정부-지자체 출연기관간 대기분야 연구교류 세미나

Ⅰ 추진배경

○ 정부의 다양한 환경개선 정책으로 가시적인 대기환경 개선 효과가 나타나고 있으나 $PM_{2.5}$와 O_3으로 대표되는 2차 생성물질의 경우 정체 또는 증가 추세에 있어 2차 생성 오염물질에 대한 관리 대책 마련이 필요함

○ 다양한 측정분석 인프라를 구축하고 있는 정부출연연구기관을 필두로 $PM_{2.5}$ 생성원인 규명 연구가 수행되고 있으며, 한국표준과학기술원은 국내 측정분석 표준개발 및 플랫폼 개발의 선두적인 역할을 하고 있음

○ 석탄화력발전소를 비롯하여 대형배출시설에 대한 영향분석을 위해 측정분석 자료가 수집되고 있으나 대부분 농도 수준의 기초 자료에 불과해 2차 생성에 대한 원인분석과 생성원인 규명에 많은 어려움을 겪고 있음

Ⅱ 추진목적

○ 대기분야 연구기관간 연구교류 및 2차 생성물질 측정분석 연구동향 파악

○ 첨단 측정장비 운영 및 자료 해석에 대한 경험 교류

○ 충남연구원이 운영 중인 마을대기측정망의 자료 확대 활용 방안 모색

Ⅲ 기대효과

○ 연구원간 연구 네트워크 구축

○ 선진 측정망 견학을 통한 연구원 역량 강화

○ 국가 측정망 자료 활용방안 검토

Ⅳ 행사개요

- (CNI세미나 2025-39) 정부-지자체 출연기관간 대기분야 연구교류 세미나
- 일 시 : 2025년 7월 2일(수), 14:30~17:00
- 주 관 : 충남연구원
- 장 소 : 한국표준과학연구원
- 참석기관 : 충남연구원, 한국표준과학연구원, 충남녹색환경지원센터

Ⅴ 세부일정

소 요 시 간		내 용	비고
14:30~14:40	10분	개회 및 참석자 소개	김종범 책임연구원 (충남연구원)
14:40~15:20	40분	지자체 대기정책 연구 사례 및 마을대기측정망 운영 현황 소개	김종범 책임연구원 (충남연구원)
15:20~16:00	40분	미세먼지 이차생성 규명을 위한 전주기 측정기반 구축	정진상 책임연구원 (한국표준과학연구원)
16:00~16:50	50분	한국표준과학연구원 Lab tour 및 첨단측정장비 시연	김선우 선임기술원 (한국표준과학연구원)
16:50~17:00	10분	마무리	

지자체 대기정책 연구사례 및 마을대기측정망 운영 현황

2025. 7. 2. (수)

충남연구원 서해안기후환경연구소

CONTENTS

충남연구원
ChungNam Institute

1. 충남연구원 소개

충남연구원(ChungNam Institute)

충남연구원은 충남의 미래를 연구합니다

- **비전**
  - ✓ '힘쎈충남'의 행복한 미래를 여는 충남연구원

- **설립목적**
  - ✓ 충남도 및 시군의 중장기 발전전략 구상
  - ✓ 체계적, 전문적 조사분석과 현장연구 수행
  - ✓ 지역균형발전과 지역경쟁력 향상에 기여

- **구성**
  - ✓ 5실, 1본부, 1단 3센터로 구성
  - ✓ 약 160여명 근무
  - ✓ 환경관련 특성화 연구 수행 (공간환경연구실, 서해안기후환경연구소)

충남연구원 ChungNam Institute

충청남도 서해안 기후환경연구소 Seohaean Research Institute

1. 충남연구원 소개

충남연구원
ChungNam Institute

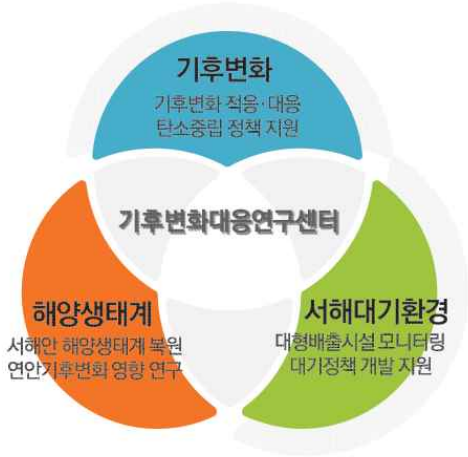
서해안기후환경연구소

설립목적 (2015년 03월 개소)

- 충청남도 산하 지방출연기관인 충남연구원 부설 연구소
- 기후변화대응연구센터, 물환경연구센터로 구성
- 충청남도와 서해안 연안의 기후변화 대응 기반을 조성
- 환경보전을 통한 지속가능한 발전 도모

주요 연구분야

- 기후변화 정책지원
- 에너지·온실가스 관리
- 기후변화적응대책 수립
- 연안환경관리
- 기후변화 모니터링
- 녹색경영지원



충남연구원 서해안기후환경연구소

충남연구원 ChungNam Institute | 충청남도 서해안 기후환경연구소 Seohaean Research Institute

충남연구원(원장 유등훈) 기후변화대응연구센터는 충청남도의 기후변화 대응과 대기질 개선, 해양연안환경 연구를 수행하고 있다. 충청남도에는 석탄화력발전소 뿐만 아니라 우리나라 3대 제철소 중 하나인 현대제철과 대산석유화학단지 등 서북부지역을 중심으로 온실가스·대기오염물질 다 배출시설이 위치해 있다. 기후변화 측면에서는 전국 1위의 온실가스 배출지역으로 탄소중립 달성목표를 위한 현안이 산재해있고, 대기환경측면에서는 자체 배출과 국외 유입 오염물질 직접 영향 지역으로 대기질 관리와, 서해 연안지역 해양쓰레기 문제 등으로 지역의 환경문제 관심과 참여가 높은 지역이다. 기후변화대응연구센터는 2015년 3월 서해안기후환경연구소 개소와 함께 설립되어 기후변화, 대기환경 및 해양환경 분야 13명의 연구원이 근무하고 있으며, 관련분야 충청남도 환경현안해결을 위한 연구와 도민 인식전환에 중추적 역할을 수행하고 있다.

○ 기후변화 대응연구, 탄소중립 정책개발, 기후변화 교육

우리나라는 전 세계 기후위기 대응 동참을 위해 2050 탄소중립 전략을 수립하고 추진 중에 있으며, 충청남도는 2045년 탄소중립을 목표로 하고 있다. 충청남도는 온실가스 배출 1위 지역(국가 배출량의 23% 내외)으로 국가 목표 달성을 위해 매우 중요한 지역이라 할 수 있다. 또한, 서해연안을 중심으로 기후변화 심화로 인해 기후위기 적응의 시급성과 중요성이 큰 지역이다. 우리 센터는 지역의 온실가스 관리와 기후위기 적응대책 이행점검, 탄소중립 계획수립, 목표관리제 지원 등 기후변화 대응을 위한 연구와 정책지원을 수행하고 있으며, 온실가스 배출원 관리, 산림과 블루카본 등 흡수원 관련 연구개발을 진행 중에 있다. 지역 기후위기 취약성평가, 리스크 관리 등의 연구를 통해 지역의 기후위기 적응역량 강화에 기여하고 있으며, 지역 기후변화 인식제고를 위한 기후변화 교육 프로그램을 지속적으로 운영하고 있다.

○ 깨끗한 해양환경 조성과 해양생태복원

전 세계적으로 나타나고 있는 지구온난화 현상으로 해수면 상승, 개발위주에서 해양환경의 보전 및 관리, 복원에 대한 국제적 의무 증대, 갯벌 가치에 대한 재조명, 연안·하구 수질 악화, 해양폐기물 등이 지속적으로 이슈화 되고 있다. 이에 충청남도는 충남 바다를 지속가능한 성장 동력으로 활용하고자 "서해안 비전"과 "해양수산발전계획" 등을 수립하였고, 지속가능발전목표(SDGs) 2030을 추진, 「전략 14-해양자원의 보전」을 제시한 바 있다. 충청남도가 탄소중립 시대를 선도하기 위해 해양수산 분야에서 △깨끗한 해양환경만들기, △서해안 해양생태계 복원·보전, △서해 연안의 호소, 습지 등의 환경개선, △기후변화와 해양환경 교육 등의 다양한 정책들을 추진하고 있다. 충남연구원 기후변화대응연구센터는 서해안 연안환경측정망 모니터링, 충남 해양생태계 보전·관리 세부실천계획

〈 대기환경학회 연구실 소개(23.12월호) 〉

연구소 구성

□ 총원 11명 : 연구위원 2명, 책임연구원 1명, 연구원 8명 / 박사급 4명, 석사급 5명, 학사급 2명
□ 해양연구 2명, 기후분야 3명, 대기정책 2명, 마을대기측정망 운영 4명

성명	직급/직책	담당업무
이상신 (박사)	연구위원 / 기후변화대응센터장	기후대기, 탄소중립 및 기후위기 적응정책
윤종주 (박사)	연구위원	해양환경관리 및 정책수립, 연안 방재 연구
김종범 (박사)	책임연구원	대기 및 실내공기질, 대기환경정책
이상기 (박사)	연구원	탄소중립 정책, 온실가스 공공목표관리제
이상우 (석사)	연구원	해양환경 연구
김아람 (석사)	연구원	마을대기측정망 운영, 기후변화 대응 연구
황규철 (석사)	연구원	대기환경 정책, 대기 데이터 분석
고성훈 (석사)	연구원	마을대기측정망 운영, 기후변화 대응 연구
이혜연 (석사)	연구원	마을대기측정망 운영, 기후변화 대응 연구
윤희원 (학사)	연구원	온실가스 목표관리제, 기후변화 연구
정이령 (학사)	연구원	마을대기측정망 운영, 기후변화 대응 연구

2. 서해안기후환경연구소 연구 사례

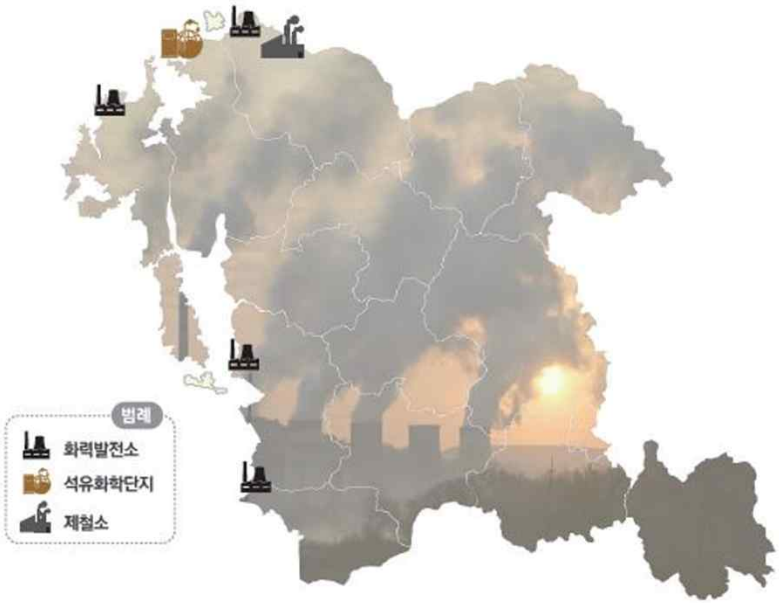
2. 서해안기후환경연구소 연구 사례

충남연구원
ChungNam Institute

충청남도의 환경 이슈 : 지역·환경적 여건 : 편서풍 지대에 위치한 중국의 영향, 쉴 틈 없는 오염벨트 지역

□ 지리적 여건 : 중국발 미세먼지는 대륙고기압 중심이 남쪽으로 이동하거나 북서풍이 강할 때 국내 유입됨

□ 환경적 여건 : 석탄화력발전소(당진, 보령, 태안, 서천), 대산 석유화학단지, 현대제철소 등 다수의 대형배출시설 위치



1 지리적 영향 ➡
- 편서풍 지대
- 장거리 이동 대기오염물질
- 중국발 황사의 영향

2 환경적 영향 ➡
- 전국 석탄화력발전소의 ½ 위치
- 전국 3대 석유화학단지 위치
- 쉴 틈 없는 오염벨트(자체+외부영향)

3 끊임없는 사건사고와 보도자료 ➡
- 한화토탈 유증기 사고 등 지속적 화학사고
- 대기오염물질 배출급증(KORUS-AQ)
- 주민들의 우려와 정부에 대한 불신 증가

복합적인 환경문제 발생 ➡ 주민 건강 보호와 대기환경 개선을 위한 대기 관리 대책 마련이 시급

2. 서해안기후환경연구소 연구 사례

충남연구원 ChungNam Institute

화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구

□ 연구 목적 : 화력발전소 주변지역 기후환경 및 대기질 영향 조사 / 2017~2023년 (5년간 약 50억원)
□ 연구 내용 : 발전소 주변지역 기후, 대기현황 분석, 생태환경 조사, 피해비용 산정

☑ 연구최종목표 : 화력발전소 주변지역 환경복지 구현을 위한 기후환경변화 과학적 실증자료 구축

1st : 기후환경 영향조사 기반마련과 법제도 분석
2nd : 맞춤형 정보생산과 피해비용 분석
3rd : 정보서비스 기반확보와 취약지역 관리방안 마련
4th : 기후환경 정보확대와 내외부 기여도 평가

✓5차년도 목표 : 기여도 분석을 통한 피해비용분석과 생태환경 영향분석

세부 1. 대기환경정보구축	세부 2. 대기질 측정분석	세부 3. 사회적 피해비용 평가	세부 4. 생태환경 모니터링
정보구축·확산과 모델링 시스템 운영	**취약지역 대기질 측정분석과 관리**	**피해비용 농도반응함수 개발 기초조사**	**생물종,취약종,산림생태 오염물질 모니터링**
• 3차원 대기모델링 구축 • 대기질 영향파악(기여도분석) • 기후환경 DB 시스템 개선 • 고정측정망 운영 • 미기후, CO2 모니터링 • 지역 거버넌스 최적안 제시 충남연구원 ChungNam Institute	• 발전소 배출시설 배출량 산정 및 특성평가 • 실시간 비산먼지 배출량 평가 및 국가배출량 추가 방안 • 비산먼지 발생량 분석 및 배출저감 대책효과 분석 대전대학교 DAEJEON UNIVERSITY	• 화력발전소 기인 농도-반응함수 개발 • 사회적 피해비용 산정 • 자원시설세 증세 대안 마련 • 화력발전소 폐쇄에 따른 가상 시나리오 분석 kfq 한국품질재단 Korean Foundation for Quality	• 주변지역 수목내 수은 분석 • 포유류, 어류 중 중금속 분석 • 분야별 생태모니터링 • 분야별 종 목록 구축 • 기후변화 취약종 모니터링 • 모니터링 결과 도감 제작 KNU 강원대학교

- (시간적 범위) 2017~2023년(5년차 중 5차년도, 차수별 과업조정 기간 포함)
- (공간적 범위) 화력발전시설 및 그 주변지역을 중심으로 충청남도 전역고려

미기후 모니터링

고정측정망 운영

생활권 대기질 정보 제공

대기오염물질 기원 추정

정보DB 시스템 구축

지역 거버넌스 체계 구축

충남연구원
ChungNam Institute

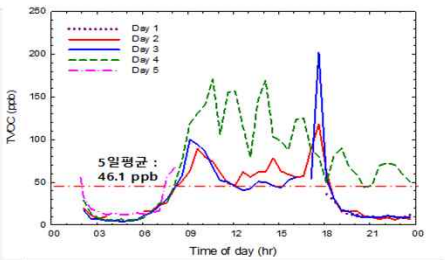
대산 공단지역 대기환경영향 조사

□ 연구 목적 : 대산 석유화학단지에 대한 현황조사 및 관리 정책 제언 / 2017~2019년 (2년간 7.5억원)
□ 연구 내용 : 석유화학단지 인근지역 대기질 모니터링, 위해성평가, 대기질 관리 정책 개발

지자체 지원 정책 : 주민 의견수렴

일시	행사명	목적	장소	대상 (참석자)
18.03.21-23	1차 설문조사	주민 의견수렴 및 인지도 조사	1대1 대면조사	이장단 (28)
18.09.03	1차 중간보고회	연구진행사항 보고	대산읍사무소	
18.12.13	주민간담회(1)	과제소개 및 향후 연구일정 공유	대산읍사무소	지역 및 환경협의체 (21)
19.01.17		간담회 결과 송부		지역 및 환경협의체 (21)
19.02-04	2차 설문조사	주민 의견수렴 및 인지도 조사	대산읍사무소 등	지역 및 환경협의체 (95/235)
19.04.25	2차 중간보고회(2)	연구진행사항 보고	중앙사회복지관	지역 주민 (82)
19.06.18	중간보고회 조치계획 설명회	중간보고회 조치사항 보고	대산읍사무소	대산지역 환경협의회 및 자문회 (8)
19.07.10		2차 보고회 조치결과 송부		대산지역 환경협의회 및 자문회 (39)
19.09.03	연구결과 보고회	연구결과 보고 및 개선방안 토의	대산석유화학단지	대산공단협의회 (10)
19.09.04	연구결과 보고회	연구결과 자문단 검토	대산읍사무소	대산지역환경협의회 및 자문회 (18)
19.09.19	주민공청회(3)	연구결과 보고 및 의견수렴	중앙사회복지관	대산(서산)지역 주민
19.10.01	주민설명회(4)	연구결과 보고 및 의견수렴	대죽1리마을회관	대산(서산)지역 주민

실시간 측정장비를 활용한 VOCs 연속 모니터링



Region	Substances (Unit : ppb)				Author
	Benzene	Toluene	Ethly-benzene	TVOCs	
Lanzhou (China)	4.5	4.0	3.0	125	Jia et al (2016)
Kaohsiung (Taiwan)	1.9	22	3.7	103.5	Lin et al (2004)
Kocaeli (Turkey)	8.6	14.8	2.8	47.17	Pekey et al (2018)
Ulsan (Korea)	1.25	5.25	1.07	-	NIER (2010)
Yeosu (Korea)	5.66	5.25	1.09	-	NIER (2009)
	1.32	4.88	0.27	-	Jeon et al (2006)
Gwangyang (Korea)	1.64	0.94	0.40	-	NIER (2009)
This study (Korea)	2.6	1.4	0.6	46.1	-

대산산업단지 대기질 개선 종합 대책

법 제도 마련

1. 대기보전 특별대책 지정
2. 특별관리권역 지정, 배출규제 실시
3. 화학사고 발생 대응 매뉴얼 개발·배포
4. 산업단지 주변지역 지원 사업 조례 제정

기반 구축

- **조사 DB 구축**
  5. 주요유해물질 공정 및 배출량 조사
  6. 배출시설 후처리 현황 조사
  7. 유해대기물질 실시간 모니터링 시스템 구축
  8. 대규모 배출시설 대기오염물질 저감계획 이행평가
- **시설 개선**
  9. 산업단지 배출시설 설비 개선 지원
  10. 산업단지 운행차량 DPF 의무화 및 LEZ 운영

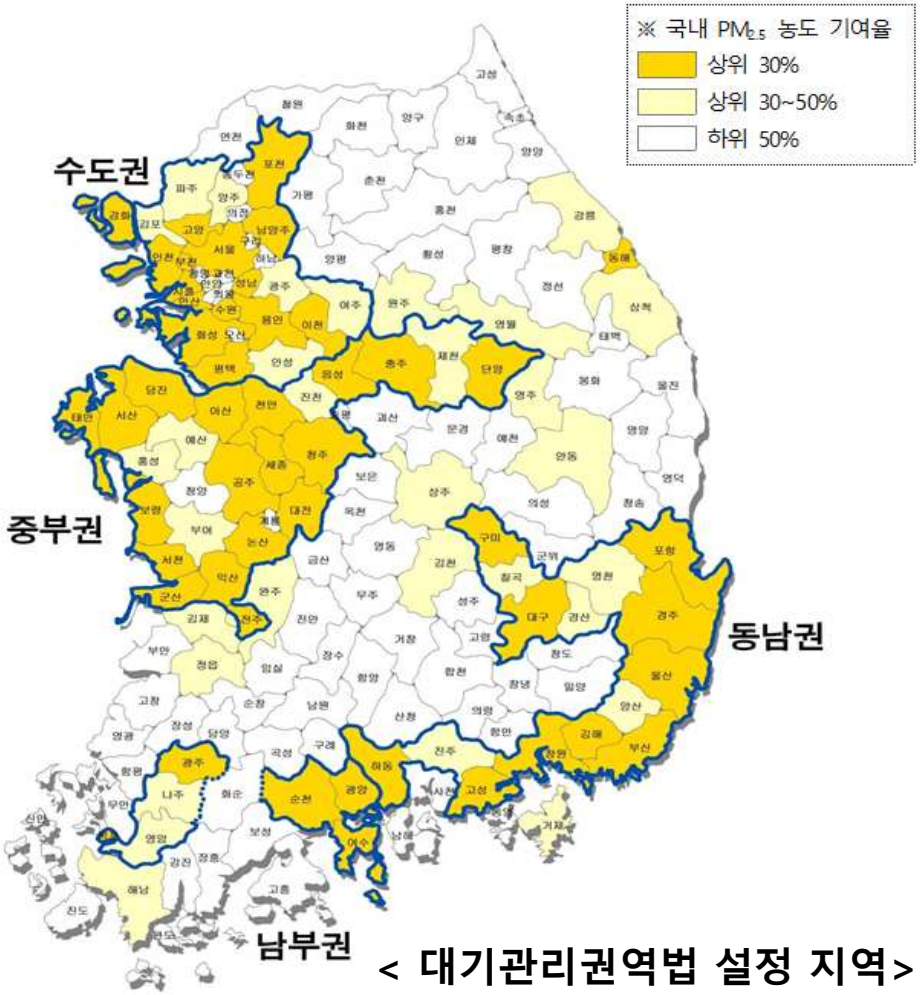
주민 지원

11. 민·관·사 거버넌스 구축 운영
12. 산업단지 주변지역 영향검토 지원
13. 주민지원 대기질 정보 센터 운영

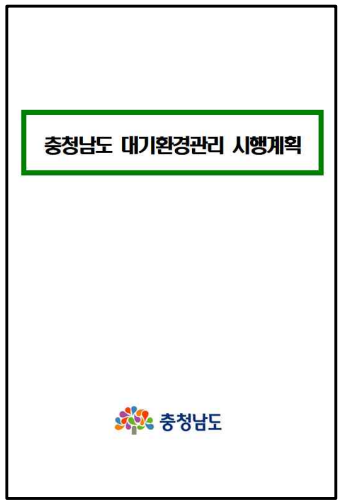
충남연구원 ChungNam Institute

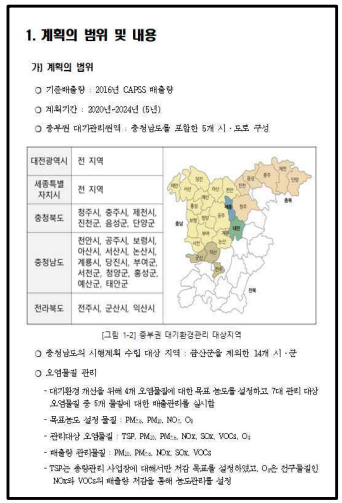
충청남도 대기환경관리 시행계획 수립

□ 연구 목적 : 대기관리권역법에 따라 지정된 중부권의 기본계획상 목표 달성을 위한 세부 시행계획 수립 / 2020년, 2024년
□ 연구 내용 : 충청남도의 대기질 현황 분석 및 미래예측, 목표달성을 위한 삭감량 산정 및 개선 세부시행계획 제시



< 대기관리권역법 설정 지역>





2. 서해안기후환경연구소 연구 사례

충남연구원 ChungNam Institute

서해안권 초광역 대기질 개선 프로젝트

□ 연구 목적 : 중국 등으로부터 유입되는 오염물질과 광역적으로 나타나는 대기오염에 대한 광역적 개선대책 마련 / 2021년
□ 연구 내용 : 광역 대기질 개선목표 수립, 고농도 미세먼지 발생시 정책협력 시스템 구축, 초광역 추진사업 개발

비전	빈 틈 없는 대기오염 관리 협력 벨트 구축		
추진목표	초광역권 대기오염 배출량 저감	서해안권 기초자료 축적과 관리시스템 구축	서해안권 초광역관리 체계 마련
추진방법	시설, 항만, 연안 관리협력 강화	대기환경 관리 통합 추진	대기질 통합 관리조직 구성
추진사업	초광역권 대기개선 관리협력 - 배출시설 지도점검 협력 - 항만주변 대기질 관리협력 - 연안도서 대기배출 관리협력	초광역권 대기환경 통합관리 - 대기질 통합분석시스템 구축 - 배출량, 시설조사 및 DB 구축 - 위해성 평가 및 관리시스템 구축	서해안권 대기환경 관리단 설치·운영
추진성과	초광역(인천, 경기, 충남) 공동 지도점검팀 운영	초광역권 대기환경 통합관리 시스템 운영	서해안권 대기환경관리단 운영

충남연구원 ChungNam Institute

탄소중립 기본계획 수립

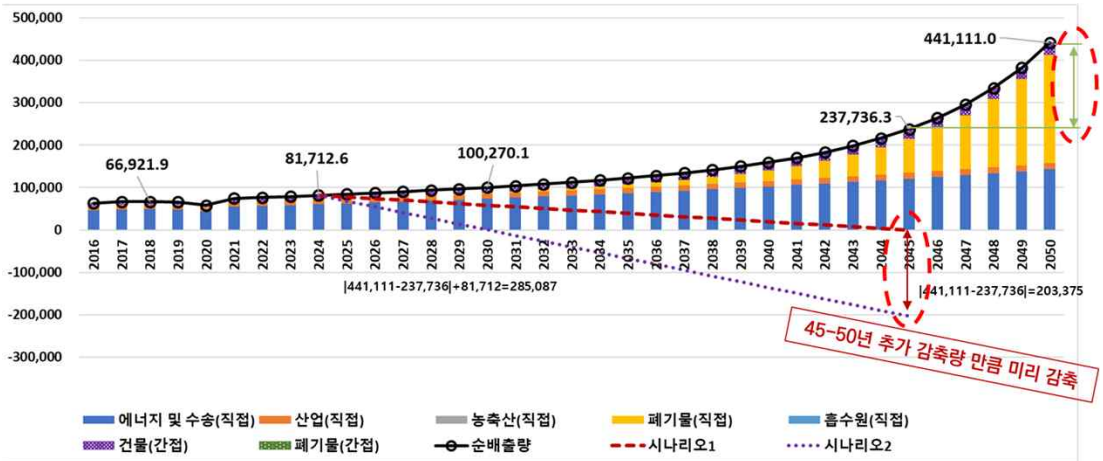
□ 연구 목적 : 2050 국가탄소중립 실현, 탄소중립기본법 제11조, 제12조 의거 법정의무사항
□ 연구 내용 : 지역 온실가스 배출현황과 전망, 탄소중립 실현을 위한 온실가스 감축 로드맵 수립 등

▪ 지역 탄소중립 녹색성장 기본계획수립 절차와 내용

Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5	Step 6
기후변화현황-전망 및 지역 관련 기존 계획 분석	당진시 온실가스 배출 현황 및 전망	상위 계획 및 시민 참여 의견 수렴	탄소중립 비전-목표 및 세부추진과제 수립	온실가스 감축 로드맵 수립	재정조달방안 및 탄소중립 인지예산제 적용방안 마련

▪ 법정계획 절차에 더하여 연구진이 새롭게 시도한 연구내용

2045 탄소중립 로드맵 수립시 탄소중립 속도에 따른 추가 필요 감축량 산정



이중맹검법 적용 : 정책효과의 극대화 유인방향 설정

연구진 A
국내외 탄소중립 우수지역 선별

연구진 B
연구진 A 결과에 대한 다방면 분석

탄소중립 정책방향
지역 특성에 맞게 적용하여 탄소중립 정책효과 극대화

기본계획 수립·운영 체크리스트 활용

충남연구원 ChungNam Institute

기후위기 적응대책 수립

□ 연구 목적 : 지역 기후탄력성 확보, 탄소중립기본법 제40조 의거 법정의무사항
□ 연구 내용 : 지역 기후변화 현황과 전망, 취약성 및 리스크 평가, 기후위기 적응대책 세부 로드맵 수립 등

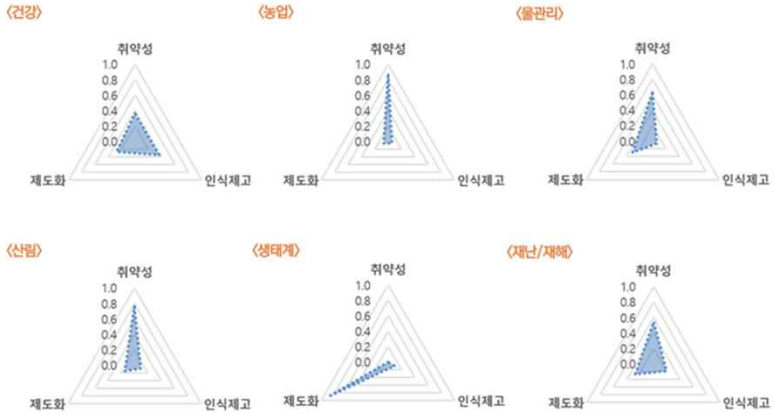
▪ 지역 기후위기 적응대책 세부시행계획 수립 절차와 내용

▪ 법정계획 절차에 더하여 연구진이 새롭게 시도한 연구내용

기후위기 적응사업 추진에 따른 취약성 개선 정도 평가

순위			지역	취약성 종합지수				노출	민감도	적응능력		
기존	전년도	이행년도		기존	전년도	이행년도	개선율			기존	전년도	이행년도
1	1	1	청룡동	0.36	0.36	0.36		0.34	0.01	0.00	0.00	0.00
1	1	1	신방동	0.36	0.36	0.36		0.26	0.09	0.00	0.00	0.00
4	3	3	원성2동	0.32	0.32	0.32		0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
6	4	4	봉명동	0.30	0.30	0.30		0.30	0.00	0.00	0.00	0.00
7	5	5	중앙동	0.28	0.28	0.28		0.29	0.00	0.01	0.01	0.01
8	6	6	수신면	0.26	0.26	0.26		0.29	0.00	0.03	0.03	0.03
9	7	7	원성1동	0.25	0.25	0.25		0.25	0.00	0.00	0.00	0.00
10	9	8	일봉동	0.24	0.24	0.24		0.24	0.00	0.00	0.00	0.00
10	9	8	문성동	0.24	0.24	0.24		0.26	0.00	0.01	0.01	0.01
5	11	8	성남면	0.30	0.17	0.24	20%	0.31	0.01	0.02	0.15	0.08
3	8	11	풍세면	0.34	0.24	0.22	35%	0.32	0.03	0.01	0.11	0.13
12	12	12	목천읍	0.16	0.16	0.16		0.15	0.01	0.00	0.00	0.00
13	13	13	신안동	0.12	0.12	0.12		0.11	0.01	0.00	0.00	0.00
14	14	14	북면	0.09	0.08	0.08	11%	0.11	0.00	0.01	0.02	0.03
15	15	15	병천면	0.08	0.04	0.06	25%	0.10	0.00	0.01	0.05	0.03
17	16	16	동면	0.00	0.00	0.00		0.04	0.00	0.03	0.04	0.05
16	17	17	광덕면	0.04	-0.08	-0.08	300%	0.06	0.00	0.01	0.14	0.14

부문별 세부사업 유형분류에 따른 정책방향 설정지원



충남연구원 ChungNam Institute

고농도 미세먼지 대응을 위한 지역간 공동 연구

□ 연구 목적 : 국지적으로 발생하는 미세먼지 사회이슈 대응을 위한 지역 연구간 공동 연구 및 이슈 발굴 / 2021~현재

□ 연구 내용 : 지역별 대기환경관련 추진 연구사례 조사, 소형사업장 대기오염물질 배출 특성 분석, 공동 세미나 및 학술대회 발표

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 41, No. 1, February 2025, pp. 49-66
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.1.049
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

충청남도의 지역별 오염 특성과 관리방안 연구: 농도 및 배출량 분석을 중심으로

A Study on Regional Pollution Characteristics and Management Policy in Chungcheongnam-do: Focusing on Concentration and Emission Analysis

황규철, 장은희, 김창혁[1], 노수진[2], 김동호[3], 김정호[4], 신인철[5], 김종범*
충남연구원 서해안기후환경연구소, [1]국립환경과학원 대기환경연구과,
[2]대림대학교 안전보건학과, [3]강원대학교 미세먼지관리 특성화대학원,
[4]열린공간, [5]충청남도 보건환경연구원 환경조사팀

접수일 2025년 1월 6일
수정일 2025년 1월 16일
채택일 2025년 1월 17일
Received 6 January 2025
Revised 16 January 2025
Accepted 17 January 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)41-630-3924
E-mail : kjb0810@cni.re.kr

Kyucheol Hwang, Eunhee Jang, Chang Hyeok Kim[1], Sujin Noh[2], Dongho Kim[3], Jeongho Kim[4], In-Chul Shin[5], Jong Bum Kim*
Seohaean Research Institute, Chungnam Institute, Hongseong, Republic of Korea
[1]*Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea*
[2]*Department of Health & Safety, Daeilm University, Anyang, Republic of Korea*
[3]*Department of Integrated Particulate Matter Management, Kangwon Natuional University, Chuncheon, Republic of Korea*
[4]*Open Space, Seoul, Republic of Korea*
[5]*Chungcheongnam-do Institute of Health & Environmental Research, Hongseong, Republic of Korea*

Abstract Environmental pollution management in Korea began with the enactment of the Framework Act on Environmental Policy in 1991. To manage air quality, national emissions inventories and pollutant concentration measurements have been conducted to set objectives and evaluate improvement efforts. Chungcheongnam-do, the focus of this study, is classified as part of the central region under the Air Quality Control Act and is managed by the Geum River Basin Environmental Office. However, uniform policies applied across the five provinces in the central region often fail to account for regional characteristics. This study analyzes air pollutant emissions and concentration data from 15 cities in Chungcheongnam-do to identify priority sectors and substances for management. Based on major emission sources and pollutants, the regions are categorized into four types: Energy-Industrial, Agricultural, Rural-Urban mixed, and Urban-Rural mixed. The diverse emission sources, environmental conditions, and topographical variations across these regions indicate that uniform policies may not effectively mitigate air pollution. To address this, the study proposes tailored regional policies that reflect the emission characteristics and major sources specific to each locality in Chungcheongnam-do. This approach underscores the importance of region-specific strategies for efficient air quality management and offers valuable insights for optimizing future environmental policies.

Key words: Region-specific air quality management, Environmental policy, Chungcheongnam-do, Clean Air Policy Support System (CAPSS), Air Quality Monitoring Station (AQMS)

1. 서 론

국내 대기질에 영향을 미치는 대기오염물질은 지역별로 다양한 배출특성을 가진다. 중국에서 유입되는 장거리 오염물질은 주로 겨울과 봄에 영향을 주며, 연구 사례에 따라 차이는 있으나 많게는 국내 오염물질

Atmospheric Pollution Research 16 (2025) 102497
Contents lists available at ScienceDirect
Atmospheric Pollution Research
journal homepage: www.elsevier.com/locate/apr

Understanding the physicochemical characteristics of $PM_{2.5}$ under meteorological influence: A study in South Chungcheong Province, South Korea (2021–2022)

Kyucheol Hwang[a], Sechan Park[a], Jeongho Kim[b,1], Jae Young Lee[c], Jong-Sung Park[d], Kwangyul Lee[d], Jungmin Park[d], Jong Bum Kim[a,*]
[a] *Seohaean Research Institute, Chungnam Institute, Hongseong, 32232, Republic of Korea*
[b] *R&D Center, Korea Environment Science Institution, Wonju, 26493, Republic of Korea*
[c] *Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Republic of Korea*
[d] *Climate & Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, 22689, Republic of Korea*

ARTICLE INFO
Keywords:
$PM_{2.5}$
Chemical composition
Meteorological conditions
South Korea
Seasonal PM management

ABSTRACT
Despite the implementation of various policies worldwide to reduce $PM_{2.5}$ concentrations, they have remained sufficiently high and cause serious environmental and health problems. Most studies and policies regarding $PM_{2.5}$ in South Korea have primarily focused on the Seoul Metropolitan Area, including Seoul, and there is a lack of research data necessary for implementing $PM_{2.5}$ management policies in South Chungcheong Province (SCP). In this study, we used data from the Air Quality Research Center in Seosan, SCP, to conduct a detailed analysis of $PM_{2.5}$, focusing on its chemical and physical properties as well as the influence of meteorological factors on $PM_{2.5}$ characteristics. The mean $PM_{2.5}$ concentrations were 16.7 ± 12.5 μg/m³ in the warm season and 31.1 ± 18.7 μg/m³ in the cold season, showing a twofold increase in the cold season. The ratio of NO_3^- in the chemical composition of $PM_{2.5}$ was higher in the cold season (19%) compared to the warm season (15%), while SO_4^{2-} was 1.75 times higher in the warm season. Using the atmospheric oxidant (Ox) and analyzing $PM_{2.5}$ concentrations under different photochemical conditions, we found that small particles dominated in the warm season, shifting towards smaller particle sizes in the size distribution with higher temperatures due to secondary particle production. In contrast, higher concentrations of $PM_{2.5}$ during the cold season were attributed to direct emissions and external influx. Our findings highlight the importance of managing small particles in summer and provide valuable data for South Chungcheong Province, aiding future policy development to reduce $PM_{2.5}$ levels.

1. Introduction

Despite continuous efforts to lower $PM_{2.5}$ levels, $PM_{2.5}$ has continued to cause problems for the environment and human health worldwide (Lim et al., 2020). Atmospheric $PM_{2.5}$ remains a major atmospheric pollutant and has various effects on the environment, climate, and human health (Yousefi et al., 2023; Zheng et al., 2019). The sources of $PM_{2.5}$ can be divided into natural and human-made emission sources, and a wide range of specific sources exist, including industrial processes, fuel combustion, and biomass burning (Padel et al., 2023; Kumar et al., 2017). Furthermore, in addition to the direct emission of $PM_{2.5}$ by primary sources, secondary production from physicochemical changes also significantly contributes to $PM_{2.5}$ concentration; thus, effectively managing $PM_{2.5}$ levels is difficult. In South Korea, the contribution of secondary production of $PM_{2.5}$ is especially high; thus, to reduce $PM_{2.5}$ levels, controlling secondary production must be prioritised (Kim et al., 2020).

From the perspective of climate, atmospheric $PM_{2.5}$ directly scatters and absorbs solar radiation, which is a direct effect of aerosols. Additionally, aerosols can indirectly affect the radiation budget in the Earth-atmosphere system by influencing cloud formation, properties, and lifetime through the provision of cloud condensation nuclei (CCN) (Che et al., 2018). Moreover, changes in meteorological factors (temperature, rainfall, humidity, cloud cover, etc.) owing to climate change could

* Corresponding author.
E-mail address: kjb0810@cni.re.kr (J.B. Kim).
[1] Now at Open Space, Seoul, 07511, Republic of Korea.

https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102497
Received 26 May 2024; Received in revised form 5 March 2025; Accepted 5 March 2025
Available online 6 March 2025

3. 연구과제 소개 I

- 지역별 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 상세분석 결과를 활용한 미세먼지 특성 및 생성원인 규명

지역별 $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ 상세분석 결과를 활용한 미세먼지 특성 및 생성원인 규명

□ 발주처 : 국립환경과학원(경기권 대기환경연구소) / 2022~2024년, 연 3억원
□ 참여기관 : 충남연구원, 아주대학교, ㈜미세먼지연구소
□ 연구 목적 : 대기환경연구소 데이터를 활용한 지역별 $PM_{1.0}$ 및 $PM_{2.5}$ 생성원인 규명

경기권 대기환경연구소
(**안산**, 서울, 서산)

분석기법고도화 PM1 자료확정

1 입자(PM1)생성 기원추정을 위한 질량분석장비 정도관리(표준절차 제시)
- 집중관측, 유효자료, Matrix 제시(PM2.5 연계)
- PM1 organic 분류 및 기여도 분석
- 생성기원파악을 위한 ORG VOCs 특성

2 PM1 PM2.5 연계분석
- PM1/PM2.5 mass & Chemical fraction
- PM1/PM2.5 inorganic, organic 특성 분석

PM2.5 현황분석 지역별특징

1 경기,수도,충청의 PM2.5 일반현황 및 고농도 사례시 특성
2 권역(지역)별 특성 비교 검토
- 일반대기오염측정소와 비교
- PM2.5 화학조성망과 비교

3 지역 미세먼지의 VOCs 및 광화학 영향 (예비조사) – 생성원인 규명
4 고농도 현상분류 및 예측

측정지역 특성 수직(공간)분포

1 안산(및 경기권) 산업단지 특성(배출) 파악
2 산업단지 주변 수직거동 특성 파악
3 산업단지 수평적 거동 특성 및 대기환경연구소 측정자료와 비교 분석
4 PM1.0에 대한 예측(경기,수도,충청)
(2차년 **AMS PM1 측정자료 비교검증**에 적용)
지역 기상요인의 PM 영향인자 제시

1단계(2022)
2단계(2023)

분석기법 정립 및 고도화, 현황 및 지역특성, 공간분포
PM1/PM2.5 분석 Data Matrix Merge 및 확정

1단계
2단계

PM1/PM2.5 특성 및 산업단지 공간분포 특성 / 고농도시 국내외 영향에 따른 원인 및 특성 규명
미세먼지 전구물질 및 광화학 입자생성 특성 규명 / $PM_{1.0}$/$PM_{2.5}$ 입자의 성장 및 거동 특성 규명
분석기법 고도화 / 향상된 대기질 분석 방법론 개발&제시 / 관리방안 제안

연구배경 및 필요성

□ 미세먼지 특별법 시행과 권역별 대기환경관리 기본계획에 따라 국가 및 권역별 대기환경개선 목표 수립(대기환경개선 시행계획)
□ 지역별 $PM_{2.5}$ 개선대책 수립을 위한 원인분석과 추진경과 분석을 위한 지역별 정밀측정 자료 확보 필요

'21년 전국 권역별 대기환경연구소 현황

□ **대기관리권역 설정**
- 2005년부터 지정된 수도권 외에 중부권, 동부권, 남부권을 권역으로 추가 총 77개 특광역시 및 시군을 권으로 관리

□ **권역별 맞춤형 대기환경관리 추진**
- 지역 특성을 고려한 광역적이고 체계적 관리 실시
- 환경부, 관계 중앙행정기관의 장 및 권역에 포함된 시도지사와 협의를 거쳐 권역별 대기환경개선 목표, 시도별 배출허용총량, 배출원별 저감계획 등이 포함된 권역별 〈대기환경관리 기본계획〉을 5년 마다 수립

□ **사업장 대기오염물질 총량관리제 확대 시행**
- 권역 내 위치한 690여개 오염물질 다량 배출사업장에 대한 총량규제 실시
- 2024년까지 2018년 대비 약 40% 감축목표

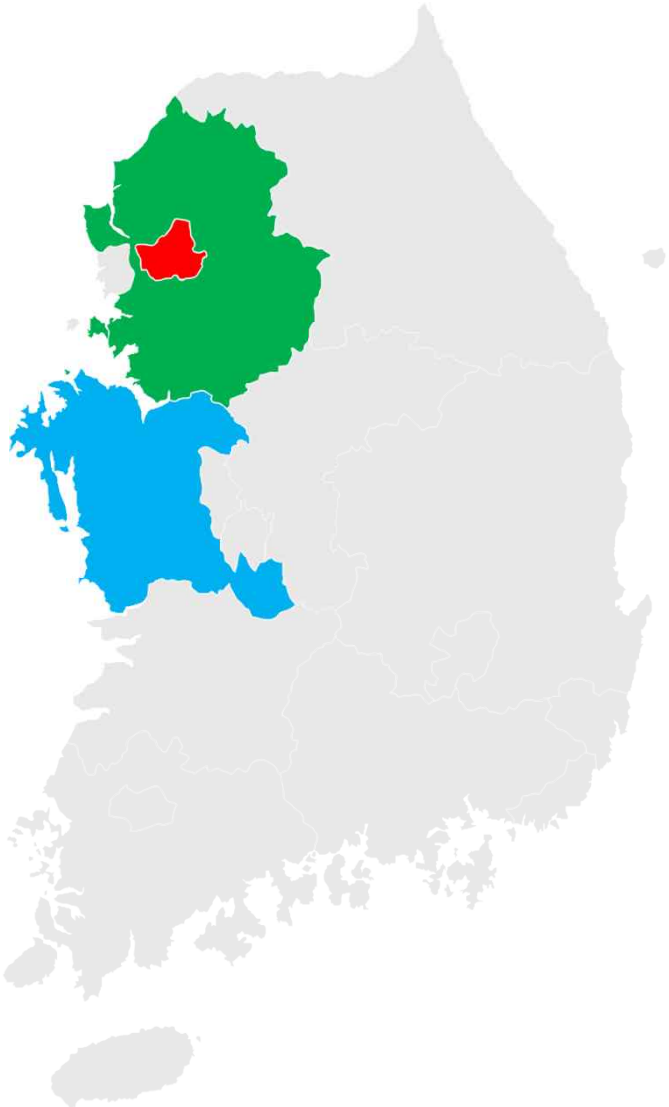
□ **자동차 및 건설기계의 배출가스 억제**

□ **생활주변 소규모 배출원 및 기타 배출원 관리**

개선대책 수립의 근거자료 확보 및 정책 추진에 따른 결과 해석을 위해 지역별 정밀분석 필요

충남연구원
ChungNam Institute

연구배경 및 필요성



- 대한민국 인구의 47.8% 거주 (서울, 경기, 충남)

- 대기오염물질 배출량의 1/3 (2019년 기준) 배출
- 경기 16.5%(1위), 충남 11.0%(3위), 서울 5.6%(8위)

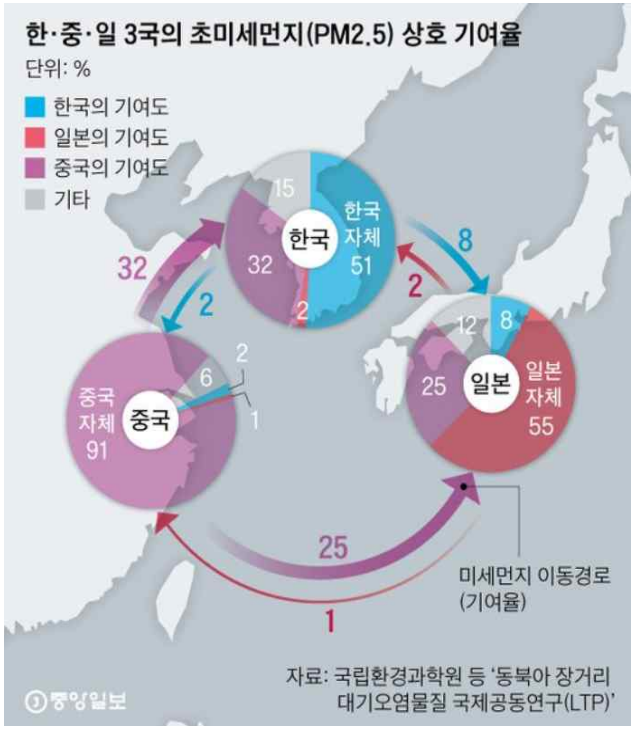
- 충남 지역 석탄화력발전소 전국 59기 중 29기 위치
- 전국 3대 제철소(당진), 전국 3대 석유화학단지(서산)

- 편서풍지대 위치 : 북서풍 및 서풍계열이 주풍
- 장거리이동오염물질에 직접 영향권(정서쪽 위치)

- 상이한 배출특성 지역(도심, 산업, 교외지역)
- 상이한 지역적 특성분석을 통한 연구결과 확산 용이

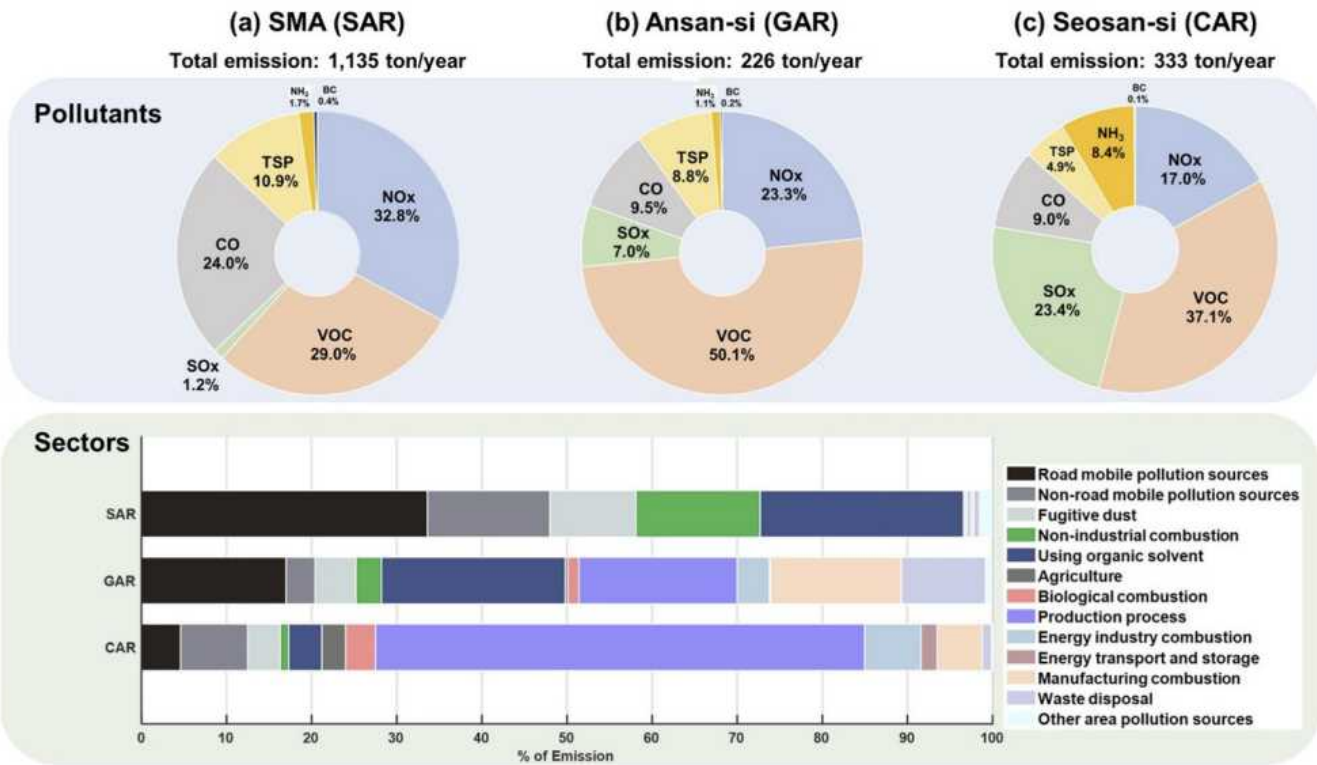
고농도 사례시 지역별 $PM_{2.5}$ 물리·화학적 특성

- □ 국내 고농도 $PM_{2.5}$ 발생시 해외유입과 국내 자체발생으로 구분되며, 지역 자체배출원에 대한 부분이 반영됨
- □ 수도권은 도로와 유기용제 사용, 경기권은 유기용제 사용, 도로, 산업배출, 제조업, 충청권은 산업배출의 기여도가 크게 나타남
- □ 국외/국외/지역특성을 고려한 자료 해석 및 대책 수립이 요구됨



자료 : 중앙일보(19.11.20)

〈지역별 대기오염물질 배출량 현황〉



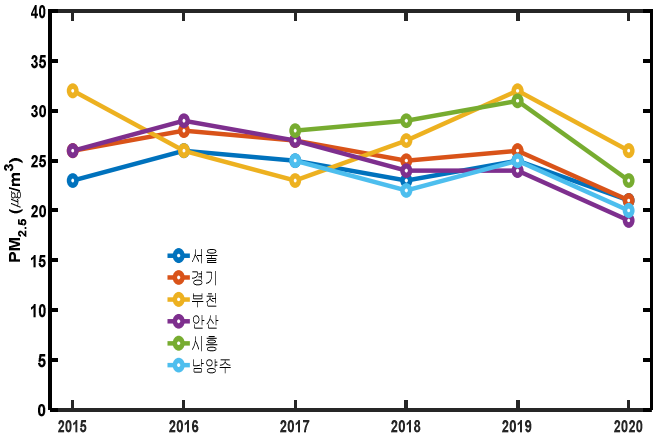
자료 : Hwang et al (2023, AJAE)

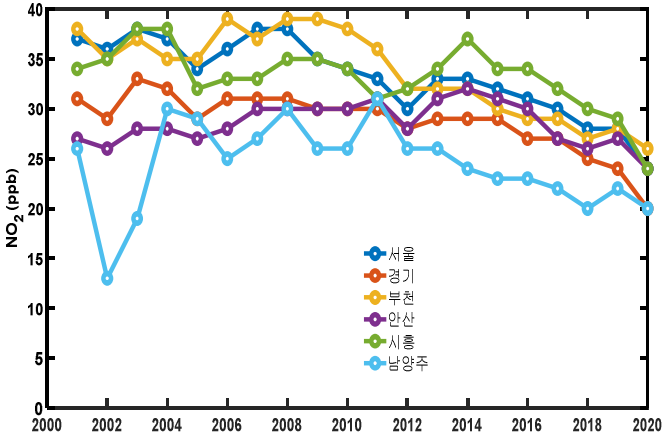
지역별 대기질 현황 분석

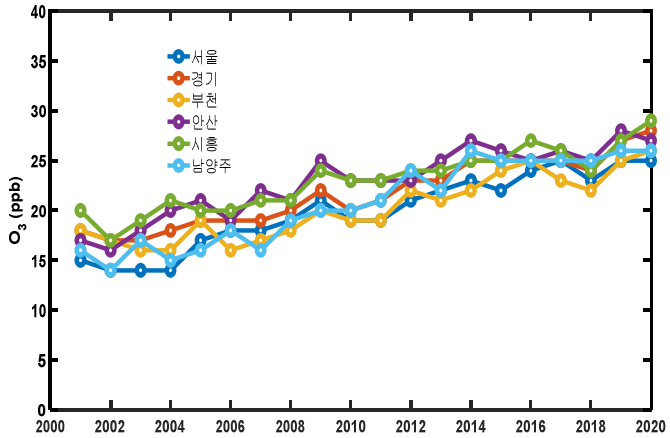
(자료 : 국립환경과학원, 대기환경연보, 2021)

- □ 측정소가 위치한 서울, 경기, 충남지역 모두 $PM_{2.5}$와 NO_2는 감소 추세이며, O_3은 증가 추세
- □ 수도권에서는 부천시가 NO_2와 $PM_{2.5}$ 모두 가장 높게 나타났고, 중부권에서는 천안이 높게 나타남 → 도심지역
- □ O_3는 시흥과 서산에서 높게 나타남 → O_3 전구물질 : NOx, VOCs (시화·안산, 서산 VOCs 배출기여도 높음)

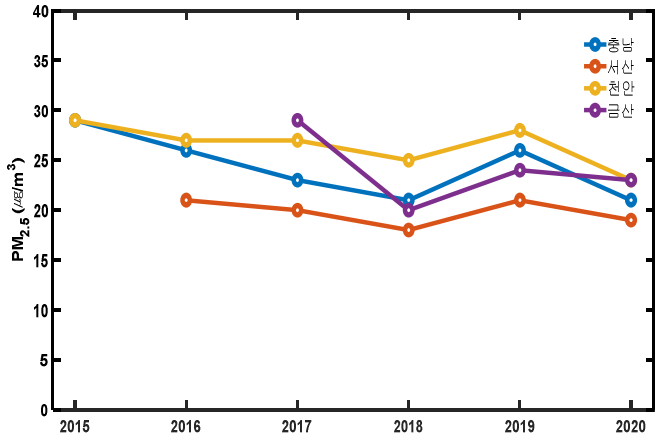
〈수도권〉

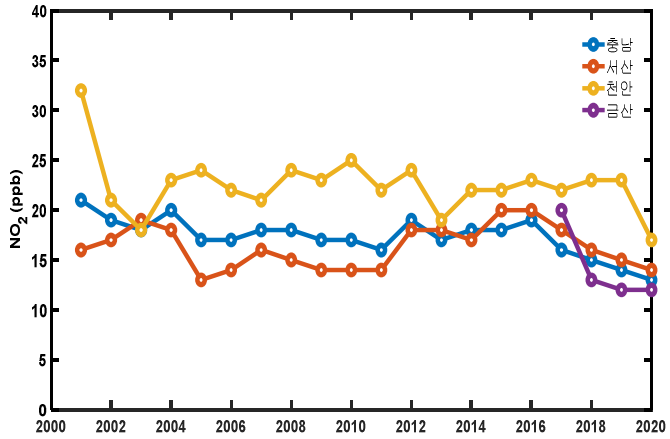


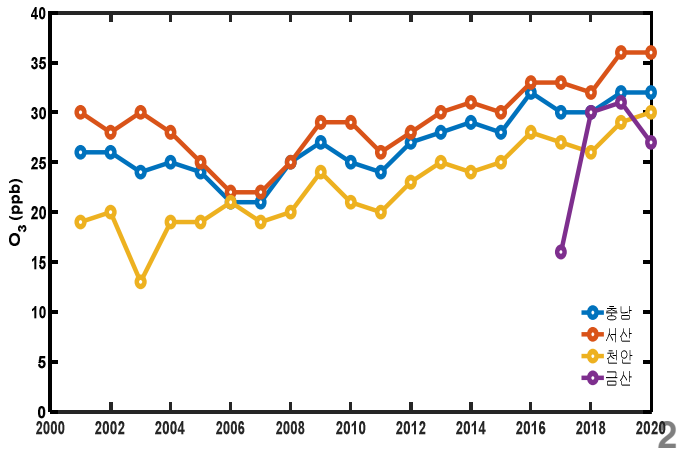




〈중부권〉



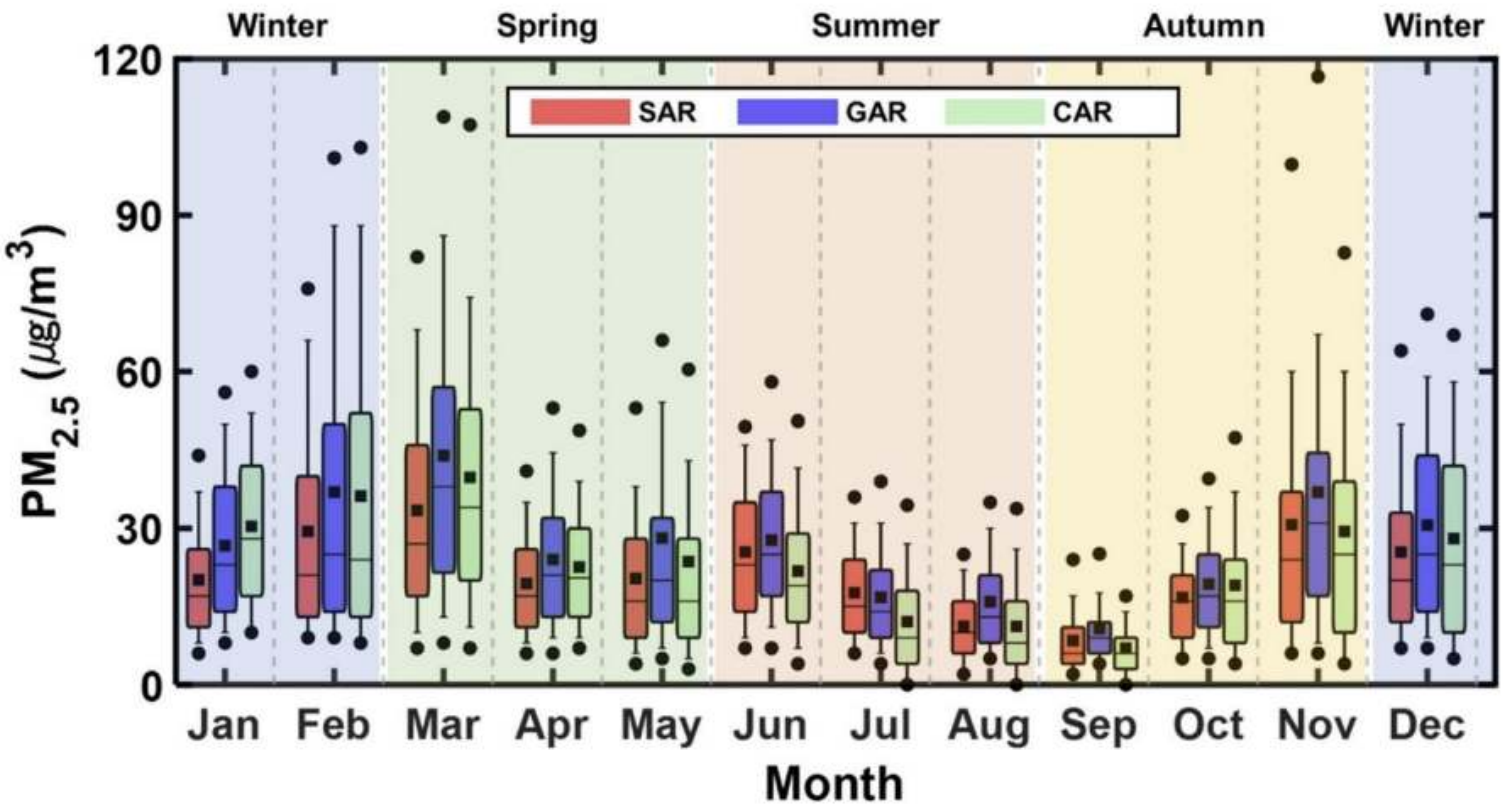




지역별 $PM_{2.5}$ 특성 : 월간, 계절별

□ 미세먼지 계절관리제가 이루어지는 겨울철(1~2, 11~12월)에 농도가 높고, 편차가 가장 크게 나타남
□ 계절별 최대/최소농도 차이 : 경기권 4.1배, 수도권 4.0배, 충청권 : 5.7배

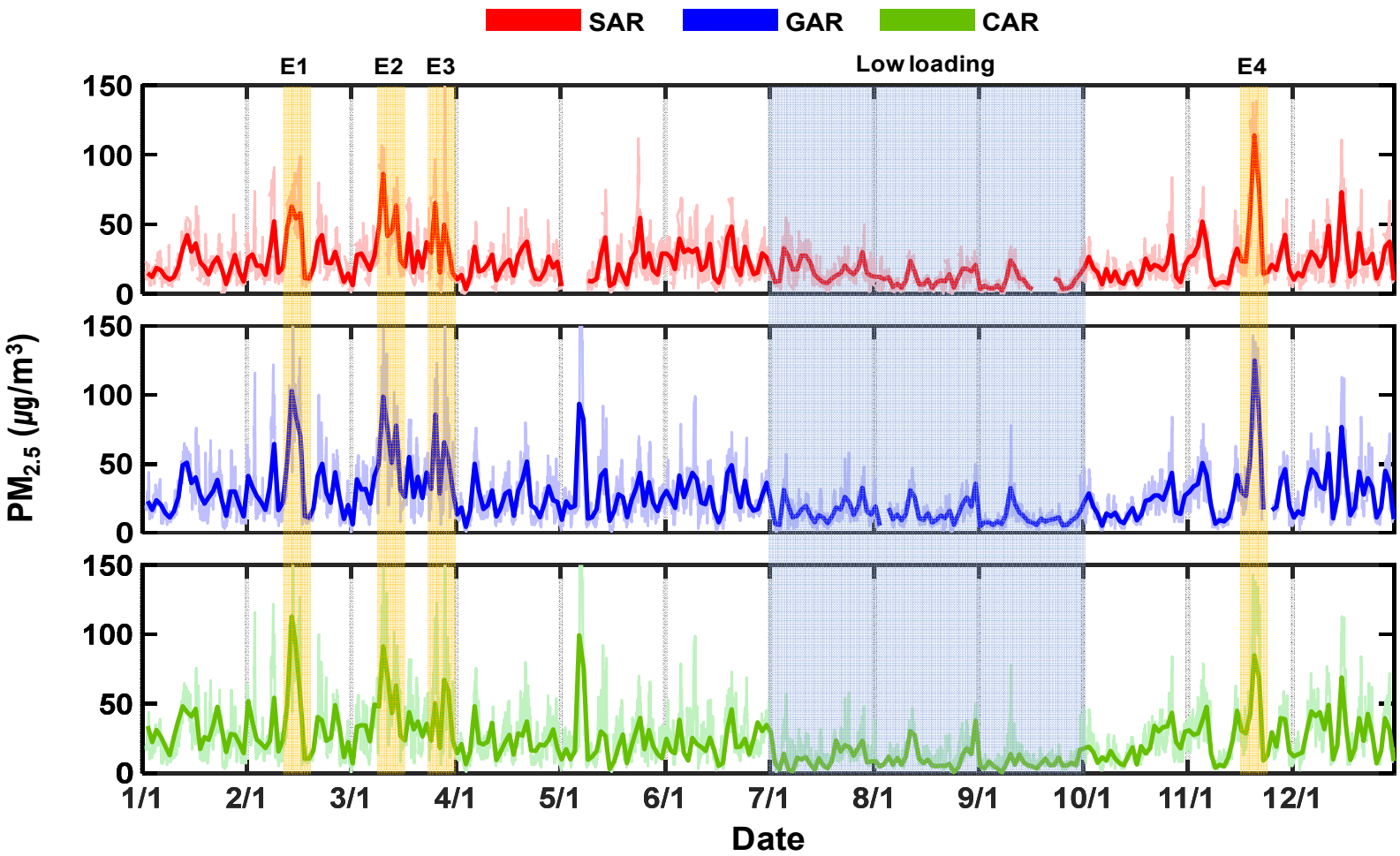
▪ **지역별 월별 $PM_{2.5}$ 평균 농도**

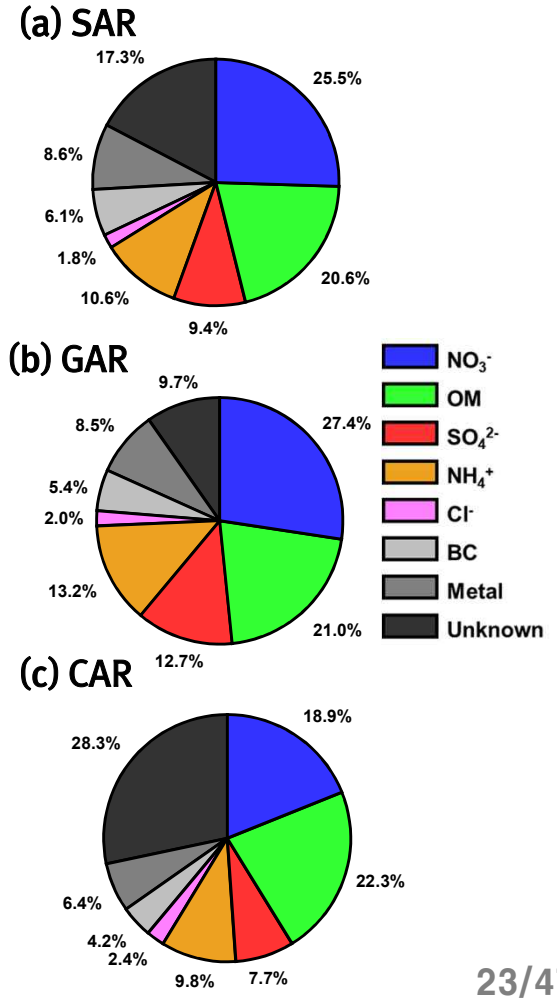


	서울 (SAR)	경기 (GAR)	충청 (CAR)
1월	20.1	26.7	30.4
2월	29.4	37	36.2
3월	33.5	44	39.8
4월	19.4	24	22.5
5월	20.3	28.1	23.6
6월	25.5	27.7	21.7
7월	17.7	16.8	12.1
8월	11.2	15.9	11.2
9월	8.4	10.8	7
10월	16.7	19.3	19
11월	30.7	37	29.5
12월	25.4	30.6	28

고농도 사례시 지역별 $PM_{2.5}$ 물리화학적 특성

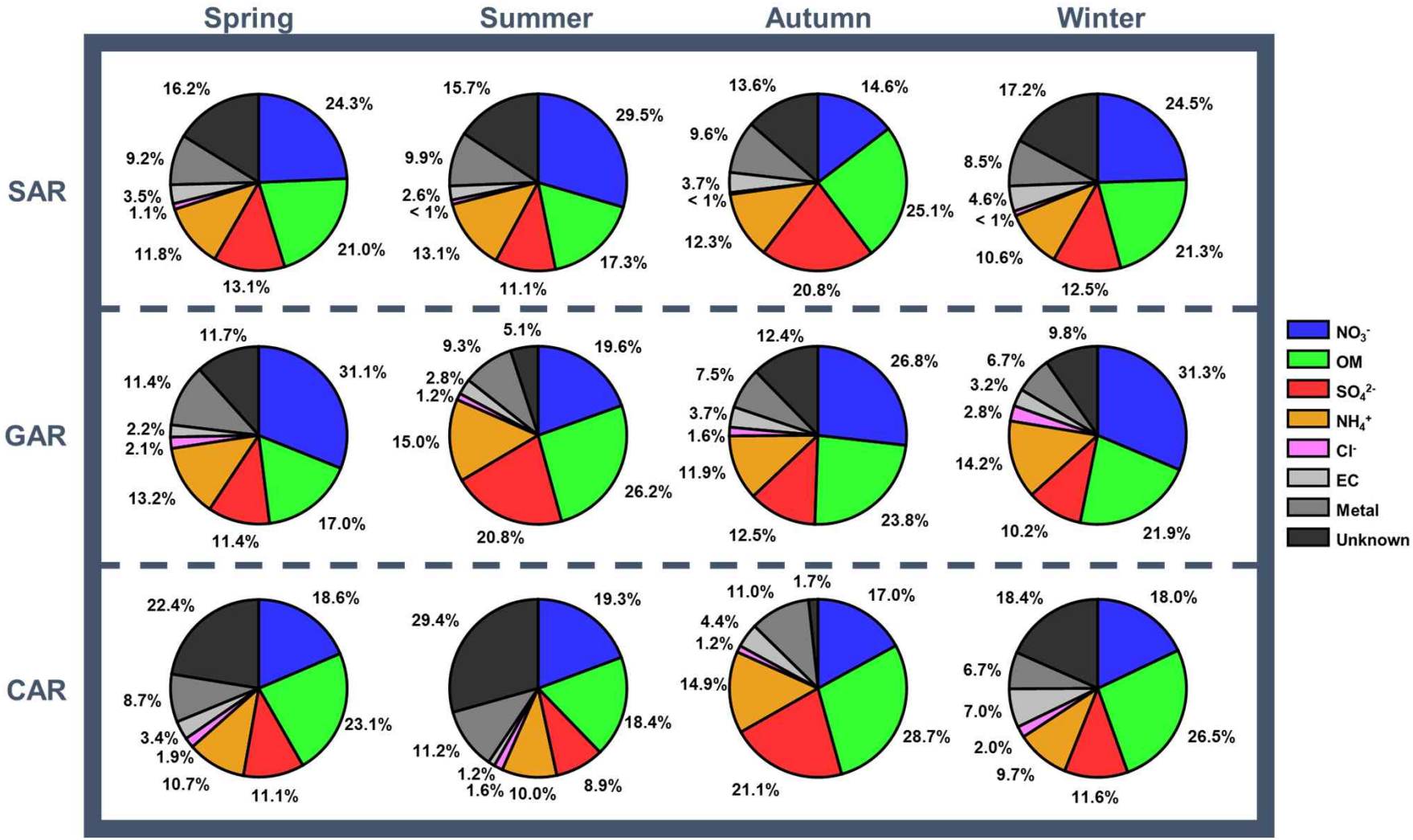
- □ 경기권의 $PM_{2.5}$ 평균 농도가 26.4 ㎍/㎥으로 가장 높음 (충청권 23.4 ㎍/㎥, 수도권 21.8 ㎍/㎥)
- □ 성분별로 질산염(NO_3^-)이 가장 높은 분율을 보였고, 그 다음 유기물(OM), 황산염(SO_4^{2-}), 암모늄 이온(NH_4^+) 순으로 확인됨
- □ 고농도 사례 분석 : 일평균 농도로 75 ㎍/㎥ 이상인 구간 / 4개 이벤트 선정





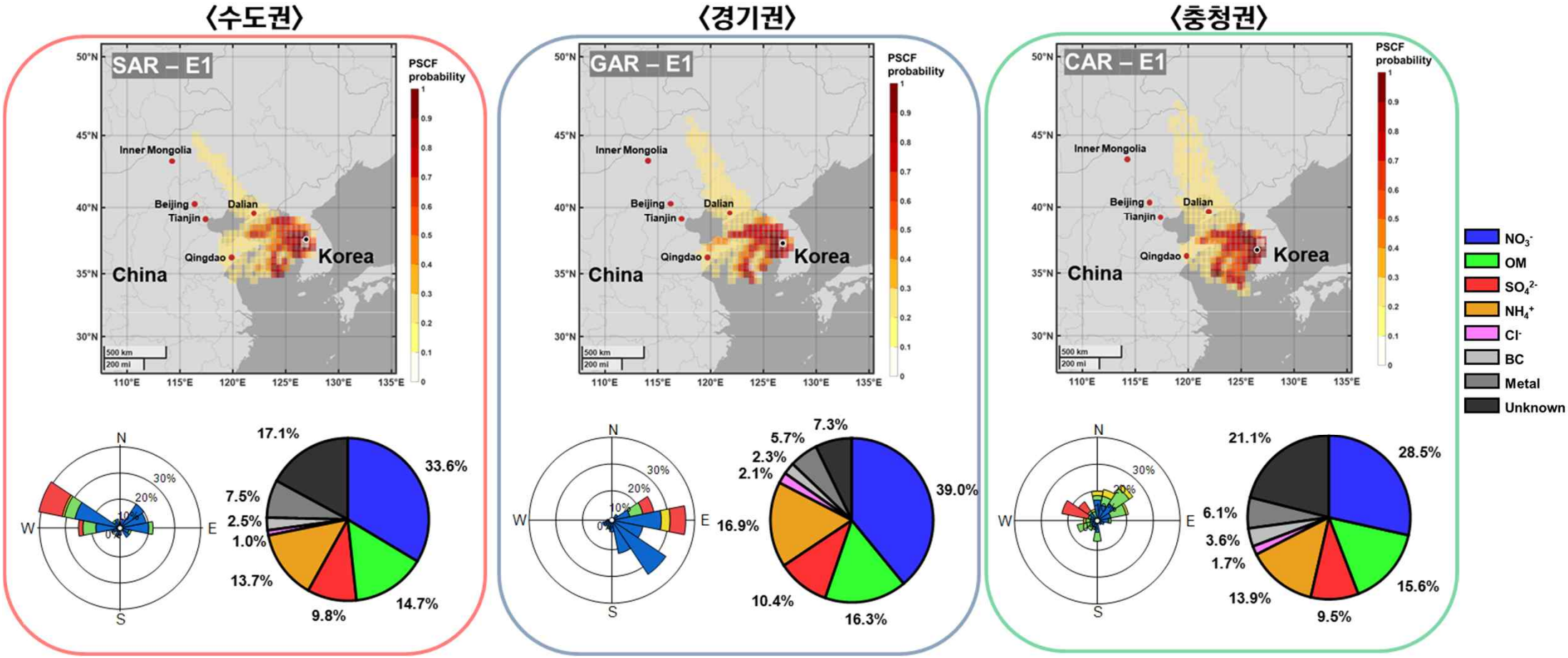
지역별 $PM_{2.5}$ 특성 : 계절별 화학 조성 분석

□ 전국이 유사하게 황산염(SO_4^{2-})+질산염(NO_3^-) 약 30-40%를 차지, 여름철 황산염 급격히 증가한 만큼 질산염이 급격히 감소
□ 유기물(OM) 비율 충청권 가장 높음 / 암모늄(NH_4^+) 비율 경기권 가장 높음 / EC는 전체적으로 2-3% 차지



고농도 사례(Episode 1) 지역별 $PM_{2.5}$ 물리화학적 특성

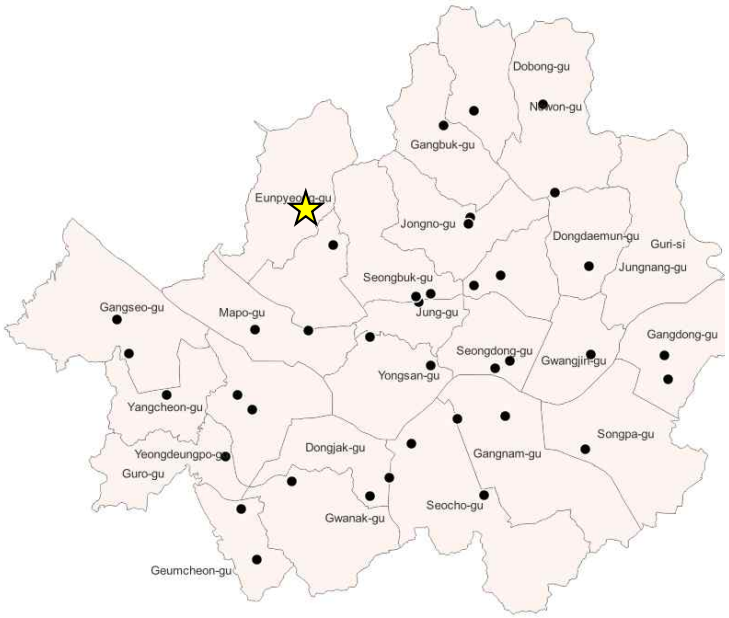
- ☐ Episode 1 : 2/12~2/14 → 수도권과 충청권은 동풍 및 서풍이 혼재, 경기권은 동풍이 지배적으로 나타남
- ☐ 지역적 정체로 인한 국내영향으로 발생 / 질산염이 가장 높고, 암모늄, 황산염, 유기탄소가 높음
- ☐ 수도권과 충청권의 비율이 유사하며, 경기권은 타 지역 대비 암모늄의 비율이 높고, 금속성분 비율이 낮게 나타남



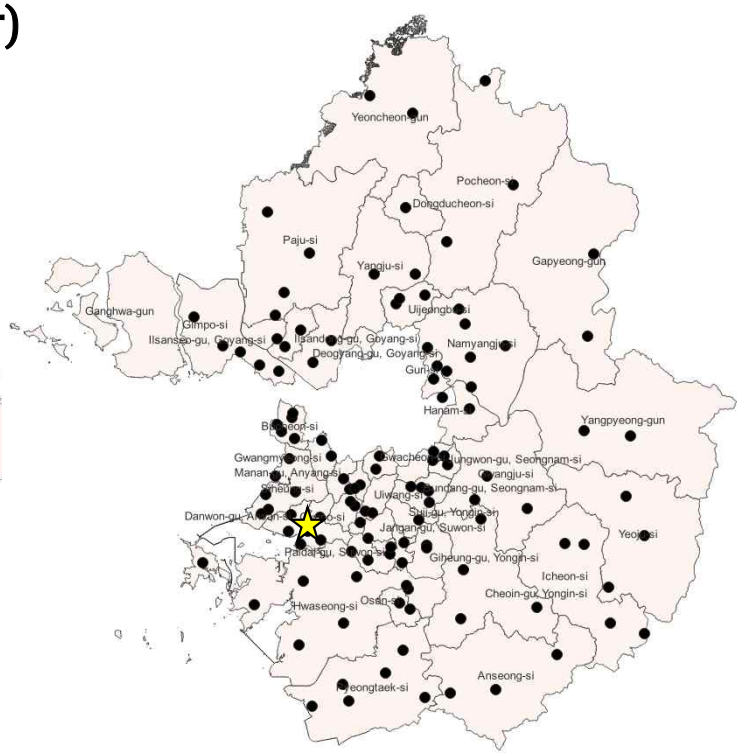
대기환경연구소와 권역 내 측정소간 상관성 분석

□ 도시지역 대기질 모니터링과 정책추진 결과 분석을 위해 대기측정망이 설치· 운영되고 있음 ($PM_{2.5}$ 포함 기준물질)
□ 2021년 기준 수도권 40개소, 경기권 123개소, 충청권 46개소가 위치해 있음 (도시+도로변측정망)
□ 대기환경연구소와의 정합성 여부 판단을 위해 $PM_{2.5}$를 대상으로 상관성 분석 수행

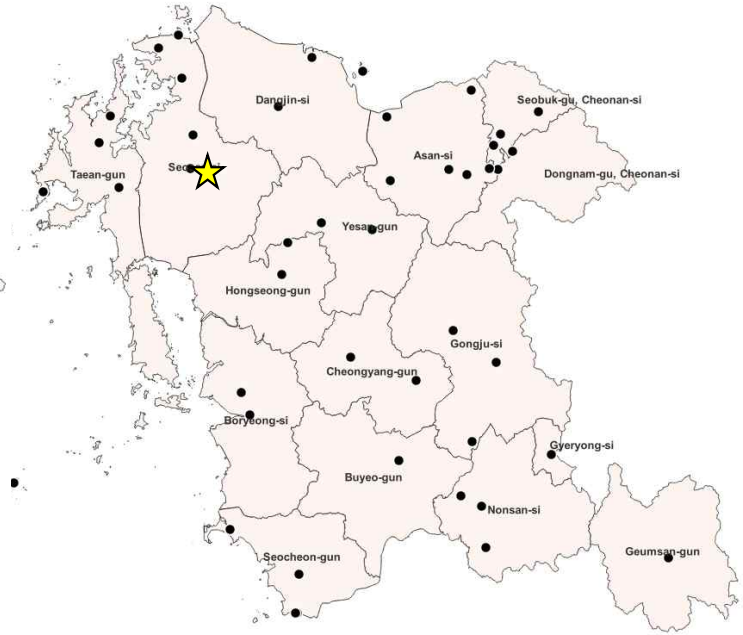
★ **집중측정소(대기환경연구소)**
● **일반측정소(도시대기측정망)**



수도권(서울)



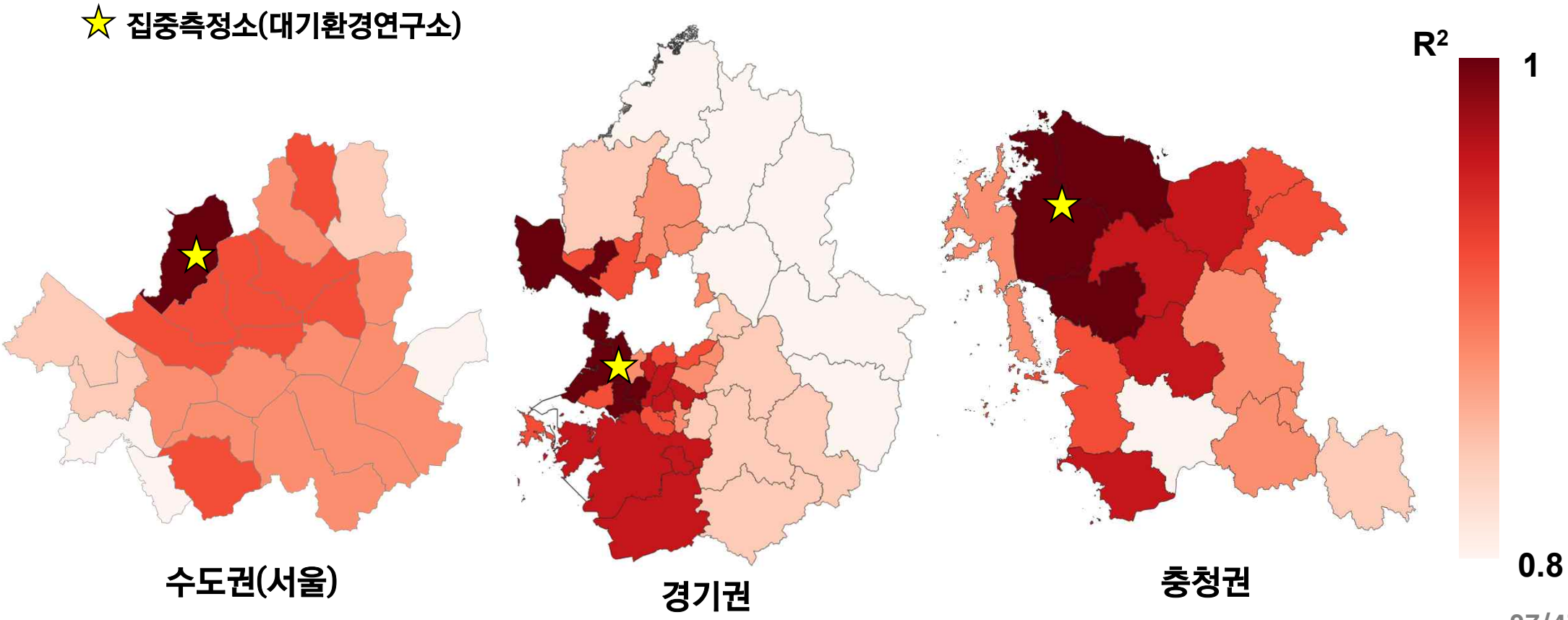
경기권



충청권

집중측정소(대기환경연구소)와 권역 내 측정소간 상관성 분석

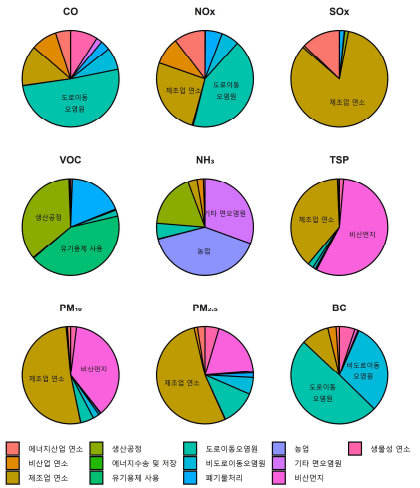
- □ 대기환경연구소와 일반측정소 간의 $PM_{2.5}$ 상관성 분석 수행 : 모든 측정소에서 R^2 0.8 이상으로 높은 상관이 나타남
- □ 서울의 경우 측정소가 위치한 은평구 측정소와 높은 상관성을 보이며 공간적으로 멀어질수록 낮은 상관성은 나타냄
- □ 경기권은 안산을 기준으로 서쪽 해안에 위치한 지역에 높은(인천, 시흥 등)에서 높은 상관성을 보임, 동쪽으로 갈수록 낮아짐
- □ 충청권은 측정소가 위치한 서산과 당진, 홍성에서 높은 상관성을 보이며, 동쪽으로 이동할수록 상관성이 낮아짐
- □ 우리나라 주풍이 북서풍으로 서쪽에서 동남쪽으로 갈수록 상관성이 낮아지는 것을 확인할 수 있었음



광화학스모그에 따른 SOA 생성 특성 분석

□ CAPSS : 경기도 배출량 전국 1위, 안산시 VOCs 배출량 지역 내 2위(1위와 유사) / 반월 및 시화 국가산업단지 위치
□ 풍량이 적고, 북서풍 주풍, 정온상태 35.0~45.9% → 산업단지 영향 크고, 배출된 오염물질의 희석, 확산력 약함

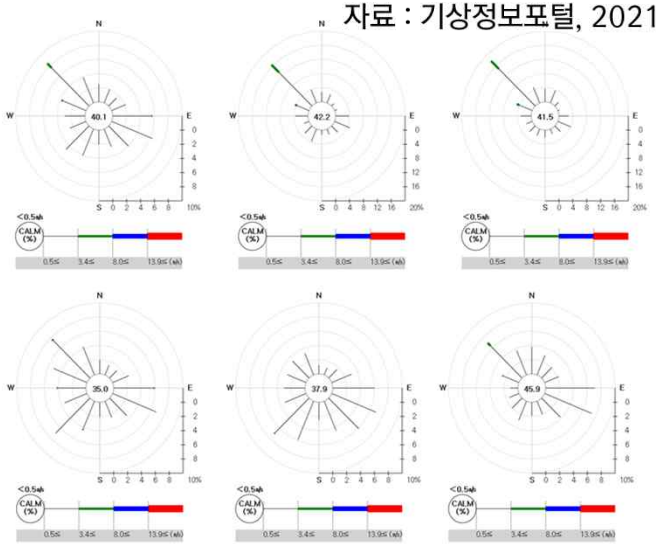
안산시 배출원 분류(2019)

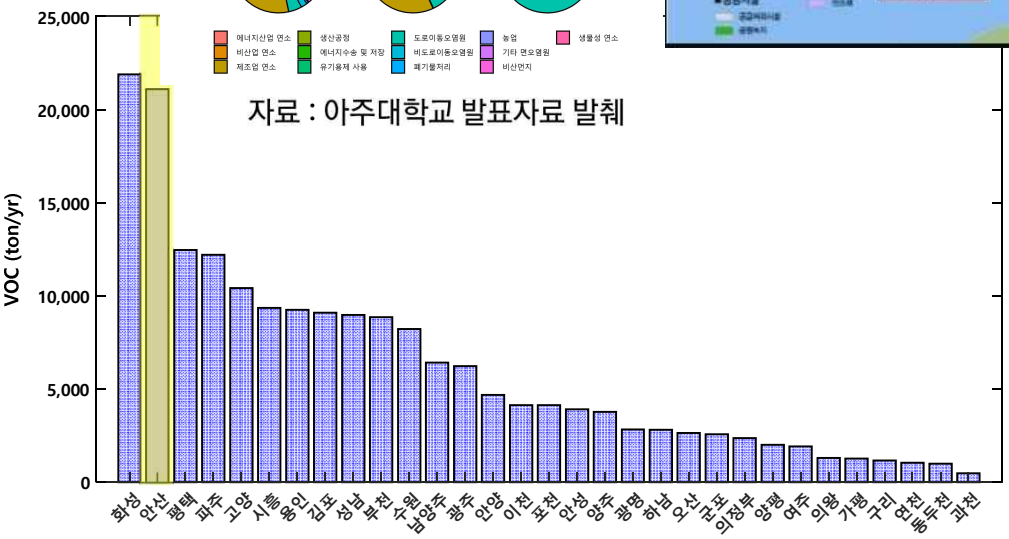


자료 : 아주대학교 발표자료 발췌

(자료 : 연합뉴스(15.07.13)

자료 : 기상정보포털, 2021



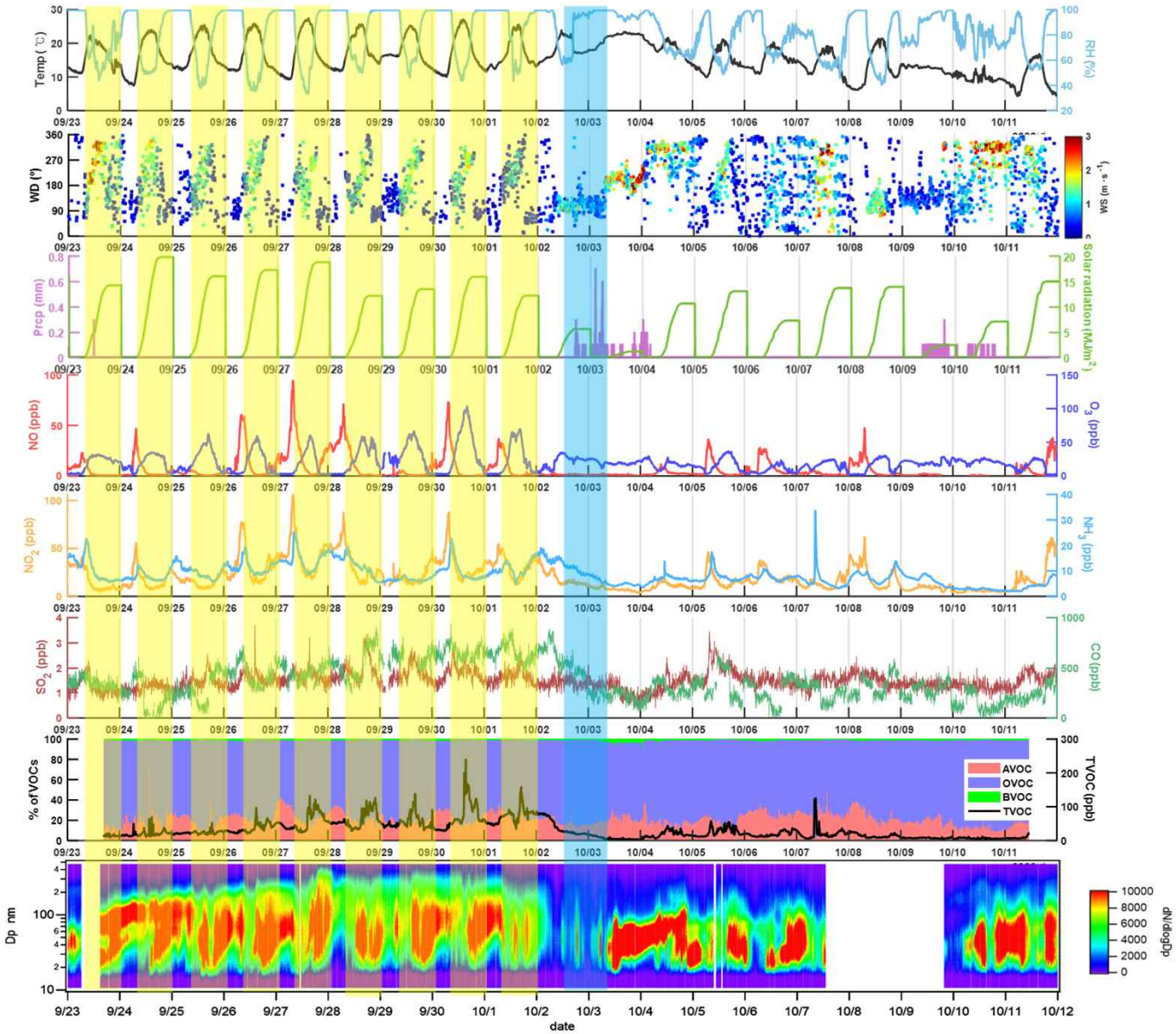


자료 : CAPSS, 2019

구 분		계(면적)	산업시설 구역	지원시설 구역	공공시설 구역	녹지구역	비 고
계(안산)		**31,495**	**18,380**	**1,761**	**5,613**	**5,741**	도로 1,987천㎡ 그 외 주차장, 운동장, 종말처리장 등 공공시설
반월국가산단		**15,374**	7,929	427	2,086	4,932	
시화국가산단	안산	**4,304**	4,130	48	1	125	**안산시 26.7%**
	시흥	11,817	6,321	1,286	3526	684	시흥시 73.3%
	소계	**16,121**	**10,451**	**1,334**	**3,527**	**809**	

자료 : 블로그(안산 둘러보기)

광화학스모그에 따른 SOA 생성 특성 분석

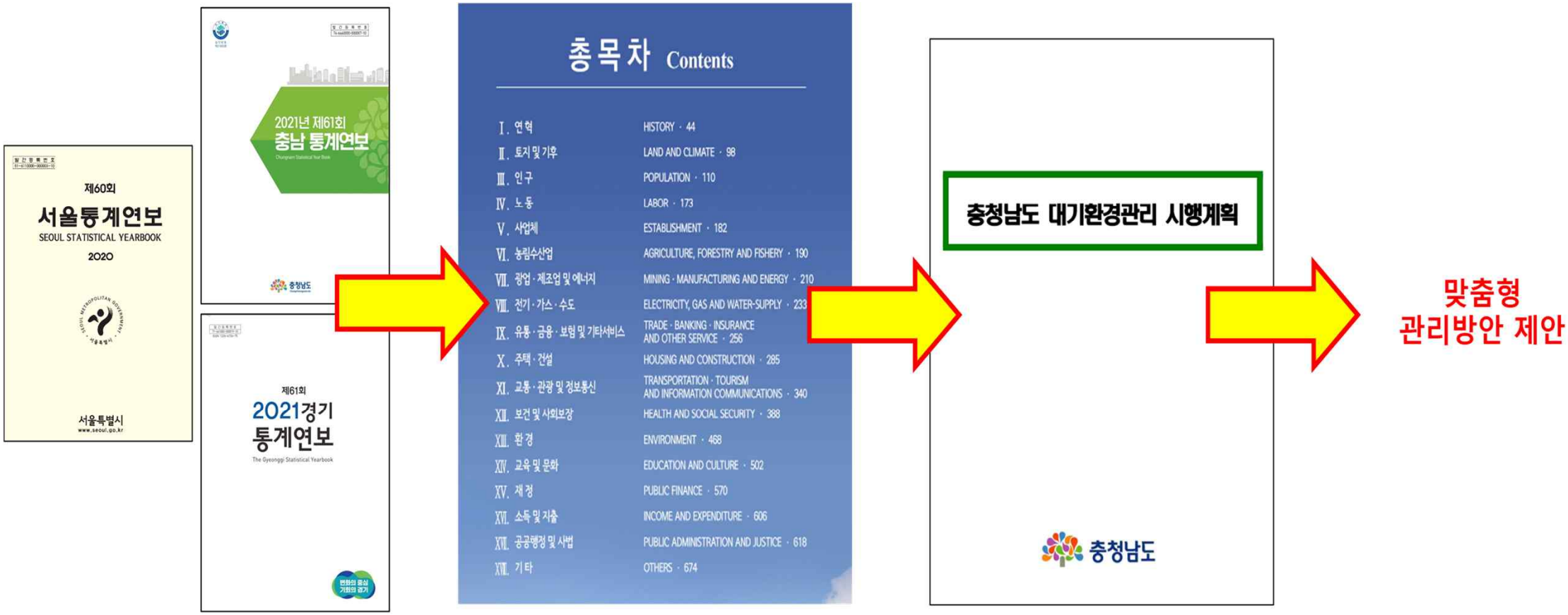


- ☐ 측정기간 대상 수집된 정보 시계열 분석
- ☐ 강우이후는 반응성이 낮게 나타나 분석제외
- ☐ 노란라인은 SR을 기준 설정
- ☐ 파란라인은 강우지역
- ☐ 풍향은 강우 전에는 일을 주기로 U자형 패턴을 보이나 강우 이후 패턴이 사라짐
- ☐ O_3을 제외한 가스상 오염물질은 시계열 분석에서 유사한 농도변화 패턴을 보임 → 주변에 일관성 있는 배출원 존재
- ☐ SR과 온도, O_3 피크가 유사하게 변화
- ☐ 노란라인 시작과 NO 최대피크 후 감소 일치
- ☐ VOCs는 노란라인 안에서 증가가 확인되나 상관성은 낮게 나타남

충남연구원 ChungNam Institute

고농도 미세먼지 발생시 $PM_{1.0}$과 $PM_{2.5}$ 국내외 영향에 따른 원인 상세 분석

□ 지역별 활용 가능한 통계자료 및 정책자료 확보 → 기초인자 분석 → 대기질 개선 관련 정책자료 수집 → 정책효과 분석
□ 활용자료 : 인구, 자동차 등록대수, 기후환경, 토지이용, 에너지 및 산업시설, 배출시설 분포, 대기배출량, 대기측정망 농도 등
□ 지역 맞춤형 정책 제안



3. 연구과제 소개 II

– 시범지역 초미세먼지($PM_{2.5}$) 발생원인 규명

충남연구원 ChungNam Institute

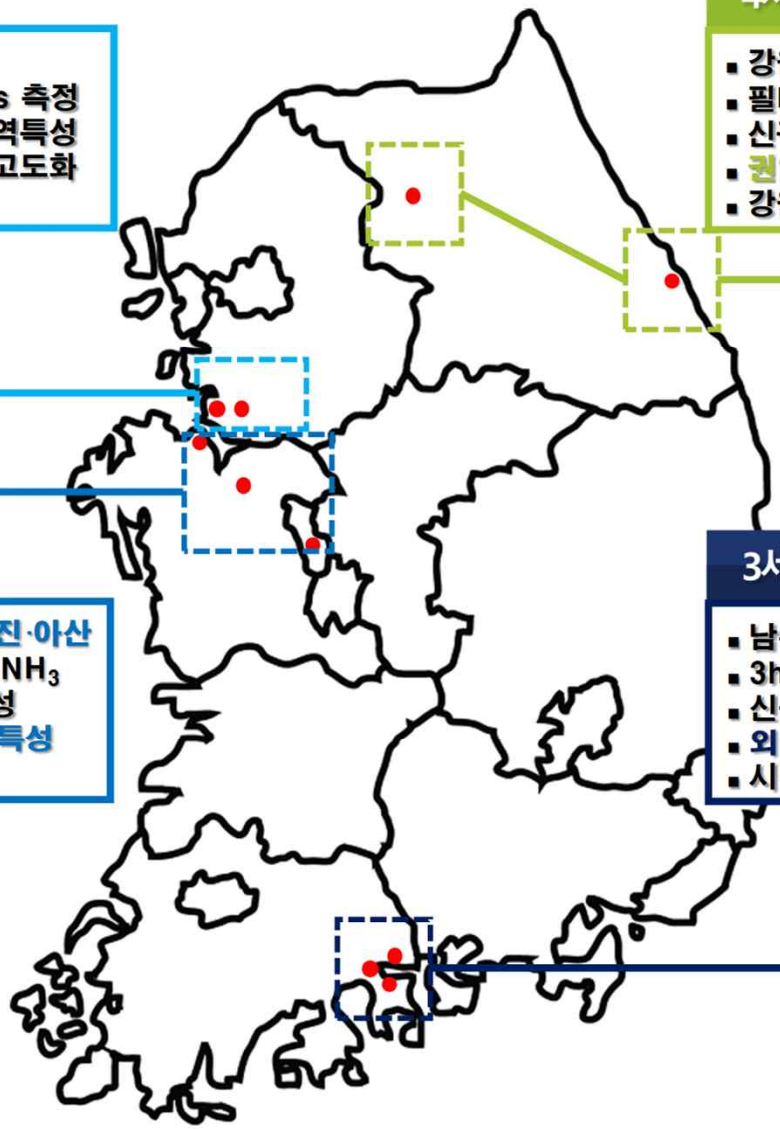
시범지역 초미세먼지($PM_{2.5}$) 발생원인 규명

2세부 수도권

- 수도권 시범지역: 화성, 오산
- 필터기반 $PM_{2.5}$화학성분, VOCs 측정
- 신규·기존 측정자료 DB기반 지역특성
- AI-공간분포 배출원-배출특성 고도화
- 시범지역 첨단산업 지역 특성

4세부 강원권

- 강원권 신규측정: 춘천, 동해
- 필터베이스 실시간 화학성분, VOCs
- 신규·기존 측정자료 DB기반 지역특성
- 권역간 이동, 이차생성, 해륙풍 영향
- 강원지역 영서/영동 지역 특성



1세부 중부권

- 중부권 시범지역: 세종, 서산·당진·아산
- 실시간 $PM_{2.5}$화학성분, VOCs, NH_3
- 신규·기존 측정 DB기반 지역특성
- 이동측정 신규·미지 오염원 배출특성
- 시범지역 도심·산업 지역 특성

3세부 남부권

- 남부권 시범지역: 순천·광양·여수
- 3hr $PM_{2.5}$화학성분, VOCs, 중금속
- 신규·기존 측정 기반 배출원 추적
- 외부유입·자연발생 영향, 유해성분
- 시범지역 제철·석유화학 산업 특성

연구단 구성

(총괄) 시범지역 초미세먼지 발생원인 규명 연구
(한국과학기술연구원)

수도권(세부)	중부권(세부)	남부권(세부)	강원권(세부)
(화성, 평택, 오산)	(세종,서산,당진,아산)	(광양, 여수, 순천)	(춘천, 동해, 권역간)
아주대학교 위탁: **한국화학융합연**	**한국과학기술연구원** 위탁: **충남연구원**	**목포대학교**	**강원대학교**
측정: 화성, 오산 유-무기 추적자, VOCs	측정: 세종, 서산, 당진, 아산 ACSM Org 추적자, Online XRF, VOCs	측정: 순천, 여수, 광양 유-무기 추적자, 중금속	측정: 춘천, 동해 유-무기 추적자, VOCs
대기측정망 DB분석	대기측정망 DB분석	대기측정망 연계분석	대기측정망 DB분석
도심, 산업 특성 분석 (인공지능-공간분포)	도심, 산업 특성 분석 (고해상도 실시간 측정)	산업 배출특성 분석 (PMF, CPF, PSCF)	권역간 이동, 대기정체 유형 분석
첨단산업 배출 특성	도심·산업 배출 특성	제철·석유 배출 특성	강원 영동/영서 특성 고농도 이벤트 특성

각 권역별 지역 1차 배출과 2차 생성 특성 제시 및 비교

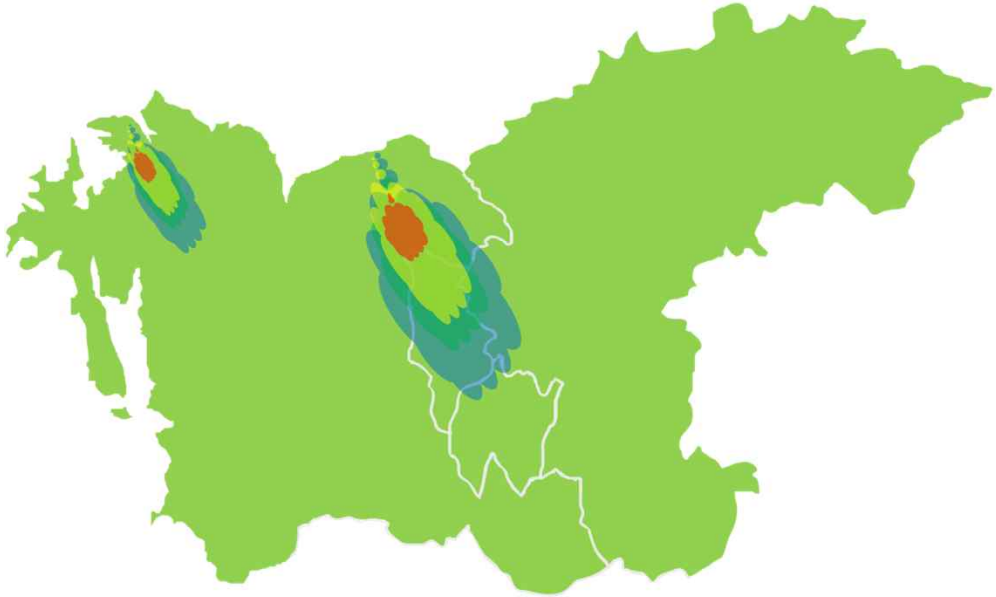
배출원-측정소 공간 농도분포 예측 모델	배출원/권역내 이동영향 특성	배출원/권역별 이동 등에 의한 성분 특성	타 권역과 지역발생 기여도 비교
수도권 $PM_{2.5}$ 배출원, 배출 특성 규명	중부권 $PM_{2.5}$ 도심, 산업지역 특성 규명	남부권 $PM_{2.5}$ 맞춤형 관리방안 제시	강원도 $PM_{2.5}$ 발생원인 규명

권역별 오염 종합 연계해석

1. 권역별(수도권, 중부권, 남부권, 강원도) 관측 공백지역 중심 $PM_{2.5}$ 원인 제시
2. 지자체 특성에 맞는 미세먼지 저감대책에 과학적 근거 제공
3. 대기측정망 데이터 활용성 증대를 통한 지자체 중심의 $PM_{2.5}$ 현황분석 및 대응 역량 제고

충남연구원
ChungNam Institute

실시간 측정기반 고정 및 이동측정을 통한 중부권 시범지역 지역적 특성 규명



성분특성 측정기반 배출원-수용지 관점

주관 KIST

고해상도 질량분석 기반 측정 시스템의 이동측정 플랫폼 구축 및 중부권 시범지역 집중·이동 측정을 통한 미세먼지 생성 특성 및 오염원 규명

ACSM, PTR-MS, XRF, Mobile lab

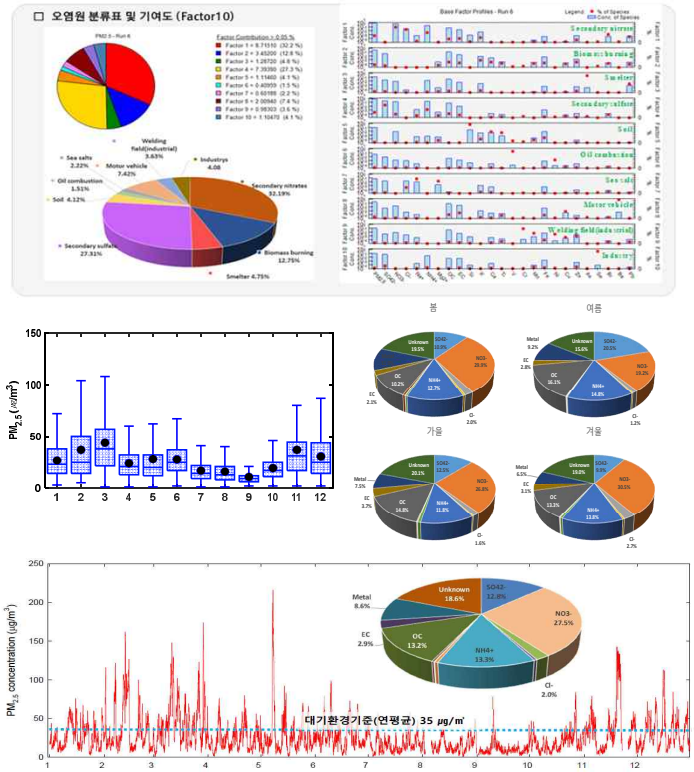
위탁 충남연구원

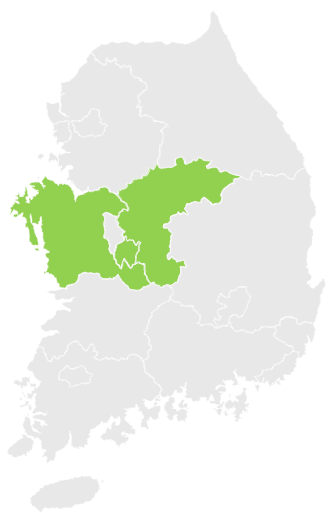
충청권 대기환경연구소 $PM_{2.5}$성분 특성과 중부권 시범지역 기초자료 분석 및 현장 지원 등을 통한 지역 맞춤형 개선 정책 제언

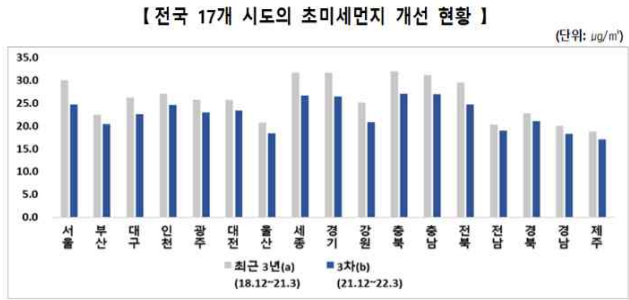
마을대기측정망, $PM_{2.5}$필터샘플

최종: 중부권 시범지역의 초미세먼지 및 전구물질의 지역적 특성 규명

중부권 초미세먼지의 물리화학적 특성 및 지역 발생원 조사







충청권 대기환경연구소 기반 $PM_{2.5}$ 성분특성 분석

- 연평균, 월, 계절별, 일평균 농도 분석
- 고농도 미세먼지시 물리화학 특성 분석
- PMF모델을 활용한 기여도 분석
- 오염물질간 상관성 분석

중부권 시범지역 기초자료 분석 및 현장지원

- 시범지역에 대한 현황자료 분석
- 대기관련 조사(배출량, 농도, 배출원 등)
- 지역적 대기오염특성 분석
- 세부 집중측정 현장 지원

대기환경 개선효과 분석 및 맞춤형 정책 제언

- 중권 기본계획에 따른 개선효과 분석
- 지역적 배출특성과 정책적합성 조사
- 지역 맞춤형 개선정책 제언

중부권 초미세먼지의 물리화학적 특성 및 지역 발생원 조사

- 충남연구원: 위탁과제 기관으로 측정자료 확보/분석, 집중측정 공동 수행 및 지역 정책발굴/제안
- 충청권대기환경연구소: 실시간 데이터 자료 공유 협조
- 충남보건환경연구원: 집중 측정, 필터 샘플링 등을 위한 장소 협조
- 중부권 미세먼지연구·관리센터: 데이터 활용을 통한 지역 정책 개발, 공동연구 및 업무협력 협조
- 당진, 아산시 및 충청남도 : 측정 위치선정 및 현장 지원 / 제안된 정책에 대한 현장적용

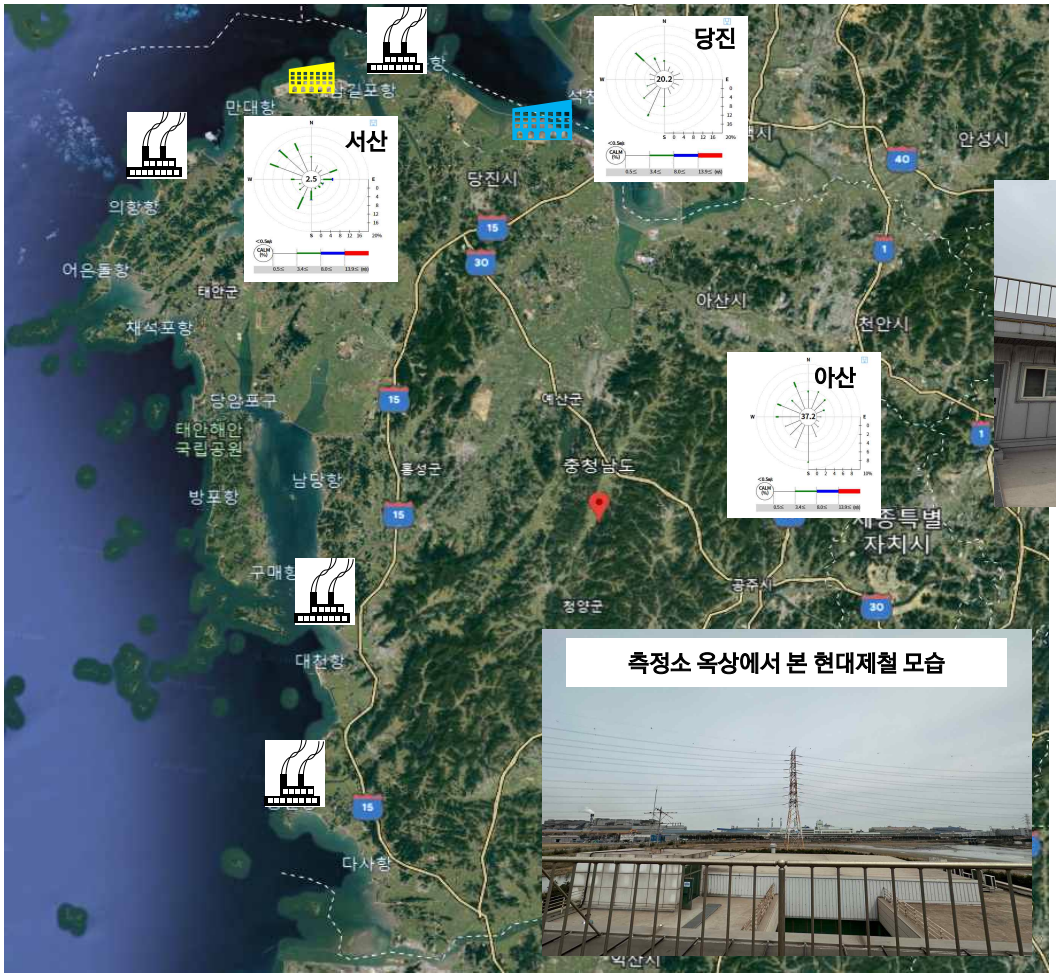
중부권 초미세먼지의 물리화학적 특성 및 지역 발생원 조사

- 충남지역 연구 네트워크 운영 → 충남도 및 시군 – 충남보건연 – 미세먼지 연구센터 – 충청권대기환경연구소
- 데이터 기반 충남지역 대기질 특성 분석 (AQMS, 마을대기측정망, 대기환경연구소)
- 필터기반 집중측정 (당진, 아산시) / 현장 이동관측 지원
- 집중측정 및 측정소 데이터 연계 $PM_{2.5}$의 물리화학적 특성 분석 / 정책제언

연차	지역	중부권 주관 – KIST	위탁 – 충남연구원
1차년도 (2023)	도심 (세종)	이동측정 플랫폼 (Mobile Lab; ML) ML 정비 및 테스트 측정 고정측정 플랫폼 (Bongo EV; ACSM) ACSM, XRF, PTR-MS 구축 및 테스트 측정 상세 이동측정계획 수립, 고정측정 지점 선정 및 예비 측정(6월) 이동(ML) 및 고정(ACSM) 본 측정 수행 (9, 10, 11월) ▼ 차량영향 예비결과 ▼ 실시간 성분 예비결과	당진-아산 필터 샘플 유기 성분 선정 장소 확정 성분 분석 시료 채취 필터성분 예비결과 기존 자료 활용 지역 미세먼지 특성 분석 상세 성분자료 시공간 분포특성 대기환경 연구소 도시·마을 대기 ▼ 지역적 특성 예비결과
2차년도 (2024)	산업 (당진)	당진 제철소 중심 이동*/고정**측정 겨울(1~2월), 봄(4~5월), 여름(7~8월), 가을(10월) * 이동측정은 고정측정 주변 우심지역 중심으로 2~3일 측정 ** 고정측정은 제철소 풍하지역 중심으로 2~3주 측정 $PM_{2.5}$, 전구물질 산업 배출 주변지역 영향 특성 예비결과	당진-아산 $PM_{2.5}$ 채취 겨울(1~2), 봄(4~5), 여름(7~8), 가을(10) (계절별 3~4주 수행) 도시-마을대기-대기환경 연구소 데이터 연계 통합 분석기법 개발 사례별 권역내 이동현상 분석 수용모델 및 권역내 이동현상 사례 예비결과
3차년도 (2025)	통합	예비결과 확정 심화분석, 오염지도 제시, ACSM PMF 배출원 기여도 제시, 전구물질 특성 제시 등 중부권 도심(세종)과 산업(당진) 지역의 초미세먼지 및 전구물질의 지역적 특성 제시	

중부권 초미세먼지의 물리화학적 특성 및 지역 발생원 조사

- 충남 대기오염물질 배출량 전국 (3위) → **충남 서북부 4개 시 (당진, 서산, 천안, 아산)**의 기여도 높음 (64.5%, CAPSS, 2019)
- 당진시 충남 내 배출량 1위(31.4%), 아산시 5위 (6.5%) / 당진→ 아산으로 영향 (충남 내 인구밀도 2위)
- 아산시 탕정면 중금속, 포름알데하이드 고농도 관측 (신도시 및 산업단지 조성에 따른 환경영향평가 결과)



3. 연구 사례 소개 III

– 충청남도 마을대기측정망 통합운영

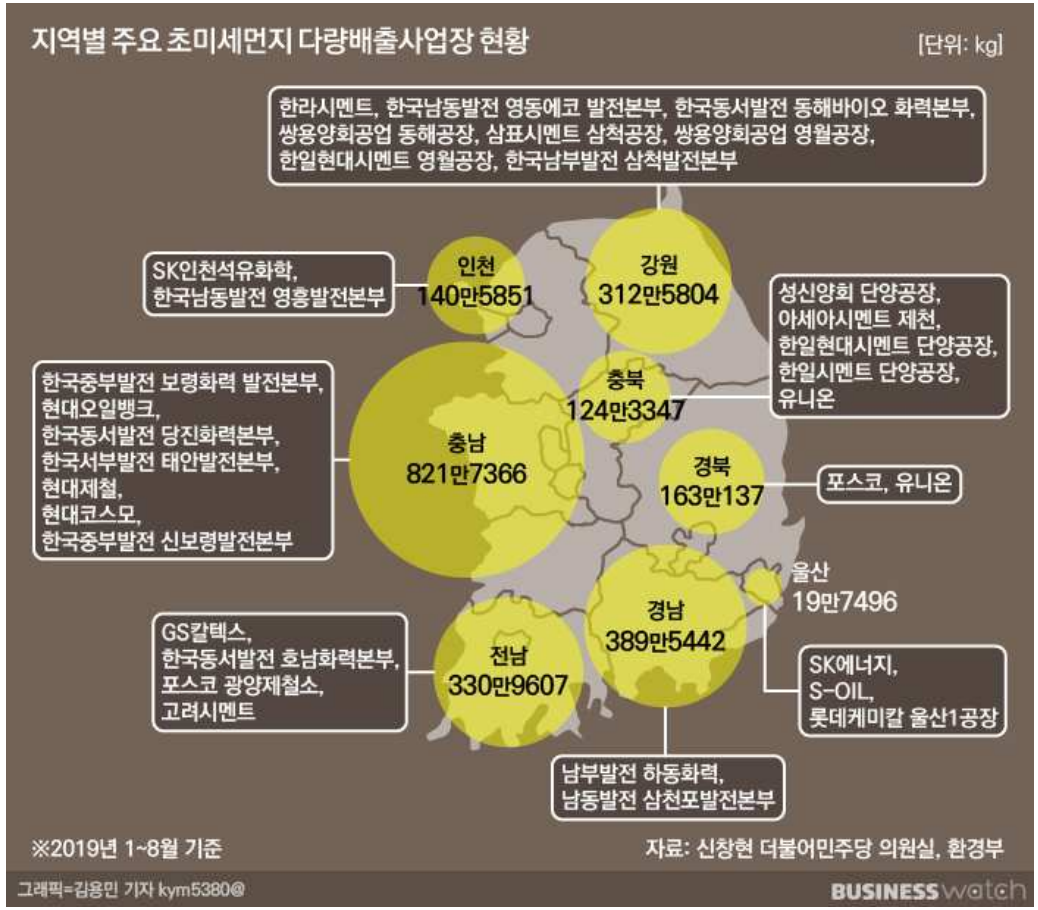
석탄화력발전소에 의한 대기질 악화 → 관리 필요성 인식

- 전국 주요 초미세먼지 다배출사업장 기준 총 배출량의 35.7% 충청남도 배출(2019. 1~8월 기준)
- 석탄화력발전소에 의한 대기질, 기후변화 가속화 우려로 과학적 기반 기초자료 구축 필요

2018년 전국 대형사업장 미세먼지 배출량

지역	사업장(개)	미세먼지(톤)	배출량 비중(%)
충남	59	16,233	29.0
전남	57	9,462	17.0
경남	54	8,036	14.0
강원	26	5859	11.0
울산	51	3415	6.1
⋮	⋮	⋮	⋮

한국환경공단 2018년 통계자료
2019.10. 대전MBC



비지니스와치(2019.11.01.)

충남연구원 ChungNam Institute

충청남도 대기오염 측정망

2021.06. 기준

□ 충청남도 국가대기 측정망 현황 : 도시대기측정소(AQMS) 37개소, 도로변측정소(RAQMS) 2개소

□ 지역별 측정소 개수 : 아산(6) 〉 천안(5) 〉 서산(4) 〉 태안, 서천(3) 〉 당진, 보령(2) / 충남 도민 57,216명당 1개 AQMS

국가대기 측정망(충청남도 보건환경연구원 관리)

한계점 1

도시대기 측정을 목적으로 하기 때문에 주거지역 위주의 배치되어 있어 발전소 주변 지역 대기질을 판단하기에 무리가 있음

한계점 2

측정소 위치를 화력발전소 기준으로 계산하면 태안화력을 제외한 모든 측정소가 10 km 이상 떨어져 있음

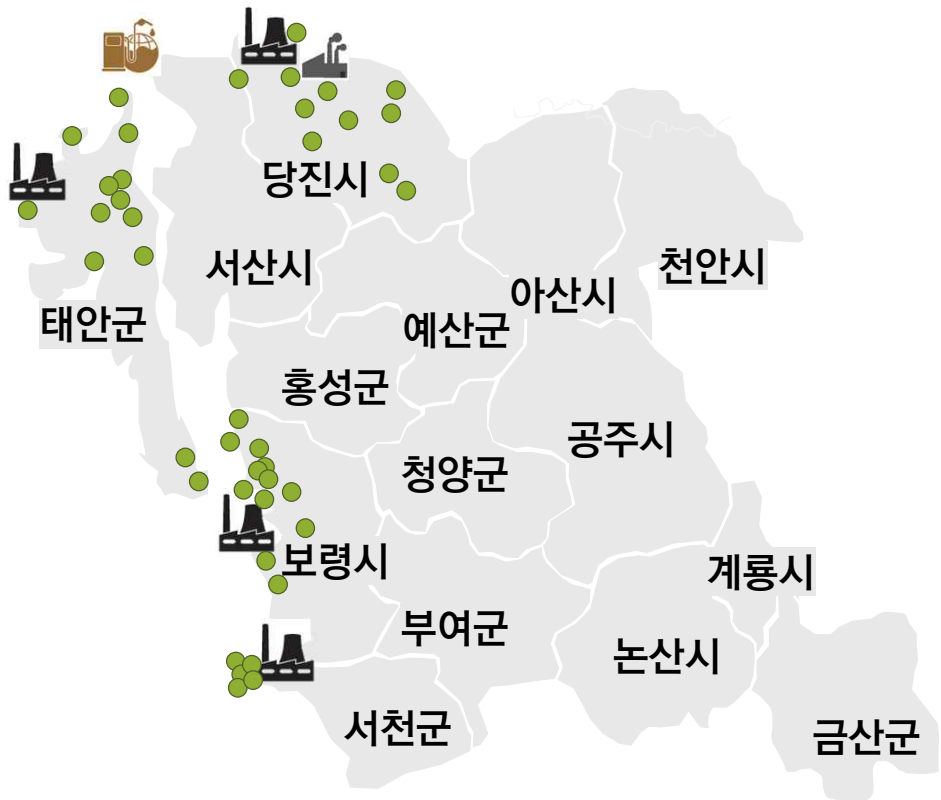
한계점 3

충남지역에 화력발전소가 위치하는 시군별 대기측정소는 태안군 및 서천군 3개소 당진시 및 보령시 2개소가 전부인 실정임

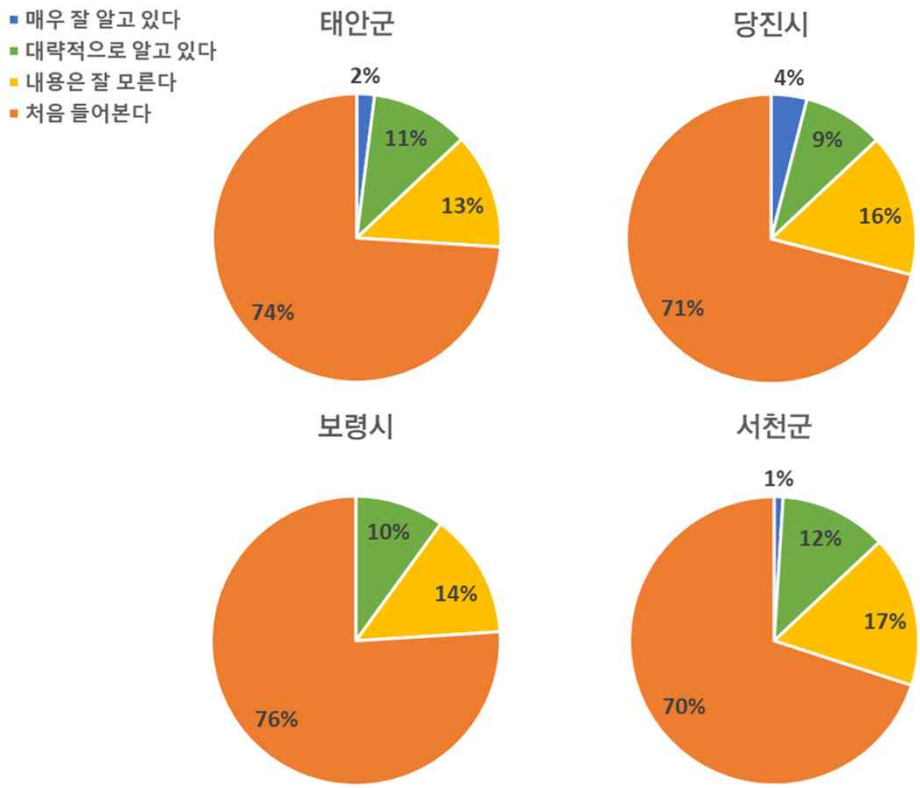
충청남도 대기오염 측정망

□ 충청남도 민간대기 측정망 현황 : 보령 12개소, 당진 11개소, 태안 10개소, 서천 5개소

□ 발전사별로 정보를 별도로 제공하며 뚜렷한 지침이 없어 도민들의 정보 취득에 불편함이 있음



민간대기 측정망(발전3사 관리)



발전사 사후영향평가 및 자체모니터링 인지도

마을대기측정망 통합정보센터 구축

('17.11.)	발전 3사 지속 가능 상생발전 실무추진단 회의
	마을대기측정망 道 통합운영 등 협의
('18.05.)	발전 3사 ↔ 충청남도 상생발전 업무협약 체결(포괄적 협약)
('18.12.)	충청남도 마을대기측정망 통합시스템 구축·운영 협정('19~'23)
	발전 3사 : 시스템 구축 및 운영 등 사업비 납부(법정기부금)
	충청남도 : 사업 총괄, 충남연구원에 사업비 지원(출연)
	충남연구원(서해안기후환경연구소) : 시스템 구축 및 운영
('20.09.)	마을대기측정망 통합시스템 개발 완료
('20.10.)	마을대기측정망 통합시스템 설치
('20.11.)	마을대기측정망 통합정보센터 개소
('21.05.)	마을대기측정망 유지보수 위탁관리 용역 계약

마을대기측정망 통합정보센터 역할

설립목적

충청남도 내 마을대기측정망의 통합운영 관리로 도내 대기질측정체계의 신뢰를 향상하고, 도민 대기질 정보서비스 질 향상과 대기질 정책의 과학적근거 제공

추진전략

1. 빈틈없는 측정망 관리, 꼼꼼한 데이터 축적
2. 가치있는 정보분석, 실효성 있는 정책 제안
3. 함께하는 미세먼지 대응

산후 마을대기측정소

〈 마을대기측정망 측정소 예시 〉

구 분	시·군	측정소명	주 소
마을대기 측정망	보령시 (11곳)	교성 / 교성1리 마을회관	충남 보령시 오천면 김신길31
		남포 / 삼현1리 노인회관	충남 보령시 남포면 봉덕삼현길 590(삼현1리)
		송학 / 송학 초등학교	충남 보령시 주교면 토정로 796-52
		신흑 / 오천면사무소 어항출장소	충남 보령시 대천항중앙길 46
		오천 / 오천 초등학교	충남 보령시 오천면 충청수영로 822
		오포 / 발전소 남부회처리장	충남 보령시 오천면 오천해안로 89-37
		원산 / 원산 마을회관	충남 보령시 오천면 원산도1길14
		주포 / 주포 면사무소	충남 보령시 주포면 보령읍성길 38-1
		죽정 / 한전사옥	충남 보령시 봉황로69 한전사택내 201동
		천북 / 천북 초등학교	충남 보령시 천북면 하궁길 45
		학성 / 바닷횟집 인근	충남 보령시 천북면 학성염전길 94-26
	당진시 (11곳)	교로 / 당진 화력본부	충남 당진시 면천면 면천로 623(성상리 945)
		금천 / 신평 면사무소	충남 당진시 신평면 신평로 834(금천리 458)
		사관 / 신당진 변전소	충남 당진시 정미면 정미로316(사관리 231-2)
		삼봉 / 석문 중학교	충남 당진시 석문면 대호로 1533-6(삼봉리 892)
		성상 / 면천 면사무소	충남 당진시 면천면 면천로 623(성상리 945)
		용두 / 고대 면사무소	충남 당진시 고대면 구장터길 9(용두리 664-1)
		운산 / 합덕 읍사무소	충남 당진시 합덕읍 예덕로 403(운산리 675-172)
		원당 / 당진 에코파워	충남 당진시 석문면 대호만로 2222-17(교로리 2893)
		적서 / 적서리 마을회관	충남 당진시 대호지면 대호로 662(적서리 156-9)
		중흥 / 송악 초등학교	충남 당진시 송악읍 송악로663-1(중흥리 257)
		통정 / 석문 면사무소	충남 당진시 석문면 통정3길2-1(통정리 393-1)
	서천군 (5곳)	내도둔 / 내도둔 마을회관	충남 서천군 서면 서인로317번길 21(마량리 74-1)
		마량 / 마량초소	충남 서천군 서면 마량리 151-2
		요포 / 요포 마을회관	충남 서천군 서면 서인로415번길 36(도둔리 716)
		춘장대 / 춘장대 사택	충남 서천군 서면 춘장대로 130(도둔리 1-4)
		홍원 / 홍원 마을회관 이전 부지	충남 서천군 서면 도둔리 957-7
	태안군 (11곳)	고남 / 고남 면사무소	충남 태안군 고남면 안면대로 4254-12
		관리 / 이원초등학교 관동분교	충남 태안군 이원면 관리 572-1
		내리 / 이원초등학교 내리분교	충남 태안군 이원면 원이로 2431
		대기 / 대기초등학교	충남 태안군 원북면 대기길 12-21
		반계 / 원북 초등학교	충남 태안군 원북면 원이로 849-3
		방갈 / 방갈2리 마을회관	충남 태안군 원북면 학암포길 29
		산후 / 산후1리 다목적회관	충남 태안군 태안읍 밤나무길 390
		안기 / 안기2리 마을회관	충남 태안군 근흥면 명장길 6-4
		의항 / 의항리 보건지료소	충남 태안군 소원면 개목길 25-9
		이곡 / 이곡1리 다목적회관	충남 태안군 원북면 이곡1길 14
		평천 / 평천3리 다목적회관	충남 태안군 태안읍 평천길 77
고정대기 측정망	당진시	석문(대난지도)	충남 당진시 석문면 교로리 난지도리 177-62, 당진시청소년수련원
	보령시	청라(청라면)	충남 보령시 청라면 나원리 749

충남연구원
ChungNam Institute

세부사업

· 마을대기측정망 주변 지역 대기오염 정보제공과 DB 구축

- ✓ 측정망 유지관리
- ✓ 측정기기별 정도관리(등가성 평가)
- ✓ 정보시스템 운영
- ✓ 측정망 주변 환경 개선 사업

· 대기질 정보 활용성 제고와 정책지원

- ✓ 연간보고서 작성
- ✓ 정책지원 연구과제 수행
- ✓ 전문가 그룹 네트워크 구축

· 지역주민 미세먼지 대응 역량 강화

- ✓ 맞춤형 마을 미세먼지 정보 제공
- ✓ 함께하는 미세먼지 측정 교육
- ✓ 찾아가는 마을대기 관련 민원상담
- ✓ 홍보물 제작 · 배포

〈 마을대기측정망 상황실 〉

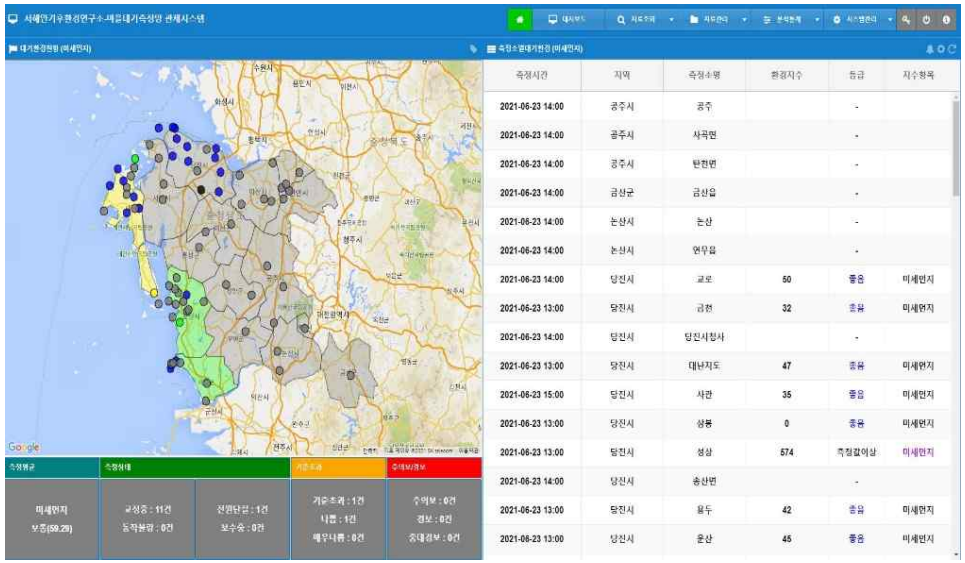
관제시스템 및 대민홈페이지 운영

□ 관제시스템을 통해 데이터 수집 및 실시간 모니터링 함으로써 정도관리를 수행함

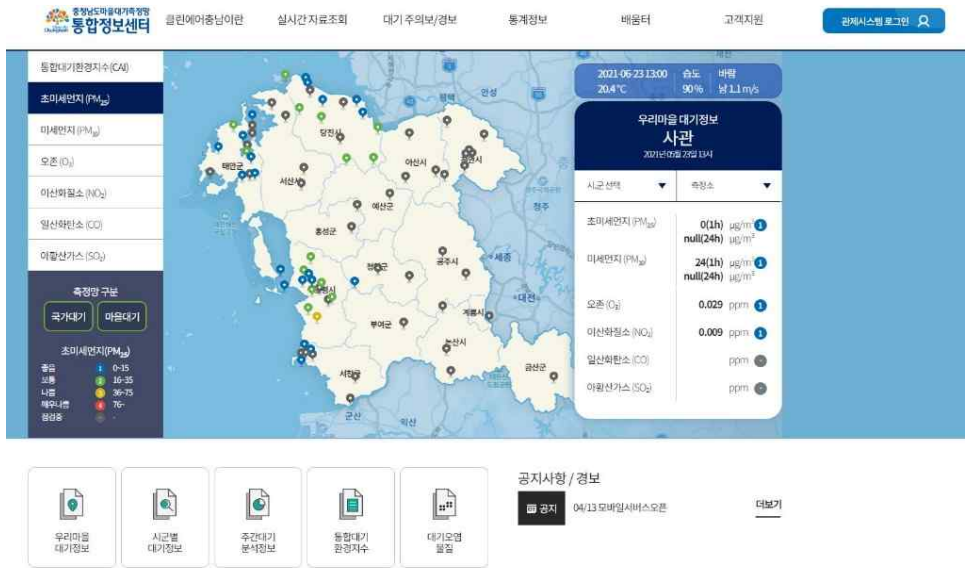
□ 관제시스템으로 수신되는 데이터는 마을대기측정망 뿐만 아니라 국가대기측정망 측정값도 포함됨

□ 현재 대민홈페이지(클린에어충남)를 시범 운영 중에 있으며 추후 모바일 서비스를 오픈할 예정임

관제시스템을 통한 실시간 모니터링



대민홈페이지(클린에어충남) 운영



감사합니다.

충남연구원
ChungNam Institute

Chungnam Institute

미세먼지 및 오존 이차생성 매커니즘 규명을 위한 전주기 측정기반 구축

충남연구원 기술교류회

2025. 7. 2.

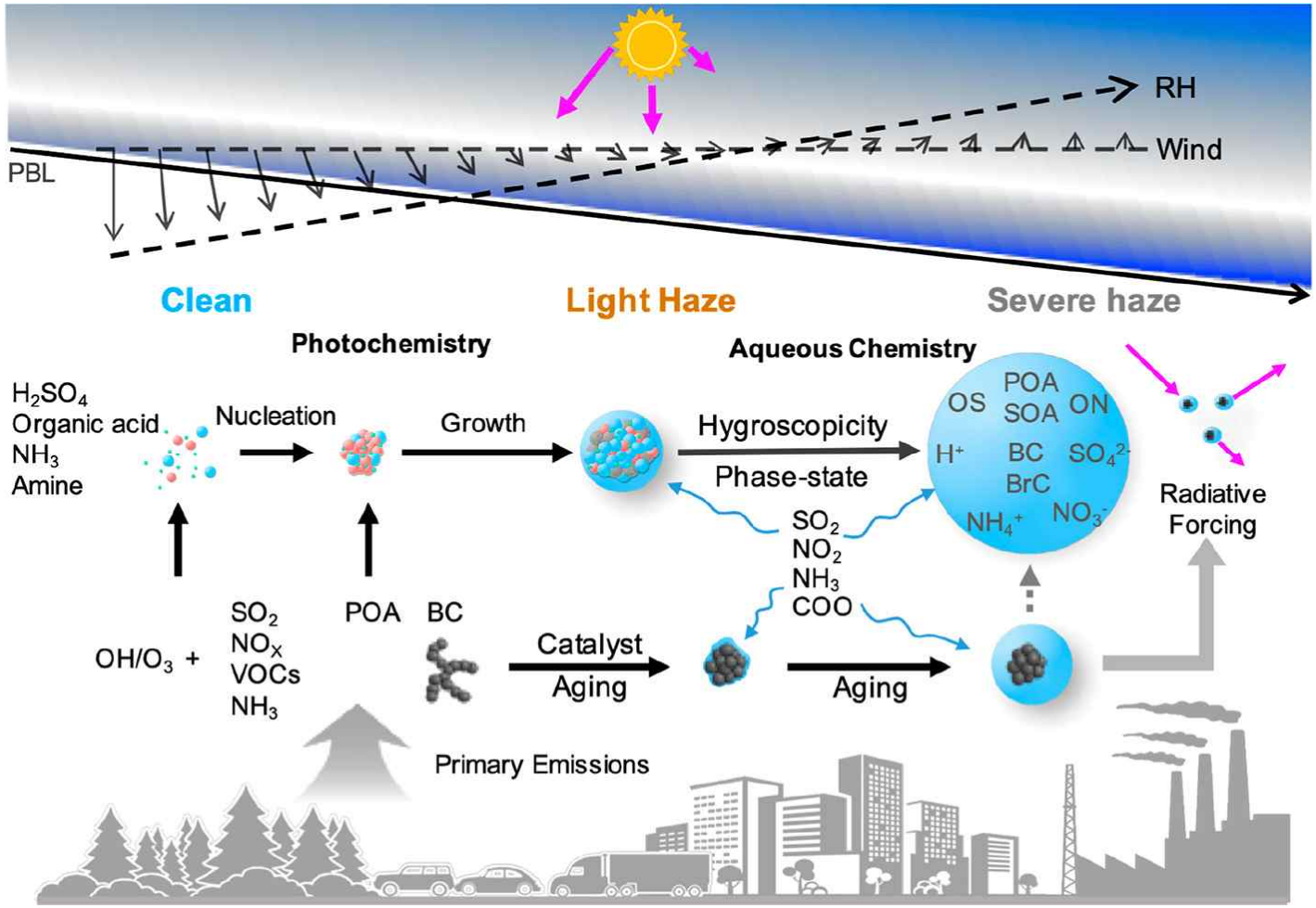
정진상

한국표준과학연구원 가스측정그룹

KRISS

목 차

고농도 오염물질 발생 사례 모식도

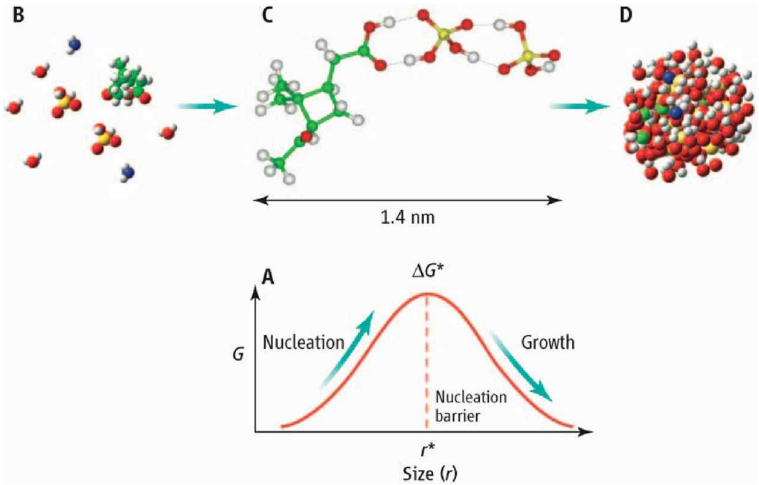


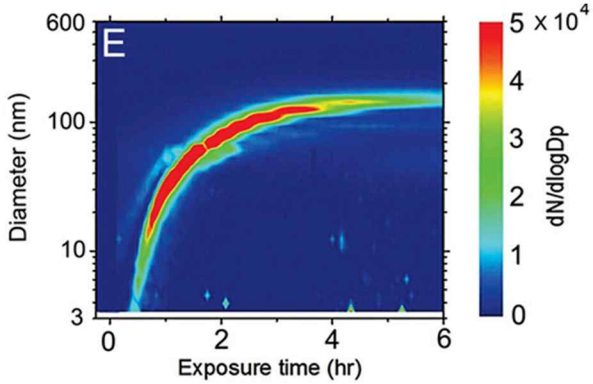
[Peng et al., 2021]

새로운 입자 생성(New particle formation) 매커니즘

Molecular cluster

Growth of cluster to critical size (nucleus)

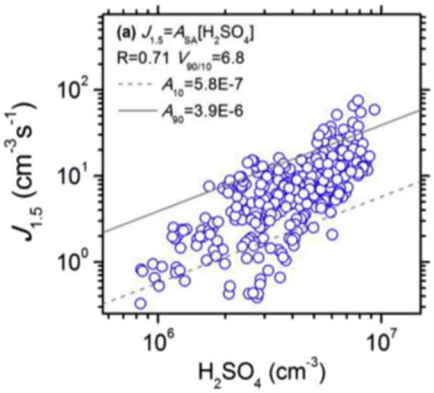


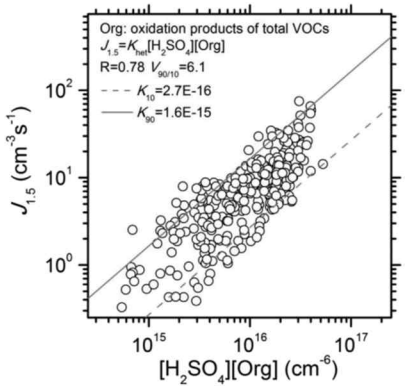


챔버 실험
-휘발류 자동차 배기가스
-높은 방향족 VOCs
-매우 낮은 SO_2, 높은 NOx

[Guo et al., 2020]

도심 환경에서 차량 배출가스의 시너지 산화 반응은 풍부한 유기물을 생성하며, 이는 나노입자의 효율적인 생성과 성장을 유도함.

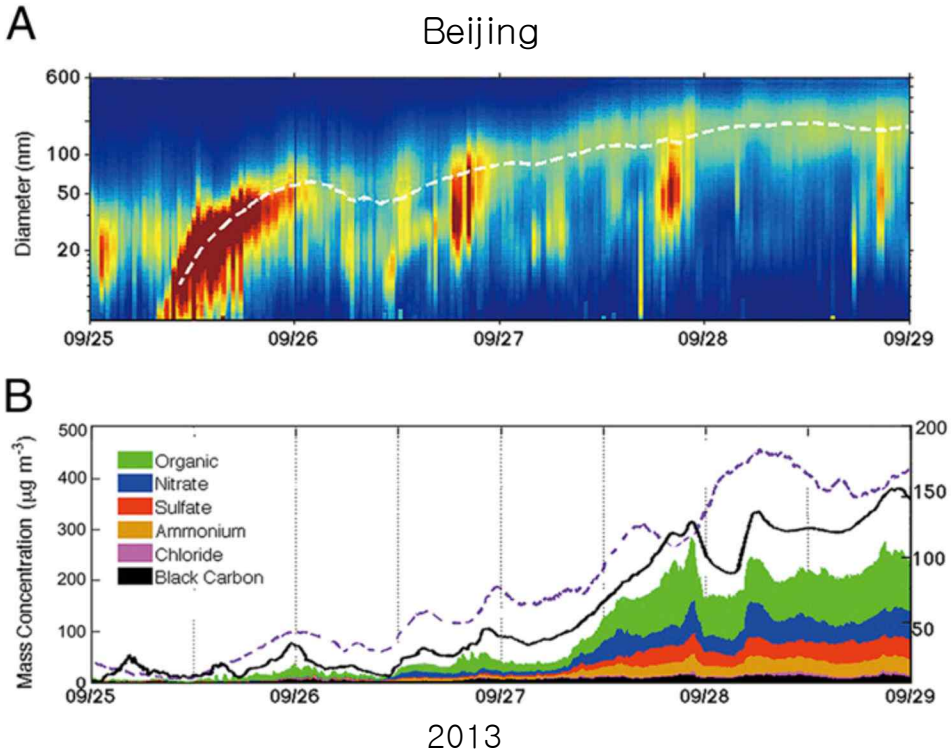


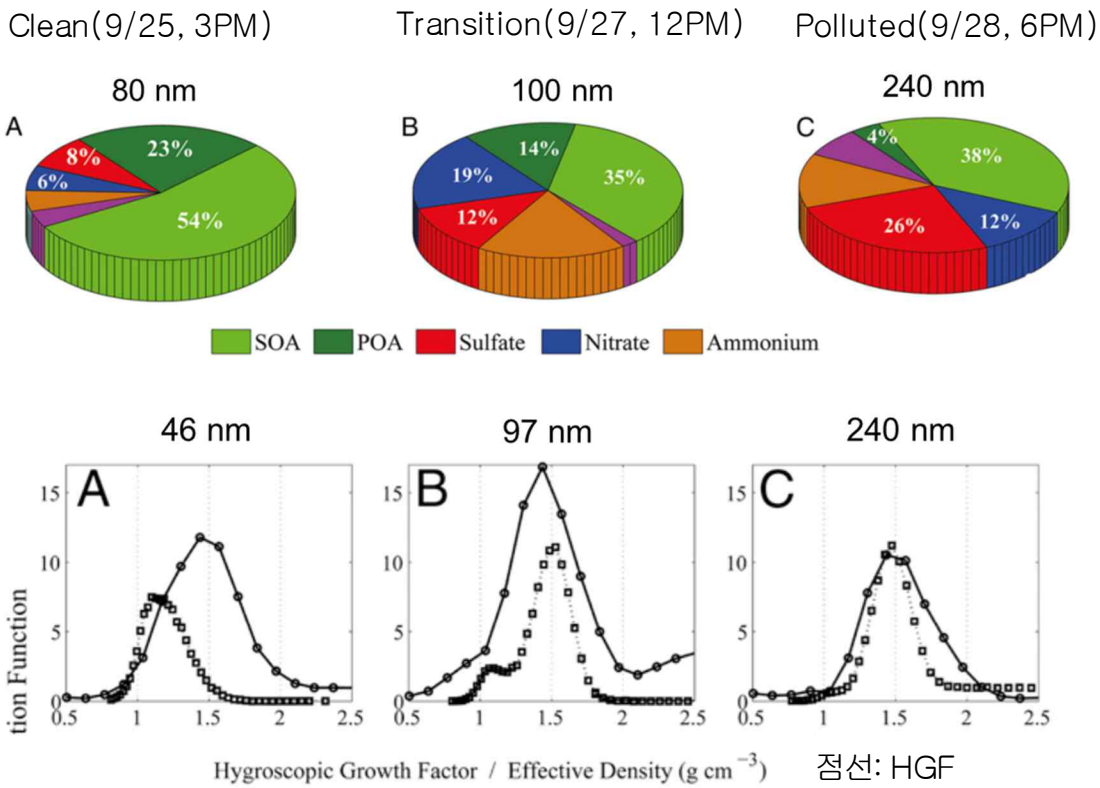


H_2SO_4-H_2O의 이원 핵 생성과 H_2SO_4-H_2O-NH_3 의 삼원 핵 생성만으로는 관측된 나노입자 생성 및 성장 현상을 충분히 설명할 수 없음.
유기물이나 아민류가 북중국평원(NCP)에서의 새로운 입자 생성(NPF)에 중요한 기여를 하는 것으로 밝혀짐.

[Wang et al., 2015]

새로운 입자 생성(NPF)과 성장(Growth)



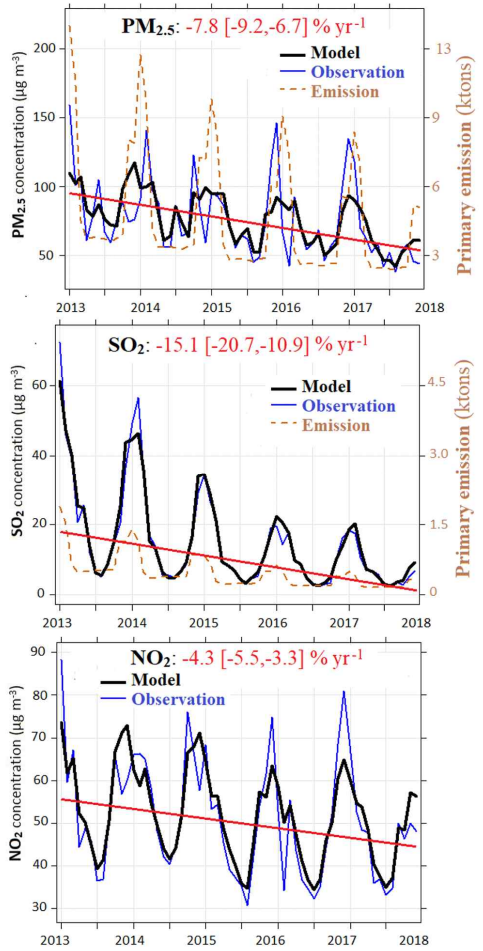


▷ 맑은 기간(Clean period) : 유기물이 주요 조성

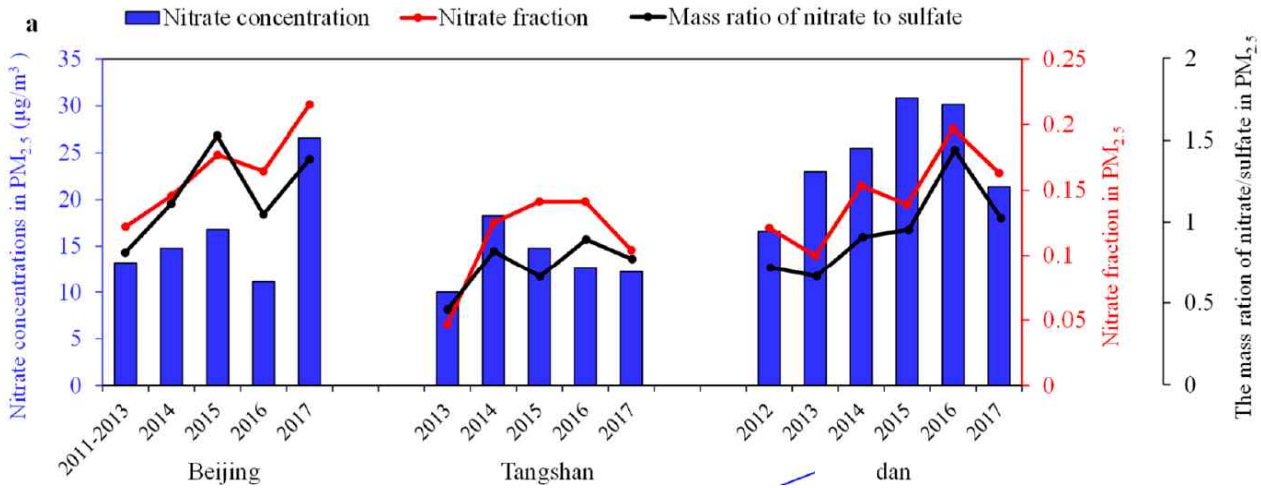
▷ 전이 및 오염 심한 기간(Transition and Polluted periods) : 유기 및 무기 성분이 내부적으로 혼합된 2차 생성물이 생성됨.

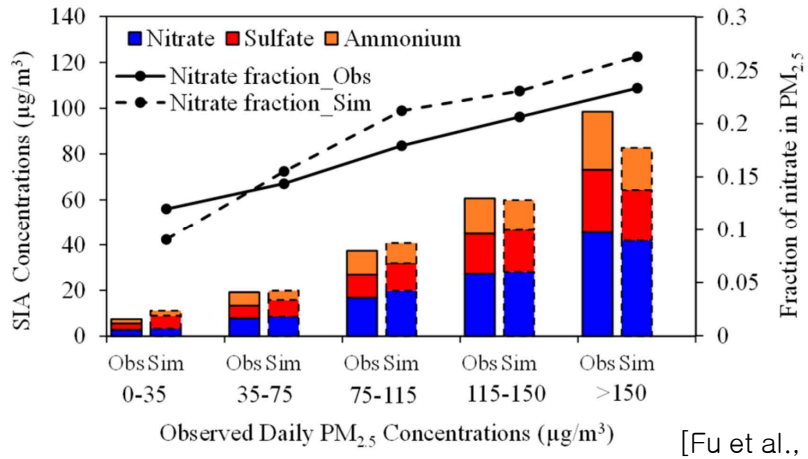
[Cuo et al., 2014]

배출 규제와 질산염의 기여 증가



[Vu et al., 2019]





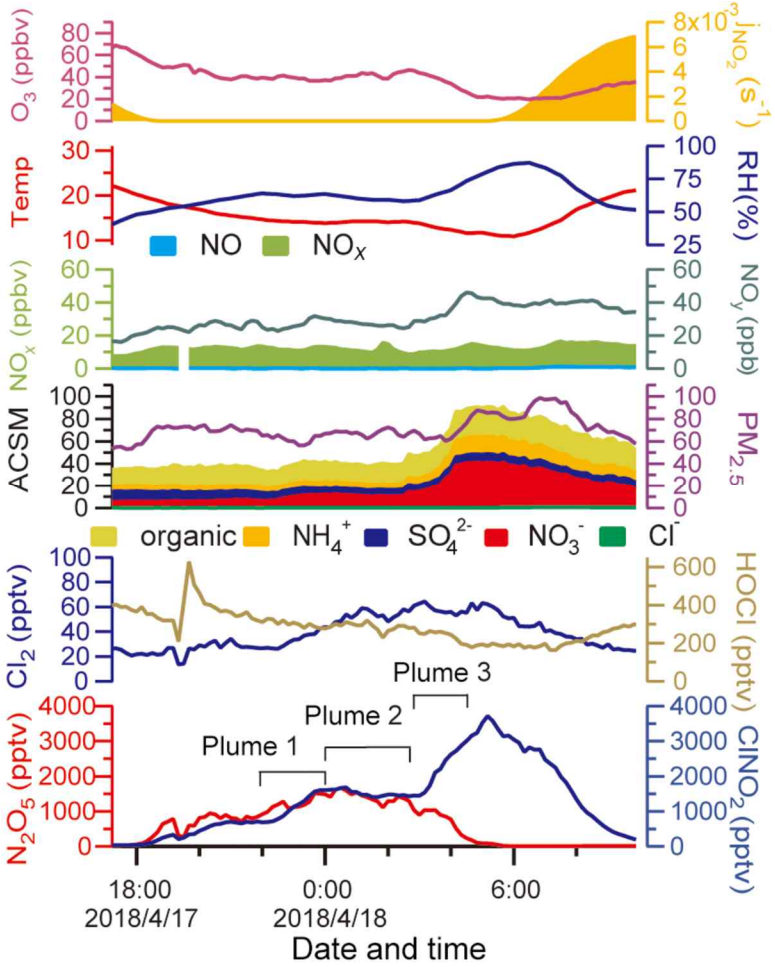
[Fu et al., 2020]

- 중국의 대기오염물질 배출 규제에 따라 $PM_{2.5}$, SO_2, NO_2가 지속적으로 감소하고 있음.
- $PM_{2.5}$ 농도가 증가함에 따라 질산암모늄의 기여율이 증가함.

➔최근의 $PM_{2.5}$ 고농도는 질산암모늄의 영향

질산염 생성 메커니즘

중국 난징지역



주간: 균일 반응(homogenous reaction)

$NO_2 + OH + M \rightarrow HNO_3 + M$

$HNO_3(g) + NH_3(g) \leftrightarrow NH_4NO_3(s)$

야간: 이질 반응(heterogeneous reaction)

$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2$

$NO_2 + NO_3 \leftrightarrow N_2O_5(g)$

$N_2O_5 + (H_2O \text{ or } Cl) \rightarrow (2-\Phi)NO_3^- + \Phi ClNO_2$

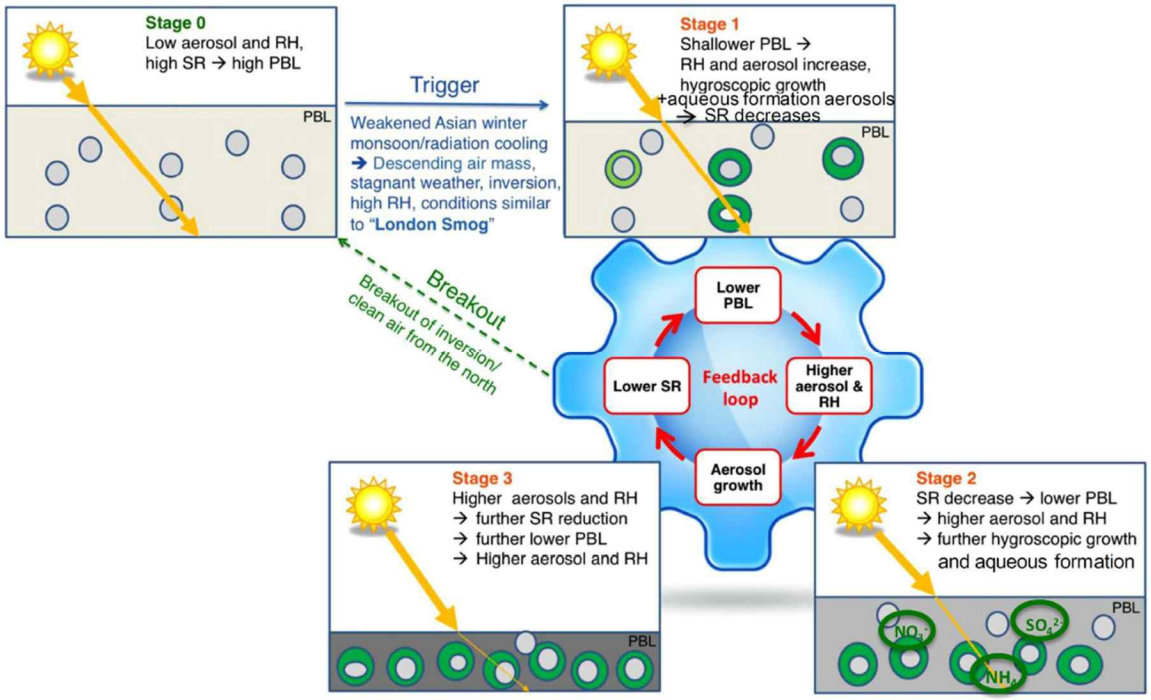
베이징 (2014년 10월 ~2015년 1월)
→ 총 질산염의 56%~97% 차지 [He et al., 2018]

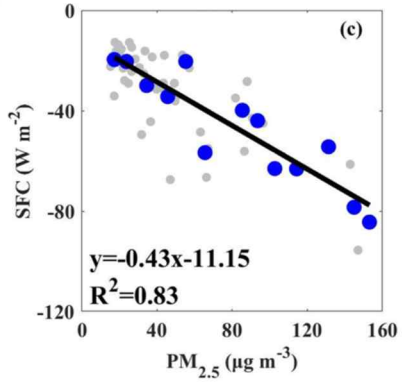
상하이 (2005년 5월 5일 ~6월 15일), 베이징 (2005년 6월 29일 ~8월 2일)
→ 총 질산염의 50%~100% 차지 [Pathak et al., 2011]

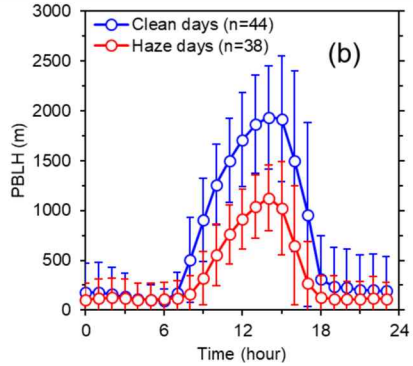
⇒ N_2O_5 가수분해 반응이 질산염 형성에 매우 중요함을 시사

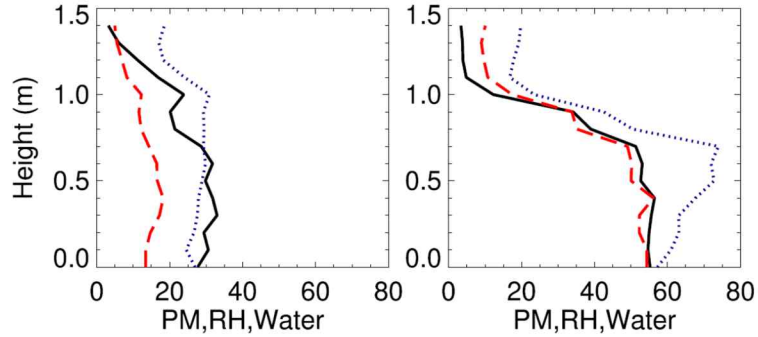
[Xia et al., 2020]

기상 조건과 에어로졸 농도 증가 사이 피드백 메커니즘









$PM_{2.5}$ 농도 증가 ➔대기 중 에어로졸 빛 산란 ➔지표면 태양복사에너지 감소 ➔지표면 온도 증가 억제

➔대기 중 에어로졸 빛 흡수 ➔대기 중 태양복사에너지 흡수량 증가 ➔대기 온도 증가 기여

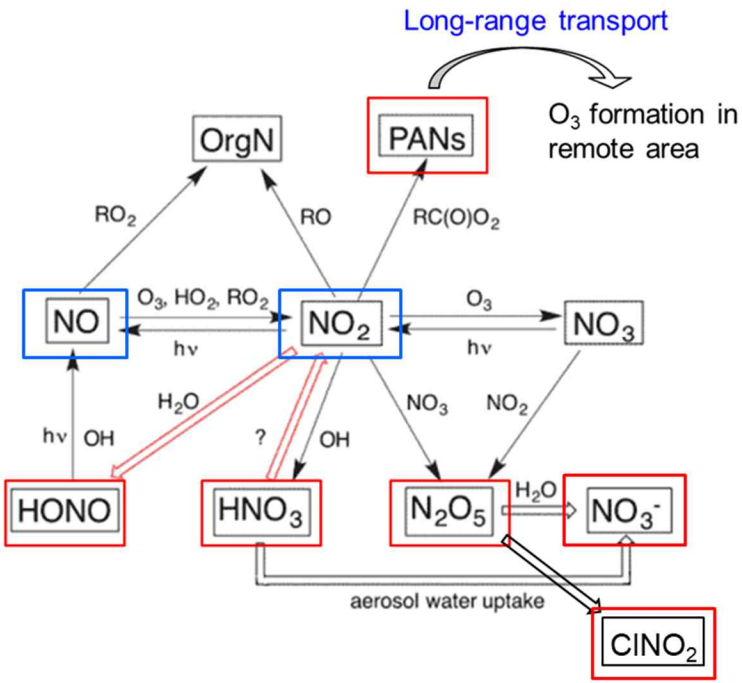
➔대기 역전층 생성 ➔대류 순환 감소 ➔대기 혼합고 감소 ➔상대습도 증가 ➔ Aqueous formation➔$PM_{2.5}$ 농도 증가

[Forster, P., et al. 2007; Tie et al., 2017; Lin et al., 2021; Zhao et al., 2021]

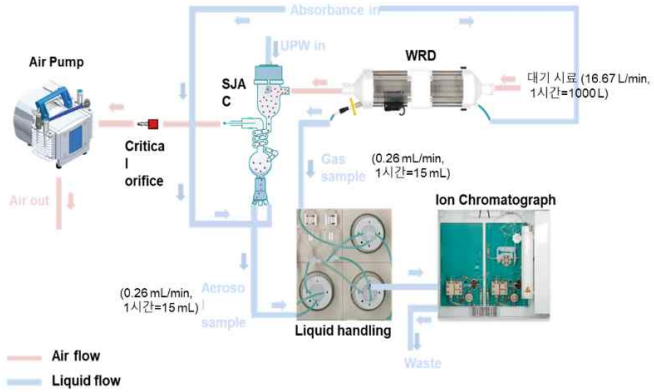
목 차

2차 생성 질소산화물 측정기반 구축

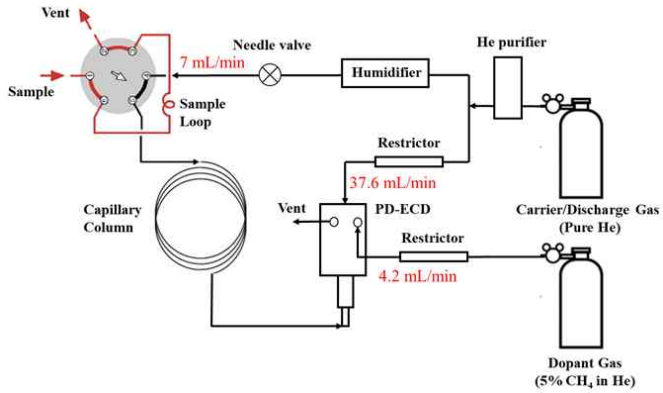
- ✓ 초미세먼지 중 질산암모늄 생성 특성을 규명하기 위해서는 2차 생성 질소산화물 측정이 매우 중요
- ✓ 국내는 2차 생성 질소산화물 측정 기반이 부족



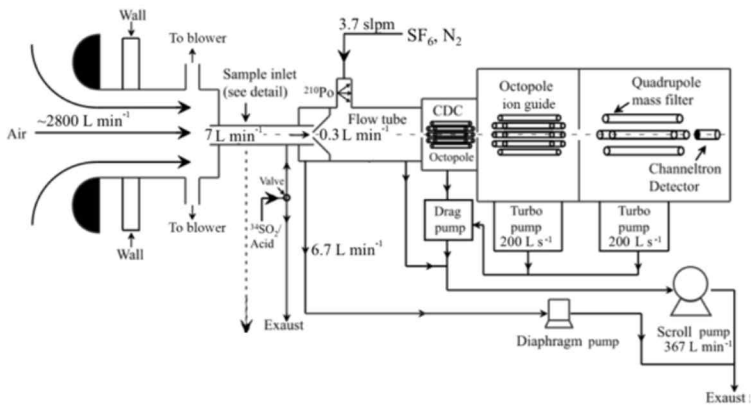
Online IC 기반 HNO_3 및 입자상 질산암모늄 (NH_4NO_3) 측정장치 구축



GC-PDECD기반 PAN(Peroxyacetal nitrate) 측정시스템 개발

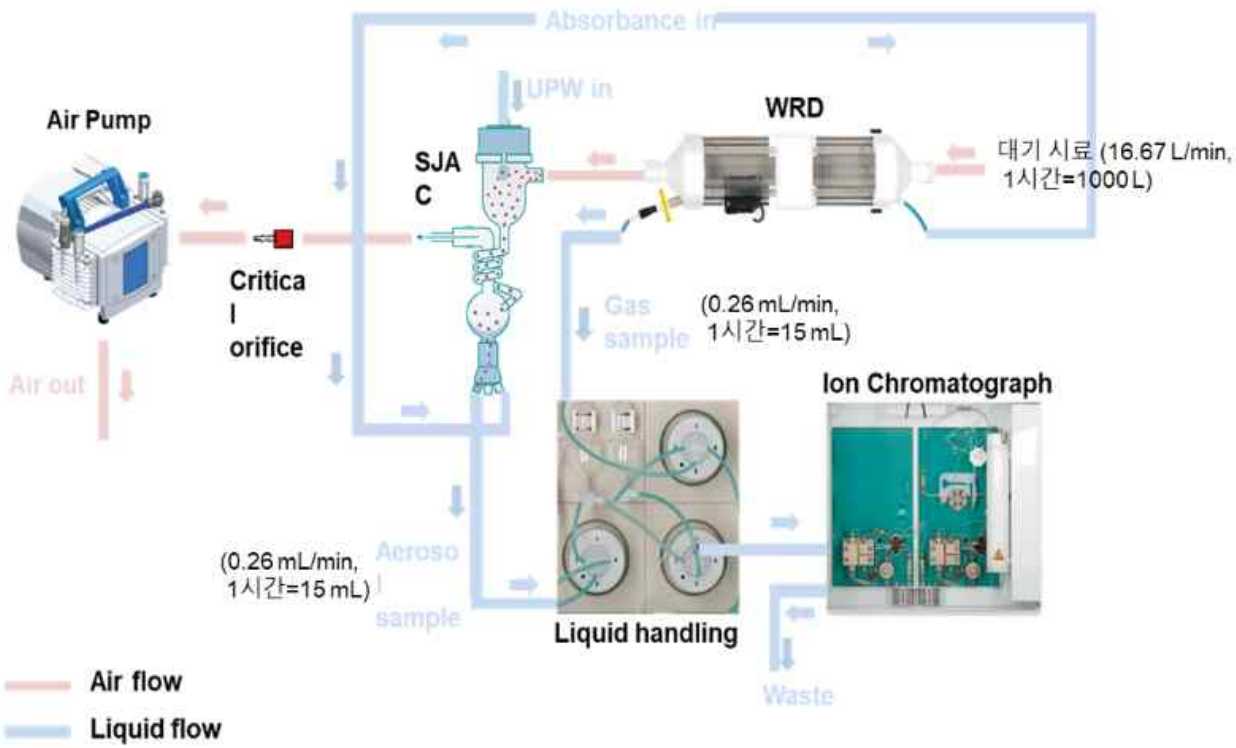


Chemical Ionization Mass Spectrometry(CIMS) 기반 실시간 N_2O_5, $ClNO_2$, HONO 측정장치 구축

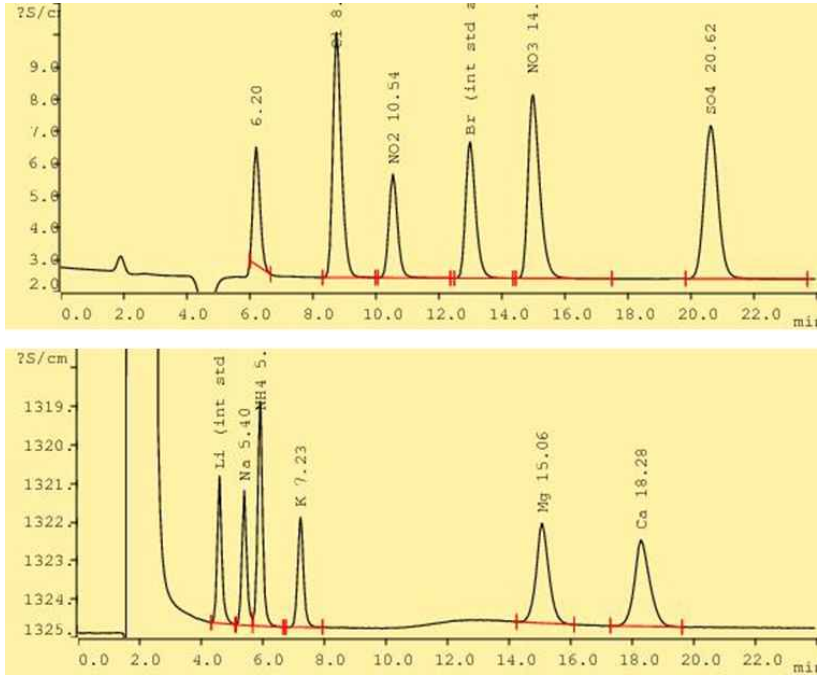


Online IC 기반 HNO_3 및 입자상 질산암모늄 측정장치 구축

MARGA 시스템 구성도



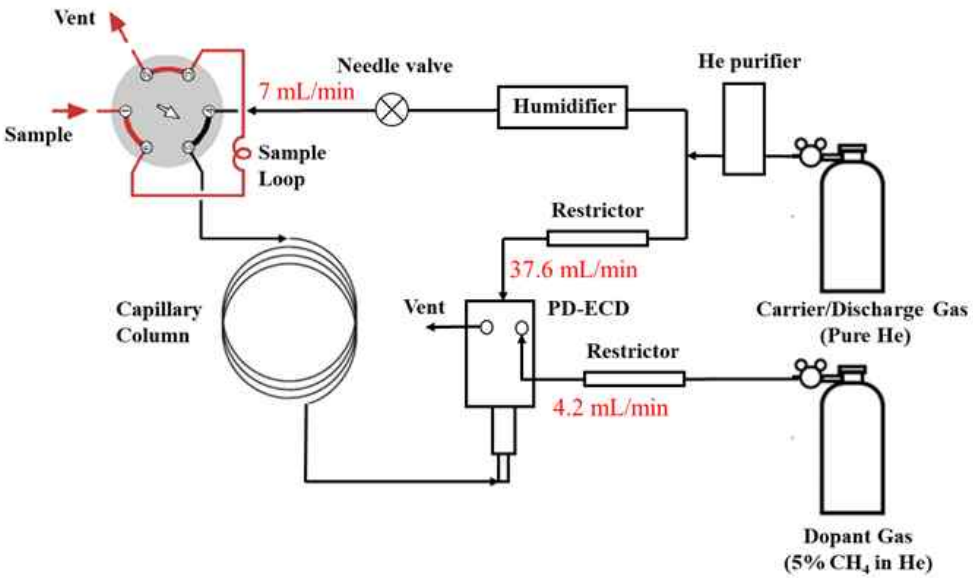
MARGA 시스템 교정 예시



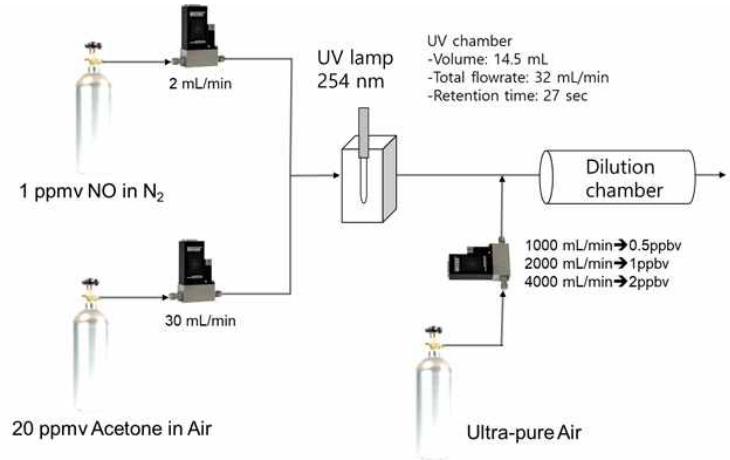
- 가스상 물질(NH_3, HCl, HNO_2, HNO_3, H_2SO_4) : RWD + 이온크로마토그래피
- 입자상 물질(Na^+, K^+, NH_4^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^-, NO_3^-, SO_4^{2-}) : SJAC + 이온크로마토그래피

GC-PDECD기반 PAN(Peroxyacetal nitrate) 측정시스템 개발

PAN 측정시스템 구성도

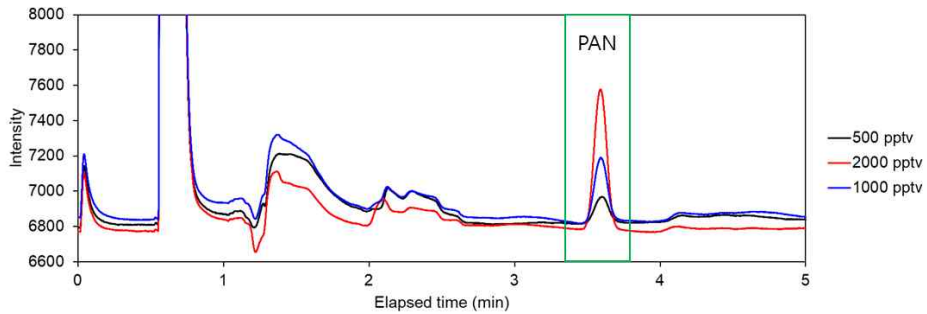


PAN 교정을 위한 발생장치



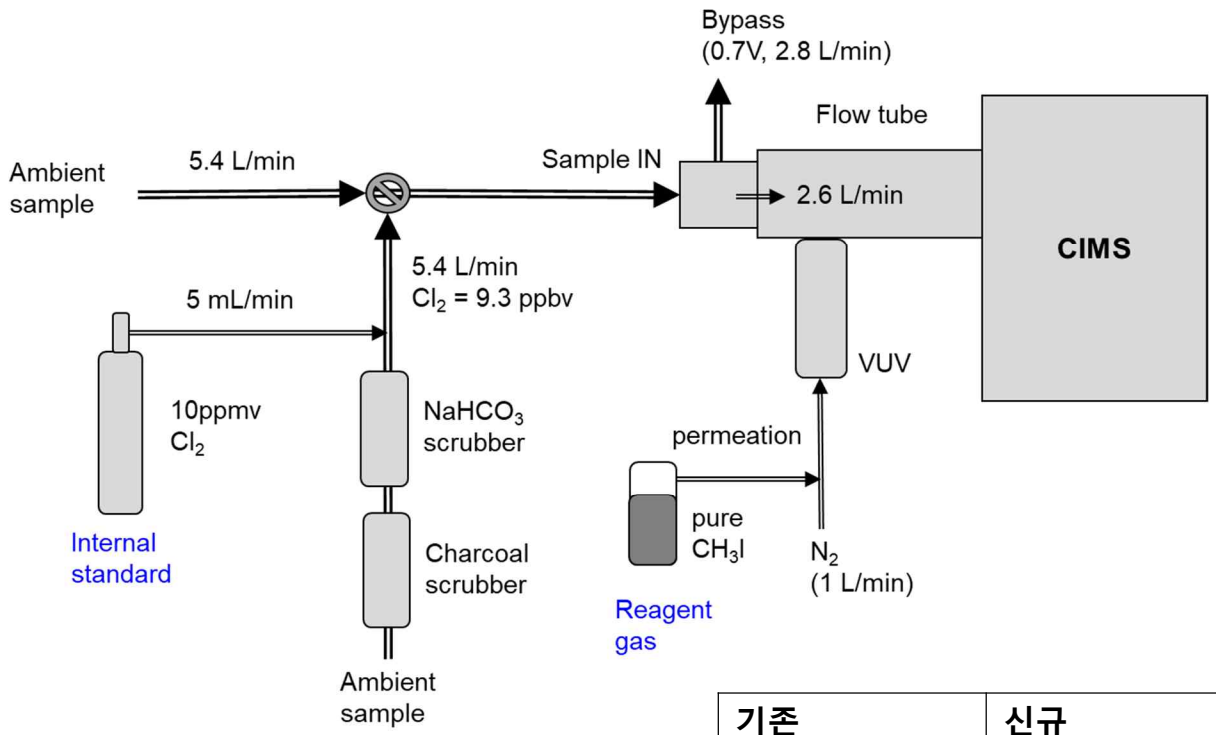
Parameter	Model
GC	Agilent 7890
He purifier	VICI HP2-220
Column	RestekRTX-200MS
Humidifier	200g CuSO4 pentahydrate
Detector	Pulsed discharge detector, VICI D-2-220

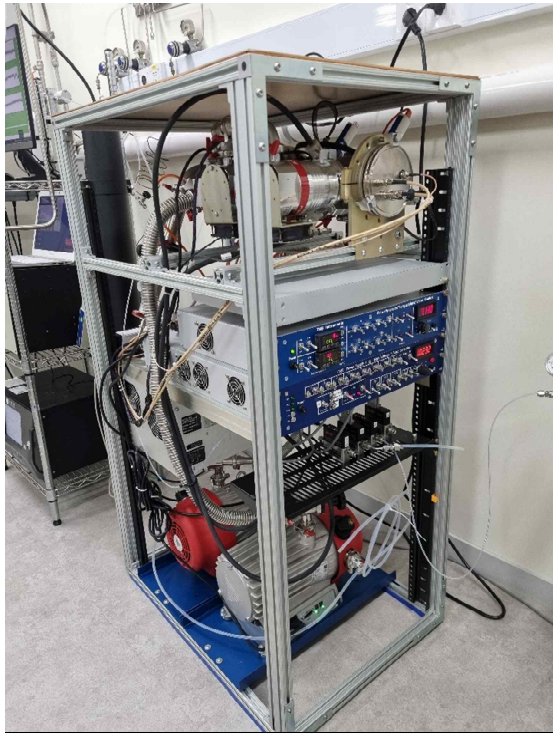
PAN 교정 결과 예시



CIMS를 이용한 이차 질소산화물 및 유기산 측정

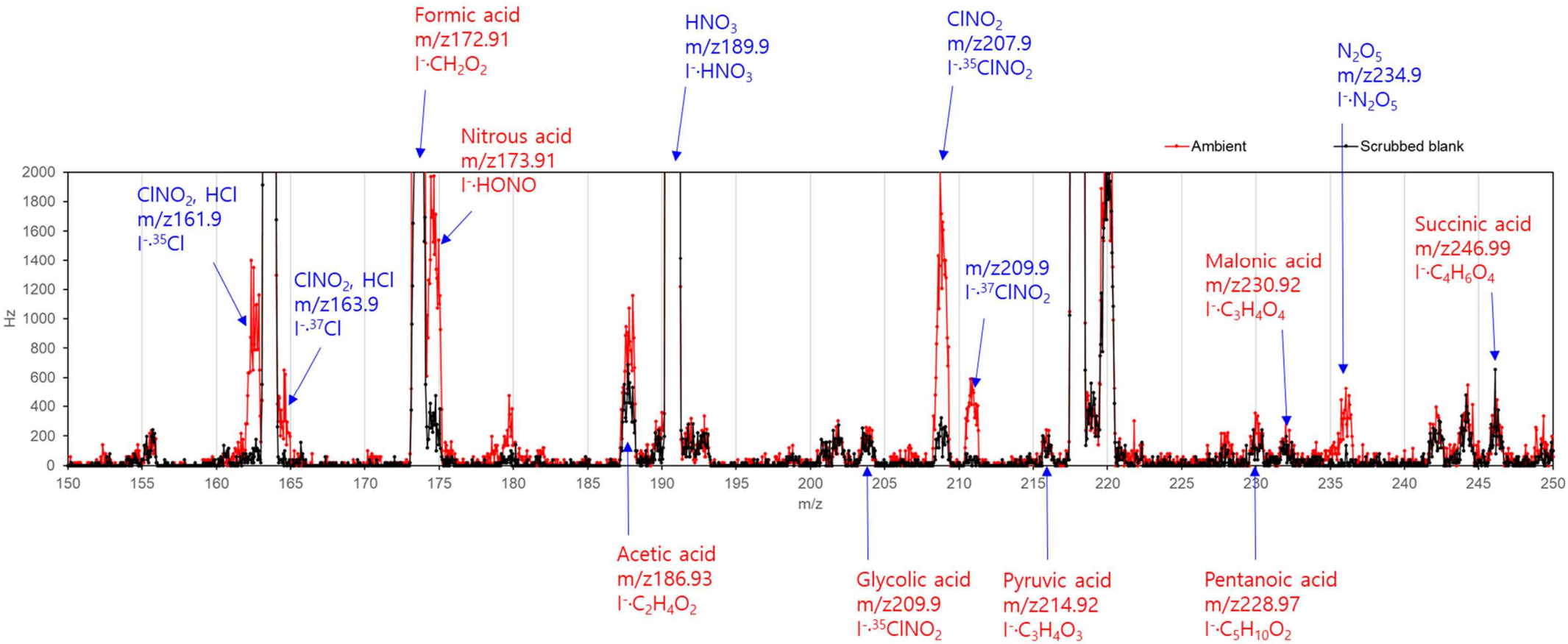
Chemical Ionization Mass Spectrometry(CIMS)





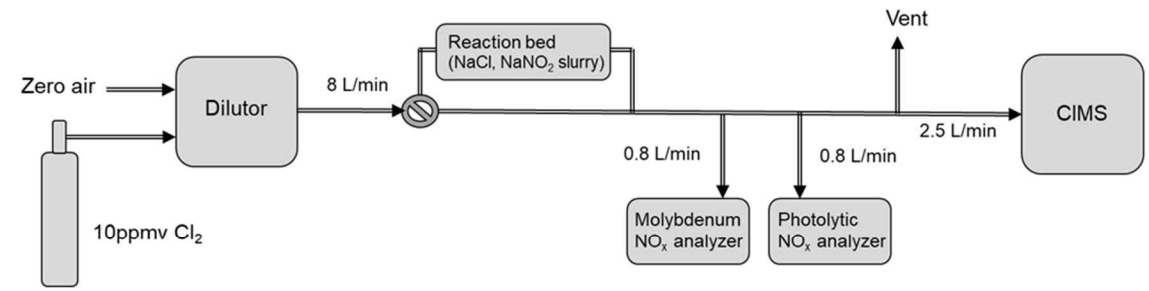
기존	신규	
$ClNO_2$, N_2O_5, HNO_3, Cl_2	확정	HONO, formic acid, acetic acid
	미확정	Glycolic acid, pyruvic acid, pentanoic acid, malonic acid, succinic acid

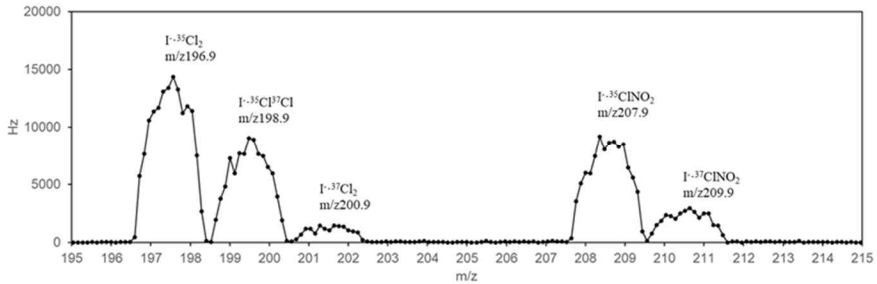
CIMS를 이용한 이차 질소산화물 및 유기산 측정 mass spectrum



CIMS $ClNO_2$와 N_2O_5 교정기법 개발

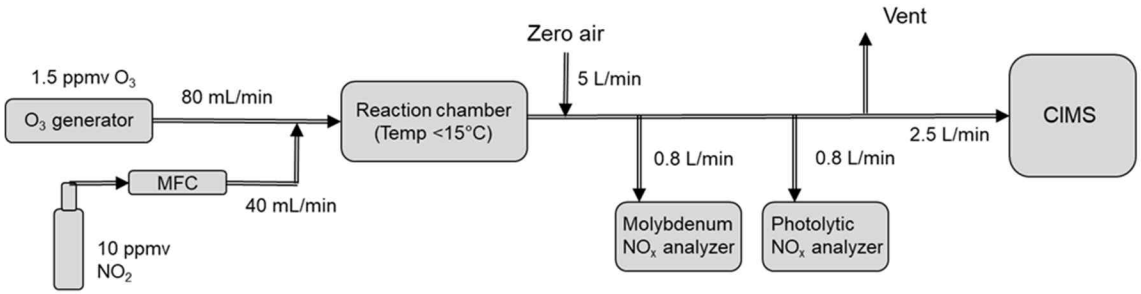
External calibration ($ClNO_2$)
: the reaction of NO_2 and O_3



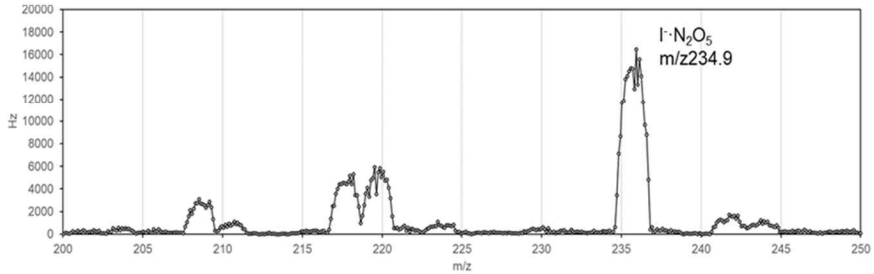


	Sensitivity
Cl_2 at mz198	0.763 Hz/pptv
$ClNO_2$ at mz208	0.557 Hz/pptv
Rel. sensitivity ($ClNO_2/Cl_2$)	0.729

External calibration (N_2O_5)
: the reaction of Cl_2 and $NaNO_2$



	Sensitivity
Cl_2 at mz198	2.33 Hz/pptv
N_2O_5 at mz235	9.67 Hz/pptv
Rel. sensitivity (N_2O_5/Cl_2)	0.24

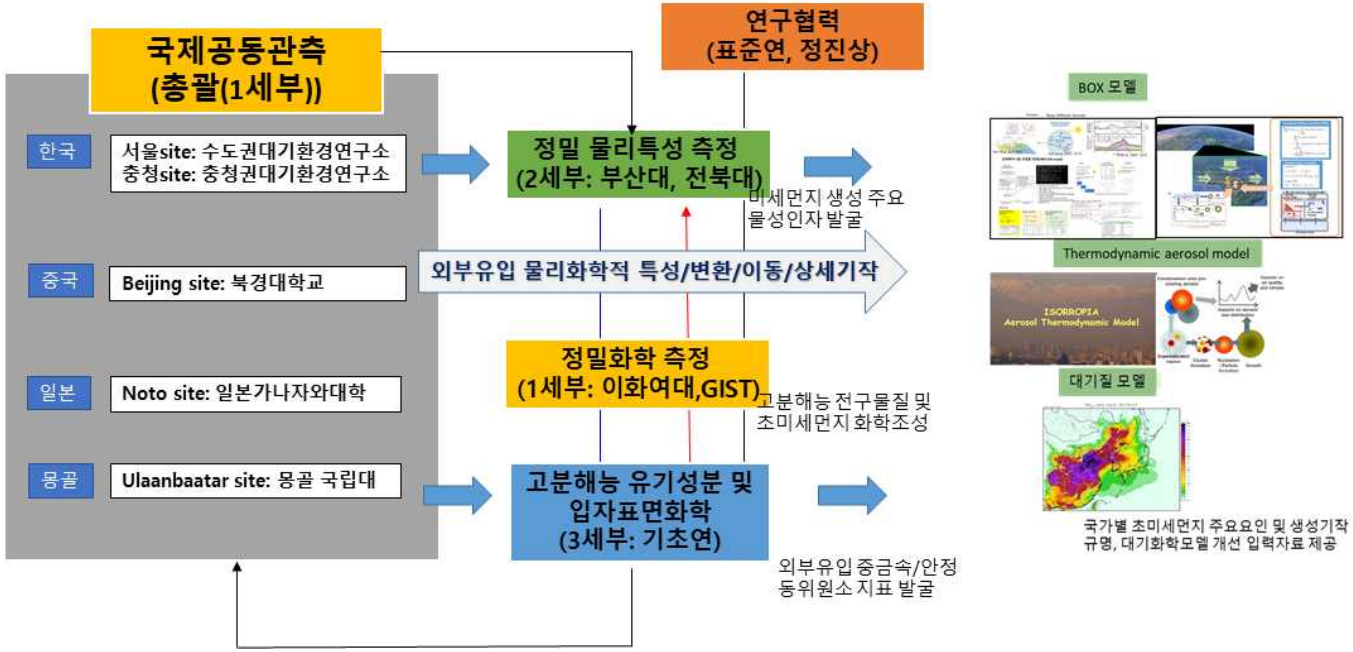


동북아- 지역연계 미세먼지 사업단 국제공동관측연구

▷목적: 동북아지역 대기오염물질 생성 및 거동특성 규명

▷주관: 이화여대

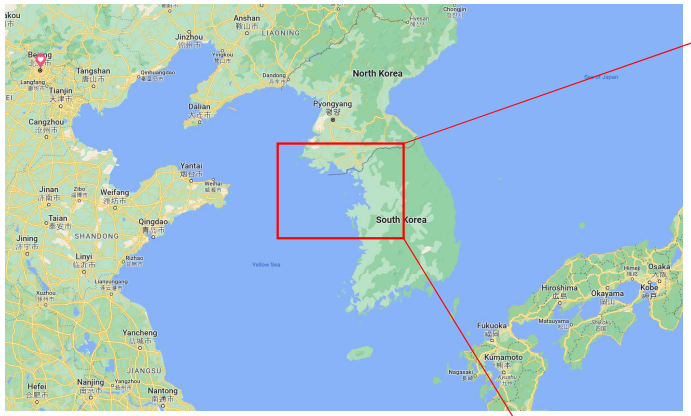
▷참여: 전북대, KBSI, 부산대, 북경대, 가나자와대, 몽골국립대, KRISS

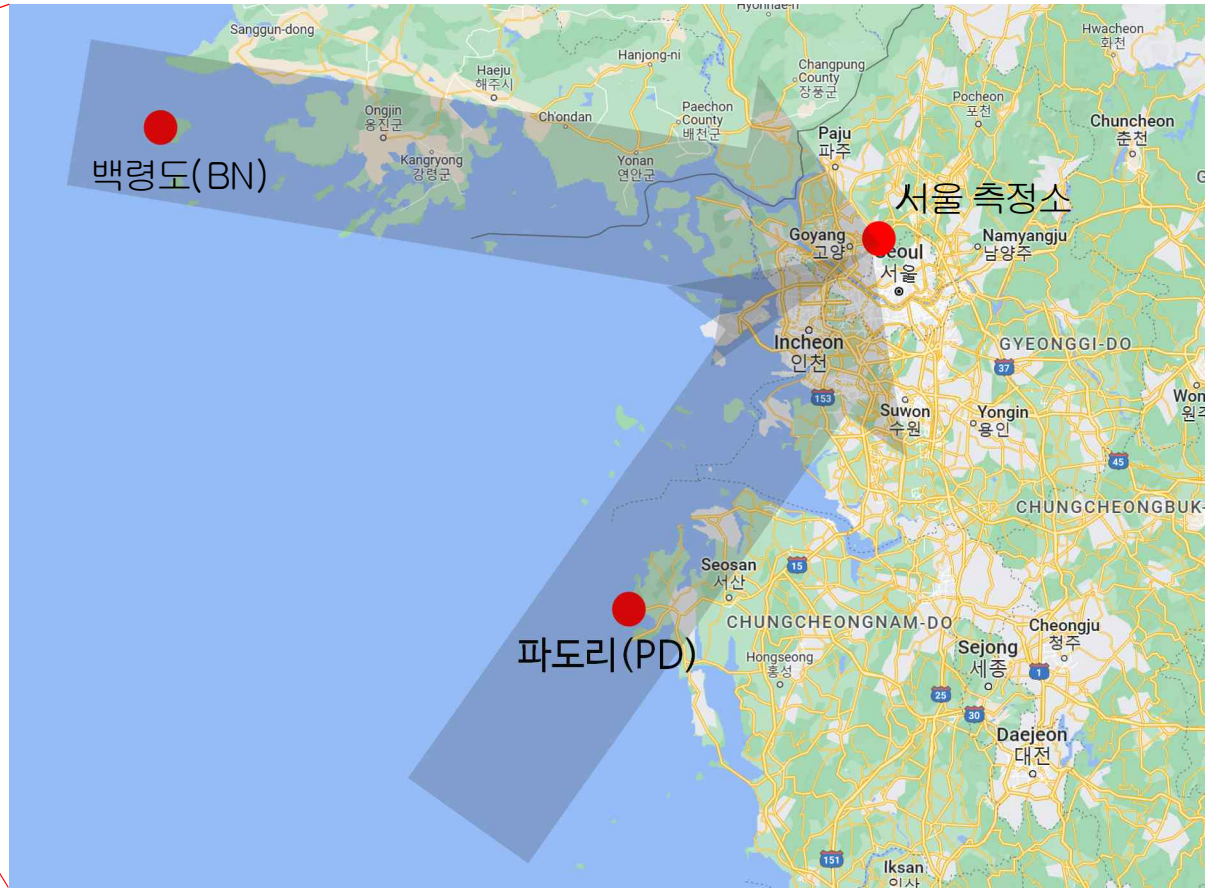


▷현장 적용

- CIMS를 이용한 2023년 봄철과 가을철 서울시 대기 중 N_2O_5, $ClNO_2$, Cl_2 측정
- HONO 생성 및 분해 그리고 O_3 생성 영향 규명

서울 캠페인 기간 동안 측정 기간 및 항목





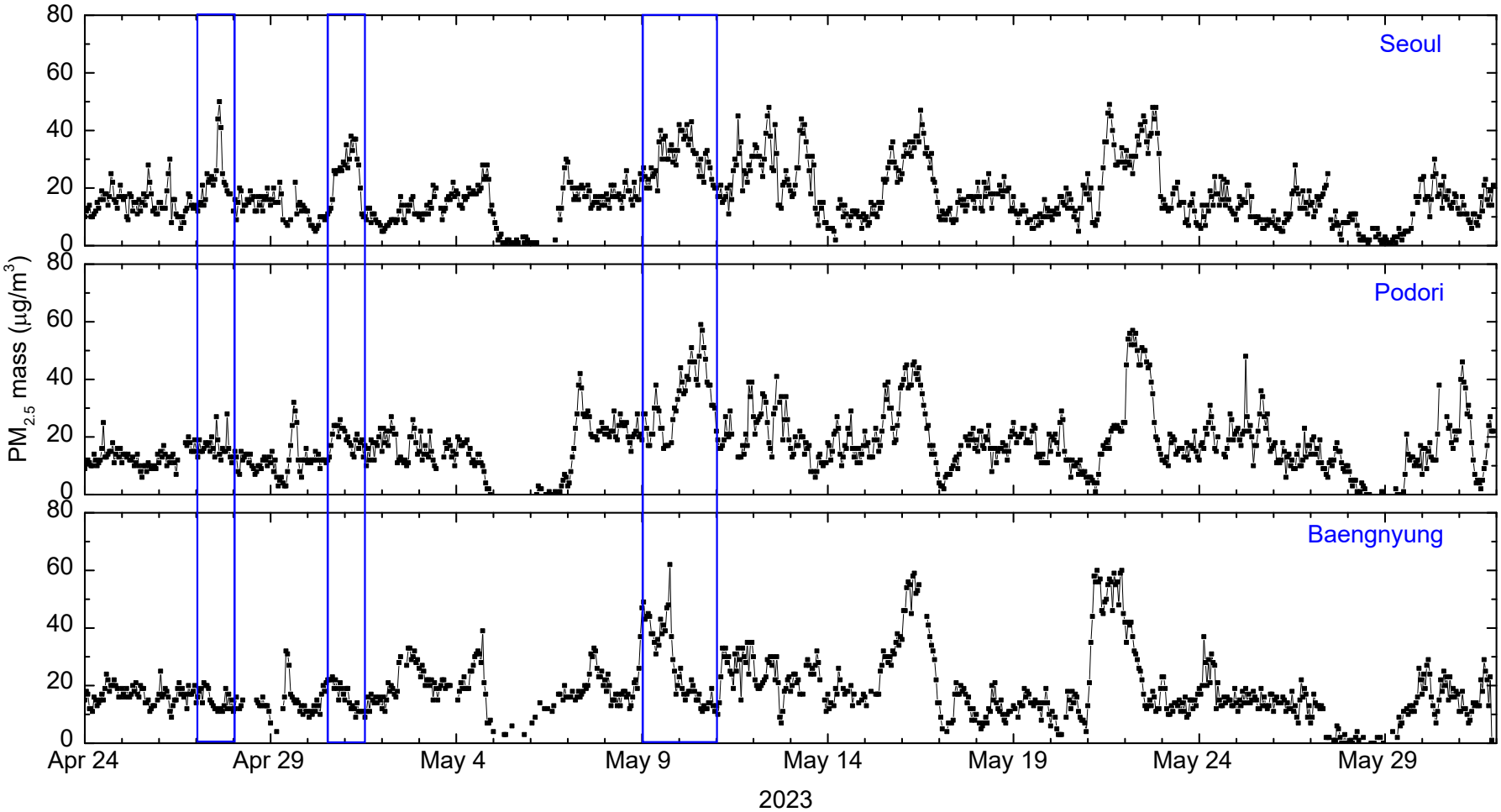
▷측정 장소: 수도권대기환경연구소

▷기간: 2023년 4월 말-5월

▷측정 항목

- CIMS: N_2O_5, $ClNO_2$, Cl_2
- MARGA: HNO3, etc
- AIM: 질산염, 황산염 등
- Beta-gauge: $PM_{2.5}$ 질량 농도
- SMPS: 입경별 수농도 분포

서울, 파도리, 백령도에서 $PM_{2.5}$ 질량 농도 시계열 변화



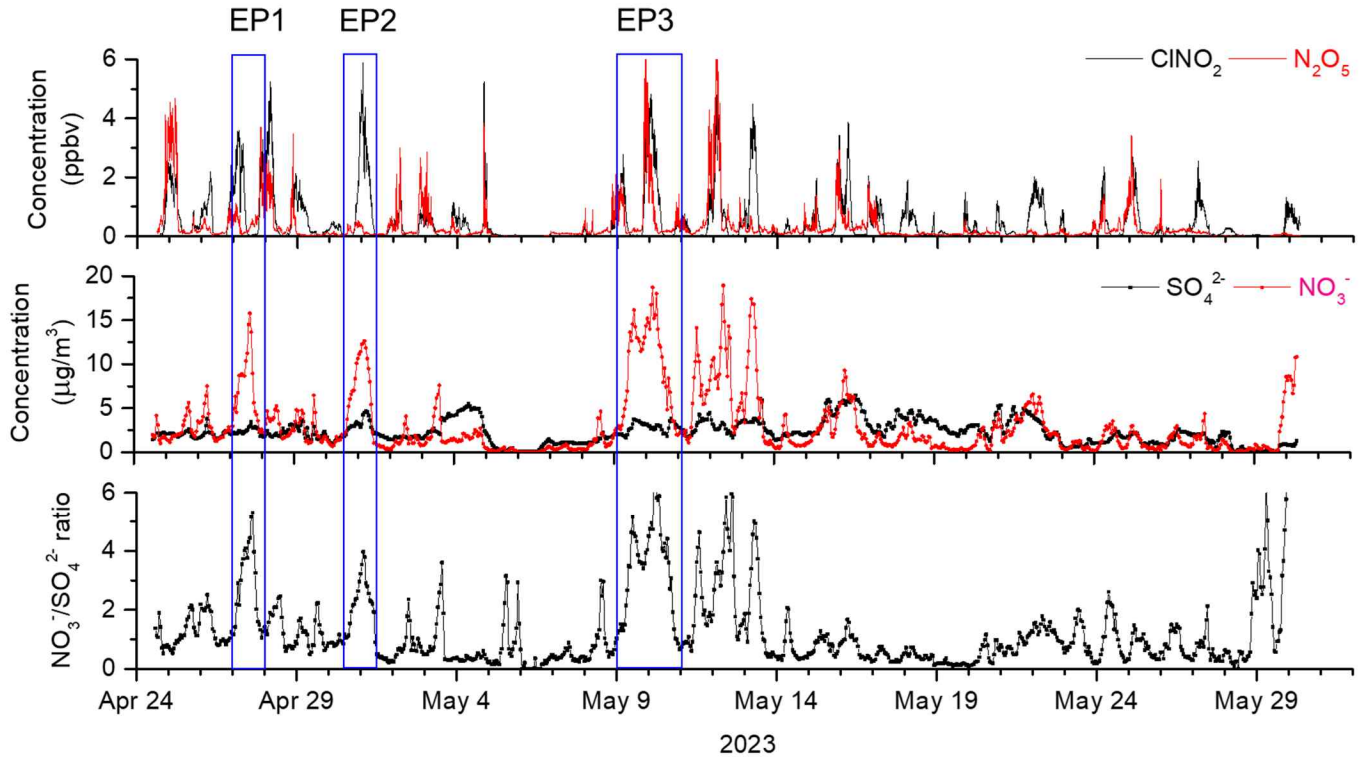
서울측정소에서 $ClNO_2$, N_2O_5, 질산염, 황산염 시계열 변화

▷낮 시간

$$OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$$
$$HNO_3(g) + NH_3(g) \leftrightarrow NH_4NO_3(s)$$
$$HNO_3(g) + NH_3(g) \leftrightarrow NH_4^+(aq) + NO_3^-(aq)$$

▷밤 시간

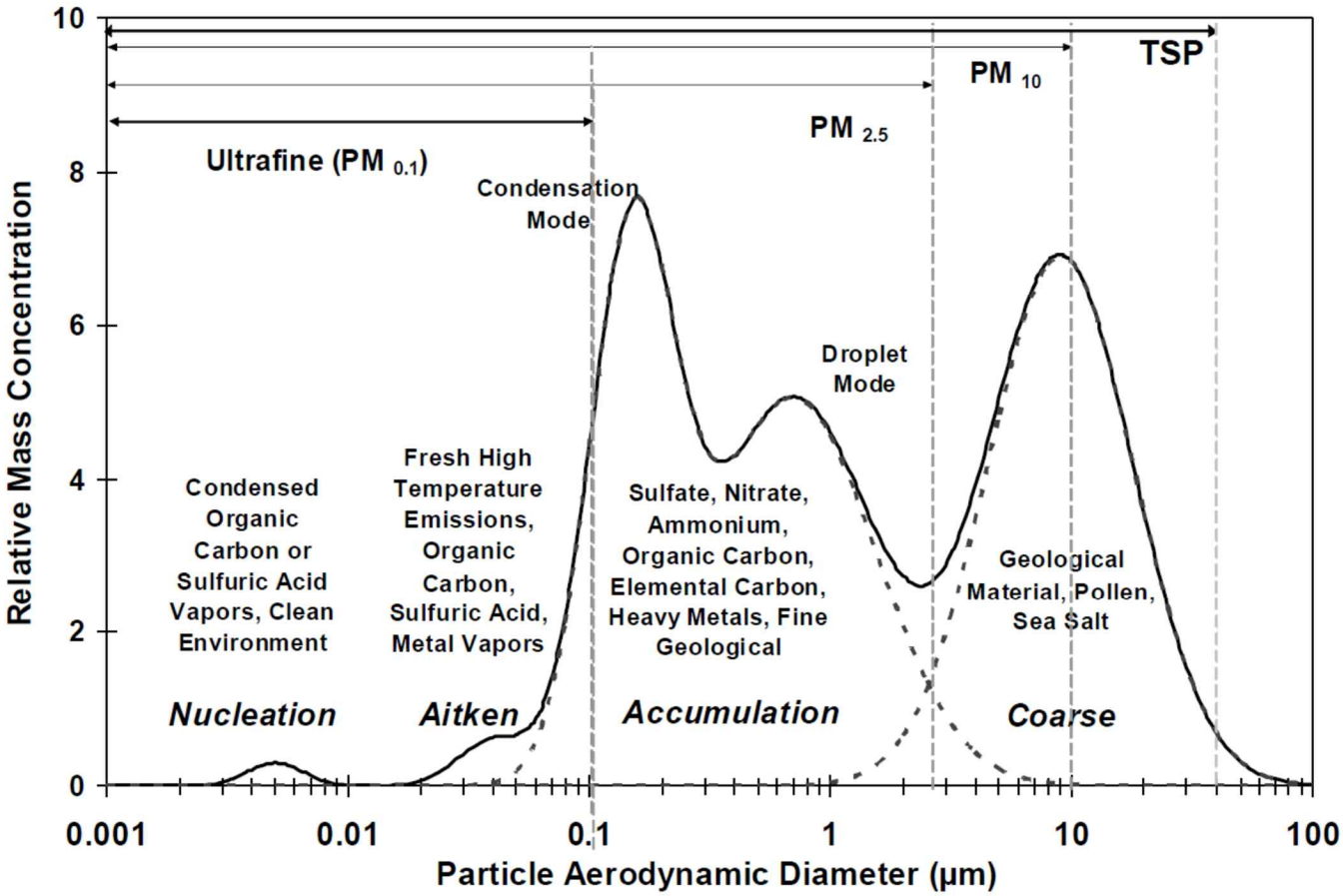
$$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3$$
$$NO_2 + NO_3 + M \leftrightarrow N_2O_5 + M$$
$$NO_3 + VOCs \rightarrow products$$
$$N_2O_5 + H_2O \text{ or } Cl^-(aq) \rightarrow (2-\phi)NO_3^-(aq) + \phi ClNO_2(g)$$



- 국내 최초로 서울지역 대기 중 N_2O_5 $ClNO_2$, Cl_2 실시간 연속 측정 성공.
- 밤 사이 N_2O_5로부터 질산염 생성되는 것을 측정기반으로 확인함.

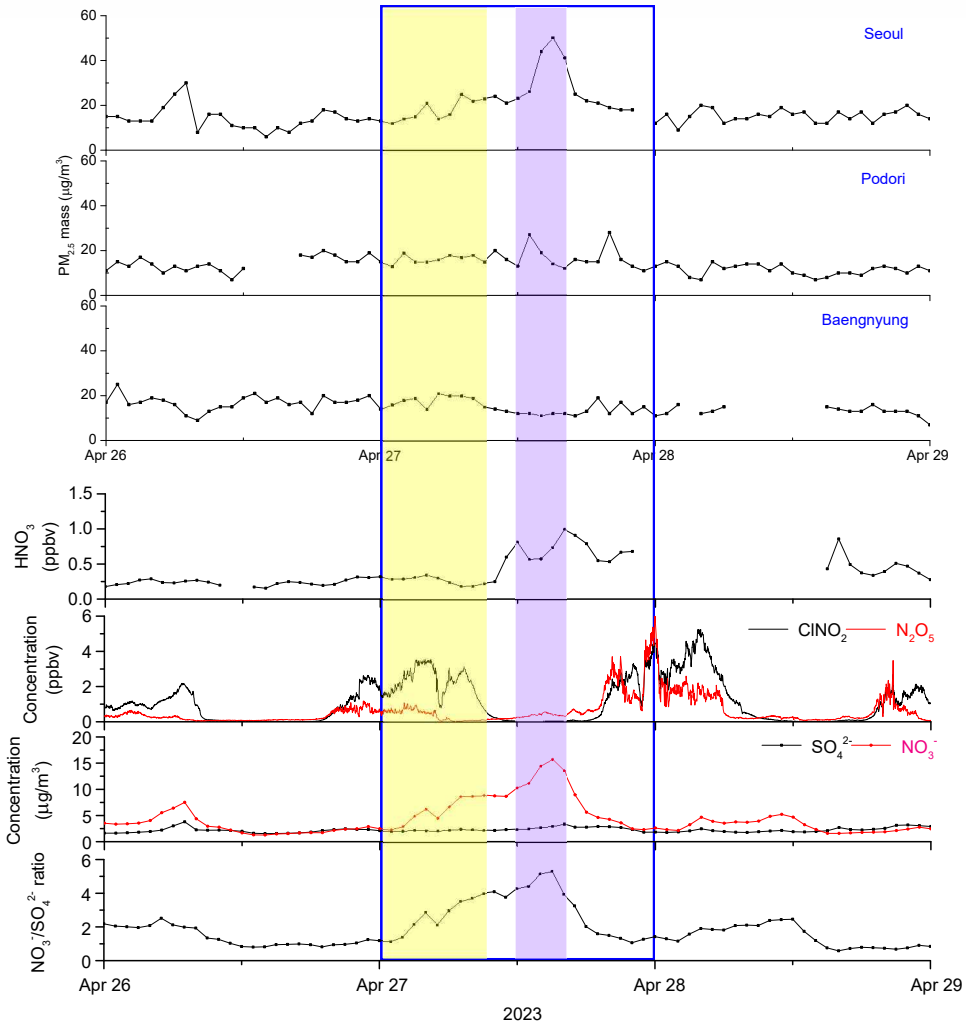
⇒ 화학반응식과 연계한 심층 반응 및 생성 매커니즘 연구.

대기 중 에어로졸의 입경별 질량농도 분포



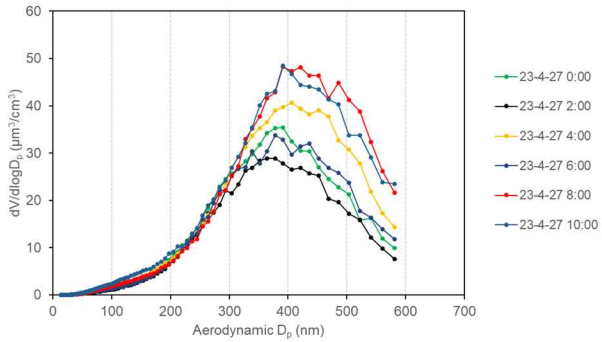
[Watson, 2010]

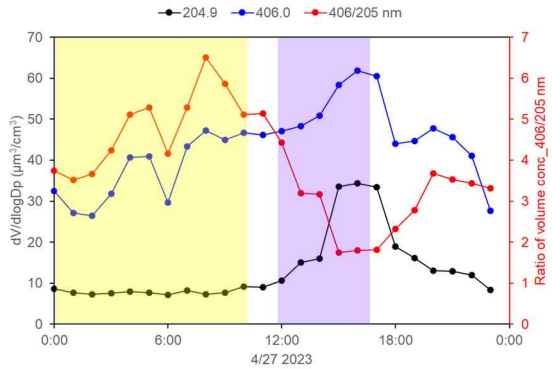
고농도 사례 1(EP1)



한반도로 외부 오염물질 유입된 것인지 명확하지 않음.

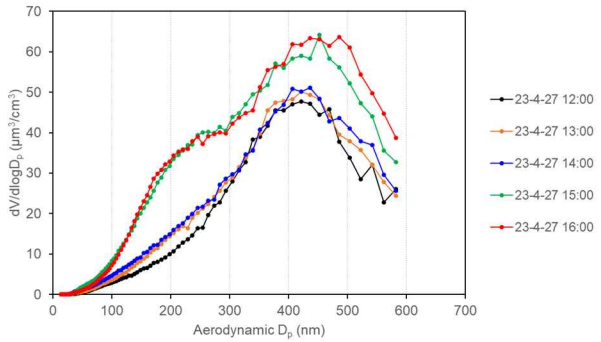
EP1-1





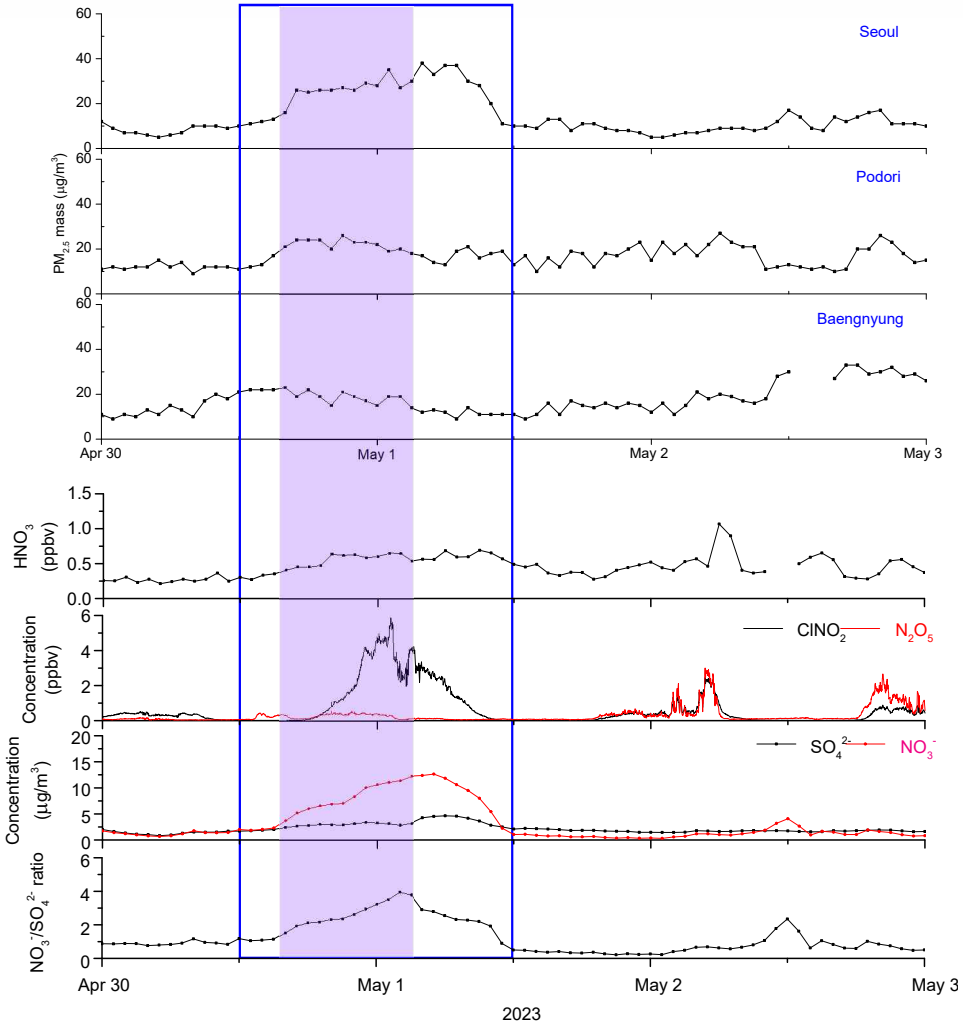
- 낮은 HNO_3과 높은 $ClNO_2$
- Droplet mode에서 부피 농도가 급격히 증가함.

EP1-2

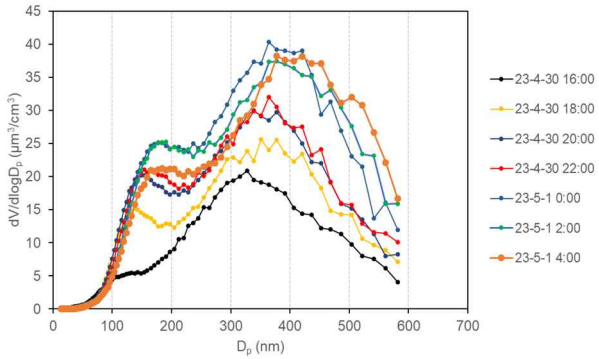


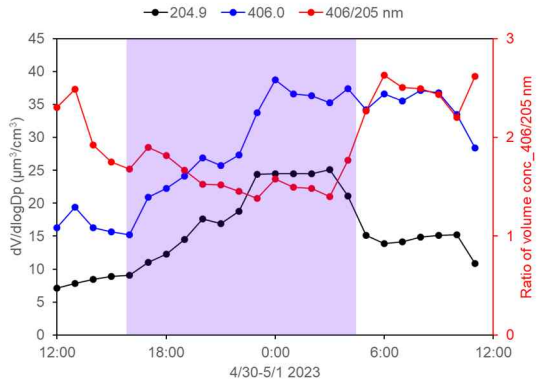
- 높은 HNO_3과 낮은 $ClNO_2$
- Condensation and droplet mode 두 곳 모두에서 부피 농도가 급격히 증가함.

EP2



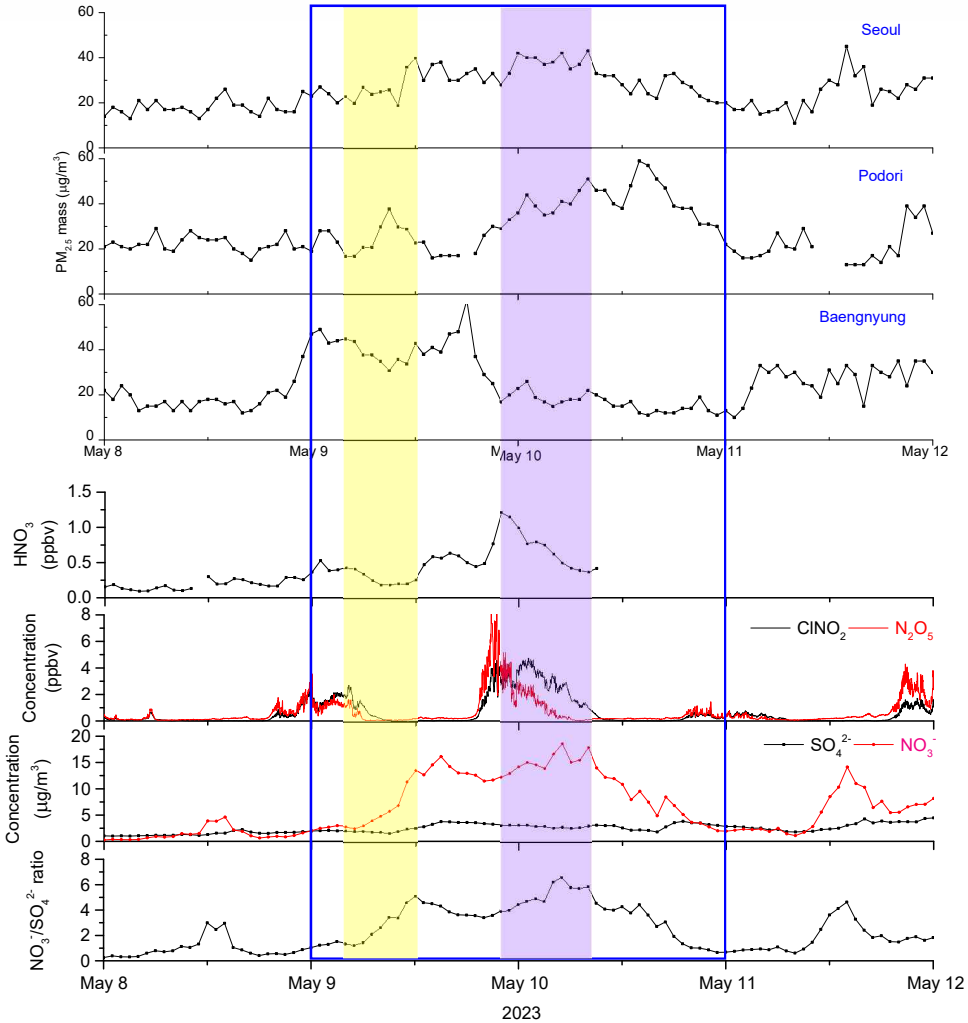
한반도의 서쪽으로부터 외부 오염물질 유입이 확인됨.





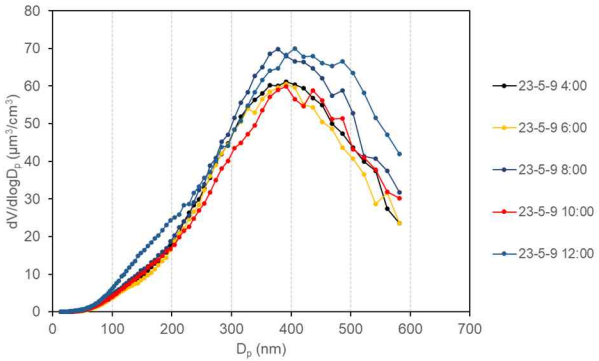
- 일정 수준 HNO_3와 높은 $ClNO_2$
- Condensation and droplet mode에서 부피 농도가 급격히 증가함.

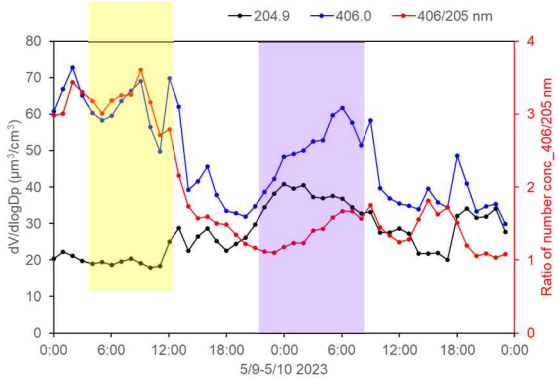
EP3



한반도의 북서쪽에서 외부 오염물질 유입이 확인됨.

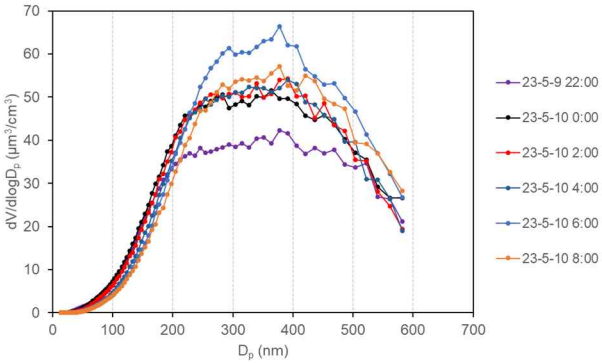
EP3-1





- 낮은 HNO_3와 낮은 $ClNO_2$
- Droplet mode에서 부피 농도가 급격히 증가함.

EP3-2

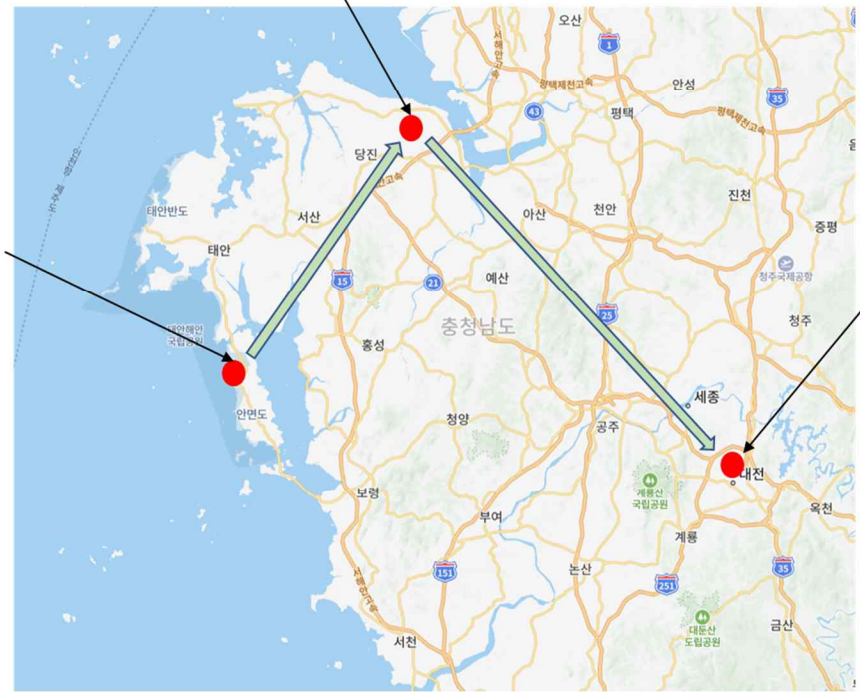


- 높은 HNO_3와 높은 $ClNO_2$
- Condensation and droplet mode에서 모두 부피 농도가 급격히 증가함.

CIMS N_2O_5, $ClNO_2$ 측정 현장적용_충남 서해안 지역

Dangjin Site
: industrial air pollutants
- 20 March-22 April 2024
- CIMS, MARGA, SMPS, online-VOCs

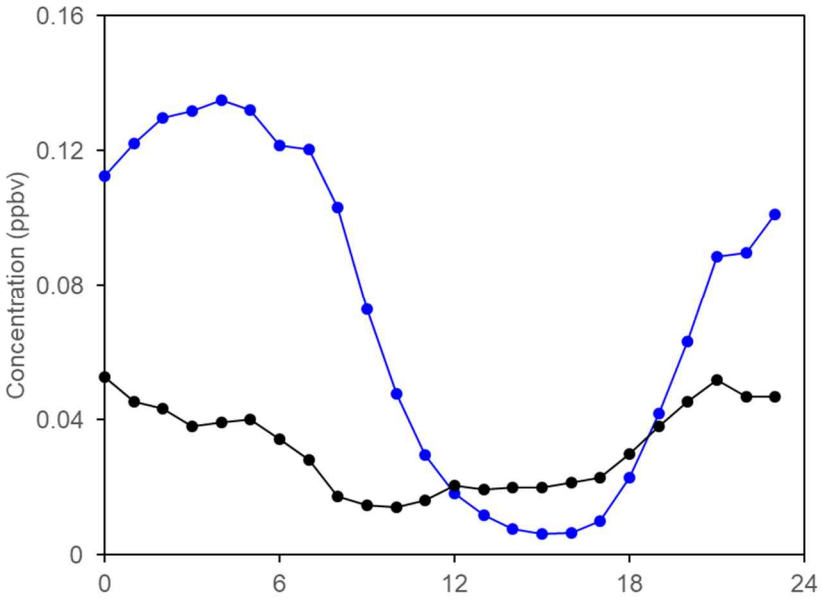
Anmyeon Site
: Inflow or outflow of air pollutants over the Korean Peninsula
- 18 Jan-13 March 2024
- CIMS, MARGA



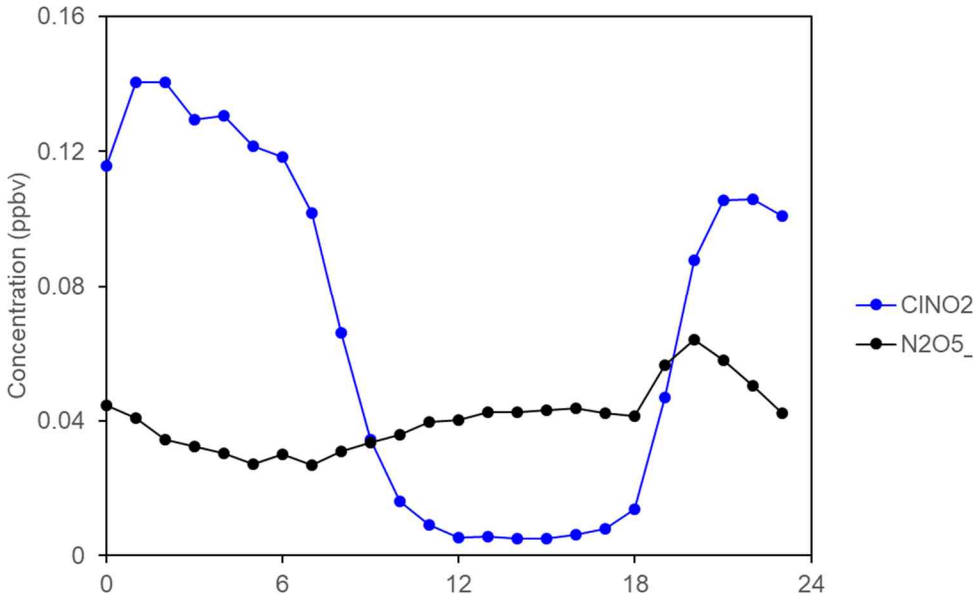
Daejeon Site
: urban air pollutants
- 20 May till now
- CIMS, MARGA, etc

N_2O_5, $ClNO_2$ 일변화 경향

안면도

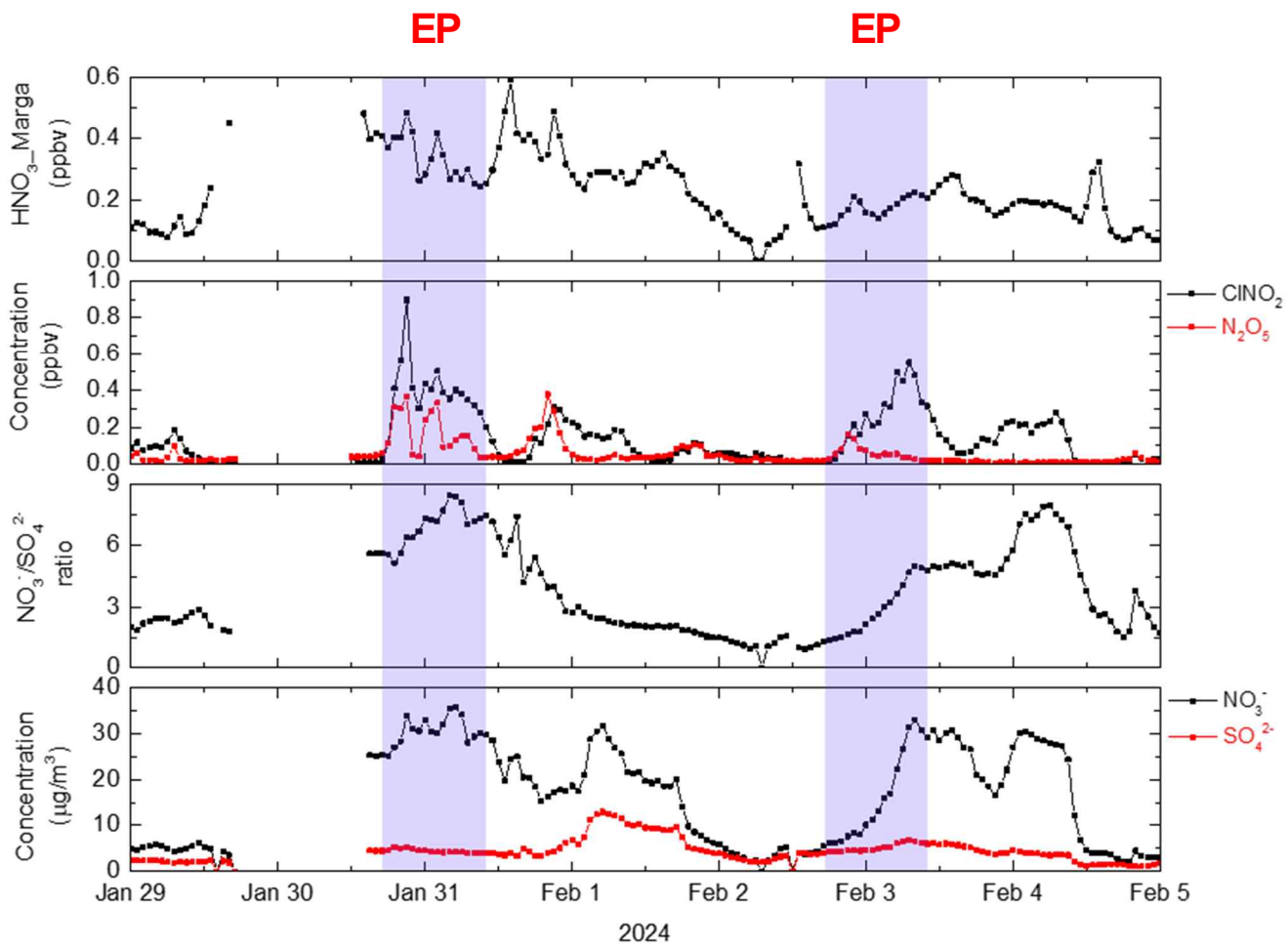


당진



$ClNO_2$와 HONO는 밤 시간 높고 낮 시간에 photolysis로 낮아지는 일변화 경향을 보임.

CIMS N_2O_5, $ClNO_2$ 측정 현장적용_안면도

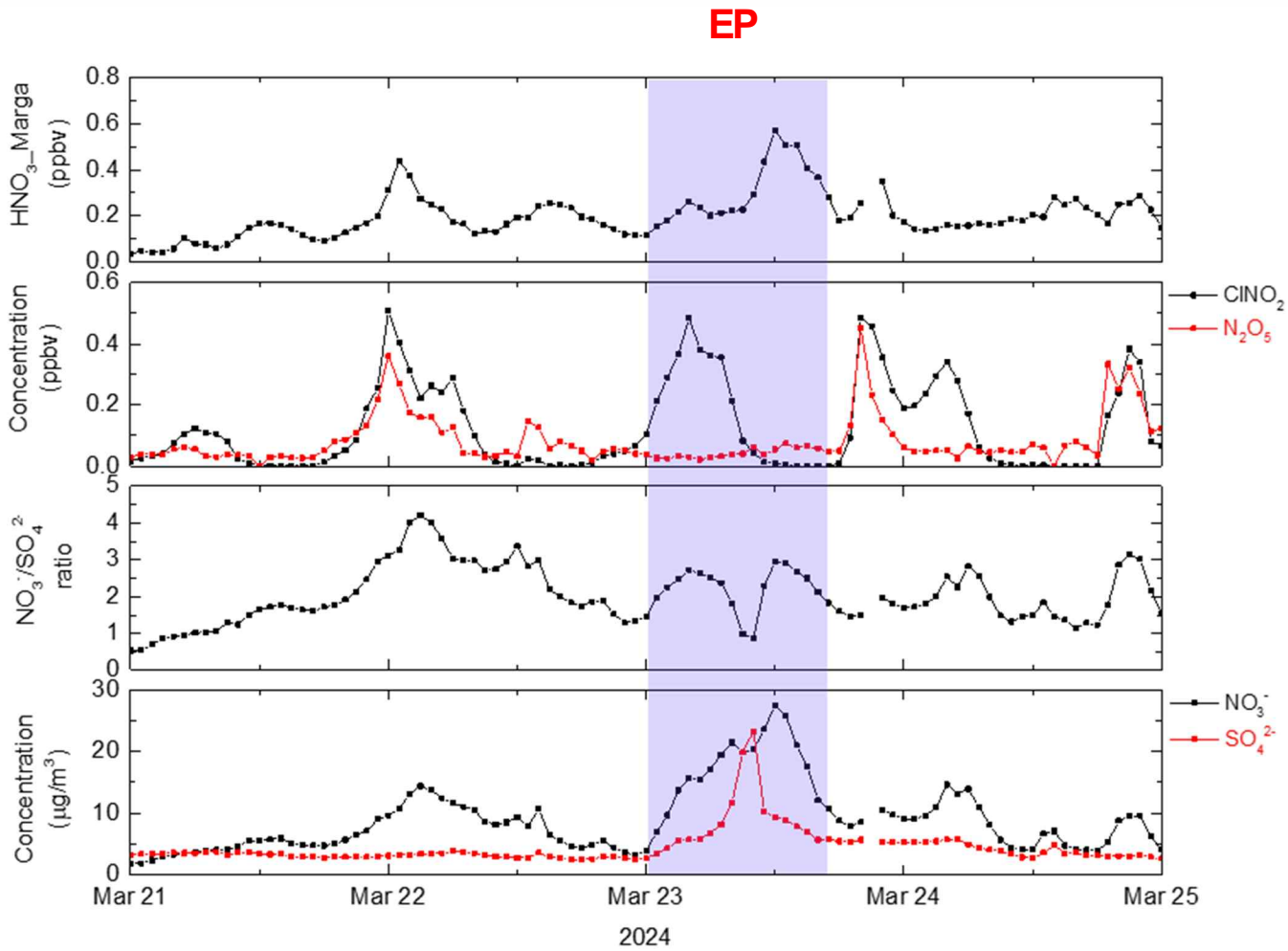


안면도 외부유입에 의해 질산염의 농도가 급격히 증가할 때(EP)

- heterogeneous reaction(N_2O_5, $ClNO_2$ 증가)에 의해
- 질산염이 추가 생성됨(질산염/황산염 비 증가)을

측정결과로 확인할 수 있음.

CIMS N_2O_5, $ClNO_2$ 측정 현장적용_당진



당진지역의 경우 외부유입에 의해 질산염의 농도가 급격히 증가할 때(EP)

-$ClNO_2$의 농도도 동일하게 급격하게 증가함.

-N_2O_5는 농도 변화가 없음

➔외부 유입된 오염물질이 당진에 도착하기 전에 heterogeneous reaction이 활발히 진행된 것으로 보임.

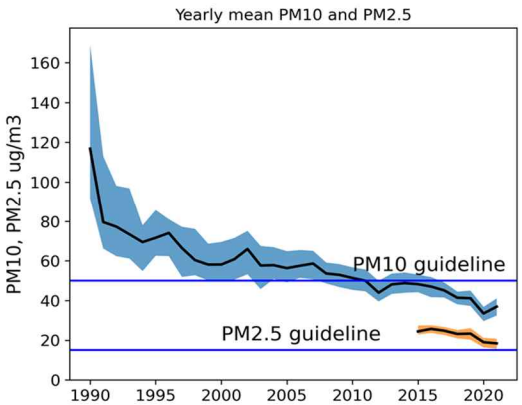
목 차

오존 연구의 필요성

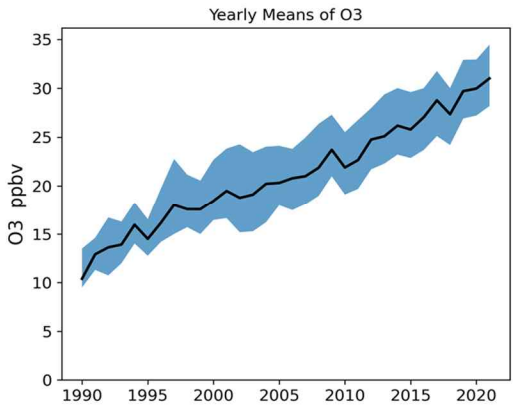
- 제 3차 대기환경개선 종합계획 (2023~2032년, 환경부 장관 주체)
  - 2032 목표 : 전국 오존 1시간 기준 (0.1 ppm) 달성률 50 % 달성 (2024년: 41 %, 2027년: 45 %, 2032년: 50 %)
  - 오존 저감 정책을 위한 오존 및 전구물질(NO_x, VOC_s, Radical 등) 전주기 감시 모니터링 체계 구축 필요

- 오존 생성에 핵심인 반응성 가스(OH, HO_2 등)에 대한 국내 측정기반이 매우 취약함

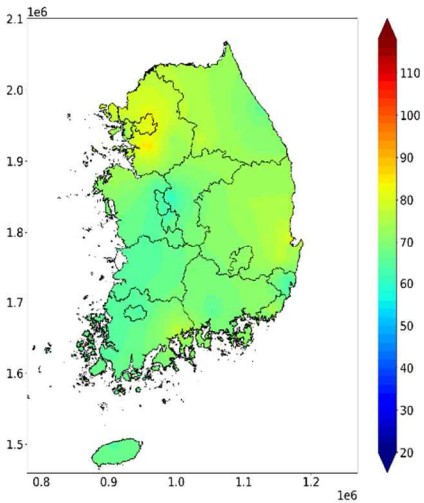
PM



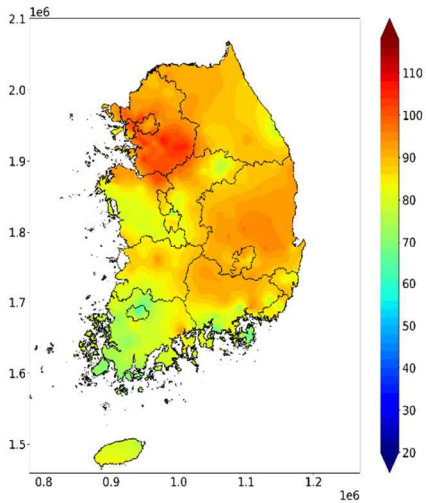
O_3



2000년



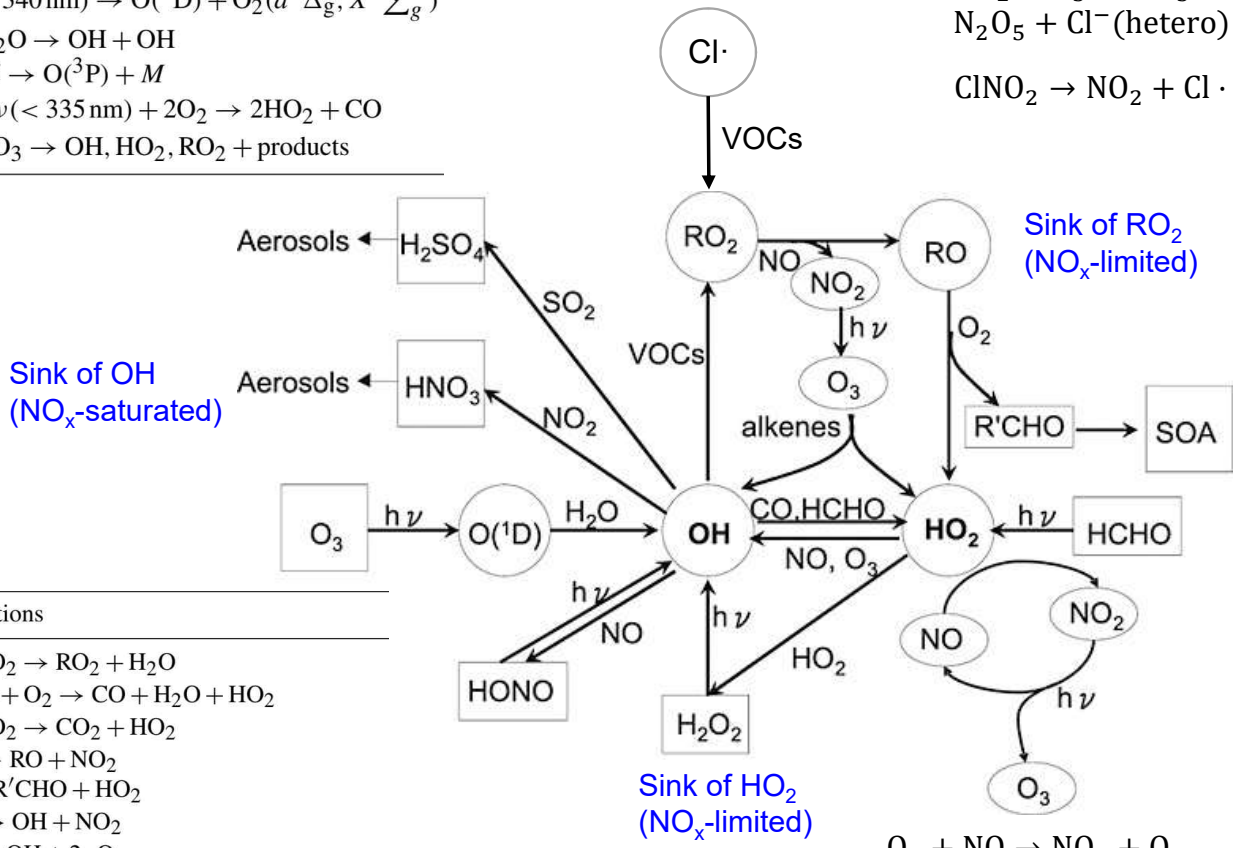
2020년



[Kim et al., 2021]

오전 전주기 측정기반 구축

Initiation reactions	
(R1)	$HONO + h\nu(< 400\,nm) \rightarrow OH + NO$
(R2)	$O_3 + h\nu(< 340\,nm) \rightarrow O(^1D) + O_2(a^1\Delta_g, X^3\Sigma_g^-)$
	$O(^1D) + H_2O \rightarrow OH + OH$
	$O(^1D) + M \rightarrow O(^3P) + M$
(R3)	$HCHO + h\nu(< 335\,nm) + 2O_2 \rightarrow 2HO_2 + CO$
(R4)	$Alkenes + O_3 \rightarrow OH, HO_2, RO_2 + products$



$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2,\ NO_2 + NO_3 \rightarrow N_2O_5$

$N_2O_5 + Cl^-(hetero) \rightarrow ClNO_2 + NO_3^-$

$ClNO_2 \rightarrow NO_2 + Cl\cdot$

$VOC_s + Cl\cdot \rightarrow RO_2 + HCl$

$VOC_s + OH \rightarrow RO_2 + H_2O$

$RO_2 + NO \rightarrow R'CHO + HO_2 + NO_2$

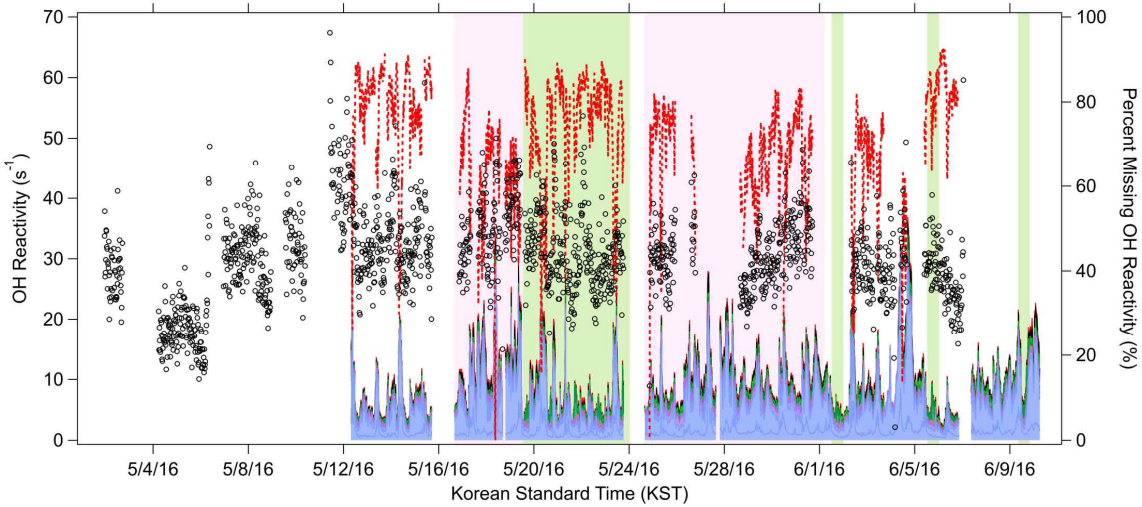
$O_3 + NO \rightarrow NO_2 + O_2$

Chain propagation reactions	
(R5)	$OH + RH + O_2 \rightarrow RO_2 + H_2O$
(R6)	$HCHO + OH + O_2 \rightarrow CO + H_2O + HO_2$
(R7)	$CO + OH + O_2 \rightarrow CO_2 + HO_2$
(R8)	$RO_2 + NO \rightarrow RO + NO_2$
	$RO + O_2 \rightarrow R'CHO + HO_2$
(R9)	$HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$
(R10)	$HO_2 + O_3 \rightarrow OH + 2\cdot O_2$
(R11)	$NO_2 + h\nu(< 420\,nm) + O_2 \rightarrow NO + O_3$

Termination reactions	
(R12)	$OH + NO_2 \rightarrow HNO_3$
(R13)	$OH + NO \rightarrow HONO$
(R14)	$RO_2 + NO \rightarrow RONO_2$
(R15)	$RO_2 + RO_2 \rightarrow products$
(R16)	$RO_2 + HO_2 \rightarrow ROOH + O_2$
(R17)[j]	$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$
	$HO_2 + HO_2 + H_2O \rightarrow H_2O_2 + H_2O + O_2$

한반도에서 오존 연구 한계

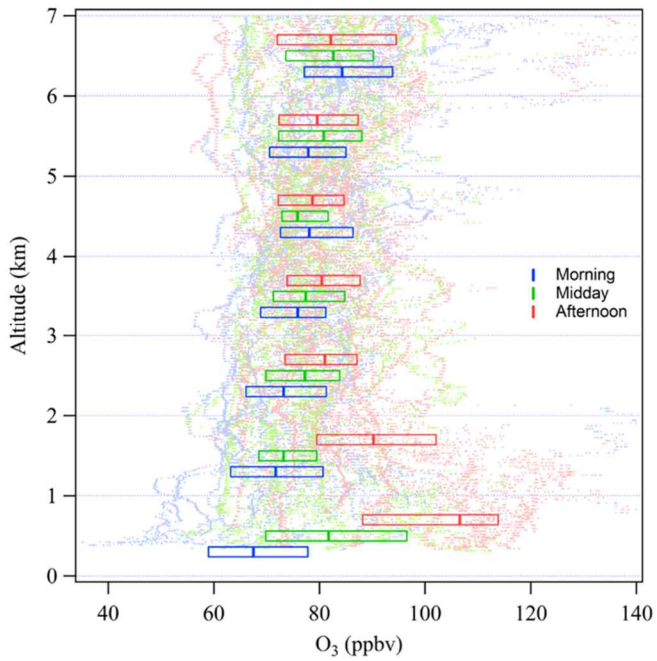
태화산 사이트에서 OH reactivity 측정



- OH Reactivity
- Percent Missing OH Reactiviy
- OVOCs
- Aromatics
- Monoterpenes
- Isoprene
- MVK +MACR
- O_3, SO_2, and CO
- NOx

OH reactivity의 측정값과 계산값이 약 50-75% 차이가 발생함.

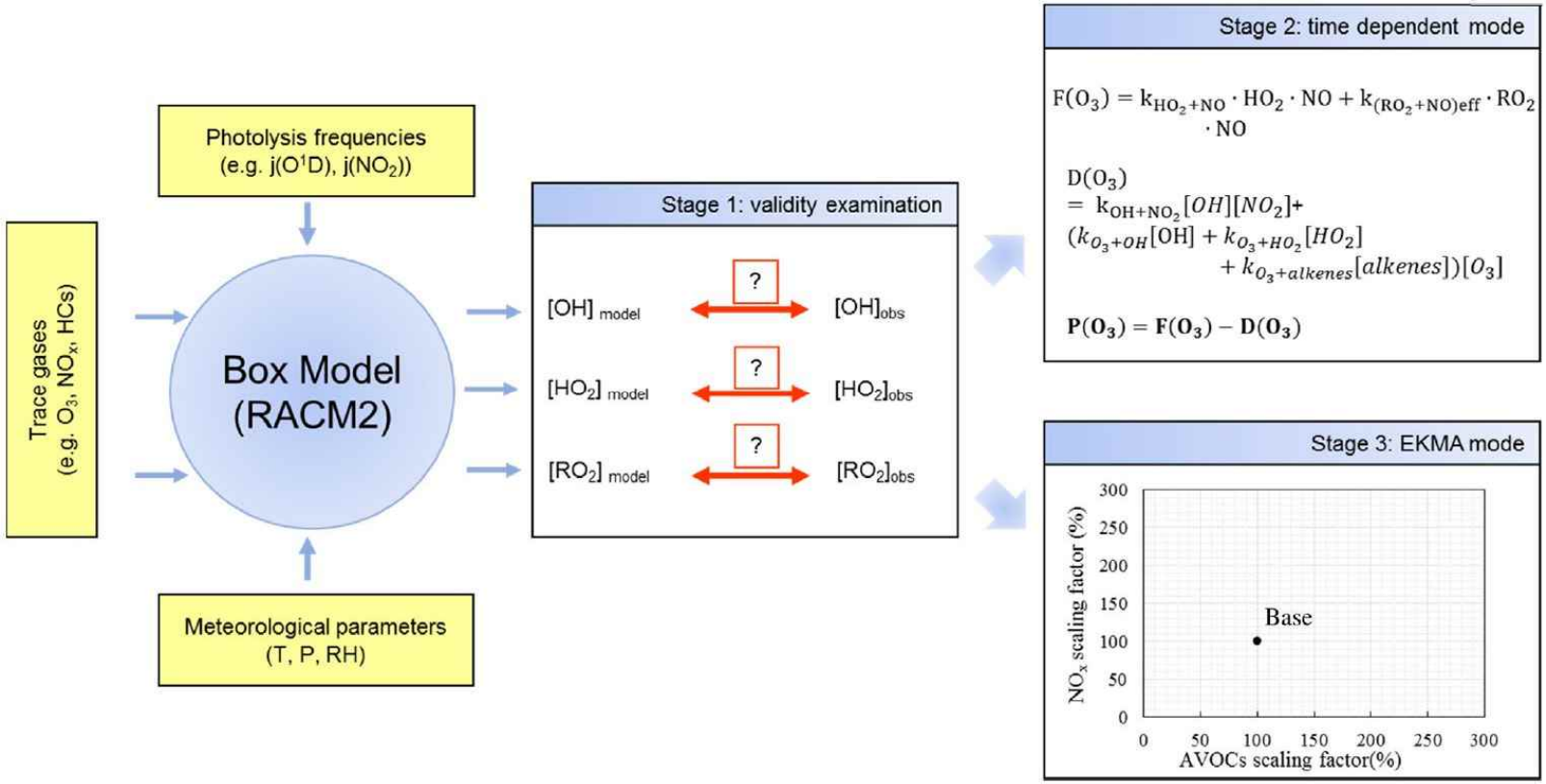
[Kim et al., 2016]



KORUS-AQ 기간 중 수도권 상층의 대기에서 거의 대부분 60 ppbv 이상의 오존이 존재함.

[Crawford et al., 2021]

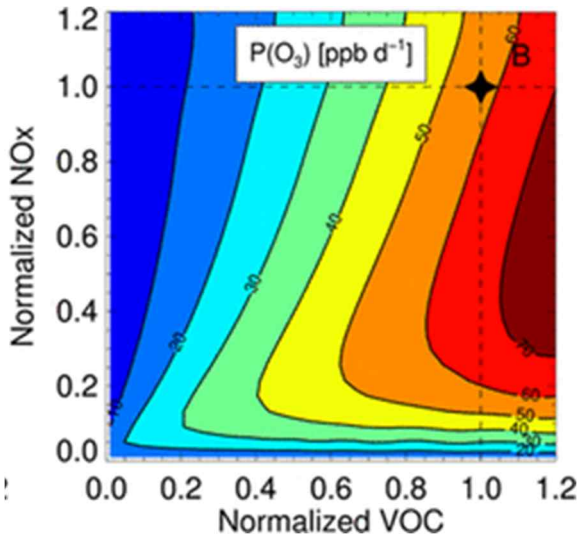
박스모델을 이용한 오존 농도 예측



[Lu et al., 2019]

오존 생성 민감도 평가

➢ Empirical Kinetics Modeling Approach (EKMA)



년 변화(%)		오존 생성 민감도
NOx Emission [−2.83±0.46 %/year]	Box model with KORUS-AQ Ground Observations and Assimilated Emissions	1.08±0.17 O_3 ppbv/year
f(NO_2/NOx) [3.065±0.484 %/year]		0.11±0.02 O_3 ppbv/year
VOCs emissions [−2.30 −11.22 %/year]		−0.94±0.38 O_3 ppbv/year
Reduction of surface area [−3.52±0.92 %/year]		0.24±0.06 O_3 ppbv/year
AOD change to photolysis [0.4±0.4 %/year]		−0.11±0.11 O_3 ppbv/year

[이강웅, 세미나 자료 2024]

오존과 오존 생성 전구물질 전주기 측정

오존 생성 전구물질

- 기 확립: HaPs, NO_x, CO, HONO, $ClNO_2$
- 확립 필요: Ozone precursor VOCs, HCHO

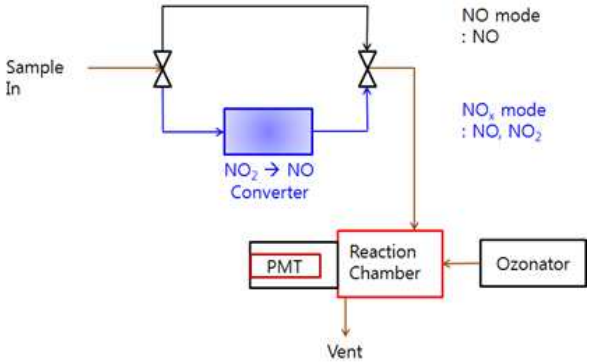
중간 생성물

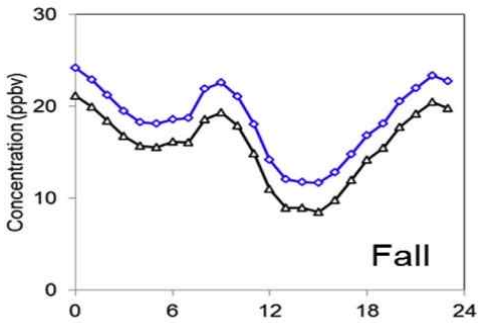
- 기 확립 :
- 확립 필요 : OH, HO_2, RO_2

최종 생성물

- 기 확립 : HNO_3, O_3
- 확립 필요 : H_2O_2, SOA

광분해 NO_2 측정기 개발





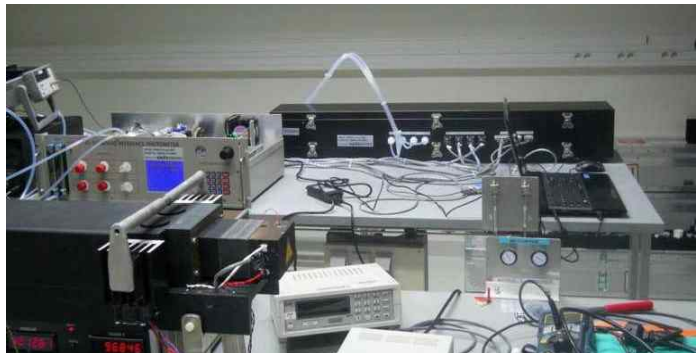
$NO_2 = NO_x - NO$

Molybdenum converter: NO_2, NO_z (HNO_3, N_2O_5, PAN 등)을 NO로 변환

Photolytic converter: NO_2만 NO로 변환

연평균 약 20.4 % 초과 측정됨을 규명 (대전지역 대기 기준) [Jung et al., 2017]

오존 기준기



- 국제도량형 사무국(BIPM)과의 국제비교를 통해 오존 측정 국내 표준 확립
- KTL, 환경공단 등에 2차 교정기관에 교정서비스를 통해 표준 국내 전파

환경공단 VOCs 측정망

유해대기측정망, PAHs 측정망

구분	서울			부산			대구			인천			광주		대전
측정소	한강대로	강남구	광진구	학장동	덕천동	연산동	대명동	만촌동	침산동	석모리	구월동	연희	농성동	하남동	구성동
	울산				세종		경기				강원				
	여천동	신정동	전하동	온산산단	아름동	신풍동	정왕동	안성	가산면	가평읍	방산면	석사동	옥천동	문막공단	
	충북			충남						전북					
	봉명동	오창산단	장안면	성황동	송산면	독곶리	배방읍	파도리	보령시	운암면	삼천동	소룡동			
	전남						경북				경남				제주
	여천동	신풍리	대포리	중동	신대리	대불	대송면	산동면	계림동	석포리	명서동	봉암동	죽도산단	옥포산단	서면	화북

유해대기측정항목: 1.Benzene 2.Toluene 3.Ethylbenzene 4.m,p-Xylene 5.Styrene 6.o-Xylene 7.Chloroform 8.Methylchloroform 9.Trichloroethylene 10.Tetrachloroethylene 11.1,1-Dichloroethane 12.Carbontetrachloride 13.1,3-Butadiene 14.Methylenechloride 15.Vinyl Chloride 16.1,2-Dichloroethane

PAHs 측정항목: 1.Benzo(a) anthracene 2.Chrysene 3.Benzo(b) fluoranthene 4.Benzo(k) fluoranthene 5.Dibenzo(a,h)anthracene 6.Indeno (1,2,3-cd)pyrene 7.Benzo[a]pyrene 8.Naphthalene 9.Acenaphthylene 10.Acenaphthene 11.Fluorene 12.Phenanthrene 13.Anthracene 14.Fluoranthene 15.Pyrene 16.Benzo(g,h,i)perylene

광화학오염물질측정망

구분	서울	인천		경기					부산				
측정소	은평구	강화군 석모리	남동구 구월동	양평 강하면	포천 관인면	부천 소사본동	광주 송정동	수원 신풍동	영도구 태종대	남구 대연동	진구 당감동	금정구 장전동	기장군 정관면
	경남	전남		대구									
	하동읍	여수 중흥동	광양 골약동	북구 산격동	남구 대명동								

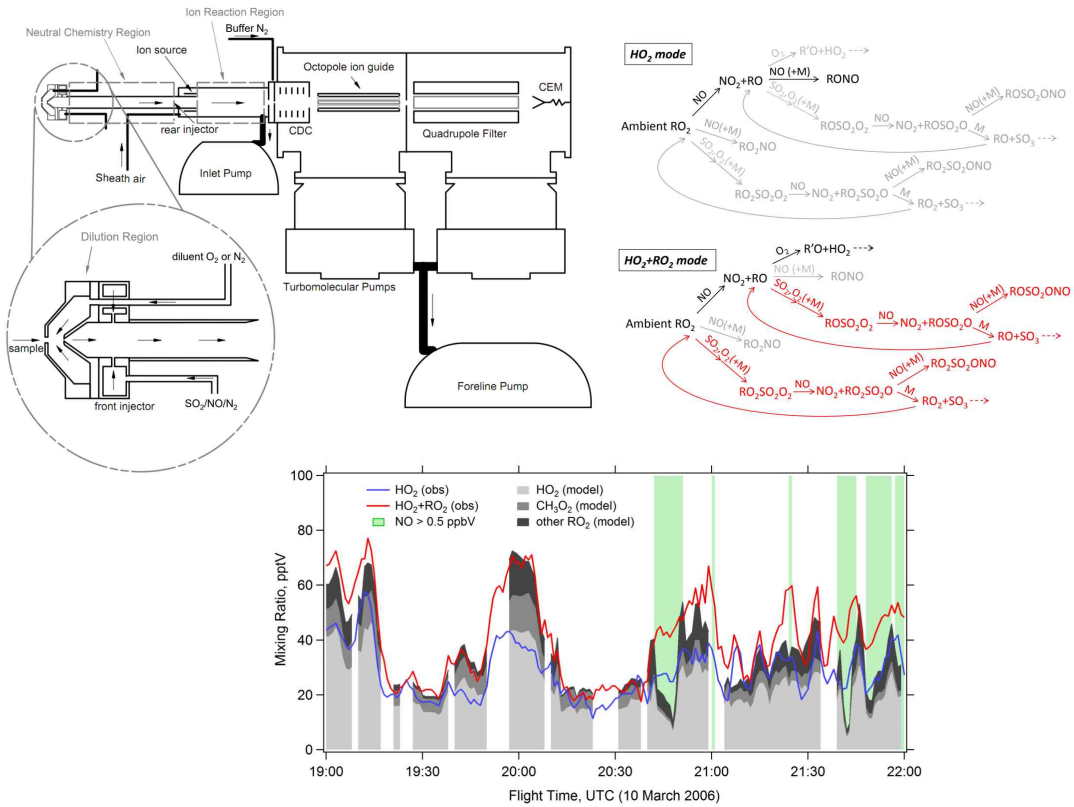
광화학오염물질 측정항목 (56종)

Ethane	Ethylene	Propane	Propylene	i-Butane	n-Butane	Acethylene	trans-2-Butene	1-Butene	cis-2-Butene	Cyclopentane	i-Pentane	n-Pentane	trans-2-Pentene
1-Pentene	cis-2-Pentene	2,2-Dimethylbutane	2,3-Dimethylbutane	2-Methylpentane	3-Methylpentane	Isoprene	1-Hexene	n-Hexane	Methylcyclopentane	2,4-Dimethylpentane	Benzene	Cyclohexane	2-Methylhexane
2,3-Dimethylpentane	3-Methylhexane	2,2,4-Trimethylpentane	n-Heptane	Methylcyclohexane	2,3,4-TriMethylpentane	Toluene	2-Methylheptane	3-Methylheptane	n-Octane	Ethylbenzene	m/p-Xylene	Styrene	o-Xylene
n-Nonane	Isopropylbenzene	n-Propylbenzene	m-Ethyltoluene	p-Ethyltoluene	1,3,5-Trimethylbenzene	o-Ethyltoluene	1,2,4-Trimethylbenzene	n-Decane	1,2,3-Trimethylbenzene	m-Diethylbenzene	p-Diethylbenzene	n-Undecane	n-Dodecane

OH, OH_2 라디칼 측정기법

method	group	limit of detection/ molecules cm^{-3} [b]	time response[e]	1σ uncertainty[c]
fluorescence assay by gas expansion (FAGE)	Leeds University, UK	1.4×10^5, SNR = 1, 2.5 min	30 s	35%
	Forschungszentrum Jülich, Germany	1.75×10^5, 80 s	40 s	10%
or	Pennsylvania State University, USA	1.4×10^5, SNR = 2, 30 s[g]	30 s	16%
laser-induced fluorescence (LIF) at low pressure	Portland State University, USA	1×10^6, 6 min	6 min	$\pm 10^6$ molecules cm^{-3}
	University of Tokyo, Japan (now at Frontier Research System for Global Change, Yokohama)	3.3×10^6, SNR = 2, 1 min (1.9×10^6 without solar scatter)	1 min	23%
	Nagoya University, Japan	7×10^5, SNR = 2, 1 min		
differential optical absorption spectroscopy (DOAS)	Forschungszentrum Jülich, Germany	1.5×10^6, 200 s	15 min	7%
	Johann Goethe University, Frankfurt, Germany[a]	4×10^5, SNR = 1, 1 min	4.5 min	$\pm 10^6$ molecules cm^{-3}
	NOAA, Fritz Peak, USA[a,h]	5×10^5, 1 min	10 min	30%
	Max Planck Institute fur Chemie, Mainz, Germany[a]	2×10^6, SNR = 2, 15 min		
chemical ionization mass spectrometry (CIMS)	NCAR, Boulder, USA[i]	$<1 \times 10^5$, SNR = 2, 5 min[g]	30 s	16%
	DWD, German Weather Service, Hohenpeissenberg, Germany	1.2×10^5, 5 min	30 s	20%
	Georgia Institute of Technology, USA			

Peroxy Radical Chemical Ionization Mass Spectrometry (PeRCIMS)

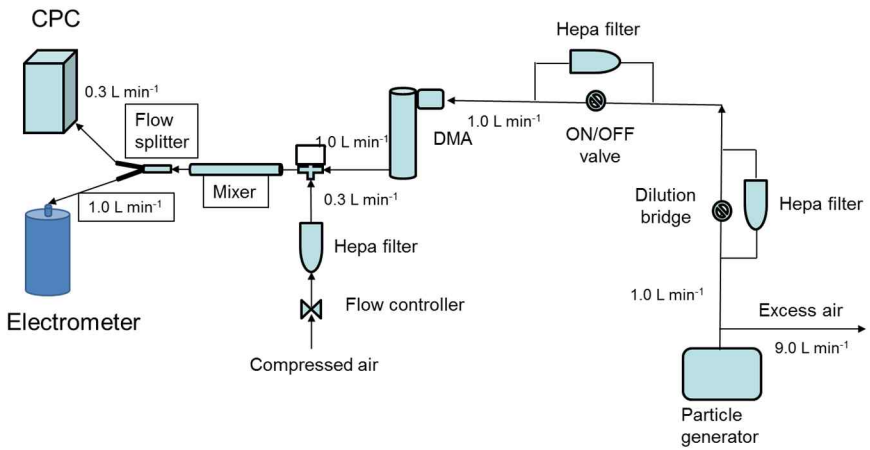


[Hornbrook et al, 2011]

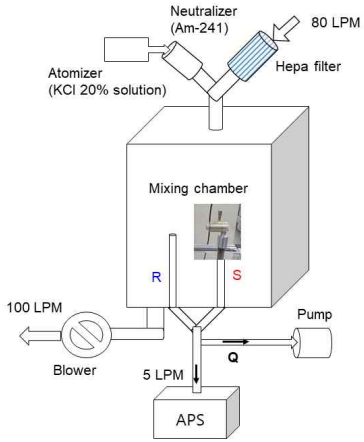
목 차

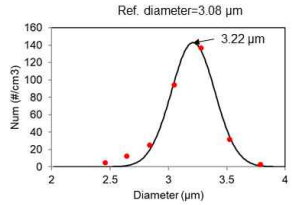
나노입자 수농도 측정기 및 입경분리장치 측정표준

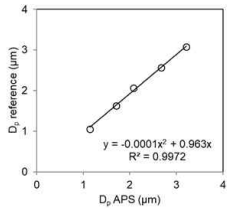
응측입자계수기(CPC) 교정 시스템 구성도



입경분립장치 성능평가

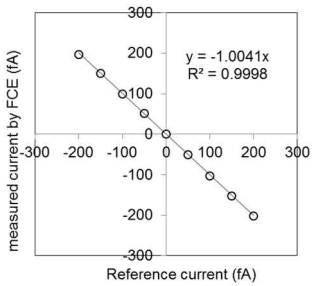




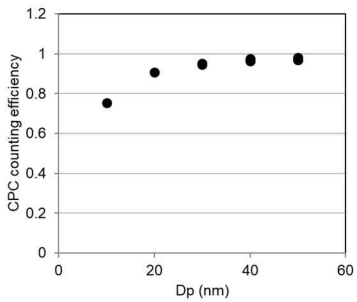


$$y = a + b\left[1 - \left[1 + \exp\left(\frac{\left(x + d\ln\left(2^{\frac{1}{e}} - 1\right) - c\right)}{d}\right)\right]^{-e}\right]$$

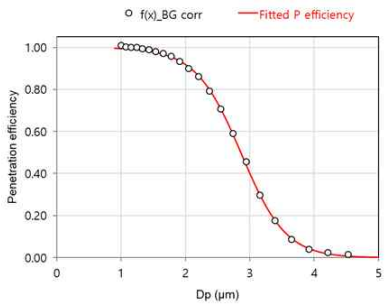
Electrometer 교정 예시

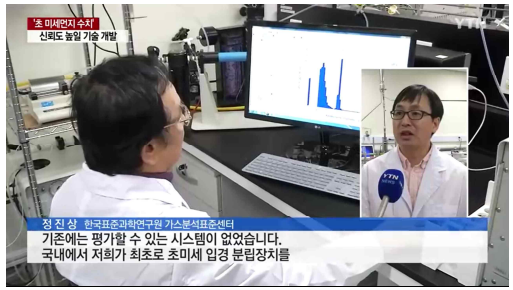


CPC 교정 예시



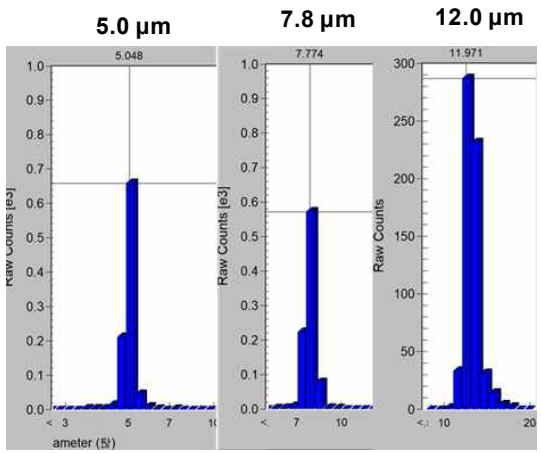
평가 결과 예시





마이크로미터 입자 입경 별 수농도 성능평가시스템 구축

마이크로미터 입자 교정 소급체계 확립



SI unit (s)

1. 시험검사

Frequency counter (s^{-1})

2. 비교 평가

Pulse Height Analyzer (PHA) (s^{-1})

Inkjet Aerosol Generator (IAG)

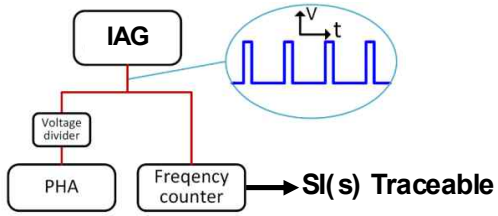
3. 동시 평가

Optical particle Counter (OPC)

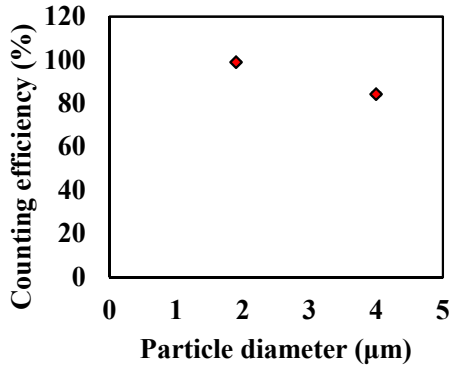
1. 기준기 **교정**

표준기 공급값 Standard Applied	피교정기 측정값 Instrument Measured	측정불확도 Measurement Uncertainty
20 Hz	20.000 045 Hz	0.000 014 Hz
50 Hz	50.000 123 Hz	0.000 035 Hz
100 Hz	100.000 245 Hz	0.000 070 Hz
200 Hz	200.000 49 Hz	0.000 14 Hz

2. 비교 평가

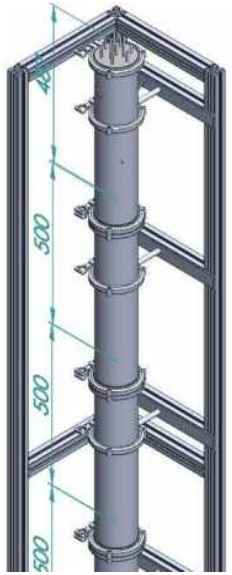


검사 대상 입자 카운터기의 입자 크기별 개수 효율



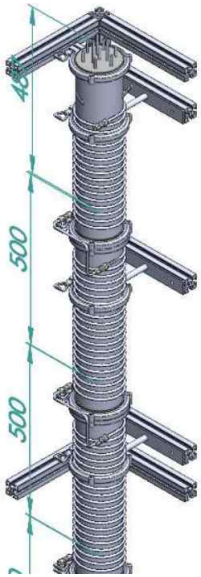
마이크로미터 입자 입경 별 수농도 성능평가시스템 구축

2023년 대기모사 챔버

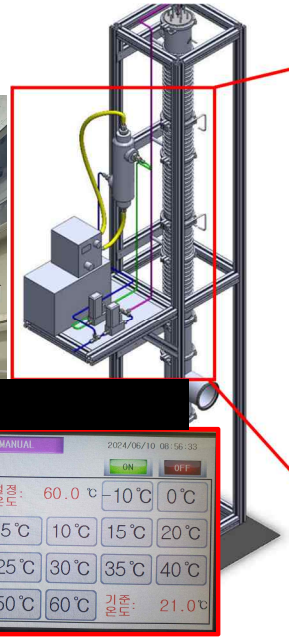


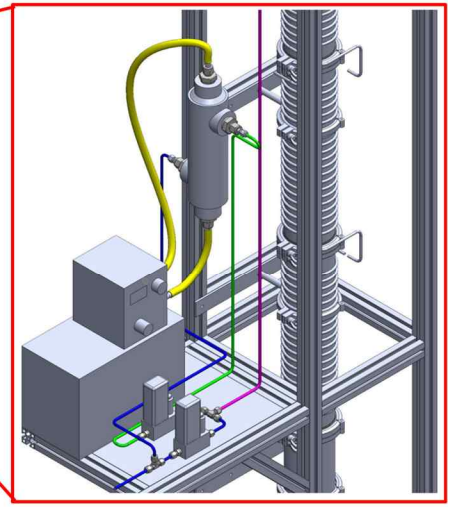
설계 변경

2024년 대기모사 챔버



습도컨트롤 모듈 설계 및 제작





▷ 공기 주입 경로 설계 변경 및 제작(-10~60 ℃, 20분 내 도달)

▷ 대기모사 에어로졸 챔버 온도 자동 제어 소프트웨어 개발 완료

▷ 습도 컨트롤(RH 5~80%) 설계 완료 및 제작 중

➔ 차년도에 다양한 종류의 대기 입자 모사 시스템 평가 예정

감사합니다!