

지역간 공동 연구를 통한 광역 미세먼지 개선 기초연구

TECHNOLOGY

김종범 이상신 최영남 박세찬
황규철 김민수 이가혜 조민철

미 세 먼 지 공 동 연 구 협 의 체

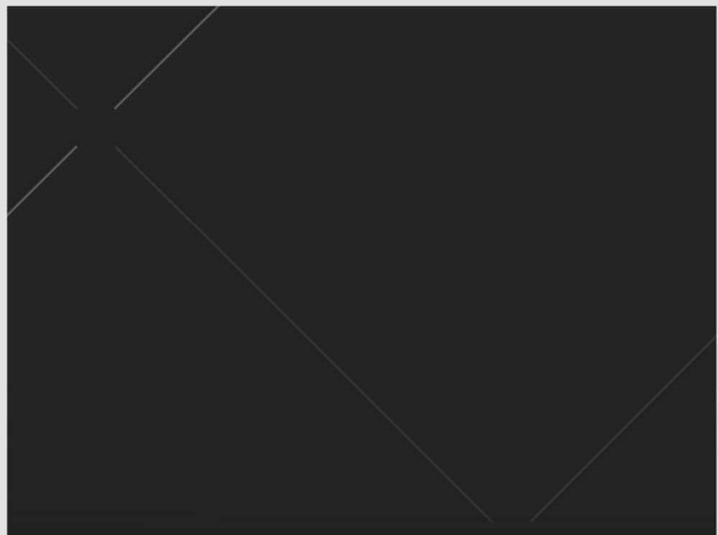


차세대융합기술연구원

본 보고서는 지역 미세먼지 현안 이슈 해결과 공동 대응을 위해 충남연구원과 서울기술연구원, 차세대융합기술연구원이 공동으로 수행한 연구결과입니다.



**지역간 공동 연구를 통한
광역 미세먼지 개선
기초연구**



연구책임

김관철 차세대융합기술연구원 선임연구원

송민영 기후환경연구실 수석연구원

김종범 충남연구원 책임연구원

연구진

이상신 충남연구원 연구위원

최영남 충남연구원 책임연구원

박세찬 충남연구원 책임연구원

황규철 충남연구원 연구원

김민수 충남연구원 연구원

이가혜 충남연구원 연구원

조민철 충남연구원 연구원

최우석 세종대학교 교수

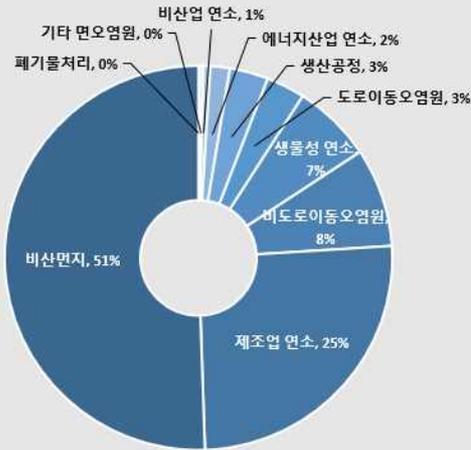
이다솜 차세대융합기술연구원 선임연구원

장지희 서울기술연구원 연구원

도로변 미세먼지 발생량 증가에 따라 버스정류장 인근 보행자, 버스 승·하차 승객의 미세먼지 노출 우려 증가. 시도별 버스정류장 미세먼지는 서로 비슷한 특성을 보이며, 배출 특성에 기반하여 밀폐형 버스정류장 도입, 친환경 버스로의 전환, 버스 노선 분산 배치 등 ‘맞춤형 저감 정책’ 마련 필요

차량에 의한 도로 비산먼지 및 재비산먼지 발생에 따라 버스정류장 이용 승객 및 보행자 건강 위협 우려

도로변 비산먼지는 생활 주변에서 지속적으로 배출되는 유해물질이며, 일정한 배출구 없이 대기 중으로 배출되는 비연소성 도로먼지로 알려져 있다. 발생원인은 타이어 마모, 브레이크 마모, 도로표면 마모 등과 같이 도로를 주행하는 차량에 의해 직접 배출되고 있으며, 도로표면에 싸여 있는 비산먼지가 차량의 주행이나 기상요건에 의해 대기 중으로 재비산 되기도 한다. 비산먼지는 미세먼지(PM₁₀) 배출량에 가장 높은 비율을 차지하며, 재비산먼지는 비산먼지 배출량에 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 알려져 있다. 도로변에서 발생하는 비산먼지 또는 재비산먼지는 도로 통행자가 직접 흡입할 수 있기에 장기적 노출로 인해 폐암, 호흡기 질환, 천식, 심장병 등을 유발하는 등 건강에 위협이 될 수 있다. 도로 재비산먼지 관리를 위해 2013년부터 비산먼지에 대한 정책, 매뉴얼 등을 통해 관리를 시행 및 강화하고 있다. 특히 미세먼지 고농도 기간(12월~3월)에 집중적으로 미세먼지 및 비산먼지 관리를 시행하고 있다. 한국환경공단에서는 도로 재비산먼지 관리를 위해 이동측정차량을 이용해 도로 재비산먼지를 측정하고 이를 기반으로 효율적인 도로청소를 유도하고 있으나, 전구물질인 NO_x, SO_x, 미세먼지 등을 상시 감소시킬 수 있는 기술개발이 요구되는 바이다.



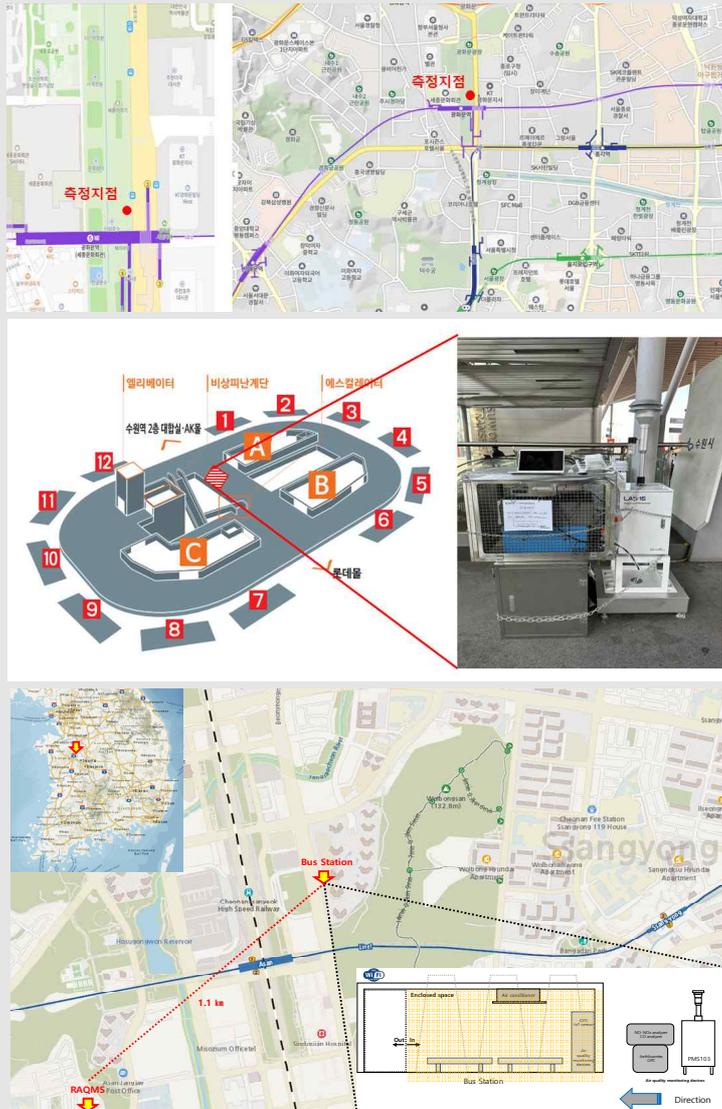
[그림 1] 전국 미세먼지(PM₁₀) 배출원별 기여율, '19년 CAPSS

도로변 비산먼지 특성을 고려하여 지역별 버스정류장 주변 대기질 현황 파악이 필요하며 이를 위한 지역간 공동 연구체계 마련 필요

도로변 비산먼지는 도로에서 차량에 의해 배출되는 대기오염물질의 영향이 복합적으로 작용한다. 도로변 비산먼지 문제 해결을 위해서는 지역별 대기질 정보 공유, 배출 저감을 위한 기술 교류, 대기 환경 연구 협력 등 공동의 노력이 필요하다. 이를 개선하기 위해 국내 각 지자체 및 연구기관에서는 대기질 개선을 위한 연구를 다양하게 수행하고는 있으나, 주로 초미세먼지 1차 배출 저감과 비산먼지 제거에 초점이 맞춰져 있다. 도로변 비산먼지 해결을 위해 지자체별로 집중관리도로를 선정하여 도로 청소 등 관리를 강화하고 있으며, 고농도 시기 도로 청소를 강화하는 등 저감 방안을 마련하고 있으나, 국가 단위 및 국가 차원에서 도로변 비산먼지 문제 해결 방향을 설정하기 위해서는 각 지자체 및 지역 특성을 고려해 차량 배출 저감을 위한 친환경 차량 전환, 2차 생성을 줄이기 위한 대기 순환 확보, 전구물질 배출 규제 등 현실을 적극 반영한 전국 단위의 종합적인 대응 노력이 필요하다.

지역별 현장 측정을 통한 도로변 대기오염물질 종류와 농도 파악

서울, 경기, 충남에서는 각 지역별 도로변 비산먼지 특성 파악을 위해 버스정류장 주변에서 현장 측정을 실시하였으며, 지역별 대기오염물질 종류와 농도 등 대기 환경 현황을 파악하였다.



[그림 2] 서울, 경기, 충남 도로변 비산먼지 측정 지점 및 장비

서울의 경우 가스상 및 입자상 물질 모두 평일에 농도가 높고 주말에 농도가 감소하는 경향을 보였다. 중금속 성분은 황(S), 규소(Si), 철(Fe) 순으로 높게 나타났으며 주말이 주중에 비해 높게 나타났다. 특히, 측정지점이 도로에 인접해 있어 자동차 배출 영향이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

경기도의 경우 서울과 마찬가지로 가스상 및 입자상 물질이 평일에 농도가 높고 주말에 농도가 낮게 나타나는 경향을 보였다. 중금속 성분은 황(S), 철(Fe), 규소(Si) 순으로 높게 나타났고, 주중이 주말에 비해 높게 나타났다. 이동측정을 통해 승객의 승하차 및 통행이 빈번한 정류장에서 농도가 높게 나타나는 경향을 보였다. 측정지점이 버스전용차로 이면서 기차역에 인접해 있기에 자동차, 기차 등에 의한 차량 배출 영향이 크게 나타나는 것으로 판단되었다.

충청남도의 경우도 서울, 경기도와 마찬가지로 가스상 및 입자상 물질이 평일에 농도가 높고 주말에 농도가 낮게 나타나는 경향을 보였다. 중금속 성분은 규소(Si), 황(S), 철(Fe) 순으로 높게 나타났다. 밀폐형 승강장 내외 측정을 통해 정류장 외부 영향이 크게 나타남을 확인하였고, 경유 버스 배출 영향이 크게 나타나는 것으로 판단되었다.

도로변 비산먼지 특성을 고려한 버스정류장 주변 대기질 개선 방안 제안

도로이동오염원에 의한 대기오염 저감을 위해 배출 저감에 초점을 맞춘 정책들이 시행되고 있으나 관련 연구나 측정/분석이 활발히 진행되고 있지 않아 현실을 제대로 반영하지 못하고 있는 실정이다.

서울, 경기, 충남 버스정류장 주변 측정에 따르면 세 지역 모두 차량 배출 영향이 크게 나타나고 있었고, 중금속 성분 중 황(S), 규소(Si), 철(Fe)의 비율이 높게 나타나 이러한 특성에 따라 압축천연가스(CNG), 전기 등의 친환경 차량으로의 전환을 통해 대기오염 물질 배출 저감에 대한 노력이 필요할 것이다. 또한, 버스 대기 및 승하차 승객의 대기오염물질 노출 저감을 위해 밀폐형 승강장 운영을 도입 및 추진할 필요가 있을 것이다. 이와 더불어 교통 수단 측면에서 이용이 편리하도록 배치된 정류장을 대기 환경 요소를 고려하여 배치 및 조정할 필요가 있을 것이다.

| 목차

목차

01 연구 개요

- 1. 연구 배경 및 목표 2
- 2. 연구 내용 및 절차 8

02 지역(서울, 경기, 충남)별 대기환경 관련 추진 연구 현황

- 1. 각 지역별 기술·정책 학술용역 연구 현황(서울, 경기, 충남) 11
- 2. 대기환경(미세먼지) 대응 기술·저감 사업(서울, 경기, 충남) 22

03 지역별 초미세먼지 특성 분석

- 1. 지역별 주요 오염물질 변화 추이 41
- 2. 수도권-경기권-충청권 대기환경연구소 47
- 3. 지역별 PM_{2.5} 특성 분석 51

04 소형사업장 관리현황 분석 및 정책 제언

- 1. 대기오염물질 배출사업장 분류 61
- 2. 지역별 소형사업장 분포 및 특성 65
- 3. 소형사업장 관리 현황 69
- 4. 소형사업장 관리를 위한 정책 제언 74

05 도로변 비산먼지 특성 조사

- 1. 지역별 도로변 비산먼지 특성 79
- 2. 관리 문제점 및 개선방안 제언 133

06 공동연구 추진 결과

- 1. 정기회의 개최 138
- 2. 공동 학술대회 개최 143

3. 연구교류 세미나 146

참고문헌 149

부록 151

표 목차

[표 1-1] 국립환경과학원 기후대기연구부 주요업무	4
[표 1-2] 세부 연구내용	8
[표 2-1] 서울시에서 최근 10년간(2013-2022) 수행한 대기환경 관련 정책 연구	11
[표 2-2] 서울연구원에서 최근 10년간(2013-2022) 자체적으로 수행한 대기환경 관련 정책 연구	12
[표 2-3] 경기도에서 최근 10년간(2013-2022) 수행한 대기환경 관련 정책 연구	14
[표 2-4] 경기연구원에서 최근 10년간(2013-2022) 자체적으로 수행한 대기환경 관련 정책 연구	15
[표 2-5] 충청남도에서 최근 10년간(2013-2022) 수행한 대기환경 관련 정책 연구	17
[표 2-6] 국내 석탄화력발전소 사업수행 현황	18
[표 2-7] 충남연구원에서 최근 10년간(2013-2022) 자체적으로 수행한 대기환경 관련 정책 연구	19
[표 2-8] 국가 대기환경 기준	23
[표 2-9] 서울시 대기환경관리 시행계획 추진 내용	24
[표 2-10] 민간 보급 전기승용·화물차 구매 보조금	27
[표 2-11] 경기도 대기환경관리 시행계획 중점관리과제 및 추진 내용	30
[표 2-12] 충청남도 시행계획 중 미세먼지 저감대책 목표	34
[표 3-1] 서울, 경기, 충남지역 대기측정망 운영 현황	41
[표 4-1] 대기오염물질 배출사업장 등록현황	64
[표 4-2] 서울시 대기오염물질 배출 소형사업장(4,5종) 분포 현황	65
[표 4-3] 경기도 대기오염물질 배출 소형사업장(4,5종) 분포 현황	67
[표 4-4] 충청남도 대기오염물질 배출 소형사업장(4,5종) 분포 현황	68
[표 4-5] 소규모 방지시설 설치지원 사업 예산 및 시군별 비율	71
[표 5-1] 도로변 대기오염물질 측정소 설치 지점	79
[표 5-2] 측정항목 및 측정 방법	80

[표 5-3] 대기오염물질 측정소 구조 및 내부	81
[표 5-4] 2022년 도로변 관측일별 가스상 물질의 농도	87
[표 5-5] 도로변 관측일별 PM _{2.5} 농도 및 구성 성분의 농도	87
[표 5-6] 2022년 도로변 관측일별 원소 성분의 농도	87
[표 5-7] 2022년 도로변 관측일별 원소 성분의 농도	87
[표 5-8] 수원역 환승센터 2층 운영 노선 정보	100
[표 5-9] 측정 일정 및 장비	102
[표 5-10] 수원역환승센터 일자별 기상 현황	103
[표 5-11] XRF 측정 물질	106
[표 5-12] 중량 휘발유 및 가스자동차(버스) 배기가스 배출허용기준	107
[표 5-13] 경유자동차(버스) 배기가스 배출허용기준	108
[표 5-14] 수원역환승센터 일자별 고정측정 일평균 결과	110
[표 5-15] 수원역환승센터 일자별 이동측정 결과	111
[표 5-16] 수원역환승센터 XRF 측정 결과	118
[표 5-17] 본 연구에서 활용된 측정장비의 특징 요약	122
[표 5-18] 선행 연구에서 조사된 각 지역별 BC의 농도	126
[표 6-1] 공동 학술대회(한국산화기술학회) 발표논문 리스트	144
[표 6-2] 공동 학술대회(한국대기환경학회) 발표논문 리스트	145
[표 6-3] 제주연구원 연구세미나 발표 리스트	146

그림 목차

[그림 1-1] 전국 비산먼지 배출원별 기여율	2
[그림 1-2] 한국환경공단 도로 재비산먼지 관리 시스템 운영체계	3
[그림 1-3] 초미세먼지 기여도 분석 및 대기질 농도 예측	6
[그림 2-1] 서울시 미세먼지, 초미세먼지 배출원별 비중	25
[그림 2-2] 물청소, 분진청소, 노면청소 차의 체계적 작업 위치	25
[그림 2-3] 일 단위면적에 따른 미세먼지 흡착량	26
[그림 2-4] 서울시 전기차 홍보와 구매보조금 지원 웹페이지	27
[그림 2-5] 친환경 보일러 교체 보조금 지원 포스터	28
[그림 2-6] 미세먼지 계절관리제 환경부 카드뉴스	29
[그림 2-7] 경기도 도로이동오염원 관리 정책	31
[그림 2-8] 경기도 비도로이동오염원 관리 정책	31
[그림 2-9] 경기도 배출시설 관리 정책	32
[그림 2-10] 경기도 생활오염원 관리 정책	33
[그림 2-11] 경기도 도민 소통·참여 확대 정책	33
[그림 2-12] 충청남도 배출시설 관리 정책	35
[그림 2-13] 충청남도 도로이동오염원 관리 정책	36
[그림 2-14] 충청남도 비도로이동오염원 관리 정책	37
[그림 2-15] 충청남도 생활오염원 관리 정책	38
[그림 2-16] 충청남도 도민 소통·참여 확대 정책	38
[그림 3-1] 수도권과 경기권 주요 지역의 대기오염 변화 추이	43
[그림 3-2] 충청권 주요지역의 대기오염 변화 추이	44
[그림 3-3] 3개 권역 대기환경연구소 위치	47
[그림 3-4] 3개 측정소 주변지역의 기상 정보	50
[그림 3-5] 3개 지역의 PM _{2.5} 연평균농도와 화학조성	52

[그림 3-6] 수도권 지역의 PM _{2.5} 월별 농도와 계절별 화학조성 변화	53
[그림 3-7] 경기권 지역의 PM _{2.5} 월별 농도와 계절별 화학조성 변화	55
[그림 3-8] 충청권 지역의 PM _{2.5} 월별 농도와 계절별 화학조성 변화	56
[그림 3-9] 각 지역별 PM _{2.5} 의 화학물질간 상관성 분석 결과	58
[그림 4-1] 대기오염물질 분류표	61
[그림 4-2] 대기오염물질 부문별 배출량 자료 분석	66
[그림 4-3] 소규모 방지시설 설치지원사업 추진 프로세스	70
[그림 4-4] 소규모 방지시설 설치지원사업 업무처리 지침	72
[그림 5-1] 측정기간 평일과 주말의 바람장미	82
[그림 5-2] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) PM _{2.5} , (b) O ₃ , (c) NO, (d) NO ₂ , (e) CO, (f) CO ₂ , (g) SO ₂ , (h) NH ₃ 농도의 시계열 분포	83
[그림 5-3] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) NO ₃ ⁻ , (b) SO ₄ ²⁻ , (c) NH ₄ ⁺ , (d) OC, (e) EC, (f) BC, (g) Mg ²⁺ , (h) Ca ²⁺ 농도의 시계열 분포	84
[그림 5-4] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) Traffic, (b) 온도, (c) 습도의 시계열 분포	85
[그림 5-5] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 PM _{2.5} 및 무기염 성분, 탄소 성분의 질량	86
[그림 5-6] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) PM _{2.5} , (b) O ₃ , (c) NO, (d) NO ₂ , (e) CO, (f) CO ₂ , (g) SO ₂ , (h) NH ₃ , (i) NO ₃ ⁻ , (j) SO ₄ ²⁻ , (k) NH ₄ ⁺ , (l) OC, (m) EC, (n) BC, (o) Mg ²⁺ , (p) Ca ²⁺ , (q) Traffic, (r) 온도, (s) 습 도의 농도 비교	88
[그림 5-7] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) PM _{2.5} , (b) O ₃ , (c) NO, (d) NO ₂ , (e) CO, (f) CO ₂ , (g) SO ₂ , (h) NH ₃ , (i) NO ₃ ⁻ , (j) SO ₄ ²⁻ , (k) NH ₄ ⁺ , (l) OC, (m) EC, (n) BC, (o) Mg ²⁺ , (p) Ca ²⁺ , (q) Traffic, (r) 온도, (s) 습 도의 낮과 밤 비교	91
[그림 5-8] 전체 측정기간 동안 (a) PM _{2.5} , (b) O ₃ , (c) NO ₂ , (d) CO, (e) SO ₂ , (f) NO, (g) CO ₂ , (h) NH ₃ , (i) NO ₃ ⁻ , (j) SO ₄ ²⁻ , (k) NH ₄ ⁺ , (l) OC, (m) EC, (n) BC, (o) Traffic, (p) 온도, (s) 습도의 일변화	92
[그림 5-9] 도로변 실제 측정과 중구 측정소의 (a) PM _{2.5} , (b) O ₃ , (c) NO ₂ , (d) CO, (e) SO ₂ 의 시계열 농도 비교	93
[그림 5-10] 도로변 실제측정과 중구 측정소의 (a) PM _{2.5} , (b) O ₃ , (c) NO ₂ , (d) CO, (e) SO ₂ 의 상관성 비교	94

[그림 5-11] PM _{2.5} 내 포함된 중금속 구성	95
[그림 5-12] 도로변 측정 평일과 주말(a~b) 및 낮과 밤(c~d) PM _{2.5} 내 포함된 중금속 비율	96
[그림 5-13] 도로변 측정 중금속 함량 비율	97
[그림 5-14] 2019년 CAPSS 경기도 PM ₁₀ 배출량	98
[그림 5-15] 수원역 환승센터 2층 안내도	100
[그림 5-16] 수원역 환승센터 측정 위치 및 장비	102
[그림 5-17] 수원역환승센터 고정측정 및 이동측정	104
[그림 5-18] 수원역환승센터 고정측정 PM _{2.5} , NO ₂ , CO와 RAQMS, 도시대기 일 평균 및 시간 평균 비교	110
[그림 5-19] 수원역환승센터 이동측정 PM _{2.5} 와 RAQMS, 도시대기 일 평균 비교	112
[그림 5-20] 수원역환승센터 대기오염물질 일 평균 시공간 분포	113
[그림 5-21] 수원역환승센터 정류장별 고농도 발생 원인	114
[그림 5-22] 수원역환승센터 대기오염물질 시간 평균 분포	115
[그림 5-23] 수원역환승센터 측정 PM _{2.5} 내에 포함된 중금속 비율	116
[그림 5-24] 수원역환승센터 중금속 항목별 비율	116
[그림 5-25] 수원역환승센터 측정 중금속 항목별 비율	117
[그림 5-26] 밀폐형 버스정류장 내외부 오염도 분석을 위해 설치된 장비와 위치 모습	121
[그림 5-27] 광산란장비에 대한 측정 전 상관성 분석 결과	123
[그림 5-28] 도로변과 RAQMS에서 측정된 오염물질의 일평균 및 시간대별 농도 변화	125
[그림 5-29] 밀폐형 버스정류장 내부에서 측정된 CO ₂ 와 온습도 변화	128
[그림 5-30] 밀폐형 버스정류장 내외부에서 측정된 PM ₁₀ 과 PM _{2.5} 의 모습	129
[그림 5-31] 밀폐형 버스정류장 내외부에서 측정된 PM ₁₀ 과 PM _{2.5} 의 비교와 상관성 분석	130
[그림 5-32] PM _{2.5} 내 포함되어 있는 중금속의 비율	131
[그림 5-33] PM _{2.5} 내 포함되어 있는 중금속의 구성	132
[그림 6-1] 3개기관 업무협약서	138
[그림 6-2] 2021년도 공동연구를 위한 연구계획서 초안	139
[그림 6-3] 제2차 정기회의 모습	140
[그림 6-5] 제4차 정기회의 모습	141

[그림 6-7] 공동 학술대회(한국산화기술학회) 진행 모습	144
[그림 6-8] 공동 학술대회(한국대기환경학회) 진행 모습	145
[그림 6-9] 제주연구원 연구세미나 진행 모습	147

01 연구 개요

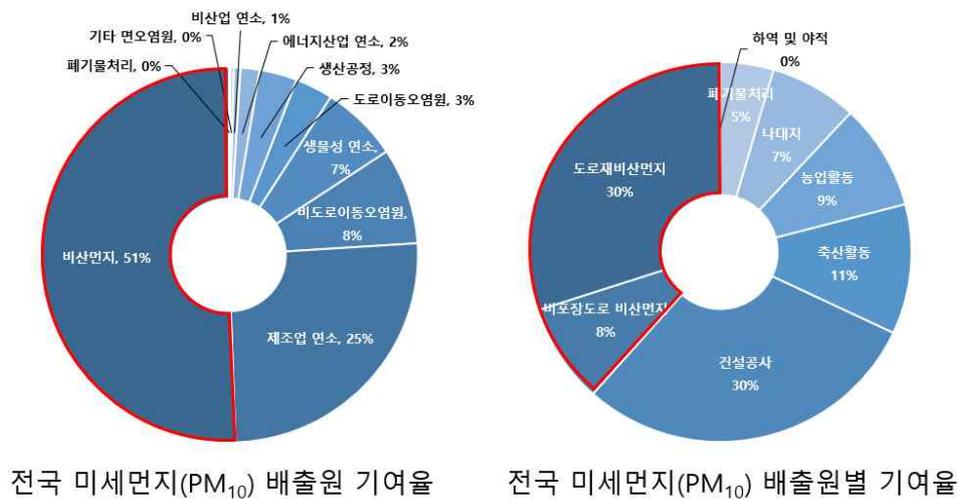
1. 목표
2. 절차

01. 개요

1. 연구 배경 및 목표

1-1. 연구 배경 및 필요성

2013년 이후 지속되는 미세먼지 발생과 개선되지 않는 대기질로 인해 국민적 관심과 우려가 증가하고 있다. 최근에는 자동차 배기가스, 타이어 마모, 브레이크 패드 마모 등에 의해 도로 위에 침적된 먼지가 차량 이동에 의해 대기 중으로 재비산되는 도로변 비산먼지에 대한 관심이 집중되고 있다.



[그림 1-1] 전국 비산먼지 배출원별 기여율 (출처: 2019 CAPSS)

전국 미세먼지 배출원 기여율에서 비산먼지가 가장 높은 기여율을 보이는 것으로 나타나고, 전국 미세먼지 배출원별 기여율에서는 도로 재비산의 비율이 특히 높은 것으로

나타났다.

도로변 비산먼지는 배출원별 발생량이 다르게 나타나고 있는데 미세먼지, 초미세먼지 발생은 도로 재비산먼지, 도로 마모, 타이어 마모, 브레이크 마모, 배기가스 순으로 높게 발생한다.¹⁾ 이에 따라, 도로변 비산먼지의 발생은 자동차 엔진 연소뿐 아니라 타이어나 브레이크 마모 등으로 분석된다.

이에 국가 차원의 도로변 비산먼지 관리를 위한 연구 및 시스템이 지속되고 있으나(그림 1-2), 대부분 미세먼지 관리에 초점이 맞춰져 있으며 관리 차원에서도 지역 현실을 고려하지는 못하고 국가 전체적 차원에서 고농도 미세먼지 현상 발생기작 규명과 예보, 관측기술 고도화 등 거시적인 관점에 초점이 맞춰져 있다(표 1-1).



[그림 1-2] 한국환경공단 도로 재비산먼지 관리 시스템 운영체계 (출처: 한국환경공단)

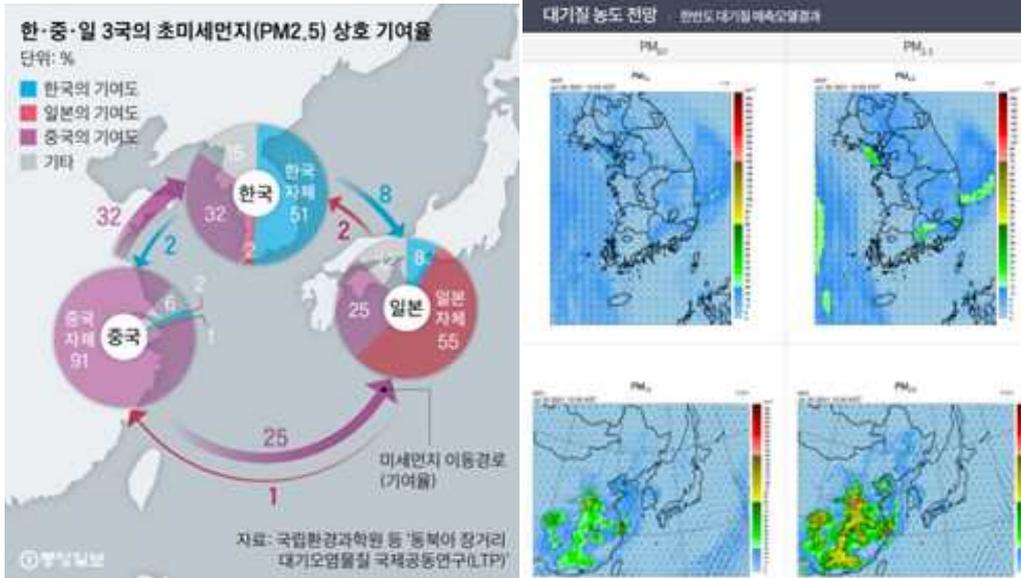
1) 한국기계연구원, 2022, 내연기관 및 전지가동차 발생 배출원별 미세먼지 측정 결과

[표 1-1] 국립환경과학원 기후대기연구부 주요업무(출처: 국립환경과학원 홈페이지)

구분	부서	세부 업무 내용
1	대기환경연구과	대기환경기준에 관한 조사연구
		대기오염물질의 화학변화 및 스모그, 대기갈색연무 등 대기오염현상에 관한 조사·연구
		대기오염물질 분포상태 및 대기관리에 관한 조사·연구
		대기환경 분석을 위한 상층기상의 관측 및 조사·연구
		고도별 대기오염물질의 특성에 관한 조사·연구
		장거리이동대기오염물질이 인체 및 생태계에 미치는 영향 등에 관한 연구
		전국 권역별 대기오염물질 감시를 위한 대기환경연구소 운영·관리
		대기 분야 환경오염공정시험방법 제·개정에 관한 조사·연구
		습성 대기오염물질의 측정 및 성분 분석에 관한 조사·연구
		대기중 입자상 오염물질 및 가스상 오염물질의 측정·분석에 관한 조사·연구
		대기오염 측정망의 설치·운영과 관련된 지침 마련 및 자료의 분석·관리
		장거리이동 대기오염물질의 측정 및 조사·연구
		장거리이동대기오염물질의 성분 및 발원지 특성 등에 관한 조사·연구
장거리이동대기오염물질피해 방지대책에 관한 국제 공동 조사·연구		
2	지구환경연구과	지구온난화 관련 물질의 측정 및 조사 연구
		기후변화유발물질(온실가스) 공정시험기준 개발
		온실가스 및 대기오염물질 통합시스템의 운영
		기후변화 영향평가 및 적응대책 관련 연구
		오존층 파괴 관련 환경변화 및 대응방안의 연구
		기후변화협약 등 국제협력관련 연구·지원
		동북아청정대기파트너십(NEACAP) 기술센터(TC) 운용, 국제 기술 및 훈련 프로그램(TNT Program) 운영
		지구 전체 또는 일부 지역의 기후변화물질 및 대기오염물질의 배출·이동·확산에 관한 조사·연구
		기후·대기 통합모델의 개발 및 운영에 관한 연구
		탄소제로건물 탄소중립 기술 실증화 효과 분석 연구
		저탄소사회 달성을 위한 온실가스 저감방안 마련 등 관련 대책의 수립에 관한 연구
		온실가스 국제상호인정협정 및 배출권거래제 검증기관 지정·등록·관리에 관한 사항
한중 대기질 공동연구, 한중일 대기 및 기후변화 국제공동연구		
3	대기공학연구과	대기오염 관리에 관한 연구
		대기오염물질 배출허용기준에 관한 연구

		대기배출원·악취 분야의 국가표준 및 환경오염공정시험기준 제·개정을 위한 조사·연구
		미세먼지 저감을 위한 방지기술 연구
		DIAL, DOAS 등 분광학 측정기법에 관한 연구
		수도권대기환경연구지원단의 구성 및 운영에 관한 사항
		대기오염물질 발생원 및 오염물질 배출특성에 관한 조사 연구
		악취의 측정 및 평가방법에 관한 조사·연구
		대기오염물질 심사·평가를 위한 관련 조사·연구 및 위원회 운영
		비산배출 저감제도 운영 관리에 관한 연구
4	대기질통합 예보센터	국가대기질 예보제의 운영·관리
		대기질 예보의 선진기술도입을 위한 국제협력
		대기질 예보등급별 국민행동요령 작성 등 대국민 홍보에 관한 사항
		대기오염 및 기상 측정자료의 수집·분석
		국가대기질 예보·정보·속보 등의 생산
		대기질 예보기술의 개선 및 예보 모델의 개발·개선
		대기질 통합 분석 및 예보 지원시스템의 개발·운영
		대기오염 피해저감을 위한 대국민 전달체계 마련 등 대내외 관계기관 협력에 관한 사항
5	환경위성센터	환경위성 운영 및 관측자료의 수산·처리·보존 및 배포
		환경위성센터 장비의 운영 및 관리에 관한 사항
		환경위성자료 처리·분석 기술 개발 및 개선
		환경위성 자료 분석 및 예보 지원에 관한 사항
		환경위성 자료 검증 및 개선에 관한 사항
		국가 환경정책 수립 및 평가를 위한 위성자료 지원에 관한 사항
		환경위성 관측자료 활용 기술 발굴 및 보급에 관한 사항
		국내외 위성 관측자료의 수집·분석·활용
		환경위성 선진기술 도입 및 자료 공유를 위한 국내외 협력
		차세대위성 등 후속 위성 개발에 관한 사항

학계에서도 지역별 맞춤형 대기환경 관리보다는 대규모 배출시설이나 플랜트 위주의 저감시설 도입 등 기술적 관점에서 연구를 진행하고 있고, 미세먼지 분석을 위해 동아시나 한반도 등 거시적 관점에서 (초)미세먼지의 외부 기여도를 산정하거나 최근 다양한 연구에 활용되는 인공지능 기법을 활용한 예측기술 개발 등의 연구를 진행하고 있다.



[그림 1-3] 초미세먼지 기여도 분석 및 대기질 농도 예측(출처: 중앙일보, 에어코리아)

대기환경(미세먼지) 관련 시급 현안 해결을 위해 국내 각 지자체 전문연구기관은 지역 맞춤형 미세먼지 대응 및 개선(안) 도출 연구를 개별적으로 다양하게 수행하고 있으나, 경계가 없는 대기환경의 특성상 특정 지역만의 특징을 조사하여 개선방안을 도출하는 것은 어려움과 한계가 있다. 따라서 지역 맞춤형 기술개발과 정책지원을 위한 포괄적 관점에서 지역별 특성분석 및 공동연구가 요구되고 있다.

1-2. 연구 목표

환경부의 이러한 연구사업은 국가적 차원에서 미세먼지를 관리하는 기술개발과 법령 제정이 유기적으로 추진된다는 측면에서 장점이 있으나, 국가의 세부 지역별 산업이나 대기오염물질 배출, 지형, 사회경제적 특성을 고려하지 못하고 있다. 본 연구를 통해 인구와 산업이 밀집하여 대기오염물질의 배출량이 많고 이에 노출되는 인구가 많은 3개 광역 지자체에서 독자적으로 추진해왔던 연구사업들을 검토하고 의미를 고찰하고자 한다.

본 연구는 지역간 대기환경 관련 구축 정보 및 인적 교류, 지역 연구원 간 연구 교류 활성화를 통한 연구 역량 강화, 지역 대기 관련 자료의 고도화를 목적으로 지역별 대기질 현황을 종합적으로 고려한 도로변 비산먼지 대응 방향 연구 설정을 최종목표로 한다.

지난 2020년 8월 서울-경기-충남 3개 연구원이 업무협약(MOU)을 추진하였으며, 참여기관은 아래와 같다.

(서울) 서울기술연구원 기후환경연구실

(경기) 차세대융합기술연구원 미세먼지신기술측정연구실

(충남) 충남연구원 서해안기후환경연구소

2. 연구 내용 및 절차

2-1. 연구 내용

연구 내용은 지역(서울, 경기, 충남)별 대기환경 관련 추진 연구 현황, 초미세먼지 발생 시 지역별 대기오염 농도변화 특성 분석, 소형사업장의 대기오염물질 배출특성 조사, 지자체 간 후속 공동연구 과제 제언으로 세부 연구 내용은 표 1-2와 같다.

[표 1-2] 세부 연구내용

구분	연구 내용	세부 연구 내용
1	지역(서울, 경기, 충남)별 대기환경 관련 추진 연구 현황	각 지역별 기술·정책 학술용역 연구 현황
		대기환경(미세먼지) 대응 기술·저감 사업
2	지역별 초미세먼지 발생시 지역별 대기오염 농도변화 특성	대기오염물질 배출량 및 농도 변화 추이 분석
		초미세먼지 발생 전, 발생기간, 후 미세먼지 특성 분석
		금속, 이온, 탄소, 입경분포 등 다각적 특성 분석
3	소형사업장 대기오염물질 배출 특성 조사	지역별 소형사업장 분포 및 특성
		실측 기반 생산공정 기타제조업 부문 배출량 상세 조사
4	지자체 간 후속 공동연구 과제 제언	지자체 간 후속 공동연구 과제 제언

2-2. 연구 추진 방법

본 연구를 수행하기 위하여 서울, 경기, 충남 지자체 연구원 미세먼지 전문가 연구협의체를 구성하고 3개 시도에서 과거 및 현재 미세먼지를 비롯한 대기오염 대응 전략을 취합 및 분석한다. 이를 바탕으로 전문가 토론회 및 공동세미나 개최를 통해 실효성있는 미세먼지 대응 방안을 마련한다.

[유관기관]

- 한국과학기술연구원(동북아 미세먼지사업단), 한국연구재단, 한국환경산업기술원 등 유관기관의 자료 협조를 통한 최신 기술 및 연구 동향 파악
- 국립환경과학원, 국가미세먼지정보센터, 서울시보건환경연구원 등 유관기관 자료 협조를 통한 미세먼지 특성 분석 활용

[서울시]

서울시 대기정책과와 자료 협조 및 정보 공유를 통한 지역별 기술·정책 관련 연구 및
사업 현황 조사 활용

[경기도]

경기도 및 지자체와 자료 협조 및 정보 공유를 통한 지역 맞춤형 기술·정책 관련 연구

02 지역별 대기환경 관련 추진 연구 현황

1. 각 기술· 현황
2. 대기환경(미세먼지) 기술· 사업

02.

1. 각 지역별 기술·정책 학술용역 연구 현황

1-1. 서울시

서울시에서는 중앙정부에서 수립한 「대기환경관리 기본계획」과 「미세먼지 관리 종합 계획」 시행을 위해 세부계획 수립의 필요성이 대두되었다. 이를 위해 현재까지는 주로 서울시청에서 추진하는 학술연구용역과 서울연구원의 자체과제를 중심으로 지자체 단위에서의 연구가 수행된 바 있다.

최근 10년간(2013-2022) 서울시에서 수행한 기후, 대기, 미세먼지, 대기오염 관련 용역사업 중 대기측정망 유지관리, 대기환경 관련 포럼 및 행사 운영 등 장비 구축과 사업 부분을 제외한 대기환경 학술정책 연구 현황은 표 2-1과 같다.

[표 2-1] 서울시에서 최근 10년간(2013-2022) 수행한 대기환경 관련 정책 연구(출처: 서울계약마당, 정책연구관리시스템)

구분	추진연도	추진부서	연구과제명
1	2021	보건환경연구원 대기질통합분석 센터	지역별 오염진단에 따른 미세먼지 발생특성 조사
2	2021	기후환경본부 환경정책과	기후변화대응 종합계획(2022-2026) 수립 연구 용역
3	2021	노원구 녹색환경과	노원구 온실가스 감축계획 수립
4	2020	기후환경본부 대기정책과	미세먼지 미산정 배출원 배출특성조사 및 관리방안 수립연구
5	2019	기후환경본부 대기정책과	2단계 수도권 대기환경관리 기본계획 시행을 위한 서울시 세부계획('20~'24)
6	2019	기후환경본부 기후변화대응과	온실가스 감축정책 효과측정 방안 수립
7	2019	기후환경본부 에너지시민협력	10년간의 에코마일리지 성과분석 및 향후 제도 발전방안 연구

		과	
8	2019	기후환경본부 녹색에너지과	제5차 서울특별시 지역에너지계획 수립
9	2018	기후환경본부 대기정책과	서울시 오존 생성 메커니즘 정밀분석 및 효율적 저감방안 연구
10	2017	기후환경본부 대기정책과	서울시 초미세먼지 상세모니터링 해석과 2030 대기환경관리 로드맵 수립 연구
11	2017	기후환경본부 대기정책과	2차 수도권 대기환경관리 기본계획 변경에 따른 서울특별시 시행계획 변경수립
12	2016	기후환경본부 기후대기과	서울시 기후변화대응 종합계획(2017~2021) 수립 연구
13	2015	기후환경본부 환경정책과	서울특별시 환경보전계획(2016~2025)수립
14	2014	기후환경본부 대기관리과	2단계 수도권 대기환경관리 서울특별시 시행계획 수립연구
15	2014	주택건축국 건축기획과	녹색건축물 실태파악 및 조성계획 수립을 위한 연구용역
16	2013	도시계획국 도시계획과	온실가스 저감을 위한 도시계획 관리시스템
17	2013	기후환경본부 친환경교통과	승용차요일제 효과분석 및 장기 추진전략 수립
18	2013	기후환경본부 생활환경과	서울지역 사업장 및 생활악취 배출원 관리방안 마련을 위한 연구
19	2013	복지건강실 생활보건과	서울시 환경보건정책 로드맵 수립 연구

서울시에서 추진해왔던 대기환경 관련 기술·정책 학술용역은 주로 온실가스와 에너지 감축, 에코마일리지와 같은 간접적인 대기환경 관리부터 최근에는 미세먼지 배출원 특성 조사나 오존 생성 메커니즘 정밀 분석과 같이 미세먼지와 대기오염을 과학적으로 이해하고 대응하기 위한 연구들로 발전해 왔다. 또한 중앙정부 정책에 맞춰 기후변화 대응 종합계획 수립이나 대기환경관리 기본계획 수행을 위한 서울시 시행계획 마련과 같은 정책적 요소도 포함되어 있다.

서울시청에서 직접적으로 수행한 대기환경 및 미세먼지 관련 기술·학술정책 연구 이외에도 최근 10년간 서울연구원에서 자체적으로 29건의 연구를 수행한 것으로 나타났다(표 2-2). 서울연구원에서는 안전환경연구실을 중심으로 대기환경 관련 연구를 추진해 왔으며, 차량과 같은 도로이동오염원과 관련하여 교통시스템연구실에서도 대기환경과 관련된 연구를 일부 수행하는 것으로 나타났다.

[표 2-2] 서울연구원에서 최근 10년간(2013-2022) 자체적으로 수행한 대기환경 관련 정책 연구(출처: 서울연구원)

구분	추진연도	추진부서	연구과제명
1	2021	안전환경연구실	2021 '탄소중립' 위한 서울시 그린뉴딜 추진현황과 개선과제
2	2021	안전환경연구실	서울시 미세먼지 환경성질환 건강취약요인 분포특성 진단
3	2021	안전환경연구실	2차연도 미세먼지 계절관리제 이행평가와 개선과제
4	2020	안전환경연구실	기후위기 대응 서울시 '그린 뉴딜' 정책 방향과 추진 전략
5	2020	안전환경연구실	대기오염물질 감축수단 비용효과성 분석
6	2020	안전환경연구실	온실가스과 미세먼지 저감 위한 경제적 수단 도입 방안
7	2019	안전환경연구실	서울시 에너지전환 정책의 성과와 개선 방안, 그리고 새 방향성 모색
8	2019	안전환경연구실	주민참여 생활권 대기오염관리 정책실험
9	2019	안전환경연구실	서울형 미세먼지 정책효과 평가모델 개발과 적용
10	2019	안전환경연구실	파리협정 이행 위한 서울시 '2050 탄소중립' 전략
11	2019	안전환경연구실	2050 서울시 탄소배출 중립 위한 정책과제
12	2019	안전환경연구실	미세먼지 시즌제 도입 방안
13	2019	안전환경연구실	서울시 미세먼지 국제협력 실효성 강화 방안
14	2018	안전환경연구실	미세먼지특별법에 대응한 맞춤형 전략 세워 서울시, 미세먼지 관리에 선도적 역할 강화
15	2018	안전환경연구실	서울시 미세먼지 관리정책의 사회경제적 편익
16	2018	안전환경연구실	그린인프라의 미세먼지 저감효과 분석과 확대 방안
17	2018	안전환경연구실	서울시 미세먼지·오존 통합관리 전략
18	2018	안전환경연구실	미세먼지 저감 위한 도로청소 개선방안
19	2018	안전환경연구실	지자체 교통부문 미세먼지 관리방안 -서울시 자동차 친환경등급제를 중심으로-
20	2018	안전환경연구실	서울시 환경행정, 현장밀착형 분권화 필요, 대기·에너지 등 분야별로 차별화전략 수립
21	2017	교통시스템연구실	교통부문 탄소배출 감소추세 '뚜렷' 교통수요관리 정책 지속 추진 필요
22	2017	교통시스템연구실	친환경차 보급 동향과 서울시 정책 방향
23	2016	안전환경연구실	서울시 공공환경시설 악취관리 강화 방안
24	2015	안전환경연구실	서울시 기후에너지정책 성과 분석을 위한 기초정보 조사
25	2014	안전환경연구실	서울시 건설공사장소음·대기오염 개선
26	2014	안전환경연구실	서울시 초미세먼지(PM _{2.5}) 예·경보 적정기준 설정 및 배출원 관리정보 구축
27	2013	안전환경연구실	서울시 기후·환경 변화의 건강영향 분석연구

28	2013	안전환경연구실	서울시 고농도 오존(O ₃) 대응 매뉴얼 연구
29	2013	안전환경연구실	건물 난방용 연소기기의 대기오염물질 관리 방안 연구

초기에는 실내오염원이나 대기오염물질 배출원별 특성을 조사하고 관리방안을 수립하는 기초적 연구가 수행되었으나, 최근에는 도로청소 방안, 미세먼지·오존 통합관리, 그린인프라 효과 분석, 미세먼지 시즌제, 대기오염물질 감축수단 비용효과성 분석까지 메가시티와 관련하여 도시 관리적 측면에서 다방면의 연구가 진행되어 왔다. 특히 과학기술적인 연구 뿐만 아니라 시민들의 인식과 참여를 고취시키기 위한 주민참여형 연구나 중국을 비롯해 대기오염물질의 외부유입 영향을 고려한 국제협력 실효성 강화 방안에 대한 연구까지 수행되고 있다. 연별로 수행된 연구의 숫자를 살펴보면 2013~2014년에는 연평균 2개의 연구과제가 수행되었으나 2019~2021년에는 총 13건의 연구가 수행되어 대기환경과 미세먼지에 대한 관심과 투자가 최근에 급격히 증가한 것을 살펴볼 수 있다.

1-2. 경기도

최근 10년간 경기도에서 수행한 대기환경과 미세먼지 관련 학술용역은 표 2-3와 같이 15건으로 조사되었다. 주로 환경국에서 추진하였으며 수도권 대기환경관리 기본계획 추진을 위한 시행계획 수립, 기후변화 적응대책 세부 시행계획 및 경기도 온실가스 감축 로드맵과 같은 중앙정부 공조를 위한 연구에서부터 반월·시화산업단지 환경질 개선 방안 및 유해대기 오염물질 관리방안, 적정기술을 이용한 미세먼지 저감방안, 도시숲 조성 및 관리 연구와 같이 지역 특성을 고려한 연구도 수행해 왔다.

[표 2-3] 경기도에서 최근 10년간(2013~2022) 수행한 대기환경 관련 정책 연구(출처: 정책연구관리시스템)

구분	추진연도	추진부서	연구과제명
1	2021	전국 시도연구원 협의회	탄소중립을 위한 지역의 그린뉴딜 추진 방안
2	2020	환경국 미세먼지대책과	경기도 대기환경관리 시행계획(2020~2024)
3	2019	환경부	미세먼지 집중관리구역 지정제도 세부 시행방안 마련 연구
4	2018	광역환경관리사업소	반월·시화산업단지 유해대기 오염물질 관리방안
5	2018	환경국 미세먼지대책과	경기도 미세먼지 인벤토리 및 관리체계 구축
6	2018	광역환경관리사업소	반월·시화산업단지 유해대기 오염물질 관리방안

		업소	
7	2018	자치행정국 회계과	2030 경기도 온실가스 감축 로드맵
8	2017	환경국 환경정책과	경기도 환경보전계획 수립
9	2017	환경국 미세먼지대책과	경기도 대기환경관리 시행계획(변경)
10	2016	환경국 환경정책과	제2차 경기도 기후변화 적응대책 세부 시행계획
11	2016	축산산림국 공원녹지과	경기도 도시숲 조성 및 관리를 위한 기본계획 수립 연구용역
12	2016	환경국 환경정책과	적정기술을 이용한 미세먼지 저감방안 연구
13	2015	경기도공단 환경관리사업소	반월·시화산업단지 환경질 개선방안 연구
14	2015	환경국 기후대기과	경기도 산업단지 온실가스 감축 종합계획수립 연구용역
15	2014	환경국 기후대기과	2차 수도권 대기환경관리 기본계획 추진을 위한 경기도 시행계획 수립 용역

경기도 이외에도 산하기관인 경기연구원에서 대기환경 및 미세먼지 관련 연구를 추진해 왔다. 최근 10년간 총 40건이 추진되었으며, 주로 생태환경연구실을 중심으로 수행되었다(표 2-4). 초기에는 유해화학물질 관리와 건강위해 취약평가, 대기배출 허용기준 등 상대적으로 기초연구가 수행되었으나, 최근에는 5등급 경유자동차 저공해화, 미세먼지 집중관리구역 운영 방안, 미세먼지 노출인구 및 취약지도 작성, 계절관리제, 탄소중립 등 대기환경과 미세먼지에 대한 연구와 대응이 고도화 되었다. 특히 4차 산업혁명과 미세먼지 관리, 인공지능을 활용한 미세먼지 저감효과 분석 등 현재 과학수준에서 도전적인 부분까지 검토함으로써 미래 경기도 대기환경을 능동적으로 관리하고자 사전 연구를 수행하고 있다.

[표 2-4] 경기연구원에서 최근 10년간(2013-2022) 자체적으로 수행한 대기환경 관련 정책 연구(출처: 경기연구원)

구분	발행연도	추진부서	연구과제명
1	2022	생태환경연구실	목재연료 사용에 의한 미세먼지 영향 분석 및 개선방안 연구
2	2022	생태환경연구실	경기도 탄소중립을 위한 '정의로운 전환' 플랫폼 구축 기초연구
3	2022	생태환경연구실	경기도 탄소중립 추진전략과 과제
4	2021	생태환경연구실	사업장 대기오염 방지시설 지원사업의 성과분석 및

			개선방안
5	2021	생태환경연구실	경기도 사업장 미세먼지 배출시설 인허가 제도 개선방안 연구
6	2020	생태환경연구실	녹색전환을 위한 10대 환경 전략
7	2020	생태환경연구실	기후변화 적응을 위한 시민과학 활용 방안 연구
8	2020	생태환경연구실	제3차 경기도 녹색성장 추진계획 수립 연구
9	2020	북부연구센터	경기도 5등급 경유자동차 저공해화 방안 연구
10	2020	생태환경연구실	경기도 미세먼지 집중관리구역 운영 방안
11	2019	생태환경연구실	수도권 지역의 미세먼지 노출인구 평가 및 취약지도 작성 연구
12	2019	자치분권연구실	미세먼지 개선을 위한 중앙 지방간 사업장 관리체계 개편방안
14	2019	생태환경연구실	경기도 미세먼지 계절관리제 도입 방안
15	2019	생태환경연구실	미세먼지 집중관리구역 지정제도 세부 시행방안 마련 연구
16	2019	생태환경연구실	경기도 실내공기질 관리기준 설정 연구
19	2018	생태환경연구실	4차 산업혁명과 경기도 미세먼지 관리
20	2018	생태환경연구실	수도권 미세먼지 집중배출지역 분석
21	2018	생태환경연구실	인공증우를 통한 미세먼지 저감효과 분석
22	2017	생태환경연구실	공공부문 온실가스·에너지 목표관리제의 효율적 운영방안
23	2017	생태환경연구실	경기도 대기배출시설 조사 및 DB 구축 방안
24	2017	생태환경연구실	'경기도 대기환경관리 기본 조례' 제정 방안
25	2017	생태환경연구실	경기동부 동농복합지역 미세먼지 관리방안
26	2016	생태환경연구실	대기질개선 정책과 기후변화대응 정책 간의 공편익 상관성 연구
27	2016	생태환경연구실	경기도 환경분야 빅데이터의 구축과 활용
29	2016	생태환경연구실	경기도 산업단지 온실가스 감축 종합계획(2016~2020)
30	2015	생태환경연구실	경기북부지역 환경위해시설 조사 및 특성분석
31	2015	생태환경연구실	경기도 환경안전관리 정책방향 연구
32	2015	생태환경연구실	화장시설의 환경영향 분석 및 관리방안 연구
33	2015	생태환경연구실	지역의 기후변화 적응 거버넌스 연구
34	2014	생태환경연구실	경기도 유해화학물질 관리계획 2015~2019
35	2014	생태환경연구실	경기도 환경산업 실태 조사

36	2014	경제사회연구실	온실가스 배출권거래제 도입에 따른 경기도 대응방안
37	2014	생태환경연구실	통합환경관리제도 도입과 경기도의 대응
38	2013	생태환경연구실	수도권 대기오염에 의한 건강위해 취약지역의 평가
39	2013	자치분권연구실	환경유해물질 안전관리를 위한 조직운영 개선방안
40	2013	생태환경연구실	경기도 유해화학물질 관리체계 개선방안

직접적인 대기환경 관련 연구 외에도, 녹색전환을 위한 10대 환경 전략이나 기후변화 적응을 위한 시민과학 활용 방안 연구와 같이 대기환경과 관련있는 사회경제적 분야를 다루면서 대기환경을 근본적으로 개선하기 위해 필요한 시민 인식 개선이나 사회적 필요 요소에 대해 평가하는 연구를 경기연구원에서 함께 진행하고 있다.

1-3. 충청남도

충청남도에서도 대기환경개선 종합계획 수립과 기후변화 적응계획 등 중앙정부 정책을 시행하기 위한 연구를 수행해 오면서, 지역 산업 특성을 고려하여 석탄화력발전소 주변지역 주민건강영향조사와 기후환경 영향 연구를 다년과제로 수행하며 대기오염에 각별한 관심과 투자를 추진하고 있다(표 2-5).

[표 2-5] 충청남도에서 최근 10년간(2013-2022) 수행한 대기환경 관련 정책 연구(출처: 정책연구관리시스템)

구분	추진연도	추진부서	연구과제명
1	2021	기후환경국 기후환경정책과	제3차 충청남도 기후변화 적응대책 세부시행계획(2022~2026) 수립 연구용역
2	2019	기후환경국 미세먼지대책과	환경오염 취약지역 주민건강영향조사(2차년도)
3	2019	기후환경국 기후환경정책과	화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(3차년도)
4	2019	기후환경국 미세먼지대책과	석탄화력발전소 주변지역 주민건강영향조사(3차년도)
5	2018	기후환경국 기후환경정책과	충청남도 기후변화 적응대책 이행평가 연구(2018년·2차년)
6	2018	기후환경국 기후환경정책과	화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(2차년도)
7	2018	기후환경국 기후환경정책과	제2차 충청남도 기후변화대응 종합계획
8	2018	기후환경국 환경보전과	석탄화력발전소 주변지역 주민건강영향조사(2차년도)

9	2017	기후환경녹지국 기후환경정책과	2017년 충청남도 기후변화적응대책 세부시행계획 이행평가 연구용역
10	2017	기후환경녹지국 환경보전과	충청남도 대기환경개선 5개년 종합계획 수립 연구용역
11	2016	기후환경녹지국 환경보전과	석탄화력발전소 주변지역 주민건강영향조사(1차년도)
12	2016	기후환경녹지국 기후환경정책과	화력발전소 주변지역 기후환경 영향 연구 용역
13	2016	기후환경녹지국 물관리정책과	제2차 충청남도 기후변화 적응계획 수립용역
14	2016	기후환경녹지국 환경보전과	충청남도 환경보건종합계획(2017~2020) 수립 용역
15	2016	환경녹지국 환경정책과	화력발전소 기후환경 영향에 따른 중장기 대응전략 수립연구
16	2014	경제산업실 에너지산업과	충청남도 제2차 녹색성장 5개년계획 연구용역
17	2013	환경녹지국 환경정책과	배출권거래제 대응전략 수립 연구용역

충청남도에는 태안화력발전소, 보령화력발전소, 당진화력발전소, 그리고 최근 상업운전을 시작한 신서천화력발전소가 위치하며(표 2-6) 원자력을 제외한 국가 전력생산의 상당부분을 차지하고 있다. 화력발전소에서는 다량의 대기오염물질이 배출되기 때문에 주변지역 주민들의 건강영향에 대한 각별한 관리를 위해 요구되는 관련 연구가 장기간 수행되고 있다.

【표 2-6】 국내 석탄화력발전소 사업수행 현황(출처: 한국전력기술)

구분	발전소	위치	용량	비고
1	보령 3~6호기	충남 보령시	500×4	운전중(SC)
2	태안 1~6호기	충남 태안군	500×6	운전중(SC)
3	삼천포 3,4호기	경남 고성군	560×2	운전중(Sub, Critical)
4	당진 1~4호기	충남 당진군	500×4	운전중(SC)
5	하동 1~6호기	경남 하동군	500×6	운전중(SC)
6	삼천포 5,6호기	경남 고성군	500×2	운전중(SC)
7	당진 5,6호기	충남 당진군	500×2	운전중(USC)
8	당진 7,8호기	충남 당진군	500×2	운전중(USC)
9	태안 7,8호기	충남 태안군	500×2	운전중(USC)
10	보령 7,8호기	충남 보령시	500×2	운전중(USC)

11	하동 7,8호기	경남 하동군	500×2	운전중(USC)
12	북평화력 1,2호기	강원 동해시	595×2	운전중(USC)
13	영흥 1,2호기	인천 옹진군	800×2	운전중(SC)
14	영흥 3,4호기	인천 옹진군	870×2	운전중(USC)
15	당진 9,10호기	인천 옹진군	1,000×2	운전중(USC)
16	신보령 1,2호기	충남 보령시	1,000×2	운전중(USC)
17	태안 9,10호기	충남 태안군	1,000×2	운전중(USC)
18	신서천화력	충남 서천군	1,000×1	건설중(USC)
19	강릉안인화력	강원 강릉시	1,000×2	운전중(USC)
20	고성하이화력	경남 고성군	1,000×2	운전중(USC)
21	삼척그린파워 1,2호기	강원 삼척시	1,000×2	운전중(USC)
22	동해 1,2호기	강원 동해시	200×2	운전중
23	여수 2호기	전남 여주시	340×1	운전중

충청남도에서는 도청 이외에도 산하연구기관인 충남연구원에서 대기환경과 관련된 지자체 단위의 많은 연구가 수행되었다. 또한, 기후변화 교육센터를 운영하며 교육지원하고 있고, 온실가스 감축 이행평가 및 차년도 감축계획 수립 연구를 진행하며 대기환경 연구를 수행하고 있다. 최근 10년간 52개의 관련 연구가 수행된 것으로 조사되어 타 광역지자체에 비해 많은 수의 연구가 진행된 것으로 나타났다(표 2-7).

[표 2-7] 충남연구원서 최근 10년간(2013-2022) 자체적으로 수행한 대기환경 관련 정책 연구(출처: 충남연구원)

구분	추진연도	추진부서	연구과제명
1	2022	기후변화대응 연구센터	충청남도 탄소중립 그린도시 온실가스 분석
2	2021	기후변화대응 연구센터	서해안권 초광역 대기질 개선 프로젝트 기획연구
3	2021	공간·환경연구실	수소버스 운영에 따른 도로부문 대기오염물질 배출량 감소 효과와 사회적 환경편익 검토
4	2021	기후변화대응 연구센터	소형사업장 대기질(미세먼지) 영향분석 및 도장시설 관리 매뉴얼 개발
5	2021	기후변화대응 연구센터	광역 대기오염관리를 위한 지역오염 특성 분석

6	2021	기후변화대응 연구센터	충남 그린뉴딜 과제의 온실가스 감축 등 환경효과 분석
7	2020	기후변화대응 연구센터	화력발전소 영향관리지역 선정을 위한 대기기초자료 수집
8	2020	기후변화대응 연구센터	충청남도 미세먼지관리 시행계획(대기환경관리 시행계획) 수립
9	2020	기후변화대응 연구센터	폐기물처리시설 신규운영에 따른 대기영향 분석
10	2020	기후변화대응 연구센터	소형 어선에 의한 충남지역 대기오염물질 배출 및 영향분석 기초 연구
11	2020	기후변화대응 연구센터	충남 온실가스 감축역량 강화를 위한 해양연안 부문 적용확대 방안
12	2020	기후변화대응 연구센터	충남 서북부 기초지자체의 미세먼지대응 행정협의회 운영 방안 연구
13	2020	기후변화대응 연구센터	화력발전소 영향관리지역 선정을 위한 대기기초자료 수집
14	2019	공간·환경연구실	충청남도 도시-환경계획 통합관리방안
15	2019	기후변화대응 연구센터	제3차 충청남도 녹색성장 5개년 계획수립 기초연구
16	2019	기후변화대응 연구센터	대기보전특별대책지역지정을 위한 석유화학단지 영향 분석 용역
17	2019	기후변화대응 연구센터	태안군 대기오염물질 및 비산먼지 배출사업장 미세먼지 교육을 위한 기초정보
18	2019	공간·환경연구실	노후 화력발전소 가동중단과 대기질 개선효과 분석
19	2019	기후변화대응 연구센터	충청남도 민간대기측정망 통합운영시스템 구축
20	2019	기후변화대응 연구센터	충청남도 미세먼지 저감 시책발굴
21	2019	기후변화대응 연구센터	오염물질 배출시설 주변지역 과거 환경영향 기록복원 기초연구
22	2019	공간·환경연구실	홍성군 미세먼지 발생현황 조사
23	2019	공간·환경연구실	노후석탄화력발전소의 단계적 폐쇄와 친환경에너지(발전소) 전환 타당성 연구
24	2019	기후변화대응 연구센터	학교 미세먼지 저감을 위한 통합관리방안 구축 사전조사 연구 (내포신도시를 중심으로)
25	2019	기후변화대응 연구센터	대산지역 산업약취 원인규명과 관리계획 수립 기초조사연구
26	2018	기후변화대응 연구센터	충남도민 생활 속 미세먼지 저감실천과 평가

27	2018	기후변화대응 연구센터	충청남도 대기오염 중점관리지역 정보관리 로드맵 수립
28	2018	공간·환경연구실	화력발전소 주변 어린이 건강영향조사
29	2018	공간·환경연구실	예산군 미세먼지 기본계획 수립을 위한 기초자료 분석
30	2018	기후변화대응 연구센터	미세먼지 중심 충청남도 대기환경개선 계획 대기오염물질 감축 목표량 설정
31	2018	기후변화대응 연구센터	충청남도 대기오염 중점관리지역 정보관리 로드맵 수립
32	2018	공간·환경연구실	충남 친환경버스 도입 방안 검토
33	2017	기후변화대응 연구센터	대기환경규제지역 및 특별대책지역지정 시민인식도 조사
34	2017	기후변화대응 연구센터	대산공단지역 대기환경영향조사 용역
35	2017	공간·환경연구실	석탄화력발전소 가동중단에 따른 충남 대기질과 주민건강실태·정책인식조사 연구
36	2017	기후변화대응 연구센터	충남지역 고농도 미세먼지(PM10) 발생일의 기상특성 분석에 대한 연구
37	2016	공간·환경연구실	환경 관련 부담금의 자치재원화 방안
38	2016	기후변화대응 연구센터	충청남도 대기오염물질 배출허용기준(안) 설정 연구
39	2016	기후변화대응 연구센터	충청남도 지역 대기환경기준 설정 기초 연구
40	2016	기후변화대응 연구센터	충남, 행복한 1.5℃(대기환경분야)
41	2016	기후변화대응 연구센터	충청남도 지역 대기환경기준 설정 기초 연구
42	2016	공간·환경연구실	충남의 환경성질환자 실태조사 및 예방·관리방안 연구
43	2016	공간·환경연구실	충남 도로부문 대기오염물질 배출량 저감을 위한 교통정책 방안
44	2016	공간·환경연구실	레미콘 공장 입지에 따른 주변환경 및 인근 주민 건강에 미치는 영향 등 연구
45	2016	공간·환경연구실	대산석유화학단지 주변지역 환경영향조사 실시설계용역 방안 연구
46	2015	기후변화대응 연구센터	충청남도 기후변화 취약성 평가 Prototype 개발
47	2015	공간·환경연구실	연탄공장 신설에 따른 주변환경 영향 검토
48	2015	외부	지역환경과 지역경제의 상생을 위한 충청남도 대기환경재원 개선 연구

49	2013	지역도시·문화 연구실	화력발전소 건설에 따른 환경 및 경제적 피해실태와 전망
50	2013	공간·환경연구 실	환경분야 대형사업장 사업자의 책무 부여 방안
51	2013	지역도시·문화 연구실	충남의 발전관련 시설에 의한 환경 및 경제적 피해 분석 - 화력발전소를 중심으로
52	2012	지역도시·문화 연구실	태안군과 한국서부발전주의 환경협정 기준 마련

충남연구원에서 초기에는 화력발전소의 환경과 경제적 피해 부분과 관련된 연구가 주로 수행되었으나, 주민 건강과 환경영향 조사, 대기오염물질 배출 감축, 대기환경기준, 탄소중립 등에 대한 연구가 수행되기 시작했고, 최근에는 노후석탄화력발전소의 가동 중단이나 단계적 폐쇄와 관련된 대기질 개선효과 분석이나 어선에 의한 대기오염물질 배출 영향까지 연구 영역이 확장된 모습을 보였다. 특히 대산석유화학단지나 레미콘 공장 주변, 태안군 사업장 등 지역 맞춤형 환경영향평가 연구가 다수 수행되어 해당지역의 대기오염 특징을 분석하고 주민들의 건강보호를 위해 노력하고 있다.

2. 대기환경(미세먼지) 대응 기술·저감 사업

환경부에서 설정한 대기오염물질 항목과 국가 대기환경 기준은 표 2-8과 같으며, 해당 기준을 달성하기 위해 각 지자체들은 기술·정책 학술연구를 추진하면서 연구결과를 반영한 대기오염 개선사업을 병행해 왔다. 일반적으로 상시 관측하는 6개 요소들(미세먼지, 초미세먼지, 오존, 이산화질소, 아황산가스, 일산화탄소)은 연간평균치와 함께 단기간의 고농도 노출 관점에서의 24시간평균치, 1시간평균치 기준이 함께 설정되어 있다. 이외에도 중금속인 납과 벤젠이 대기환경관리 기준으로 설정되어 있다.

[표 2-8] 국가 대기환경 기준(출처: 환경부 수도권대기환경청)

구분	항목	기준	측정방법
1	미세먼지(PM ₁₀)	연간평균치 50 μ g/m ³ 이하 24시간평균치 100 μ g/m ³ 이하	베타선흡수법 (β - Ray Absorption Method)
2	초미세먼지(PM _{2.5})	연간평균치 15 μ g/m ³ 이하 24시간평균치 35 μ g/m ³ 이하	중량농도법 또는 이에 준하는 자동측정법
3	오존(O ₃)	8시간평균치 0.06ppm 이하 1시간평균치 0.1ppm 이하	자외선광도법 (U.V Photometric Method)
4	이산화질소(NO ₂)	연간평균치 0.03ppm 이하 24시간평균치 0.06ppm 이하 1시간평균치 0.10ppm 이하	화학발광법 (Chemiluminescent Method)
5	아황산가스(SO ₂)	연간평균치 0.02ppm 이하 24시간평균치 0.05ppm 이하 1시간평균치 0.15ppm 이하	자외선형광법 (Pulse U.V. Fluorescence Method)
6	일산화탄소(CO)	8시간평균치 9ppm 이하 1시간평균치 25ppm 이하	비분산적외선분석법 (Non - Dispersive Infrared Method)
7	납(Pb)	연간평균치 0.5 μ g/m ³ 이하	원자흡광광도법 (Atomic Absorption Spectrophotometry)
8	벤젠	연간평균치 5 μ g/m ³ 이하	가스크로마토그래프법 (Gas Chromatography)

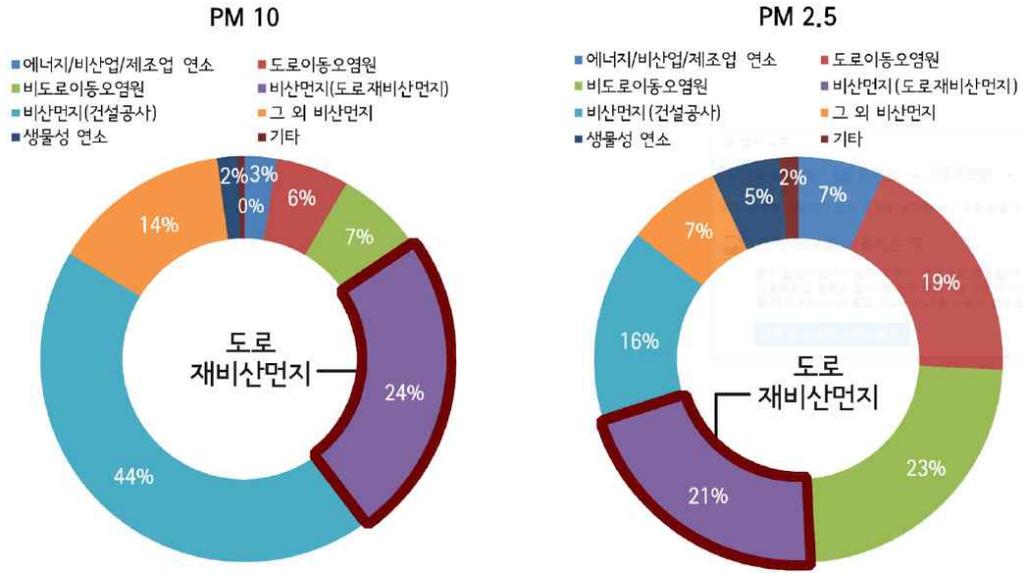
2-1. 서울시

서울시에서는 학술연구를 통해 도출된 방안들을 시정 관리에 적용해 대기환경 개선사업을 추진하고 있다. 서울시는 인구와 산업이 밀집한 메가시티로써 교통과 관련된 자동차 운행, 소규모 사업장 중심의 배출시설, 주거 및 에너지와 관련된 생활오염원들의 지속적인 모니터링과 과학적 관리기반을 구축하고 궁극적으로는 대기오염물질 감축을 위한 시민들의 자발적 참여를 독려하는 홍보를 강화해 왔다(표 2-9).

[표 2-9] 서울시 대기환경관리 시행계획 추진 내용(출처: 서울연구원 2018)

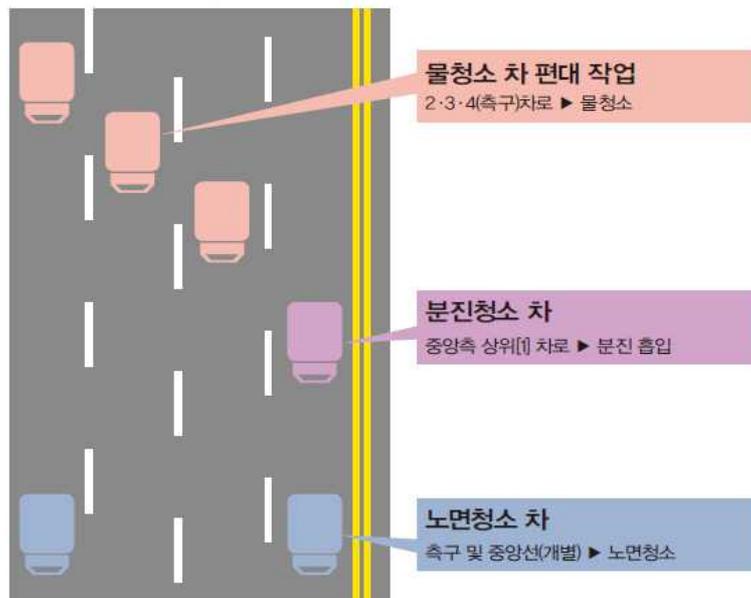
저감대책 구분	추진 내용
자동차 관리	<ul style="list-style-type: none"> 친환경자동차 보급 확대 제작차 배출허용기준 및 사후관리 강화 운행자동차 배출가스 관리 비도로 이동오염원 관리 교통수요 관리
배출시설 관리	<ul style="list-style-type: none"> 대기오염물질 배출총량제 강화 총량 사업장 외 배출시설 관리
생활오염원 관리	<ul style="list-style-type: none"> VOCs, NOx 배출원 관리 PM10, PM2.5 배출원 관리 친환경 도시 관리 및 에너지 체계 구축
과학적 관리기반 구축 및 홍보 강화	<ul style="list-style-type: none"> 과학적 관리기반 구축 국내외 협력 강화 시민 홍보 및 친환경 생활 실천 민감계층 중점 보호

2015년 서울시에서 국가대기오염물질 배출량의 미세먼지와 초미세먼지 배출원별 비중을 살펴보면, PM₁₀ 은 도로 재비산먼지가 배출량의 24%로 나타났고, PM_{2.5} 에서도 21% 로 무시할 수 없는 수준이라는 점이 드러났다(그림 2-1). 서울시에서는 도로 주변 보행자가 타 도시에 비해 많기 때문에 도로재비산먼지로 인한 배출량을 저감하는 것이 미세먼지 노출을 줄이고 시민 건강을 지키는 가장 효율적인 방법 중 하나로 평가된다. 따라서 도로 주변의 대기 난류나 미세먼지 거동의 일반적 특성을 파악하고, 기상조건이나 보행자 활동까지 고려한 도로청소를 추진한다면 그 효과가 극대화 될 수 있다.



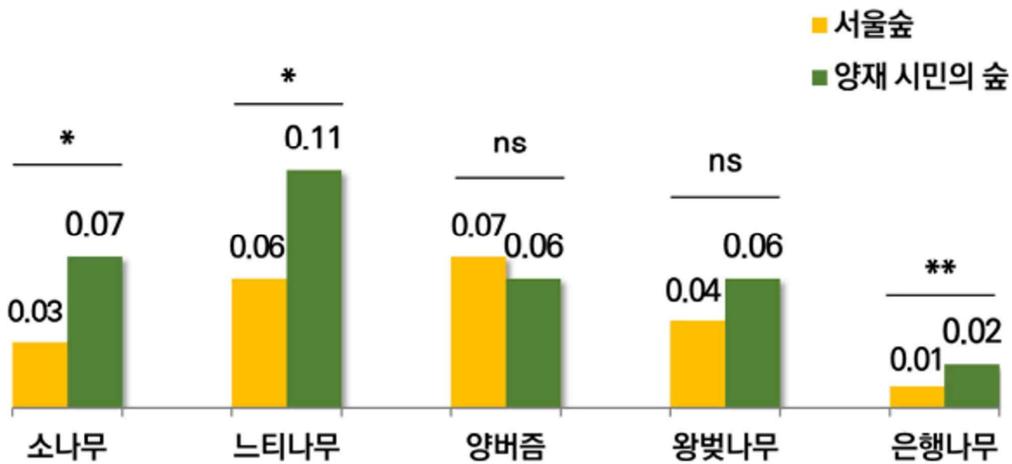
[그림 2-1] 서울시 미세먼지, 초미세먼지 배출원별 비중(출처: 서울연구원, 2018)

겨울철에는 물청소를 실시할 경우 노면이 빙결되어 2차 사고가 발생할 수 있기 때문에 도로 분진청소차량을 적극 활용하며, 일반적인 경우에는 그림 2-2와 같이 물청소, 분진청소, 노면청소 차가 편대 운행하여 도로재비산먼지 배출량을 삭감한다.



[그림 2-2] 물청소, 분진청소, 노면청소 차의 체계적 작업 위치(출처: 서울정책아카이브)

또한 서울시에서는 미세먼지 흡착효과를 고려한 입체적 그린인프라를 조성하여 대기 환경 개선을 위해 노력하고 있다. 잎 단위면적에 따른 미세먼지 흡착량을 도시 가로수 종별로 분석한 결과, 느티나무가 가장 효율적으로 미세먼지를 흡착하는 것으로 나타났다(그림 2-3). 이러한 결과는 엽면적지수를 적용하여 실제 효율로 살펴봐도, 느티나무의 흡착 효율이 가장 높은 것으로 나타났다. 그러나 고농도 미세먼지가 발생하는 겨울과 봄철에는 낙엽활엽수종의 흡착 효과가 상대적으로 낮아질 수 있기 때문에, 추운 계절에도 흡착 효과가 나타날 수 있는 소나무, 스트로브 잣나무 등 상록교목도 생육환경에 따라 적절하게 활용해야 하며, 서울시에서는 공원이나 가로수 배치 등 연결성까지 고려하여 그린인프라를 확충하고 있다.



[그림 2-3] 잎 단위면적에 따른 미세먼지 흡착량(mg/cm², 출처: 서울연구원, 2018)

이외에도 탄소배출을 저감하여 기후변화에 대응하고 미세먼지 및 전구체 배출을 관리하기 위해 서울시에서는 전기차 보급을 꾸준히 추진해 왔다. 2022년 하반기에도 전기차 보급 예산을 추가 확보·보급함으로써 10,278대 추가 보급을 추진한다. 이를 통해 2022년에만 24,400대의 전기차를 보급할 예정이다. 현재 출시된 전기차 중 승용차 73종, 화물차 37종, 승합차 16종에 대해 국고와 시비로 구매보조금을 지원하고 있다(그림 2-4). 차량 가격에 따라 보조금을 차등 지원하며, 전기 승용·화물차의 경우 일부 법인의 독점을 막고 개인의 구매 기회를 확대하기 위해 개인사업자 및 법인 구매 대수를 10회로 제한했다. 전기승합차의 경우, 구매 대수를 3회로 제한했으며, 서울시 산하 기관에서 업무용 차량을 구매하거나 임차할 때 전기·수소차를 의무 도입했다. 이외에도 배출가스 5등급 차량을 폐차한 후 전기차를 구매할 경우, 별도로 70만원을 녹색교통지역 거주자는 100만원을 지원하여 도로이동오염원에서의 배출을 줄이기 위해 노력하고 있다.



[그림 2-4] 서울시 전기차 홍보와 구매보조금 지원 웹페이지(출처: 서울시)

아래 표 2-10 과 같이 차종과 가격 구간별로 보조금이 상이하기 때문에 환경부 저공해차 통합누리집(www.ev.or.kr)에서 확인하여 구매보조금 지급 대상과 금액을 확인할 필요가 있다.

[표 2-10] 민간 보급 전기승용·화물차 구매 보조금(단위: 만원/대, 출처: 서울시 2022)

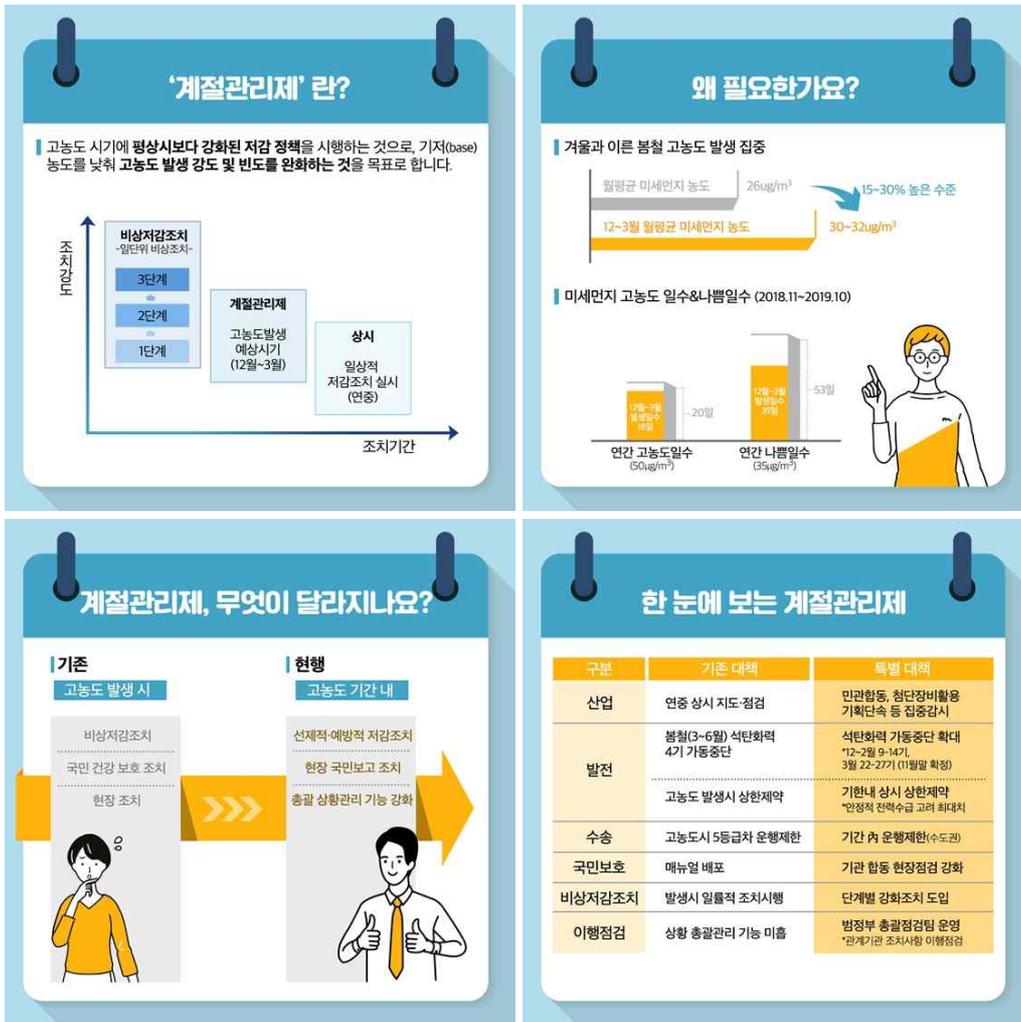
대상차종	계	국비보조금	시비보조금
전기승용차(일반)	최대 900	700	200
전기승용차(초소형)	540	400	140
전기화물차(소형)	최대 2,000	1,400	600
전기화물차(소형특수)	최대 2,628	1,840	788
전기화물차(경형)	1,500	1,000	500
전기화물차(초소형)	900	600	300
전기승합차(중형)	최대 10,000	5,000	5,000

생활오염원 관리를 위해 10년 이상 노후 가정용 보일러 115,000대 교체에 보조금 120억원을 지원한다(그림 2-5). 노후 보일러를 교체하고자 하는 주택의 소유주에는 10만원, 저소득층일 경우에는 60만원을 지원한다. 서울시는 지난 2015년부터 2022년 9월까지 친환경 보일러 약 630,000대를 지원하여 질소산화물 1,258톤, 이산화탄소 120,274톤을 저감하였고 도시가스도 82,784가구가 1년간 사용하는 수준을 절감하여 미세먼지 및 열효율의 개선을 달성하였다.



[그림 2-5] 친환경 보일러 교체 보조금 지원 포스터(출처: 서울시)

최근에는 미세먼지 고농도가 자주 발생하는 12월~3월(4개월)에 기저 농도를 낮추고자 강력한 대기오염물질 감축정책을 추진하는 미세먼지 계절관리제가 시행되고 있다. 이를 통해 미세먼지 고농도 발생 빈도와 강도를 낮추고 시민들의 노출을 줄이고자 노력하고 있다. 구체적으로는 서울시 전 지역에 배출가스 5등급 차량(전국 약 146만대)의 평일 06~21시 운행 제한, 공공기관 차량 2부제 실시, 시영주차장 주차요금 할증 및 인상, 난방에서 에코마일리지 특별포인트 도입, 대형건물 적정 난방 온도 집중관리, 대기오염물질 배출사업장 관리 강화, 노후 건설기계 사용 제한, 도로청소 강화, 다중이용 시설 실내 공기질 점검 등이 추진된다.



[그림 2-6] 미세먼지 계절관리제 환경부 카드뉴스(출처: 환경부)

환경부에서 발표한 ‘제3차 미세먼지 계절관리제’ 시행 결과에 따르면, 2021년 12월~2022년 3월 기간 동안 전년도에 비해 초미세먼지 평균농도는 5% 개선되었고 ‘나쁨’ 일수도 20일에서 18일로 감소했다고 알려졌다. 이는 주로 석탄발전 가동 축소, 5등급차량 운행제한 등 저감 정책 시행으로 인해 나타난 결과로 해석되고, 수송과 생활 부문에서 더 노력해야 한다는 점이 과제로 남았다. 따라서 여전히 차량과 생활배출원이 서울시가 해결해야할 문제로 인식되고 있으며, 다양한 연구와 정책들이 꾸준히 실행되고 있다.

2-2. 경기도

국내 가장 많은 인구가 거주하고, 도내 다양한 종류의 발전과 산업 시설이 위치한 경기도에서도 미세먼지 저감과 대기환경 개선을 위해 다양한 사업들이 추진되어 왔다 (표 2-11). 분야별 4대 중점관리과제를 비롯하여 총 39개 중점 추진과제를 수립하여 추진하고 있다.

[표 2-11] 경기도 대기환경관리 시행계획 중점관리과제 및 추진 내용(출처: 경기도 2022)

중점관리과제	추진 내용
대기 개선 정책 및 국내·외 협력	<ul style="list-style-type: none"> • 대기 주요 정책 및 측정망 운영 • 중앙 및 타 시·도 협력 • 국제 협력
생활분야 대기질 개선	<ul style="list-style-type: none"> • 생활 속 대기질 개선사업 • 실내공기질 관리 강화 • 도민 참여 및 소통 정책
수송분야 대기질 개선	<ul style="list-style-type: none"> • 무공해 자동차 보급 및 인프라 확대 • 운행차 오염물질 배출관리
사업장 관리 강화 및 배출원 농도 저감	<ul style="list-style-type: none"> • 대기오염물질 배출사업장 관리 강화 • 청정에너지 전환 및 대기질 개선사업

경기도에서는 도로이동오염원 관리 부문에서 저공해차 보급 확대를 위해 전기차 및 수소연료전지차와 같은 친환경자동차 보급 확대 뿐만 아니라 충전소 인프라를 확충하고 배출가스 등급제를 실시하여 산업 체질을 바꾸는 노력을 지속적으로 추진하고 있다(그림 2-7). 또한 제작차 배출허용기준을 강화하고, 노후 경유차의 저공해 조치 확대 또는 운행제한 확대 및 퇴출을 적극적으로 추진하고 있다. 어린이 통학 및 택배용 신규 경유차 사용을 제한하고 운행차 검사 관리도 강화하고 있다. 여기에 광역급행철도를 확충하고 공공버스 확대, 광역환승센터 설치 등 교통수요관리를 통해 도로이동오염원에 의한 배출량 저감을 다각도로 진행하고 있다.



전기자동차 충전인프라 확충



노후경유차 단속

[그림 2-7] 경기도 도로이동오염원 관리 정책(출처: 아시아경제, 경인일보)

비도로이동오염원을 관리하기 위해 경기도에서는 노후된 건설·농업기계에서 배출되는 대기오염물질을 저감하기 위해 저공해 조치를 추진하고 정밀검사를 확대하고 있다(그림 2-8). 또한 서해와 맞닿아 있는 항만에서 선박 등에 의한 배출을 저감하기 위해 미세먼지 저감장치를 설치하거나 선박 연료유 황 함유량의 기준을 강화하고, 대형항만 배출규제해역 지정을 추진하는 등 다양한 조치를 취하고 있다. 항만과 관련된 부분은 환경부 뿐만아니라 해양수산부와 긴밀히 공조하여 친환경 항만 인프라 구축을 진행하고 있다.



노후 건설기계 저공해화 사업



저유황 연료유 사용 의무화

[그림 2-8] 경기도 비도로이동오염원 관리 정책(출처: 경기도, 연합뉴스)

배출시설 관리와 관련하여, 배출총량을 기준으로 사전 예방적으로 오염물질별 배출허용총량을 설정하고 배출량을 사업장별로 할당하는 사업장 총량관리제를 강화하였다(그림 2-9). 총량관리제는 질소산화물과 황산화물, 미세먼지를 대상으로하며 질소산화물과 황산화물을 최근 2년 동안 4톤 이상 배출하였거나, 미세먼지 연간 배출량이 0.2

톤 이상인 사업장을 대상으로 실시하고 있다. 또한 사업장 배출기준 및 감시를 강화하고 있으며, 소규모 사업장 방지시설 설치를 지원하고 굴뚝감시체계를 구축하며, 오염물질 배출 측정값 조작 방지 및 데이터 공개를 통해 도민들에게 투명하고 신뢰도 있는 결과값을 제공하고자 노력하고 있다.



사업장 총량관리제 대상 지역

굴뚝감시체계 구축

[그림 2-9] 경기도 배출시설 관리 정책(출처: 환경부)

생활오염원 관리와 관련하여 주유소 유증기 회수설비 설치를 지원하고, 도료 VOCs 함유기준 강화, 수성도료 확대, 사업장 저NOx 버너 설치 지원, 도심 난방시설 관리 및 지원 강화, 소규모 배출원 관리 강화, 축산·경종 분야 암모니아 관리 강화 등이 추진되고 있다(그림 2-10). 또한 소규모 배출원 관리 강화로 인해 유기용제나 연소 오염물질의 직접 배출 사업장 관리 강화를 시행하고 있다. 이외에도 생활 주변 미세먼지 관리 강화를 위해 건설현장 비산먼지 배출 저감, 영농폐기물·부산물 불법소각 방지, 도로 먼지 제거장비 보급 확대 등 다양한 정책들이 추진되고 있다. 도시 내 ECO-인프라 확충을 위해서는 미기후 개선을 위한 도시숲 조성 및 건축물 내·외부 녹화사업 추진, 집단 에너지 보급, 에너지 자립마을 조성 사업들을 추진하고 있다. 민감·취약계층 보호를 통한 도민건강 보호를 위해 계절관리제를 시행하고 미세먼지 집중관리구역, 맑은 숨터 조성사업을 수행하고 있다.



주유소 유증기 회수설비



저NOx 버너 설치

[그림 2-10] 경기도 생활오염원 관리 정책(출처: 에너지 데일리, 한국가스신문)

마지막으로 도민 소통과 참여 확대를 통해 앞서 기술한 정책들이 자발적으로 수행될 수 있도록 홍보와 협력을 강화하고 있다(그림 2-11). 이를 위해 민-관 협력 체계 구축 및 경기도민 청정대기 국제포럼 등을 추진하고 있다. 또한 경기도 대기측정망을 확충하고 정보시스템을 고도화하며, 대기오염 종합정보를 실시간으로 공개하고 있다. 국제협력 강화를 위해 유엔환경계획(UNEP)와 대기질 개선 공동평가를 추진해 국제적 모범 사례로 홍보되고 있으며, 중국과의 공동협력과 공동대응을 위해 국제행사 등을 개최하고 민간 홍보와 체험교육센터 등을 운영하고 있다.



경기도 대기환경정보 서비스



경기도-중국 국제협력

[그림 2-11] 경기도 도민 소통·참여 확대 정책(출처: 경기도, 인천일보)

2-3. 충청남도

화력발전소와 산업공단 시설이 밀집하여 산업배출량이 상대적으로 많은 충청남도에서도 대기환경 개선과 주민건강 보호를 위해 5개 부문 10대 전략 제시를 통해 다양한 사업이 추진되고 있다(표 2-12). 충청남도는 대전, 세종, 충북, 전북과 함께 중부권으로 분류되었고, 관련 법률에 따라 금강유역환경청에서 수립된 중부권 대기환경관리 기본계획을 따른다.

[표 2-12] 충청남도 시행계획 중 미세먼지 저감대책 목표(출처: 충청남도 2020)

부문	전략
배출시설	<ul style="list-style-type: none"> 발전소·사업장 대기오염물질 총량 관리 시행 석탄화력발전소 배출 저감 사업장 관리체계 개선
도로이동오염원	<ul style="list-style-type: none"> 저공해차 전환 및 보급 확대 중대형 승합·화물차 배출 저감 교통 수요 관리 강화
비도로이동오염원	<ul style="list-style-type: none"> 건설·농업기계 관리 강화 항만·선박 및 공항 관리 강화
생활오염원	<ul style="list-style-type: none"> 도심 미세먼지 발생원 저감 농업·농촌 미세먼지 관리 강화
정책기반 강화 및 국민소통·참여 확대	

중부권 대기환경 개선 목표와 충청남도에서 자체적으로 설정한 기준을 합쳐 최종적으로 2024년 목표를 PM₁₀ 34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO₂ 0.014 ppm, O₃ 0.06 ppm로 설정하였고 이를 달성하기 위해 다양한 기술개발과 사업을 통해 노력하고 있다.

배출시설에 대한 대기환경 개선사업은 주로 발전소, 제철·제강, 시멘트를 포함한 대형 배출시설에 대한 관리 강화 및 조기폐쇄, 가동 상한 제약 및 중지, 또는 총량관리제(cap & trade) 수행 등으로 구성되어 있다(그림 2-12). 또한 사업장 배출허용기준 강화 및 TMS 대상시설 증대와 부착 의무화 등 배출량 저감을 위해 다양한 사업들이 진행되고 있다. 특히 노후 석탄화력발전소의 폐쇄 여부는 국가적 관심사로서 대기오염 뿐만 아니라 에너지 및 전력 수급, 일자리 및 지역 경제와 맞물려 있는 복합적인 문제로 대두되고 있다. 충청남도에서는 노후 발전소 폐쇄에서 그치지 않고 폐쇄로 인해 발생하는 다양한 사회경제적 문제까지 해결해야 할 필요성이 존재한다.



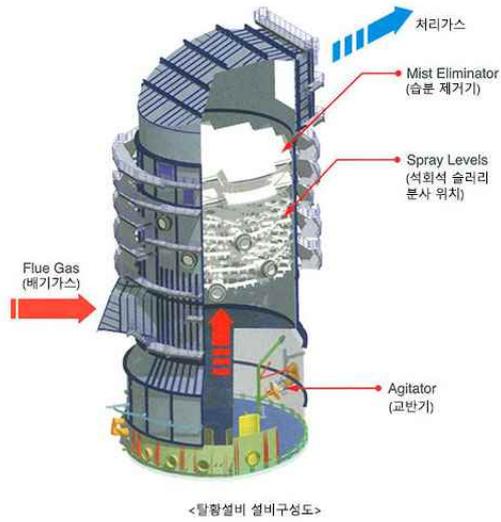
신보령화력발전소



보령 화력발전소 폐쇄 기사



화력발전소 가동중단



방지시설(탈황설비) 설치

[그림 2-12] 충청남도 배출시설 관리 정책(출처: 이론경제, SBS)

도로이동오염원의 배출량 저감과 관련하여, 전기차와 수소차 등 저공해차량으로의 전환을 유도하고 기존 노후 경유차의 조기 폐차 및 DPF 부착 등 저공해 조치 지원을 추진하고 있다(그림 2-13). 구체적으로는 운송 및 물류를 위한 중대형 화물차량의 도내 활동이 많기 때문에 친환경 모빌리티로의 전환을 위해서 충전소를 확보하고 친환경 자동차의 보급을 확대하며, 차량운행 제한구역(LEZ) 등을 시행하고 있다. 또한 대도시권 노선버스 수소버스 등 무공해버스로 교체, 광역급행버스 및 간선급행버스체계 확대, 도로 살수 시스템 구축, 타이어 마모등급제 시행 등 다양한 방안들을 실행하고 있다.

노후경유차 조기폐차 지원사업



지원대상 | 배출가스 5등급 경유자동차 및 2005년 이전 배출허용 기준을 적용하여 제작된 도로용 3종 건설기계

신청기간 | 2021. 3. 8.(월) ~ 3. 12.(금)

3. 8.(월)	3. 9.(화)	3. 10.(수)	3. 11.(목)	3. 12.(금)
대산,성연,지곡	인지,부석,부춘	활명,동면1,동면2	석남,수석,음암	해미,고백,운산

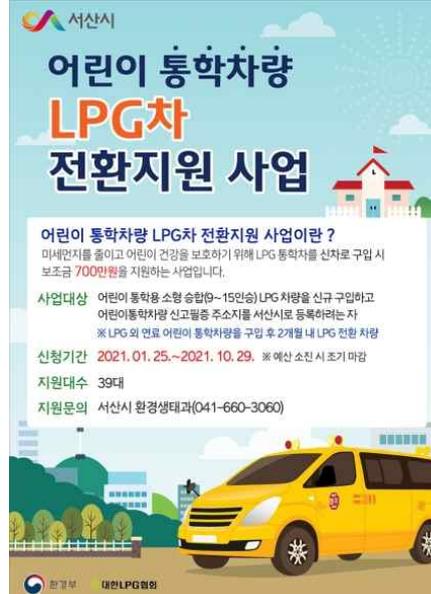
신청방법 | 자동차등록증, 정기검사 결과표, 신분증, 소유주 명의 통장 사본

신청방법 | 현지 방문접수(서산종합운동장) 및 우편접수

문의처 | 서산시 환경생태과 (☎ 660-3370) **NEWS1**

노후경유차 조기폐차 지원사업

어린이 통학차량 LPG차 전환지원 사업



어린이 통학차량 LPG차 전환지원 사업이란 ?
미세먼지를 줄이고 어린이 건강을 보호하기 위해 LPG 통학차를 신차로 구입 시 보조금 700만원을 지원하는 사업입니다.

사업대상 | 어린이 통학용 소형 승합차(15인승) LPG 차량을 신규 구입하고 어린이통학차량 신고필증 주소지를 서산시로 등록하려는 자
※ LPG 외 연료 어린이 통학차량을 구입 후 2개월 내 LPG 전환 차량

신청기간 | 2021. 01. 25. ~ 2021. 10. 29. ※ 예산 소진 시 조기 마감

지원대수 | 39대

지원문의 | 서산시 환경생태과(041-660-3060)

환경부 | 대한LPG협회

어린이 통학차량 LPG차 전환지원 사업

[그림 2-13] 충청남도 도로이동오염원 관리 정책(출처: 뉴스1, 굿뉴스)

충청남도에서는 건설현장과 농업활동에서 노후된 기계의 대기오염물질 배출과 대규모 항만 주변에서의 선박 배출 및 공항 내 항공 장비 등 비도로이동오염원 배출 중 큰 비중을 차지하기 때문에, 이에 대한 각별한 관리를 추진하고 있다(그림 2-14). 노후 건설기계는 DPF를 부착하거나 엔진을 교체하여 에너지 효율 증가와 대기오염물질 배출 감소를 추진하고 있으며, 노후 농기계는 조기 폐차 사업을 시행하고 있다. 또한 항만에서도 선박 육상전원 공급시설(AMP)을 확충하여 정박 중 발전기 가동률을 줄이고, 선박 배출허용기준 강화 및 항만 하역장비 배출가스 기준을 신설하여 관리감독이 가능한 체계를 구축하고 있다. 특히 AMP는 육상 발전소에서 생산한 전력을 항만에서 수송선에 직접 공급하여 하역 작업에 필요한 동력을 안정적으로 확보할 수 있도록 하는 시스템으로써, AMP를 활용하면 병커C유를 사용하여 선박 엔진의 가동을 유지할 때보다 대기오염물질 배출량을 약 96%까지 줄일 수 있다고 알려져 있다.



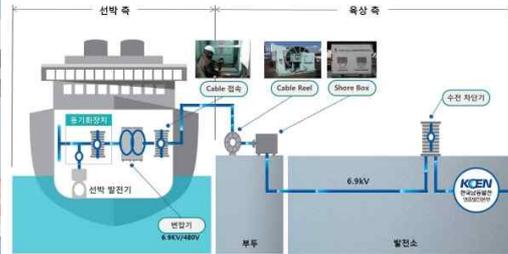
노후 지게차 저공해 엔진교체



선박 대기오염물질 배출 관리



충청남도 육상전력공급설비 설치공사 준공



육상전력공급설비

[그림 2-14] 충청남도 비도로이동오염원 관리 정책(출처: 충청뉴스, 현대해양, 엠뉴스, 에너지 신문)

충청남도에서의 생활오염원 관리는 농어촌 미세먼지 관리 강화, 도심지역 미세먼지 발생 저감으로 나누어 추진하고 있다(그림 2-15). 특히 농어촌 지역에서는 나대지 정비 사업이나 노천소각 방지 및 지도점검, 축산시설의 악취저감시설 지원이 대표적이다. 도심지에서는 생활 주변 배출원 관리 강화를 위해 배출기준 및 관리 강화, 청소차량 보급 확대, 비산먼지 발생사업장 관리 대상 확대, 도심 악취시설에 대한 방지시설 설치 의무화, 4-5종 사업장 배출저감시설 설치 지원 등이 추진되고 있다.



노천소각 실태



소규모 사업장 방지시설 설치

[그림 2-15] 충청남도 생활오염원 관리 정책(출처: 환경일보, 충청뉴스)

마지막으로, 정책기반 강화 및 국민소통·참여 확대 부문으로써, 환경교육 활성화, 국가 주도 R&D 사업 유치 및 활용, 대기환경 전문학술대회 유치, 미세먼지 연구추진단 운영, 지역 민간감시단 역량 강화 등을 추진하고 있다(그림 2-16). 도내 실행 주체들의 적극적인 참여를 유도하여 앞서 언급한 정책들의 효율성을 극대화하기 위해 노력하고 있다.



찾아가는 환경교육 서비스



환경지킴이 출범

[그림 2-16] 충청남도 도민 소통·참여 확대 정책(출처: 금강일보, 당진신문)

03 지역별 초미세먼지 특성 분석

- 1.
2. 경기-충남-
특성

분석

1. 지역별 주요 오염물질 변화 추이

대기오염물질은 한번 배출되면 그 지역뿐만 아니라 기류를 타고 인근 도시와 국가에까지 영향을 미쳐 어느 한 지역만의 문제가 아니다. 대기환경 문제에서 효과 분석에 사용되는 것은 크게 배출량 자료와 농도자료이다. 배출량 자료는 1999년부터 환경부에서 산정하여 게시하고 있는 대기정책지원시스템(clean air policy support system, CAPSS)을 활용하고 있고, 농도자료는 대기환경측정망에서 측정된 자료를 에어코리아에 송신하여 전국의 모든 자료를 제공하고 있다. 배출량 자료는 산정방법론이나 배출계수, 활동도 자료에 따라 상이한 값을 나타낼 수 있지만 측정자료는 장비의 정도관리만 잘 이루어진다면 그 지역에 대한 정확한 정보를 제공받을 수 있어 신뢰할 수 있는 자료로 알려져 있다. 2022년 8월 기준 전국에는 909개소의 측정망이 설치되어 운영되고 있으며, 지역별로는 서울 55개소(국가 10, 지자체 45), 경기도 152개소(국가 24, 지자체 128), 충청남도 72개소(국가 25, 지자체 47)가 설치되어 있다(표 3-1). 본 장에서는 서울과 경기, 충남에 설치되어 운영되고 있는 도시대기측정망 자료를 대상으로 오염물질별 장기적인 농도변화를 검토하고자 한다.

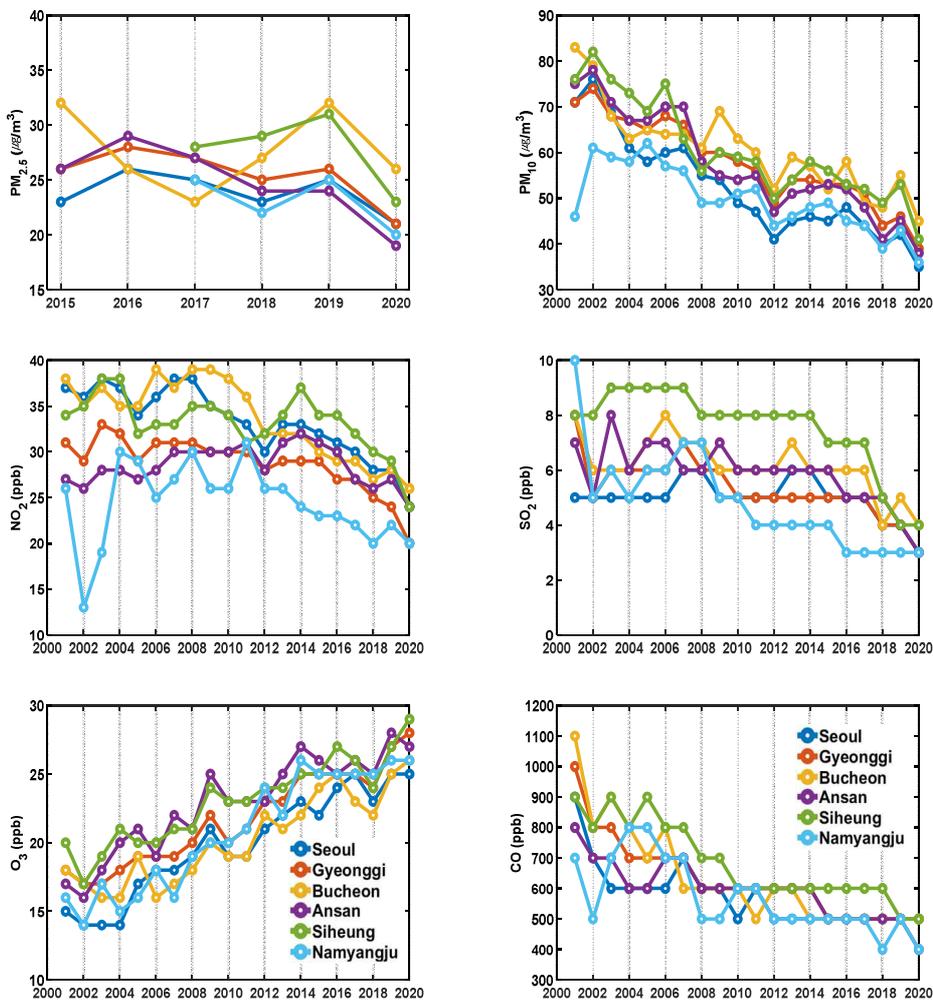
[표 3-1] 서울, 경기, 충남지역 대기측정망 운영 현황(2022년 8월 기준)

구분	서울	경기	충청남도	총계
국가	10	24	25	59
지자체	45	128	47	220
도시대기	25	110	39	174
도로변대기	15	11	3	29
유해대기	3	5	6	14
대기중금속	5	7	5	17
산성강하물	2	4	4	10
PM _{2.5} 성분	3	4	4	11
대기환경연구소	1	1	1	3

1-1. 수도권과 경기권

그림 3-1은 서울을 중심으로 인근 주요 도시의 환경기준물질에 대한 농도변화를 나타낸 것이다. 서울을 중심으로 경기도 전체 평균농도와 경기도 내 주요 배출원(산업단지)으로 손 꼽히는 부천, 안산, 시흥을 고농도지역으로 선정하였고, 대조군으로 남양주를 추가하였다. PM₁₀을 포함하여 NO₂, SO₂, O₃, CO는 2001년부터 2020년까지 20년의 변화추이를 검토하였고, PM_{2.5}의 경우 2015년부터 데이터가 생산된 점을 감안하여 2015년부터 2020년까지 5년간의 자료를 나타냈다. PM_{2.5}가 처음 측정된 2015년 6개 지역의 농도는 26.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으나 2020년 농도는 21.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 19.0% 개선된 것으로 나타났다. 지역별로는 안산이 26.9%로 가장 높은 개선효과를 보였고, 남양주 20.0%, 경기도 19.2%로 나타났다. 2001년 PM₁₀의 경우 부천의 농도가 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 나타났고, 시흥 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 안산 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 서울과 경기가 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높은 농도를 보인 반면 남양주는 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮은 농도를 보였다. 이후 약 20년간의 개선노력으로 2020년의 6개 지역 평균농도는 39.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 44.5%의 감축을 일궈냈다. 지역별로는 서울이 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2001년 대비 50.7%로 가장 많은 감축율을 보였고, 안산이 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (49.3%), 부천 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (45.8%), 경기 39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (45.1%)로 대부분 40% 이상의 감축율을 보였다. 다만 2001년 상대적으로 낮은 농도를 보였던 남양주는 2020년 36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮은 21.7%의 저감율을 나타냈다. 화석연료가 주요 배출원인 SO₂는 석유 및 석탄의 황 함유량 강화정책에 힘 입어 전반적으로 낮은 수준의 농도를 나타냈다. 2001년 남양주에서 10 ppb로 첨두 농도를 보였고, 서울이 5 ppb로 가장 낮은 농도를 보였다. 이는 서울시의 경우 수도권 대기환경특별법 등에 따라 석탄 등의 고체연료 사용이 금지되고, 배출시설들이 경기권으로 밀려남에 따라 특별한 배출원이 없어져 낮은 농도를 나타낸 반면, 남양주를 비롯해 경기권에 있는 도시들은 산업시설과 이들은 운행하는 경유차량 등에서 배출된 오염물질의 영향으로 높은 농도를 보인 것으로 판단된다. 하지만 2020년에는 6개 지점 모두에서 3~4 ppb의 낮은 농도를 보였는데, 이는 지속적으로 추진된 연료의 황 함유량 강화정책으로 도심지역의 주요 SO₂ 배출원인 디젤차량의 연료 중 황 함유량 감소에 따른 효과로 판단된다. NO₂와 O₃은 선진국형 오염물질로 알려져 있는 주요 물질이다. NO₂는 연소과정에서 열적 반응과 연료 내 질소의 산화반응에 의해 생성된 Thermal NO_x와 Fuel NO_x가 혼재되어 있는 상태이고, O₃의 경우 NO_x와 VOCs의 광화학반응에 의해 생성되는 주요 2차 생성 오염물질이다. 2001년 NO₂는 부천에서 38 ppb로 가장 높은 농도를 보였고, 서울 37 ppb, 시흥 34 ppb, 경기 31 ppb이고, 남양주가 가장 낮은 26 ppb로 나타났다. 2020년 측정결과 역시 부천이 26 ppb로 가장 높은 농도를 보였으며, 서울과 안산, 시흥이 24 ppb, 경기도와 남양주가 20 ppb로 나타났다. 서울과 경기도가 평균 35% 수준의 감축율을 보였고, 안산이 11.1%로 가장 낮은 감축율을 나타냈다. O₃을 제외한 5개 물질이 모두 감축율의 차이는 있지만, 절대적인 농도가 감소되고 있는 가운데 O₃은 반대로 급격한 증가추세에 있다. 2001년 전반적으로 15~20 ppb 수준을

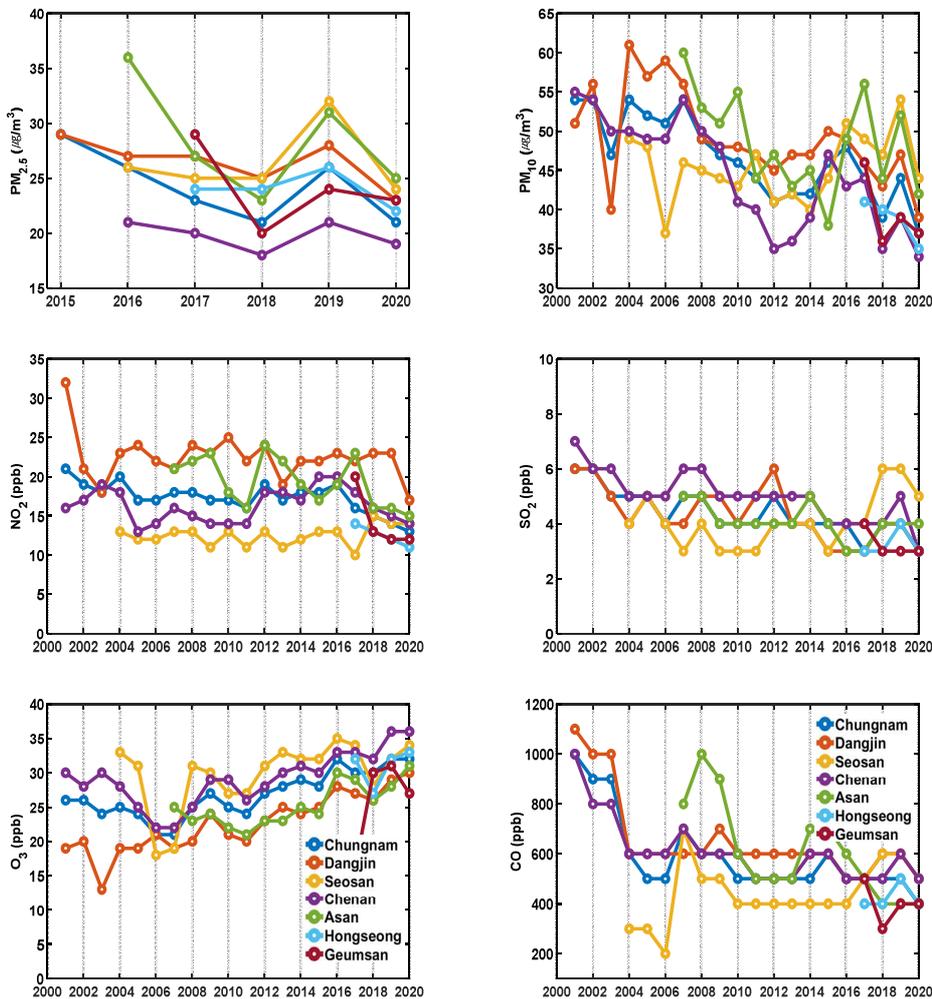
보이던 O_3 농도는 2020년 26~29 ppb로 약 44.4~66.7%까지 증가한 것으로 나타났다. 지역별로는 서울이 15 ppb에서 25 ppb로 66.7%의 가장 큰 증가율을 보였고, 남양주가 16 ppb에서 26 ppb로 62.5%의 증가율을 보였다. 그 외 안산 58.8%, 경기도 55.6% 증가하였다. 전국적으로 퍼져있는 대기측정소에 대해 O_3 항목은 목표 달성율이 2021년 기준 8시간 평균이 0.0~0.7%로 매우 저조하며, 1시간 평균 또한 12.0~40.8%로 매우 낮은 수준이다. 하지만 아직까지 이에 대한 구체적인 개선대책이 수립되지 못하고 있다.



[그림 3-1] 수도권과 경기권 주요 지역의 대기오염 변화 추이

1-2. 충청권

충청권의 중장기적인 대기질 변화추이를 검토하기 위해 6개 지역의 측정소와 충청남도 평균자료를 대상으로 선정하였다. 충청남도는 2016년 이전까지 도로변 측정소 포함 단 6개소의 측정망이 운영되고 있어 많은 측정망이 비교적 최근에 설립된 것이다. 당진은 2004년부터, 아산은 2007년, 홍성과 금산은 2017년부터 자료를 추가로 하였고, 천안과 서산은 2001년부터 자료를 대상으로 하였다. 당진과 서산, 천안, 아산은 충남 서북부지역 고농도 지역으로 선정되었고, 금산은 배출량이 없는 대조군으로 추가하였다. 충청남도는 현재 천안 성황동 측정소와 서산 동문동 측정소가 추이 측정소로 지정되어 운영되고 있다. PM_{2.5}가 처음 측정된 2015년엔 천안에서만 측정값이 존재하며 지역 평균 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 이때 서울이 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 경기가 26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 임을 감안했을 때 천안의 PM_{2.5} 농도는 높은 수준으로 판단된다.



[그림 3-2] 충청권 주요지역의 대기오염 변화 추이

홍성과 금산을 제외한 지역의 2016년도 평균 농도는 $27.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2020년 $22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 17.5%가 감소한 것으로 나타났다. 지역별로는 서산이 19 로 가장 낮은 농도를 보였고, 충남 전체 평균이 $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 홍성 $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 천안과 금산 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었다. 당진과 서산은 각각 제철소와 석유화학단지가 있어 대기오염물질 다 배출지역이고, 천안과 아산은 충청남도 내 거대도시로 이동오염원에 의한 영향이 큰 걸로 알려져 있다. 금산의 경우 이렇다할 배출원이 존재하지 않아 2020년부터 시행되고 있는 대기관리권역에서 충청남도 내 유일하게 관리 권역에서 제외된 지역이다. 하지만 $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 다 배출시설인 서산이 가장 낮게 나타났고, 금산은 충청남도 평균 농도보다 높게 나타났다. PM_{10} 의 경우 2001년 평균농도가 $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 이때 서울과 경기가 $71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수도권 대비 낮은 수준을 유지하고 있었다. 이후 지속적인 감축의 노력이 효과를 발휘하여 2020년 충청남도의 평균농도는 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 20년간 31.5%의 감축율을 보였다. 가장 큰 감축율을 보인곳은 서산으로 2001년 $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2020년 $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 38.2%의 감축율을 보였다. 그 뒤를 이어서는 아산 30.0%, 천안 23.5% 순으로 나타났다. SO_2 는 2001년 서산과 천안에서 각각 7 ppb, 6 ppb로 나타나 서울, 경기권과 유사한 수준을 보였다. 이후 지속적인 감축을 거쳐 2020년에는 평균 3 ppb로 50%의 감축율을 보였다. CO는 불완전연소의 지표물질로 산업 시설이나 에너지 생산, 자동차 배기가스에서 주로 배출된다. 2001년 충청남도 평균 농도는 1,000 ppb로 경기도와 같은 수준이었으나 꾸준히 감축하여 2020년에는 400 ppb로 60% 감축한 것으로 나타났다. 2001년 충청남도의 NO_2 농도는 21 ppb로 서울 37 ppb, 경기 31 ppb보다 낮은 수준이었다. 이후 꾸준히 감소하여 2020년에는 13 ppb로 서울 24 ppb, 경기 20 ppb보다 54~65% 수준인 것으로 나타났다. 지역적으로는 홍성이 11 ppb 로 가장 낮은 농도를 보였고, 금산 12 ppb, 당진과 서산 14 ppb, 천안이 17 ppb로 가장 높았다. O_3 은 충청남도 역시 서울, 경기와 마찬가지로 꾸준한 증차 경향을 보이고 있다. 2000년 26 ppb로 서울 15 ppb, 경기 18 ppb보다 높은 수준에서 2020년 역시 32 ppb 로 서울, 경기의 25, 28 ppb보다 높게 나타났다. 가장 높은 증가율은 보인 곳은 천안으로 57.9%의 증가를 보였고, 아산 24.0%, 서산 20.0% 등으로 나타났다. O_3 은 NO_x 를 전구물질로 강한 햇빛과 VOCs의 반응으로 생성된다. VOCs가 존재하지 않을 경우 NO와 NO_2 로 변화되면서 해리된 O·와 반응하여 일정량의 O_3 이 유지되나 VOCs 존재시 이 반응을 늦추게 하여 O_3 을 축적시키는 역할을 하게 된다. 일반적으로 VOCs는 석유정제공정이나 자동차 배기가스, 유기용제 사용, 도장 및 세탁시설 등 다양한 생활 및 생산활동에서 배출되는 것으로 보고되고 있는데 이러한 인위적 배출원보다 자연적으로 배출되는 NVOCs가 10배 이상 많은 것으로 알려져 있다. 충청남도는 태안, 보령, 서천, 당진, 서산 등 바다가를 왼쪽에 끼고 있어 여기서 배출되는 NVOCs가 풍부하고, 당진과 서산에 위치하고 있는 대형배출 시설에서 NO_x 가 충분히 공급되는 가운데 강한 햇빛이 조사되면 O_3 이 생성되기 적합한 환경이 조성된다. 선행 연구에서도 도심지역보다 산업단지 인근 지역에 위치한 바닷가에서 O_3 의 발생량이 더 많은 것으로 보고된바 있다.

2. 수도권-경기권- 대기환경연구소

2-1 측정소 위치

그림 3-3은 수도권과 경기권, 충청권 측정소의 위치를 나타낸 것이다. 수도권 측정소는 서울시 은평구 불광동에 위치하고 있으며, 주거와 상가지역이 혼재되어 있다. 측정소 바로 앞에는 왕복 6차선의 교차로가 있고, 가운데로 버스중앙차선이 운행 중에 있다. 뒤로는 북한산이 위치하고 있다. 경기권 측정소는 경기도 안산시 단원구 고잔동에 위치해 있다. 안산은 경기도의 주요 산업도시로 전국 배출량 1위의 경기도 내에서도 VOCs 배출량 2위의 도시이다. 측정소 왼쪽으로 약 10~15 km 이격되어 바다가 위치해 있으며, 시화와 반월 산업단지와 인접해 있다. 마지막으로 충청권 대기환경연구소는 서산시 수석동에 위치해 있으며, 논밭 가운데 위치해 있어 평상시 비산먼지나 생물성 연소에 의한 성분들이 주요 물질로 나타나고 있다. 본 연구에서는 수도권은 도심지, 경기권은 산업단지, 충청권은 교외지역으로 분류하여 자료를 분석하였다.



[그림 3-3] 3개 권역 대기환경연구소 위치

2-2 지역별 기상조건

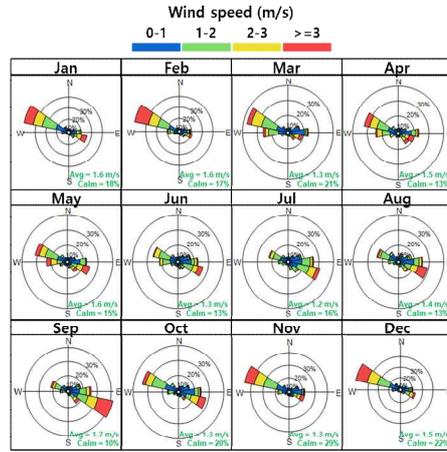
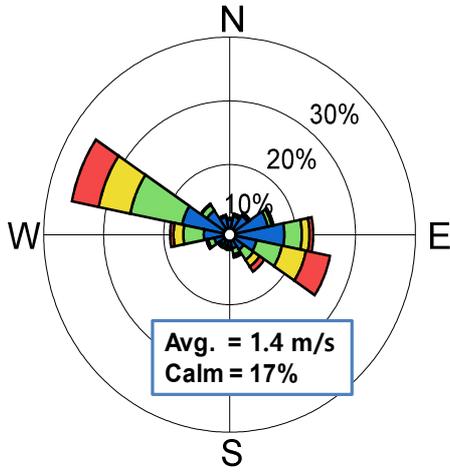
기상은 대기 중에 배출된 오염물질을 희석·확산시켜 대기질을 유지해주는 환경정화 작용 중 가장 효율적인 요소이다. 하지만 전 지구적으로 나타나고 있는 기후변화에 따라 국내 환경정화 능력이 감소하고 있는 것으로 나타나고 있다. 전국에서 측정된 기상정보를 기반으로 2001년부터 2020년까지 20년을 기반으로 지상관측소(ASOS)의 자료 분석 결과 습도는 3% 상승하였고, 평균 풍속은 0.2 m/s 감소하였다. 강수량의 경우 과거 10년대비 최근 10년간 평균 강수량이 75 mm 적게 내린 것으로 확인되었다. 높은 습도는 대기 중에 부유하는 가스상 오염물질의 응축성을 높게 만들며, 응결핵으로 작용하여 2차 생성이나 응축성 미세먼지를 생성하는 요인으로 작용할 수 있다. 물론 반대로 입자를 키워 rain out 효과를 야기시켜 감소시킬 수도 있다. 이외 줄어든 풍속은 미비하긴 하지만 대기 중 대기오염물질의 희석확산력을 감소시키며, 강수량 감소는 wash out 효과를 감소시킨다.

서울과 경기, 충청권에서 조사된 풍향·풍속 정보를 그림 3-4에 나타냈다. 기본적으로 각 측정소에서 기상장비를 활용하여 데이터를 확보하긴 하지만 지역 환경문제(빌딩 세류나 차단효과)로 일부 지역의 데이터를 활용할 수 없는 곳이 있어 측정소로부터 가장 가까운 방재기상센터의 자료를 활용하였다. 2021년 기준 서울의 경우 북서풍이 주풍향인 가운데 남동풍이 같이 나타났다. 평균 풍속은 1.4 m/s, 정온상태가 17%로 확인되었다. 월별로 1, 2월 북서풍이 주풍으로 나타나다가 3월에 접어들면서 북서풍 외 서풍과 남동풍이 나타나기 시작하고, 점차 남동풍의 비율이 커지면서 9월엔 남동풍이 최대 빈도를 보인다. 이후 10월부터 다시 북서풍의 비율이 커진다. 이는 국내 전형적인 풍향이다. 겨울철은 북극으로부터 유입되는 시베리아 기단의 영향으로 북서풍이 주풍으로 불다가 여름철에는 오호츠크나 북태평양 기단의 영향으로 바뀌면서 동남풍이 주풍으로 된다. 과거에는 봄, 가을철에 고온 건조한 양쯔강 기단의 영향도 받는 것으로 알려져 있으나 최근 기후변화 등의 영향으로 봄, 가을이 상대적으로 짧아지고, 여름과 겨울철이 길어지면서 나타난 현상으로 해석된다.

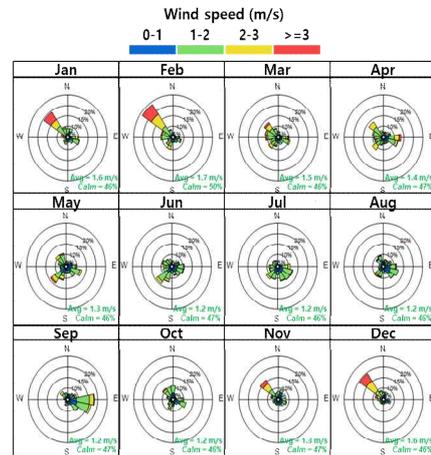
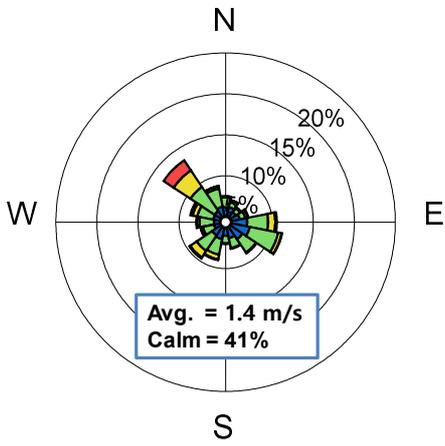
경기권의 경우 연평균 풍속이 수도권과 동일한 1.4 m/s로 나타났으나 정온이 41%로 매우 높게 나타났다. 겨울철에 해당하는 1,2월과 11,12월의 경우 북서풍이 주풍으로 나타났으나 그 외 기간에는 주풍이라고 확인할 수 있는 뚜렷한 방향성이 나타나지 않았고 혼재되어 나타났다. 이는 현재 경기권 측정소의 경우 안산시청과 수도권대기환경청 등 공공 및 상업빌딩이 밀집되어 있는 지역 안에 위치하고 있는데 주변에 유사하거나 약간씩 높은 건물들이 자리잡으면서 병풍 효과를 가져와 지역 내 풍속을 약화시키는 효

과를 가져온 것으로 풀이된다.

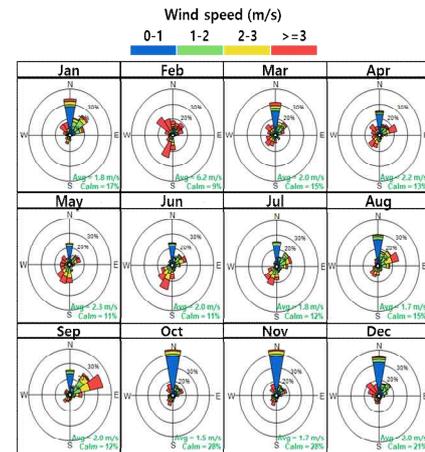
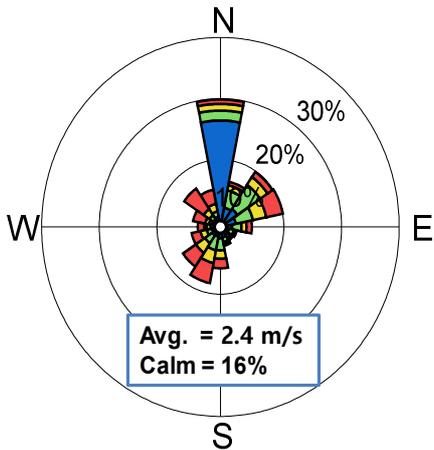
충청권의 경우 세 지점 중 평균 풍속이 2.4 m/s로 가장 컸으며, 정온 비율은 16%로 나타났다. 풍속이 가장 세게 나타난 이유는 충청권의 경우 주변이 논밭으로 높은 건물이 없고 개활지이기 때문에 마찰력이 가장 적고, 바다로부터 유입되는 해풍이 별다른 에너지 손실없이 측정소까지 도달하기 때문인 것으로 판단된다. 또 한가지 특이한 점은 월별 풍속의 차이가 크게 나타나며, 정온의 비율도 크게 나타났다. 정온의 비율이 가장 적게 나타난 2월의 경우 평균 풍속이 6.2 m/s로 나타났는데 이는 2021년 2월에 발생한 태풍 DUJUAN의 영향인 것으로 판단된다.



(a) 수도권



(b) 경기권



(c) 충청권

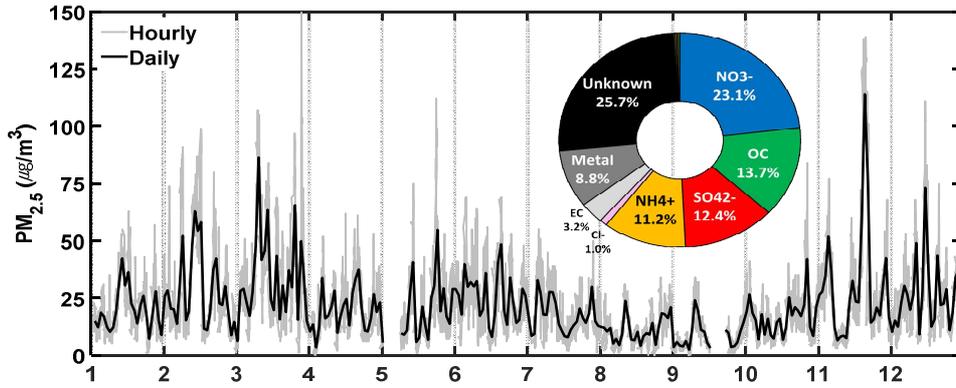
[그림 3-4] 3개 측정소 주변지역의 기상 정보

3. PM_{2.5} 분석

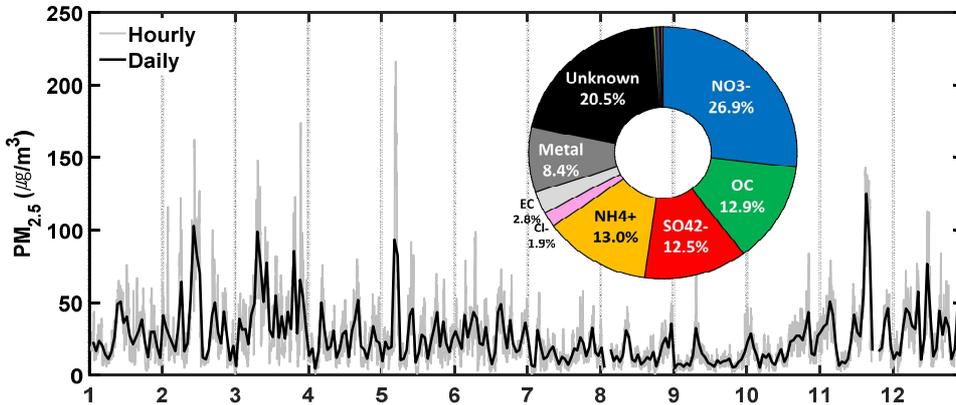
3-1 수도권-경기권-충청권의 PM_{2.5} 특징

그림 3-5는 2021년을 기준으로 수도권과 경기권, 충청권 대기환경연구소에서 측정된 지역별 PM_{2.5}의 연간 변화와 화학적 조성을 나타낸 것이다. 연평균 농도는 경기권 측정소가 $26.4 \pm 22.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 충청권 $23.4 \pm 22.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 수도권 $21.8 \pm 17.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 월별로는 3개 측정소 모두 3월이 가장 높은 농도를 보였고, 9월이 가장 낮게 나타났다. 3월은 겨울철 얼었던 중국 내륙과 몽골 고비사막의 지반이 녹으면서 계절적으로 발생하는 기단을 타고 국내로 흠먼지를 끌고 오는 황사가 발생하면서 월 평균을 높게 만들어 나타난 현상이며, 9월은 여름철 강우량 집중에 따른 오염물질의 세정효과가 크고, 초가을 혼합고가 높아지면서 환경용량의 증대로 희석화산효과가 극대화되면서 가장 낮은 농도를 보이는 것으로 판단된다. 이후 10월부터 겨울과 익년 겨울철까지 농도가 증가하였다. 최근 겨울철 계절관리제가 기존의 11월에서 10월로 조기 추진되고 있는데 본 데이터가 이러한 계절관리제 조기 시행의 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

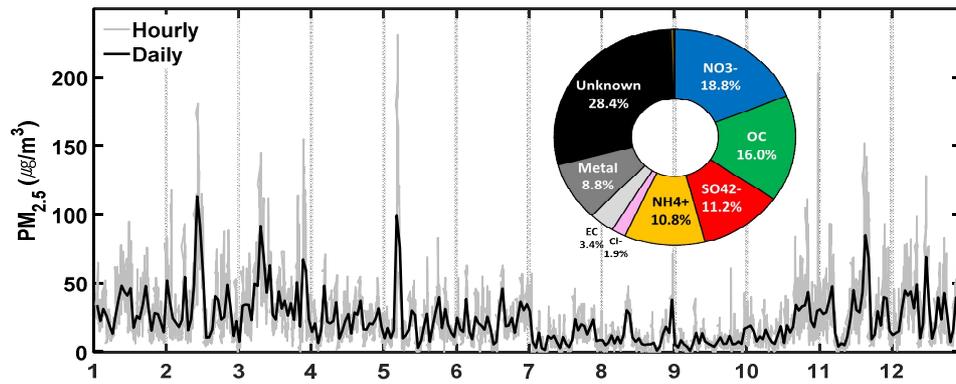
지역별 화학조성을 보면 수도권의 경우 질산염이 23.1%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 황산염 12.4%, 유기탄소 13.7%, 암모늄 11.2%, 금속성분 8.8%순으로 나타났다. 경기권 역시 질산염이 26.9%로 가장 높은 비율을 보였고, 그 뒤를 이어 암모늄이 13.0%, 유기탄소 12.9%, 황산염 12.5%, 금속성분 8.4% 순이었다. 마지막으로 충청권의 경우 질산염이 18.8%로 가장 높았고, 그 뒤를 이어 유기탄소 16.0%, 황산염 11.2%, 암모늄 10.8%, 금속성분 8.8%였다. 3곳 모두 질산염이 가장 높은 비율을 차지하였고, 수도권은 황산염이 경기권은 암모늄, 충청권은 유기탄소가 그 뒤를 이어 나타나 서로 상이한 조성을 가지는 것으로 나타났다. 일반적으로 2차 생성에 기여하는 질산염과 황산염이 가장 높은 비율을 보이고, 그 뒤를 암모늄과 유기탄소가 지역적 특징에 따라 비율이 다르게 나타난다. 충청권의 경우 측정소 위치가 논밭 한 가운데 위치해 있다 보니 평상시에도 주변에서 벌어지는 노천소각이나 생물성 연소에 의한 영향이 큰 것으로 보고되고 있는데, 벼짚이나 나뭇가지, 화목난로 등에서 연소시 주로 검출되는 levoglucosan은 식물의 세포벽 성분이 열분해 되면서 나타나는 생물성 연소의 지표물질로 알려져 있으며, PM 성분 분석시 주로 유기탄소로 검출된다. 전반적으로 황산염과 무기탄소, 금속성분의 비율은 세 곳 모두 유사하게 나타났다.



(a) 수도권



(b) 경기권



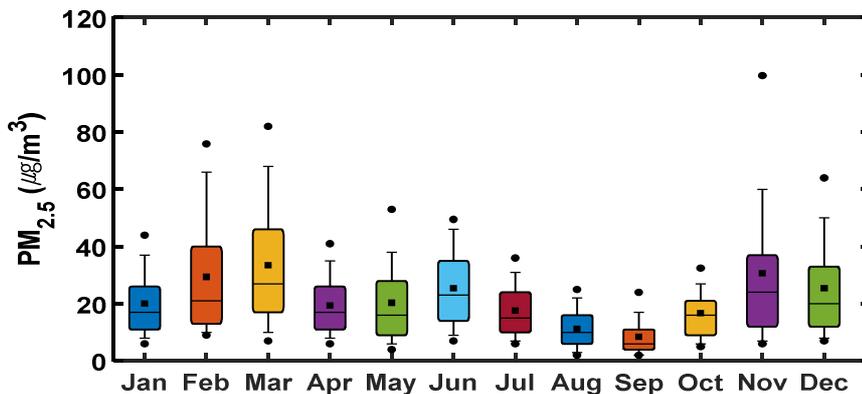
(c) 충청권

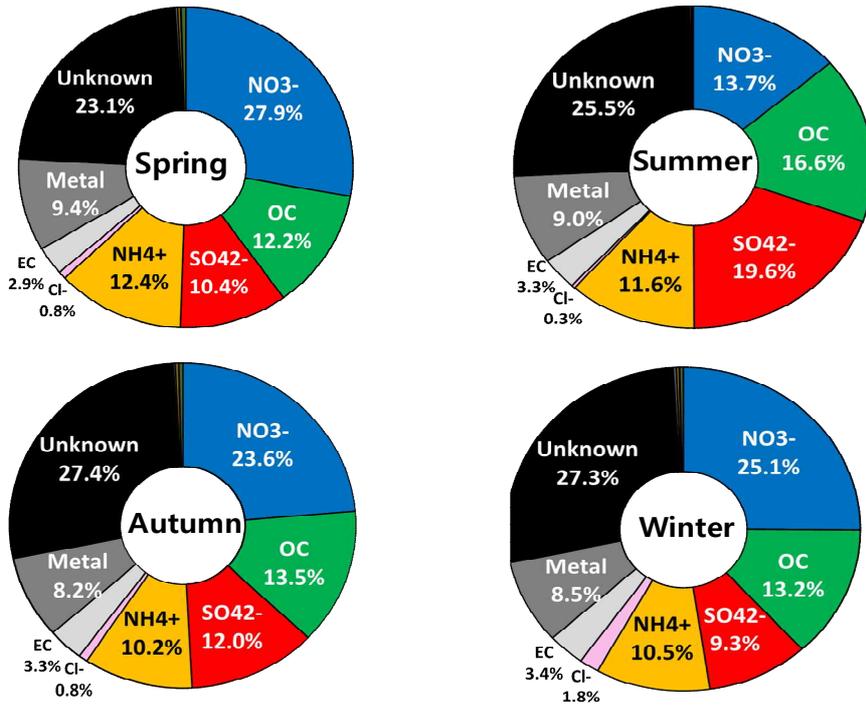
[그림 3-5] 3개 지역의 PM_{2.5} 연평균농도와 화학조성

3-2 계절별 PM_{2.5} 변화

3-2-1 수도권

그림 3-6은 월별 PM_{2.5}의 농도와 계절별 화학적 성분비를 나타낸 것이다. 1월부터 3월까지 증가하다가 3월 이후 감소세로 변화되면서 9월 가장 낮은 농도를 보이고 다시 증가하는 S자 곡선을 보였다. 연중 최대농도는 11월에 30.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났고, 최저농도는 9월 8.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 2, 3월과 11, 12월이 상대적으로 편차가 크게 나타났는데 이는 겨울철 중국으로부터 유입되는 황사에 따른 일간 농도편차가 크게 나타나면서 이 점이 반영된 결과로 풀이된다. 화학성분비의 경우 봄철에는 황사의 영향으로 금속성분비가 4계절 중 가장 높은 9.4%를 차지하였다. 전체적으로는 질산염이 27.9%로 가장 높은 비율을 보였고, 암모늄 12.4%, 유기탄소 12.2%, 황산염 10.4%였다. 여름철에는 타 계절과 다르게 황산염이 19.6%로 가장 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났고, 그 뒤를 유기탄소 16.6%, 질산염 13.7%, 암모늄 11.6%, 금속성분 9.0%였다. 가을과 겨울 모두 질산염이 각각 23.6%와 25.1%로 가장 높은 비율을 보였고, 그 뒤를 유기탄소가 13.5%와 13.2%로 차지하였다. 전체적인 비율은 가을과 겨울이 유사한 패턴을 보였고, 다만 질산염과 황산염의 비율이 서로 2% 전후로 높고 낮은 차이를 보였다. 무기탄소는 4계절 모두 3% 수준이었고, 염소성분은 겨울철에 1.8%로 가장 높게 나타났다.

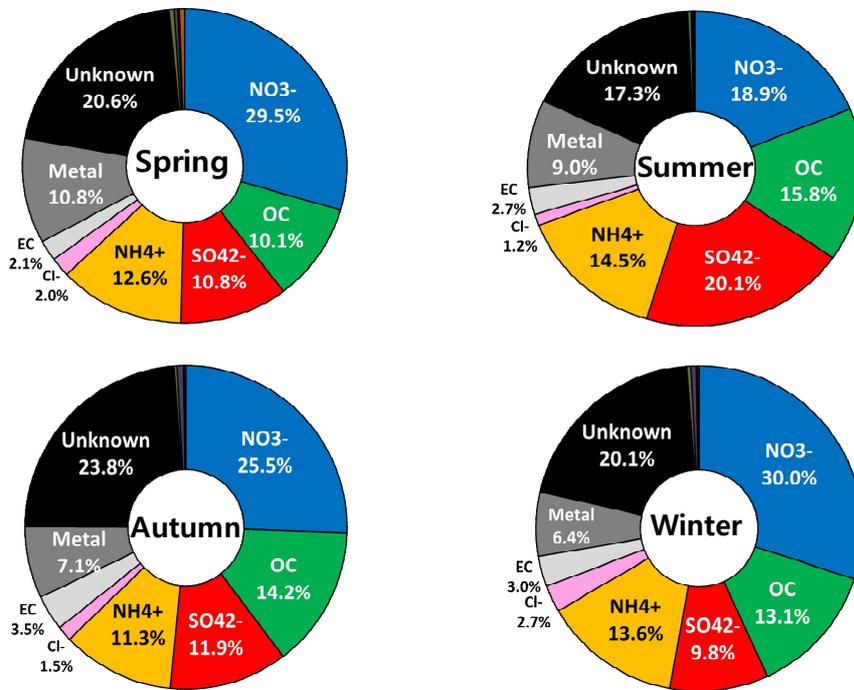
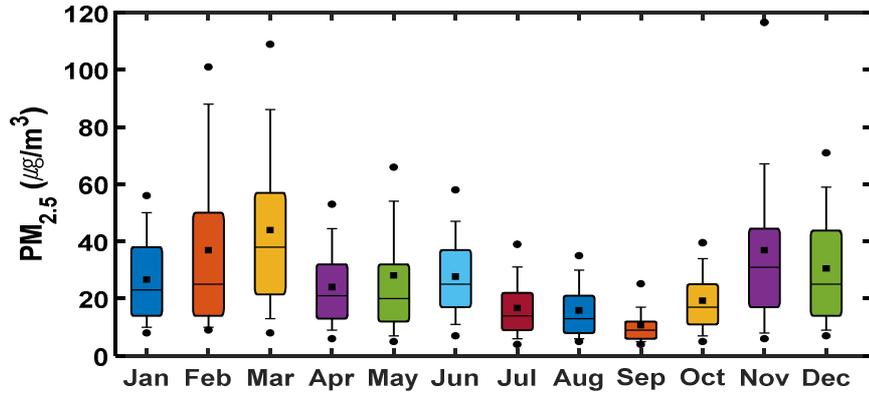




[그림 3-6] 수도권 지역의 PM2.5 월별 농도와 계절별 화학조성 변화

3-2-2 경기권

경기권은 3개 지점 중에 가장 높은 농도를 보였다. 월별로는 3월이 44.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 농도를 보였고, 9월이 10.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮았다. 전반적으로 연간 농도변화와 편차는 수도권과 유사하게 나타났다. 계절별 화학조성은 봄의 경우 질산염이 29.5%로 가장 높은 비율을 보였고, 암모늄 12.6%, 금속성분과 황산염이 10.8%로 그 뒤를 이었고, 유기탄소 10.1% 순이었다. 수도권 역시 4계절 중 봄에 질산염의 비중이 가장 크게 나타났는데 경기권 역시 봄이 가장 높은 비율을 보였으며, 중금속의 비율도 4계절 중 가장 높게 나타났다. 수도권의 경우 암모늄의 농도가 봄에 가장 높았던 것에 비해 경기권은 가을 외 가장 낮게 나타났다. 여름의 경우 수도권과 마찬가지로 황산염의 비율이 가장 높은 20.1%로 나타났으며, 질산염 18.9%, 유기탄소 15.8%, 암모늄 14.5%, 금속성분 9.0%로 나타났다. 가을에는 질산염이 다시 가장 높은 비율인 25.5%로 나타났으며, 유기탄소 14.2%, 황산염 11.9%, 암모늄 11.3%, 금속성분 7.1%였다. 겨울에는 질산염의 비율이 가장 높은 30.0%로 나타났고, 암모늄 13.6%, 유기탄소 13.1%, 황산염 9.8%, 금속성분 6.4%로 나타났다. 무기탄소는 2.1~3.5%로 수도권 대비 낮은 비율을 차지하였고, 염소성분은 수도권 대비 높은 비율(1.2~2.7%) 수준이었다.

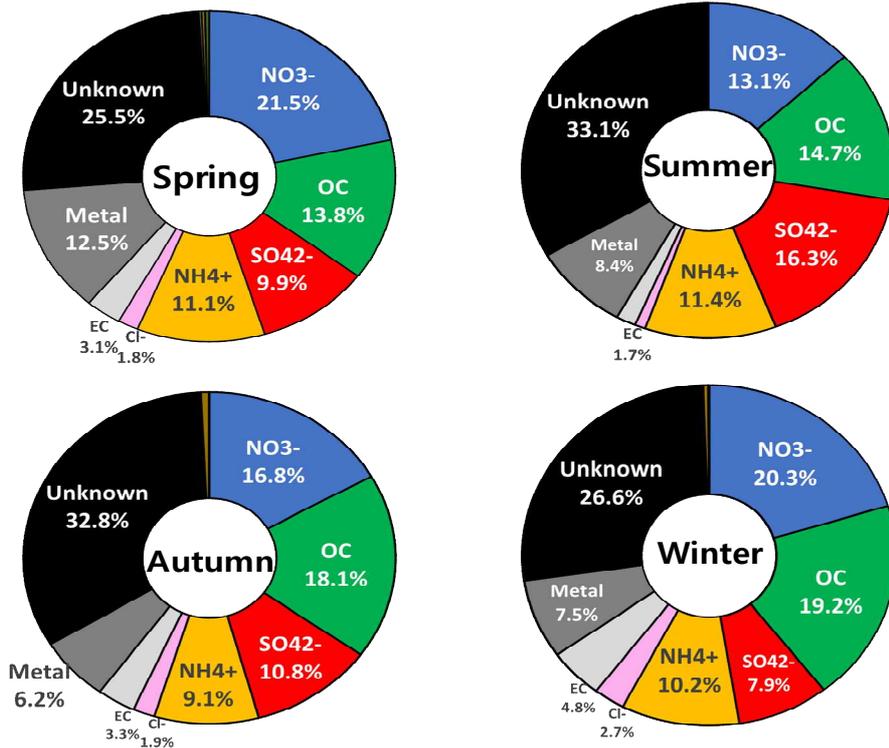
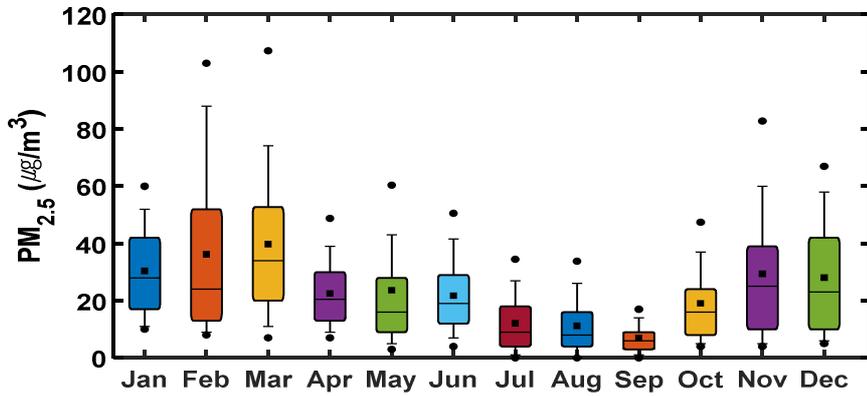


[그림 3-7] 경기권 지역의 PM_{2.5} 월별 농도와 계절별 화학조성 변화

3-2-3 충청권

충청권 역시 전체적인 월간 변화패턴과 편차는 수도권 및 경기권과 유사하게 나타났다. 3월이 39.8 µg/m³로 가장 높았고, 9월이 7.0 µg/m³로 가장 낮았다. 본 연구에서는 각기 다른 환경을 가지는 3개의 측정소인 수도권(도심지역)과 경기권(산업단지), 충청권(교외지역)을 대상으로 선정하였다. 국내에서는 대기질 개선을 위해 지역별 맞춤형 정책을 수립하여 추진하고 있다. 3개 지역은 모두 다른 배경조건을 가지기 때문에 상이한 정책이 추진중에 있다. 하지만 데이터 분석결과 모든 곳에서 3월에 가장 높은 농도

를 보였고, 9월에 가장 낮은 농도를 보였다. 지역별, 계절별 화학조성의 차이는 있지만, 결과적으로 국내 대기질 농도를 낮추기 위해서는 국내 발생원 관리도 중요하지만 중국으로부터 유입되는 황사의 영향을 줄일 수 있는 방안이 모색되어야 한다. 또한 현재 정부차원에서 매년 12월부터 익년 3월까지 계절관리제가 수행되고 있으며, 2022년부터 4차 계절관리제가 도입되고 있다. 여기서 일부 공공기관을 대상으로 10월부터 추진이 진행되고 있는데 본 연구결과를 보더라도 9월 이후 증가하는 것으로 나타나 선제적 차원에서 10월부터의 정책 추진은 충분히 필요성이 있는 것으로 보인다.



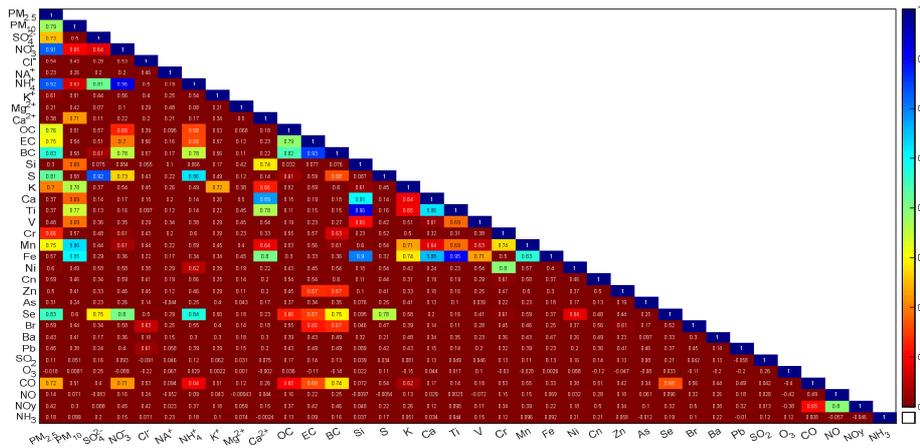
[그림 3-8] 충청권 지역의 PM_{2.5} 월별 농도와 계절별 화학조성 변화

충청권의 봄 화학조성 역시 수도권, 경기권과 마찬가지로 질산염의 비율이 21.5%로 가장 높게 나타났으며, 4 계절 중 금속성분의 비율이 12.5%로 가장 높았다. 유기탄소 13.8%, 암모늄 11.1%, 황산염 9.9% 순이었다. 여름철 역시 앞서 2개 지점과 마찬가지로 황산염의 비율이 16.3%로 가장 높았고, 그 뒤를 유기탄소 14.7%, 질산염 13.1%, 암모늄 11.4%, 금속성분 8.4%로 나타냈다. 충청권의 가장 큰 특징은 유기탄소의 비율이 수도권과 경기권보다 높다는 것이다. 수도권은 12.2~16.6%, 경기권은 10.1~15.8%인 것에 반해 충청권은 13.8~19.2%로 높았다. 이는 앞서 측정소 위치에 대해 설명할 때 언급한 것처럼 측정소가 논밭 한 가운데 위치해있다보니 주변 지역에서 발생하는 노천소각과 생물성 연소에 의한 영향을 타 지역 대비 크게 받은 결과로 판단된다. 반대로 암모니아의 주 배출원으로 알려져 있는 논밭 중심에 위치해 있는 것에 반해 암모늄의 비율이 타 지역보다 낮게 나타났다. 암모늄은 노천소각이나 생물성 연소, 이차생성 질산염과 황산염의 전구물질로 알려져 있는데 지역적으로 풍부한 질산염과 황산염과 반응하여 소멸되어 농도가 상대적으로 낮게 나왔을 수도 있다. 하지만 이러한 것은 과학적으로 조사된 바가 없어 추가적인 논의가 필요할 것으로 판단된다.

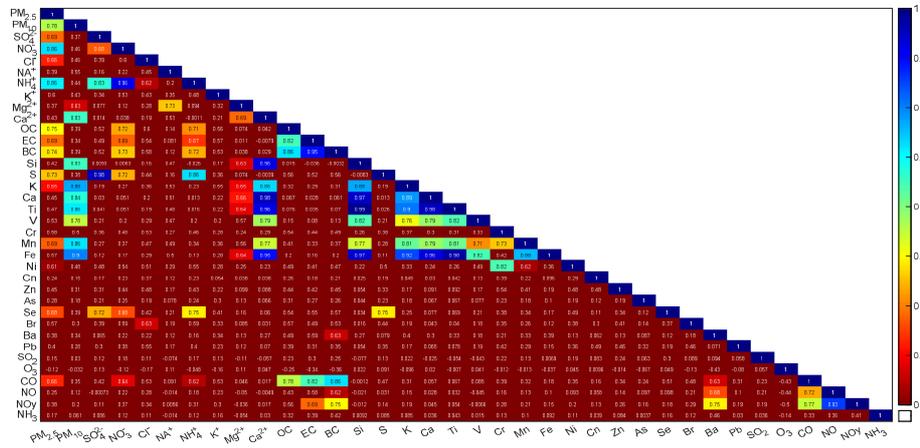
3-3 각 지역 PM_{2.5}의 화학물질간 상관성 분석

대기환경보전법이 개정된 이후 국가 차원의 대기질 장기 모니터링과 정책 추진결과 분석을 위해 대기오염측정망을 설치하여 운영 중에 있다. 2022년 8월 기준 전국에는 909개소의 측정망이 운영되고 있다. 하지만 대기오염물질은 발생된 공간에 국한되지 않고 주변 지역으로 확산되어 영향을 미치게 되며, 당시 기류, 온습도, 주변 지형, 풍향풍속에 따라 다르게 나타난다. 이에 수백개의 측정망이 설치되어 운영되고 있는 것이며, 아직도 지역적 대표성을 가지는 측정 데이터를 생산하기 위해 노력 중에 있다. 하지만 측정소 1개소를 설치하는데 2억정도가 소요되며, 연간 2천만원 수준의 유지비가 드는 측정소를 무한정으로 늘릴 수 없다. 이러한 가운데 최근에는 빅데이터 분석기법을 활용하여 지역적 특성을 고려한 오염물질간 상관성을 분석하여 높은 값을 가지는 항목을 매칭시켜 미래를 예측하는 방법이 고안되어 활용되고 있다. 본 연구에서는 빅데이터를 활용한 미래 예측을 수행할 순 없지만 각 측정소별로 도출된 물질들간 상관성을 분석하여 향후 빅데이터 분석을 통한 미래예측시 활용할 수 있도록 계수를 제공하고자 하니다. 그림 3-9는 각 측정소에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 화학분석 결과를 나열한 것이다($p < 0.01$). 분석결과 PM_{2.5}는 PM₁₀, 질산염, 황산염, 암모늄, 탄소성분(OC, EC, BC), 황, 칼륨 등과 높은 상관성을 보였고, PM₁₀의 경우 망간, 철, 바나듐, 칼슘이온, 암모늄, 질산염과 높은 상관성을 보였다. 본 자

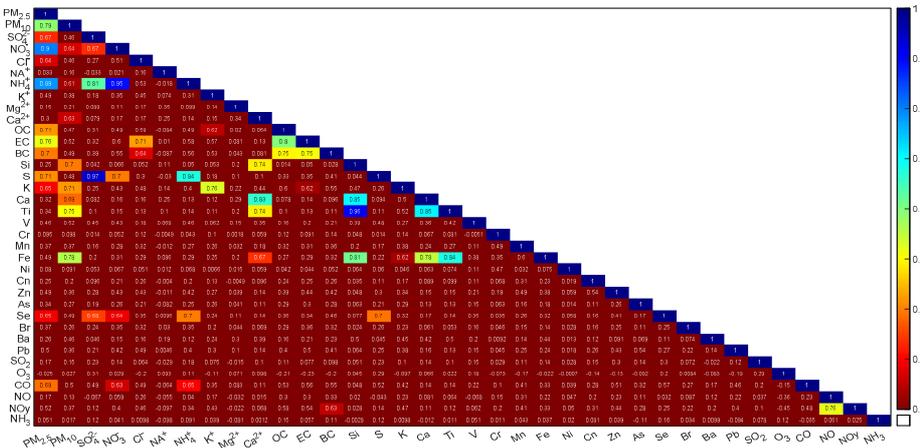
료는 향후 빅데이터를 활용한 미래예측 연구에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 수도권



(b) 경기권



(c) 충청권

[그림 3-9] 각 지역별 PM2.5의 화학물질간 상관성 분석 결과

04 소형사업장 관리현황 분석 및 정책 제언

1. 특성
2. 현황
3. 제언

1. 대기오염물질 배출사업장 분류

대기오염물질이란 대기중 중에 존재하는 물질 중 「대기환경보전법」 제7조에 따른 심사·평가 결과 대기오염의 원인으로 인정된 가스 및 입자상 오염물질을 말하며, 「대기환경보전법」에 따라 규제되는 대기오염물질은 「대기환경보전법 시행규칙」 별표 1에 따라 64종이 지정되어 있다. 또한 그 중 사람의 건강이나 동식물의 생육에 위해를 끼칠 수 있어 지속적인 측정이나 감시·관찰 등이 필요하다고 인정된 물질을 유해성대기감시물질로, 저농도에서 장기적인 섭취나 노출시 사람의 건강이나 동식물의 생육에 위해를 끼칠 수 있는 물질을 특정대기유해물질로 선정하여 관리하고 있다. 유해성대기감시물질과 특정대기유해물질은 각각 43종과 35종이 지정되어 있다. 2020년 대기오염물질 배출허용기준이 강화되면서 기존 물질들에 대해서는 30% 이상 강화를 시켰고, 특정대기유해물질에 대해서는 8종의 기준을 초과하여 사용이 금지된 2개를 제외한 33종에 대한 모든 항목의 기준이 설정되었다.

대기오염물질					
44. 입자상 오염물질 45. 브롬 및 그 화합물 46. 바나듐 및 그 화합물 47. 철 및 그 화합물 48. 아연 및 그 화합물 49. 셀렌 및 그 화합물 50. 안티몬 및 그 화합물 51. 주석 및 그 화합물 52. 텔루륨 및 그 화합물 53. 바륨 및 그 화합물 54. 황산화물 55. 황화메틸 56. 메르캅탄류 57. 아민류 58. 이황화탄소 59. 탄화수소 60. 인 및 그 화합물 61. 붕소화합물 62. 아닐린 63. 아크롤레인	<table border="1"> <thead> <tr> <th>유해성대기감시물질</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>36. 암모니아, 37. 아세트산비닐, 38. 비스프탈레이트, 39. 디메틸포름아미드, 40. 일산화탄소, 41. 알루미늄 및 그 화합물, 42. 망간화합물, 43. 구리 및 그 화합물</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>특정대기유해물질</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1. 카드뮴 및 그 화합물, 2. 시안화수소, 3. 납 및 그 화합물, 4. 폴리염화비페닐, 5. 크롬 및 그 화합물, 6. 비소 및 그 화합물, 7. 수은 및 그 화합물, 8. 프로필렌 옥사이드, 9. 염소 및 염화수소, 10. 불소화물, 11. 석면, 12. 니켈 및 그 화합물, 13. 염화비닐, 14. 다이옥신, 15. 페놀 및 그 화합물, 16. 베릴륨 및 그 화합물, 17. 벤젠, 18. 사염화탄소, 19. 이황화메틸, 20. 아닐렌, 21. 클로로포름, 22. 포름알데하이드, 23. 아세트알데하이드, 24. 벤지딘, 25. 1,3부타디엔, 26. 다환방향족탄화수소, 27. 에틸렌옥사이드, 28. 디클로로메탄, 29. 스티렌, 30. 테트라클로로에틸렌, 31. 1,2-디클로로에틸렌, 32. 에틸벤젠, 33. 트리클로로에틸렌, 34. 아크릴로니트릴, 35. 히드라진</td> </tr> </tbody> </table>	유해성대기감시물질	36. 암모니아, 37. 아세트산비닐, 38. 비스프탈레이트, 39. 디메틸포름아미드, 40. 일산화탄소, 41. 알루미늄 및 그 화합물, 42. 망간화합물, 43. 구리 및 그 화합물	특정대기유해물질	1. 카드뮴 및 그 화합물, 2. 시안화수소, 3. 납 및 그 화합물, 4. 폴리염화비페닐, 5. 크롬 및 그 화합물, 6. 비소 및 그 화합물, 7. 수은 및 그 화합물, 8. 프로필렌 옥사이드, 9. 염소 및 염화수소, 10. 불소화물, 11. 석면, 12. 니켈 및 그 화합물, 13. 염화비닐, 14. 다이옥신, 15. 페놀 및 그 화합물, 16. 베릴륨 및 그 화합물, 17. 벤젠, 18. 사염화탄소, 19. 이황화메틸, 20. 아닐렌, 21. 클로로포름, 22. 포름알데하이드, 23. 아세트알데하이드, 24. 벤지딘, 25. 1,3부타디엔, 26. 다환방향족탄화수소, 27. 에틸렌옥사이드, 28. 디클로로메탄, 29. 스티렌, 30. 테트라클로로에틸렌, 31. 1,2-디클로로에틸렌, 32. 에틸벤젠, 33. 트리클로로에틸렌, 34. 아크릴로니트릴, 35. 히드라진
유해성대기감시물질					
36. 암모니아, 37. 아세트산비닐, 38. 비스프탈레이트, 39. 디메틸포름아미드, 40. 일산화탄소, 41. 알루미늄 및 그 화합물, 42. 망간화합물, 43. 구리 및 그 화합물					
특정대기유해물질					
1. 카드뮴 및 그 화합물, 2. 시안화수소, 3. 납 및 그 화합물, 4. 폴리염화비페닐, 5. 크롬 및 그 화합물, 6. 비소 및 그 화합물, 7. 수은 및 그 화합물, 8. 프로필렌 옥사이드, 9. 염소 및 염화수소, 10. 불소화물, 11. 석면, 12. 니켈 및 그 화합물, 13. 염화비닐, 14. 다이옥신, 15. 페놀 및 그 화합물, 16. 베릴륨 및 그 화합물, 17. 벤젠, 18. 사염화탄소, 19. 이황화메틸, 20. 아닐렌, 21. 클로로포름, 22. 포름알데하이드, 23. 아세트알데하이드, 24. 벤지딘, 25. 1,3부타디엔, 26. 다환방향족탄화수소, 27. 에틸렌옥사이드, 28. 디클로로메탄, 29. 스티렌, 30. 테트라클로로에틸렌, 31. 1,2-디클로로에틸렌, 32. 에틸벤젠, 33. 트리클로로에틸렌, 34. 아크릴로니트릴, 35. 히드라진					

[그림 4-1] 대기오염물질 분류표

1-1. 대기오염물질 배출시설

대기오염물질 배출시설은 「대기환경보전법」 제2조에 따라 대기오염물질을 대기에 배출하는 시설물, 기계, 기구, 그 밖의 물체로서 환경부령으로 정하는 것을 말한다.

1-2. 대기오염물질 배출시설 대상

- (1) 배출시설 규모는 그 시설의 중량·면적·용적·열량·동력 등으로 하되 최대시설 규모로 산정
- (2) 2020.1.1.부터 섬유제품 제조시설 등 28개 업종, 도장시설 등 7개 시설, 입자상물질 및 가스상물질 발생시설 등 37개 종류로 구분(시행규칙 별표3)
 - 시행규칙 별표3의 배출시설 분류표 1)~35)의 분류에 해당하지 않는 배출시설은 36) 또는 37)의 시설로 봄
- (3) 동일 사업장에 배출시설 기준 규모 미만의 동종시설이 2개 이상 설치된 경우로서 기준 규모 미만 시설의 총 규모가 기준 규모 이상인 경우에는 그 시설들은 배출시설에 포함됨. 다만 다음의 시설은 시·도지사가 인정하는 경우에는 총 규모 산정에서 제외할 수 있음
 - (가) 지름이 1밀리미터 이상인 고체입자상물질 저장시설
 - (나) 영업을 목적으로 하지 않는 연구시설
 - (다) 설비용량이 1.5메가와트 미만인 도서지방용 발전시설
 - (라) 시간당 증발량 0.1톤 미만 또는 열량이 61,900 킬로칼로리 미만인 보일러로서 환경표지 인증을 받은 보일러

1-3. 전국 대기오염물질 배출사업장 운영 현황

2019년 기준 전국에는 총 60,611개소의 대기오염물질 배출사업장이 신고·운영되고 있으며, 종별로는 5종 사업장이 전체 58.0%인 35,145개소가 운영되고 있고, 4종 사업장 19,956개소(32.9%), 3종 사업장 2,038개소(3.4%), 1종 사업장 1,831개소(3.0%), 2종 사업장 1,641개소(2.7%) 순으로 나타났다. 지역별로는 경기도가 35.6%로 압도적인 1위를 차지하고 있으며, 경상남도 8.6%, 경상북도 8.5%, 충청북도 7.3%, 인천 7.0%이었다. 환경부에서 매년 발간하고 있는 CAPSS에 따르면 대기오염물질 배출량은 경기도가 지난 수년간 꾸준히 1위를 차지하고 있으며, 2017년까지 충청남도가 2위를 차지하다가 2018년과 2019년에 경상북도가 올라와 2위를 사수하고 있으며, 충청남도 3위,

전라남도 4위를 나타내고 있다. 경기도는 도 내 전반에 걸쳐 중소형 배출사업장이 압도적으로 많아 여기서 기인한 배출원이 높은 배출량을 나타낸 것으로 판단되며, 경상북도와 충청남도, 전라남도는 경기도와 다르게 발전소, 제철소, 석유화학단지로 대표되는 산업단지가 다수 분포하면서 대형배출시설들에 의한 배출 기여도가 높기 때문인 것으로 판단된다. 현재 배출량 체계로는 다수의 배출원을 가지고 있는 경기도의 배출량이 높은 것이 사실이지만 전체 배출시설의 4~7%에 불과한 경북, 충남, 전남의 배출량이 많다는 것은 다수의 소형 배출시설보다는 소수의 대형배출시설에 의한 배출기여도가 훨씬 크다는 것을 의미한다. 하지만 현재 소형배출사업장(4,5종)에 대한 배출량 조사 과학적인 자료 기반의 정확한 산정방식이 아닌 4년을 주기로 사업장 내 환경관리인에 의한 설문형태의 조사자료를 기반으로 산정되기 때문에 불확실성이 매우 높다. 최근 환경부에서 소형배출사업장에 대해 IoT기술을 이용한 모니터링 기술을 접목하기로 결정하였는데, 향후에는 공정가동 여부 외에 배출량 정보 또한 모니터링 할 수 있는 기술이 접목되어 운영되어야 할 것이다.

[표 4-1] 대기오염물질 배출사업장 등록현황 (2019년 기준)

시도	1종	2종	3종	4종	5종	합계	비율
합계	1,831	1,641	2,038	19,956	35,145	60,611	100.0%
서울특별시	11	12	12	528	1,539	2,102	4.4%
부산광역시	29	55	112	920	1,315	2,431	3.7%
대구광역시	24	40	58	825	1,154	2,101	3.3%
인천광역시	72	65	109	1,488	2,471	4,205	7.0%
대전광역시	10	27	24	211	376	648	1.1%
광주광역시	18	25	35	343	496	917	1.4%
울산광역시	102	50	65	413	541	1,171	1.5%
세종특별자치시	25	25	11	114	242	417	0.7%
경기도	230	219	392	5,868	12,501	19,210	35.6%
강원도	40	44	37	458	837	1,416	2.4%
충청북도	74	180	180	1,388	2,578	4,400	7.3%
충청남도	133	107	162	1,317	2,168	3,887	6.2%
전라북도	538	324	232	1,142	1,267	3,503	3.6%
전라남도	268	124	116	1,087	1,446	3,041	4.1%
경상북도	133	136	242	1,582	2,982	5,075	8.5%
경상남도	118	206	247	2,139	3,009	5,719	8.6%
제주특별자치도	6	2	4	133	223	368	0.6%
비율	3.0%	2.7%	3.4%	32.9%	58.0%	100.0%	

2. 지역별 소형사업장 분포 및 특성

2-1. 서울시

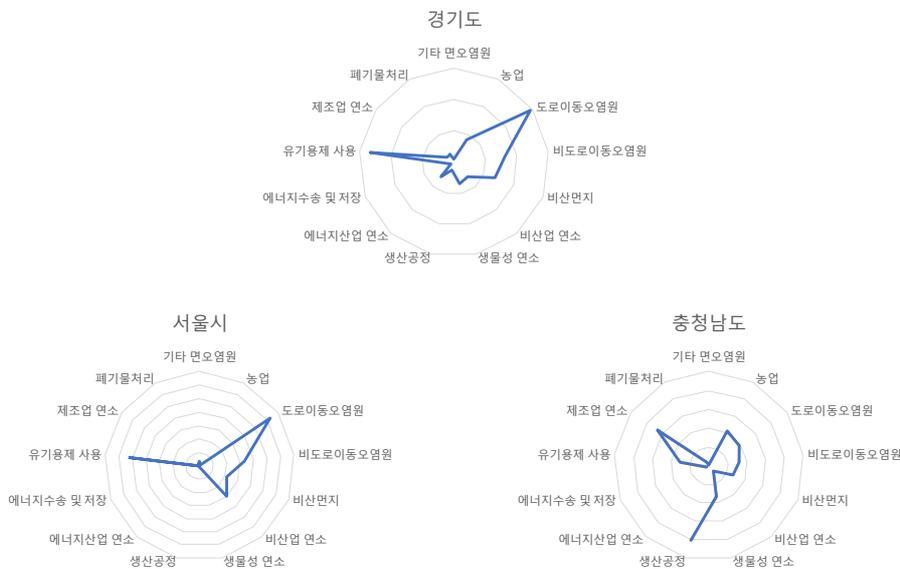
2020년 기준 서울에 위치하고 있는 대기오염물질 배출사업장은 총 2,012개소로 그 중 대형 사업장으로 분류되는 1~3종 사업장의 경우 전체의 2.1%에 해당하는 43개소만이 포함되며, 나머지는 대부분 소형사업장으로 분류된다. 지역별로는 성동구가 10.9%로 가장 많은 소형사업장이 위치하고 있으며, 중구 9.9%, 영등포 9.6%, 강남 9.1%순으로 나타났다.

[표 4-2] 서울시 대기오염물질 배출 소형사업장(4,5종) 분포 현황

단위 : 개소	4종	5종	계	비율(%)
2020	505	1,464	1,969	100.0%
종로	36	73	109	5.5%
중구	55	140	195	9.9%
용산	14	26	40	2.0%
성동	30	184	214	10.9%
광진	18	17	35	1.8%
동대문	9	22	31	1.6%
중랑	3	20	23	1.2%
성북	17	16	33	1.7%
강북	2	18	20	1.0%
도봉	10	25	35	1.8%
노원	10	26	36	1.8%
은평	8	11	19	1.0%
서대문	6	18	24	1.2%
마포	10	48	58	2.9%
양천	6	17	23	1.2%
강서	35	105	140	7.1%
구로	19	88	107	5.4%
금천	18	142	160	8.1%
영등포	38	151	189	9.6%
동작	13	12	25	1.3%
관악	7	21	28	1.4%
서초	49	84	133	6.8%
강남	57	122	179	9.1%
송파	28	61	89	4.5%
강동	7	17	24	1.2%

2-2. 경기도

경기도 국내 대기오염물질 배출사업장도 가장 많이 위치해 있고, 배출량 또한 부동의 1위인 지역이다. 2019년 기준 전국에서 운영 중인 대기오염물질 배출사업장 중 35.6%가 위치해 있으며, 1,2종 사업장 합계 2위, 4,5종 사업장 수 1위이다 보니 사업장에 대한 배출 기여도가 매우 높다. 그림 4-2는 서울과 경기, 충남지역의 대기오염물질 배출량 자료를 부문별로 나타낸 것이다. 서울시는 도로이동오염원과 비산먼지에 대한 기여도가 높은 가운데 유기용제 사용이 높게 나타나며, 충청남도는 농업과 도로이동오염원과, 제조업 연소 및 생산공정이 높게 나타난다. 서울은 자동차 기인 배출원에 영향이 커 자동차 배기가스에 인한 배출원이 가장 큰 영향을 나타내며, 충청남도는 주력산업인 농업부문과 대형배출사업장의 위치에 따른 제조업 연소와 생산공정에 대한 영향이 크게 나타났다. 경기도는 가장 많은 사업장을 보유하고 있는 지역 답게 도로이동오염원과 함께 유기용제 사용, 에너지산업연소, 생산공정 분야에서 높게 나타났다.



[그림 4-2] 대기오염물질 부문별 배출량 자료 분석

표 4-3은 경기도의 소형 배출사업장 개소를 나타낸 것이다. 2020년 기준 4,5종 사업장은 총 18,610개소가 있으며, 4종 5,957개소, 5종 12,653개소로 5종 사업장이 4종 대비 2.1배 많았다. 지역별로는 화성시가 14.6%로 가장 높은 비율을 차지하였고, 김포시 10.6%, 포천시 7.3%, 파주시 5.8%로 나타났다. 특이한 점은 광역환경관리사업소가 14.3%로 높은 비율을 차지하였는데 이는 사업장 부지가 경기도에만 국한되지 않아 타

지자체와 공동 관리되는 사업소를 의미한다.

[표 4-3] 경기도 대기오염물질 배출 소형사업장(4,5종) 분포 현황

단위 : 개소	4종	5종	계	비율(%)
2020	5,957	12,653	18,610	
본 청	29	43	72	0.4%
광역관리사업소	981	1,687	2,668	14.3%
경경제자유지역	1	-	1	0.0%
수 원 시	76	181	257	1.4%
성 남 시	21	80	101	0.5%
안 양 시	29	85	114	0.6%
부 천 시	190	563	753	4.0%
광 명 시	21	15	36	0.2%
평 택 시	184	588	772	4.1%
안 산 시	427	554	981	5.3%
과 천 시	7	12	19	0.1%
오 산 시	18	57	75	0.4%
시 흥 시	18	49	67	0.4%
군 포 시	44	147	191	1.0%
의 왕 시	19	41	60	0.3%
하 남 시	13	24	37	0.2%
용 인 시	184	486	670	3.6%
이 천 시	146	263	409	2.2%
안 성 시	177	527	704	3.8%
김 포 시	723	1,257	1,980	10.6%
화 성 시	858	1,861	2,719	14.6%
광 주 시	310	712	1,022	5.5%
여 주 시	62	200	262	1.4%
양 평 군	21	31	52	0.3%
북 부 청	185	195	380	2.0%
의정부시	22	33	55	0.3%
동두천시	26	31	57	0.3%
고 양 시	82	271	353	1.9%
구 리 시	11	9	20	0.1%
남양주시	158	323	481	2.6%
파 주 시	261	823	1,084	5.8%
양 주 시	273	386	659	3.5%
포 천 시	325	1,038	1,363	7.3%
연 천 군	34	46	80	0.4%
가 평 군	21	35	56	0.3%

2-3. 충청남도

충청남도는 경기도에 위치해 있는 대형사업장(1,2종) 449개소 대비 240개소로 대형사업장의 비는 절반 수준이나 소형사업장(4,5종)의 경우 18,761개소 대비 3,647개소로 19.4%로 소형사업장의 비율은 낮은 편이다. 하지만 충청남도만 봤을 때는 소형사업장 비율이 89.7%로 높은 수준이다. 하지만 앞서 언급한 것처럼 충청남도에는 대형배출사업장이 다수 밀집되어 있다. 2022년 기준 전국에서 운영 중인 59기 석탄화력발전소 중 29기가 태안, 보령, 당진, 서천에 밀집되어 있고, 전국 3대 제철소인 포항, 광양과 더불어 당진 제철소가 있다. 그리고 전국 3대 석유화학단지인 여수, 울산과 함께 대산석유화학단지(서산)가 있어 이들에 대한 배출 기여도가 매우 높은 것으로 알려져 있다. 소형배출사업장은 지역별로는 천안이 29.1%로 가장 높은 비율은 보이며, 아산 18.7%, 당진 9.9%로 나타났다. 충남 서북부에 위치한 서산, 당진, 아산, 천안은 대형배출시설과 대도시가 인접해 있어 자체적인 대기질 개선을 위한 노력을 추진 중에 있다. 2018년 미세먼지 대응 지방정부 연대를 수립하여 “충남 서북부 미세먼지 대응 행정협의회”를 발족, 공동 연구와 개선대책 수립, 추진을 목적으로 추진 중에 있다.

[표 4-4] 충청남도 대기오염물질 배출 소형사업장(4,5종) 분포 현황

단위 : 개소	4종	5종	계	비율(%)
2020	1,329	2,133	3,462	
도	10	2	12	0.3%
천안시	363	646	1,009	29.1%
공주시	51	126	177	5.1%
보령시	49	54	103	3.0%
아산시	241	408	649	18.7%
서산시	71	96	167	4.8%
논산시	85	154	239	6.9%
계룡시	6	11	17	0.5%
당진시	166	177	343	9.9%
금산군	59	173	232	6.7%
부여군	26	45	71	2.1%
서천군	25	25	50	1.4%
청양군	21	23	44	1.3%
홍성군	52	51	103	3.0%
예산군	88	116	204	5.9%
태안군	16	26	42	1.2%

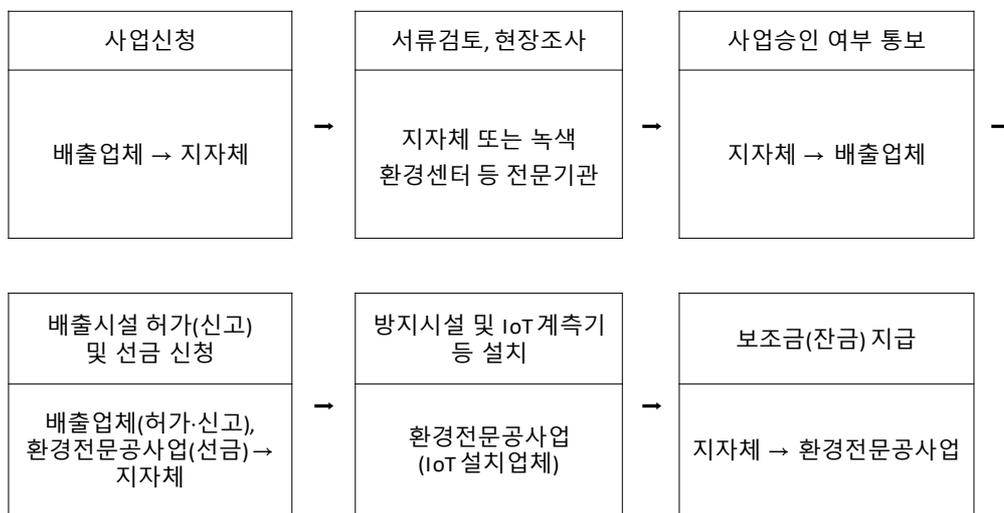
3. 소형사업장 관리 현황

3-1. 국가차원의 소규모 배출사업장 지원 사업 추진 현황

최근 2022년 서울시의 초미세먼지의 연 평균농도가 2008년 이후 가장 낮은 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준인 것으로 보도되었다. 1999년 정부에서 TSP를 시작으로 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 로 점점 그 크기를 축소하면서 대기개선 정책을 추진한 결과 꾸준한 감소세를 보이고 있었다. 하지만 2015년부터 2020년까지 감소세가 주춤하면서 유지 혹은 증감을 반복하기 시작하였고, 이러한 가운데 고농도 미세먼지 사례가 증가하면서 국민적인 관심과 우려가 증가하기 시작하였다. NGO들은 앞 다투어 정부차원의 개선대책과 지원을 강화하라고 성토했고, 주부들은 미세먼지가 무서워 자녀들의 등교를 못 시키겠다고 하였다. 학교 등에서는 미세먼지 때문에 외부활동을 해야 하는지, 환기는 언제 해야 하는지 등 일선에서 많은 혼선을 야기하였다. 이러한 국민적 염원과 우려를 기반으로 2018년 미세먼지 관리 종합계획(2020~2024)이 수립되었다. 기존의 현안과 미래전망을 기반으로 산업, 생활, 도로 및 비도로 등 전 분야에 걸쳐 개선대책이 수립되었으며, 미세먼지 특별법과 대기관리권역법이 신설되어 한반도 전역을 대상으로 한 정책이 추진되고 있다. 여기서 국가 정책 수립의 기본이 되는 것이 CAPSS이다. CAPSS는 국가미세먼지정보센터에서 연단위로 전 분야에 걸친 대기오염물질 배출량을 산정, 고시하는 것으로 이를 기반으로 미래 예측, 삭감량이 산정된다. CAPSS는 9개 오염물질(TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO, NH_3 , BC, VOCs, SO_x , NO_x), 13개 항목을 시·군별로 산정한다. 이 과정에서 불분명한 활동자료, 배출계수 등이 배출량 산정의 정확성을 낮추는 저해요인으로 작용하고 있다. 특히 TMS와 SEMS를 기반으로 배출량이 관리되는 1~3종 사업장과 다르게 4,5종 사업장은 아직까지 4년마다 수행되고 있는 전수조사에 의존하고 있어 배출량의 불확실성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 미세먼지 종합계획에서 제시된 정책들도 노후 석탄화력발전소 조기폐쇄 및 상한 제약, 배출허용 기준 강화, 총량관리제 도입 및 권역별 개선대책 수립 등 대형 배출시설을 중심으로 한 정책이 대부분이다. 물론 앞서 서울과 경기, 충남지역의 배출량 검토 결과 대형배출시설에 대한 개선대책 추진이 더 효과적일 수 있다는 것을 확인하였다. 하지만 4,5종 사업장에 대한 배출량 산정량이 불확실하다는 점을 감안할 때 이들 소형사업장들에 대한 관리대책이 필요하다는 것은 묵인할 수 없는 사실이다.

환경부와 각 지방유역환경청, 지자체 등을 대상으로 소형배출 사업장을 대상으로 한 개선대책을 검토한 결과 현재 추진대고 있는 사업은 「소규모 사업장 방지시설 설치 지

원사업」이 주요 사업자이 유일한 사업인 것으로 확인되었다. 해당 사업은 2019년 이후 노후 방지시설에 대한 개선 및 설치비용을 지원하여 미세먼지 저감을 목적으로 4년간 추진되어 왔다. 연초 국가의 지역별 국비 지원금을 확정하여 고시하면, 이 금액 대한 지역별 매칭 펀드를 추가하여 국비+지자체비로 교체사업 비용의 90%를 부담하고 나머지 10%를 사업주가 부담하는 것이 주요 골자이다. 기본적으로는 4, 5종의 소규모 사업장을 대상으로 고시하고 있지만, 지자체별로 예산 여건에 따라 1~3종 사업장도 포함하여 고시하는 곳도 있다.



[그림 4-3] 소규모 방지시설 설치지원사업 추진 프로세스

국고 보조금이 확정되면 각 시도는 이에 맞는 매칭펀드를 할당하고, 도 단위의 광역지자체는 이 금액을 다시 기초지자체에 위임하게 된다. 이 역할은 주로 각 지역별로 환경부로부터 위임받아 활동하는 녹색환경지원센터에서 수행하고 있다. 지역별로 소규모 사업장 지원사업 공고를 내고, 이 공고에 따라 해당되는 사업주들은 방지시설 설계시공업체와 논의하여 개선사업 제안서를 제출하고, 이 서류를 1차 검토 후 현장 등을 지역 전문가들(주로 대기환경기술사)로 이루어진 “홈닥터”와 함께 방문하여 적절성 여부를 검토한다. 이후 수정보완을 거쳐 현장 시공이 진행되고, 완료시 다시 녹색환경지원센터와 홈닥터, 지자체 공무원들이 현장을 방문하여 서류검토 및 설치된 시설의 적절성 등을 판하여 준공 완료하게 된다. 기존에 4,5종 사업장의 경우 설치된 방지시설을 끄거나 주요 설비를 제외하고 운영하는 경우가 있었는데 이를 방지하기 위해 신규 지원설치된 시설에는 IoT를 이용한 운영정보 전달 시스템이 도입되게 되었다. 아직 기술적인 한계로 각 시설별로 처리하는 오염물질에 대한 농도 정보를 제공할 순 없지만 풍량, 차압, 온

습도, pH 등의 정보를 환경공단과 연계된 클린링크로 전송하도록 하고 있다. 이 정보는 각 사업장의 정확한 운영시간과 설계된 방지시설의 주요 부품 누락 등으로 발생할 수 있는 압력변화 등을 감지하여 정상 작동 여부를 확인할 수 있다. 표 4-5는 지난 4년간 소규모 방지시설 지원사업으로 할당된 예산을 시도별로 합산하여 나타낸 것이다. 2019년 2천억 규모로 시작하여 2020년에는 약 2배 증가한 3.96천억원으로 최대비용일 할당되었다가 2021년과 2022년으로 오면서 점차 감소하는 추세이다. 지역별로는 소형사업장이 가장 많이 위치하고 있는 경기도 4년간 전체 금액의 34.8%가 할당되었고, 경남 2위, 인천 3위로 나타났다.

【표 4-5】 소규모 방지시설 설치지원 사업 예산 및 시군별 비율 (단위:백만원)

구분	2019년	2020년	2021년	2022년	전체합계	비율, %	순위
서울	10,800	10,163	10,134	5,418	36,515	3.4	10
부산	5,893	11,808	12,600	10,818	41,119	3.9	8
대구	7,297	34,448	16,740	18,468	76,953	7.2	5
인천	15,201	30,456	23,715	25,758	95,130	8.9	3
광주	3,771	7,542	5,400	5,778	22,491	2.1	13
대전	2,029	3,629	900	180	6,738	0.6	16
울산	3,830	3,600	3,600	1,854	12,884	1.2	14
세종	2,369	900	900	900	5,069	0.5	17
경기	68,085	136,368	104,481	61,560	370,494	34.8	1
강원	4,387	8,784	6,660	5,598	25,429	2.4	12
충북	12,078	24,192	8,955	9,900	55,125	5.2	6
충남	10,796	21,618	8,541	4,662	45,617	4.3	7
전북	7,672	15,372	6,156	3,726	32,926	3.1	11
전남	7,668	15,354	10,800	6,534	40,356	3.8	9
경북	16,850	33,750	23,400	18,666	92,666	8.7	4
경남	17,278	34,614	24,300	22,572	98,764	9.3	2
제주	1,699	3,402	2,088	288	7,477	0.7	15
합계	197,703	396,000	269,370	202,680	1,065,753		

이와 더불어 녹색환경지원센터에서 추진하고 있는 사업은 기술지원 사업이다. 방지시설 운영 사업장을 대상으로 현재 설치되어 운영되고 있는 설비가 적절한 설비인지, 최적의 운영효율을 발휘하고 있는지를 홈닥터와 함께 검토하고, 검토 결과 필요한 운전 노하우나 개선방안을 제시해주고, 만약 대상 사업장이 방지시설 지원사업 대상이라면 관련 사업에 지원하도록 돕고 있다. 하지만 대부분의 사업이 신규설치나 지원에 머무르고 있어 설치 이후 유지보수와 관리에는 많은 부족한 부분이 나타나고 있다. 예를들어

소형 배출사업장 중 200 m³/min의 용량을 가지는 도장시설의 경우 지원사업을 통해 약 3,000만원 전후의 지원금을 받아 시설을 새로 개설할 수 있으나 여기에 들어가는 흡착제의 연간 비용이 700~900만원 정도로 소규모 사업장의 경우 경제적 부담이 될수 밖 없다. 또한 어떠한 정책이 추진되었을 경우 소요 비용에 대한 효과를 분석해야 하는데 대부분의 사업장이 교체 후 연단위의 후속관리만 추진되고 있어 이에 따른 정확한 개선효과가 제시되지 못하고 있다. 경기도의 경우 소규모 방지시설 지원 시설에 대해 연 500만원 한도 내에서 활성탄과 같은 충전물의 교체나 덕트의 수리 등 유지보수에 필요한 비용을 일부 지원하고 있으나 아직 많이 부족한 실정이다.

'22년 소규모 사업장 방지시설 설치 지원사업
국고보조금 업무처리지침

'22. 1.

환 경 부
대 기 관 리 과

【 방지시설 종류·시설용량별 설치비 및 보조금 지원액 】
 <<2021년 이전 지원사업으로 신청한 사업장>
 (단위: 만원)

구 분	시설용량	방지시설 설치비	보조금 지원액		
			계	국비	지방비
어과집진시설	100m ³ /분	3,307	2,977	1,654	1,323
	200m ³ /분	4,791	4,312	2,396	1,916
	300m ³ /분	6,028	5,425	3,014	2,411
	400m ³ /분	7,895	6,884	3,797	3,037
원심러집진시설	100m ³ /분	8,890	7,821	4,345	3,476
	200m ³ /분	1,300	1,170	650	520
	300m ³ /분	2,400	2,160	1,200	960
	400m ³ /분	2,800	2,520	1,400	1,120
출수에 의한 시설	100m ³ /분	3,900	3,510	1,950	1,560
	200m ³ /분	4,700	4,230	2,350	1,880
	300m ³ /분	3,308	3,157	1,754	1,403
	400m ³ /분	4,568	4,111	2,284	1,827
	500m ³ /분	5,829	5,066	2,815	2,251
	600m ³ /분	7,391	6,652	3,696	2,956
	700m ³ /분	9,250	8,325	4,625	3,700
	800m ³ /분	3,659	3,294	1,830	1,464
	900m ³ /분	4,846	4,361	2,423	1,938
	1,000m ³ /분	5,959	5,357	2,965	2,372
출수에 의한 시설	100m ³ /분	7,840	6,976	3,620	3,006
	200m ³ /분	9,586	8,627	4,793	3,834
	300m ³ /분	1,706	1,535	853	682
	400m ³ /분	3,034	2,731	1,517	1,214
흡착에 의한 시설	100m ³ /분	3,544	3,190	1,772	1,418
	200m ³ /분	4,667	4,201	2,334	1,867
	300m ³ /분	5,612	5,061	2,806	2,245
	400m ³ /분	13,400	12,060	6,700	5,360
PTO	100m ³ /분	18,760	16,884	9,380	7,504
	200m ³ /분	25,320	22,788	12,660	10,128
	300m ³ /분	32,916	29,624	16,458	13,166
	400m ³ /분	41,145	37,031	20,573	16,458
RCO	20,000	18,000	10,000	8,000	
	30,000	27,000	15,000	12,000	
	43,000	39,510	21,850	17,860	
	52,000	46,800	26,000	20,800	
	60,000	54,000	30,000	24,000	
SCR	100m ³ /분	24,000	21,600	12,000	9,600
	200m ³ /분	28,000	25,200	14,000	11,200
	300m ³ /분	31,500	28,350	15,750	12,600
	400m ³ /분	36,500	32,850	18,250	14,600
	500m ³ /분	42,000	37,800	21,000	16,800

[그림 4-4] 소규모 방지시설 설치지원사업 업무처리 지침

이 외에도 지역적이긴 하지만 경상북도의 경우 소규모 배출사업장에서 운영 중인 후처리시설에 대한 성능인증 및 측정분석 비용을 지원해주고 있으며, 서울시는 현재 대형배출사업장을 대상으로 추진되고 있는 통합환경관리를 소형사업장까지 포함시켜 추진하는 방안을 정책적으로 제시하기도 하였다. 하지만 대부분 일회성이거나 제안의 수준으로 방지시설 지원사업을 제외하고는 관련 개선사업은 미미한 수준이다.

4. 소형사업장 관리를 위한 정책 제언

4-1. 개선효과 분석

정책을 수립하고 추진하기 위해서는 다년간의 정보와 자료, 비용이 소요된다. 이렇게 추진된 결과에 대해서는 항상 이행평가가 따르고 평가 결과에 대해 좋은 점은 확대·확산 시키고, 부족한 부분은 검토하여 재구성하거나 수정보완, 폐기의 과정을 거친다. 지난 4년간 소규모 배출시설 방지시설 지원사업으로 1조원에 다리는 비용이 할당되고 사용되어졌다. 전국적으로 교체된 시설이 수백~수천기가 되며, 이들에 대한 개선효과는 분명히 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 사업에서 이들에 대한 개선효과를 분석하여 비용대비 얼마의 효과를 보았는지에 대한 자료는 찾아 볼 수 없다. 일부 서울이나 경기도의 경우 이를 산정하여 논문이나 보도자료 형식으로 제시하기도 하였지만, 전반적인 효과분석 자료는 없다. 사업이 추진된지 4년이 지난 지금, 기존의 모든 사업에 대한 조사 및 효과분석에는 어려움이 있을 수 있다. 하지만 새로 시작되는 2023년이나 2024년부터는 이들 사업에 대해 어떻게 개선효과를 판단하여 정책적 효과를 보았는지에 대한 산정이 필요해 보인다.

4-2. 정보DB 시스템 구축과 시군차원의 우선 지원 사업장 선정

소형사업장에 대한 관리 권한은 지자체의 구조에 따라 상이하다. 충청남도의 경우 1,2 종 사업장의 경우 충청남도에서, 그 외 3~5종 사업장의 경우 시군에서 관리하고 있으며, 그 중에서도 통합환경관리나 총량관리 대상 사업장은 금강유역환경청에서 위임 받아 관리하고 있다. 대구시의 경우 각 구군에서 담당하여 관리한다. 하지만 이러한 다양함 속에서 공통적인 것은 소형사업장 관련 업무는 각 시·군·구에 1명에서 최대 2명이 담당하고 있다는 것이다. 한 지역당 수십에서 많게는 수천에 달하는 사업장을 1,2명이서 담당을 하고, 거기다가 이 업무만을 하는 것이 아닌 타 업무와 겸업을 하고 있다. 거기다가 아직까지 관련 사업장들의 정보는 전산화 되지 못하고 1980~90년도부터 관리하기 시작한 인허가 자료를 기반으로 수행되고 있다. 이러다보니 각 사업장별 정보를 확인하기 위해서는 관련 서류를 뒤져야 하며, 여기에 어떤 배출원이 있고, 이를 제어하기 위한 시설이 무엇이 있는지를 확인하기 위해서는 일일이 서류를 뒤져야 하는 번거로움이 있다. 이러다보니 현재 수행되고 있는 소규모 배출시설 지원 사업 또한 우리 지역에 대한 개선효과가 탁월하거나 유해성이 높은 사업장에 우선적으로 추진되는 것이 아

년 사업주와 방지지설 업체의 의지에 따라 지원하는 사업장을 대상으로 진행되고 있다. 이러한 흐름은 지역 내 대기질 개선 효과를 최적으로 맞출 수 없을뿐더러 잘못된 정보가 그대로 반영될 수 있는 우려가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 현재 인허가 서류 체제의 관리체계를 종합 정보DB시스템으로의 전산화가 필요하며, 이 정보를 기반으로 지역별 지원사업 우선 순위를 선정하여 지원이 추진되어야 할 것이다.

4-3. 관리항목 확대

개선사업을 통해 신규 설치된 설비에 대해 가동 상태 및 정상운전 여부를 확인하기 위해 IoT 시스템을 통한 과리가 이루어지고 있다. 하지만 항목이 풍량, 압력, 전력량, pH 등 기초적인 정보만이 포함되어 있어 각 장비에 대한 성능 파악에는 한계가 있다. 현대 대형배출시설이나 통합관리사업장에 대해서는 TMS가 부착되어 실시간으로 배출 농도를 포함한 정보가 제공되고 있으며, SEMS를 통해 매달 관련 정보가 제공되고 있다. 하지만 소규모 사업장의 경우 비용과 인력, 기술적인 문제로 이러한 관리가 전혀 이루어지지 못하고 있다. 배출량 또한 4년에 한번 이루어지고 있는 전수조사를 통한 불확실성이 큰 상황에서의 산정이 이루어지고 있을 뿐이다. 최근 IoT에 미세먼지 등의 센서를 부착하여 일반 대기나 다중이용시설에 대한 공기질 관리를 위한 노력이 나타나고 있다. 이러한 센서방식의 관리는 기존 공정시험법에 비해 정확도가 많이 떨어지지만 저렴한 가격에 연속적인 자료를 얻을 수 있다는 장점으로 많이 활용되고 있다. 현재 운영 중인 소형배출 사업장에 대해서는 이러한 관점의 센서를 개발·적용한다면 정확도가 어느 정도 떨어지더라도 TMS와 같은 배출정보와 공정 운영상태를 확인할 수 있어 기존 대비 개선된 관리가 수행될 수 있을 것으로 기대된다. 물론 아직까지 센싱기술을 통한 관리가 불확실성을 더 키울 수 있다는 우려가 있지만 기술부족은 노력과 시간을 통해 개선될 수 있을 것으로 정책적 추진이 우선적으로 수행되어야 할 것이다.

4-4. 사업장 사후관리 강화

현재 지원사업은 “기존의 노후된” 시설에 대한 개선이 주요 목적이다. 이렇다보니 시설의 교체여부와 당위성을 우선적으로 검토한 후 준공이 완료된 이후에는 1년 단위의 현장 점검이 전부이다. 하지만 시설이 자동화되지 못한 상황에서 최적의 운전효율을 보이기 위해서는 운영 노하우 전수와 지속적인 관리가 필요하다. 수도권이나 대도시를 제외한 도 단위의 시군에서는 나날이 부족한 인력을 외국인 노동자분들이 채우는 경우가

많다. 이러한 사업 구조는 현장 운영이나 인력 부족은 보충할 수 있으나 정작 관리가 필요한 시설에 대해서는 최적의 운전 효율을 기대하기에는 어렵다. 또한 앞서 언급한 것처럼 시설 설치비에 버금가는 유지비용은 장비 운영의 장애요소로 다가올 수 있다. 현재 소규모 배출시설 지원사업을 지역 녹색환경지원센터에서 위임받아 추진 중에 있는 만큼 시설 교체에 유지보수 및 보수 관리를 추가하여 장비가 지속적으로 잘 돌아가고 최적 효율을 유지할 수 있도록 지원해 나가야 할 것이다.

4-5. 지역별 자문위원회 구성 및 지원시스템 구축

수도권이나 대도시를 제외한 지역은 방지시설에 대한 운영이나 성능 개선, 최적 운영을 위한 노하우를 알려줄 전문 기술인력이 부족한 실정이다. 녹색환경지원센터를 필두로 서류검토 및 현장지원을 위해 활동 중인 “홈닥터”의 경우도 대부분 수도권에서 활동 중인 박사나 기술사급 인력이 충남, 강원, 경기도 등 지방에까지 활동하는 경우 많다. 도 단위의 지역은 수도권이나 대도시 대비 인구수가 적은 만큼 지역 전문인력도 많이 부족한 실정이다. 이러한 전문인력 부족현상을 개선하기 위해 지역 내 전문가로 구성된 지역별 자문위원회가 위촉되고 소형배출사업장과 연계하여 지원해 줄 수 있는 시스템이 구축되어야 할 것이다. 연구인력이 아무리 뛰어난다 한들 그 지역에 대한 특성을 고려하지 않는다면 잘못된 정보나 자료를 제시할 수 있다. 반면에 그 지역에서 활동 중인 지역 전문가는 그 지역적 특성과 현안이슈 등을 파악하고 있기 때문에 상대적으로 지역 현안문제 해결에 큰 도움을 줄 수 있다. 지역 전문가로 구성된 자문위원회를 구성하고, 소형배출 사업장과 연계하여 지원해 줄 수 있는 시스템을 구축한다면 좀 더 효과적인 방지시설 지원이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

05 도로변 비산먼지 특성 조사

1. 특성
2. 제언

05.

조사

1. 지역별 도로변 비산먼지 특성

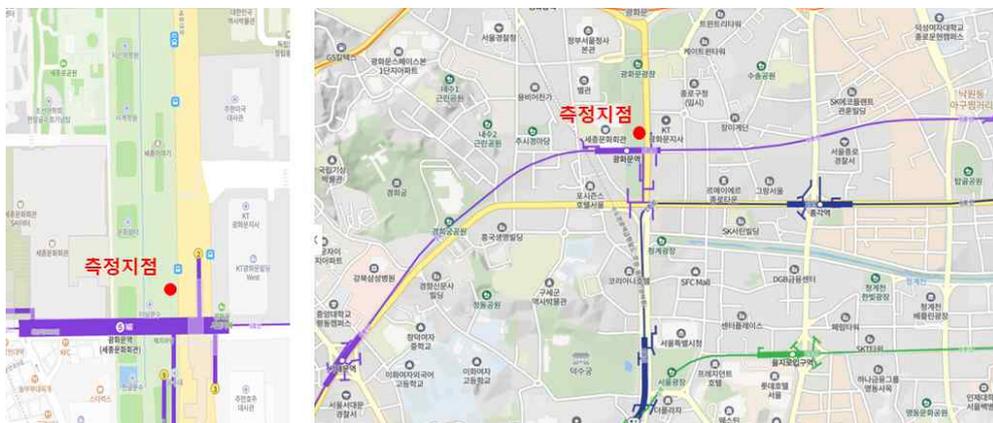
1-1. 서울시

1-1-1. 측정위치 및 일정

서울시 내 도로변 비산먼지 분석을 위해 아래와 같은 장소에서 2022년 9월 7일부터 9월 8일(평일)과 9월 10일부터 9월 11일(주말)에 2회에 걸쳐 연속 관측을 수행하였다. 측정 기간에는 대부분 흐린 날이 지속되었으며, 9월 11일에는 0.1 mm의 비가 내렸다. 측정장소 주변에는 세종대로, 지하문로, 사직로, 율곡로 등이 위치하고 있어 교통정체가 빈번하게 발생한다. 또한 기업 및 학교가 다수 존재하고, 인근에 경복궁, 인사동, 세종문화회관과 같은 문화시설이 위치하고 있기 때문에, 평일과 주말 모두 유동 인구수가 많은 지역이다.

[표 5-1] 도로변 대기오염물질 측정소 설치 지점

도로변 대기오염물질 측정소



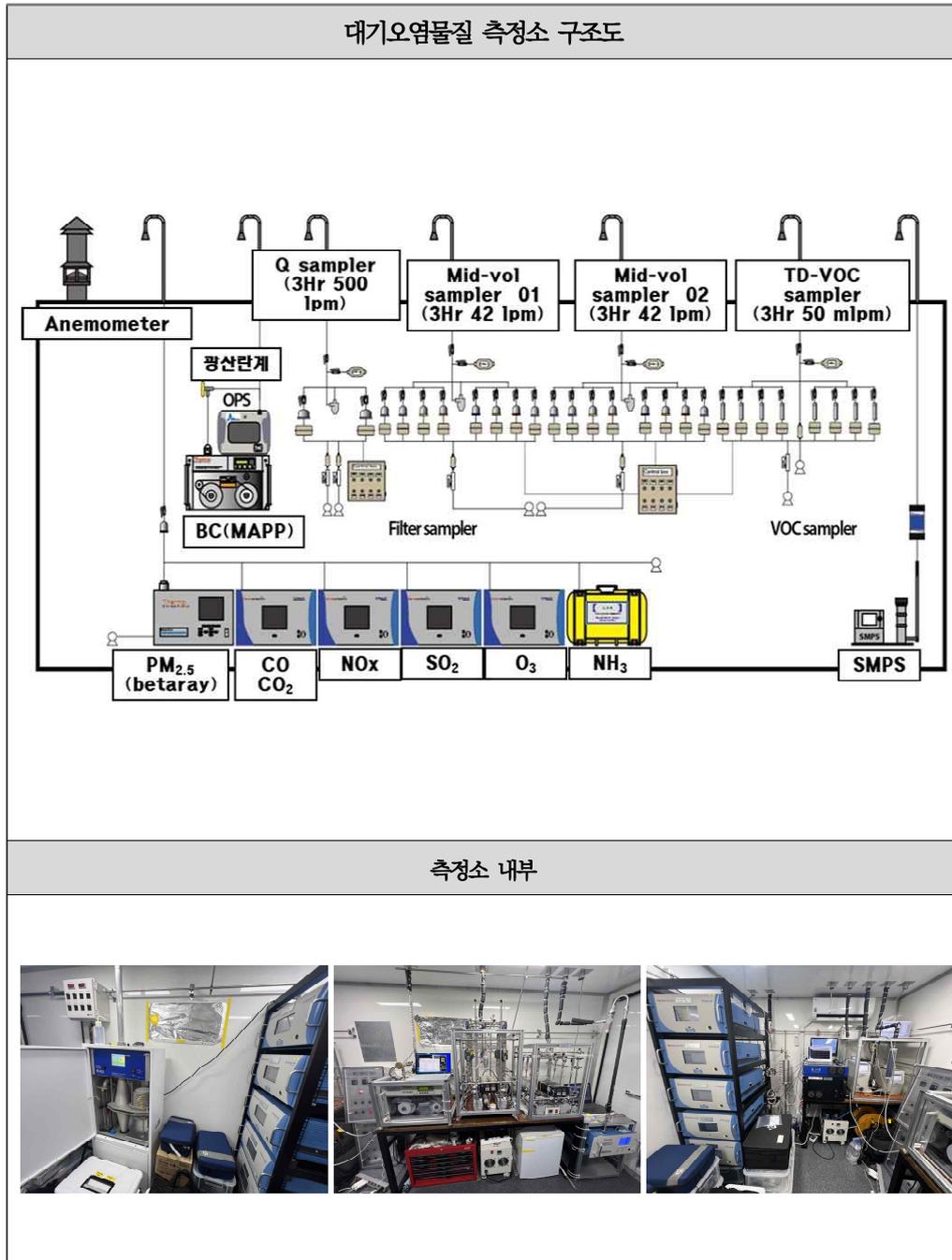
1-1-2. 측정방법

측정소 내부에 가스상 물질(O₃, NO, NO₂, CO, CO₂, SO₂) 및 입자상 물질(PM_{2.5}, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, OC, EC) 측정을 위한 실시간 장비가 비치되어 있으며, 실험실 분석을 위한 포집 장치로 구성되어 있다(표 5-2). 각각의 측정기기 및 포집 장치는 측정소 천장에 설치된 유입구로부터 도로변의 대기를 흡인하여 측정 및 포집하며, 실험실 분석 시료는 표6-3과 같이 냉장 보관하였다. 측정소의 운영은 측정 기간에 측정소 전담 인력 1인을 배치하여 수행하였다. 측정소 전담 인력은 오전과 오후 각 1회 측정소를 방문하여 분석용 시료의 수거를 수행하였으며, 실시간 측정기 등 측정소 내부에 비치된 장비 전반에 대해 운영상태를 점검하였다. 또한 측정소 전담 인력이 수거한 분석용 시료는 매주 1회 별도 인력을 통해 분석실로 이송하여 분석 기간 내에 대기오염물질을 분석하였다. 가스상 물질은 추후 실제 도로변 측정소에서 0.8km 떨어진 곳에 위치한 중구측정소 자료와 비교 분석하였다.

[표 5-2] 측정항목 및 측정 방법

측정항목	방법	해상도
PM _{2.5} mass	β -ray법	1 hr
O ₃	화학발광법 (Chemiluminescence)	1 min
NO _x	화학발광법 (Chemiluminescence)	1 min
CO	비분산적외선법 (NDIR, Non-Dispersive Infrared)	1 min
CO ₂	IR 흡수법 (InfraRed Spectrometry)	1 min
SO ₂	자외선형광법 (UV Fluorescence)	1 min
NH ₃	CRDS (Cavity Ring Down Spectroscopy)	1 min
수용성 이온 (NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺)	필터-IC (Ion Chromatography)	3 hr
OC, EC	필터-OCEC	3 hr
원소물질 (Si, Fe 등 20종)	필터-XRF (X-ray Fluorescence Spectrometry)	3 hr
기상 (풍향, 풍속, 온도, 습도)	초음파법	1 min

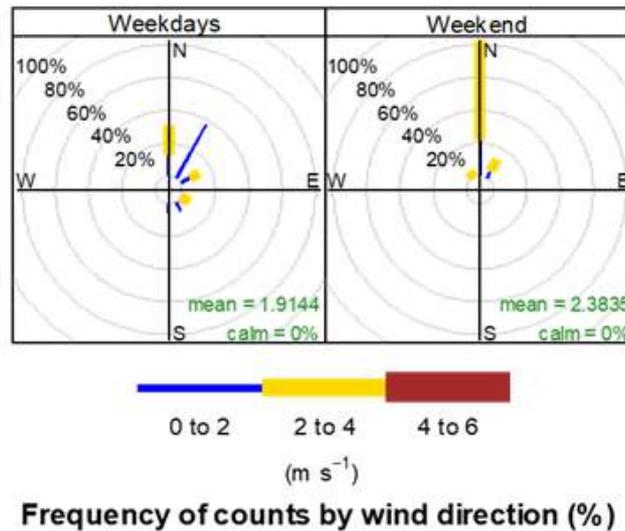
[표 5-3] 대기오염물질 측정소 구조 및 내부



1-1-3. 도로변 대기오염물질 농도 분포

2022년 9월 7일부터 9월 8일(평일)과 9월 10일부터 9월 11일(주말)에 걸쳐 서울시 교통혼잡 도로변에서 가스상 및 입자상 물질과 PM_{2.5} 내 무기염 성분 및 중금속 성분을 연속 관측하였다(그림 5-1~5-5, 표 5-4~5-7). 가스상 물질은 1분 간격으로 데이터가 생산되었는데, 입자상 물질(해상도: 3시간)과의 비교를 위해 3시간 평균하여 사용하였다.

전체 측정기간 동안 북풍이 우세했으며, 주말에는 평일에 비해 평균 풍속이 증가하며 북풍의 영향이 더 강하게 나타났다(그림 6-1). 평일과 주말의 평균 기온(23℃, 24℃) 및 습도(57%, 51%)는 유사한 수준으로 기상 조건은 큰 차이를 보이지 않았다.



[그림 5-1] 측정기간 평일과 주말의 바람장미

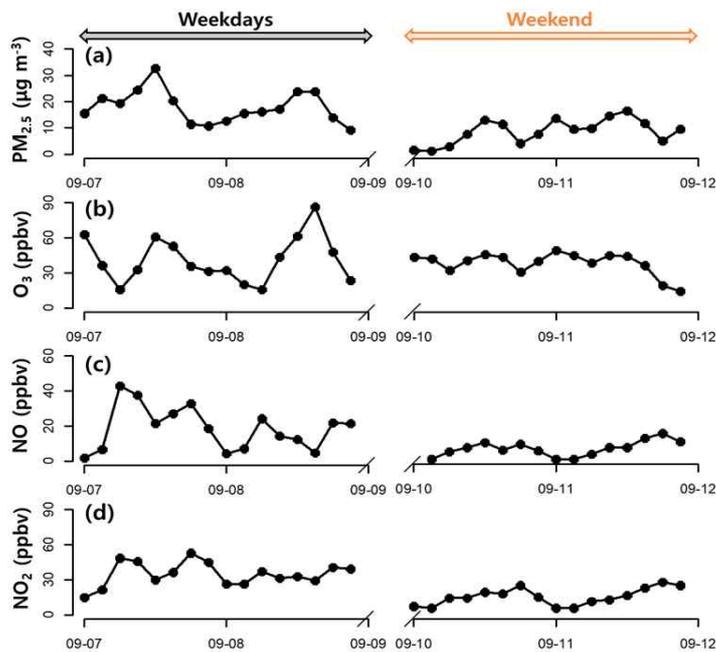
전체 측정 기간 중 가스상 물질인 O₃, NO, NO₂, CO, SO₂, NH₃의 평균 농도는 각 39±15 ppbv, 12±10 ppbv, 24±12 ppbv, 295±89 ppbv, 0.2±0.1 ppbv, 11±3 ppbv였다. 가스상 물질은 모두 평일에 농도가 높고 주말에 농도가 감소하는 경향을 보였다. O₃과 NO₂의 평균 농도는 2022년 9월 서울시 평균 농도(30 ppbv, 16 ppbv)²⁾에 비해 각 30%, 50% 높은 수준이었다. 반면, NO, NH₃, CO의 평균 농도는 과거 서울시 도로변에서 측정한 선행연구³⁾와 비교하였을 때, 각 76 ppbv, 50 ppbv, 802 ppbv로 측정농도가 매우 낮은 수준이었다. 하지만, 선행연구에서는 이동 차량을 이용하여 농도를 측정하였기 때문에 이동 차량에서 직접 배출된 오염물질의 농도도 다소 영

2) 서울특별시 대기환경정보(<https://www.cleanair.go.kr>)

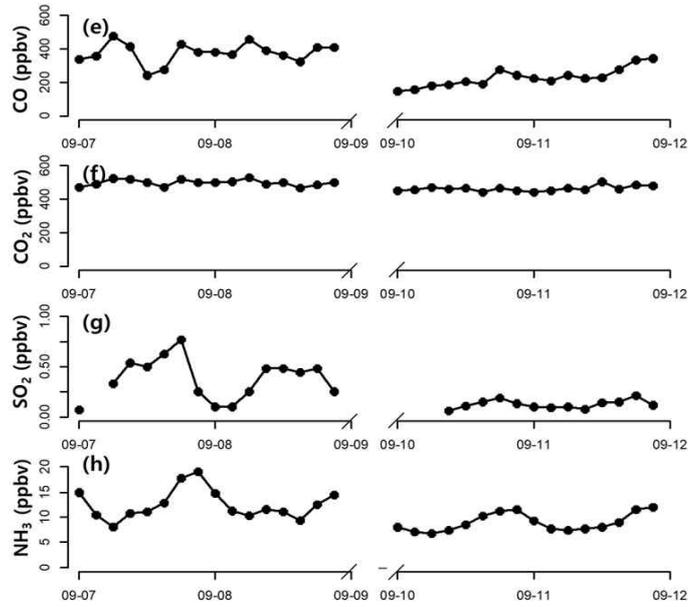
3) 국립환경과학원, 암모니아 배출특성별 농도분포 파악 및 실시간 관측자료 정도관리 방안 마련, 2021

향을 미쳤을 것이라 판단된다. O₃의 측정 기간 중 최대농도는 87 ppbv로 9월 8일에 관측되었으며, NO, NO₂, CO, NH₃의 일 평균 최대농도는 각 43 ppbv, 53 ppbv, 474 ppb, 19 ppbv로 모두 9월 7일에 관측되었다.

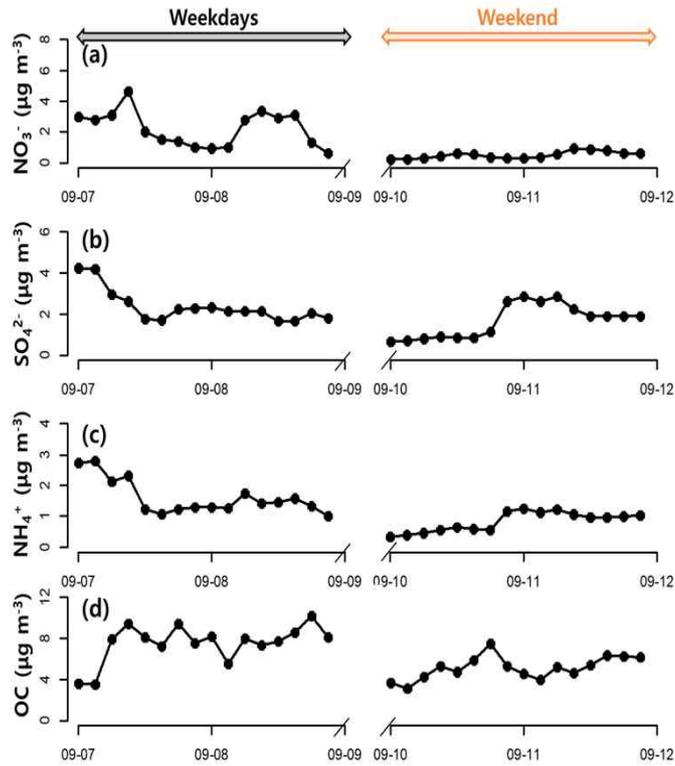
PM_{2.5} 및 PM_{2.5} 내 무기염 성분(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺)과 유기탄소 성분(OC, EC)의 평균 농도는 각 13.00±7.78 μg m⁻³, 1.25±1.10 μg m⁻³, 1.84±0.89 μg m⁻³, 1.14±0.59 μg m⁻³, 6.42±1.82 μg m⁻³, 0.42±0.21 μg m⁻³였다. 입자상 물질은 가스상 물질과 마찬가지로 평일에 비해 주말에 농도가 감소하는 경향이 나타났다. 2018년부터 서울시 전체 PM_{2.5} 월 평균 농도는 9월(12 μg m⁻³)이 가장 낮게 관측되어왔는데, 본 측정 기간 PM_{2.5}의 평균 농도는 2022년 9월 서울시 평균 농도(11 μg m⁻³)에 비해 18% 높은 수준이었다. 반면, 과거 가을철 (9-10월) 서울시에서 관측된 선형연구⁴⁾의 PM_{2.5} 평균 농도(18 μg m⁻³)에 비해 28% 낮은 수준이었다. PM_{2.5}의 측정 기간 중 최대농도는 32.69 μg m⁻³로 NO, NO₂, NH₃의 일 평균 최대가 관측된 9월 7일에 관측되었다. 유기탄소(OC, EC)의 일 최대농도는 각 10.25 μg m⁻³, 1.13 μg m⁻³로 PM_{2.5}와 동일한 날에 일 최대농도를 보였으며, BC도 2.15 μg m⁻³로 최대농도가 관측되었다.

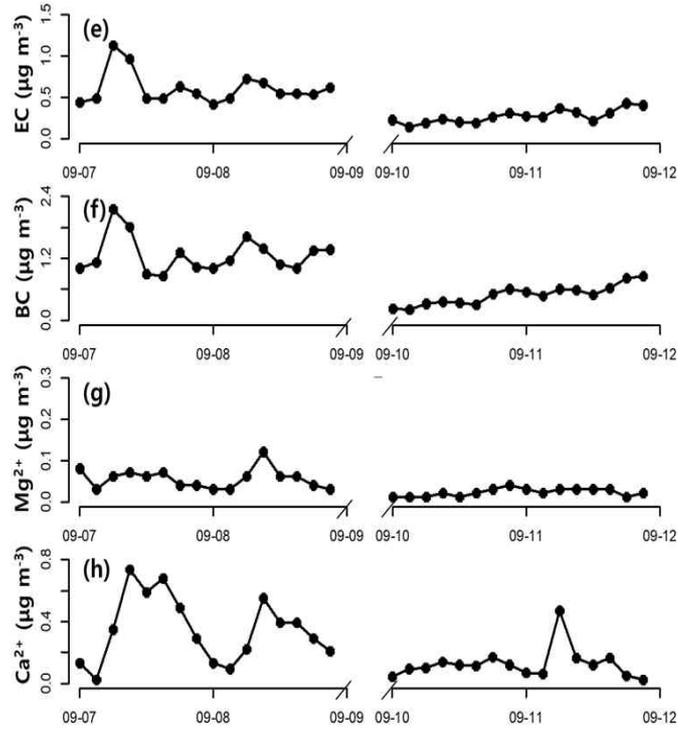


4) 한국연구재단, 수도권 초미세먼지 발생 기작 및 배출 특성 규명, 2022

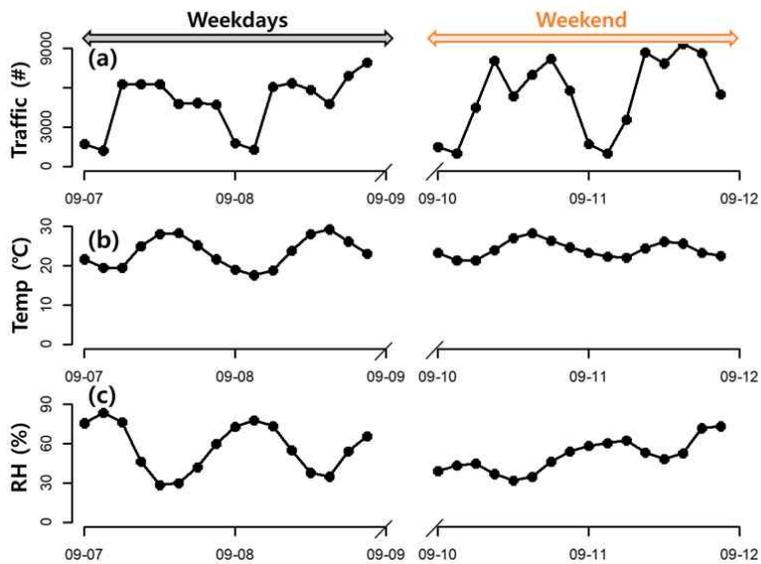


[그림 5-2] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) PM_{2.5}, (b) O₃, (c) NO, (d) NO₂, (e) CO, (f) CO₂, (g) SO₂, (h) NH₃ 농도의 시계열 분포



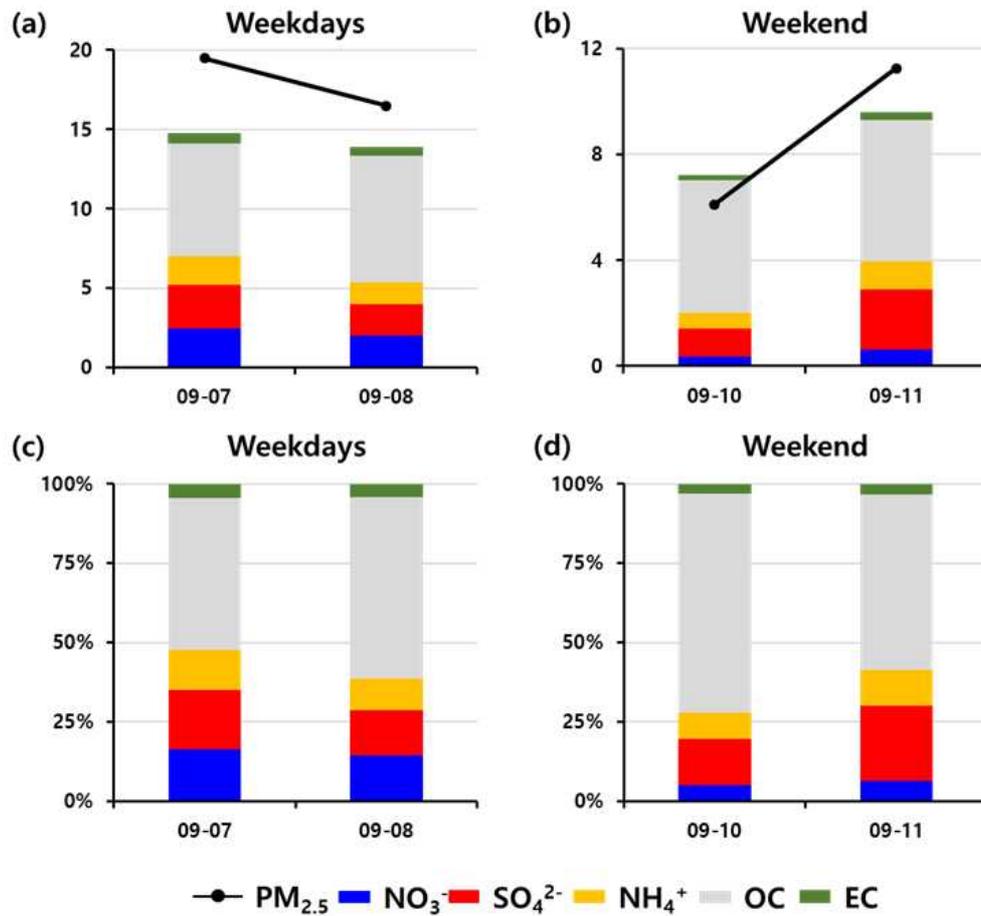


[그림 5-3] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) NO_3^- , (b) SO_4^{2-} , (c) NH_4^+ , (d) OC, (e) EC, (f) BC, (g) Mg^{2+} , (h) Ca^{2+} 농도의 시계열 분포



[그림 5-4] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) Traffic, (b) 온도, (c) 습도의 시계열 분포

무기염 성분(NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+)의 측정 기간 중 일 최대농도는 각 $4.64 \mu\text{g m}^{-3}$, $4.22 \mu\text{g m}^{-3}$, $2.81 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 $\text{PM}_{2.5}$ 와 동일하게 9월 7일에 관측되었다. 일반적으로 무기염 성분은 $\text{PM}_{2.5}$ 내 가장 많은 부분을 차지하는데, 도로변 측정농도는 탄소 성분의 비율이 무기염 성분에 비해 더 크게 관측되었다(그림 5-5). 특히, OC의 비율이 매우 크게 나타났는데, OC의 주요 배출원은 자동차로 이는 측정지점이 도로에 인접해 있어 자동차 배출의 영향이 크게 나타난 것으로 판단된다.



[그림 5-5] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 $\text{PM}_{2.5}$ 및 무기염 성분, 탄소 성분의 질량

[표 5-4] 2022년 도로변 관측일별 가스상 물질의 농도

관측일	O ₃ (ppb)	NO (ppb)	NO ₂ (ppb)	CO (ppb)	CO ₂ (ppm)	SO ₂ (ppb)	NH ₃ (ppb)
9월 7일	40.99	23.55	36.79	363.67	499.95	2.55	13.15
9월 8일	41.41	13.63	32.71	387.05	497.76	2.52	11.91
9월 10일	39.77	5.88	14.64	197.04	458.61	2.27	8.87
9월 11일	36.44	6.98	15.87	259.41	469.64	2.32	9.10

[표 5-5] 도로변 관측일별 PM_{2.5} 농도 및 구성 성분의 농도

단위 : (μg/m³)

관측일	PM _{2.5}	BC	OC	EC	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
9월 7일	19.47	1.27	7.09	0.65	2.42	2.75	1.85	0.06	0.41
9월 8일	16.50	1.25	7.97	0.57	1.99	1.99	1.39	0.05	0.28
9월 10일	6.11	0.36	4.99	0.22	0.37	1.06	0.59	0.02	0.11
9월 11일	11.26	0.62	5.32	0.32	0.63	2.26	1.08	0.02	0.14

[표 5-6] 2022년 도로변 관측일별 원소 성분의 농도

단위 : (μg/m³)

관측일	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr
9월 7일	0.36	0.05	0.18	0.42	0.14	0.35	0.19	0.02	0.00	0.01
9월 8일	0.27	0.04	0.16	0.42	0.08	0.35	0.12	0.01	0.00	0.00
9월 10일	0.18	0.03	0.14	0.32	0.03	0.20	0.13	0.01	0.00	0.00
9월 11일	0.26	0.04	0.12	0.39	0.04	0.31	0.09	0.01	0.00	0.00

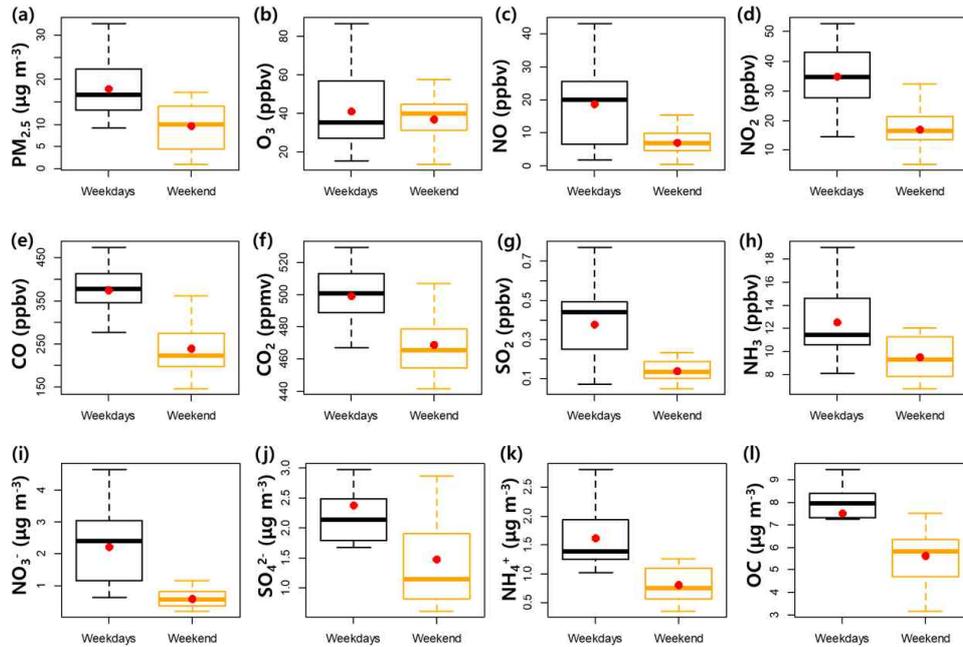
[표 5-7] 2022년 도로변 관측일별 원소 성분의 농도

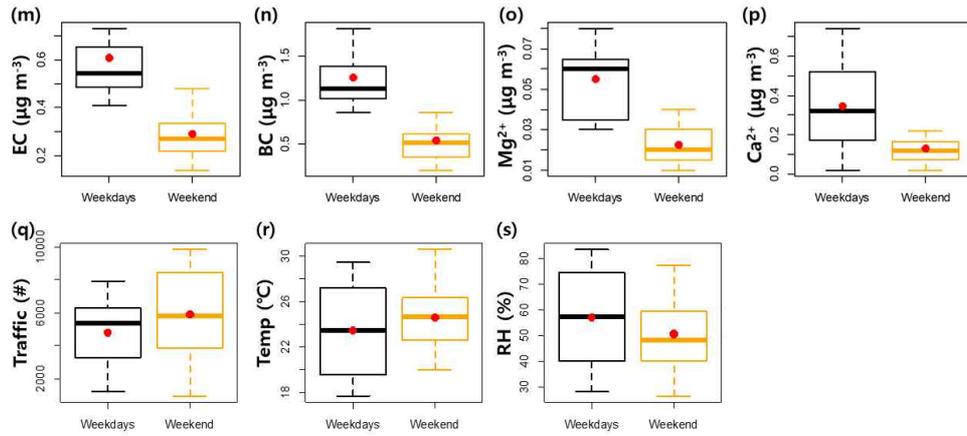
단위 : (μg/m³)

관측일	Mn	Ba	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Se	Br	Pb
9월 7일	0.03	0.03	0.52	0.02	0.02	0.10	0.01	0.00	0.01	0.03
9월 8일	0.02	0.02	0.41	0.02	0.02	0.08	0.01	0.00	0.01	0.04
9월 10일	0.01	0.02	0.25	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
9월 11일	0.01	0.02	0.25	0.02	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01

1-1-4. 도로변 대기오염물질 주간 변화

오염물질 농도의 요일 변화는 인간의 활동과 밀접하게 관련되어 나타난다. 평일(Weekdays)과 주말(Weekend)의 가스상 및 입자상 물질의 평균 농도를 그림 5-6에 비교하여 나타냈다. 가스상 물질(O_3 , NO, NO_2 , CO, SO_2 , NH_3)의 평일 농도는 각 41 ppbv, 19 ppbv, 35 ppbv, 375 ppbv, 0.38 ppbv, 13 ppbv로 주말(37 ppbv, 7 ppbv, 17 ppb, 239 ppbv, 0.14 ppbv, 9 ppbv)에 비해 모두 높게 나타났다. 입자상 물질($PM_{2.5}$, NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , OC, EC, BC) 또한 평일 농도가 각 $17.98 \mu g m^{-3}$, $2.21 \mu g m^{-3}$, $2.37 \mu g m^{-3}$, $1.62 \mu g m^{-3}$, $7.53 \mu g m^{-3}$, $0.61 \mu g m^{-3}$, $1.26 \mu g m^{-3}$ 로 주말($9.54 \mu g m^{-3}$, $0.59 \mu g m^{-3}$, $1.47 \mu g m^{-3}$, $0.81 \mu g m^{-3}$, $5.64 \mu g m^{-3}$, $0.29 \mu g m^{-3}$, $0.4 \mu g m^{-3}$)에 비해 높았다. 일반적으로, 측정장소 주변은 기업 및 학교 등이 위치하며 중앙로, 서소문로, 세종대로, 종로 등 교통량이 많은 도로들이 밀접해 있어 평일 출퇴근 시간 차량 수가 증가하면서, 차량 배출의 영향이 크게 나타난다.



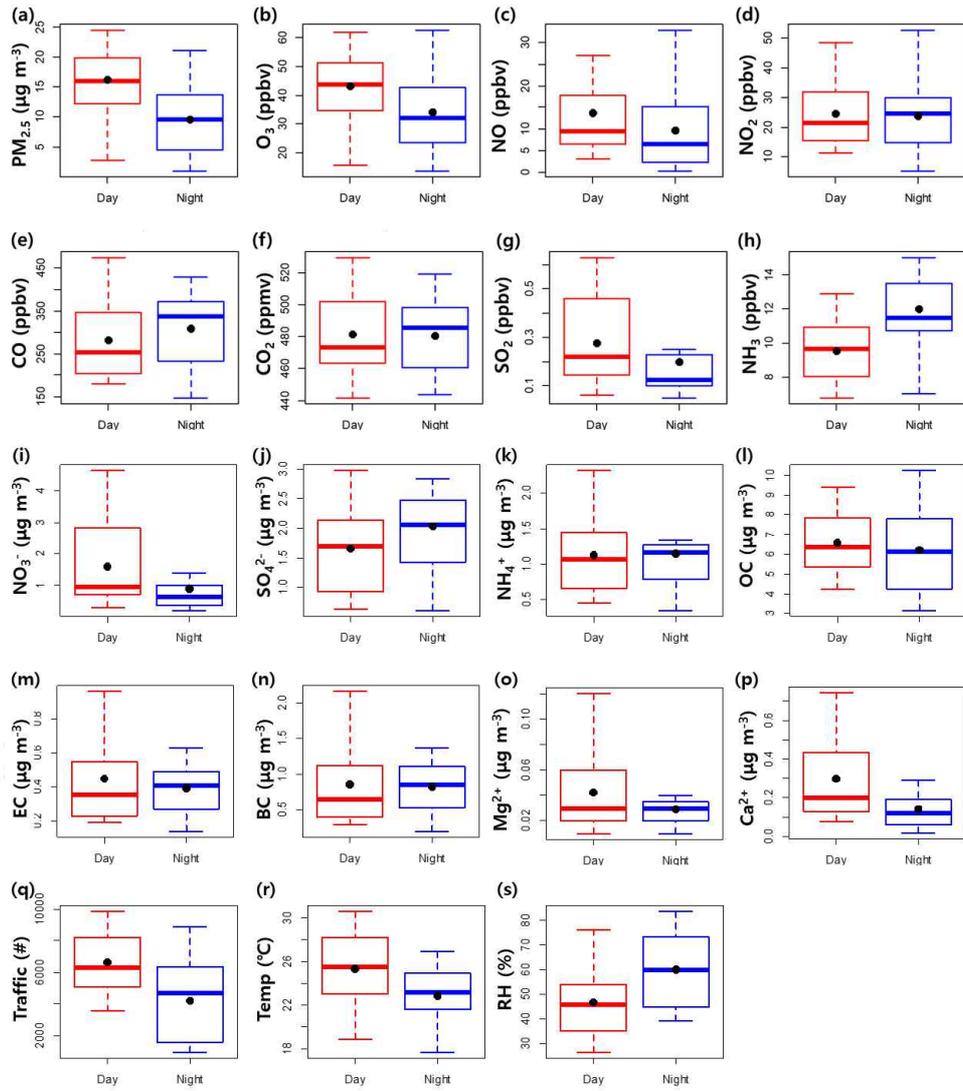


[그림 5-6] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) $\text{PM}_{2.5}$, (b) O_3 , (c) NO, (d) NO_2 , (e) CO, (f) CO_2 , (g) SO_2 , (h) NH_3 , (i) NO_3^- , (j) SO_4^{2-} , (k) NH_4^+ , (l) OC, (m) EC, (n) BC, (o) Mg^{2+} , (p) Ca^{2+} , (q) Traffic, (r) 온도, (s) 습도의 농도 비교

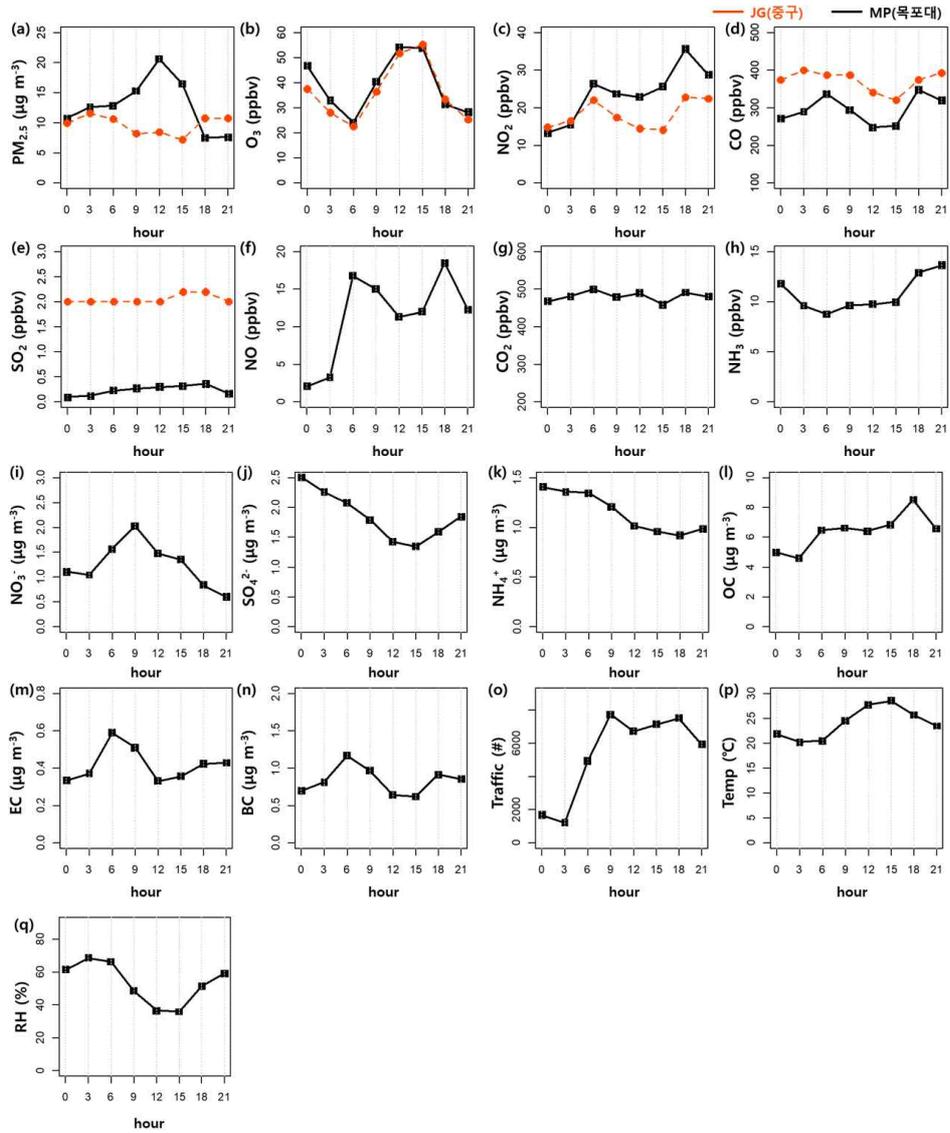
1-1-5. 도로변 대기오염물질 일간 변화

그림 5-7에는 낮과 밤의 평균 농도를 비교하여 나타냈다. 낮과 밤의 기준은 2022년 9월 일출, 일몰 시간을 고려하여 낮(06시~18시), 밤(18시~06시)으로 정의하였다. 가스상 물질은 CO와 NH₃를 제외하고 낮의 평균 농도(O₃: 43 ppbv, NO: 14 ppb, NO₂: 25 ppbv, SO₂: 0.3 ppbv)가 밤 평균 농도(O₃: 34 ppbv, NO: 10 ppb, NO₂: 24 ppbv, SO₂: 0.2 ppbv)에 비해 높게 나타났다. O₃의 시간별 평균 농도는 광화학 반응이 활발한 15시에 54 ppbv로 최고농도를 보이고, 6시에 24 ppbv로 최저농도를 보였다(그림 5-8). NO와 NO₂는 18시에 일 최고농도(18 ppbv, 36 ppbv)를 보이고 0시에 최저농도(2 ppbv, 13 ppbv)를 보였으며, 낮과 밤의 농도 수준 차이가 크지 않았다. 이는 출퇴근 시간 차량의 영향이 컸음을 간접적으로 나타낸다. CO와 NH₃는 밤 평균 농도(282 ppbv, 9 ppbv)가 낮(309 ppbv, 12 ppbv)에 비해 각 9%, 33% 높았다. 또한 CO와 NH₃의 시간별 평균 농도는 각 18시(287 ppbv)와 21시(14 ppbv)에 최고농도를 보였는데, 이는 야간의 혼합고가 낮아지면서 CO와 NH₃의 농도가 농축되면서 밤 시간 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다.

PM_{2.5}의 낮 평균 농도는 16.29 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 밤 평균 농도(9.54 $\mu\text{g m}^{-3}$)에 비해 71% 높은 수준을 보였다. NO₃⁻(낮: 1.60 $\mu\text{g m}^{-3}$, 밤: 0.88 $\mu\text{g m}^{-3}$)는 PM_{2.5}와 마찬가지로 낮에 더 높은 농도를 보였다. 반면, SO₄²⁻와 NH₄⁺은 밤 평균 농도(2.03 $\mu\text{g m}^{-3}$, 밤: 1.15 $\mu\text{g m}^{-3}$)가 낮(1.66 $\mu\text{g m}^{-3}$, 밤: 1.13 $\mu\text{g m}^{-3}$)에 비해 높게 나타났다. PM_{2.5}는 O₃과 유사한 일변화 패턴을 보였으며, 12시에 20.62 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 최고농도를 보였다. NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺은 각 2.02 $\mu\text{g m}^{-3}$ (9시), 2.26 $\mu\text{g m}^{-3}$ (3시), 1.35 $\mu\text{g m}^{-3}$ (3시)로 PM_{2.5} 보다 이른 시간에 피크를 보였다. 유기탄소(OC, EC)는 낮(6.58 $\mu\text{g m}^{-3}$, 0.45 $\mu\text{g m}^{-3}$)과 밤(6.24 $\mu\text{g m}^{-3}$, 0.40 $\mu\text{g m}^{-3}$)의 농도 수준 차이가 크지 않았다. OC와 EC는 NO, NO₂와 유사한 일변화 패턴을 보이며 자동차 배출의 영향을 간접적으로 나타냈다. 하지만, OC는 18시에 8.52 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 최고농도를 보이고 EC는 6시에 0.59 $\mu\text{g m}^{-3}$ 로 최고농도를 보이며, 피크가 나타나는 시간의 차이를 보였다.



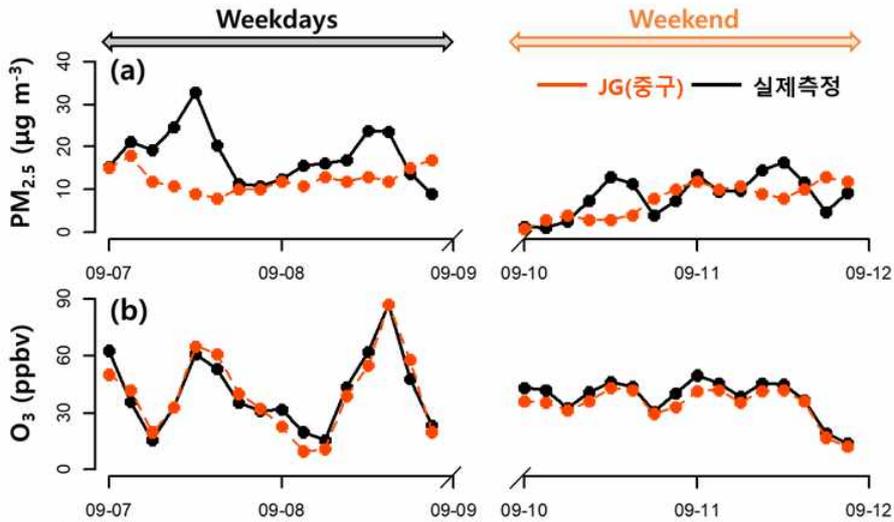
[그림 5-7] 평일(09.07~08)과 주말(09.10~11)기간 (a) PM_{2.5}, (b) O₃, (c) NO, (d) NO₂, (e) CO, (f) CO₂, (g) SO₂, (h) NH₃, (i) NO₃⁻, (j) SO₄²⁻, (k) NH₄⁺, (l) OC, (m) EC, (n) BC, (o) Mg²⁺, (p) Ca²⁺, (q) Traffic, (r) 온도, (s) 습도의 낮과 밤 비교

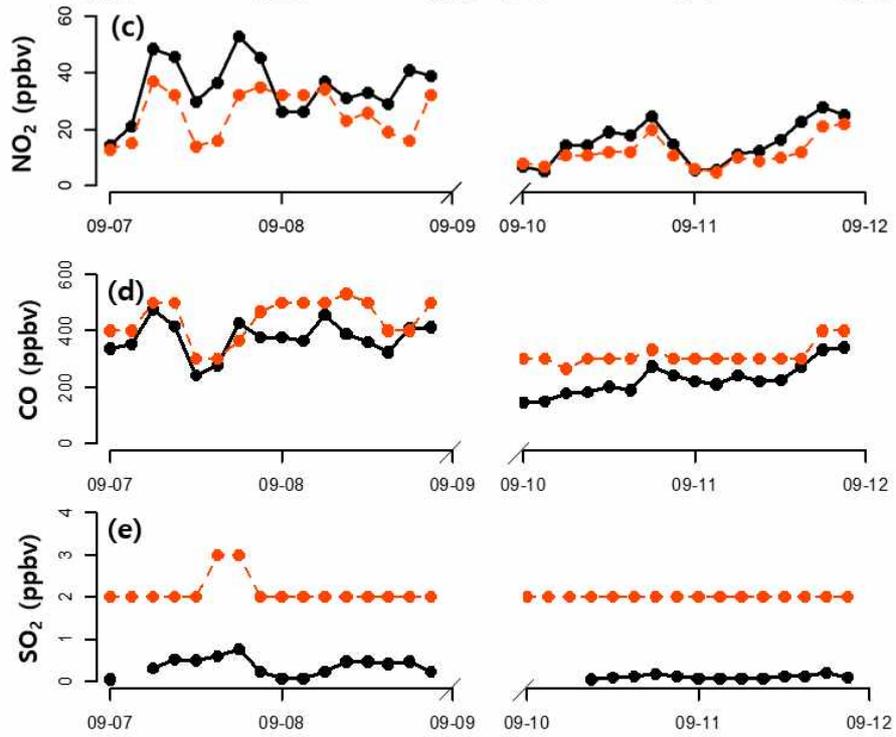


[그림 5-8] 전체 측정기간 동안 (a) $PM_{2.5}$, (b) O_3 , (c) NO_2 , (d) CO , (e) SO_2 , (f) NO , (g) CO_2 , (h) NH_3 , (i) NO_3^- , (j) SO_4^{2-} , (k) NH_4^+ , (l) OC , (m) EC , (n) BC , (o) Traffic, (p) 온도, (s) 습도의 일변화

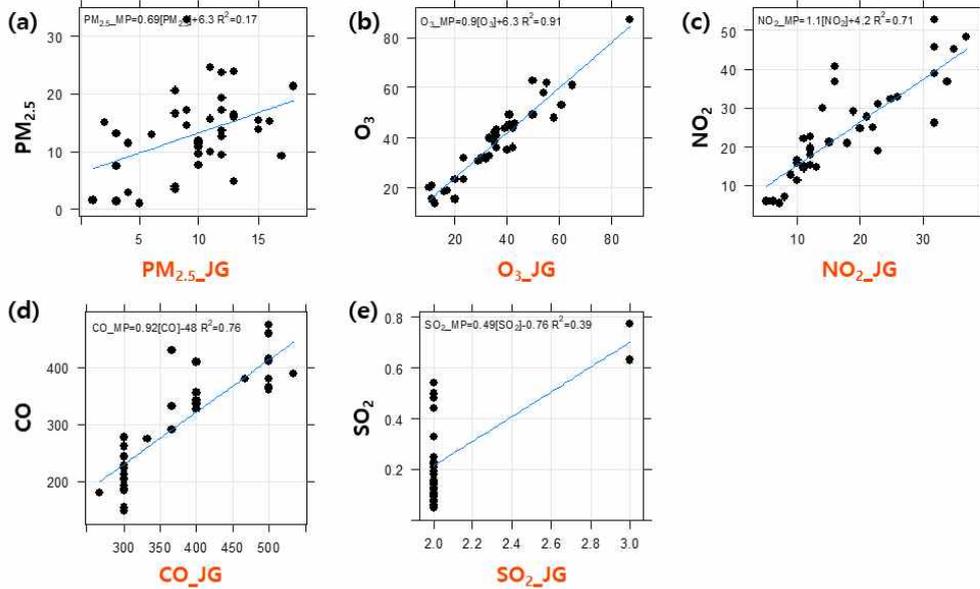
1-1-6. 중구 대기환경측정소, 본 연구 측정자료 비교

도로변에서 측정한 자료와 측정 장소로부터 0.8km 떨어진 곳에 위치한 중구 측정소의 대기오염물질($PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 , CO , SO_2) 측정자료를 비교하여 나타냈다(그림5-9). 측정농도의 비교를 위해 중구 측정소 자료(1시간)를 3시간 평균하여 사용하였다. 도로변 측정농도의 평균은 각 $13.49 \mu g m^{-3}$, 40 ppbv, 25 ppbv, 300 ppbv, 0.26 ppbv였다. 중구 측정소의 측정농도는 각 $9.90 \mu g m^{-3}$, 38 ppbv, 19 ppbv, 376 ppbv, 2.08 ppbv로 $PM_{2.5}$, O_3 , NO_2 는 도로변 측정 자료가 더 높게 측정되었으며, CO 와 SO_2 는 중구 측정소가 더 높게 측정되었다. $PM_{2.5}$ 는 도로변 측정과 중구 측정소 간의 시간 해상도 차이가 분명하게 나타났으며, 이는 그림 5-10의 일변화 패턴에서도 관측되었다. NO_2 는 두 측정자료의 실시간 일변화 패턴은 유사했지만, 도로변 측정자료의 농도가 중구 측정소에 비해 약 32% 가량 높게 관측되었다. 이는 실제 측정자료의 측정 지점이 도로변에 매우 인접하여 중구 측정소보다 높게 관측된 것으로 판단된다. 반면, O_3 은 두 측정 자료가 매우 유사하게 나타났으며, 일 평균 농도 의 수준 차이도 크지 않았다. CO 는 일 변화는 유사하나, 전반적으로 중구 측정소의 base-line이 실제 측정자료보다 크게 나타났다. CO 는 측정장비 및 교정에 따라서 편차가 매우 크게 나타나기 때문에, 이는 두 측정 장비에 대한 비교가 추후 필요할 것으로 판단된다.





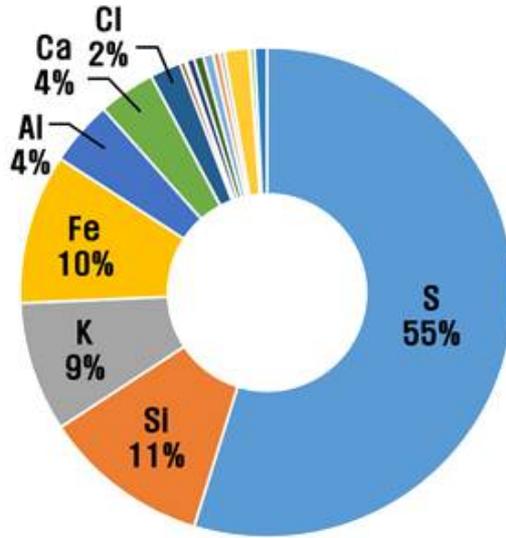
[그림 5-9] 도로변 실제 측정과 중구 측정소의 (a) PM_{2.5}, (b) O₃, (c) NO₂, (d) CO, (e) SO₂의 시계열 농도 비교



[그림 5-10] 도로변 실제측정과 중구 측정소의 (a) PM_{2.5}, (b) O₃, (c) NO₂, (d) CO, (e) SO₂의 상관성 비교

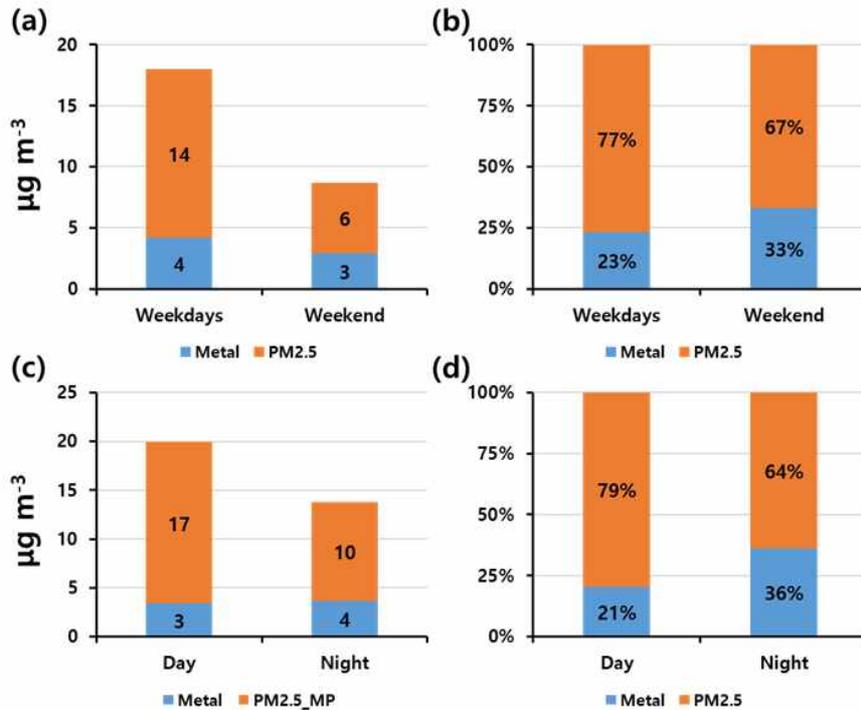
1-1-7. 도로변 측정 중금속 농도 특성

PM_{2.5} 내에 포함된 중금속에 대한 분석을 위해 XRF(X-ray fluorescence spectrometry)분석을 진행하였다. 성분별로는 황(S)이 54.8%로 가장 많은 비율을 차지하였으며, 규소(Si)(11.0%) > 철(Fe)(9.9%) > 칼륨(K)(8.6%) > 알루미늄(Al)(4.3%) > 칼슘(Ca)(3.7%) > 염소(Cl)(2.0%) 순으로 나타났다. 주말과 주중의 절대적인 농도의 차이는 있었지만, 금속 성분의 비율은 주말(33%)이 주중(23%)에 비해 높게 나타났다. 또한, 낮과 밤의 중금속 성분 비율도 밤(36%)이 낮(21%)에 비해 높았다.



[그림 5-11] PM_{2.5} 내 포함된 중금속 구성

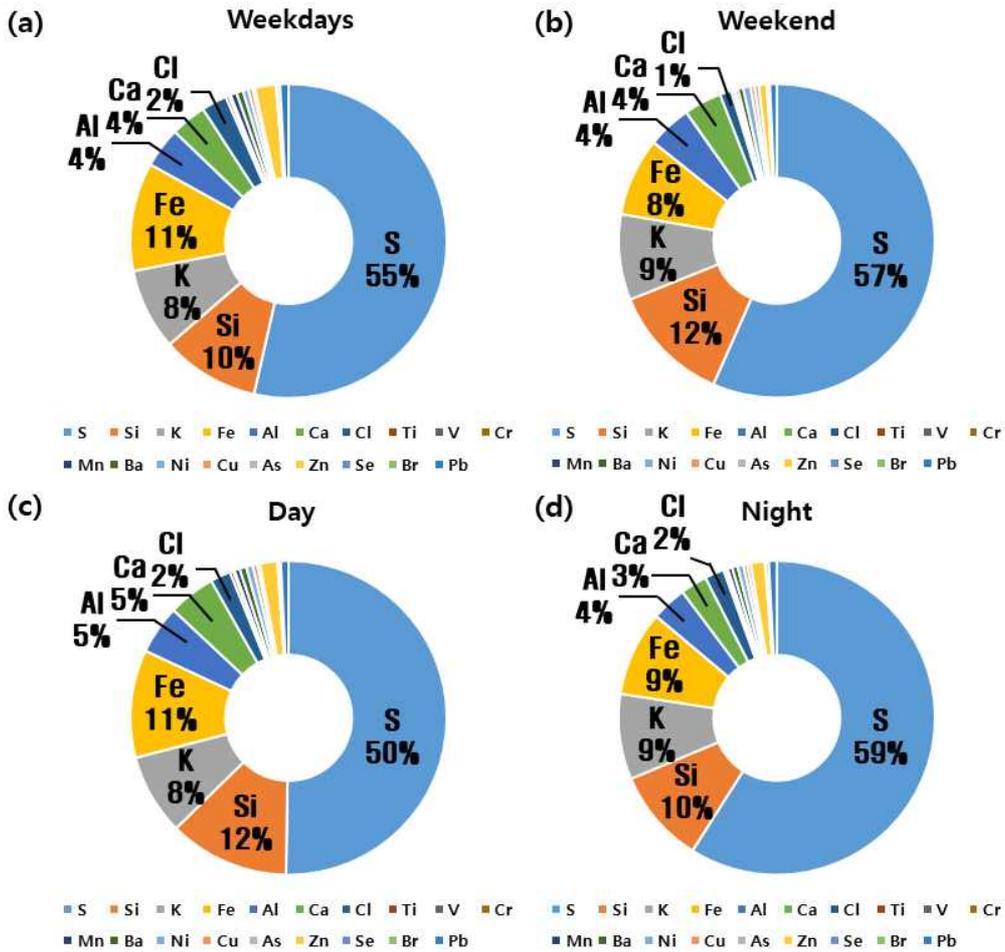
(※ 소수점 첫째자리 반올림하여 표현)



[그림 5-12] 도로변 측정 평일과 주말(a~b) 및 낮과 밤(c~d) PM2.5 내 포함된 중금속 비율

그림 5-13에는 평일과 주말(a,b), 낮과 밤(c,d)의 중금속 성분의 구성비를 나타냈다. 성분별로는 4가지 분류 모두 황(S)이 50.3~59.0%로 가장 높았으며, 다음으로는 규소(Si)가 9.7~12.3%로 높았다. 평일에는 황(S)(53.5%) > 규소(Si)(10.0%) > 철(Fe)(11.2%) > 칼륨(K)(8.4%) > 알루미늄(Al)(4.1%) > 칼슘(Ca)(3.7%) > 염소(Cl)(2.6%) 순으로 나타났고, 주말에는 황(S)(56.6%) > 규소(Si)(12.3%) > 칼륨(K)(8.8%) > 철(Fe)(8.1%) > 알루미늄(Al)(4.5%) > 칼슘(Ca)(3.9%) > 염소(Cl)(1.2%)로 나타났다. 주말에는 황(S)과 규소(Si), 칼륨(K)의 비율이 증가하였으며, 철(Fe)의 비율이 감소하였다. 낮에는 황(S)(50.3%) > 규소(Si)(12.3%) > 철(Fe)(11.1%) > 칼륨(K)(8.3%) > 알루미늄(Al)(5.0%) > 칼슘(Ca)(4.8%) > 염소(Cl)(2.1%) 순으로 나타났고, 밤에는 황(S)(59.0%) > 규소(Si)(9.7%) > 칼륨(K)(8.8%) = 철(Fe)(8.8%) > 알루미늄(Al)(3.6%) > 칼슘(Ca)(2.7%) > 염소(Cl)(2.0%)로 나타났다. 황(S)의 비율은 밤에 크게 증가한 반면, 규소(Si), 철(Fe), 알루미늄(Al), 칼슘(Ca)은 감소하였다. 도로변 측정은 다른 측정 지역(수원역 환승센터, 천안아산 KTX 정류장)에 비해서도 황의 비율이 매우 크게 나타났다. 황(S)은 주로 노후화된 디젤 버스에서 많이 배출되는데, 서울시는 천연가스(CNG)버스 7,071대(2020년 기준)와 전기버스 725대를 운행(2022.06 기준)하고 있으며, 전기버스의 수요를 증가시

키고 있음에도 불구하고 황의 비율이 높게 나타났다. 또한 상대적으로 버스 운행 수가 감소하는 주말과 밤에 비율이 높게 나타나, 이에 대한 추후 분석이 필요할 것으로 판단된다.

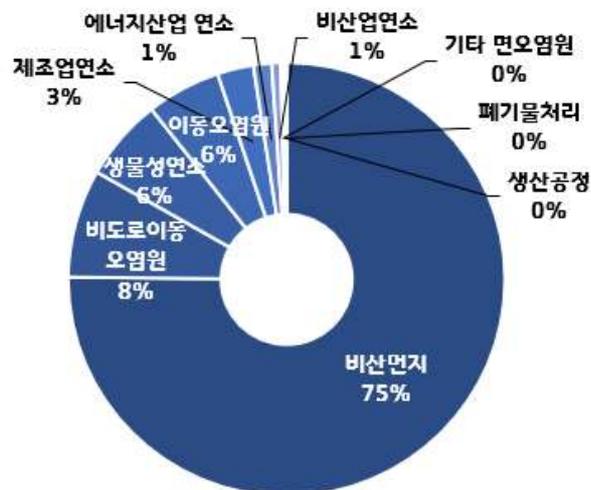


[그림 5-13] 도로변 측정 중금속 함량 비율

(※ 소수점 첫째자리 반올림하여 표현)

1-2. 경기도

도로이동오염원은 주로 자동차 및 이륜차의 주행으로 인해 대기오염물질을 배출하고 있으며, 자동차의 도로 운행으로 재비산되는 먼지인 도로 재비산먼지를 발생시키고 있다. 이러한 도로 재비산먼지는 Al, K, Ca 등의 자연적 발생 외에도 Cd, Pb, Cr 등의 인위적 대기오염물질이 자동차 배출가스, 타이어 및 브레이크 마모 등에 의해 발생하고 있다. 이러한 도로 재비산먼지는 일반적으로 발생하는 미세먼지에 비해 유해한 성분으로 알려져있어 인체에 더욱 해로우며, 입자가 매우 미세하여 호흡기질환을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 「대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법」, 「도로 재비산먼지 이동측정 운영에 관한 규정」 등의 관련 법령 및 환경부 훈령에 따라 도로 재비산먼지를 측정 관리하고 있다. 국가미세먼지정보센터에서 발행하는 국가대기오염배출량 통계자료 CAPSS에 따르면 경기도 비산먼지 PM₁₀ 배출량 5년(2015년부터 2019년까지) 평균은 23,368톤으로 전국 평균의 약 21%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히, 2019년 경기도 PM₁₀ 배출은 비산먼지, 비도로이동오염원, 생물성연소, 이동오염원 순으로 높게 나타났고, 자세한 내용은 그림 5-14에 나타내었다. 경기도 PM₁₀ 배출의 가장 많은 비율을 차지하는 비산먼지에서 배출량은 2019년 23,368톤으로 전년 대비 약 2% 감소하였지만, 비산먼지 중 도로 재비산먼지, 타이어마모, 비포장도로 비산먼지에서는 전년 대비 약 45톤 증가한 것을 확인할 수 있었다.



[그림 5-14] 2019년 CAPSS 경기도 PM₁₀ 배출량

통계청에서 제공하는 「전국사업체조사」⁵⁾의 시도·산업·종사자규모별 사업체수, 종사자 수를 조사한 결과에 따르면, 경기도의 2020년 기준 운수 및 창고업 관련 사업체 수는 149,340개이며, 종사자 수는 312,842명으로 확인되었다. 이 중 시내버스, 시외버스, 전세버스 등을 포함하는 버스 관련 사업체 수는 29,400개이며, 종사자 수는 84,982명으로 나타났다.

경기도교통정보센터에 따르면 2022년 경기도에서 운행 중인 버스는 3,635개 노선으로 시내버스, 시외버스, 마을버스, 저상버스, 공항버스 등으로 구분된다. 이 중 수원시 인허가 노선은 87개, 9개 업체이며, 수원을 경유하는 노선은 171개, 19개 업체에서 운영 중이다.

특히, 수원시의 경우 수도권 버스 정류장 중 가장 많은 노선이 경유하고 있었기에 경기도청에서는 이를 해결하고자 수원역 환승센터를 구성하여 3개의 큰 버스 정류장과 2개의 택시 승차장 그 외 작은 버스 정류장을 운영 중이다. 수원시는 2012년 4월 타당성 조사·기본계획 용역을 시작으로 같은해 12월 환승센터 건립 기본·시설 설계 용역에 착수하였다. 2014년 7월에 착공하여 3년여만인 2017년 6월 16일 개장하였다. 이후 2017년 6월 19일과 7월 3일 두 번의 노선 변경을 통해 경유 노선을 확정하였다. 또한, 2017년 6월 10일부터 버스환승센터 구간으로 버스전용차로를 신설해 24시간 전일제로 「여객자동차 운수사업법」 제3조 및 같은 법 시행령 제3조 제1호에 따른 노선여객자동차 운송 사업용 승합차 통행이 가능하도록 하였으며, 그 외의 차량 통행을 위반 단속하고 있다.

1-2-1. 측정위치 및 일정

경기도 내 도로변 비산먼지 분석을 위해 경기도 수원시 권선구 세화로 136(서둔동)에 건립된 환승센터를 대상으로 설정하였다. 수원역 환승센터는 지하 1층 ~ 지상 2층 규모로 부지 면적은 23,377㎡, 건축 면적 35,160㎡로 구성되어 있다. 지하 1층에는 1호선·분당선 지하철 역사와 환승주차장이 있고, 지상 1층에는 택시 승차장, 환승 및 자전거 주차장, 시티투어버스 승차장이 있으며, 지상 2층에는 버스 정류장이 있고 지상 2층과 지하 1층에는 수원역 및 주변 쇼핑센터로 연결되는 통로가 있다(그림 5-15).



[그림 5-15] 수원역 환승센터 2층 안내도

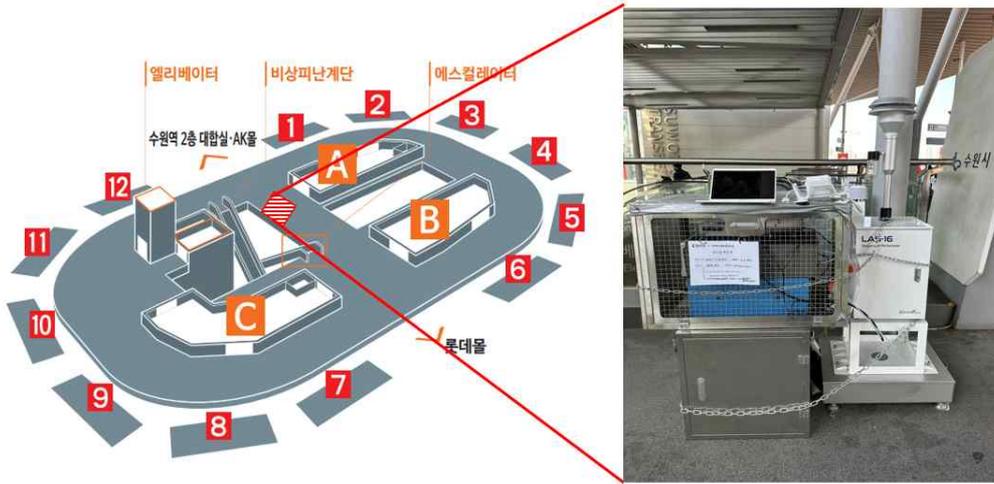
지상 2층에는 총 12개의 정류장과 3개의 승객대기실이 위치하고 있으며, 42개의 노선이 운행 방향에 따라 각 정류장에서 운행 중이다 (표 5-8).

[표 5-8] 수원역 환승센터 2층 운영 노선 정보

정류장 번호 (방면)	구분	노선번호
1 (봉담·발안 방면)	시내일반버스	35, 5-2, 32-4, 50-2, 50-5
2 (봉담·발안 방면)	시내일반버스	16-2, 39, H103, H160, H161

3 (봉담·병점역 방면)	시내일반버스	700-2, 46
4 (비봉·남양 방면)	시내일반버스	999, H120A
5 (비봉·남양 방면)	시내일반버스	5-2, 50-2, 50-3, 50-4, 50-5, 50-6
	좌석버스	1004, 1004-1
6 (비봉·남양 방면)	시내일반버스	400, 400A, H404
7 (팔달구청·화성행궁 방면)	시내일반버스	700-2
8 (화서역)	시내일반버스	30, 30-1
9 (수원역·화서역 방면)	시내일반버스	42
10 (수원여대·호매실 방면)	시내일반버스	11-1
	마을버스	27-2, 27-6
11 (봉담 방면)	마을버스	31, 31-1, 31-2, 6-1, 6-3, 6-4, H131
12 (봉담 방면)	시내일반버스	30, 30-1, 42

측정은 2022년 10월 29일부터 11월 4일까지 총 7일 진행하였고(표 5-9), 필터샘플러는 10월 29일부터 11월 2일까지 5일간 24시간 동안 총 5번 측정하였고, NO_x와 CO 측정기는 10월 29일부터 11월 3일까지 24시간 동안, 11월 4일 12시간 동안 총 7일간 측정하였다. 이동 측정은 10월 29일부터 11월 3일 08시부터 18시까지 주말·주중 영향, 출·퇴근 시간 영향 등을 확인하기 위하여 1시간 단위로 총 66번 측정하였다. 이동 측정 경로는 정류장 1번부터 12번까지 도보 이동하며 이동측정 장비인 Sniffer4D를 이용해 측정했고, 장비 안정화를 위해 측정 시작 전·후 5분씩 안정화를 진행해 1회 관측 시간은 약 15분이 소요되었다. 또한, 이동 측정을 진행하는 동안 실시간으로 시각화자료를 통해 가스상·입자상 대기오염물질 농도를 확인하였다.



[그림 5-16] 수원역 환승센터 측정 위치 및 장비

[표 5-9] 측정 일정 및 장비

측정일정	측정 장비 (측정시간/횟수)
2022.10.29.	필터샘플러, NO _x & CO 측정기 (24시간), Sniffer4D (11회)
2022.10.30.	필터샘플러, NO _x & CO 측정기 (24시간), Sniffer4D (11회)
2022.10.31.	필터샘플러, NO _x & CO 측정기 (24시간), Sniffer4D (11회)
2022.11.01.	필터샘플러, NO _x & CO 측정기 (24시간), Sniffer4D (11회)
2022.11.02.	필터샘플러, NO _x & CO 측정기 (24시간), Sniffer4D (11회)
2022.11.03.	NO _x & CO 측정기 (24시간), Sniffer4D (11회)
2022.11.04.	NO _x & CO 측정기 (12시간)

측정 기간 동안 기상자료는 수원역환승센터 인근 권선구 고색동에 위치한 기상청 자동 기상관측소(automatic weather station, AWS) 1시간 평균 관측자료를 활용하였다. 7일 평균 기온은 11.47℃, 10미터 평균풍속 1.48m/s, 10미터 평균풍향 남서풍으로 나타났다. 측정 기간 중 미세먼지 농도가 높게 나타났던 11월 2일 기상 상황은 평균 기온 11.67℃, 10미터 평균풍속 1.41m/s, 10미터 평균풍향 남서풍으로 나타났다. 측정 마지막 날이었던 11월 4일은 다른 측정일에 비해 기온이 5.66℃로 매우 낮고 10미터 평균풍속이 2.49m/s로 바람이 강하게 부는 것으로 나타났다. 일자별 자세한 내용은 표 5-10에 나타내었다.

[표 5-10] 수원역환승센터 일자별 기상 현황

일 자	기온(℃)	풍속(m/s)	풍향(°)	상대습도(%)
2022.10.29.	13.80	0.99	183.14	73.33
2022.10.30.	14.01	1.05	139.73	70.50
2022.10.31.	14.59	1.57	176.82	69.42
2022.11.01.	12.89	1.34	217.73	83.13
2022.11.02.	10.03	1.33	240.70	62.13
2022.11.03.	9.34	1.56	229.21	67.00
2022.11.04.	5.66	2.49	308.03	40.13

1-2-2. 측정방법

버스에서 배출되는 비산먼지는 국가배출량 산정시 중분류 수준에서 포장도로 재비산먼지, 타이어마모, 비포장도로 비산먼지로 구분하여 산정하고 있으나, 타이어 마모의 경우 활동도 및 배출계수 입수 한계로 산정에서 제외하고 있다. 비산먼지 배출량 산정방법은 통계청의 자동차 주행거리, 지역별 비포장도로 길이와 도로 통행량을 활용하기에 도로 이동오염원의 엔진가열 배출에서 이용하는 주행거리 산정방식 및 1일 비포장도로 통과 차량을 10대로 가정하여 배출량을 산정하고 있다. 그렇기에 버스 승·하차를 위해 정류장에 정차할 때와 같이 공회전에 의한 배출 등은 고려되지 않아 정확한 현황 파악 및 관리 대책 마련에 한계가 있다. 특히나, 버스정류장은 버스 승하차를 위해 많은 유동 인구가 이용하고 있기에 비산먼지에 직접적으로 노출되기 쉬운 환경이지만 배출저감에 대한 관리 방안이 미비하고 배출량 산정 방법 보완도 필요하다. 이에 따라 해당 연구는 12개의 버스정류장이 위치하고 있는 수원역 환승센터를 대상으로 버스에서 배출되는 비산먼지가 주변 대기 환경에 미치는 영향을 기초 조사하기 위해 고정식 및 이동식 측정 장비를 활용해 정류장별 발생하는 대기오염물질 성분을 분석하였다(그림 5-17).



[그림 5-17] 수원역환승센터 고정측정 및 이동측정

수원역 환승센터의 시공간 대기오염물질 분포를 파악하기 위해 정류장 1번과 12번 사

이 유동 인구 밀집 지역에 필터샘플러, NO-NO₂ 측정기, CO 측정기를 설치하여 고정 관측을 수행하였고, 정류장별 대기오염물질 분포 특성 파악을 위해 대기오염 모니터링 및 매핑 시스템인 Sniffer4D를 이용해 이동 측정을 수행하였다. 필터샘플러는 도로변 PM_{2.5}의 중금속 농도를 파악하기 위해 PM_{2.5} 중량농도 측정 장비인 PM_{2.5} sequential sampler(APM Engineering, LAS-16)를 이용하였으며, 미국 EPA FRM PM_{2.5} 측정 방법에 적합하게 설계되어 있고 설정된 주기 및 시간과 유량에 따라 시료 채취가 가능해 대기오염 측정망 PM_{2.5} 모니터링, 미세먼지 발생 작업환경 등에 활용되고 있다. NO_x는 화학발광법을 이용하여 실시간으로 농도를 측정하며, 이는 대기 중에서 산화되는 질소와 O₃의 기상 적정에 따라 생성된 빛으로 측정하는 원리로서 상대적으로 불안정한 일산화질소가 O₃ 존재하에서 NO₂로 산화되는 양을 방식으로 측정된다. CO는 비분산적외선(NDIR) 측정법을 이용하여 대기 중의 CO 가스 농도를 연속 측정하고 US-EPA와 환경부의 승인장비로 R²=0.999로 데이터 품질이 증명되었다. Sniffer4D는 블랙박스 형태로 내부에 장착된 초정밀 환경측정센서를 활용해 가스상 대기오염물질 농도와 미세먼지 입자 크기별 농도 관측이 가능한 장비이며, 실시간 데이터 산출이 가능해 이동 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 데이터 품질 증명은 과학등급측정소(Jinan University, China)에서 공동 비교 테스트를 통해 R²=0.88-0.95로 데이터 품질을 증명하였다.

필터샘플러로 24시간 측정한 PM_{2.5}는 중금속 물질 분석을 위해 금속, 합금, 폴리머, 세라믹, 지질학적 재료, 석유 제품, 토양, 페인트, 식품 및 환경 등을 포함한 다양한 측정자료의 원소 분석이 가능한 X선 형광 분석법(X-ray fluorescence; XRF, Epsilon 4, Malvern Panalytical B.V.)을 이용해 분석을 진행하였다. 표 5-11은 XRF를 이용해 분석한 개별 분석 물질을 나타낸 것이다. XRF를 이용해 총 19개(Al, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, P, S, Cr, Si)에 대해 분석하였고, 이동오염원에서 배출되는 대기오염물질 관련하여 기존 연구보고서와 도로이동오염원 배출 관련 논문을 검토하여 개별 물질 항목에 대한 분석을 실시하였다(이형우 외, 2008; 이태정 외, 2009; 허종원 외, 2018).

[표 5-11] XRF 측정 물질

측정 물질	Certified values (mg/kg)	Results \pm std dev (mg/kg)
Al ₂ O ₃ (%)	11.92	12.10 \pm 0.02
Ti	3837	3625 \pm 4
V	81.4	83.1 \pm 1.4
MnO(%)	0.08	0.08 \pm 0.01
Fe ₂ O(%)	4.48	4.35 \pm 0.01
Ni	31.5	31.1 \pm 0.4
Co	12.7	12.2 \pm 0.1
Cu	24.3	22.0 \pm 0.3
Zn	68	59.6 \pm 0.3
As	12.7	12.6 \pm 0.2
Sr	236	227.3 \pm 0.2
Mo	1.16	1.06 \pm 0.08
Cd	0.13	<1
Ba	480	499 \pm 2
Pb	21	19.1 \pm 0.2
P ₂ O ₅ (%)	0.18	0.18 \pm 0.01
SO ₃ (%)	0.03	0.05 \pm 0.01
Cr	68	72.1 \pm 0.8
SiO ₂ (%)	58.60	54.84 \pm 0.05

대기오염물질 중 중금속은 희토류 금속보다 무거운 금속으로 정의되고 있으며, 특히나 이러한 중금속은 비스무트나 금을 제외하고는 모두 인체에 해로운 영향을 미칠 수 있는 치명적 독성을 가지고 있다. 개별 물질 중 Al, Fe, Ti, Si, Cd는 지각기원으로 토양 및 도로비산 관련 영향을 받고, Ni, Cu, Pb, S는 휘발유나 경유 등의 차량용 연료 연소, Cu, Zn, Cd는 자동차 브레이크 라이닝 등의 차량용 소모품 마모와 오일첨가제 등과 같은 인위적 발생 영향을 받아 대기 중으로 배출되는 것으로 알려져 있다. 특히 이 중 As(비소), Cr(크롬), Cd(카드뮴), Pb(납) 등은 유해 중금속으로도 알려져 있다⁶⁾. As는 준금속이지만 중금속과 비슷한 성질을 가지고 있고, 독성도 수은이나 납과 비슷한 것으로 알려져 있다. 인체 위해성은 심혈관계 질환, 암, 피부질환, 호흡계 질환 등으로 알려져 있다. Cr는 천연가스, 석유, 석탄의 연소과정, 자동차의 배출가스 등에서 발생하고 있다. 형태에 따라 건강에 미치는 영향이 다르게 나타나는데 6가 크롬은 발암물질로 알려져 있으며 궤양, 코 연골화, 위장자극 등을 일으키는 것으로 알려져 있다. Cd는 지각

6) 식품의약품안전처, 2020, 중금속(5종) 총 노출량 평가 및 인체 통합위해성평가 기술개발 연구

에서 흔히 발견되는 금속이며, 석탄이나 석유와 같은 화석연료를 연소시킬 때 대기 중으로 배출된다. 인체에 노출된 카드뮴은 섭취시 위에 심각한 손상을 주며, 흡입을 하게 되면 폐에 심각한 손상을 일으키고, 뼈를 연골화 시키는 등 인체 위해성이 있으며 이따이따이 병을 유발하는 것으로 알려져 있다. Pb는 주변 환경에서 흔히 볼수 있는 중금속으로 자동차 배터리, 가솔린 첨가제 등에서 발생하고 있다. 인체에 노출된 납은 체내에 일부만 축적되는데 주로 뼈, 혈류, 골수, 신장과 같은 연질세포 속에 축적되어 지능저하, 행동장애, 심장질환, 태아 성장 방해 등을 유발하는 독성물질로 알려져 있다. 우리나라는 1991년 2월부터 납에 대한 대기환경기준을 마련해 관리하고 있으며, 무연휘발유 사용 이후 납의 농도가 매우 낮아져 국민들의 납에 대한 노출과 혈액 중 납 함유량이 크게 감소하였다.

우리나라는 1984년부터 경유자동차 배출가스 규제를 시행하였으며 배출기준을 단계적으로 강화하였다. 시내버스(경유)의 경우 2014년부터 EURO-6가 적용되었고, 시내버스(CNG)의 경우 2013년부터 EURO-6 기준보다 약 13% 강화된 기준이 적용되어 대기오염물질 배출을 규제하고 있다(표 5-12와 5-13).

[표 5-12] 중량 휘발유 및 가스자동차(버스) 배기가스 배출허용기준

(단위: g/kWh)

적용연도	CO	HC	NOx	기타	측정방법
1991.02.02.	33.5	1.3	11.4		D-13 모드
2000.01.01.	33.5	1.3	5.5	CH ₂ O 0.01	D-13 모드
2002.07.01.	4.0	0.9	3.5		D-13 모드
2006.01.01.	1.5(0.4)	0.46(0.2)	3.5		ND-13 모드
	4.0	0.55	3.5		ETC 모드
2009.01.01./ 2010.07.01.	4.0	0.55	2.0		ETC 모드
2013.01.01./ 2014.01.01.	4.0	0.14	0.40	NH ₃ 10ppm	WHTC 모드
2016.01.01.	4.0	0.14	0.40	NH ₃ 10ppm / CH ₄ 0.5	WHTC 모드

[표 5-13] 경유자동차(버스) 배기가스 배출허용기준

(단위: g/kWh)

적용연도	CO	HC	NOx	PM	입자개수 #/kWh	매연	비고 (측정방법 /EURO 기준)
1996.01.01.	4.9	1.2	11.0	0.9		35%이하	
1998.01.01.	4.9	1.2	6.0(9.0)	0.25(0.5)		25%이하	
2000.01.01.	3.0	1.0	6.0	0.2		20%이하	
2002.01.01.	2.1	0.66	5.0	0.15(0.1)		15%이하	EURO-2
2003.01.01.	2.1	0.66	5.0	0.1		15%이하 K=0.8m ⁻¹ -1	EURO-3
2006.10.01./ 2008.01.01.	1.5/4.0	0.46/0.55	3.5/3.5	0.02/0.03		15%이하 K=0.5m ⁻¹	EURO-4
2009.09.01./ 2010.10.01.	1.5/4.0	0.46/0.55	2.0/2.0	0.02/0.03		K=0.8m ⁻¹	EURO-5
2014.01.01./ 2015.01.01.	1.5/4.0	0.13/0.16	0.40/0.46	0.01/0.01	8×10 ¹¹ 이하 / 6×10 ¹¹ 이하		WHSC /WHTC EURO-6
2017.10.01.	1.5/4.0	0.13/0.16	0.40/0.46	0.01/0.01	8×10 ¹¹ 이하 / 6×10 ¹¹ 이하		WHSC /WHTC EURO-6

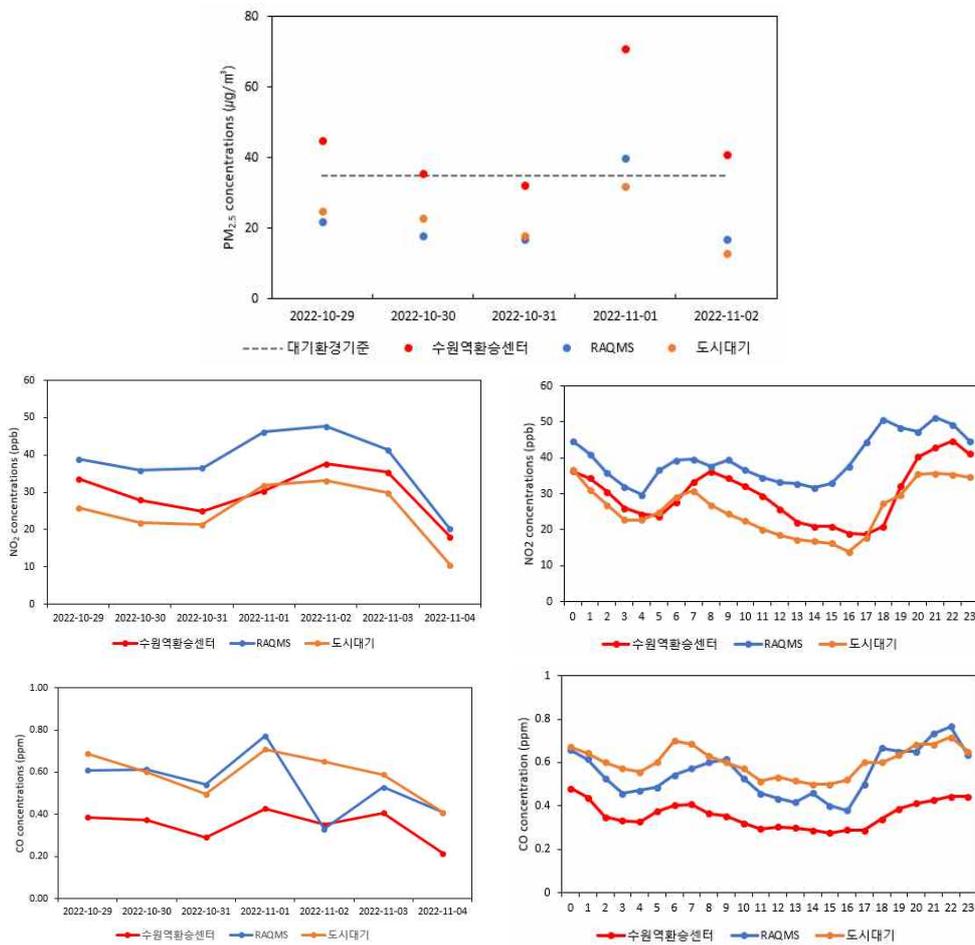
경유 및 CNG 버스 배기가스저감을 위해 NOx를 저감하는 SCR과 EGR, PM을 저감하는 POC과 DPF, OC, 삼원촉매 등의 배기가스 후처리장치에 대한 기술 개발이 이루어지고 있으며, EURO-6 대응기술로는 NOx와 PM 배출 억제를 위한 DPF, SCR 촉매 등의 기술이 널리 사용되고 있다. 또한, 최근 들어 대기오염물질 배출허용기준 강화와 함께 친환경버스(CNG버스, 전기버스 등)로의 교체가 활발히 이루어지고 있어 오염물질 배출 저감에 실질적인 효과를 발휘하고 있다. 그럼에도 불구하고 현재 경유버스는 운행 중이며 차량 노후화에 따라 오존 전구물질인 NOx와 PM 배출량이 증가할 가능성이 크고 저감장치가 제대로 작동하지 않을 가능성이 있어 인체 건강에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 버스 통행이 많이 이루어지고 있는 버스 전용 차로에서 대기오염물질 분포 현황을 파악하여 향후 대기오염물질 저감을 위한 대응 방안 제안이 필요할 것이다.

1-2-3. 수원역환승센터 대기오염물질 고정측정 분석

수원역환승센터는 버스전용차로로 시내버스, 광역버스, 마을버스 등 노선여객자동차 운송 사업용 승합차만이 운행할 수 있으므로 버스에서 배출되는 대기오염물질의 영향만을 정확히 확인할 수 있었다. 측정 동안 NO_x, NO₂, NO, CO는 고정측정을 통해 1분 간격으로 얻어진 자료를 24시간 평균하였으며, 평균 농도가 NO_x 47.52ppb, NO₂ 30.12ppb, NO 17.40ppb, CO 0.36ppm으로 나타났다. PM_{2.5}의 경우 중금속 분석을 위해 1일간 측정된 결과를 분석에 사용하였고, 자세한 일자별 농도 분포는 표 5-14에 나타내었다. 도로변 대기오염물질 분석을 위해 측정지역 주변의 고색동(도로교통관리사업소) 도시대기 측정소와 경수대로(동수원사거리) 도로변 측정소(oadside air quality monitoring station, RAQMS) 측정 자료를 활용해 비교분석 하였다(그림 5-18). 측정 결과 수원역환승센터 PM_{2.5} 평균 농도는 44.84 μ g/m³로 RAQMS 22.00 μ g/m³와 도시대기 21.00 μ g/m³에 비해 2.04배와 2.14배 높게 나타났다. 또한, 모든 측정일 동안 수원역환승센터의 PM_{2.5} 농도가 모두 높게 나타났고, 측정일 5일 중 하루를 제외한 4일 모두 24시간 평균 PM_{2.5} 대기환경기준인 35 μ g/m³를 초과하는 것으로 나타났다(표 5-14와 그림 5-18). 하지만 RAQMS에서는 하루를 제외한 나머지 4일에서 대기환경기준을 만족하는 것으로 나타났고, 도시대기에서는 측정일 모두 대기환경기준을 만족하는 것으로 나타났다. NO₂의 경우 30.64 \pm 12.53ppb로 RAQMS 39.39 \pm 12.98ppb에 비해 약 12.49% 낮고 도시대기 25.91 \pm 12.40에 비해 약 8.37% 높은 것으로 나타났다. 특히, 수원시의 RAQMS는 주변에 주요 도로가 위치하고 있어 수원역환승센터, 도시대기 측정소에 비해 상대적으로 높은 농도 값을 보인 것으로 판단된다. 세 측정지점 모두 일 평균과 시간 평균이 비슷한 변화 경향을 보였고, 모두 NO₂ 대기환경기준인 24시간 평균 0.06ppm 이하와 1시간 평균 0.10ppm 이하를 만족하였다. CO의 경우 0.36 \pm 0.12ppm으로 RAQMS 0.55 \pm 0.22ppm과 도시대기 0.60 \pm 0.15ppm에 비해 약 21%과 약 25% 낮은 것으로 나타났다. CO는 도시대기와는 유사한 경향을 보였지만 RAQMS에서 하루를 제외한 6일만 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났지만, 모두 대기환경기준을 만족하는 것으로 나타났다.

[표 5-14] 수원역환승센터 일자별 고정측정 일평균 결과

일 자	측정항목 (단위)				
	NOx (ppb)	NO2 (ppb)	NO (ppb)	CO (ppm)	PM2.5 (μg/m³)
2022.10.29.	49.85	33.58	16.27	0.39	44.72
2022.10.30.	35.58	27.96	7.61	0.37	35.41
2022.10.31.	28.76	24.93	3.84	0.29	32.26
2022.11.01.	44.75	30.36	14.39	0.43	70.79
2022.11.02.	75.26	37.63	37.63	0.35	41.00
2022.11.03.	67.85	35.39	32.46	0.41	-
2022.11.04.	25.16	18.00	7.16	0.21	-



[그림 5-18] 수원역환승센터 고정측정 PM_{2.5}, NO₂, CO와 RAQMS, 도시대기 일 평균 및 시간 평균 비교

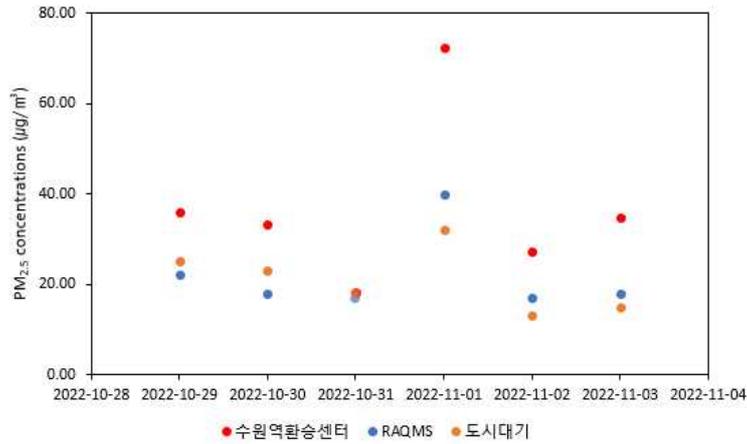
1-2-4. 수원역환승센터 대기오염물질 이동측정 분석

수원역환승센터는 타원형의 구조로 12개의 정류장이 분포해있기에 각 정류장별 대기 오염물질 농도의 시공간 분포를 확인해보고자 Sniffer4D를 이용해 이동측정을 수행하였다. 측정 동안 PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, CO, SO₂, VOCs, H₂S는 이동측정을 통해 1시간 간격으로 정류장 1부터 12까지 도보 이동하며 측정을 수행하였고, 1회 측정시 약 15분이 소요되었다. Sniffer4D에 의해 측정되는 대기오염물질농도는 1초 간격으로 획득할 수 있으며 본 연구에서는 해당 자료를 일자별 11시간 평균하였다. 이동 측정을 수행하였던 6일간의 대기오염물질 평균 농도는 PM₁₀ 40.06 μ g/m³, PM_{2.5} 36.96 μ g/m³, NO₂ 10.63 μ g/m³, CO 0.79mg/m³, SO₂ 6.31 μ g/m³, VOCs 0.17ppm, H₂S 4.64 μ g/m³로 나타났다. 자세한 가스상·입자상 대기오염물질의 일자별 평균 농도 분포는 표 5-15에 나타내었다.

[표 5-15] 수원역환승센터 일자별 이동측정 결과

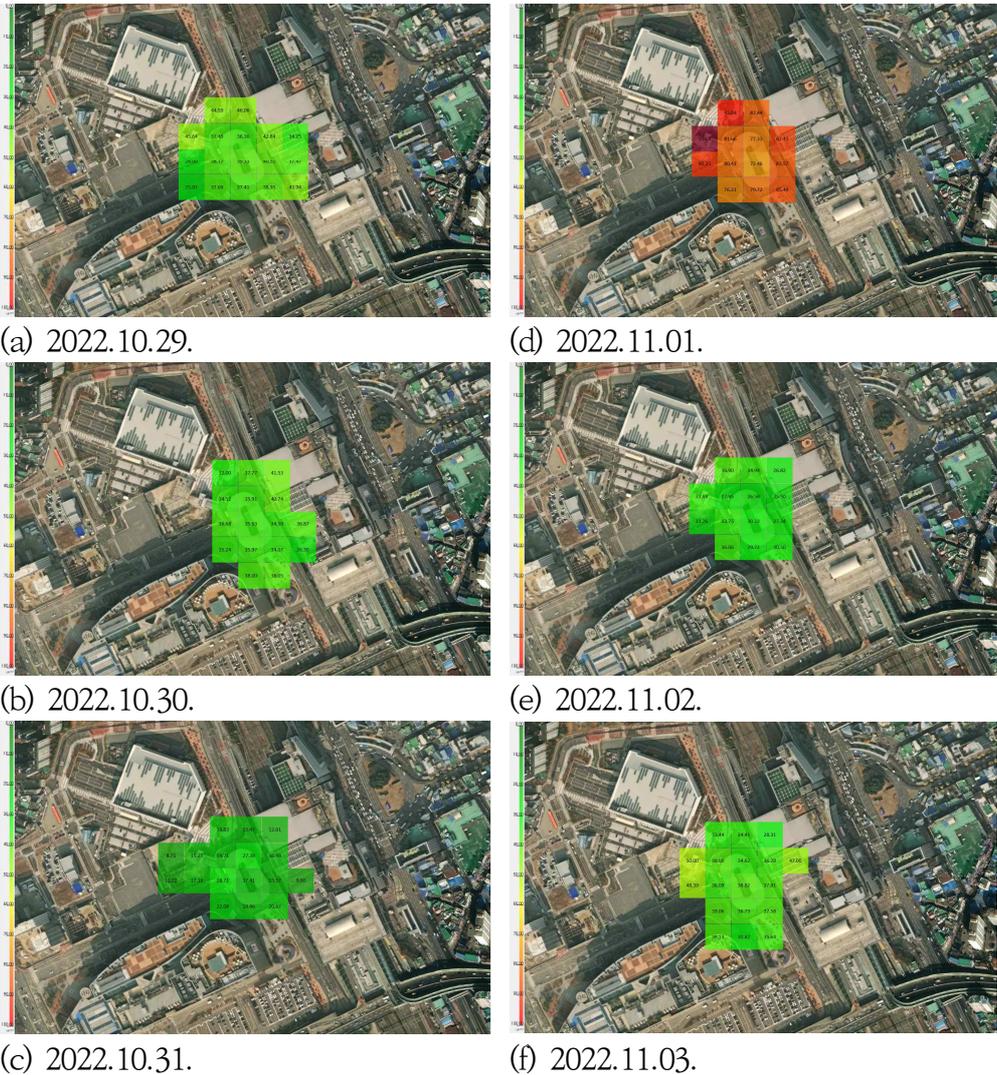
일 자	측정항목 (단위)						
	PM ₁₀ (μ g/m ³)	PM _{2.5} (μ g/m ³)	NO ₂ (μ g/m ³)	CO (mg/m ³)	SO ₂ (μ g/m ³)	VOCs (ppm)	H ₂ S (μ g/m ³)
2022.10.29.	38.94	36.05	4.78	0.75	6.59	0.17	2.35
2022.10.30.	35.89	33.41	4.09	0.74	5.80	0.18	1.53
2022.10.31.	19.32	18.11	2.10	0.71	6.85	0.18	4.20
2022.11.01.	79.16	72.27	16.70	0.88	8.39	0.16	14.89
2022.11.02.	29.29	27.15	12.63	0.77	4.31	0.15	1.17
2022.11.03.	37.74	34.77	23.46	0.86	5.94	0.18	3.71

이동측정 결과 수원역환승센터에서 측정된 PM_{2.5} 평균 농도는 36.96 μ g/m³로 RAQMS 22.00 μ g/m³와 도시대기 21.00 μ g/m³에 비해 1.68배와 1.76배 높게 나타났다. 또한, 모든 측정일 동안 수원역환승센터에서 측정된 PM_{2.5} 농도가 RAQMS와 도시대기측정망 자료에 비해 모두 높게 나타났다. 측정일 6일 중 주말과 주중 하루씩을 제외한 4일 모두 24시간 평균 PM_{2.5} 대기환경기준인 35 μ g/m³를 만족하는 것으로 나타났지만, RAQMS와 도시대기측정망에서 측정된 PM_{2.5} 농도에 비해 높게 나타났다(그림 5-19). 또한, 고정측정 PM_{2.5} 변화 경향과도 매우 유사한 경향을 보였다.



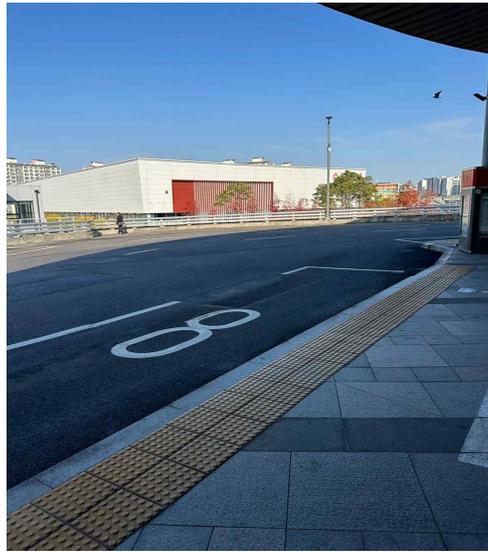
[그림 5-19] 수원역환승센터 이동측정 PM_{2.5}와 RAQMS, 도시대기 일 평균 비교

대기오염물질 공간적 분포를 확인해보고자 수원역환승센터를 중심으로 일 평균 PM₁₀ 농도 자료를 매핑해 대기오염물질 분포 특성을 확인하였다(그림 5-20). 측정일 6일 중 5일은 농도 분포가 전체적으로 평균 농도 50µg/m³ 이하로 나타났으며, 11월 1일엔 평균 농도가 70µg/m³을 초과하는 것으로 나타나 상대적으로 매우 높은 농도 분포를 나타냈다. 에어코리아 도시대기측정망 측정 결과에 따르면 해당 일자에는 수원역환승센터 주변으로도 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도가 함께 높아진 것으로 나타나 대기질 악화 영향을 함께받아 고농도 분포가 나타난 것으로 판단된다. 또한, 유동 인구 통행이나 차량 입·출입이 빈번한 정류장 1, 12, 6, 7 근처에서 다른 정류장에 비해 상대적으로 높은 농도 분포를 보이는 것으로 확인되었다.



[그림 5-20] 수원역환승센터 대기오염물질 일 평균 시공간 분포

정류장별 상대적으로 높은 농도가 나타났던 정류장 7, 8, 9 주변에서는 회차를 위해 버스가 정차해있거나 흡연자의 흡연행위가 종종 이루어지고 있었으며, 정류장 1, 12, 6, 7 주변은 주변 쇼핑몰을 오가는 유동인구의 통행과 버스차량의 입·출입이 빈번하게 나타나 상대적으로 농도가 더 높게 나타나는 것으로 확인되었다(그림 5-21). 또한, 정류장 1, 2, 11, 12 근처에는 기차역이 위치하고 있어 철도차량으로 발생하는 대기오염 물질 영향이 존재할 것으로 판단된다. 그렇기에 수원역환승센터에서 측정된 대기오염물질은 배출원 기여도 확인이 가능한 지시자를 파악할 수 있는 분석이 반드시 필요할 것이다.



(a) 정류장 7, 8, 9 주변

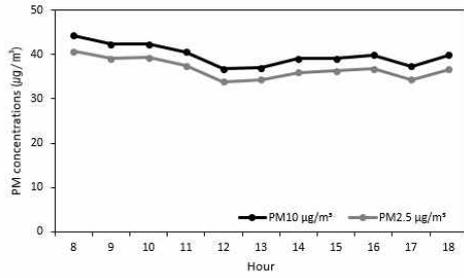


(b) 정류장 1, 12, 6, 7, 주변

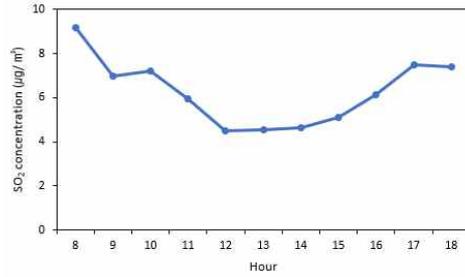
[그림 5-21] 수원역환승센터 정류장별 고농도 발생 원인

대기오염물질 시간적 분포를 확인해보고자 시간 평균 대기오염물질별 농도 자료를 활용하여 분포 특성을 확인하였다(그림 5-22). 08시부터 18시까지 측정을 진행하였으며, 대기오염물질별 농도 변동성은 약간 상이하였지만 대부분 비슷한 경향을 보이고 있었다. 출근 시간대인 08-09시에 대기오염물질의 농도가 높게 나타나는 경향을 보였으며 오후 시간대인 12시-16시 농도가 감소하는 경향을 보이고 퇴근 시간대인 17시-18시에 농도가 다시 증가하는 경향을 나타냈다. PM₁₀, PM_{2.5}, CO, VOCs는 거의 유사한 변동 경향을 보이고 있었고, 특히 NO₂, SO₂, H₂S가 08시에 다른 시간대에 비해 상대적으로 매우 높은 농도로 나타났는데 이는 주 배출원이 도로이동오염원 및 비도로이동오염원이

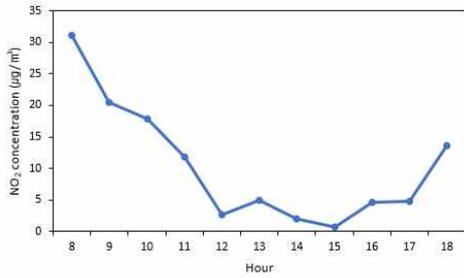
라는 것을 의미한다. 이를 통해 수원역환승센터의 대기질 개선을 위해서는 운행 버스의 친환경버스 전환과 기차역의 철도차량으로부터 발생하는 대기오염물질의 관리가 필요할 것이다.



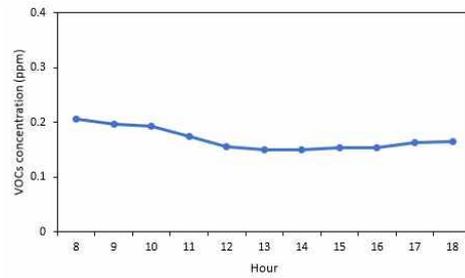
(a) PM₁₀ & PM_{2.5}



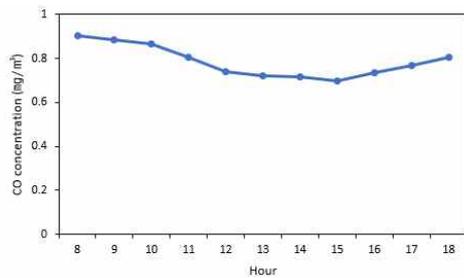
(d) SO₂



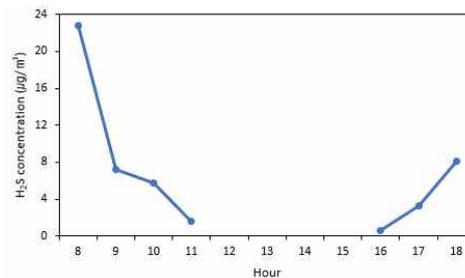
(b) NO₂



(e) VOCs



(c) CO

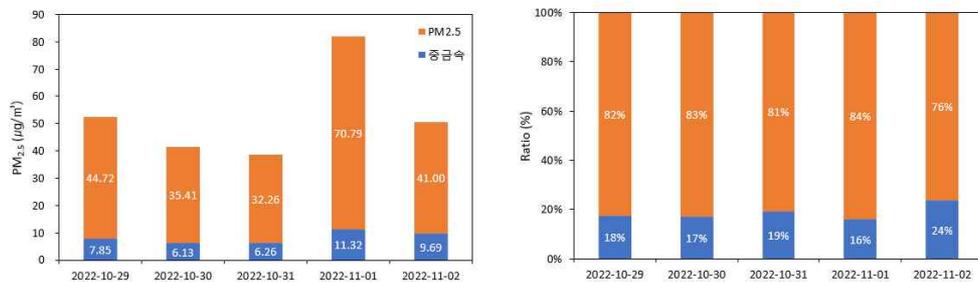


(f) H₂S

[그림 5-22] 수원역환승센터 대기오염물질 시간 평균 분포

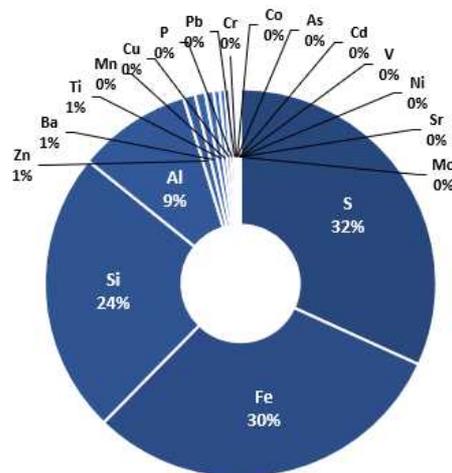
1-2-5. 수원역환승센터 중금속 분석

PM_{2.5} 내에 포함된 중금속에 대한 분석을 위해 XRF 분석을 진행하였으며, 주중과 주말의 차이를 보기 위하여 총 5회 측정을 수행하였고, 일정은 주말인 10월 29일과 30일, 주중은 10월 31일, 11월 1일, 2일이다. PM_{2.5} 농도는 5일 중 10월 30일이 가장 낮은 32.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 11월 1일이 가장 높은 70.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타냈다. 전반적으로 측정된 5일에 대해 절대적인 농도 차이는 있었지만, 중금속 성분비는 15.99~23.64% 수준으로 나타났다(그림 5-23).



[그림 5-23] 수원역환승센터 측정 PM_{2.5} 내에 포함된 중금속 비율

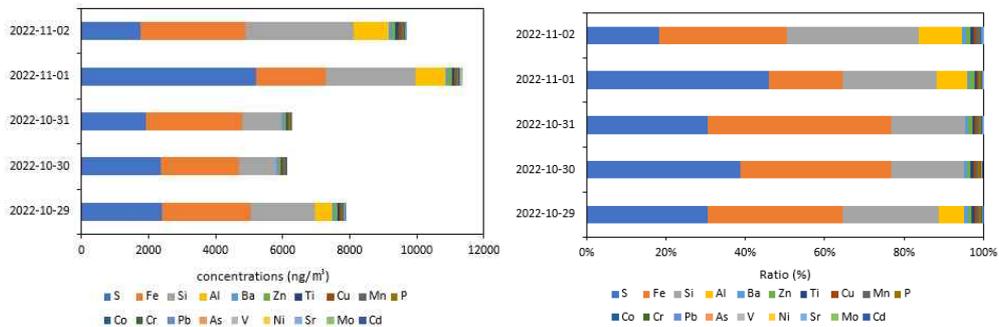
그림 5-24는 측정을 수행한 5일에 대해 분석된 중금속 성분의 구성비를 나타낸 것이다. 앞서 그림 5-23에서 나타난 것처럼 5일간 측정된 PM_{2.5} 내 중금속 농도는 6.13~11.32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 나타났다. 성분별로는 5일 모두 황(S), 철(Fe), 규소(Si) 성분이 가장 높은 비율을 차지하였다. 이 외에 측정된 성분들에 대한 자세한 내용은 그림 5-24에 나타내었다.



[그림 5-24] 수원역환승센터 중금속 항목별 비율

일자별로는 휴일인 10월 29일의 경우 철(Fe)(33.8%) > 황(S)(30.60%) > 규소(Si)(24.38%) > 알루미늄(Al)(6.15%) > 바륨(Ba)(1.11%) 순으로 나타났고, 30일은 황(S)(38.66%) > 철(Fe)(38.07%) > 규소(Si)(18.32%) > 바륨(Ba)(0.92%) 순으로 높게 나타났다. 주중인 10월 31일은 29일과 비슷하게 철, 황, 규소의 비율이 매우 높게 나타났으며, 철(Fe)(46.19%) > 황(S)(30.53%) > 규소(Si)(18.54%) > 아연(Zn)(0.98%) 순으로 Fe의 비율이 다른 날에 비해 매우 증가한 것을 볼 수 있다. 11월 1일은 황(S)(46.03%) > 규소(Si)(23.68%) > 철(Fe)(18.37%) > 알루미늄(Al)(7.80%) 순으로 황의 비율이 다른 날에 비해 매우 높은 비율 및 농도로 나타났다. 11월 2일은 규소(Si)(33.24%) > 철(Fe)(32.16%) > 황(S)(18.25%) > 알루미늄(Al)(11.00%) 순으로 나타났다. 이 외 성분들에 대한 자세한 내용은 그림 5-25와 표 5-16에 나타났다.

본 연구에서 측정된 철(Fe)과 규소(Si)는 토양 성분의 지시자로서 측정이 자동차 이동도로이면서 동시에 버스전용차로인 수원역환승센터 내에서 측정된 점을 감안한다면 지시자의 분류체계에 따라 정확한 기원 분석이 된 것으로 판단된다. 황(S)의 경우 다른 성분들과는 달리 성분비가 매우 높게 나타났는데, 이는 측정 대상인 수원역환승센터에서 주행하는 버스의 경우 압축천연가스(compressed natural gas, CNG)나 전기 등의 친환경버스로의 전환이 활발히 이루어지고 있으나 여전히 운행 중인 기존의 경유(diesel) 버스와 기차역에 매우 인접하여 철도차량에서 기인한 S의 영향이 반영된 결과로 판단된다.



[그림 5-25] 수원역환승센터 측정 중금속 항목별 비율

[표 5-16] 수원역환승센터 XRF 측정 결과

측정 일정	분석 물질	Al	Ti	V	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	As	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	P	S	Cr	Si
	2022.10.29.		482.57	60.45	4.19	42.85	2657.58	3.24	13.82	42.3	76.86	4.59	5.44	1.25	0.3	87.24	11.17	27.28	2402.95	13.32
2022.10.30.	ND	39.55	3.09	32.27	2333.07	2.24	9.83	33.22	48.63	3.24	0.35	ND	24.84	56.21	4.39	34.91	2369.23	11.12	1122.67	
2022.10.31.	ND	37.89	4.04	40.04	2893.84	3.29	13.91	29.37	61.62	3.19	2.09	ND	ND	57.29	4.24	27.12	1912.64	13.06	1161.19	
2022.11.01.	882.7	67.83	5.99	45.14	2080.13	4.74	10.82	35.91	136.82	7.43	3.89	ND	ND	61.4	30.48	43.69	5210.96	12.27	2680.92	
2022.11.01.	1066	91.13	5.49	53.37	3117.21	3.69	15.41	53.67	92.92	8.33	5.34	ND	ND	100.26	34.17	39.6	1768.34	14.76	3221.95	

1-3. 충청남도

국가에서는 대기질 관리를 위해 대기오염물질 배출량 정보를 1999년을 시작으로 연단위로 산정하여 고시하고 있다. 산정 초기 일산화탄소(carbon monoxide, CO)와 총부유분진(total suspended particulate, TSP)을 포함하여 총 7개 물질을 산정하였고, 그 뒤 초미세먼지(particulate matter less than 2.5 μm , PM_{2.5})와 검댕(black carbon, BC)을 포함하여 현재는 총 9개 물질을 대상으로 선정하고 있다. 부문별로는 에너지 산업 연소부터 비산업 연소, 제조업 연소, 생산 공정 등 13개 항목으로 분류하고 있다. 2019년 배출량 기준 전국 TSP 배출량은 484,527 톤으로 비산먼지의 기여율은 66.8%(323,462톤)으로 가장 높은 수준이며, 그 중 50.7%가 도로재비산먼지이다. 질소산화물(nitrogen dioxide, NO_x)과 CO 역시 도로이동오염원에 대한 기여도가 높은 것으로 알려져 있으며, 국내 연구에서도 서울을 포함한 광주, 대구 등 대도시의 주요 대기오염물질 배출원으로 이동오염원을 언급하고 있다.

도로변에서 배출되는 오염물질은 BC를 포함하여 NO_x, CO, 휘발성유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 입자상 오염물질 등 다양한 대기오염물질이 존재한다. 이러한 오염물질들은 자동차 배기가스, 타이어와 브레이크 패드, 도로와의 마모, 도로변에 존재하는 먼지의 재비산, 주변 토양 유입 등 다양한 배출원을 가진다. 도로변에서 발생된 오염물질은 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn), 니켈(Ni), 카드뮴(Cd)과 같은 중금속을 다량 함유하고 있으며, 단·장기적인 독성영향을 준다. 특히 자동차에서 배출되는 입자상 오염물질은 100 μm 이하의 미세한 크기를 가지기 때문에 인체 유입 시 폐포 및 세포 속까지 침투하여 폐 기능 감소, 심혈관계질환, 호흡기계 영향 및 당뇨병, 사망률 증가 등 다양한 건강 악영향을 미칠 수 있다.

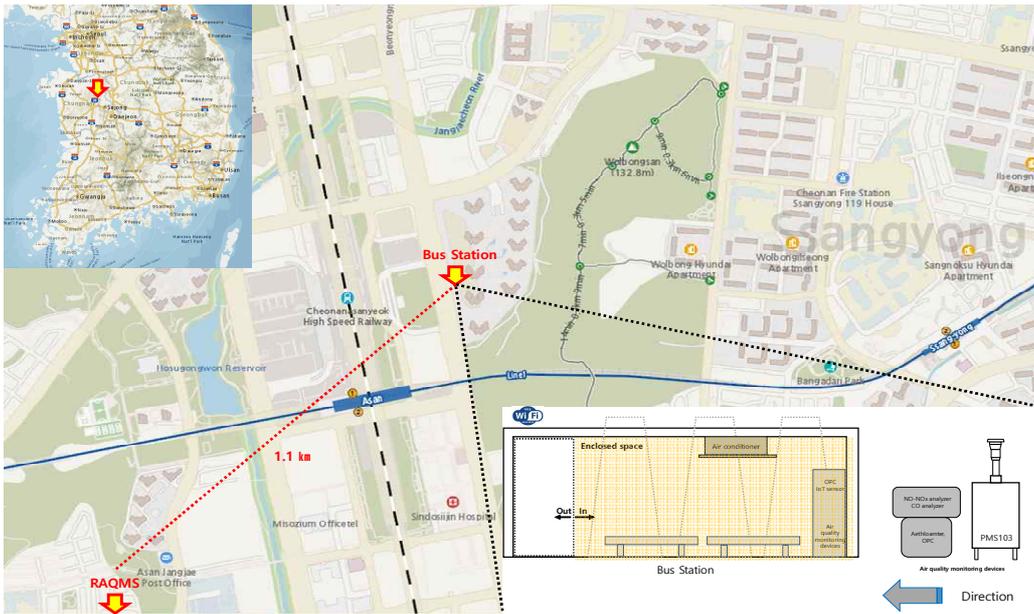
도로를 이용하는 대중교통 중 버스는 2019년 기준 전국 대중교통 분담률의 23.0%로 가장 높은 비율을 차지하고 있다. 서울을 포함한 일부 광역 지자체에서는 버스 중앙차선제를 설치하여 버스의 원활한 소통을 유도하고 있으며, 대전이나 세종시의 경우 간선급행버스체계(bus rapid transit, BRT)를 운영하는 등 주민들의 버스 활용도를 높이기 위해 노력하고 있다. 하지만 버스 중앙차선제도 도입으로 도로변에서 배출된 오염물질에 대한 승객들의 건강 영향이 제시되고 있다. 선행 연구에서 버스정류장에서 승객들이 대기하는 시간을 분석한 결과 약 472~610초 정도인 것으로 보고하였으며, 이 기간 동안 도로기원 오염물질에 노출될 수밖에 없어 이에 대한 대책이 필요한 것으로 나타나고 있다. 정부에서는 도로오염원에 대한 개선대책으로 친환경 자동차 보급, 노후 경유차 조기 폐차 및 엔진 교체 지원, 도로 살수 차량 및 분진 흡입 차량 도입 등 다양한 대책

을 추진하고 있지만 뚜렷한 개선 효과는 나타나지 않고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 지자체에서는 밀폐형 스마트 버스정류장 도입을 추진하고 있다. 기존의 개방형 버스정류장을 밀폐형이나 반 밀폐형으로 바꾸고, 내부에 공조설비나 공기질 개선장치를 장착하여 운영 중에 있으나 아직까지 이들에 대한 정량적인 개선 효과를 보고한 사례는 없다.

이에 본 연구에서는 각 지자체에서 설치되어 운영되고 있는 저마다의 특성의 버스정류장 및 도로변을 대상으로 도로변 비산먼지의 특징을 검토하였다. 서울시의 경우 광화문 개선 사업 후 교통량 변화에 따른 도로변 대기질 개선 효과를 분석하였고, 경기도는 수원역에 있는 개방형 버스정류장을 대상으로 차량 이동에 따른 고정 및 이동오염농도를 분석하였다. 충청남도는 천안아산 KTX 버스정류장을 대상으로 버스정류장 밀폐 여부에 따른 개선효과를 분석하였다. 향후 본 연구는 지역 비산먼지 중 가장 높은 기여도를 보이는 도로변 비산먼지 개선을 위한 정책수립시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

1-3-1. 측정위치 및 일정

측정 위치는 충청남도 내 인구수가 많고 버스정류장 혼잡도가 높을 것으로 판단되는 천안아산 KTX정류장으로 선정하였다(그림 5-26). 버스정류장은 천안아산 KTX역 앞에 위치하고 있어 경부선을 이용하는 지역 주민들의 이용이 빈번한 곳으로 주변 지역에는 특별한 대기오염물질 배출시설이 위치해 있지 않으며, 주거 및 대형상점들로 둘러싸고 있다. 버스정류장은 시내 순환 버스와 간이 시외버스 정류장으로 동시에 사용되고 있으며, 시내 순환 버스 9개 노선에서 일평균 164대, 광역버스는 4개 노선에 일평균 48대가 이용하고 있다. 버스정류장은 아산시에서 지정·운영하고 있는 “미세먼지 안심 승강장”으로 지정되어 관리되고 있으며, 밀폐형 구조로 내부에서 승객이 대기하다가 해당 버스 도착 시 개폐문을 열고 나가 버스를 타는 형태이다. 내부에서는 냉난방 시스템과 공기청정기가 가동되고 있으며, 승객의 출입을 제외하고는 대부분 밀폐된 상태로 외부 공기가 차단되어 있었다. 측정은 2022년 10월 14일(금)부터 24일까지 수행되었으며, 측정기간 중 평균온도는 13.0℃, 최대온도 24.5℃, 강우는 없었고, 대부분 맑은 가운데 평균풍속은 0.6 m/s로 대기는 정온에 가까운 안정상태였다.



[그림 5-26] 밀폐형 버스정류장 내외부 오염도 분석을 위해 설치된 장비와 위치 모습

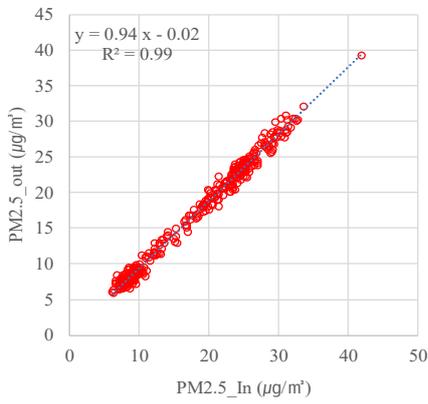
1-3-2. 측정항목 및 장비

측정은 버스정류장 내부와 외부에서 동시에 수행되었다. 첫 번째 목적은 외부에서 도로변 오염도를 분석하여 주변 지역의 도로변대기측정소(roadside air quality monitoring station, RAQMS)와 비교하여 농도 수준 파악을 목적으로 하였다. 측정항목은 자동차 배출가스의 지표 물질로 사용되고 있는 검댕(black carbon, BC)을 Aethlaometer(Magee, AE43)를 PM_{2.5} 분립장치와 함께 사용하였고, 그 외 자동차 배기가스의 영향을 파악할 수 있는 CO와 NO-NO₂를 각각 측정 장비를 사용하여 측정하였다. 그 외 도로변 PM_{2.5}의 중금속 농도를 파악하기 위해 PM_{2.5} 중량농도 측정 장비인 PM_{2.5} sequential sampler(APM Engineering, LAS-16)을 사용하였다. BC와 CO, NO-NO₂는 실시간 측정 장비로 각각 1분 단위로 저장하여 분석하였고, PM_{2.5}는 24시간 동안 포집 후 X선 형광분석법(X-Ray fluorescence, XRF, Epsilon 4, Malvern Panalytical B.V.)을 이용하여 중금속 농도를 확인하였다. 도로변과 버스정류장 내부에서 측정된 데이터의 비교분석을 위해 인근 지역에 있는 장재리 도로변 대기측정소와 성거 자동기상관측소(automatic weather station, AWS) 자료를 활용하였다. 장재리 측정소는 측정지점으로부터 남서쪽으로 약 1.1 km 떨어져 있는 도로변에 설치되어 있다.

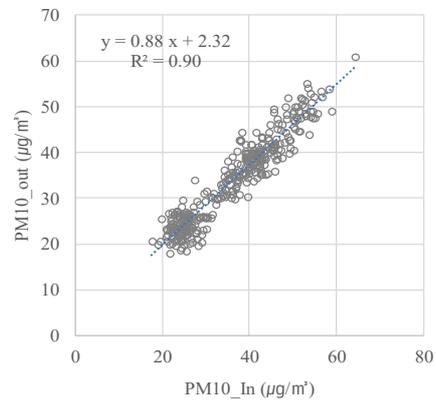
[표 5-17] 본 연구에서 활용된 측정장비의 특징 요약

측정항목	측정장비	실내	외기	측정주기	유량	항목
BC	Aethalometer (Magee, AE43) with PM _{2.5} cyclone		○	1 min	5 LPM	accuracy : 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 0.01~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	CO analyzer (Thermo, 48IQ)		○	1 min	1 LPM	accuracy : 100 ppb 0~10,000 ppm
NO-NO _x	NO-NO _x analyzer (Thermo, 42IQ)		○	1 min	0.1 LPM	accuracy : 10 ppb 0~100 ppm
PM _{2.5}	PM _{2.5} sequential sampler (APM Eng., LAS-16)		○	24 hr	16.7 LPM	∅ : 47 mm Gravity method
중금속	X-Ray fluorescence (Epsilon 4, Malvern Panalytical B.V.)		○			Al, Ti, V, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, As, Sr, Mo, Cd, Ba, Pb, P, S, Cr, Si
입자 개수농도	Particle Aerosol Spectrometer (Grimm, 11-D)	○	○	1 min	1.2 LPM	31 channels 0~100 mg/m^3
기상정보	AirGuard K (K-weather, IAQ-CW1)	○		1 min	0.1 LPM	CO ₂ : 0~3,000 ppm RH : 0~100 % Temp. : -40~70°C

실내외 농도 비교엔 광산란 측정 장비(particle aerosol spectrometer, PAS, Grimm, 11-D)를 각각 버스정류장 내부와 외부에 설치하였다. 동일 장비를 활용하여 각기 다른 장소에서 농도변화나 상관성을 검토할 때 두 장비 간 데이터의 신뢰성과 정확성이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 실험에 사용될 2대의 측정 장비를 측정 전 외부환경에서 동시에 측정하여 상관성 분석을 실시하였다. 실험결과 PM_{2.5}와 PM₁₀에 대한 농도변화는 선형적인 변화 특성을 매우 잘 따라가는 것을 확인할 수 있었으며, 장비 간 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 R² 값이 각각 0.99와 0.90로 나와 장비 간 상관성은 매우 높은 것으로 확인되었다(그림 5-27).



(a) PM_{2.5}

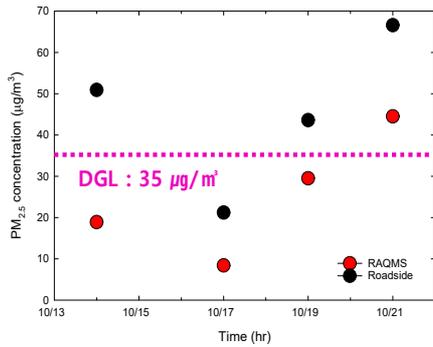


(b) PM₁₀

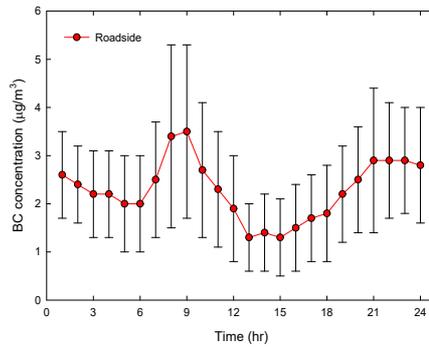
[그림 5-27] 광산란장비에 대한 측정 전 상관성 분석 결과

1-3-3. 도로변 오염도 분석

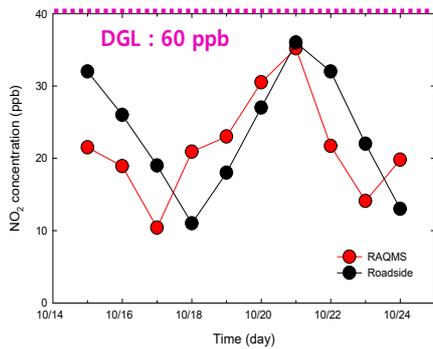
그림 5-28은 측정대상 지점으로 선정된 버스정류장 외부에 대한 오염도를 나타낸 것으로, 왼쪽은 일평균 농도변화를, 오른쪽은 시간 평균 농도변화이다. 대상 항목은 대기 환경기준물질 중 도로변 주요 배출원으로 판단되는 $PM_{2.5}$, NO_2 , CO를 선정하였고, 이외에 자동차 오염 조사 시 지표 물질로 활용되는 BC를 추가적으로 분석하였다. 실시간 분석 장비인 NO_2 와 CO, BC는 1분 간격으로 얻어진 자료를 시간과 일평균으로 도식하였으며, $PM_{2.5}$ 의 경우 중금속 분석을 위해 1일간 측정한 결과를 각각 RAQMS와 비교하였다. $PM_{2.5}$ 의 경우 주중과 주말의 중금속 농도변화 파악을 위해 주중 3회 주말 1회 측정을 수행하였다. 측정결과 도로변 농도가 $45.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 RAQMS의 $26.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 1.7배 높게 나타났다. 모든 측정일에 도로변 측정치가 모두 높게 나타났으며, 도로변 측정 4일 중 하루를 제외한 3일이 대기 환경기준을 초과하는 것으로 나타났다. 반대로 RAQMS는 1일을 제외한 3일은 대기 환경기준을 만족하게 나타났다. NO_2 의 경우 도로변이 $23.5 \pm 8.0 \text{ pbb}$ 로 RAQMS $21.6 \pm 6.8 \text{ pbb}$ 보다 약 8.7% 높은 수준을 보였다. 도로변과 RAQMS 모두 일평균 대기 환경기준 이하로 나타났으며, 도로변과 RAQMS의 농도가 큰 차이를 보이지 않았다. 시간대별 농도변화에서는 두 곳 모두 5시까지 감소하다가 차량 운행량이 증가하는 6시를 기점으로 증가하기 시작하였으며, 8시경에 최대 농도를 보이고 그 후 점점 감소하다 13시경부터 다시 증가하는 경향을 보였다. 시간대별 농도변화는 RAQMS보다 도로변이 더 큰 폭으로 변화하였다. CO의 경우 도로변 측정값이 $0.36 \pm 0.07 \text{ ppm}$ 으로 $0.45 \pm 0.13 \text{ ppm}$ 의 RAQMS보다 낮게 나왔다. 시간 농도변화는 NO_2 농도변화와 유사한 경향을 보였고, NO_2 와 CO 모두 일평균과 시간 평균 모두 대기 환경기준을 만족하였다. 전반적으로 $PM_{2.5}$ 와 NO_2 의 경우 도로변이 RAQMS보다 높은 농도 수준을 보였다. 이는 도로변의 경우 차량이 이동하는 도로와 불과 1~2 m 밖에 이격거리가 되지 않고, 차량 이동 시 형성되는 차량풍에 의해 측정지점의 농도가 고농도로 형성되었기 때문으로 판단된다. 반대로 RAQMS의 경우 도로변에 인접해 있지만, 도로변 측정소보다 이격거리가 있고, 측정소 특성상 지상 2~3 m 지점에 유입구(inlet)이 위치하기 때문에 상대적으로 낮은 농도값을 보인 것으로 판단된다. 선행 연구에 따르면 도로변으로부터 주요 도로로부터 멀어질수록 오염물질의 농도가 감소하는 것으로 보고하였는데 본 연구 역시 동일한 경향을 보였다. CO의 경우, 역시 위의 $PM_{2.5}$ 및 NO_2 와 매우 유사한 경향을 보였다.



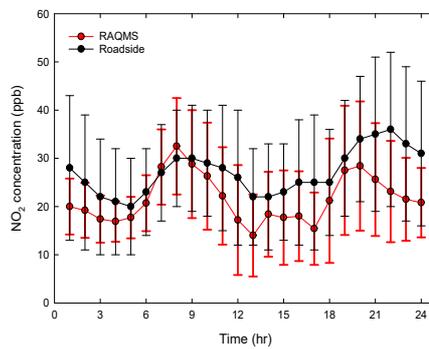
(a) PM_{2.5} 일평균 농도



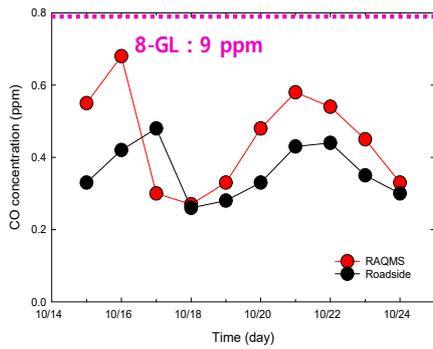
(b) BC 시간대별 농도 변화



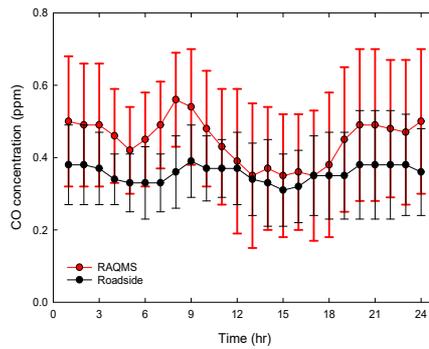
(c) NO₂ 일평균 농도



(d) NO₂ 시간대별 농도 변화



(e) CO 일평균 농도



(f) CO 시간대별 농도 변화

[그림 5-28] 도로변과 RAQMS에서 측정된 오염물질의 일평균 및 시간대별 농도 변화
 BC의 평균농도는 $2.3 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. BC의 하루 중 농도변화는 0시를 기점으로 6시까지 감소 후 7시부터 증가하여 9~10시경 최대 농도를 보인 후 13시까지 감소하였다가 다시 증가하는 경향으로, 앞서 NO₂ 및 CO와 유사한 경향을 보인다. 이는 도로변에서 측정된 BC를 포함한 NO₂와 CO의 주 배출원이 자동차라는 것을 의미한다. 표 5-19는 국내에서 조사된 도로변 BC 농도 수준을 나열한 것이다. 2008년 광주 도심에서 측정된 BC의 농도는 $1.9 \sim 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준이었고, 서울의 도로변과 자전거도로에서 측정된 BC는 $2.7 \sim 7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 광주 도심보다 높은 수준을 보였다. 부천시 도로

변에서는 1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 국외 연구사례로는 미국 펜실베이니아에서 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 태국의 방콕이 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 본 연구에서는 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 광주 도심과 서울의 자전거도로와 유사한 수준을 보였고, 서울 도로변과 방콕 등보다는 낮은 수준으로 확인되었다. 서울은 전국에서 가장 높은 자동차 등록 대수와 이동량을 보이며, 방콕은 전통적으로 이륜차량의 배출이 문제시되고 있어, 이에 대한 기여도가 반영된 결과로 판단된다. 반대로 상대적으로 넓은 면적과 적은 교통량을 가지는 펜실베이니아는 낮은 농도 수준을 보였다.

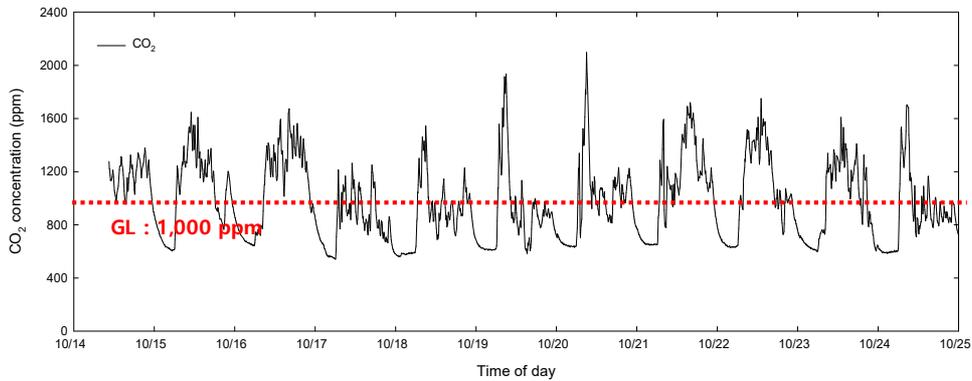
[표 5-18] 선행 연구에서 조사된 각 지역별 BC의 농도

저자	연도	위치	도시	오염물질	오염농도
Park et al.	2008	도시	광주광역시	PM _{2.5}	1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Jung et al.	2008	도시	광주광역시		2.6±2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Woo et al.	2013	도로변	서울		5.5~7.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Kim et al.	2017	도로변	서울		3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		자전거도로	서울		2.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Cummings et al.	2021	도로변	펜실베이니아		1.6±0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Phanukarn et al.	2020	도로변	방콕		4.5±1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Kim et al.	2021	도로변	방콕		1.7~3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
This study	2022	도로변	아산		2.3±1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

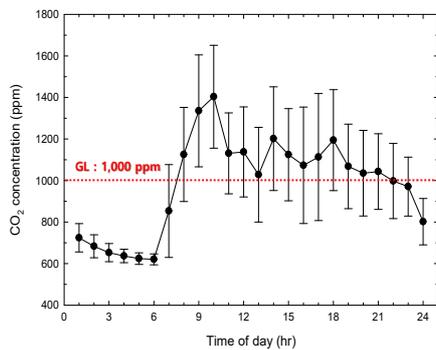
1-3-4. 버스정류장 내외 오염도 분석

대상지점으로 선정한 버스정류장은 아산시에서 미세먼지 안심 승강장으로 지정·관리하고 있는 밀폐형 승강장으로 7시부터 18시까지 공기청정기와 냉난방기를 운영하고 있다. 실내공간에 대한 주요 지표로 미세먼지와 더불어 CO₂가 활용되고 있다. 밀폐형 버스정류장은 아직까지 다중이용시설로 분류되지 않아 관리규정이 없지만, 철도역사나 항만시설, 공항 여객터미널 등은 다중이용시설로 분류되어 CO₂ 기준 1,000 ppm 이하로 관리되고 있다.

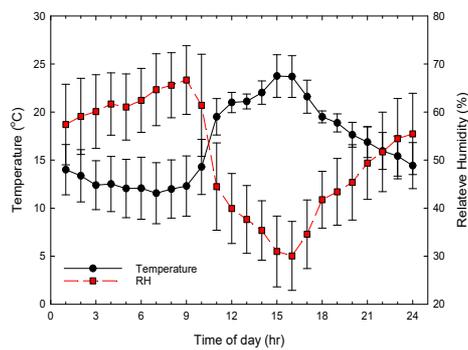
그림 5-29는 측정 기간 중 밀폐된 버스정류장 내 CO₂의 일변화와 CO₂ 및 온습도의 시간대별 변화 특성을 나타낸 것이다. 측정 기간 전체에 대한 CO₂ 농도는 실내공기질 유지기준과 유사한 수준인 987±296 ppm으로 나타났다. 시간대별로는 이용객 수가 증가하는 6시를 기점으로 증가하기 시작하여 10시경 최대 농도를 찍고 감소하다가 13시와 17시경 다시 첨두값을 보이고 감소하는 경향을 보였다. CO₂의 경우 주요 배출원이 밀폐된 버스정류장 내 승객이기 때문에 승객의 혼잡도에 따라 다르게 나타나는데, 7시부터 24시까지 편차가 크다는 것은 농도변화 폭이 크다는 것을 의미한다. 측정 기간에 실내 온도는 16.6±4.6℃ 내부 공조설비 가동 여부에 따른 온도 편차가 큰 것으로 나타났다. 인근 성거 AWS의 경우 측정 기간 평균온도가 11.3℃로 버스정류장 내부 온도가 약 5.3℃ 높게 나타났다.



(a) 시간에 따른 CO₂ 농도 변화



(b) CO₂ 시간대별 농도 변화

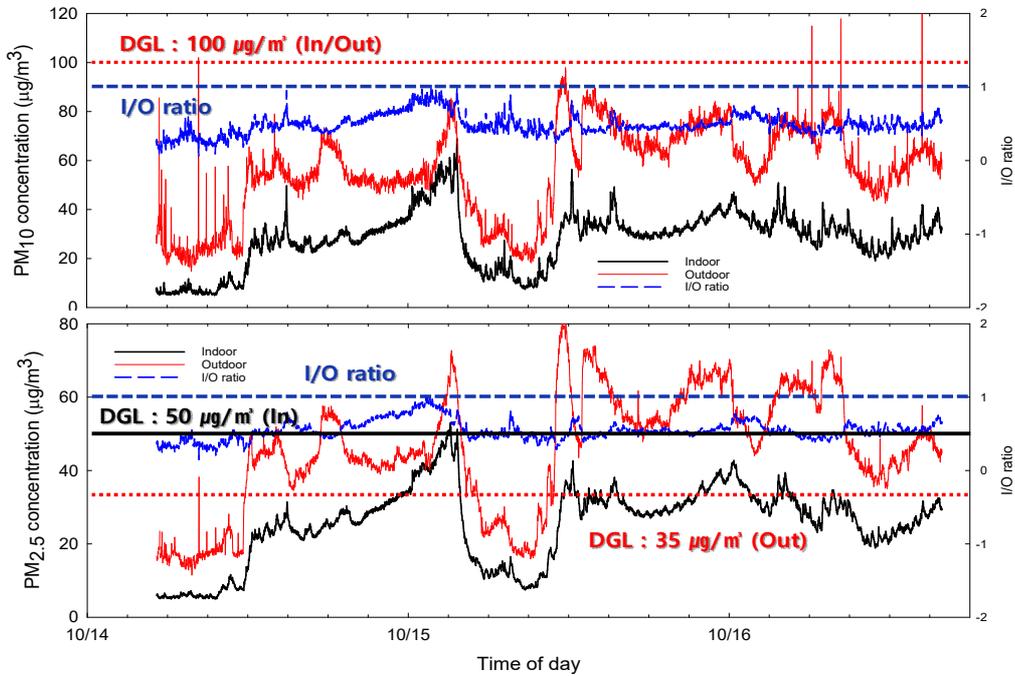


(c) 온도와 습도의 시간대별 농도 변화

[그림 5-29] 밀폐형 버스정류장 내부에서 측정된 CO₂와 온습도 변화

밀폐형 버스정류장 내외에서 발생하는 입자상 오염물질의 영향을 검토하기 위해 광산란장비 2대를 대상으로 측정을 실시하였다. 밀폐형 버스정류장은 가장 인쪽에 철제 캐비닛 안에 장비를 위치시킨 후 흡입구를 외부로 유출시켜 실내 공기질을 측정하였고, 외부의 경우 도로변에 설치된 가스상 측정기기와 함께 설치하였다. 그림 5-30은 실내 외에서 측정된 정보를 대상으로 시간에 따른 농도변화와 실내외 비(I/O ratio)를 나타낸 것이다. I/O ratio는 측정된 지점에 대한 영향이 실내와 외기 중 어느 곳이 더 지배적인지를 판단하는 지표로 많이 사용되며, 1보다 크면 실내 영향이 더 큰 것으로 보고, 반대의 경우 외부영향이 더 큰 것으로 알려져 있다. 측정결과 PM₁₀의 경우 실내 $27.7 \pm 11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 외부 $55.7 \pm 18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실외가 실내대비 2.0배 높았고, 동일 기간 RAQMS는 $44.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실내는 AQMS의 63%, 외부는 126% 정도였다. I/O ratio는 0.49로 실내에 대한 외부영향이 크게 나타났다. 실내와 외부 모두 환경기준은 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 동일했는데 대부분의 기간 동안 기준치를 만족하였다. PM_{2.5}는 실내 $25.4 \pm 10.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 외기 $45.6 \pm 16.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실외가 실내대비 1.8배 높게 나타났고, 동일 기간 RAQMS의 농도는 $25.9 \pm 11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실내농도와 유사한 수준이었다.

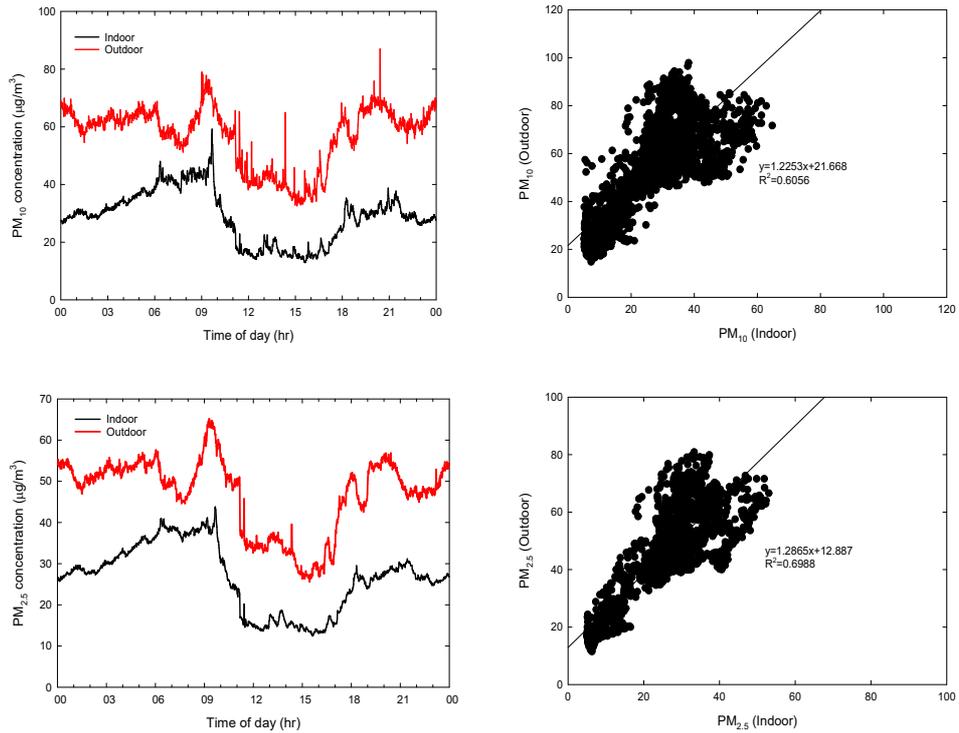
I/O ratio는 0.55로 PM₁₀보다는 소폭 높았지만 PM_{2.5} 역시 외부영향이 크게 작용하고 있는 것으로 나타났다. PM_{2.5}의 경우 PM₁₀과 다르게 실내외 관리기준이 다른데, 실외는 일평균 농도로 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 실내공기질은 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 실내공기질 관련 기준값은 대부분 대기환경기준이 실내공기질 기준과 유사하거나 소폭 높은 수준이나 본 연구에서 확인된 바에 의하면 실내 PM_{2.5}의 기준이 외부보다 높은 것으로 확인되었다. PM_{2.5}의 실내농도는 기준치인 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하는 것으로 나타났지만 외부 농도는 기준치인 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 대부분 상회하는 것으로 나타났으며, 일부 구간에서는 실내공기질 조차 이 농도보다 높게 나타났다.



[그림 5-30] 밀폐형 버스정류장 내외부에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 모습

그림 5-31은 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 시간대별 농도변화와 실내외 상관분석 결과이다. PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 절대적인 농도값은 다르지만 유사한 경향성을 보이고 있다. 외기의 경우 0시부터 7시까지 증감을 감소하며 전반적인 농도감소 경향을 보이다가 차량 운행량이 증가하는 7시를 기점으로 급격히 증가하여 9~10시경 일 중 최대 농도를 보인 후 16시경까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 동일 기간 같이 측정된 NO₂, CO, BC와 유사한 패턴으로 도로변 이동오염원의 영향을 크게 받는 도시형 오염 패턴과 일치한다. 실내의 경우 0시부터 꾸준히 농도가 증가하다가 외기보다 조금 늦은 10시경 최대 농도를 보이고 감소하다가 17시경부터 다시 증가하는 경향을 보인다. 그

림 5-31의 (b)는 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 실내외 상관분석 결과를 나타내었으며, R²이 각각 0.61과 0.70으로 높은 상관관계를 보였다.



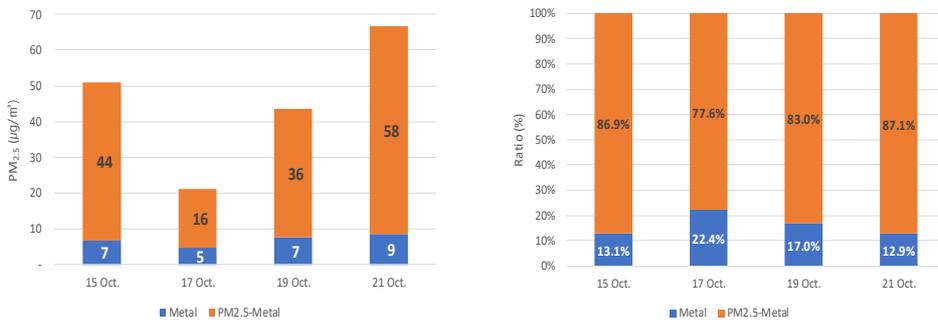
(a) PM₁₀과 PM_{2.5}의 일변화 비교분석

(b) 실내외 장비간 상관성 분석결과

[그림 5-31] 밀폐형 버스정류장 내외부에서 측정된 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비교와 상관성 분석

1-3-5. 도로변 중금속 오염도

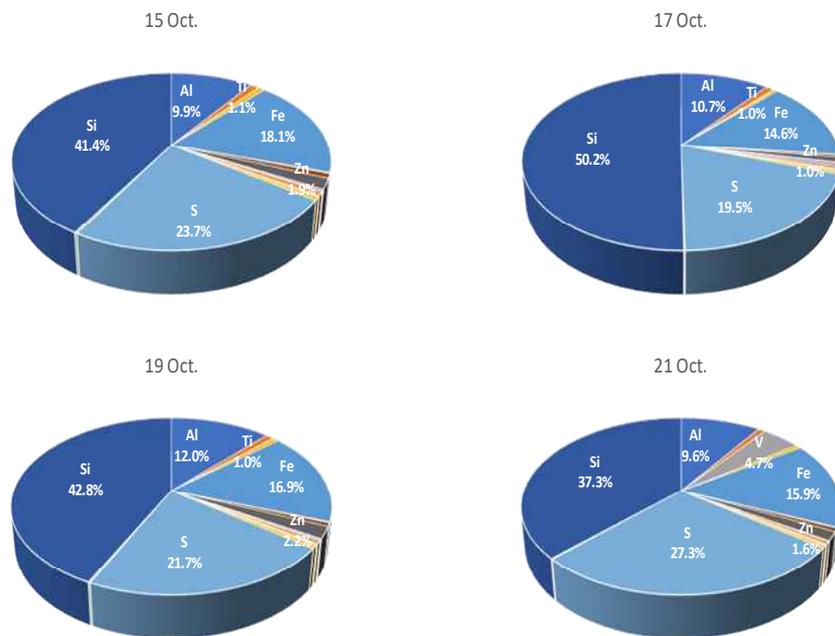
그림 5-32는 PM_{2.5} 내 포함되어 있는 중금속의 비율을 나타낸 것이다. PM_{2.5}는 주중과 주말의 차이를 보기 위하여 총 4회 측정을 수행하였으며, 10월 15일 주말, 나머지 17, 19, 21일은 주중이다. 4일 중 17일이 가장 낮은 21.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 21일이 가장 높은 66.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 보였다. 전반적으로 측정된 4일에 대해 절대적인 농도 차이는 있었지만, 중금속 성분비는 13.1~22.4% 수준으로 나타났다.



[그림 5-32] PM_{2.5} 내 포함되어 있는 중금속의 비율

그림 5-33은 측정을 수행한 4일에 대해 분석된 중금속 성분의 구성비를 나타낸 것이다. 앞서 그림 5-32에서 나타난 것처럼 4일간 측정된 중금속은 4.7~8.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준으로 나타났다. 성분별로는 4일 모두 규소(Si)성분이 가장 많은 37.3~50.2%를 차지하였고, 그 뒤를 황(S) 성분이 19.5~27.3%로 나타났다. 일자별로는 휴일인 15일의 경우 규소(Si)(41.4%) > 황(S)(23.7%) > 철(Fe)(18.1%) > 알루미늄(Al)(9.9%) > 아연(Zn)(1.9%) 순으로 나타났고, 17일 역시 15일과 동일한 순서로 규소(Si)(50.2%) > 황(S)(19.5%) > 철(Fe)(14.6%) > 알루미늄(Al)(10.7%) > 아연(Zn), 티타늄(Ti)(1.0%)으로 나타났다. 19일은 앞선 15일과 17일과 동일한 비율을 보였으나 21일의 경우 규소(Si)(37.3%) > 황(S)(27.3%) > 철(Fe)(15.9%) > 알루미늄(Al)(9.6%) > 바나듐(V)(4.7%)으로 Si의 비율이 다른 날에 비해 감소한 반면, S와 V의 비율이 증가한 것을 볼 수 있다. 오염도가 높은 지역이나 대기질 관리정책 수립을 위해 기존 지역에 대한 기여도 분석에 수용모델이 다수 활용되고 있다. 수용모델은 해당 지점에서 측정된 자료를 오염원 지시자와 비교 분석하여 배출원에 대해 추정하게 된다. 수도권 산업단지를 중심으로 대기 배출원 기여도 분석연구에서 그동안 사용된 지시자를 정리하여 제시하였다. 이 자료에 따르면 본 연구에서 측정된 중금속 성분 중 Si, Al, Fe, Ti의 경우 토양 성분에서 대한 지시자이며,

Zn과 S의 경우 자동차 배출에 대한 지시자로 분류된다. 본 연구가 자동차 이동 도로에 인접한 버스정류장 바로 옆에서 수행된 점을 감안한다면 지시자의 분류체계에 따라 정확한 기원분석이 된 것으로 판단된다. 한 가지 특이한 점은 S의 성분비가 매우 높다는 것인데 이는 측정대상인 아산시의 경우 아직까지 압축천연가스(compressed natural gas, CNG)나 전기, 수소 등의 친환경 버스로의 전환이 늦어져 기존의 경유(diesel) 버스가 주요 노선이다 보니 여기서 기인한 S의 영향이 반영된 결과로 판단된다. 이는 다시 말하면 도로변 오염원 개선을 위해서는 운행 버스의 친환경 버스로의 전환이 필요하다는 의미로 해석된다.



[그림 5-33] PM_{2.5} 내 포함되어 있는 중금속의 구성

2. 관리 문제점 및 개선방안 제언

2-1. 관리 문제점

도로이동오염원에 의한 대기오염은 자동차가 대부분을 차지한다고 알려져 있으며, 차량에 의한 대기오염 저감을 위해 대기관리권역 및 수도권 대기환경개선을 위한 특별법이 시행되고 있다. 이에 따라 기본계획을 수립하여 자동차에 의한 대기오염 저감정책으로 저공해 자동차 보급, 배출가스 저감장치 부착, 저공해엔진으로 개조 등 이동오염원 배출 저감에 초점을 맞춰 시행되고 있다.

버스정류장은 대형경유 버스의 정차 및 주행의 빈도가 빈번하고, 보행자 통행 및 버스 승·하차를 위해 머무를 수 있기에 대기오염물질 노출이 다른 지점에 비해 높을 수 있다. 하지만, 버스정류장 설치시 설치 장소 및 교통약자 편의시설 등은 관련 법에서 규정한다. 하지만 버스정류장의 형태(개방형, 폐쇄형 등) 등의 규정은 마련되어 있지 않아 대기오염물질 노출 영향은 거의 고려되지 않고 대부분이 개방형 또는 반폐쇄형으로 설치되고 있어 도로변에서 발생하는 비산먼지로부터 취약한 상황이다.

서울시의 경우 해외 간선급행버스(Bus Rapid Transit; BRT)을 바탕으로 2004년 중앙버스전용차로를 도입해 교통체계를 대중교통 중심으로 운영하고 있다. 차도의 중앙에 버스차로를 도입해 버스 대기 및 승·하차하는 동안 승객들은 자동차 및 버스에서 배출되는 대기오염물질(배출가스, 매연 등) 등에 노출되고 있으나 관련된 연구나 측정/분석이 활발히 진행되고 있지 않아 시민들의 건강 보전이 우려가 되고 있다.

경기도의 경우 수원시에서 2017년 수원역환승센터를 도입해 버스 차로 조정, 노선 분산 배치 등을 통해 승객의 환승 동선 최적화 및 교통 혼잡도를 개선하였다. 하지만 노선 분산 배치가 승객의 승·하차 혼잡도 및 배차간격을 고려하지 않고 운행 방면에 따라 배치되어 환승센터 내에서 버스를 대기하는 승객들이나 환승센터를 통과하는 시민들의 대기오염물질 노출이 우려되고 있다.

충청도의 경우 수도권에 비해 버스 이용 비중이 높으며, 버스정류장이 도로변에 위치하고 있어 승용차, 버스, 트럭 등 다양한 차종에서 배출된 대기오염물질에 의해 버스를 대기하는 승객 및 시민 노출이 우려되고 있다.

2-2. 개선방안 제언

첫째, 미세먼지 저감 정책에 따른 대기질 개선을 위해 도로 미세먼지 저감을 위한 맞

춤형 정책 도입이 추진되어야 할 것이다.

둘째, 시도별 대중교통 이용이 증가하는 주중은 주말에 비해 미세먼지 농도가 높게 나타나는 특성을 보이고 있으므로 배출 특성에 기반하여 주중과 주말 맞춤형 집중 관리가 추진되어야 할 것이다.

셋째, 세 연구지역(서울시, 경기도, 충청도) 모두 PM_{2.5} 내 중금속 성분 중 황(S), 규소(Si), 철(Fe)에 대한 비율이 높게 나타나는 것으로 확인되었다. 따라서, 도로이동오염원에 대한 대기질 개선을 위해 현재 운행 중인 경유 버스의 CNG 버스, 수소버스, 전기 버스 등의 친환경 차량으로의 전환이 적극 추진되어야 할 것이다.

넷째, 대부분의 버스정류장이 개방형 또는 반폐쇄형으로 설치되어 운영되고 있으나 이는 미세먼지 영향을 고려하지 않은 설계로 버스 승객이나 시민의 건강 영향이 고려되어 있지 않다. 따라서 제도적으로 환경적 요소를 고려하여 관련 지침에 미세먼지 저감장치 등을 설치할 수 있도록 대기오염물질 관리 측면을 반영할 필요가 있을 것이다.

다섯째, 버스 노선의 정류장 배치는 「환승센터 및 복합환승센터 설계·배치 기준」에 따라 이루어지고 있으나 대기 환경 요소가 고려되지 않은 교통수단 측면에서 이용이 편리하도록 접근하게 되어있다. 그러므로 버스정류장 이용 승객 및 시민의 대기오염물질 노출 저감을 위해서는 혼잡도가 높고 승객 승·하차가 빈번한 버스노선의 정류장 분산 배치 및 조정을 통해 도로변 비산먼지 직접적 노출을 예방할 필요가 있다.

2-3. 밀폐형 버스정류장 관리대책 제언

대기관리권역법과 미세먼지특별법이 개정된 이후 정부에서는 분야별 대기환경 개선대책을 수립하여 추진 중에 있다. 그중 이동오염원은 도심지역의 주요 배출원으로 친환경 자동차 전환을 중심으로 다양한 개선대책이 추진 중에 있다. 밀폐형 버스정류장은 이러한 노력의 일환으로 서울을 포함한 구리, 부천, 안산 등 전국의 광역 및 기초지자체에서 다수 적용되고 있다. 하지만 아직까지 밀폐형 버스정류장의 경우 정식으로 다중이용 시설로 분류하고 있지 않기 때문에 관련 규제나 기준이 마련되지 않고 있다. 버스의 이동 편리를 위해 제안되어 운영 중인 버스 중앙차선제는 버스의 원활한 운행을 유도함에 따라 도심 주요 문제인 교통체증을 해결하고 운행과정에서 발생하는 배기 가스량을 감소시키는 등 긍정적인 효과를 나타내고 있다. 하지만 반대로 양방향으로 운행되는 도로 가운데 버스정류장을 설치함에 따라 자동차에서 배출된 오염물질이 중앙차선 버스정류장에서 대기하는 이용객에 노출을 증가시켜 건강상 악영향을 줄 수 있다는 연구결과가 보고되고 있다. 이에 본 연구에서는 아산시에 위치한 밀폐형 버스정류장을 대상으로 현장평가를 수행하였고, 그 결과를 기반으로 다음과 같은 관리대책을 제언하고자 한다.

첫째, 본 연구결과 밀폐형 버스정류장 설치에 따라 도로변에서 배출된 오염물질에 대한 노출농도가 절반 수준으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 2021년 한국철도기술연구원에서 수행한 연구에서도 이와 유사한 수준의 개선 효과를 보고한 바 있다. 인구가 밀집되어 있는 도심지역은 산업단지와 같은 산업공정보다는 도로이동오염원에 대한 영향이 큰 것으로 나타나고 있기 때문에 도로오염원에 의한 시민 건강 보호를 위해 밀폐형 버스정류장 보급사업이 지속적으로 추진될 필요가 있다.

두 번째, 현재 버스정류장은 이용객의 안전과 냉난방 제공, 도로변 오염물질로부터 보호하기 위해 밀폐형이나 반밀폐형으로 개선사업이 추진되고 있다. 하지만 대부분의 사업이 시범사업으로 추진되다 보니 설치가 용이하거나 해당 지자체의 협조가 원활한 지역을 대상으로 선정되고 있다. 연구조사 결과에서는 편도로 차량이 운행하는 버스 차선보다는 버스정류장을 중심으로 양방향으로 운행하는 버스 중앙차선에 대한 도로오염도가 더 큰 만큼 밀폐형 버스정류장에 대한 보급을 버스 중앙차선을 우선적으로 추진할 필요가 있다.

세 번째, 현재 버스정류장은 밀폐형으로 보급사업이 추진되어가고 있기 때문에 실내

공기질 관리법에 따른 다중이용시설로 구분되어 있지 않아 관리규정이 존재하지 않는다. 하지만 국가와 지자체 차원에서 밀폐형 버스정류장에 대한 필요성을 인식하고 점차 확대해 나가는 가운데 이에 대한 관리규정 마련이 논의되어야 할 것이다. 그리고 현재 실내공기질 관리법상의 유지기준과 권고기준에 대한 전면적인 재검토도 필요할 것으로 판단된다. 실내의 경우 외부오염원에 대한 차단과 내부 배출원 관리만 잘 이루어진다면 충분히 외부대기 청정한 상태를 유지할 수 있음에도 불구하고, 환경기준 대비 실내공기질 기준이 더 높은 수준의 항목이 존재하고 있다. WHO에서는 배경농도와 지역적 특성을 반영하여 신규 배출허용기준을 제시하였는데 여기서 $PM_{2.5}$ 에 대한 기준을 실내외 통합하여 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 제시하였다. 국내의 경우 배경농도 자체가 이보다 높은 수준으로 WHO만큼의 강화는 어렵겠지만 전면적인 검토를 통한 환경기준 재정비가 필요해 보인다.

네 번째로 본 연구에서 $PM_{2.5}$ 에 대한 중금속 분석결과 S에 대한 기여도가 토양지각 성분인 Si 다음으로 높게 나타났다. 수도권을 포함한 대도시들은 CNG를 거쳐 전기 및 수소 버스로 전환을 추진 중에 있지만, 측정대상인 아산시가 포함된 충청남도는 15개 시군안 단 2개 시·군만이 CNG 버스가 주력 버스로 운영되고 있으며 그 외 13개 시·군은 아직까지 디젤 버스가 주요 교통수단으로 활용되고 있는 실정이다. 도로오염원에 대한 대기질 개선을 위해서는 이들 디젤 버스에 대한 순차적인 전환이 요구된다.

06 공동연구 추진 결과

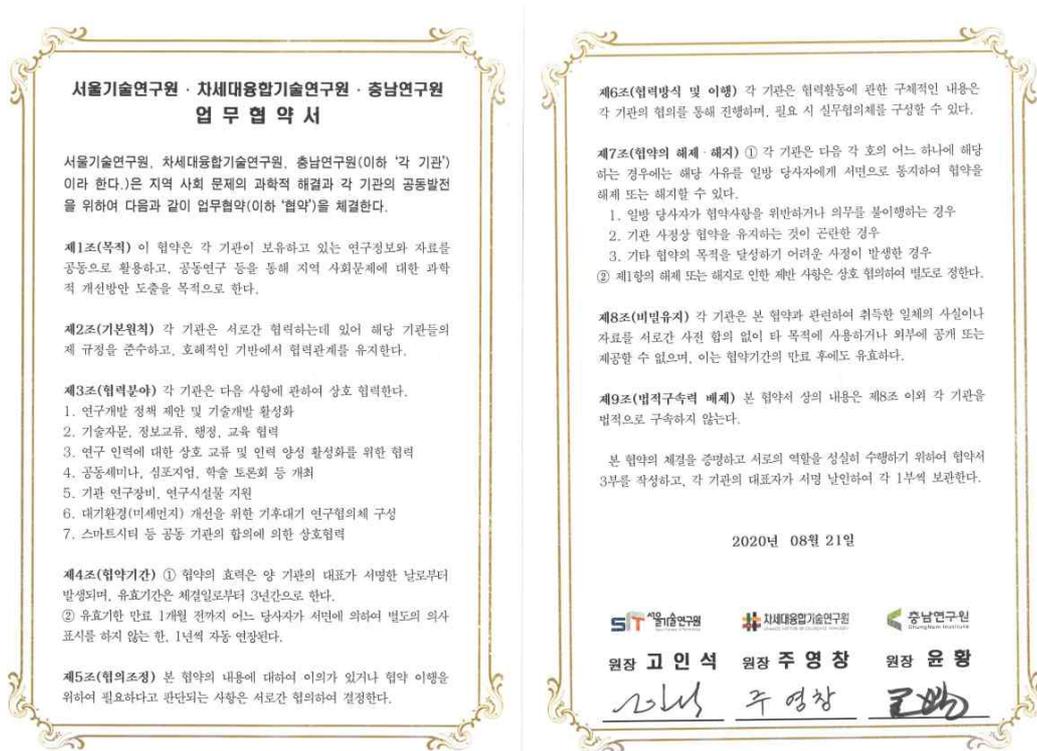
1. 정기회의
2. 공동학술대회
3. 세미나

06.

결과

1. 정기회의 개최

2020년 8월 21일 서울기술연구원과 차세대융합기술연구원, 충남연구원은 서울-경기-충남을 대표하는 지역기반 연구기관으로 지역사회 이슈(미세먼지 및 기후변화 대응)에 대한 공동대응을 위해 업무협약서를 체결하였다. 업무협약서에는 3개 기관이 각 지역의 대기환경(미세먼지) 개선을 위한 기후대기 연구협의체를 구성하고, 이와 관련하여 3년간 공동연구를 수행하는데 합의하였다.



[그림 6-1] 3개기관 업무협약서

이에 따른 후속 조치로 3개 기관을 2021년도 자체과제를 생성, 공동연구를 수행하기로 하였으며, 공동연구를 위해 2020년 12월 차년도 연구계획(안)을 공유하였고, 그 초안은 그림 6-2와 같다.

고농도 미세먼지 대응을 위한 지역간 공동 연구방안 수립을 위한 기초연구	□ 연구개요
<p>□ 연구 배경</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 2016년 이후 지속되는 고농도 미세먼지 발생과 개선되지 않는 대기 질로 인해 국민적 관심과 우려 증가 ○ 국가 차원의 대응방안 마련 연구가 지속되고 있으나, 지역 현실을 고려하지 못한채 발생기와 규명과 예보, 관측기술 고도화 등에 초점이 맞춰져 있음 ○ 각 지역별 정책연구기관들이 지역에 대한 개선안 도출을 위한 연구를 수행하고 있으나 경제가 없는 대기환경의 특성상 한 지역만의 특성을 조사하여 개선방안을 도출하기에는 어려움이 있음 ○ 지역 맞춤형 기술개발과 정책시원을 위한 지역별 특성분석 및 공동연구가 요구되고 있음 <p>□ 연구목적 및 개요</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 지역 맞춤형 대기질 현황 분석 및 공동연구의 필요성 검토 ○ 지역간 구축 정보 및 인적교류 ○ 지역 대기관련 DB구축 및 자료의 고도화 ○ 지역 연구원간 연구교류 및 활성화를 통한 역량강화와 정부차원의 연구지원 방안 검토 ○ 참여기관 : 서울~경기-충남 <ul style="list-style-type: none"> - 서울기술연구원 기후환경연구소 - 차세대융합기술연구원 시흥스마트시티 실증지원센터 - 충남연구원 서해안기후환경연구소 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연구비 : 3-6천만원(각 기관별 1-2천만원 책정) - 연구형태 : 각 기관별 기관고유과제 생성 ○ 연구기간 : 2021년 1월~12월 ○ 연구 성과(2021년 기준) <ul style="list-style-type: none"> - 공동 연구논문 작성 : 3편 이상(각 기관별 1편 이상) - 전문서적 작성 : 1편

[그림 6-2] 2021년도 공동연구를 위한 연구계획서 초안

3개 기관의 협의 끝에 각 지역 이슈를 발굴하고, 발굴된 이슈에 대한 심층분석(측정이나 현장 고증)을 통해 시사점을 도출, 정책적으로 활용 가능해야 하며, 1차년도 시작의 성격이다 보니 공동학술대회나 연구교류 세미나를 추진하는 것으로 하였다. 하지만 각 기관별로 주요 업무가 있고, 상이한 성격의 기관임을 감안하여 서로에게 최대한 보편적인 잣대로 적용할 수 있는 선안에서 진행하고자 하였다. 초기 제안된 계획안을 바탕으로 2021년도 1월 3개 기관에서는 각자 자체과제를 생성하였고, 정기회의, 학술대회, 연구교류 세미나 등이 진행되었다.

3개 기관의 협의 끝에 각 지역 이슈를 발굴하고, 발굴된 이슈에 대한 심층분석(측정이나 현장 고증)을 통해 시사점을 도출, 정책적으로 활용 가능해야 하며, 1차년도 시작의 성격이다 보니 공동학술대회나 연구교류 세미나를 추진하는 것으로 하였다. 하지만 각 기관별로 주요 업무가 있고, 상이한 성격의 기관임을 감안하여 서로에게 최대한 보편적인 잣대로 적용할 수 있는 선안에서 진행하고자 하였다. 초기 제안된 계획안을 바탕으로 2021년도 1월 3개 기관에서는 각자 자체과제를 생성하였고, 정기회의, 학술대회, 연구교류 세미나 등이 진행되었다.

2022년도는 2021년도와 마찬가지로 공동으로 진행할 수 있는 연구 추진을 위하여 2월 11일(금) 서울기술연구원에서 1회 정기회의를 진행하였다. 각 기관별로 생성된 과제 의 범위와 목적, 기간, 비용 등에 협의하였고, 그 중 최종적으로 제시할 수 있는 대표 성과들에 대해 논의하였다. 1차 회의에서는 공동연구 추진을 위한 계획을 논의하고 본 과제에서 각 기관별 역할에 대해 논의하는 가벼운 자리로 마감되었다. 2차 회의는 4월 14일 (목) 차세대융합기술연구원에서 진행되었다. 2차년도의 경우 사업 총괄 및 추진을 차세대융합기술연구원에서 맡기로 하였고, 비용 역시 측정 및 분석 비용 등을 감안하여 가장 높은 비용을 책정하였다. 이 자리에서는 공동연구 추진 일정 검토, 공동학술대회 개최, 소형배출사업장 현장점검 방안에 대해 논의하였다. 특히 7월과 10월달에 진행되는 공동학술대회 추진이 주요 핵심사항으로 특별세션 주제선정, 각 기관별 발표 논문 분할, 비용부담 등 세부사항에 대해 협의하였다.



[그림 6-3] 제2차 정기회의 모습

3차 회의는 5월 20일 (금) 서울기술연구원에서 공동연구 주제 선정과 관련하여 도로변 비산먼지, 오존 발생 이슈 등에 대해 논의하였다. 버스전용차로 도입에 따라 서울에서는 중앙버스전용차로를 도입하여 운영하고 있고, 경기도에서는 수원시가 수원역과 광교중앙역에 버스환승센터를 설립하여 운영하고 있으며, 충청도에서는 대전시 등에서 버스전용차로를 운영하고 있다. 버스전용차로 도입에 따른 버스 정체는 해소되었을지 몰라도 버스 승하차를 위한 정체나 운행에 따라 버스정류장에서 대기하는 승객들에게 도로변 미세먼지 노출이나 차량(버스)에서 배출되는 대기오염물질에 의한 영향이 작용할 것이다. 최근 몇몇 연구에서 관련 영향을 조사하고는 있지만, 지역이 주로 서울로 한정되어있고 실측자료를 이용하는 것이 아닌 도로변 측정소 자료를 이용하는 등 정확한 원인 분석이나 해결책이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

최근 오존 발생 이슈에 대해 지자체의 관심이 높아지고 있고, 서울과 경기, 충청도는 수도권(도심지역), 경기권(산업단지), 충청권(교외·축산지역) 특성에 따라 오존 발생 원

인이 각각 다른 것으로 알려져 있다. 각 지역별로 오존 발생 특성이 다르고 생성 반응에 따라 근접지역에서 오존 농도 변동에 영향을 미칠 수 있는 가능성이 높기에 공동연구 주제로 적합할 수 있지만 관측 자료 획득이나 공동 측정 및 분석을 진행하는데 여러 가지 제약사항이 많을 듯하여 공동 주제 선정에 대해서는 다음 정기회의에서 결정하기로 하였다.

4차 회의는 8월 26일 (금) 서울기술연구원에서 진행되었는데 여기서는 공동주제 선정관련 도로변 대기오염물질 현장측정 관련 업무협약이 진행되었다. 과제 계획시 각 시도별로 공동으로 접근 가능한 대기질 이슈에 대하여 현장측정 및 분석을 수행하여 공동 분석과 논문작성을 논의하였는데 이에 대한 세부적인 계획을 검토하였다. 이 자리에서는 기존에 고정관측 장비를 활용하여 현장 측정·분석 경험이 있는 충남연구원의 주도로 버스정류장 인근에 대한 미세먼지, NO_x, 중금속 측정장비를 활용하여 시공간 분포를 검토하는 방안을 논의하였다. 논의 결과 서울은 광화문 광장 주변 버스정류장을, 경기도는 수원역환승센터와 광고중앙역환승센터 버스정류장을, 충청남도는 배방환승정류장, 온양온천역, 천안아산역 버스정류장을 대상으로 측정지점 선정을 논의하기로 하였다. 이와 더불어 측정분석 전문기관인 APM엔지니어링의 협조를 얻어 실시간 CO와 BC 측정장비를 활용하기로 하였다.



[그림 6-5] 제4차 정기회의 모습

마지막 5차 정기회의는 12월 9일 (금) 서울기술연구원에서 진행되었다. 5차 회의에서는 1년동안 공동연구를 수행하면서 진행한 결과들을 검토하여 보고서에 어떻게 수록할지에 대한 논의가 진행되었다. 3개 기관의 양식에 맞춰 보고서 목차를 선정하였고, 각 파트별로 담당자를 선정하여 작성하도록 하였다. 이와 더불어 다음 차년도 연구에 대해 논의하였다. 2차년도 연구결과에 대해 각 기관별 의견을 수렴하여 2차년도와 동일하게 “각 기관의 고유 업무에 방해받지 않는 한도내에서 지역별 미세먼지 특성분

석과 개선정책 지원을 위한 연구 수행”으로 설정하였다. 세부 항목으로는 공동연구 보고서 1건, 공동 이슈발굴 및 측정 1건, 공동 학술대회 2건과 세미나 1건씩으로 정했다. 미세먼지 이슈는 요즘 코로나19 거리두기가 완화됨에 따라 불꽃축제 등 고농도 미세먼지를 발생 시킬 수 있는 지자체 행사들이 제시되었고, 소형사업장들에 대한 현안문제 파악 및 개선을 위한 운영 매뉴얼 개발 등이 신규사업으로 건의되었다.

2. 공동 학술대회 개최

공동연구를 추진하면서 가장 먼저 제시된 것이 공동학술대회와 교류세미나 추진이었다. 서로 다른 지역에 위치한 기관이 공동의 목적으로 과업을 추진하기 위해서는 공동의 관심이 필요하다. 이를 위해 공동학술대회 개최가 요구되었지만 재작년부터 전 세계적으로 미치고 있는 코로나19 사태로 학술대회 추진이 쉽진 않았다. 작년과 마찬가지로 (사)한국산학기술학회가 7월 초 오프라인으로 진행한다는 소식을 듣고 (사)한국산학기술학회 정기학술대회에서 특별세션을 진행하는 것으로 확정하였다. (사)한국산학기술학회는 산학협동을 활성화시켜 기술보급 및 과학적 활성화를 목적으로 운영되고 있으며, 연 12회 발간되는 학술지는 KCI 우수등재지로 활용되고 있다.

또한 미세먼지에 대한 이슈 부각을 위해 10월 말 오프라인 학술대회가 진행되는 (사)한국대기환경학회에 특별세션을 진행하는 것으로 확정하였다. (사)한국대기환경학회는 대기환경분야의 전문 학술단체로 대기환경의 질을 향상시키기 위한 학술 연구, 기술 개발과 정보 교환을 통해 국가발전에 기여함을 목적으로 운영하고 있다. 한국대기환경학회 학술지는 한국연구재단의 SCOPUS지로 그 위상을 공고히 지키고 있으며, IUAPPA와 긴밀한 협력을 통해 학술 활동의 국제화에도 힘쓰고 있다.

한국산학기술학회는 7월 1일 (금)부터 2일 (토)까지 2일간 ICC제주국제컨벤션센터에서 진행되었다. 공동 학술대회는 7월 1일 (금) 9시부터 11시까지 2시간동안 총 9명이 “지역 대기오염 현황 및 개선(기술) 정책”이라는 제목으로 발표하였다. 특별세션은 충남연구원 서해안기후환경연구소 이상신 연구소장이 좌장으로 각 기관별로 추진 중이 과제의 목적과 추진 경과에 대해 소개하고, 플로어의 질의응답 등으로 진행되었다.

[표 6-1] 공동 학술대회(한국산학기술학회) 발표논문 리스트

	발표자	논문제목	소속
1	김종범	고농도 미세먼지 발생시 PM2.5의 지역별 특성 분석	충남연구원
2	박세찬	충남지역 화력발전소 인근 대기오염물질 농도추이 분석	충남연구원
3	김관철	원격탐사 기법을 활용한 산불 조기 탐지 기술 개발	차세대융합기술연구원
4	박건철	시민참여형 인터랙티브 소통 플랫폼 개발을 위한 핵심성공요인 도출 : 도시계획지원플랫폼의 UX/UI를 중심으로	차세대융합기술연구원
5	이다숨	계절적 고농도 미세먼지와 기상 패턴의 상관성 분석	차세대융합기술연구원
6	김대환	서울시 생활환경별 특징과 그에 영향을 미치는 도시계획 특성 분석을 위한 방법론 고찰 - 2020~2022년 S-dot 빅데이터를 중심으로-	차세대융합기술연구원
7	최우석	수도권 및 충청남도의 미세먼지 농도 변동성에 따른 지역 구분	세종대학교
8	송민영	인쇄소 발생 대기오염 특성 및 기술적 저감 방안	서울기술연구원
9	전혜준	서울시 도장시선 VOCs 발생 및 오존생성기여도 분석	서울기술연구원



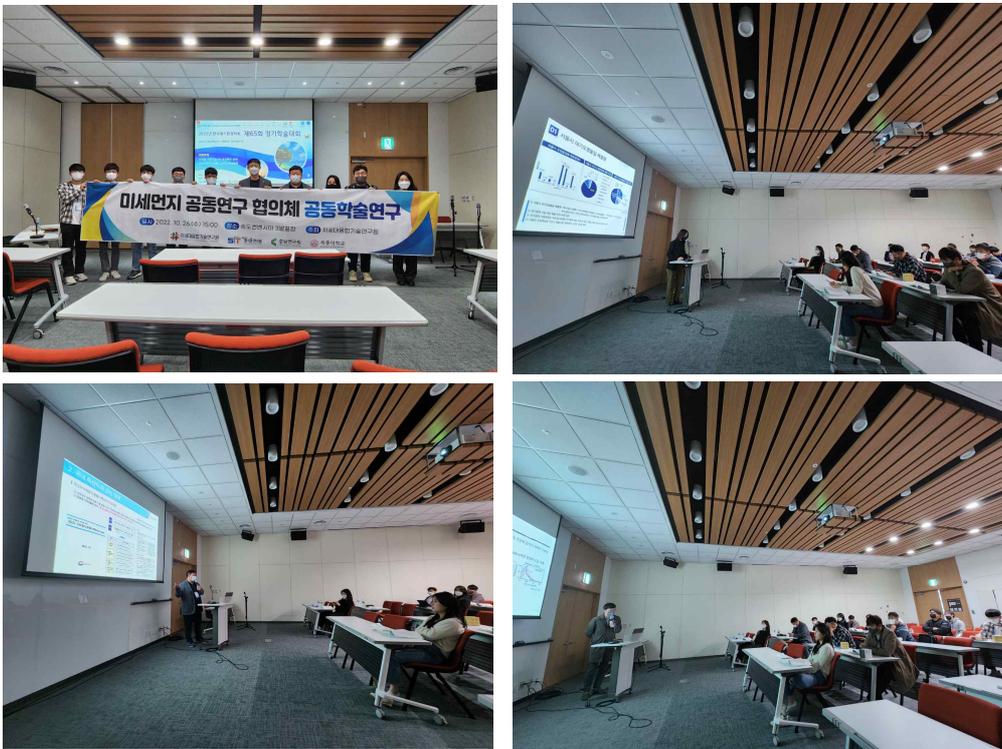
[그림 6-7] 공동 학술대회(한국산학기술학회) 진행 모습

한국대기환경학회는 10월 26일 (수)부터 28일 (금)까지 3일간 송도컨벤시아에서 진행되었다. 그 중 특별세션은 10월 26일 (수) 15시부터 16시 40분까지 1시간 40분으로 진행되었기에 지역간 공동연구에 관심이 많은 학생, 연구자들의 참여가 많이 이루어졌다.

공동 학술대회는 10월 26일 (수) 15시부터 16시 40분까지 1시간 40분 동안 총 5명이 “미세먼지 공동연구 협의체 공동학술연구”라는 제목으로 발표하였다. 특별세션은 차세대융합기술연구원 김관철 실장이 좌장으로 각 기관별로 추진 중이 과제와 목적과 추진 경과에 대해 소개하고, 플로어의 질의응답 등으로 진행되었다.

[표 6-2] 공동 학술대회(한국대기환경학회) 발표논문 리스트

	발표자	논문제목	소속
1	이다솜	파주출판단지의 VOCs 공간분포에 관한 연구	차세대융합기술연구원
2	송민영	서울시 VOCs 배출시설의 특성 및 저감 방안	서울기술연구원
3	김종범	축산악취관련 국가 정책추진 현황 및 충청남도의 악취관리 사례	충남연구원
4	최우석	서울시 대기질 주간 변동 변화와 주요 기작	세종대학교
5	신성균	도심지역 대기질 측정을 위한 원격탐사 기술의 최적화 연구	서울기술연구원



[그림 6-8] 공동 학술대회(한국대기환경학회) 진행 모습

3. 연구교류 세미나

연구교류 세미나의 가장 큰 목적은 각 기관별로 진행하고 있는 연구에 대한 공유와 인적 네트워크 구축으로 잡았다. 이에 기존에 과제 참여 중인 3개 기관외에 제주연구원, 제주권 대기환경측정소 관련 전문가를 초청, 지역별 미세먼지 특성과 탄소중립 관련 선진사례에 대해 같이 논의하는 자리를 마련하였다. 세미나는 2022년 6월 30일 (목) 14시부터 18시까지 제주연구원에서 진행하였다.

제주연구원은 제주특별자치도가 출연한 연구기관으로 제주발전을 위한 전 분야의 심층적 연구를 통해 제주도민의 행복한 삶의 질 제고와 지역 발전에 기여하고 있다. 제주도의 경우 내륙지역과는 다른 미세먼지 특성을 보이고 있었는데 제주연구원에서는 황사를 포함하여 장거리 이동오염물질과 오존 발생 특성 등과 같은 다양한 연구를 수행하고 있었다. 특히 최근에는 제주탄소중립지원센터를 개소하여 탄소중립에 대한 관심과 연구 분야를 확장시키고 있는 추세이다. 현장 방문은 본관에서 제주연구원의 소개와 운영 목적에 대해 소개받은 후 세미나 실로 자리를 옮겨 각 연구 기관별 기관 소개 및 최근 연구 동향에 대한 세미나로 진행되었다. 현장에는 차세대융합기술연구원 4명, 서울기술연구원 3명, 충남연구원 5명, 세종대학교 1명 등 총 16명이 참석하였다.

[표 6-3] 제주연구원 연구세미나 발표 리스트

	발표자	논문제목	소속
1	신우석	제주도의 환경이슈 및 기후대기환경관련 연구동향	제주연구원
2	김종범	충남의 환경이슈 및 기후대기환경관련 연구동향	충남연구원
3	송민영	서울의 환경이슈 및 기후대기환경관련 연구동향	서울기술연구원
4	김관철	차세대융합기술연구원의 설립목적과 연구추진 현황	차세대융합기술연구원
5	최우석	세종대학교 연구실 소개 및 연구추진 현황	세종대학교



[그림 6-9] 제주연구원 연구세미나 진행 모습

참고문헌

- 경기데이터드림(<https://data.gg.go.kr/>), 경기도, 2022
- 국가미세먼지 정보센터(<https://www.air.go.kr/index.do>), 환경부, 2022
- 대기오염측정망 설치운영 지침, 환경부·국립환경과학원, 2021
- 대기환경연보 2021, 국립환경과학원, 2022
- 대기환경보전법 시행규칙, 별표 7 대기오염경보 단계별 대기오염물질의 농도기준, 환경부, 2019
- 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr>), 한국환경공단, 2022
- 제 61회 충청남도 통계연보, 충청남도, 2022
- 환경정책기본법 시행령, 별표 1 환경기준, 환경부, 2022
- 휘발성유기화합물 관리현황 및 저감계획, 환경부, 2002
- 2019 국가 대기오염물질 배출량, 환경부, 2021
- 이동측정차량을 활용한 부천시 대기오염의 공간 분포 특성 연구, 한국입자 에어로졸학회 17(1), 9-20, 김종범, 김창혁, 노수진, 황은영, 박덕신, 이정주, 김정호, 2021
- Spatial Mapping of Highly Non-Uniform Distribution of Particle-Bound PAH in a Densely Populated Urban Arera, Atmosphere 11, 496, 김경환, 곽경환, 이재영, 우성호, 김종범, 이승복, 류성희, 김창혁, 배귀남, 오인보, 2020
- Wallace LA. and Pellizzari ED. Personal air exposures and breath concentrations of benzene and other volatile hydrocarbons for smokers and nonsmokers, Toxicology Letters; 1987; 35(1); 113-116
- Identification of Atmospheric PM10 Sources and Estimating Their Contributions to the Yongin-Suwon Bordering Area by Using PMF, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24, 4, 439~454, 이형우, 이태정, 양성수, 김동술, 2008
- Estimation of PM10 Source Contributions on Three Cities in the Metropolitan Area by Using PMF Model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25,

4, 275~288, 이태정, 허종배, 이승목, 김신도, 김동술, 2009

Source Apportionment of PM10 at Pyeongtaek Area Using Positive Matrix Factorization(PMF) Model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 34, 6, 849~864, 허종원, 김찬혁, 민윤기, 김현자, 성연국, 김종수, 이경빈, 허종배, 2018

부록

1. 미세먼지 공동연구 협의체 연구교류 세미나 자료집
2. 산학기술학회 특별세션 발표초록집/발표자료
3. 한국대기환경학회 특별세션 발표초록집/발표자료