profile derived from PMF analysis at Seoul air quality research center

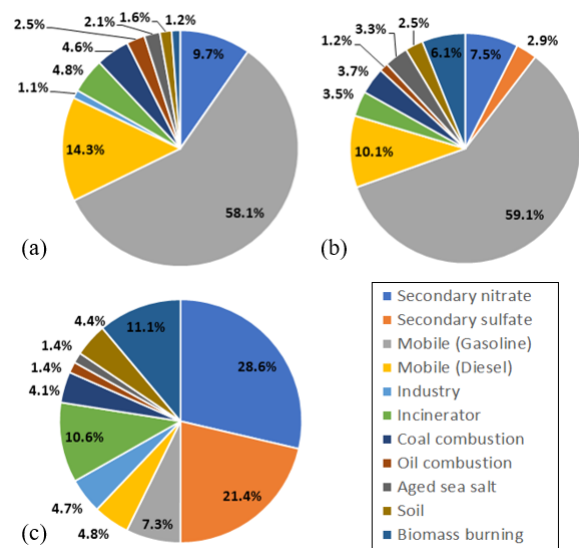


Fig. 5. Source contributions of (a) CO₂, (b) CH₄ and (c) PM_{2.5} at Seoul Air Quality Research Center

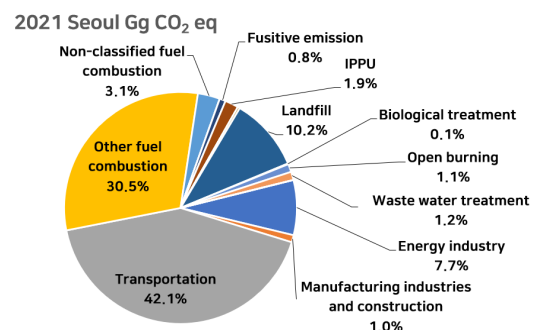


Fig. 6. Sectoral GHG emission statistics in Seoul

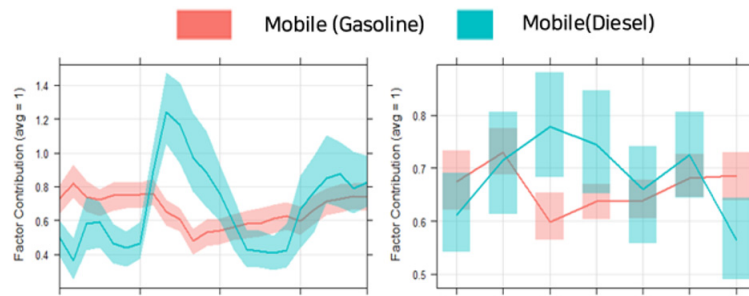


Fig. 7. Diurnal and weekly variation of mobile source contribution to CO₂ at Seoul Air Quality Research Center

스에만 국한된 배출원 영향은 파악할 수 없다. 이때 CO₂에 대한 배출 기여도가 가장 큰 차량 배출원의 기여도 변화(Fig. 7)를 살펴보면, 가솔린과 디젤차량 모두 출퇴근 시간대에 기여도 증가가 뚜렷하고, 주중 교통량 및 물류 수송 증가의 영향으로 주중에 기여도가 높고, 주말에 감소하는 주간 변화 패턴을 확인할 수 있다.

4. 결론

전 세계적으로는 온실가스 감축 이행에 대한 객관적 검증과 농도 변화 추세의 과학적 분석에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라, 실측 데이터를 기반으로 온실가스 감축 및 기후변화 적응 행동의 효과를 정량적으로 평가하고, 기존 정책의 실효성을 점검하며, 과학적 근거에 기반한 정책 보완이 필요한 시점이다.

본 연구는 서울 불광동에 위치한 수도권 대기환경연구소의 상시 관측자료를 활용하여, 도시 지역에서의 온실가스 농도 변화 특성을 분석하고, CO₂, CH₄와 PM_{2.5} 등 대기 오염물질의 공통 배출원과 그 기여율을 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 서울 지역의 CO₂ 농도는 출퇴근 시간대에 뚜렷한 증가 양상을 보이며, 인간 활동과 밀접한 연관성이 있는 것으로 나타났다. 특히, CO₂, CH₄ 농도와 자동차 배출가스 등 화석연료 연소 시 주로 배출되는 CO, NO_x의 상관성이 확인되었다. 또한 2023년 한 해 동안의 측정자료로 수행한 PMF (Potential Matrix Factorization) 분석 결과, CO₂의 경우 가솔린 및 디젤 차량의 기여율이 72.4%, CH₄는 69.2%로 가장 높은 수준을 나타냈다. 이러한 결과는 교통부문 연료 연소 비중이 높은 서울 지역 부문별 온실가스 배출 통계의 주요 배출원 순위와 유사하였다. 이와 함께 동일 지점 PM_{2.5} 농도에 대한 가솔린과 디젤 자동차의 배출 기여율이 이차 생성 기여율 다음으로 높게 나타나, 수송 부문 연료연소가 이 지역 온실가스와 미세먼

지의 주요 배출원임을 확인하였다. 이러한 결과는 서울 지역 대기 중 온실가스와 미세먼지 농도를 효과적으로 동시에 저감하기 위해서는 자동차 배출원을 우선적으로 관리해야 할 필요성을 보여준다. 특히, 친환경차 보급 확대, 대중교통 이용 활성화 등 수송부문 연료 연소 배출을 줄이기 위한 구조적 전환이 핵심적 전략으로 제시될 수 있다. 그 외에도 생활폐기물 소각 등 연소 배출원이 온실가스 배출에 일정 수준 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

결론적으로 본 연구는 기존 대기오염 측정 인프라를 활용한 도시지역 온실가스 측정망의 확충과 공통 배출원 추정 연구를 통해 온실가스 감축과 대기질 개선 간의 정합성을 제고하고, 지역별 배출 특성을 반영한 실효성 있는 탄소중립 및 기후대기 통합관리 전략 수립을 위한 과학적 근거를 제공할 수 있음을 보여준다.

사사

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 “동북아 주요 도시 지역 미세먼지 및 온실가스 발생원인 비교 연구(NIER-2024-01-01-002)” 지원과 온실가스 관측연구 협의체의 협업을 통해 수행되었습니다.

Reference

- Cheong Y, Kim T, Ryu J, Ryoo I, Park J, Jeon K, Yi S, Hopke PK. 2024. Source apportionment of PM_{2.5} using DN-PMF in three megacities in South Korea. *Air Qual Atmos Health* 17: 2579-2599. doi: 10.1007/s11869-024-01584-5
- Churkina G. 2016. The role of urbanization in the global carbon cycle. *Front Ecol Evol* 3:144. doi:

- 10.3389/fevo.2015.00144
- Duren RM, Miller CE. 2012. Measuring the carbon emissions of megacities. *Nat Clim Change* 2: 560-562. doi: 10.1038/nclimate1625
- German R, Matthews B, Ruysenaars P. 2021. Inverse modelling as a tool to support national greenhouse gas monitoring in Europe. ETC/CME Eionet Report.
- GIR. 2024. 2023 National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea.
- Heo JB, Hopke PK, Yi SM. 2009. Source apportionment of PM_{2.5} in Seoul, Korea. *Atmos Chem Phys* 9(14): 4957-4971. doi: 10.5194/acp-9-4957-2009
- Heo JW, Kim CH, Min YK, Kim HJ, Sung YG, Kim JS, Lee KB, Heo JB. 2018. Source apportionment of PM₁₀ at Pyeongtaek area using positive matrix factorization (PMF). *J Korean Soc Atmos Environ* 34(6): 849-864. doi: 10.5572/KOSAE.2018.34.6.849
- Imasu R, Tanabe Y. 2018. Diurnal and seasonal variations of carbon dioxide (CO₂) concentration in urban, suburban, and rural areas around Tokyo. *Atmosphere* 9(10): 367. doi: 10.3390/atmos9100367
- IPCC. 2022. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press.
- Lee HM. 2011. A study on the national MRV system for GHG mitigation actions. Korea Energy Economics Institute. ISBN 978-89-5504-322-8.
- Levin I, Hammer S, Eichelmann E, Vogel FR. 2011. Verification of greenhouse gas emission reductions: The prospect of atmospheric monitoring in polluted areas. *Philos Trans R Soc A: Math Phys Eng Sci* 369: 1906-1924. doi: 10.1098/rsta.2010.0249
- Lim CH. 2024. Policy direction for climate crisis response and carbon neutrality of local governments. *Local Gov Policy Rep* 11: 1-11.
- Mahata KS, Panday AK, Rupakheti M, Singh A, Naja M, and Lawrence MG. 2017. Seasonal and diurnal variations in methane and carbon dioxide in the Kathmandu Valley in the foothills of the central Himalayas. *Atmos Chem Phys* 17: 12573-12596. doi: 10.5194/acp-17-12573-2017
- Ministry of Environment (MOE). 2023. National strategy for carbon neutrality and green growth and the 1st national basic plan (2023-2028).
- Moon KJ, Park SM, Park JS, Song IH, Jang SK, Kim JC, Lee SJ. 2011. Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Seoul metropolitan area in 2010. *J Korean Soc Atmos Environ* 27(6): 711-722. doi: 10.5572/KOSAE.2011.27.6.711
- Park SM, Moon KJ, Park JS, Kim HJ, Ahn JY, Kim JS. 2012. Chemical characteristics of ambient aerosol during Asian Dusts and high PM episodes at Seoul intensive monitoring site in 2009. *J Korean Soc Atmos Environ* 28(3): 282-293. doi: 10.5572/KOSAE.2012.28.3.282
- Park SM, Song IH, Park JS, Oh J, Moon KJ, Shin HJ, Ahn JY, Lee M, Kim J, Lee G. 2018. Variation of PM_{2.5} chemical compositions and their contributions to light extinction in Seoul. *Aerosol Air Qual Res* 18: 2220-2229. doi: 10.4209/aaqr.2017.11.0484
- Song CK, Lee SJ, Yoon JS. 2011. A review of the integrated strategy for climate change and air pollution management. *J Korean Soc Atmos Environ* 27(6): 805-818. doi: 10.5572/KOSAE.2011.27.6.805
- The Government of Republic of Korea (GOK). 2023. The enforced 3rd national climate crisis adaptation plan (2023-2025). ISBN 978-89-5504-322-8.
- Wei C, Wang M, Fu Q, Dai C, Huang R, Bao Q. 2020. Temporal characteristics of greenhouse gases (CO₂ and CH₄) in the megacity Shanghai, China: Association with air pollutants and meteorological conditions. *Atmos Res* 235: 104759. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104759
- World Meteorological Organization (WMO). 2022. IG³IS urban greenhouse gas emission observation and monitoring: Good research practice guidelines. GAW Report No. 275.
- Wu A, Kim AY, Kim TY, Shin HW. 2018. MRV system for achieving NDC under the new climate regime.

- Green Technology Center (GTC). ISBN 979-11-86271-56-8.
- Xiong T, Liu Y, Yang C, Cheng Q, Lin S. 2023. Research overview of urban carbon emission measurement and future prospect for GHG monitoring network. *Energy Rep* 9: 231-242. doi: 10.1016/j.egy.2022.11.131
- Yadav V, Verhulst K, Duren R, Thorpe A, Kim J, Keeling R, Weiss R, Cusworth D, Mountain M, Miller C, Whetstone J. 2023. A declining trend of methane emissions in the Los Angeles basin from 2015 to 2020. *Environ Res Lett* 18: 034004. doi: 10.1088/1748-9326/acb0b3
- Zhang Q, Boersma KF, Zhao B, Eskes H, Chen C, Zheng H, Zhang X. 2023. Quantifying daily NO_x and CO₂ emissions from Wuhan using satellite observations from TROPOMI and OCO-2. *Atmos Chem Phys* 23: 551-563. doi: 10.5194/acp-23-551-2023