대기측정분석을 통한 기여도 추정연구 세미나

Ⅰ 추진배경

○ 대기환경 정책추진에 따른 영향 예측과 대상 지역에 대한 기여도 분석을 위해 모델링이 활용되고 있음

○ 모델링은 측정분석에 비해 정확도가 불분명하지만, 장기적인 데이터 학습과 입력데이터의 신뢰도 향상을 통해 과거와 미래에 대한 영향분석이 가능함

○ 최근 안정동위원소와 역괘적분석을 통해 대상 지역에 대한 영향 연구가 수행중에 있으나 아직까지 국내 여건상 전문가가 부족한 상황임

○ 이에 관련 분야 연구자간의 교류를 통해 인적 네트워크 구축 및 결과분석을 통한 데이터 신뢰성 향상을 추진하고자 함

Ⅱ 추진목적

○ 각 기관별 연구분야 공유 및 정보 교류

○ 측정분석시 애로사항 공유 및 개선방안 도출

Ⅲ 기대효과

○ 대기환경관련 인적 네트워크 구축

○ 각 분야 데이터를 활용한 연구 결과 활용성 증대

○ 도출된 결과를 활용한 대기오염 기여도 추정

Ⅳ 행사개요

○ 대기측정분석을 통한 기여도 추정연구 세미나

○ 일시 : 2021년 10월 14일 (목) 13:30 ~ 16:20

- 각 연사별 발표 30분, 질의응답 10분

○ 주관 : 충남연구원 서해안기후환경연구소

○ 참여 : 고려대 지구환경과학과, 한국원자력연구원

○ 장소 : 충남연구원 서해안기후환경연구소 (충남 홍성군 홍북읍 홍예로 360)

○ 참석인원 : 이상신 연구소장 외 7명

Ⅴ 세부일정

시 간	내 용	
10월 14일 (목)		
13:30~13:35(5`)	참석자 소개	김종범 (책임연구원)
13:35~13:40(5`)	환영사	이상신 (연구소장)
13:40~14:20(40`)	화력발전소 주변 지역 안정동위원소를 활용한 기여도 추정 연구	윤수향 (연구원)
14:20~15:00(40`)	미세먼지 내 방사성 물질 연구	김지석 (선임연구원)
15:00~15:10(10`)	휴식	
15:10~15:50(40`)	Contribution of fossil fuel sources to $PM_{2.5}$ in Seoul constrained by carbon, nitrogen, and oxygen isotopic ratios	이미혜 (교수)
15:50~16:20(30`)	종합 토의 / 정리 및 폐회	김종범 (책임연구원)

【별첨 1】

참석자 명단 (8명)

소 속	직 위	성 함	비고
충남연구원 (6)	연구소장	이상신	
	책임연구원	김종범	
	연구원	최영남	
	연구원	윤수향	
	연구원	이선엽	
	연구원	조민철	
고려대(1)	교수	이미혜	
한국원자력연구원 (1)	책임연구원	김지석	

대기측정분석을 통한 기여도 추정연구 세미나

화력발전소 주변 지역 안정동위원소를 활용한 기여도 추정 연구

2021. 10. 14.

충남연구원 윤수향

연구추진 로드맵

대기오염물질 기원과 기여도 추정

	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
(대상범위)	발전소 소재지 4개 지점	당진시 2개 지점 (시범조사)	발전소 소재지 4개 지점 (2km, 5km, 10km, 20km 지역특성 고려)		서천군 4개 지점 (발전소 영향 규명)
(측정방식)	1회	4회(연차별) 모델 입력값, 상관관계 분석 등을 위한 기초자료로 활용			
(방법론)	대기 원소함량 분석 (C, N, S)	대기 동위원소 분석 (C, Pb)	대기+강우 분석(동위원소비, 중금속, 음이온) +모델링(PSCF 등) 4차년도 : 굴뚝, 석탄(원료), 석탄재 분석 추가		
(결과활용)	안정동위원소 분석 가능여부 파악	대상지역(측정지점) 외부 유입 대기오염물질의 상대적 기·원기여도, 강하물질의 영향 규명 2차년도 : 기·원기여도 추정, 3~5차년도 : 기·원기여도, 강하+확산 영향 추정			

정책 활용 : 발전소의 대기오염 기여도와 확산에 따른 영향 규명을 위한 근거자료로 활용

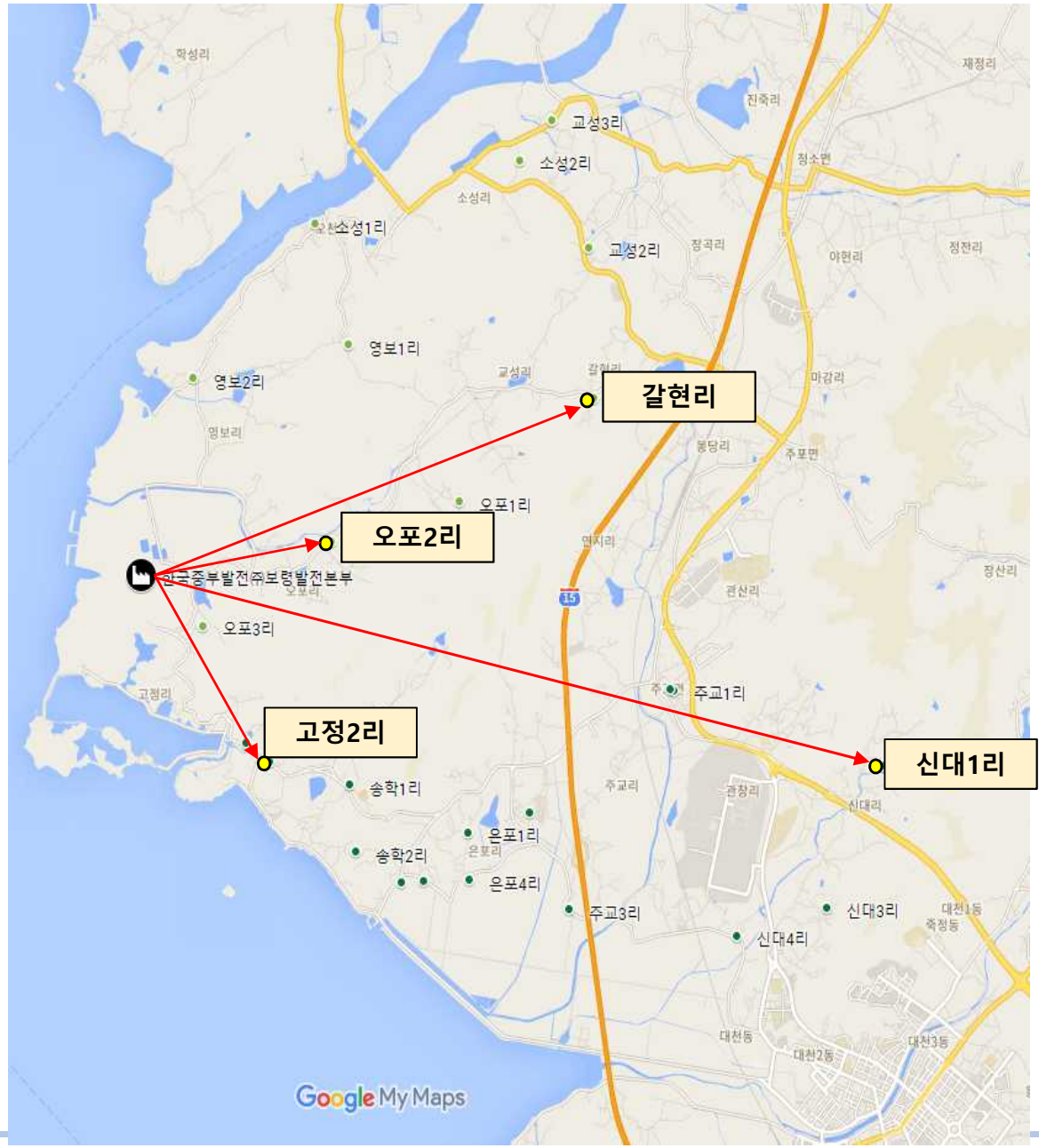
연구대상지(1/4)

충청남도 보령시

□ 측정지점의 TM좌표와 화력발전소로부터의 이격거리

구분	TMx(N)	TMy(E)	화력발전소 인접도	
			거리(km)	방향
고정2리	420932.374677	155813.654275	2.3	남동
오포2리	423226.488261	156876.767922	2.4	북동
갈현리	424852.398194	160174.011602	6.0	북동
신대1리	420636.300230	163791.774737	9.5	남동

□ 측정지점 현황



연구대상지(2/4)

충청남도 당진시

□ 측정지점의 TM좌표와 화력발전소로부터의 이격거리

구분	TMx(N)	TMy(E)	화력발전소 인접도	
			거리(km)	방향
교로3리	494501.039274	156582.303396	0.3	남동
삼봉2리	490435.761234	159885.712183	5.6	남동
대촌리	482206.911176	163289.729263	14.3	남동
시청사	476871.353075	168172.703004	21.4	남동

□ 측정지점 현황

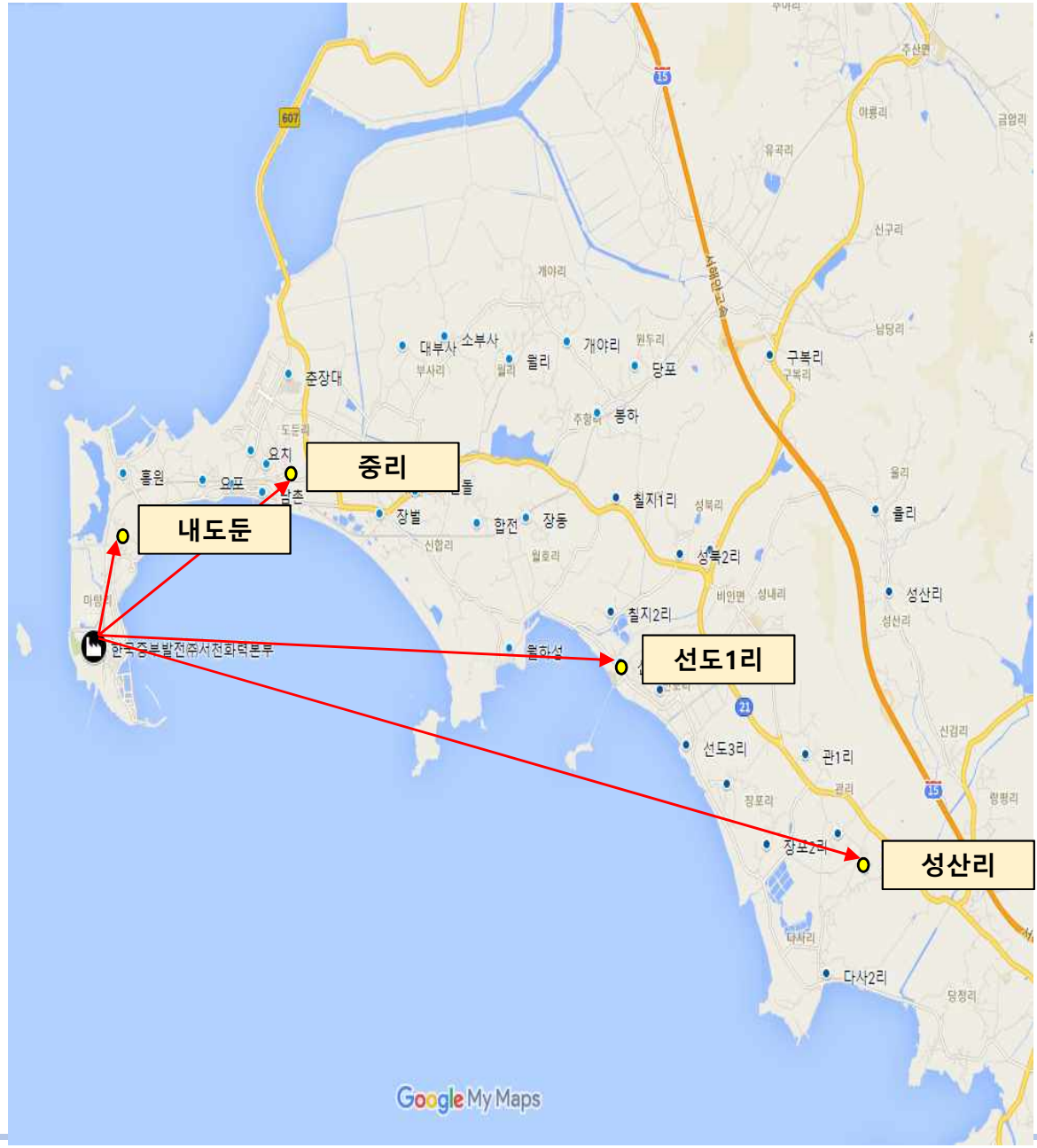
연구대상지(3/4)

충청남도 서천군

□ 측정지점의 TM좌표와 화력발전소로부터의 이격거리

구분	TMx(N)	TMy(E)	화력발전소 인접도	
			거리(km)	방향
내도둔	394559.360799	155052.461077	1.3	동
중리	395438.138407	157001.899660	3.3	북동
선도1리	393132.207903	162214.398268	7.8	북동
성산리	393944.387952	166187.729110	11.7	북동

□ 측정지점 현황



연구대상지(4/4)

충청남도 태안군

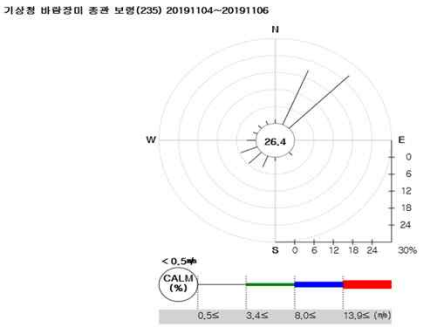
□ 측정지점의 TM좌표와 화력발전소로부터의 이격거리

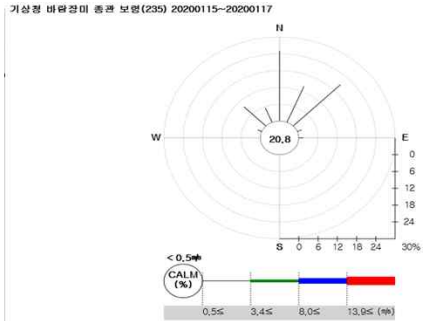
구분	TMx(N)	TMy(E)	화력발전소 인접도	
			거리(km)	방향
방갈2리	477914.174181	129217.315149	2.2	남서
포지2리	474146.764451	135006.283462	5.8	남동
마산1리	470876.809079	134888.447668	8.5	남동
양산2리	464343.322518	133810.234150	14.5	남동

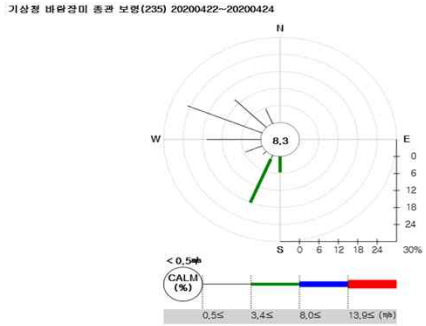
□ 측정지점 현황

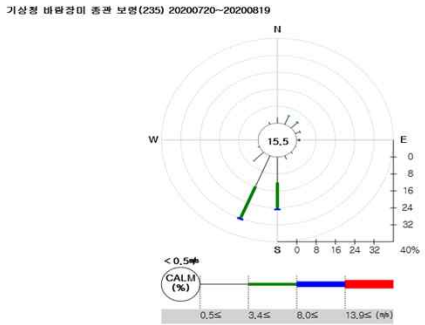
기상분석(1/4)

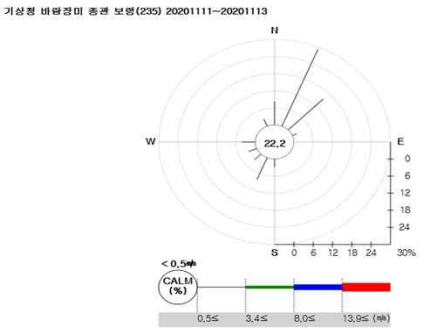
지점	측정기간	기온(℃)			일강수량 (mm)	최대 순간 풍속 (m/s)	평균풍속 (m/s)	최대 순간 풍속 풍향(deg)
		평균	최저	최고				
보령시	2019.11.04.~11.06.(가을)	12.3	8.4	18.8	0.0	4.6	0.9	210(SW)
	2020.01.15.~01.17.(겨울)	0.1	-3.1	4.6	0.0	5.3	1.1	346.7(NNW)
	2020.04.22.~04.24.(봄)	9.1	5.3	12.7	0.0	8.6	2.3	273.3(WNW)
	2020.08.18.~08.20.(여름)	25.4	22.1	30.0	0.0	4.7	0.7	193.3(SSW)
	2020.11.11.~11.13.(가을)	10.1	4.9	17.0	0.0	4.3	0.8	256.7(W)
	2021.01.13.~01.15.(겨울)	4.9	-1.2	10.0	0.0	8.1	2.1	173.3(S)
	2021.04.07.~04.09.(봄)	10.7	3.6	17.4	0.0	5.3	0.8	246.7(WSW)
	2021.06.21.~06.23.(여름)	21.5	18.2	26.0	0.6	6.0	1.1	220(SW)

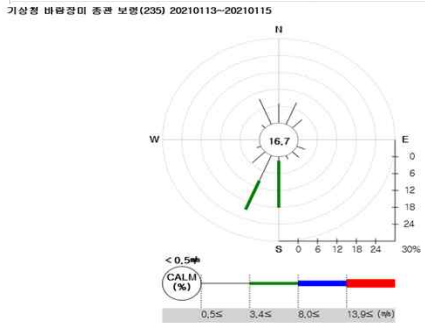


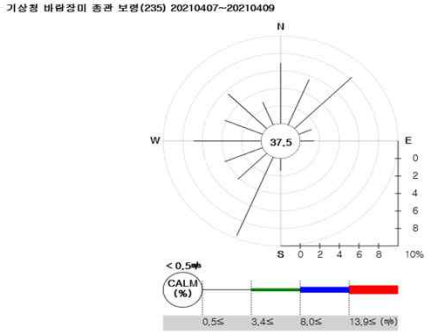


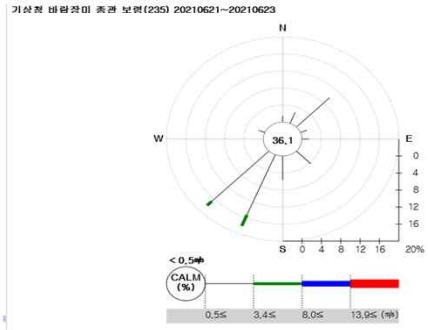






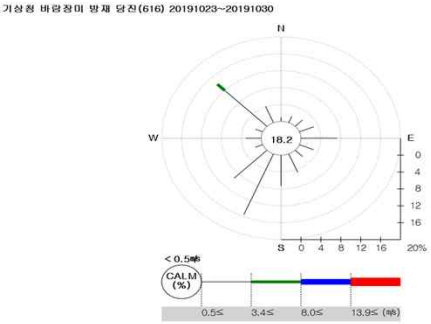


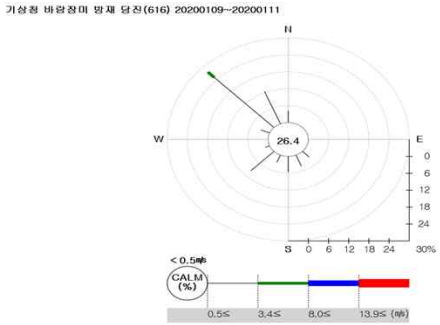


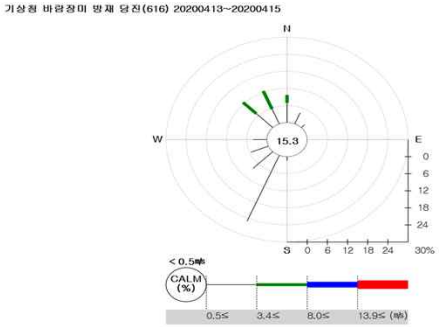


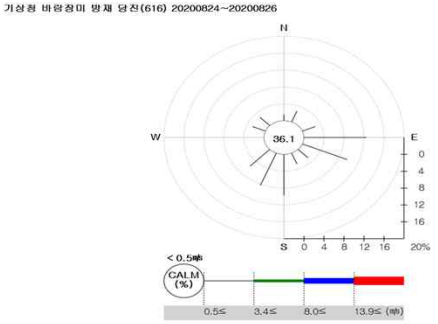
기상분석(2/4)

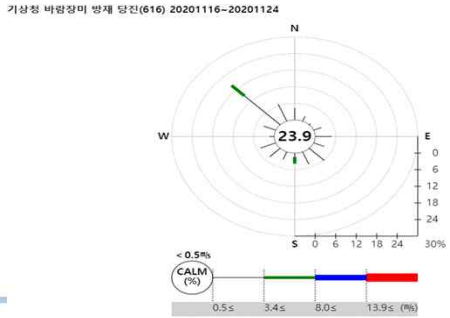
지점	측정기간	기온(℃)			일강수량 (mm)	최대 순간 풍속 (m/s)	평균풍속 (m/s)	최대 순간 풍속 풍향(deg)
		평균	최저	최고				
당진시	2019.10.23.~10.24. / 2019.10.29.30.(가을)	13.7	8.9	19.4	0.9	5.7	1.1	205.3(SW)
	2020.01.09.~01.11.(겨울)	-0.4	-4.0	3.8	0.0	5.1	1.3	200.6(SSW)
	2020.04.13.~04.15.(봄)	11.1	4.6	18.5	0.0	7.0	2.0	327.2(NNW)
	2020.08.24.~08.26.(여름)	27.5	22.7	33.3	0.7	6.0	1.1	183.7(SSW)
	2020.11.16.~11.17.(가을)	7.4	2.5	12.7	0.6	4.5	1.0	141.4(SSE)
	2021.01.25.~01.28.(겨울)	1.9	-2.6	7.3	1.3	7.6	2.1	258.8(W)
	2021.04.14.~04.16.(봄)	9.1	3.4	15.2	0.0	6.8	1.6	284(WNW)
	2021.06.30.~07.02.(여름)	24.0	19.1	30.2	0.0	4.6	0.9	129.4(SE)

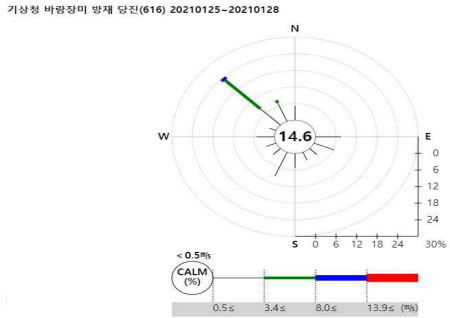


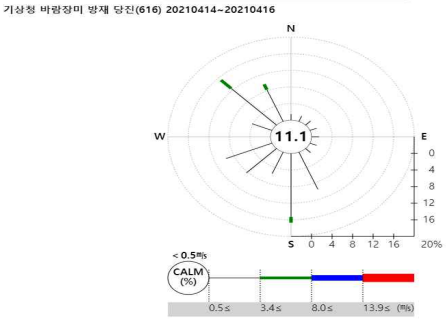


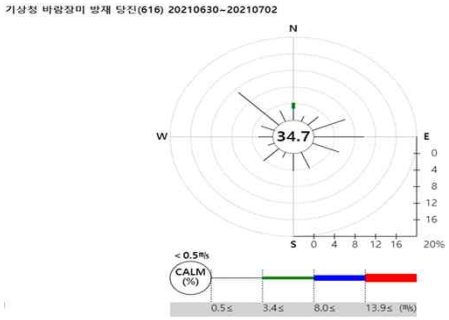






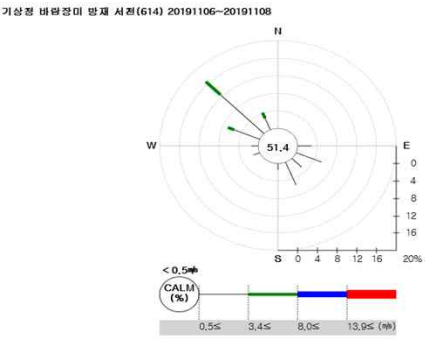


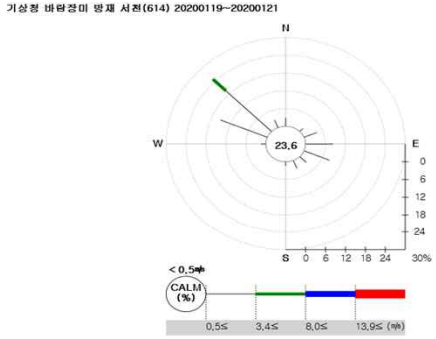


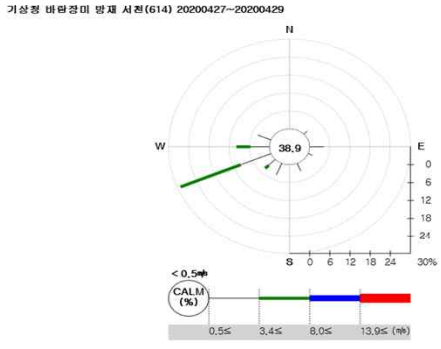


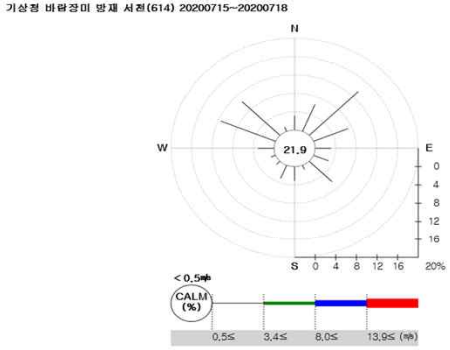
기상분석(3/4)

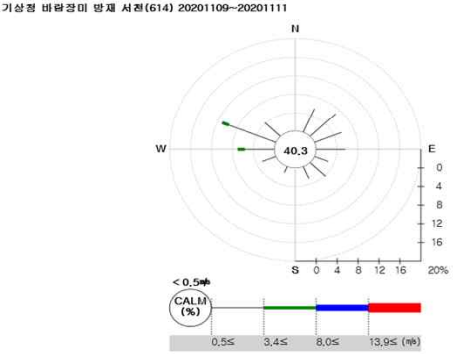
지점	측정기간	기온(℃)			일강수량 (mm)	최대 순간 풍속 (m/s)	평균풍속 (m/s)	최대 순간 풍속 풍향(deg)
		평균	최저	최고				
서천군	2019.11.06.~11.08. (가을)	8.7	2.1	16.7	0.0	7.5	1.0	297.2(NW)
	2020.01.19.~01.21. (겨울)	2.9	-2.6	8.5	0.0	7.6	1.5	202.5(SSW)
	2020.04.27.~04.29. (봄)	11.0	1.9	18.4	0.0	8.6	1.8	239.1(WSW)
	2020.07.15.~07.18. (여름)	23.1	20.0	27.4	1.8	5.5	1.3	298.1(NW)
	2020.11.09.~11.11. (가을)	12.0	5.7	18.1	0.6	6.2	1.2	292.5(WNW)
	2021.01.11.~01.13. (겨울)	-3.2	-11.0	3.2	0.2	7.3	1.2	155.6(SSE)
	2021.04.05.~04.07. (봄)	10.5	2.4	17.1	0.0	6.7	1.5	244.7(WSW)
	2021.06.16.~06.18. (여름)	20.4	19.4	22.3	5.0	7.7	1.7	247.5(WSW)

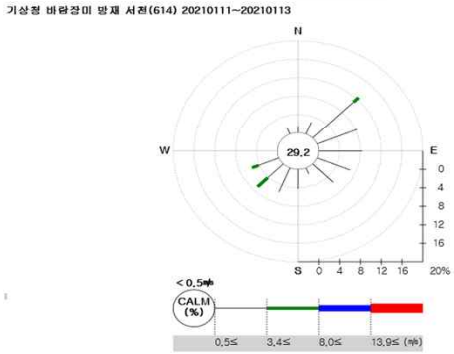


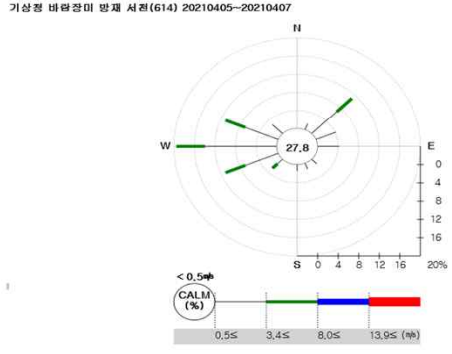


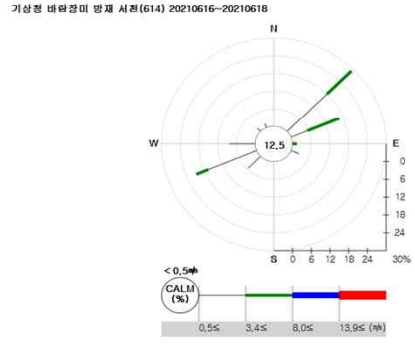








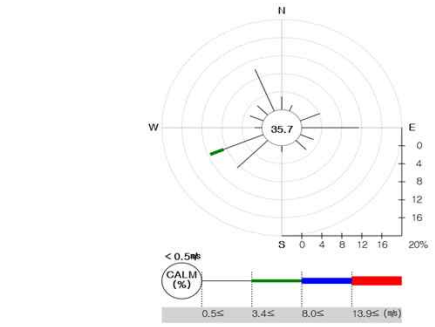




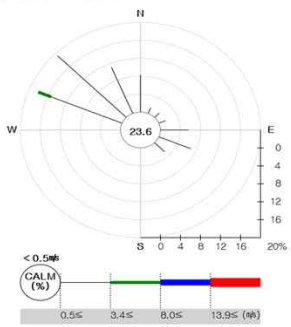
기상분석(4/4)

지점	측정기간	기온(℃)			일강수량 (mm)	최대 순간 풍속 (m/s)	평균풍속 (m/s)	최대 순간 풍속 풍향(deg)
		평균	최저	최고				
태안군	2019.10.30.~11.01.(가을)	13.8	8.6	19.1	0.0	6.7	1.1	274.6(WNW)
	2020.01.13.~01.15.(겨울)	-0.6	-3.5	2.4	0.0	6.6	1.3	334(NNW)
	2020.04.20.~04.22.(봄)	7.9	5.2	10.7	0.2	12.5	3.2	270.2(WNW)
	2020.08.31.~09.02.(여름)	25.6	23.2	29.3	11.0	8.5	1.5	266.4(W)
	2020.11.24.~11.26.(가을)	5.9	2.1	10.4	0.0	5.8	1.1	232.7(WSW)
	2021.01.19.~01.21.(겨울)	0.6	-5.0	5.3	4.3	5.6	1.0	181(SSW)
	2021.04.19.~04.21.(봄)	13.5	6.8	21.3	0.0	6.5	1.5	230.5(WSW)
	2021.06.28.~06.30.(여름)	23.3	19.7	28.6	2.5	6.1	1.3	272.9(WNW)

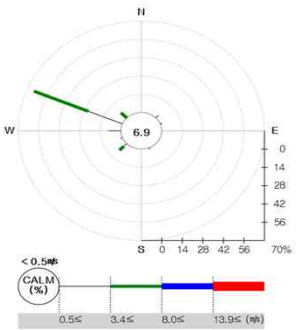
기상청 바람장미 방재 태안(627) 20191030~20191101



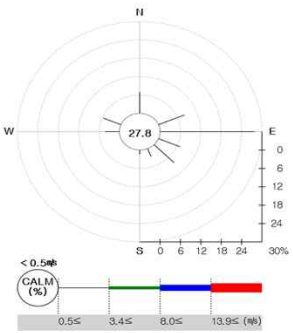
기상청 바람장미 방재 태안(627) 20200113~20200115



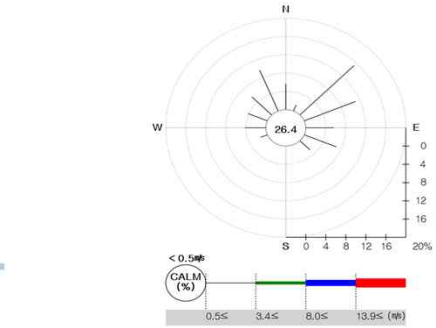
기상청 바람장미 방재 태안(627) 20200420~20200422



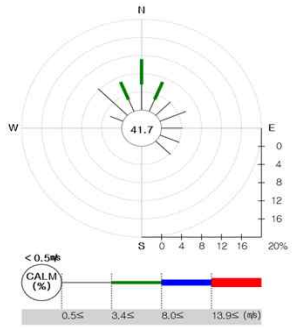
기상청 바람장미 방재 태안(627) 20210119~20210121



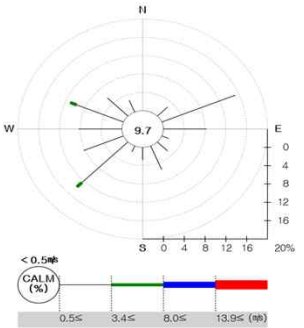
기상청 바람장미 방재 태안(627) 20201124~20201126



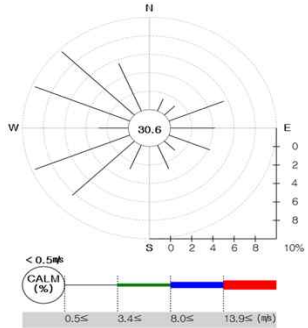
기상청 바람장미 방재 태안(627) 20200831~20200902



기상청 바람장미 방재 태안(627) 20210419~20210421



기상청 바람장미 방재 태안(627) 20210628~20210630



라이브러리 구축(탄소 안정동위원소)

- 당진시 대기오염물질 기원 파악을 위한 탄소 동위원소비 라이브러리 DB 구축
- "미세먼지, 초미세먼지 기원 추적에 적합"(측정값과 매칭 → 국가/지역적 오염, 발생원 추정)

국가	지역	구분	계절	$d^{13}C$	출처
뉴질랜드	Mount Victoria tunnel	자동차 배기가스		-25.9±0.8	S. Dai. (2015)
멕시코	멕시코시티	도로분진	봄~가을	-21±0.2	S. Dai. (2015)
멕시코	central Camionera del Norte	디젤차량 연소	봄	-24.6±0.3	S. Dai. (2015)
멕시코	tunnel of Avenida Chapultepec	가솔린차량 연소	봄	-25.5±0.1	S. Dai. (2015)
브라질	tunnel of Rio de Janeirol	자동차 배기가스	봄	-25.4	S. Dai. (2015)
브라질	tunnel of Rio de Janeirol	자동차 배기가스	봄	-24.8	S. Dai. (2015)
캐나다	Cassier tunnel	자동차 배기가스		-27.1	S. Dai. (2015)
캐나다	Cassier tunnel	자동차 배기가스		-26.9	S. Dai. (2015)
프랑스	파리	석탄연소	봄~가을	-23.9±0.5	S. Dai. (2015)
프랑스	파리	연료유(중유)연소	봄~가을	-26.0±0.5	S. Dai. (2015)
중국	베이징		여름	-26.9	J. Cao et al (2011)
중국	홍콩	자동차	겨울	-26.62	NIER (2016), NIER (2015a), NIER (2013)
중국	베이징		여름	-26.62	J. Cao et al (2011)
중국	베이징	석탄+자동차	겨울	-25.14	NIER (2016), NIER (2015a), NIER (2013)
중국	장춘		겨울	-23.27	J. Cao et al (2011)
중국	장춘	석탄연소	겨울	-23.13	NIER (2016), NIER (2015a), NIER (2013)
중국	장춘		겨울	-23.08	J. Cao et al (2011)
중국	Zhujiang tunnel	자동차 배기가스	여름	-25.0±0.3	S. Dai. (2015)

라이브러리 구축(탄소 안정동위원소)

구분	$d^{13}C$	출처	구분	$d^{13}C$	출처
C3식물	-28.9~ -23.8	NIER (2015c)	C4식물(옥수수)	-16.1	Kawashima and Haneishi (2012)
C3식물	-32.0~ -29.0	J. Cao et al (2011)	C4식물(잔디)	-19.3	Kawashima and Haneishi (2012)
C3식물 (Potherb mustard)	-32.1	Kawashima and Haneishi (2012)	꽃가루	-28	park HW (2017)
C3식물(대두)	-28.8	Kawashima and Haneishi (2012)	느티나무연소	-31.1	NIER (2015c)
C3식물(로즈마리)	-31.7	Kawashima and Haneishi (2012)	바이오매스 연소 (C3식물)	-32~-20	NIER (2016)
C3식물(마른잎)	-29.4	Kawashima and Haneishi (2012)	바이오매스 연소 (C4식물)	-17~-9	NIER (2016)
C3식물(몬트부레치아)	-32.3	Kawashima and Haneishi (2012)	바이오매스 연소 (농작물)	-28.14~ -27.12	NIER (2015c)
C3식물(벼)	-28.0±0.1	Kawashima and Haneishi (2012)	바이오매스 연소 (목재류)	-31.08~ -27.21	NIER (2015c)
C3식물(수박)	-29.4	Kawashima and Haneishi (2012)	볏짚 연소	-27.1	NIER (2015c)
C3식물(오이)	-29.2	Kawashima and Haneishi (2012)	생잣나무가지 연소	-28.1	NIER (2015c)
C3식물(카모마일)	-34.7	Kawashima and Haneishi (2012)	생잣나무가지 침엽 연소	-30.1	NIER (2015c)
C3식물(해바라기)	-30.7	Kawashima and Haneishi (2012)	은행잎 연소	-29.3	NIER (2015c)
C4식물	-13.5~ -11.5	J. Cao et al (2011)	잣나무잎 연소	-27.2	NIER (2015c)
			콩가지 연소	-28.1	NIER (2015c)

라이브러리 구축(납 동위원소)

- 당진시 대기오염물질 기원 파악을 위한 납 동위원소비 라이브러리 DB 구축
- "석탄, 비철금속 제련에 의한 오염원 추적에 적합"(측정값과 매칭 → 국가/지역적 오염, 발생원 추정)

국가	구분	$^{206}Pb/^{207}Pb$	출처
러시아	러시아산 유연탄	1.181	NIER (2014b)
미국	미국산 유연탄	1.18	NIER (2014b)
미국	석탄화력발전시설 유연탄	1.18	NIER (2013a)
인도네시아	석탄화력발전시설 유연탄	1.19	NIER (2013a)
인도네시아	인도네시아산 유연탄	1.19	NIER (2014b)
일본	강우	1.158	NIER (2014a), NIER (2013a)
중남미	납 광상	1.175~1.206	NIER (2013b)
호주	납 광상	1.03~1.10	NIER (2013b)
호주	석탄화력발전시설 유연탄	1.19	NIER (2013a)
호주	호주산 유연탄	1.19	NIER (2014b)

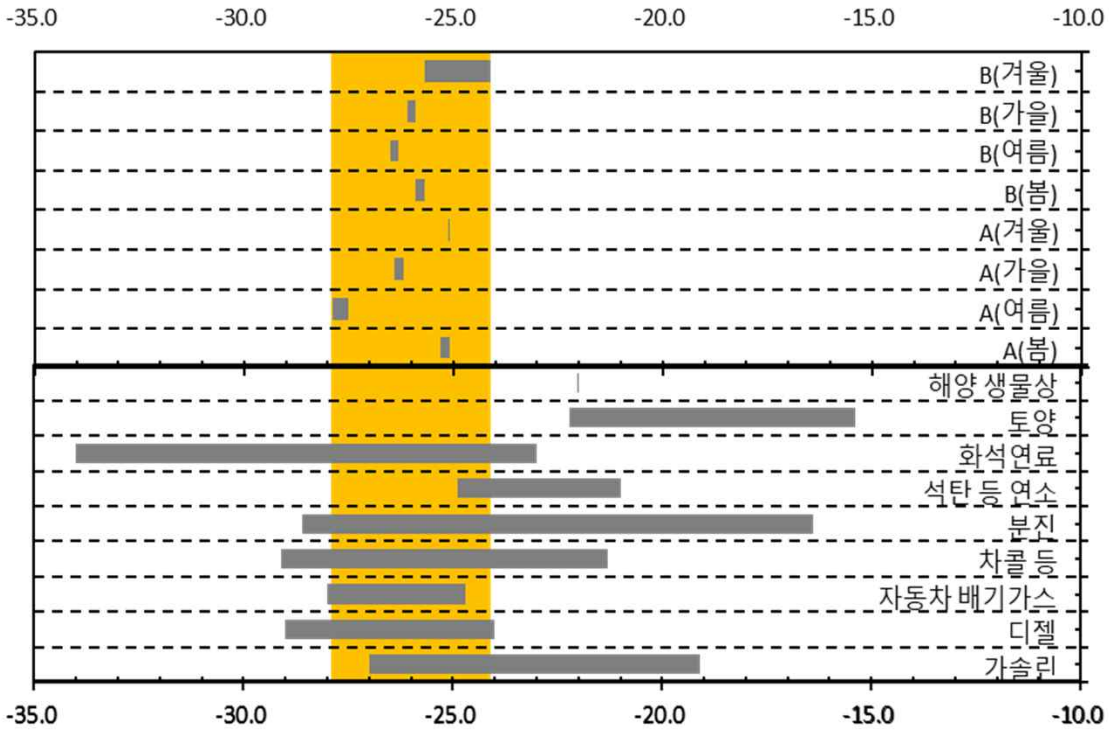
라이브러리 구축(납 동위원소)

국가	지역	구분	$^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{208}Pb/^{206}Pb$	$^{206}Pb/^{207}Pb$	출처
한국	포항시	제철산업단지(Clinker+P/C)	18.543±0.192	0.8530±0.0021	2.0890±0.0059		조완근 등 (2011)
한국	포항시	제철산업단지(Coal)	18.765±0.197	0.8471±0.0025	0.8471±0.0025		조완근 등 (2011)
한국	포항시	제철산업단지(EAFD Ferroalloy)	16.138±0.166	0.8532±0.0021	1.9701±0.0089		조완근 등 (2011)
한국	포항시	제철산업단지(EAFD Iron)	16.358±0.143	0.832±0.0031	1.9510±0.0047		조완근 등 (2011)
한국	포항시	제철산업단지(Iron Dust)	18.196±0.169	0.8691±0.0017	2.1182±0.0112		조완근 등 (2011)
한국	포항시	제철산업단지(Slag Cement)	18.364±0.157	0.8620±0.0024	2.1062±0.0127		조완근 등 (2011)
한국	포항시	제철산업단지(Slag)	18.177±0.114	0.8691±0.0018	2.1222±0.0096		조완근 등 (2011)
한국	포항시	제철산업단지(TAS)	17.823±0.174	0.8752±0.0027	2.1352±0.0072		조완근 등 (2011)
한국		축산단지(토양)		0.843~0.856			NIER (2015b)
한국		축산분뇨 처리시설($PM_{2.5}$)		0.854~0.858			NIER (2015b)
한국		터널($PM_{2.5}$)				1.160±0.004	NIER (2014b)
한국		톨게이트($PM_{2.5}$)				1.163±0.015	NIER (2014b)
한국	남인천TG					1.137~1.176	NIER (2015b)
한국	남산3호터널					1.153~1.164	NIER (2015b)
한국	홍지문터널					1.156~1.166	NIER (2015b)

탄소 동위원소 분석결과

대기오염물질 기원과 기여도 추정(보령시-국내)

- 실측치(대기)와 라이브러리(이동오염원,) 매칭
- 이동오염원 배기가스(가솔린, 디젤), 화력발전소 기인 비산재 또는 석탄연소 등의 기원으로 추정



□ 보령시

- 배기가스(가솔린, 디젤), 중유 연소, 베이징(석탄+차량), Zhujiang tunnel, 벽난로 숯, 차콜연소
- 일본 유리혼조 시(벽난로 숯), 아키타현(가을철 SPM)
- 보령화력 인근 1km, 20km의 PM-2.5, 화력발전 비산재

□ 당진시

- 배기가스(가솔린, 디젤), 베이징(석탄+차량), 벽난로 숯, 석탄연소, 차콜연소, 화석연료(액체)
- 일본 유리혼조 시(벽난로 숯), 아키타현(가을철 SPM)
- 태안 파도리, 보령화력 인근 1km, 20km의 PM-2.5, 화력발전 비산재, 볏짚연소, 잣나무잎 연소

□ 서천군

- 배기가스(가솔린, 디젤), 굴뚝먼지, 석탄연소, 갈탄연소
- 일본 유리혼조 시(벽난로 숯), 아키타현(가을철 SPM)
- 태안 파도리(가을), 보령화력 인근 20km의 PM-2.5, 화력발전 비산재

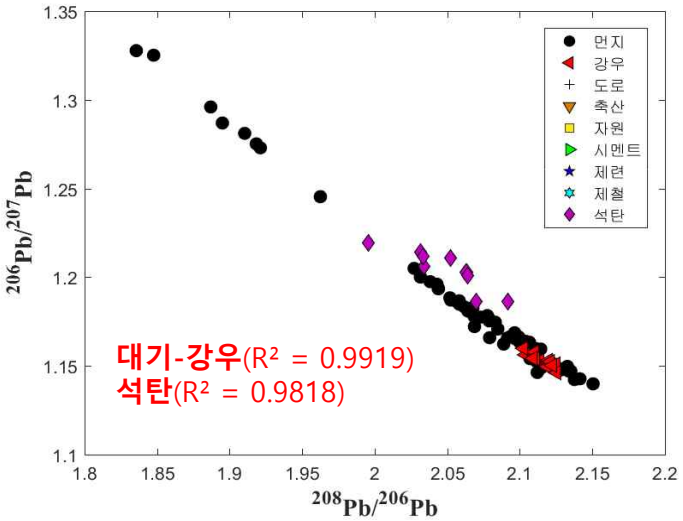
□ 태안군

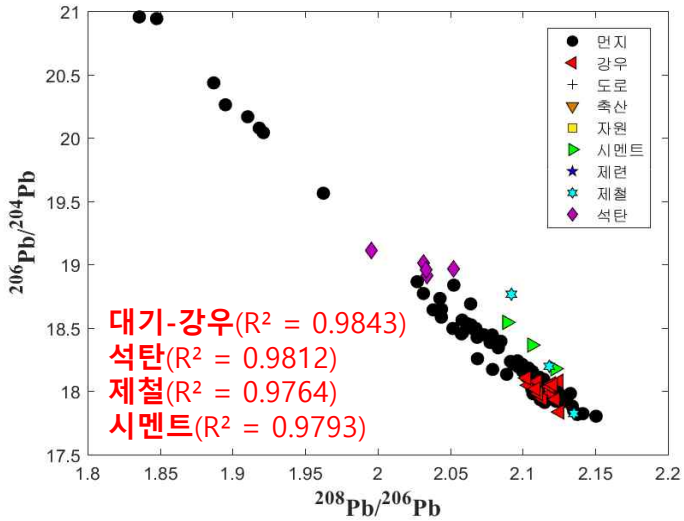
- 배기가스(가솔린, 디젤), 베이징(석탄+차량), Zhujiang tunnel, 갈탄, 굴뚝먼지, 석탄연소
- 아키타현(가을철 SPM, PM-2.5)
- 태안 파도리, 보령화력 인근 1km, 20km의 PM-2.5, 화력발전 비산재

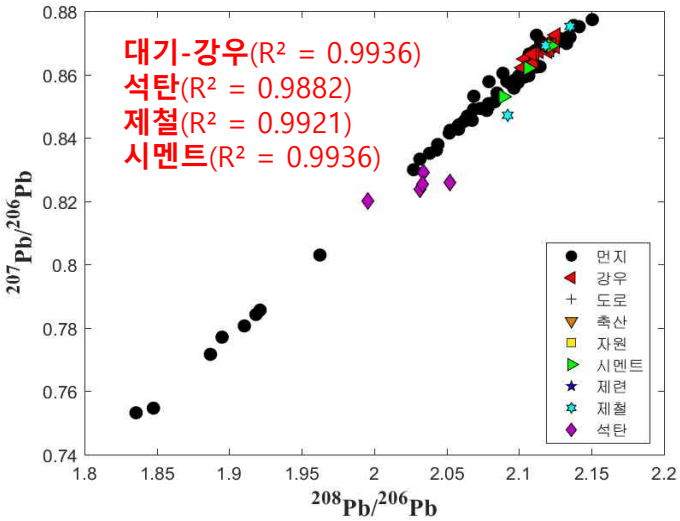
납 동위원소 분석결과

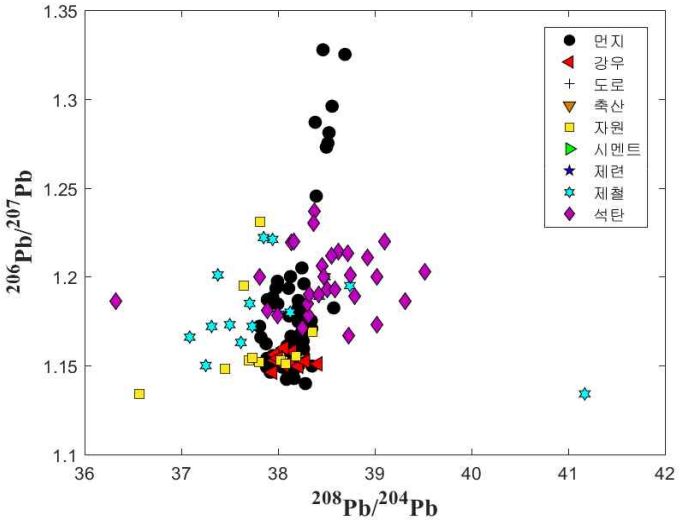
대기오염물질 기원과 기여도 추정(보령시-국내)

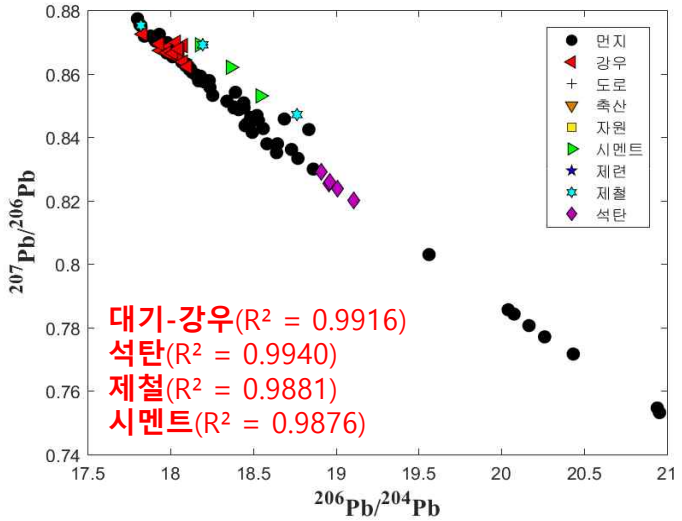
- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(도로, 축산, 자원회수시설, 시멘트공정, 제련, 제철, 화력발전) 매칭
- 시멘트공정, 일관제철소, 화력발전시설 기원이 큰 것으로 추정, 대기-강우 상관성 확인

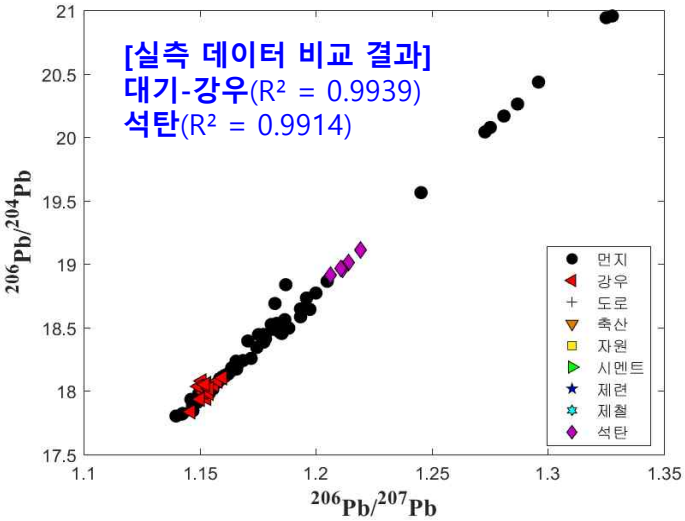








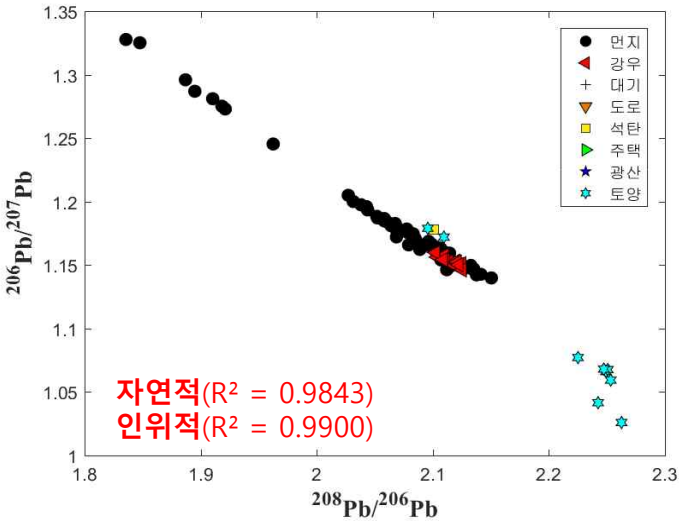


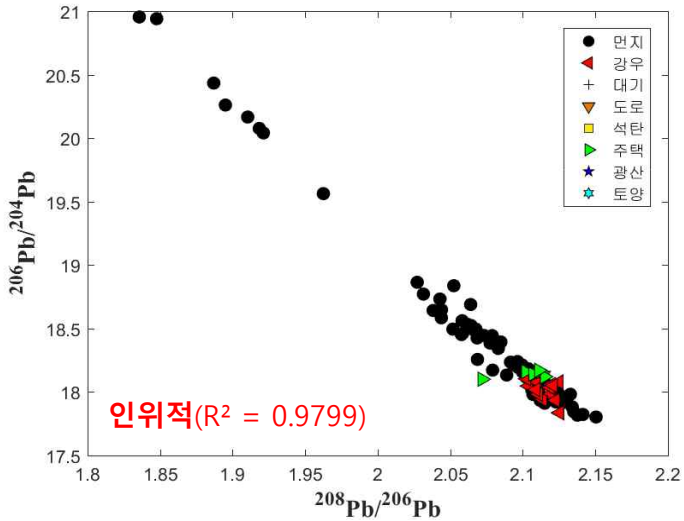


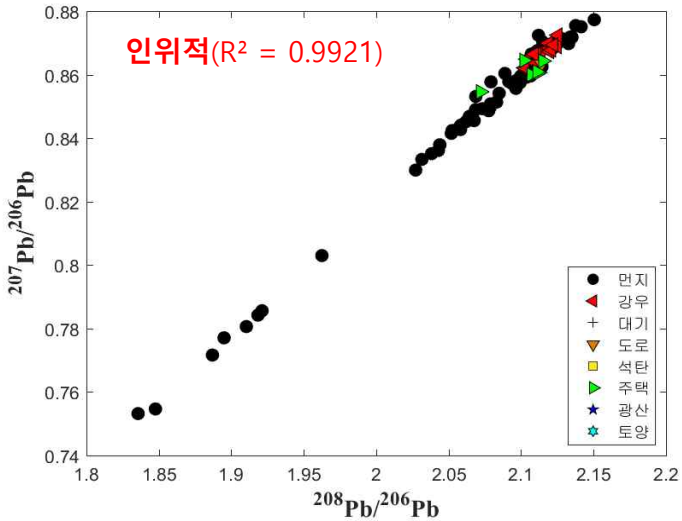
납 동위원소 분석결과

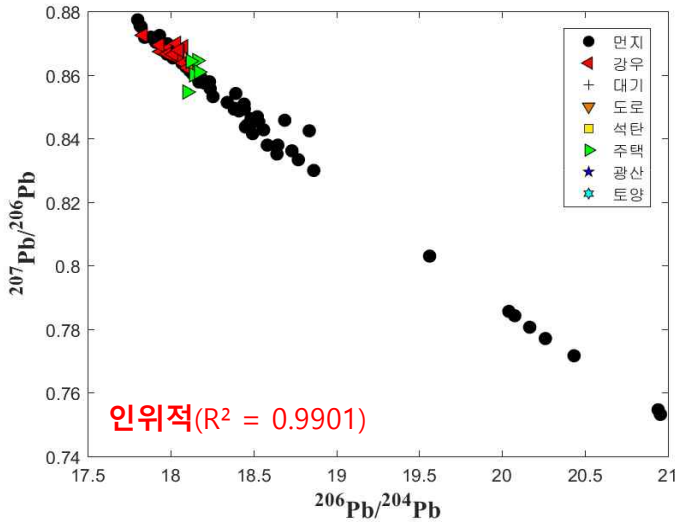
대기오염물질 기원과 기여도 추정(보령시-국외)

- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(자연적(암석, 광산, 토양), 인위적(대기, 도로, 석탄, 주택가)) 매칭
- 중국의 인위적(주택가, 석탄), 자연적(토양) 기원이 큰 것으로 추정





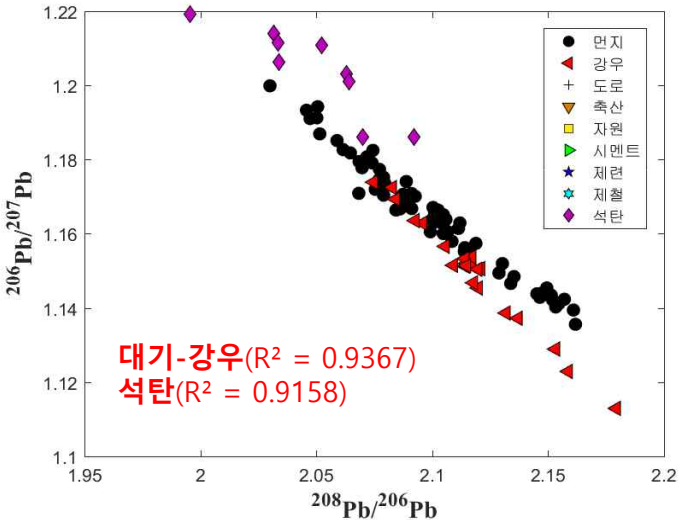


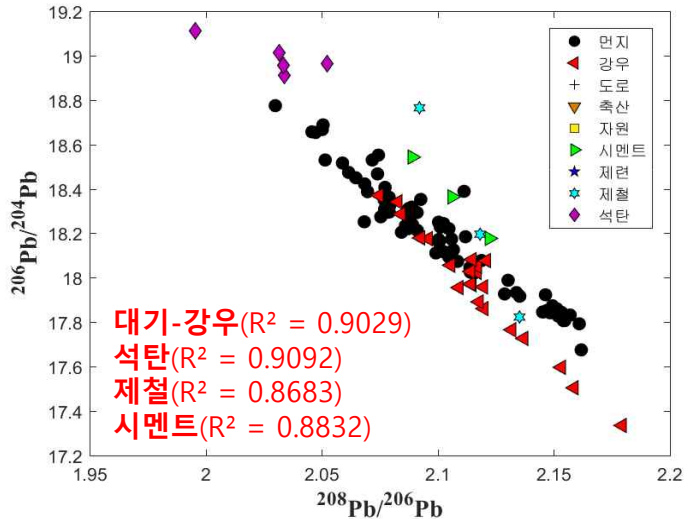


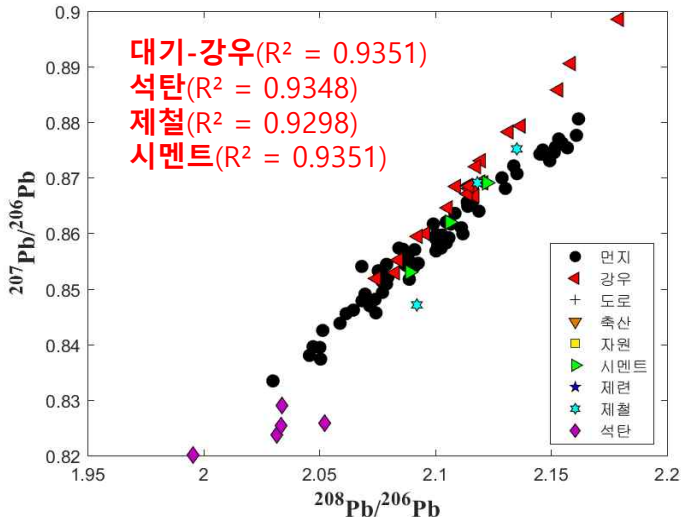
납 동위원소 분석결과

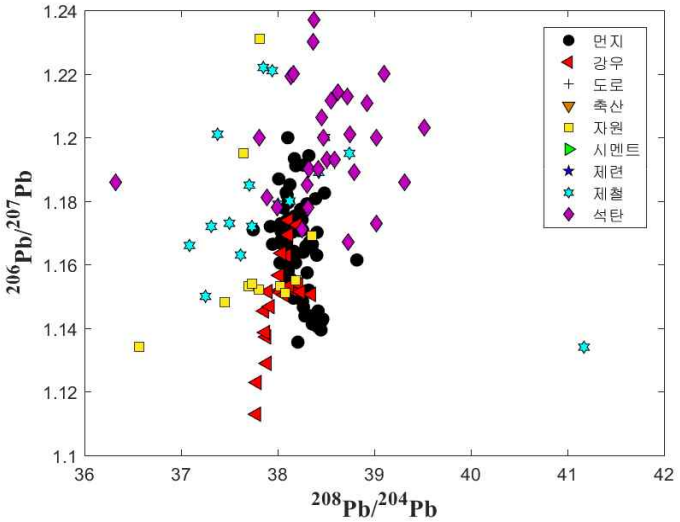
대기오염물질 기원과 기여도 추정(당진시-국내)

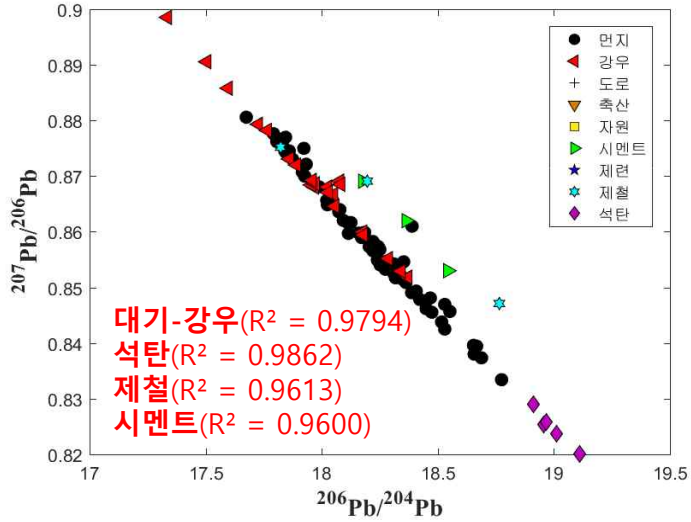
- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(도로, 축산, 자원회수시설, 시멘트공정, 제련, 제철, 화력발전) 매칭
- 시멘트공정, 화력발전시설, 일관제철소 기원이 큰 것으로 추정, 대기-강우 상관성 확인

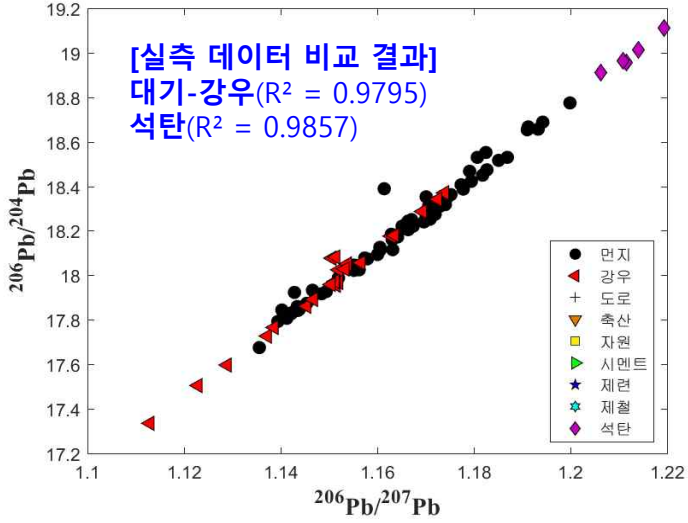








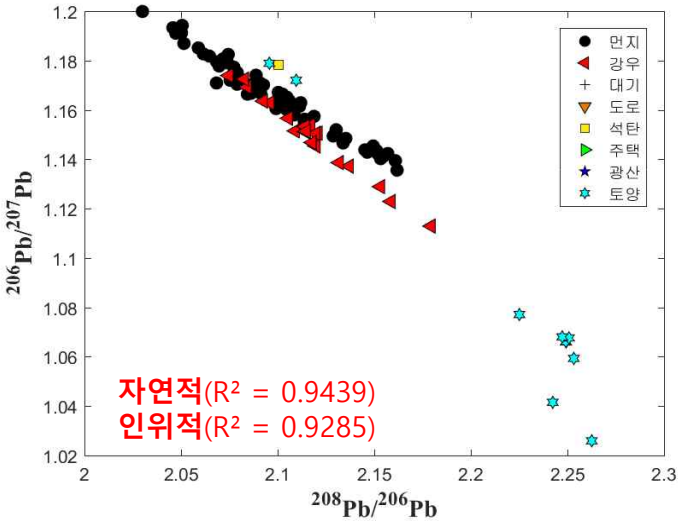


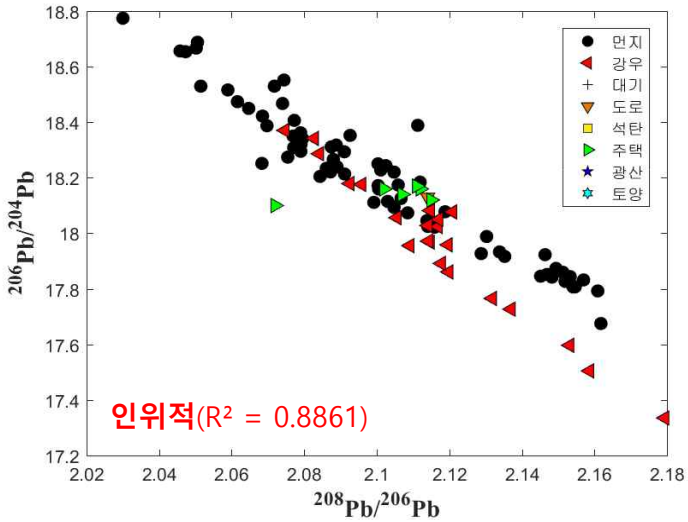


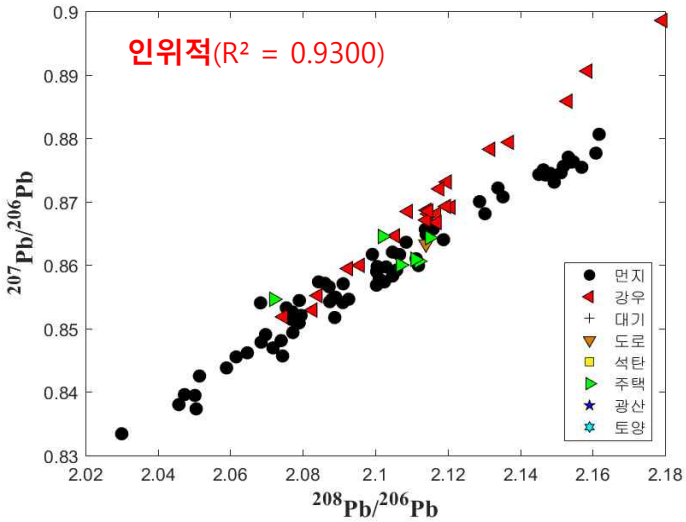
납 동위원소 분석결과

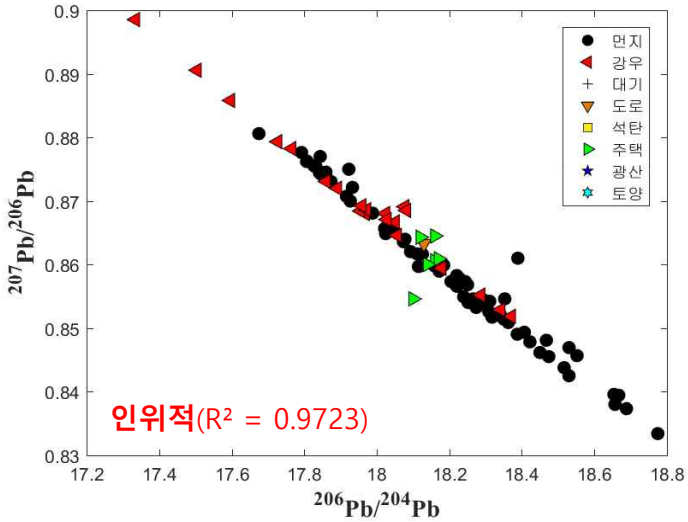
대기오염물질 기원과 기여도 추정(당진시-국외)

- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(자연적(암석, 광산, 토양), 인위적(대기, 도로, 석탄, 주택가)) 매칭
- 중국의 인위적(주택가, 도로), 자연적(토양) 기원이 큰 것으로 추정





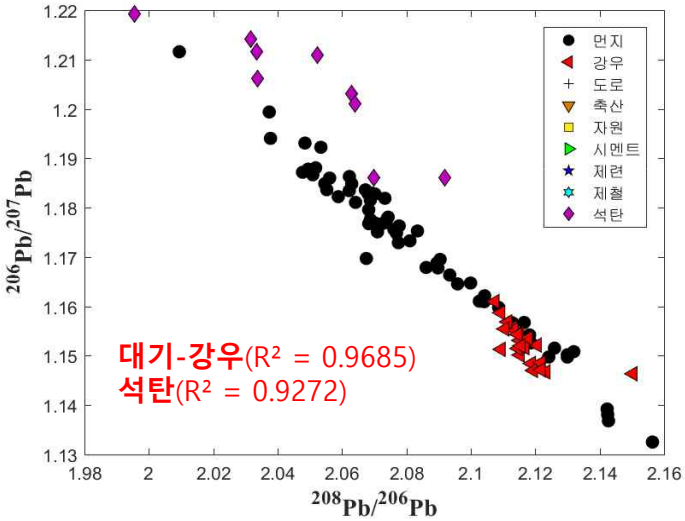


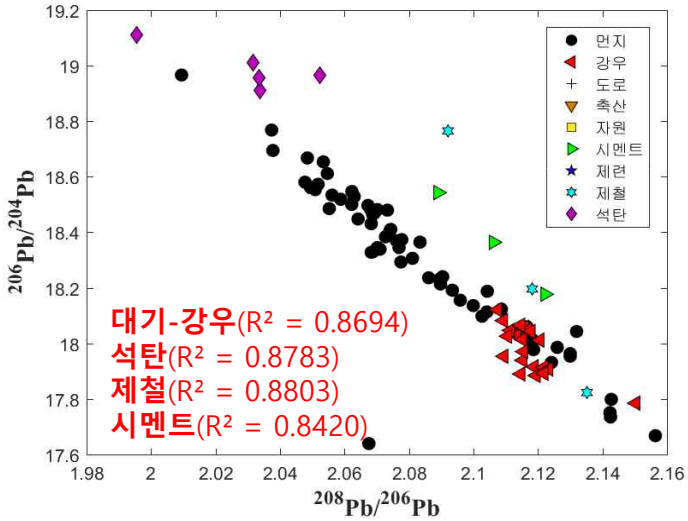


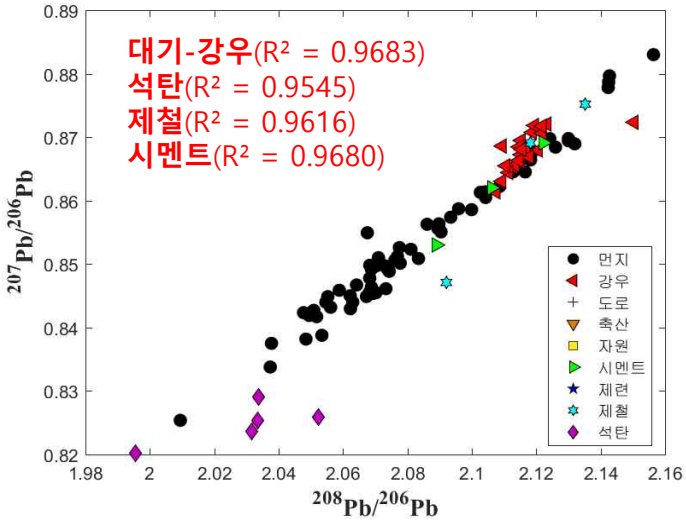
납 동위원소 분석결과

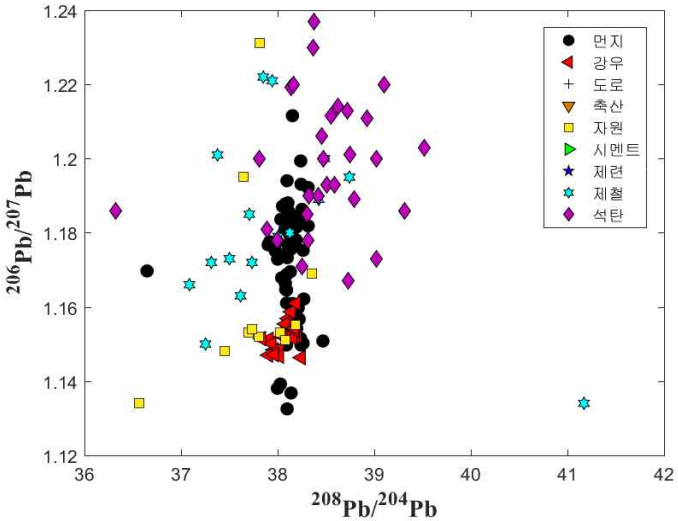
대기오염물질 기원과 기여도 추정(서천군-국내)

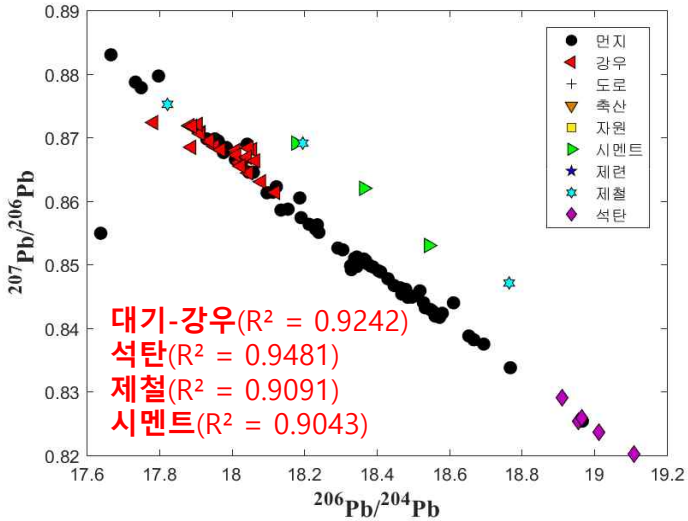
- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(도로, 축산, 자원회수시설, 시멘트공정, 제련, 제철, 화력발전) 매칭
- 시멘트공정, 일관제철소, 화력발전시설 기원이 큰 것으로 확인, 대기-강우 상관성 확인

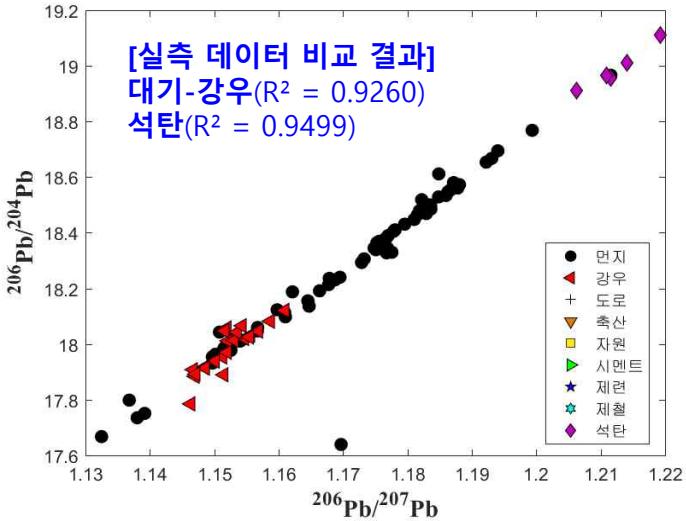








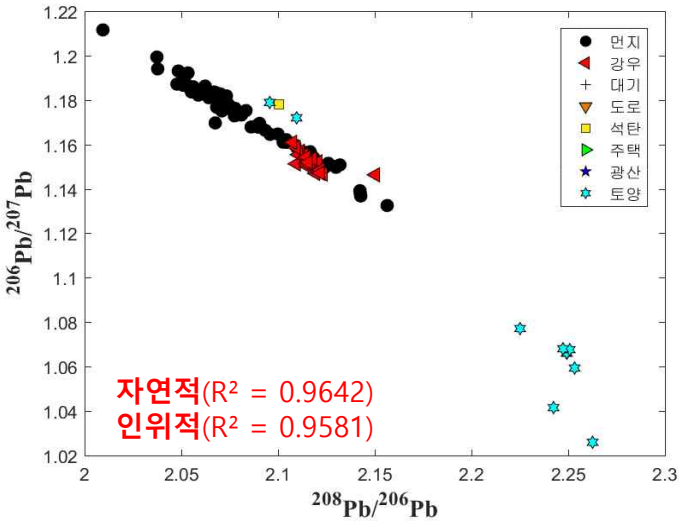


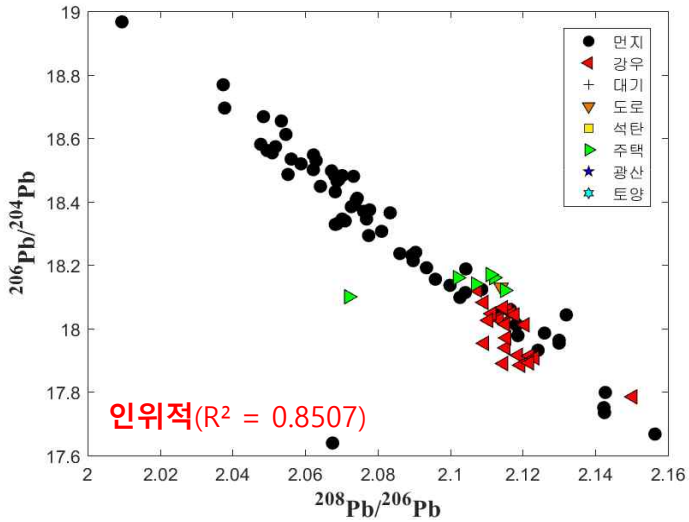


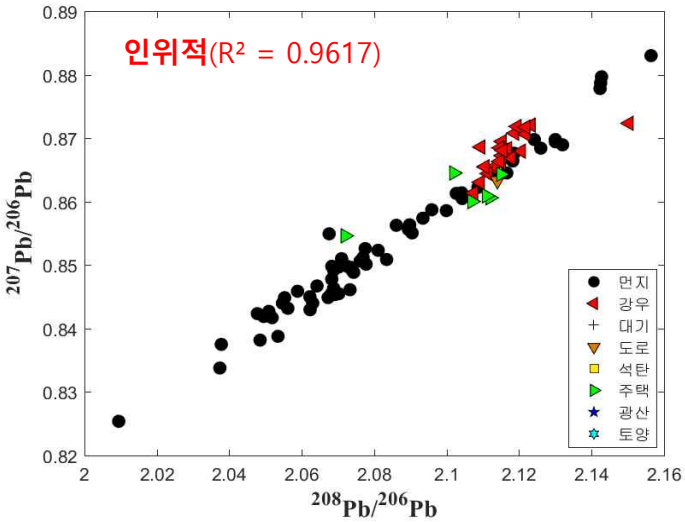
납 동위원소 분석결과

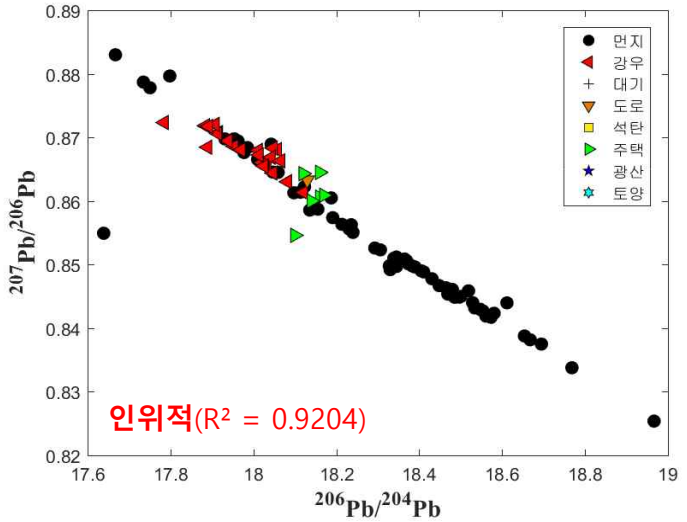
대기오염물질 기원과 기여도 추정(보령시-국외)

- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(자연적(암석, 광산, 토양), 인위적(대기, 도로, 석탄, 주택가)) 매칭
- 중국의 인위적(주택가, 도로), 자연적(토양) 기원이 큰 것으로 추정





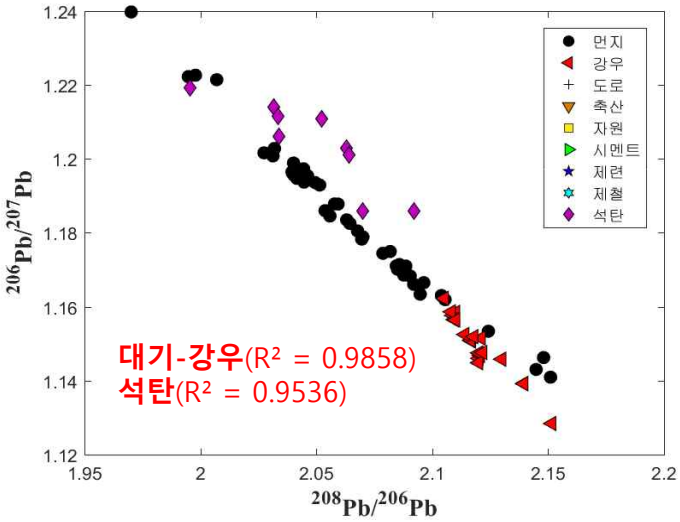


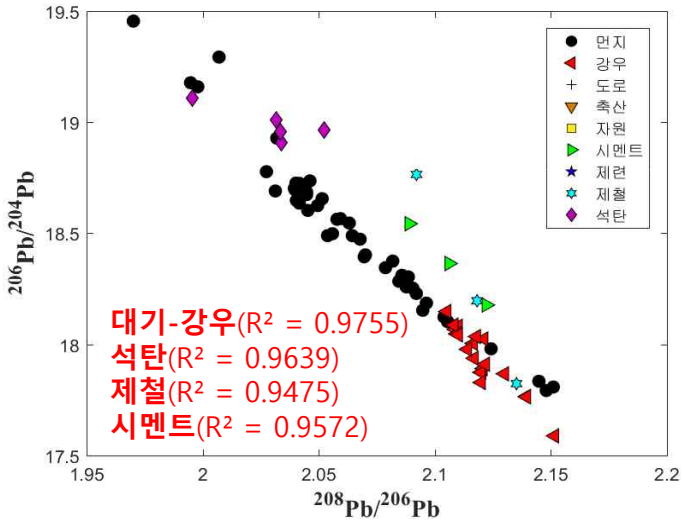


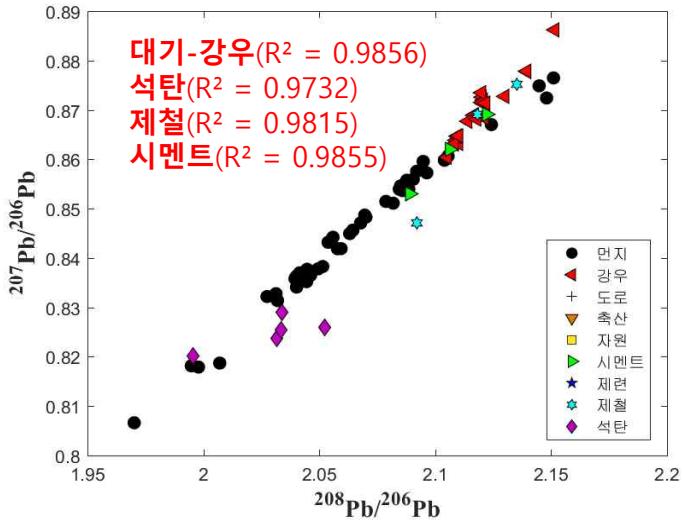
납 동위원소 분석결과

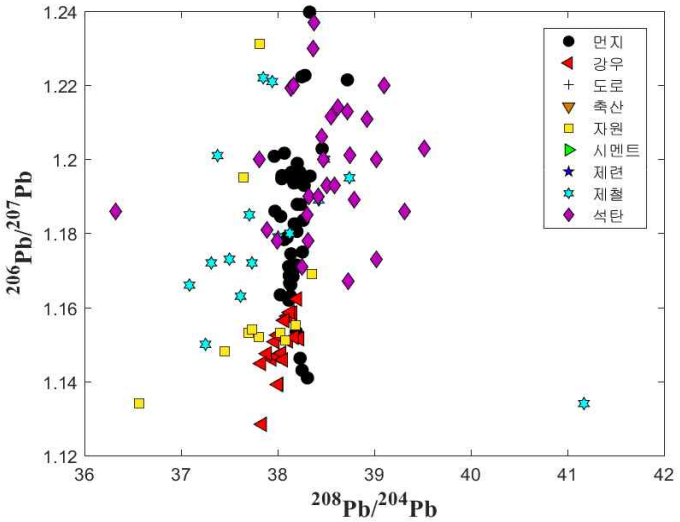
대기오염물질 기원과 기여도 추정(태안군-국내)

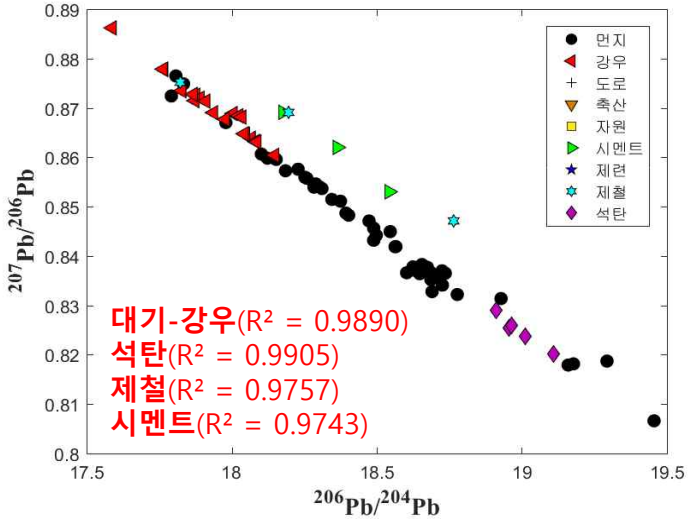
- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(도로, 축산, 자원회수시설, 시멘트공정, 제련, 제철, 화력발전) 매칭
- 시멘트공정, 일관제철소, 화력발전시설 기원이 큰 것으로 추정, 대기-강우 상관성 확인

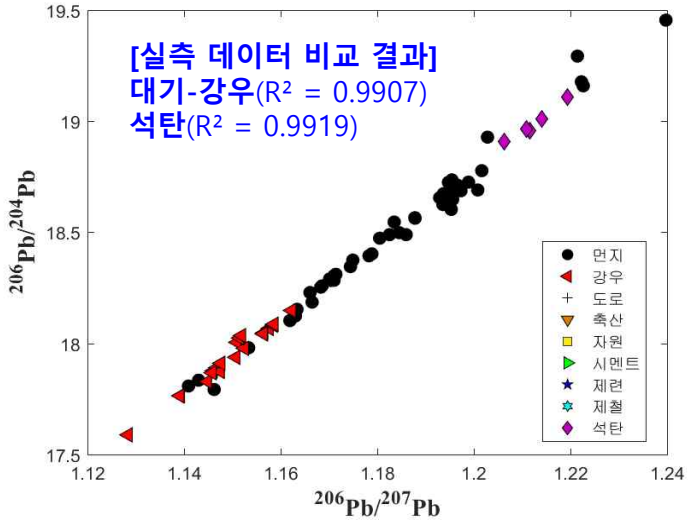








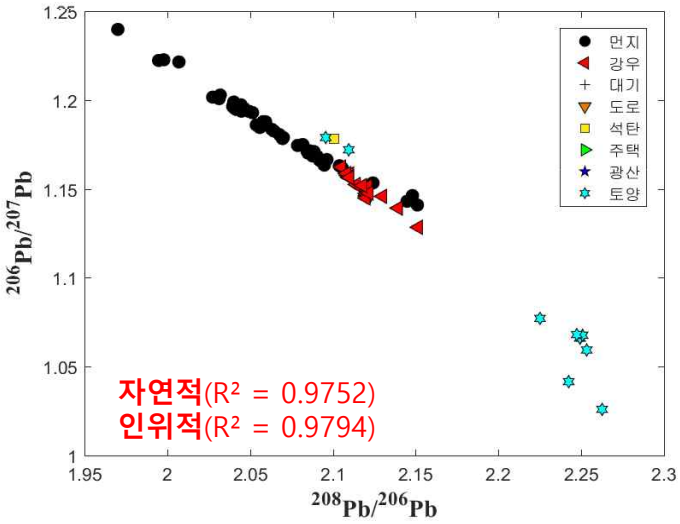


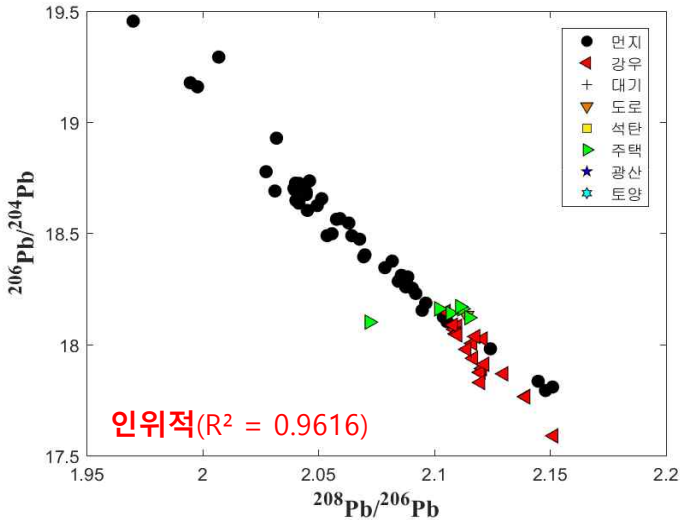


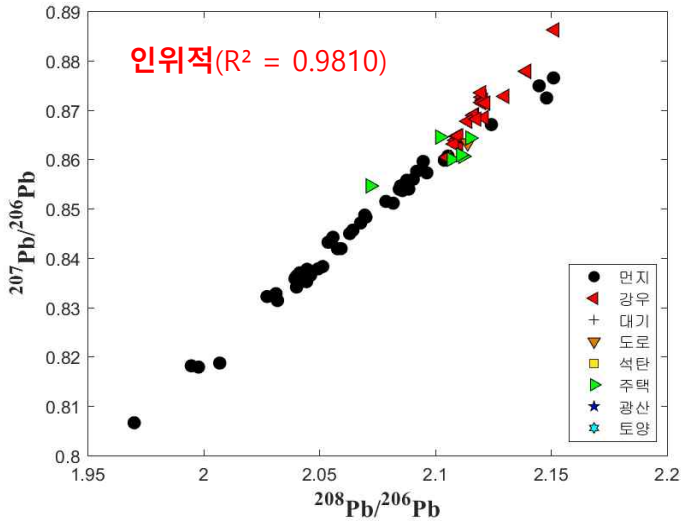
납 동위원소 분석결과

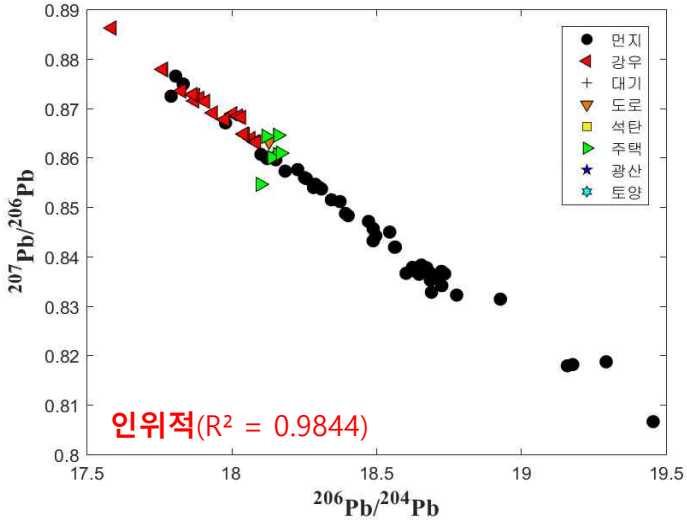
대기오염물질 기원과 기여도 추정(태안군-국외)

- 실측치(대기, 강우)와 라이브러리(자연적(암석, 광산, 토양), 인위적(대기, 도로, 석탄, 주택가)) 매칭
- 중국의 인위적(주택가, 도로), 자연적(토양) 기원이 큰 것으로 추정









역궤적 분석

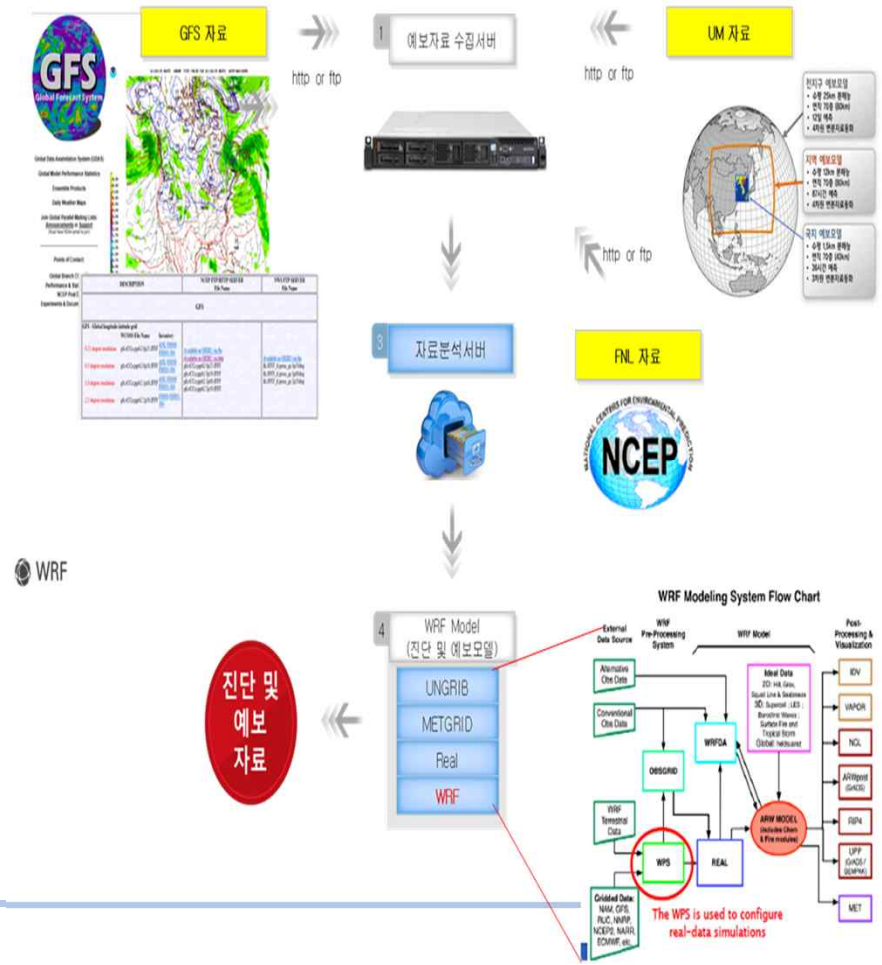
대기오염물질 기원과 기여도 추정(PSCF모델)

3차원 중규모 기상모델링

□ 동북아시아 지역에 대한 3차원 모델링

□ 다양한 환경정보 및 모델링 시스템 구축 경험

WRF 입력자료 수신체계 구축



Hysplit 모델 이론 및 운영 방안

HYSPLIT 모델 이론

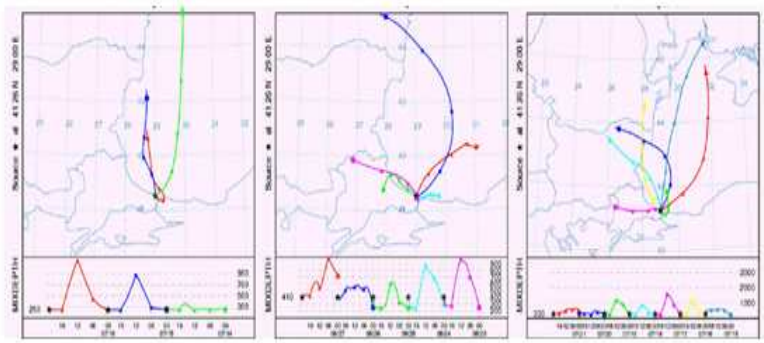
- 평면 및 공간(HySplit) Trajectory
  - Backward

$$XR = XR_0 - W_x \times T$$
$$YR = YR_0 - W_y \times T$$

  - Forward

$$XR = XR_0 + W_x \times T$$
$$YR = YR_0 + W_y \times T$$

XR_0 : 기점의 X축 좌표
YR_0 : 기점의 Y축 좌표
XR : 유적의 X축 좌표
YR : 유적의 Y축 좌표
T : 이동시간 (sec)
W_x : Vector(m/sec)
W_y : Vector(m/sec)



Trajectory 모델 흐름도

- 역추적/정추적
- 추적간격(1시간)
- 추적기간(72시간)

- 추적대상으로부터 추적 시작 지점까지의 폴리라인 좌표
- 추적라인선상에 위치한 사업장 검색

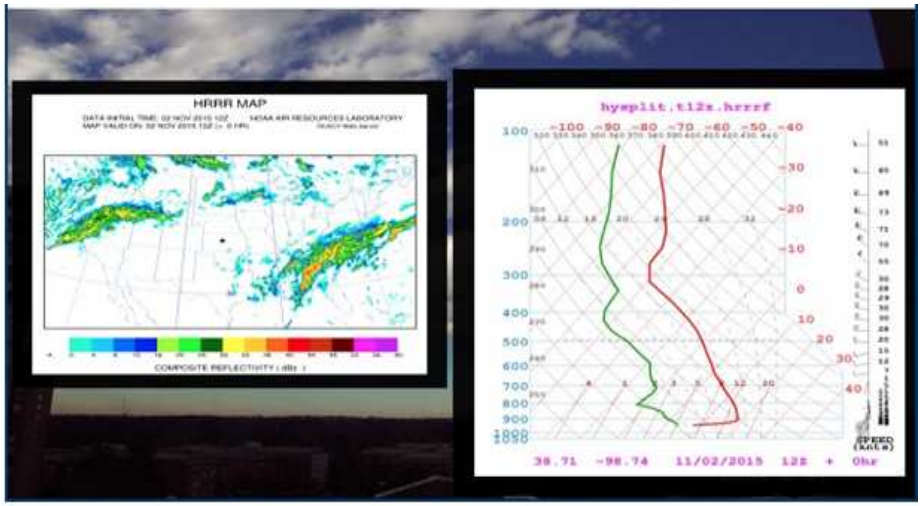
역궤적 분석

대기오염물질 기원과 기여도 추정(PSCF모델)

자료 변환

□ 3차원 중규모 모델링 결과 자료에 대한 변환

□ ARW to ARL Convert



WRF(NetDDF)

- U
- V
- W
- T
- Cloud etc.

ARW to ARL

Hysplit(BIN)

- U
- V
- W
- T
- Cloud etc.

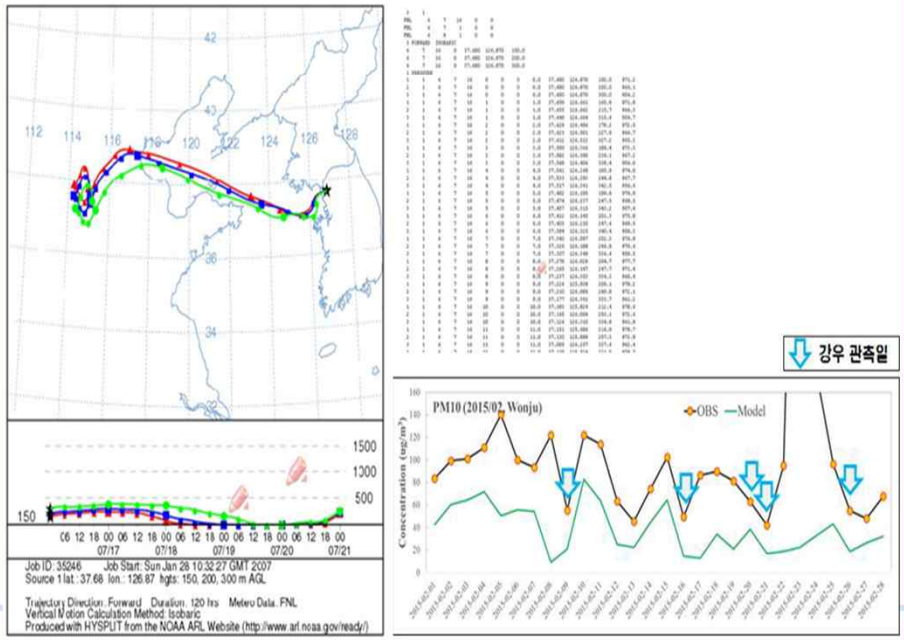
Hysplit 모델 결과 예시

기상입력 자료 생성

기상 수치모델자료 → MCIP 자료 변환 → NOAA ARL 자료 생성

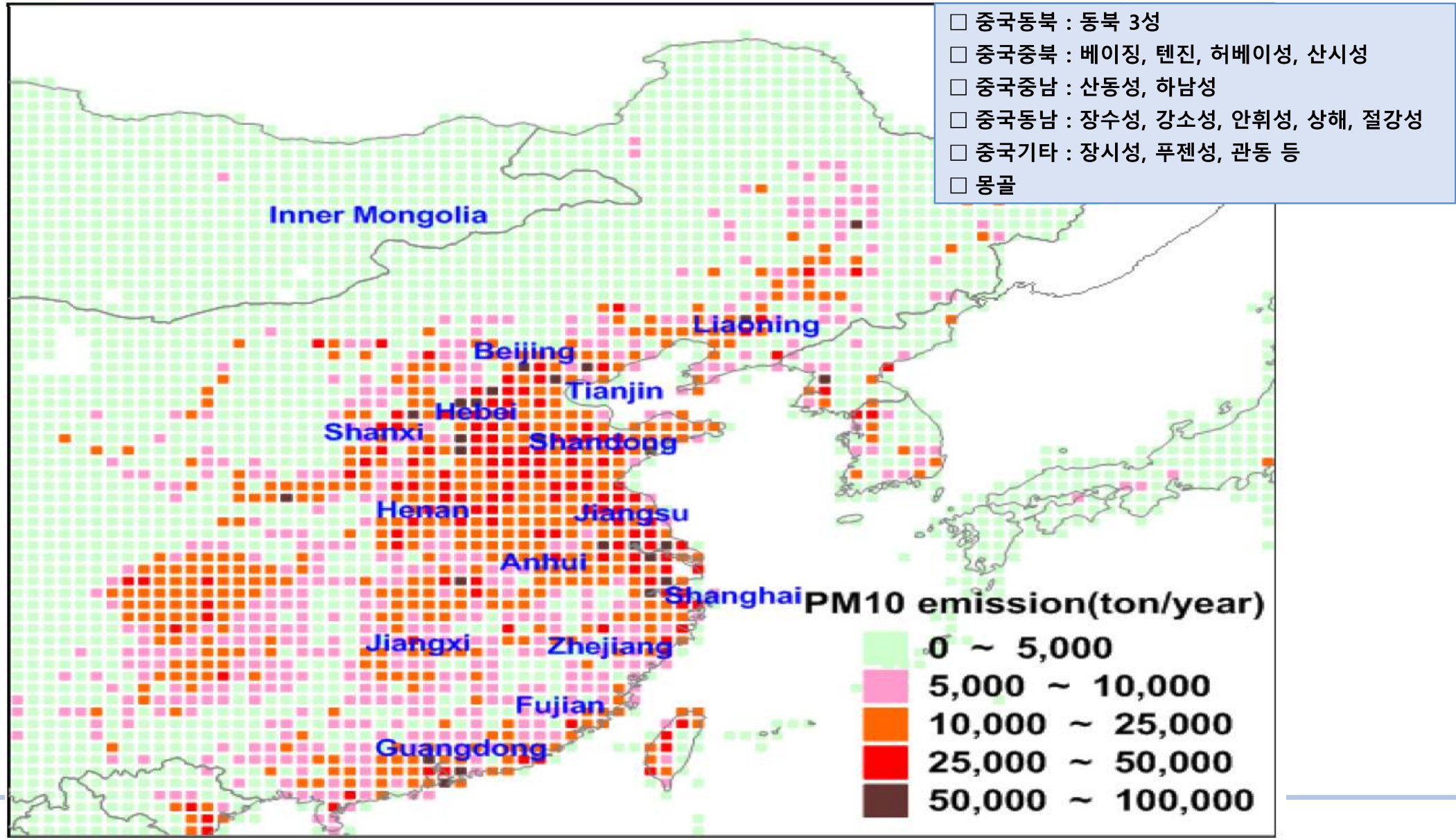
※MCIP : Meteorology Chemistry Interface Processor

HYSPLIT 모델 수행 결과 표출 (예시)



역궤적 분석

● 기류 이동경로와 오염원 분포 관계 파악을 위해 인위적 배출량에 국외 배출량 INTEX-B자료 적용

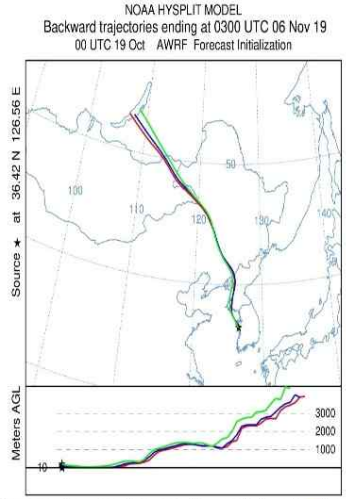


역궤적 분석결과

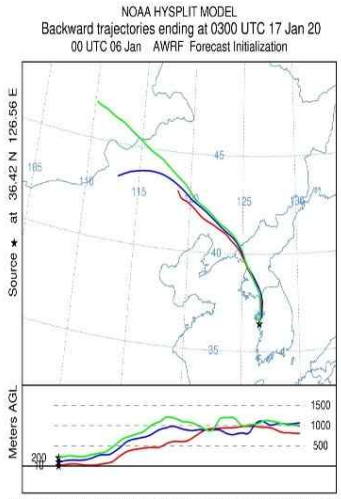
대기오염물질 기원과 기여도 추정(보령시-36.4208377, 126.5587595)

- (봄) 북서풍, (여름) 남동풍, (가을) 북서풍, (겨울) 북서풍, 올해는 이례적으로 남서풍 국내 유입

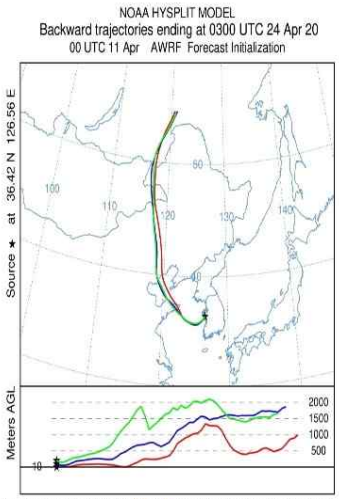
가을 대기샘플링 (19.11.04.~06.)



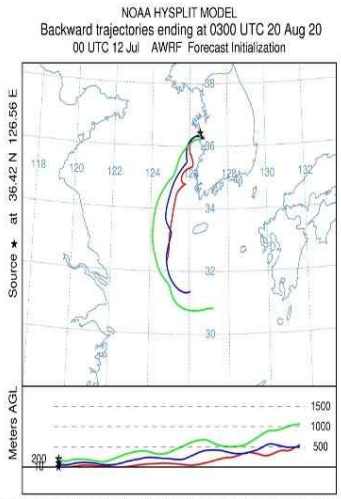
겨울 대기샘플링 (20.01.15.~17.)



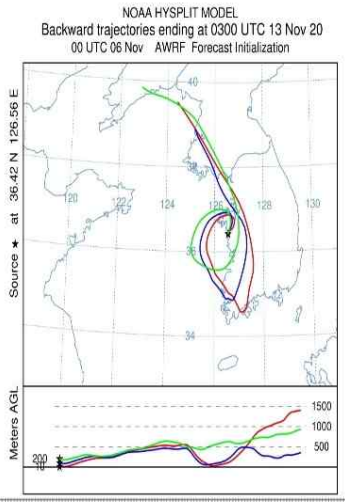
봄 대기샘플링 (20.04.22.~24.)



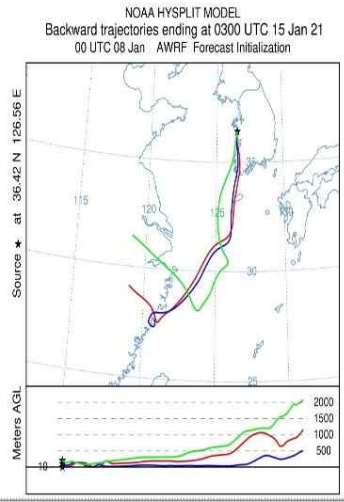
여름 대기샘플링 (20.08.18.~20.)

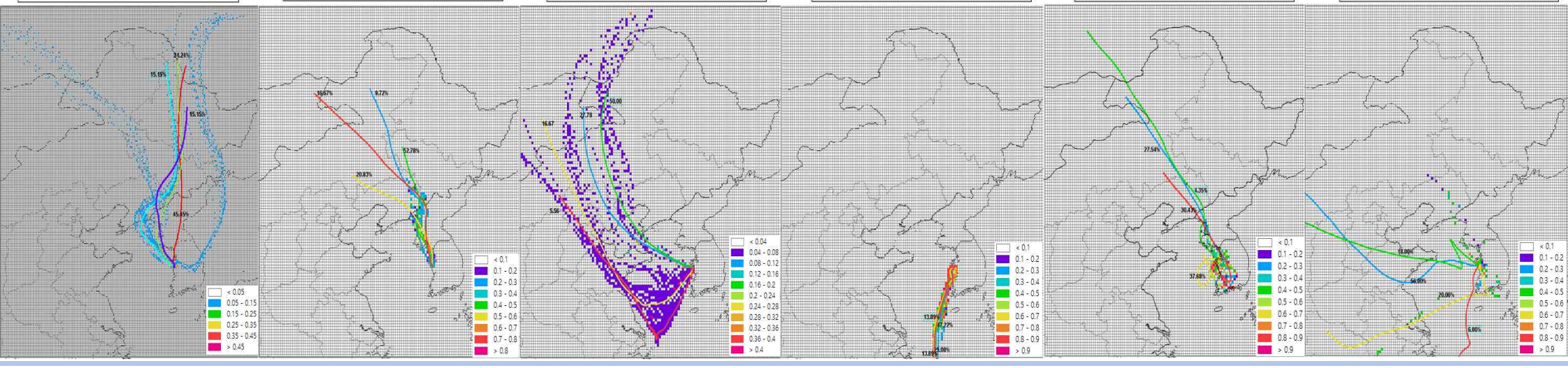


가을 대기샘플링 (20.11.14.~13.)



겨울 대기샘플링 (21.01.13.~15.)





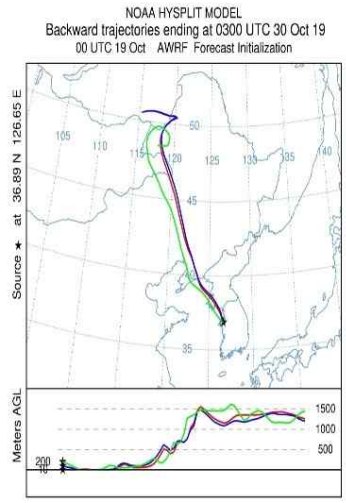
"HYSPLIT모델 역궤적 분석결과와 PSCF모델 분석결과를 통한 기여도 분석 중"

역궤적 분석결과

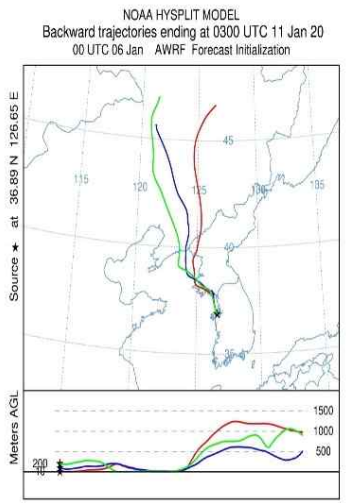
대기오염물질 기원과 기여도 추정(당진시-36.4208377, 126.5587595)

- (봄) 북풍, (여름) 남동풍, (가을) 북풍, (겨울) 북서풍 국내 유입

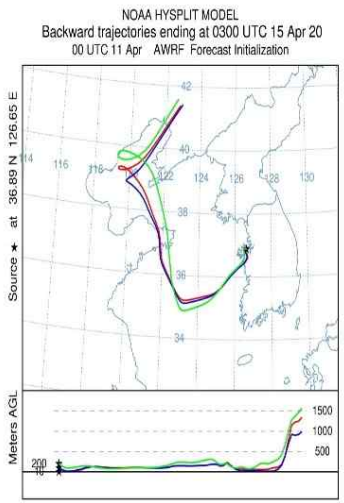
가을 대기샘플링 (19.10.29.~30.)



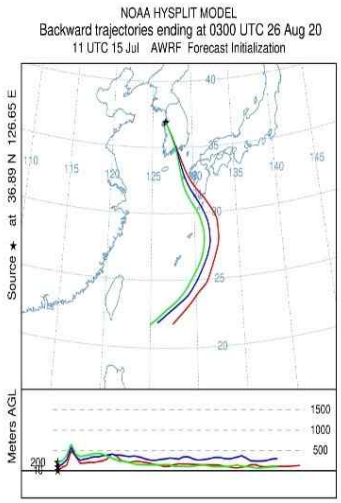
겨울 대기샘플링 (20.01.09.~11.)



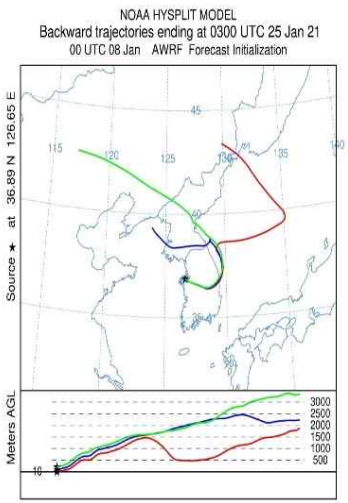
봄 대기샘플링 (20.04.13.~15.)



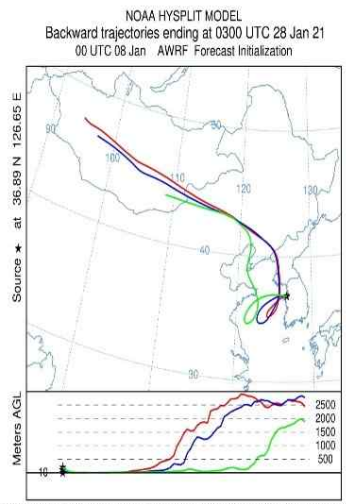
여름 대기샘플링 (20.08.24.~26.)

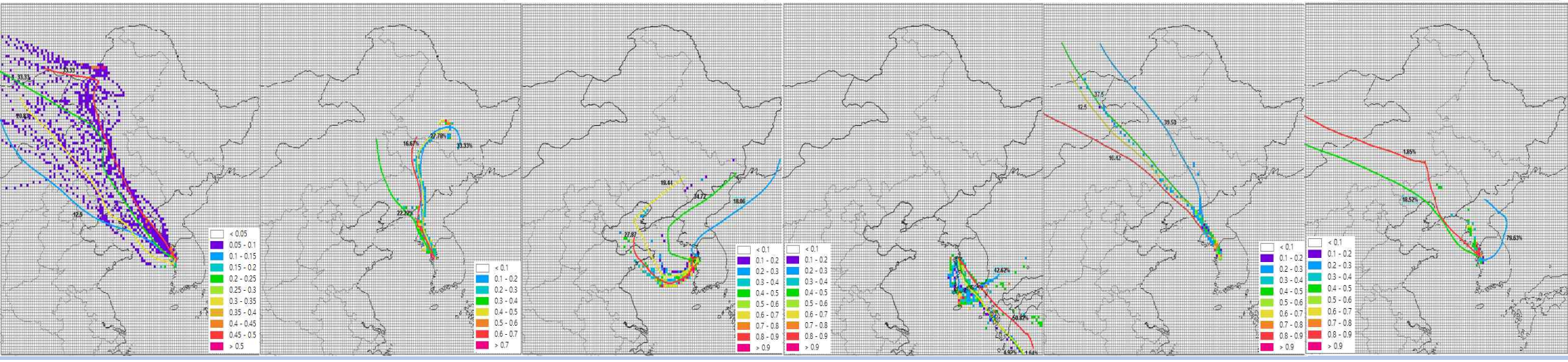


가을 대기샘플링 (20.11.23.~25.)



겨울 대기샘플링 (21.01.25.~28.)





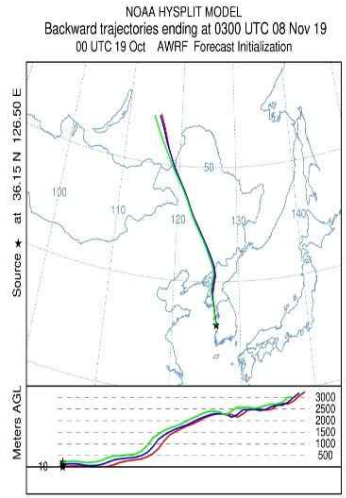
"HYSPLIT모델 역궤적 분석결과와 PSCF모델 분석결과를 통한 기여도 분석 중"

역궤적 분석결과

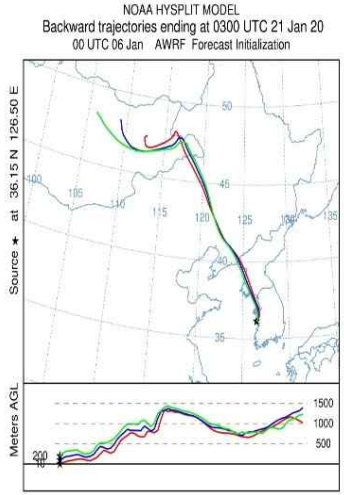
대기오염물질 기원과 기여도 추정(서천군-36.1475949, 126.5033898)

- (봄) 북서풍, (여름) 북서풍, (가을) 북풍, (겨울) 북서풍 국내 유입

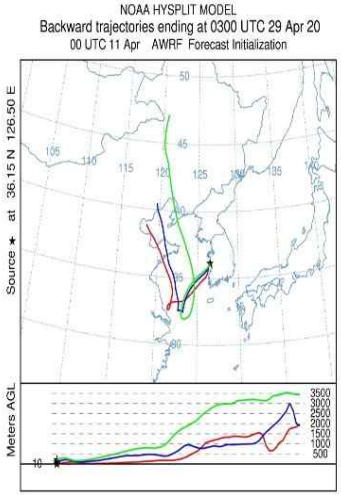
가을 대기샘플링 (19.11.06.~08.)



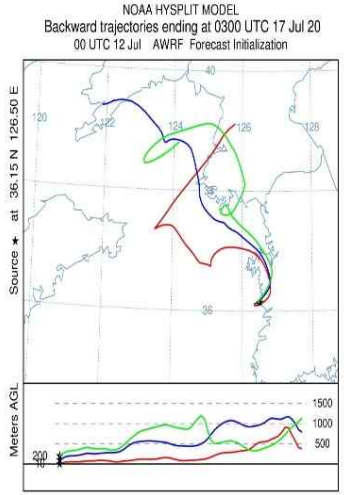
겨울 대기샘플링 (20.01.19.~21.)



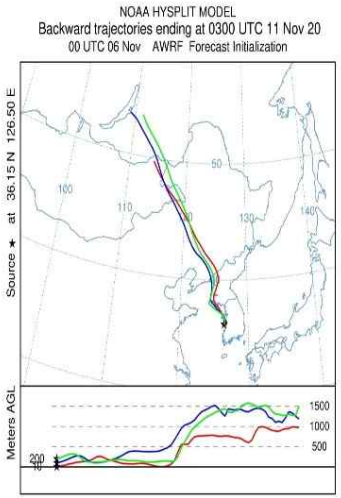
봄 대기샘플링 (20.04.27.~29.)



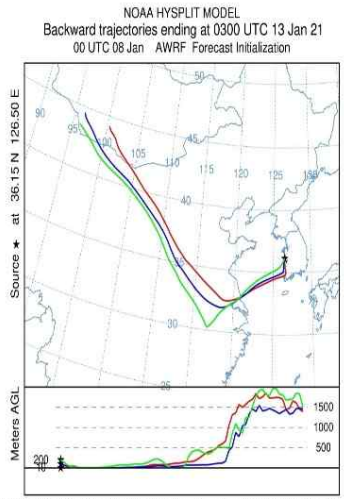
여름 대기샘플링 (20.07.15.~18.)

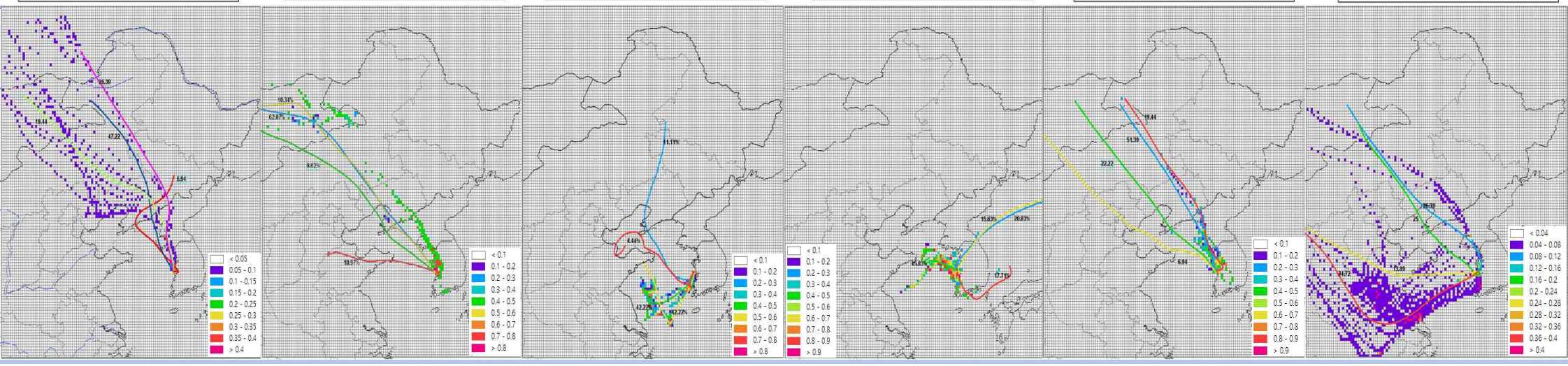


가을 대기샘플링 (20.11.09.~11.)



겨울 대기샘플링 (21.01.11.~13.)





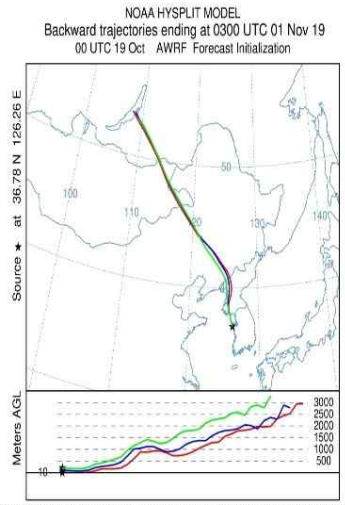
"HYSPLIT모델 역궤적 분석결과와 PSCF모델 분석결과를 통한 기여도 분석 중"

역궤적 분석결과

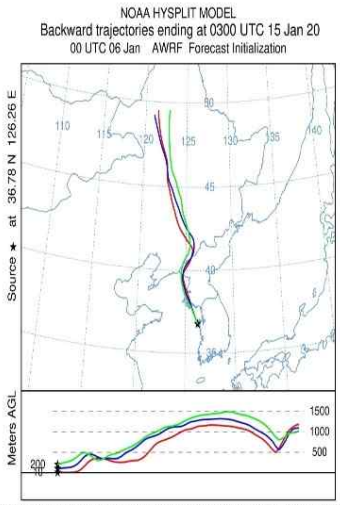
대기오염물질 기원과 기여도 추정(태안군-36.7752604, 126.2613762)

- (봄) 북풍, (여름) 남동풍, (가을) 북풍, (겨울) 북서풍 국내 유입

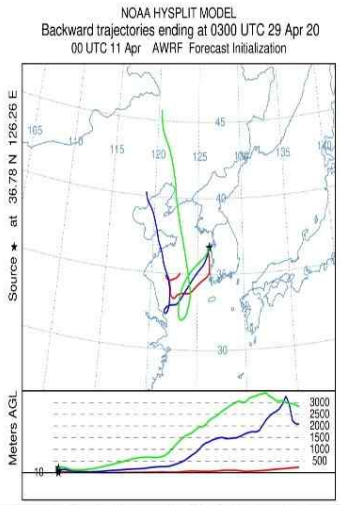
가을 대기샘플링 (19.10.30.~11.01.)



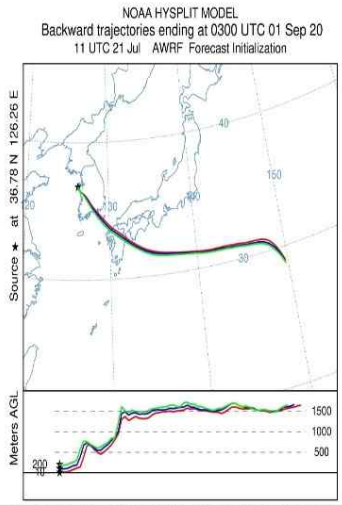
겨울 대기샘플링 (20.01.13.~15.)



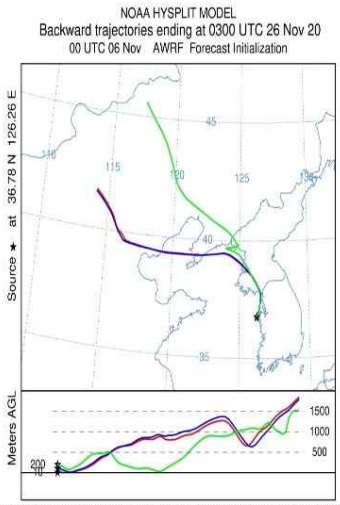
봄 대기샘플링 (20.04.27.~29.)



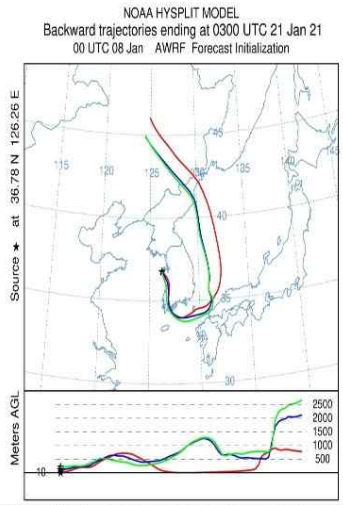
여름 대기샘플링 (20.08.31.~09.02.)

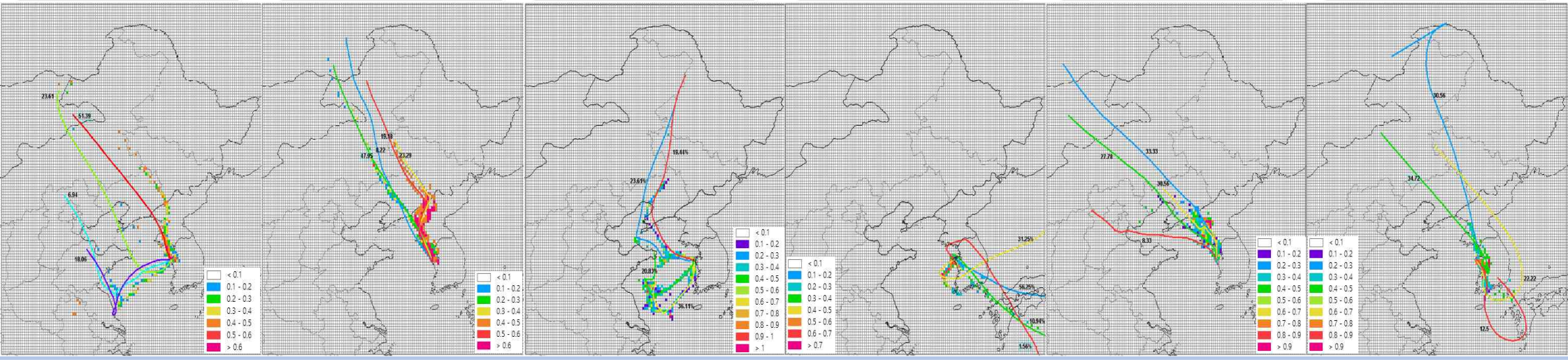


가을 대기샘플링 (20.11.24.~26.)



겨울 대기샘플링 (21.01.19.~21.)





"HYSPLIT모델 역궤적 분석결과와 PSCF모델 분석결과를 통한 기여도 분석 중"

중금속 분석결과

인자간 상관관계 분석(보령시)

- 납(Pb)에 영향을 주는 항목은 카드뮴(Cd), 알루미늄(Al), 크롬(Cr), 비소(As)으로 분석

		Al	Cr	Cu	Fe	Zn	Co	Ni	As	Pb	Cd
Al	Pearson 상관계수	1	.629**	-.016	.921**	-.335**	.162	.440**	.758**	.718**	.743**
	유의확률 (양쪽)		.000	.883	.000	.002	.133	.000	.000	.000	.000
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Cr	Pearson 상관계수	.629**	1	-.047	.496**	.023	.175	.669**	.656**	.764**	.719**
	유의확률 (양쪽)	.000		.667	.000	.833	.106	.000	.000	.000	.000
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Cu	Pearson 상관계수	-.016	-.047	1	-.013	-.123	.338**	-.090	.014	.035	.024
	유의확률 (양쪽)	.883	.667		.903	.258	.001	.440	.899	.748	.824
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Fe	Pearson 상관계수	.921**	.496**	-.013	1	-.236*	.250*	.322**	.629**	.557**	.522**
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.903		.028	.020	.005	.000	.000	.000
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Zn	Pearson 상관계수	-.335**	.023	-.123	-.236*	1	-.051	-.015	-.164	-.180	-.179
	유의확률 (양쪽)	.002	.833	.258	.028		.642	.898	.128	.095	.096
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Co	Pearson 상관계수	.162	.175	.338**	.250*	-.051	1	.047	.063	.106	.073
	유의확률 (양쪽)	.133	.106	.001	.020	.642		.684	.565	.326	.503
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Ni	Pearson 상관계수	.440**	.669**	-.090	.322**	-.015	.047	1	.470**	.297**	.349**
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.440	.005	.898	.684		.000	.009	.002
	N	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
As	Pearson 상관계수	.758**	.656**	.014	.629**	-.164	.063	.470**	1	.846**	.829**
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.899	.000	.128	.565	.000		.000	.000
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Pb	Pearson 상관계수	.718**	.764**	.035	.557**	-.180	.106	.297**	.846**	1	.920**
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.748	.000	.095	.326	.009	.000		.000
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87
Cd	Pearson 상관계수	.743**	.719**	.024	.522**	-.179	.073	.349**	.829**	.920**	1
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.824	.000	.096	.503	.002	.000	.000	
	N	87	87	87	87	87	87	76	87	87	87

**. 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의합니다.

*. 상관계수는 0.05 수준(양쪽)에서 유의합니다.

중금속 분석결과

인자간 상관관계 분석(당진시)

- 납(Pb)에 영향을 주는 항목은 알루미늄(Al), 철(Fe), 비소(As), 카드뮴(Cd)으로 분석

		Al	Cr	Cu	Fe	Zn	Co	Ni	As	Pb	Cd
Al	Pearson 상관계수	1	.669**	.197	.791**	-.298**	-.186	.500**	.574**	.883**	.858**
	유의확률 (양쪽)		.000	.084	.000	.008	.103	.000	.000	.000	.000
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Cr	Pearson 상관계수	.669**	1	.062	.700**	-.126	-.080	.471**	.281*	.584**	.558**
	유의확률 (양쪽)	.000		.587	.000	.271	.488	.000	.013	.000	.000
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Cu	Pearson 상관계수	.197	.062	1	.163	-.221	.552**	-.070	.145	.203	.155
	유의확률 (양쪽)	.084	.587		.155	.052	.000	.564	.204	.075	.176
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Fe	Pearson 상관계수	.791**	.700**	.163	1	-.143	-.062	.296*	.743**	.827**	.805**
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.155		.210	.591	.013	.000	.000	.000
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Zn	Pearson 상관계수	-.298**	-.126	-.221	-.143	1	-.185	-.115	-.021	-.217	-.223
	유의확률 (양쪽)	.008	.271	.052	.210		.105	.341	.853	.056	.050
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Co	Pearson 상관계수	-.186	-.080	.552**	-.062	-.185	1	-.157	-.073	-.135	-.115
	유의확률 (양쪽)	.103	.488	.000	.591	.105		.193	.523	.239	.316
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Ni	Pearson 상관계수	.500**	.471**	-.070	.296*	-.115	-.157	1	-.007	.241*	.331**
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.564	.013	.341	.193		.952	.044	.005
	N	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
As	Pearson 상관계수	.574**	.281*	.145	.743**	-.021	-.073	-.007	1	.824**	.711**
	유의확률 (양쪽)	.000	.013	.204	.000	.853	.523	.952		.000	.000
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Pb	Pearson 상관계수	.883**	.584**	.203	.827**	-.217	-.135	.241*	.824**	1	.864**
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.075	.000	.056	.239	.044	.000		.000
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78
Cd	Pearson 상관계수	.858**	.558**	.155	.805**	-.223	-.115	.331**	.711**	.864**	1
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.176	.000	.050	.316	.005	.000	.000	
	N	78	78	78	78	78	78	70	78	78	78

**. 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의합니다.

*. 상관계수는 0.05 수준(양쪽)에서 유의합니다.

중금속 분석결과

인자간 상관관계 분석(태안군)

- 납(Pb)에 영향을 주는 항목은 구리(Cu), 카드뮴(Cd)으로 분석

		Al	Cr	Cu	Fe	Zn	Co	Ni	As	Pb	Cd
Al	Pearson 상관계수	1	.742**	.311**	.861**	-.343**	-.038	.354**	.469**	.365**	.467**
	유의확률 (양쪽)		.000	.007	.000	.003	.751	.004	.000	.001	.000
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Cr	Pearson 상관계수	.742**	1	.274*	.474**	-.147	-.119	.720**	.308**	.399**	.627**
	유의확률 (양쪽)	.000		.018	.000	.212	.313	.000	.008	.000	.000
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Cu	Pearson 상관계수	.311**	.274*	1	.276*	-.225	.276*	-.020	.362**	.734**	.674**
	유의확률 (양쪽)	.007	.018		.017	.054	.017	.875	.002	.000	.000
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Fe	Pearson 상관계수	.861**	.474**	.276*	1	-.154	.076	.107	.325**	.248*	.212
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.017		.191	.520	.395	.005	.033	.069
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Zn	Pearson 상관계수	-.343**	-.147	-.225	-.154	1	-.118	-.074	-.078	-.158	-.171
	유의확률 (양쪽)	.003	.212	.054	.191		.318	.557	.506	.179	.146
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Co	Pearson 상관계수	-.038	-.119	.276*	.076	-.118	1	-.113	-.103	-.093	-.158
	유의확률 (양쪽)	.751	.313	.017	.520	.318		.368	.384	.432	.179
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Ni	Pearson 상관계수	.354**	.720**	-.020	.107	-.074	-.113	1	-.111	.072	.218
	유의확률 (양쪽)	.004	.000	.875	.395	.557	.368		.376	.565	.079
	N	66	66	66	66	66	66	66	66	66	66
As	Pearson 상관계수	.469**	.308**	.362**	.325**	-.078	-.103	-.111	1	.508**	.509**
	유의확률 (양쪽)	.000	.008	.002	.005	.506	.384	.376		.000	.000
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Pb	Pearson 상관계수	.365**	.399**	.734**	.248*	-.158	-.093	.072	.508**	1	.844**
	유의확률 (양쪽)	.001	.000	.000	.033	.179	.432	.565	.000		.000
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74
Cd	Pearson 상관계수	.467**	.627**	.674**	.212	-.171	-.158	.218	.509**	.844**	1
	유의확률 (양쪽)	.000	.000	.000	.069	.146	.179	.079	.000	.000	
	N	74	74	74	74	74	74	66	74	74	74

**. 상관계수는 0.01 수준(양쪽)에서 유의합니다.

*. 상관계수는 0.05 수준(양쪽)에서 유의합니다.

경청해주셔서 감사합니다

중성자 방사화 분석 이용
미세먼지 오염원 평가기술 개발

김 지 석

2021.10.14

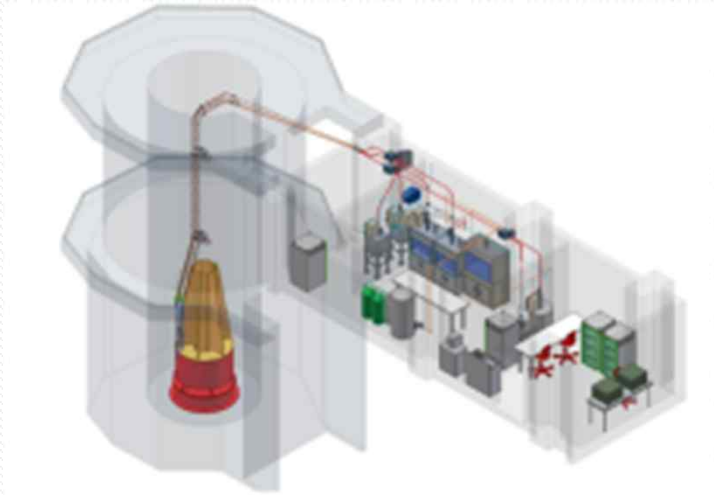
KAERI
한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

Ⅰ. 과제 개요

KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

국가적 분석 역량 동원 필요

방사선 기술 기반 최상위 성분 분석 기술 적용



<방사화 분석 시설 + 하나로>

- 세계 표준기관들이 최상위 분석 기술로 인정하는 **중성자 방사화 분석 기술로,**
- **미세먼지와 같은 다 원소 분석에 매우 유리**

※ 전처리 과정이 없어, 물질이 비산하지 않음

- 국외 대응 시 **국외에서 이용된 분석 기법 활용 필요**
- 국외보다 더 많은 데이터로 압박 필요

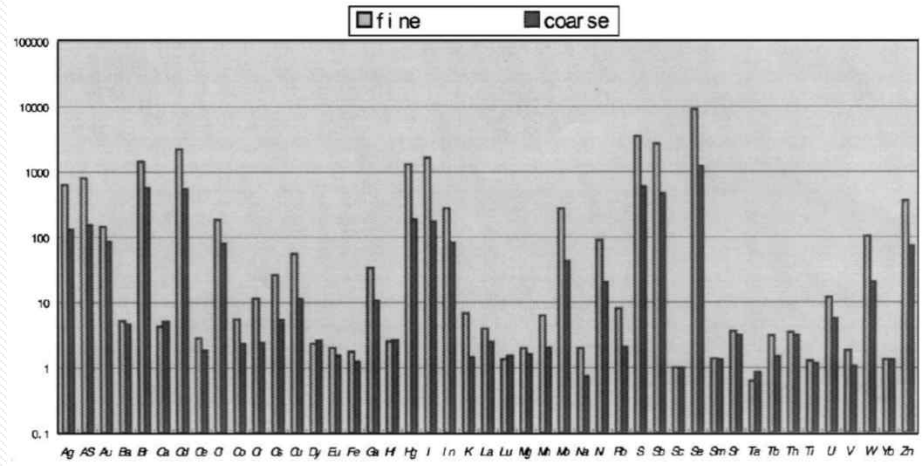
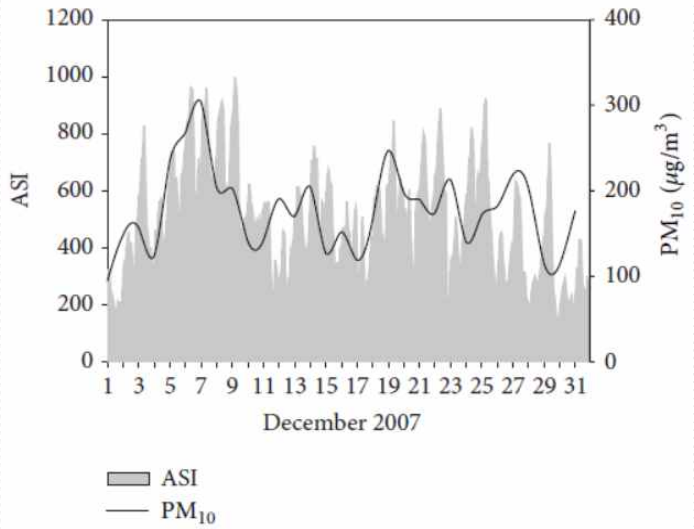


Fig. 2. Enrichment factors of 45 elements for fine and coarse particles, in logarithm.

<베이징 미세먼지 방사화분석, 중국>

미세먼지 내 방사능 연구 필요

방사성 물질 이용 오염원 평가 연구



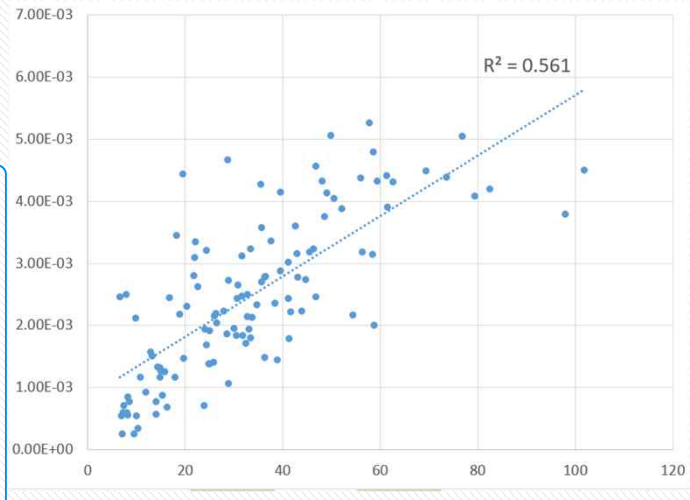
<PM 10내 라돈 농도 연구, 중국>

- 미세먼지 농도 증가는 자연에 존재하는 환경 방사능의 증가를 야기
- 환경 방사능을 이용해 미세먼지 분석 가능

※ 대기 정체에 따라 라돈과 함께 미세먼지 증가

- 장거리 이동 미세먼지는 주로 상승 -> 고 고도 이동 -> 하강 매커니즘을 가짐
- Be-7은 고 고도에서발생해서 지상 관측되는 환경 방사능 물질임

※ Be-7 으로 장거리 이동 미세먼지 모니터링 가능



<Be-7과 미세먼지간의 상관 관계>

연구목표

미세먼지 오염원 평가 및 모니터링 기술 개발

국외 발 미세먼지를 중심으로

종합 성분 분석 기반

방사화 분석 시설 이용 연구

- 방사화분석 이용 미세먼지 성분 분석
- 시료 내 방사능 분석
- 성분 정보에 기반한 역학 분석

모니터링

- 방사선량률 이용
- 자동 감시망 이용

오염원 분석

- 천연 방사성 물질 이용
- 오염원 평가

세부과제 개요

❖ 과제명 : 중성자 방사화 분석 이용 미세먼지 오염원 평가기술 개발(제2세부)

❖ 과제책임자 : 김지석 (한국원자력연구원)

❖ 총 연구기간 : **2018.7.18 ~ 2022.12.31 (총 4.5년)**
2단계 기간 : 2020.1.01 ~ 2022.12.31 (총 36개월)

❖ 총연구비 : **40.51** 억원

❖ **2단계 연구비 및 참여인력 : 31.62** 억원 **/ 19.95 M/Y**

❖ 위탁연구

* 위탁과제명 : 미세먼지 측정소 운영 및 분석 방법론 체계 확립
* 위탁연구책임자 : 김용균 (한양대학교)

Ⅱ. 1차년도 연구개발 수행실적

KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

주요 연구성과

서울 및 대전 지역 미세먼지 측정소 설치

4개 샘플 일간 분석
(PM 2.5, 10 각 1개 X 2개 지역)

- 측정소 위치
  - ✓ 서울시 성동구 한양대학교 토목건축공학관
  - ✓ 대전 유성구 한국원자력연구원 동위원소동
- 측정 주기: 일일 측정 (평일: 1일 간격, 주말:1회 측정)
- 포집기 모델: HiVol-3000 with PM10 and PM2.5 inlet

주요 연구성과

서울 및 대전 지역 미세먼치 측정소 운영

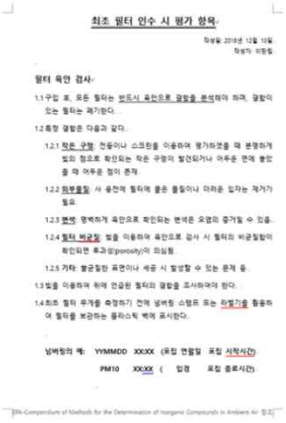
- 측정소 시험 운영: 1 개월 (측정소 운영 관련 절차 마련 및 NAA 분석 테스트 시료 수집)
- 측정소 정식 운영: 9개월 (운영 시작일 2019년 3월 – 현재)

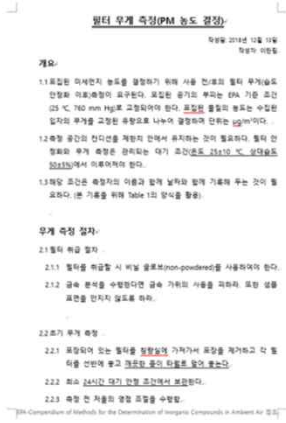
서울 지역 미세먼지 측정소 운영 일지

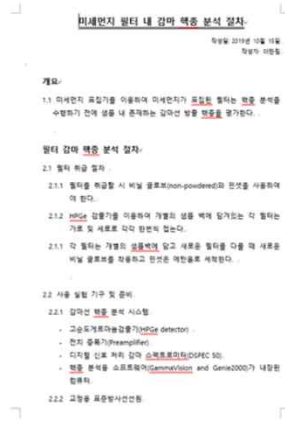
대전 지역 미세먼지 측정소 운영 일지

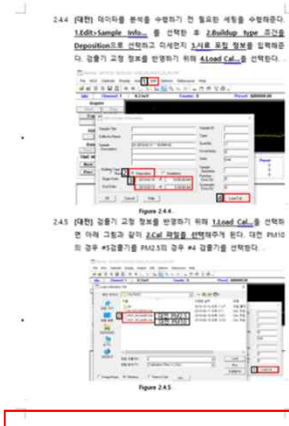
주요 연구성과

측정소 운영 및 작업 절차서 마련

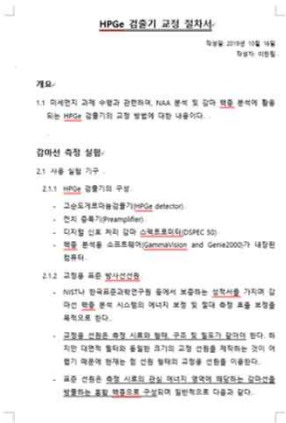

최초 필터 인수 시 평가 항목

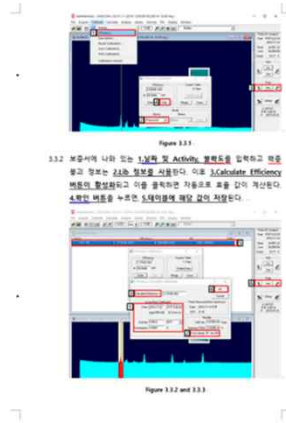

필터 무게 측정(PM 농도 결정)

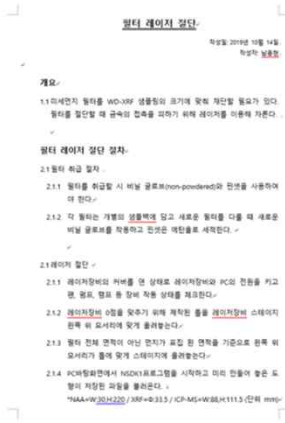

미세먼지 필터 내 감마 핵종 분석 절차

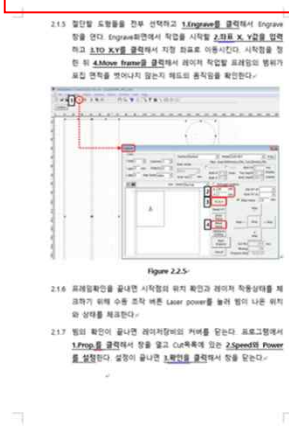


국가 재난 매뉴얼 신청


HPGe 검출기 교정 절차서

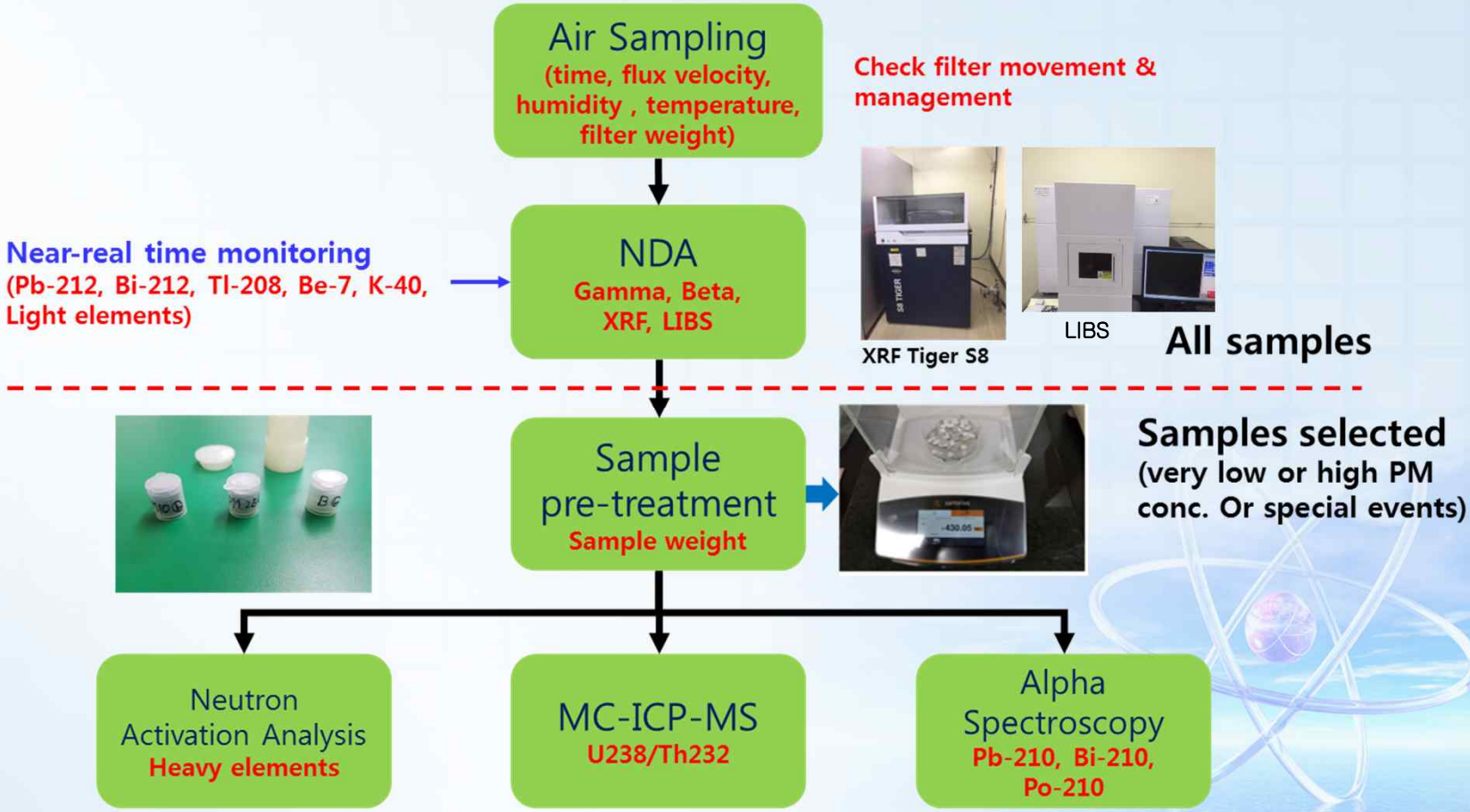



필터 레이저 절단



주요 연구성과

종합 성분 분석 절차 확립



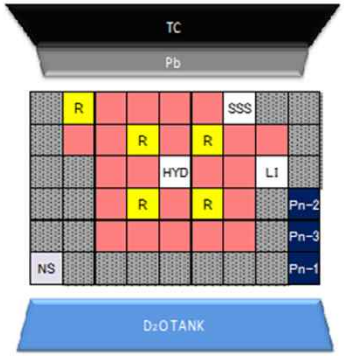
Ⅲ. 2차년도 연구개발 수행실적

KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

주요 연구성과

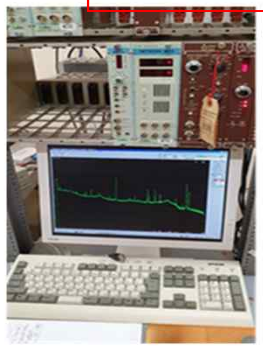
서울 및 대전 지역 미세먼지 방사화 분석

31개 핵종 분석 성공



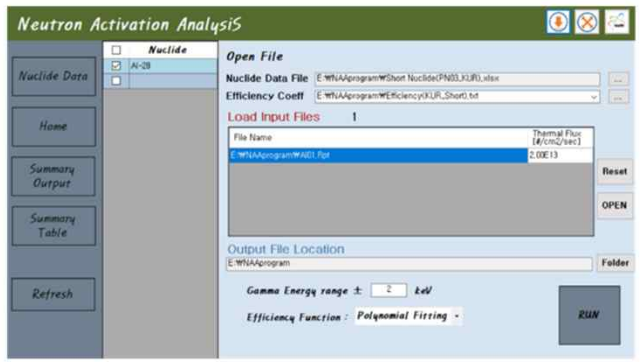
교토 대학교 연구로 노심

교토 대학교 연구용 원자로의 NAA용 공압이송시스템



방사화 분석을 위한 교토 대학교 HPGe 감마선 분석 시스템

방사화 분석를 위한 조사 준비 중인 에어로졸 시료의 모습



방사화 핵종의 정량 분석을 위한 프로그램의 모습

주요 연구성과

미세먼지 방사화 분석 결과

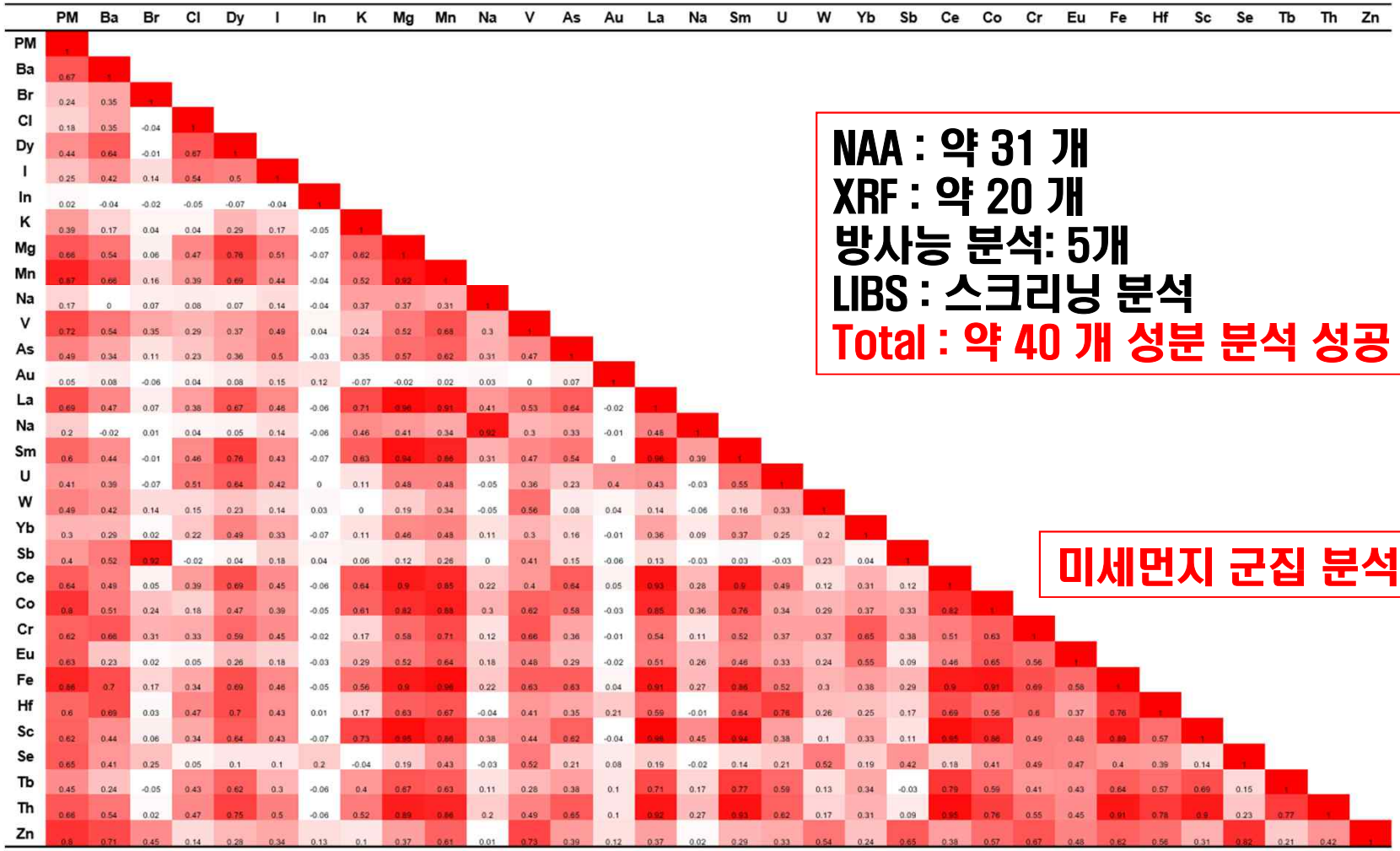
서울 지역 PM2.5 원소의 함량 (ng/m³)

PM	Ba	Br	Cl	Dy	I	In	K	Mg	Mn	Na	V	As	Au	La	Na	Sm	U	W	Yb	Sb	Ce	Co	Cr	Eu	Fe	Hf	Sc	Se	Tb	Th	Zn
21.2	21.7	11.7	464.0	0.3	7.9	0.0	574.1	84.0	23.9	617.7	3.2	2.6	0.0	0.8	596.6	0.2	0.9	1.2	0.0	6.2	2.1	0.4	6.3	0.0	967.1	0.7	0.1	2.4	0.1	0.5	80.8
18.7	52.8	12.0	460.5	0.3	29.8	0.3	1084.2	822.3	36.6	0.0	7.4	8.2	0.0	1.3	10.6	0.3	0.5	1.0	0.1	5.9	2.4	0.5	6.5	0.1	1602.6	0.8	0.3	1.2	0.1	0.4	135.0
29.3	87.0	14.8	508.6	0.5	20.4	0.1	2455.8	2114.5	96.6	973.4	14.3	11.1	0.0	3.8	986.7	0.7	0.8	1.3	0.2	6.4	6.6	1.5	12.6	0.1	3869.6	0.9	1.0	3.1	0.1	1.3	145.9
12.0	93.4	14.1	676.3	0.5	28.5	0.1	1463.1	1587.2	80.3	912.7	12.4	5.6	0.0	3.2	875.8	0.6	0.6	2.0	0.1	9.3	6.2	1.3	11.2	0.1	3464.3	0.9	0.8	1.0	0.2	1.2	139.1
44.4	68.6	99.5	321.0	0.2	20.6	0.2	1438.2	1068.5	59.4	622.1	16.8	7.0	0.0	2.0	643.3	0.3	0.3	2.1	0.0	33.3	3.1	1.0	10.0	0.1	2323.3	0.5	0.4	4.8	0.1	0.6	236.7
10.1	51.0	15.8	426.6	0.4	14.2	0.0	1731.4	1048.3	43.9	208.8	5.7	5.9	0.0	2.4	300.5	0.5	0.7	1.6	0.2	5.9	3.5	0.7	15.1	0.1	2385.7	0.9	0.5	1.6	0.0	1.0	68.3
17.8	71.6	26.8	706.5	0.4	35.2	0.1	1460.8	1579.3	73.7	909.2	18.5	9.4	0.0	2.9	927.8	0.5	0.7	1.7	0.1	9.0	4.9	1.1	15.7	0.0	3021.3	0.8	0.6	3.4	0.1	1.0	149.2
16.1	18.9	6.3	60.6	0.0	4.9	0.1	256.5	284.1	16.0	300.0	4.3	6.8	0.0	0.6	297.3	0.1	0.1	0.5	0.0	2.3	0.8	0.2	3.6	0.0	591.9	0.2	0.1	1.2	0.0	0.2	54.0
4.9	20.3	4.5	114.6	0.0	2.4	0.0	430.7	320.8	9.7	629.6	1.3	0.9	0.0	0.6	605.5	0.1	0.1	0.1	0.0	1.7	1.8	0.1	4.7	0.0	547.6	0.3	0.1	0.1	0.1	0.5	18.0
5.7	18.1	4.4	88.9	0.0	2.3	0.0	192.4	164.8	10.4	446.7	1.7	1.2	0.0	0.5	338.9	0.1	0.0	0.2	0.0	1.4	1.0	0.1	4.5	0.0	478.3	0.3	0.1	0.2	0.0	0.2	21.7
4.8	8.6	2.8	104.4	0.0	1.4	0.0	0.0	0.0	5.6	177.9	0.8	0.7	0.0	0.4	219.6	0.1	0.2	0.2	0.0	3.3	0.6	0.2	5.2	0.0	277.7	0.3	0.0	0.3	0.1	0.3	15.3
4.4	11.9	2.4	64.9	0.1	2.9	0.4	0.0	0.0	4.3	76.5	1.4	0.7	0.0	0.2	62.3	0.0	0.1	0.4	0.0	2.6	0.8	0.0	4.4	0.0	163.6	0.1	0.0	0.4	0.0	0.0	32.2
34.5	32.5	17.8	310.9	0.3	14.9	0.2	976.0	451.5	37.4	237.9	17.3	4.4	0.0	1.3	243.9	0.3	0.8	2.8	0.1	5.6	1.6	0.5	8.9	0.1	1388.8	0.6	0.2	3.7	0.2	0.5	117.3
38.8	38.9	19.2	486.1	0.3	12.6	0.4	450.3	704.5	45.5	383.6	13.6	4.9	0.0	1.5	415.5	0.3	0.6	2.0	0.1	7.5	2.6	0.4	9.0	0.0	1911.7	0.6	0.2	5.6	0.2	0.5	159.2
52.5	42.9	20.9	327.0	0.2	11.2	0.2	767.4	702.2	56.6	272.1	11.6	5.4	0.0	1.4	267.0	0.3	0.6	2.2	0.0	7.8	3.2	0.8	10.9	0.0	1945.4	0.5	0.3	5.3	0.0	0.6	173.7
36.6	61.0	14.1	321.6	0.3	7.5	0.1	272.2	1033.3	47.5	434.2	7.6	4.0	0.0	1.7	471.6	0.3	0.7	2.0	0.0	7.4	2.7	1.0	14.0	0.0	2128.5	0.6	0.3	4.2	0.1	0.6	139.3
19.0	30.1	9.0	243.6	0.1	7.6	0.1	482.3	472.1	29.7	551.1	5.1	2.2	0.0	0.9	557.0	0.2	0.2	1.7	0.0	3.9	1.6	0.5	4.9	0.1	1170.3	0.3	0.2	1.8	0.1	0.3	72.5
평균	42.9	17.4	334.5	0.2	13.2	0.1	825.6	731.6	39.8	456.1	8.4	4.8	0.0	1.5	460.0	0.3	0.5	1.4	0.1	7.0	2.7	0.6	8.7	0.0	1661.0	0.5	0.3	2.4	0.1	0.6	103.4

- 대기환경보전법상의 유해물질 중 원소 성분
  - Al, As, Ba, Br, Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sb, Se, Sn, Te, V, Zn
  - 환경부 상시 측정 중금속: 14종 - NAA분석에 의한 측정 중금속: 23종
- Br : 자동차 관련 오염원 마커, V : 화력 발전 오염원 마커, U, Th : 황사 관련 마커

주요 연구성과

미세먼지 상관도 분석



	PM	Ba	Br	Cl	Dy	I	In	K	Mg	Mn	Na	V	As	Au	La	Na	Sm	U	W	Yb	Sb	Ce	Co	Cr	Eu	Fe	Hf	Sc	Se	Tb	Th	Zn
PM	1																															
Ba	0.67	1																														
Br	0.24	0.35	1																													
Cl	0.18	0.35	-0.04	1																												
Dy	0.44	0.64	-0.01	0.67	1																											
I	0.25	0.42	0.14	0.54	0.5	1																										
In	0.02	-0.04	-0.02	-0.05	-0.07	-0.04	1																									
K	0.39	0.17	0.04	0.04	0.29	0.17	-0.05	1																								
Mg	0.66	0.54	0.06	0.47	0.76	0.51	-0.07	0.62	1																							
Mn	0.67	0.66	0.16	0.39	0.69	0.44	-0.04	0.52	0.92	1																						
Na	0.17	0	0.07	0.08	0.07	0.14	-0.04	0.37	0.37	0.31	1																					
V	0.72	0.54	0.35	0.29	0.37	0.49	0.04	0.24	0.52	0.68	0.3	1																				
As	0.49	0.34	0.11	0.23	0.36	0.5	-0.03	0.35	0.57	0.62	0.31	0.47	1																			
Au	0.05	0.08	-0.06	0.04	0.08	0.15	0.12	-0.07	-0.02	0.02	0.03	0	0.07	1																		
La	0.69	0.47	0.07	0.38	0.67	0.48	-0.06	0.71	0.96	0.91	0.41	0.53	0.64	-0.02	1																	
Na	0.2	-0.02	0.01	0.04	0.05	0.14	-0.06	0.46	0.41	0.34	0.92	0.3	0.33	-0.01	0.48	1																
Sm	0.6	0.44	-0.01	0.46	0.76	0.43	-0.07	0.63	0.94	0.86	0.31	0.47	0.54	0	0.96	0.39	1															
U	0.41	0.39	-0.07	0.51	0.64	0.42	0	0.11	0.48	0.48	-0.05	0.36	0.23	0.4	0.43	-0.03	0.55	1														
W	0.49	0.42	0.14	0.15	0.23	0.14	0.03	0	0.19	0.34	-0.05	0.56	0.08	0.04	0.14	-0.06	0.16	0.33	1													
Yb	0.3	0.29	0.02	0.22	0.49	0.33	-0.07	0.11	0.46	0.48	0.11	0.3	0.16	-0.01	0.36	0.09	0.37	0.25	0.2	1												
Sb	0.4	0.52	0.92	-0.02	0.04	0.18	0.04	0.06	0.12	0.26	0	0.41	0.15	-0.06	0.13	-0.03	0.03	-0.03	0.23	0.04	1											
Ce	0.64	0.49	0.05	0.39	0.69	0.45	-0.06	0.64	0.9	0.85	0.22	0.4	0.64	0.05	0.93	0.28	0.9	0.49	0.12	0.31	0.12	1										
Co	0.8	0.51	0.24	0.18	0.47	0.39	-0.05	0.61	0.82	0.88	0.3	0.62	0.58	-0.03	0.85	0.36	0.76	0.34	0.29	0.37	0.33	0.82	1									
Cr	0.62	0.68	0.31	0.33	0.59	0.45	-0.02	0.17	0.58	0.71	0.12	0.66	0.36	-0.01	0.54	0.11	0.52	0.37	0.37	0.65	0.38	0.51	0.63	1								
Eu	0.63	0.23	0.02	0.05	0.26	0.18	-0.03	0.29	0.52	0.64	0.18	0.48	0.29	-0.02	0.51	0.26	0.46	0.33	0.24	0.55	0.09	0.46	0.65	0.56	1							
Fe	0.86	0.7	0.17	0.34	0.69	0.48	-0.05	0.56	0.9	0.96	0.22	0.63	0.63	0.04	0.91	0.27	0.86	0.52	0.3	0.38	0.29	0.9	0.91	0.69	0.58	1						
Hf	0.6	0.69	0.03	0.47	0.7	0.43	0.01	0.17	0.63	0.67	-0.04	0.41	0.35	0.21	0.59	-0.01	0.64	0.78	0.26	0.25	0.17	0.69	0.56	0.6	0.37	0.76	1					
Sc	0.62	0.44	0.06	0.34	0.64	0.43	-0.07	0.73	0.95	0.86	0.38	0.44	0.62	-0.04	0.98	0.45	0.94	0.38	0.1	0.33	0.11	0.95	0.86	0.49	0.48	0.89	0.57	1				
Se	0.65	0.41	0.25	0.05	0.1	0.1	0.2	-0.04	0.19	0.43	-0.03	0.52	0.21	0.08	0.19	-0.02	0.14	0.21	0.52	0.19	0.42	0.18	0.41	0.49	0.47	0.4	0.39	0.14	1			
Tb	0.45	0.24	-0.05	0.43	0.62	0.3	-0.06	0.4	0.67	0.63	0.11	0.28	0.38	0.1	0.71	0.17	0.77	0.59	0.13	0.34	-0.03	0.79	0.59	0.41	0.43	0.64	0.57	0.69	0.15	1		
Th	0.66	0.54	0.02	0.47	0.75	0.5	-0.06	0.52	0.89	0.86	0.2	0.49	0.65	0.1	0.92	0.27	0.93	0.62	0.17	0.31	0.09	0.95	0.76	0.55	0.45	0.91	0.78	0.9	0.23	0.77	1	
Zn	0.8	0.71	0.45	0.14	0.28	0.34	0.13	0.1	0.37	0.61	0.01	0.73	0.39	0.12	0.37	0.02	0.29	0.33	0.54	0.24	0.65	0.38	0.57	0.67	0.48	0.82	0.56	0.31	0.82	0.21	0.42	1

NAA : 약 31 개
XRF : 약 20 개
방사능 분석: 5개
LIBS : 스크리닝 분석
Total : 약 40 개 성분 분석 성공

미세먼지 군집 분석

주요 연구성과

해외 분석 기관과의 협력 체계 구축

- 분석 신뢰도 향상을 위해 Oregon State University의 Radiation Center와 분석 협력 체계 구축
- 대전 측정소에서 포집한 98개의 미세먼지 시료(PM10 및 PM2.5 각각 49개 시료)에 대해 방사화 분석을 수행하였음

비교 검증 & 공신력 강화

(단위:ng/m³)

	Al	Cl	Mn	Ca	Ti	V	In	I	Ba	Dy
1	3885.47	243.14	29.18	638.65	87.93	5.83		7.10	6.45	0.35
2	2477.17	86.50	35.91	603.76	102.22	6.75	0.08	9.24	5.53	0.25
3	2833.35	342.75	27.33	175.13	84.68	12.39	0.09	8.37		0.11
4	3116.34	273.67	15.99		0.00	10.07	0.02	7.06	4.80	0.37
5	2793.01	401.66	35.47		56.89	11.50	0.10	11.29	6.81	0.21
6	2164.82	181.49	21.70	61.90	40.90	5.16	0.08	5.58	5.60	0.22
7	815.61	43.04	7.53	36.51	10.71	1.82	0.16	1.20	2.24	0.05
8	2390.00	130.69	10.86	41.29	36.05	1.88	0.03	3.30	2.64	0.22
9	2798.90	125.39	21.65	238.32	57.75	5.08	0.01	4.56		0.35
10	2583.68	109.83	26.51	338.27	60.62	5.91		4.24	23.68	0.26
11	2449.04	237.92	43.65	874.30	103.38	11.01	0.02	4.97	7.64	0.33
12	2168.19	126.50	41.90	1049.14	70.43	6.28	0.27	3.53	14.51	0.19
13	1586.75	609.93	4.27		0.00	1.87		1.23		0.06
14	1787.15	53.38	7.64	38.46	32.39	4.37		3.14	8.53	0.12
15	1550.27	98.99	17.97	274.57	52.53	5.73	0.02	3.62	2.65	0.13
16	870.45	50.50	10.25	85.99	26.81	3.76	0.05	4.04	4.80	0.08
17	2230.50	218.44	34.69	575.79	79.95	8.01	0.23	4.63	10.03	0.17
18	1317.74	74.40	15.60	40.74	39.09	3.90	0.05	2.74		0.07
19	789.20	26.30	5.24		8.42	1.34		1.16	11.84	0.09
20	1940.06	19.10			0.00	0.42		0.45		0.19
21	1772.06	168.00	7.54		0.00	6.05	0.06	3.31		0.22
22	1233.68	75.71	11.63	126.05	40.58	4.05	0.03	5.12		0.13
23	1020.68	162.97	18.28	93.52	0.00	4.76	0.06	6.47	6.29	
24	622.88	51.87	14.70	84.10	41.30	4.84	0.09	3.34	8.97	
25	1054.03	59.85	6.66		0.00	1.77	0.11	1.92		

	Al	Cl	Mn	Ca	Ti	V	In	I	Ba	Dy
26	715.65	202.53	10.51		0.00	5.51	0.03	1.42	11.45	0.07
27	746.53	165.39	17.58	117.67	57.35	6.94	0.02	3.54	14.76	0.14
28	813.71	187.02	22.31		78.64	7.58	0.04	4.22	10.48	0.14
29	434.66	20.02	11.61	139.50	40.41	4.16	0.13	2.52	3.29	0.02
30	208.00	58.00	10.45	55.27	32.74	6.48	0.16	6.95	15.40	0.09
31	197.76	43.71	16.53		0.00	5.67	0.03	9.03	1.67	
32	132.73	93.33	10.65		83.89	2.67	0.06	1.28		0.21
33	414.74	67.85	3.91		0.00	2.64	0.02	1.63		
34	178.81	44.58	12.04	22.87	16.47	7.83	0.04	2.31	2.84	0.02
35	489.98	38.03	7.13		0.00	4.91	0.00	3.94	4.17	0.07
36	666.71	84.84	8.79		0.00	6.24		3.98		
37	770.96	85.98	22.67	195.52	0.00	9.47	0.23	6.24		0.07
38	680.08	68.63	17.80		42.34	10.63	0.04	8.11	11.99	0.00
39	176.14	28.18	9.00	117.21	9.37	3.13	0.28	2.40	10.08	0.05
40	192.57	38.52	2.05		0.00		0.03	0.95	9.16	
41	1442.58	42.31	2.91		0.00	0.43	0.10	0.92	22.99	
42	1128.69	28.22	3.25		0.00		0.02	2.53	10.99	0.11
43	945.45	59.94	7.19		0.00	1.61	0.05	3.16		0.30
44	388.97	99.71	11.29	49.71	24.10	5.72	0.13	2.57	6.82	0.03
45	1294.72	112.51	14.01		0.00	1.51	0.11	2.19	19.21	
46	674.93	70.71	14.57		0.00	3.68	0.07	1.98	0.10	0.27
47	188.66	110.32	17.16	3.96	0.00	5.14	0.09	2.06		0.13
48	445.80	61.12	10.07		0.00	0.66	0.10	0.58		0.08
49	563.48	59.24	6.23		0.00	1.19	0.58	0.13		

주요 연구성과

서울 및 대전 지역 미세먼지 성분 원소 농축 계수 평가

$$\text{Enrichment Factor} = \frac{\text{Element 대기중 농도/Sc 대기중 농도}}{\text{Mason의 원소 별 지각 농도/ Sc 지각 농도}}$$

	EF (PM2.5)		EF (PM10)	
	서울	대전	서울	대전
Al	2	2	2	1
Ba	7	5	10	5
Br	**492**	**617**	**395**	**490**
Cl	**182**	**488**	**166**	**648**
Dy	5	2	5	1
I	**1865**	**2975**	**1447**	**2172**
In	**111**	**123**	**89**	**96**
K	3	3	2	3
Mg	3	3	3	3
Mn	3	4	3	3
Na	1	3	1	4
V	4	5	4	4
As	**188**	**329**	**177**	**326**
La	4	3	3	3
U	**19**	**10**	**17**	**7**
Ce	3	2	3	3
Cr	6	7	6	6
Fe	2	2	3	2
Hf	13	4	15	4
Se	**3348**	**7973**	**3084**	**5626**
Tb	7	3	6	3
Th	6	3	6	4
Zn	**104**	**127**	**102**	**117**

- 자동차 지표 원소인 Br과 Zn의 경우 농축 계수가 100배 이상 높았으며, 이를 통해 외부 유입원이 주요 방출 요인으로 평가함
- 디젤차를 포함하는 도로 이동 오염원이 주 배출원인 I, In도 농축 계수가 높은 것을 확인
- 화석 연료의 배출원 추적 인자인 As과 Se의 경우에도 농축 계수가 높았으며, 외부 기여가 높음을 확인
- 소각로 지표 원소인 Cl 원소도 높은 농축 계수를 가짐을 확인하였으며, 외부 기여가 높음을 확인

인공적인 먼지 구분

주요 연구성과

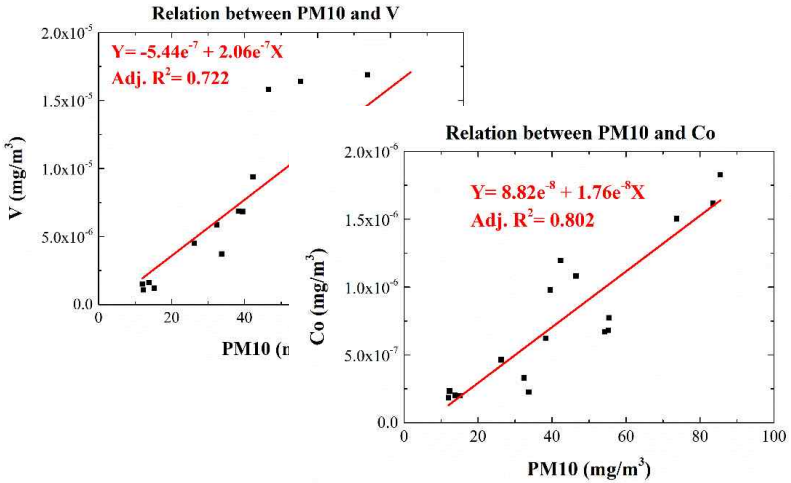
미세먼지 농도와 구성 원소와의 연관성 평가

- 서울 성동구 PM10 농도와 각 원소 함량과의 상관도 분석 수행

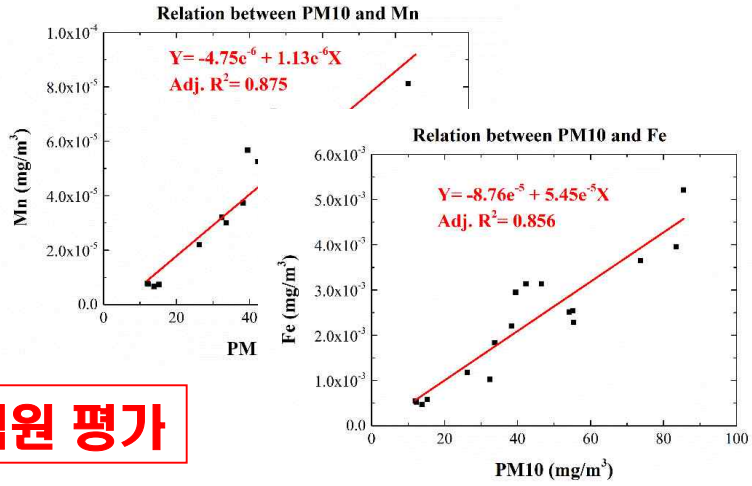
Br	Cl	Dy	I	In	K	Mg	Mn	V	Zn	Ba	Ce	Co	Cr	Eu	Th
0.24	0.18	0.19	0.25	0.02	**0.53**	**0.62**	**0.87**	**0.72**	**0.80**	0.48	**0.64**	**0.80**	**0.62**	**0.64**	**0.66**

Fe	Hf	Sc	Se	Tb	As	Au	La	Mo	Na	Sm	U	W	Yb	Sb
0.86	**0.60**	**0.62**	**0.65**	0.43	0.49	0.05	**0.69**	0.23	0.20	**0.60**	0.41	0.49	0.17	0.40

- 중유 연소(디젤, 보일러, 발전 등)와 관련된 V 및 Co원소와 높은 상관도를 가짐



- 자동차와 도로 오염원, 철강산업과 관련된 Fe 및 Mn 원소와 높은 상관도를 가짐



오염원 평가

주요 연구성과

금속 가공 작업장 오염원 특성 평가

- 목적: 금속 가공을 수행하는 작업장에서 발생하는 미세먼지의 성분 특성 확인
- 작업장 위치: 대전시 유성구 대덕대로 989번길 111 한국원자력연구원 공작실
- 수행 작업 내용: 금속 용접, CNC 밀링 작업, 금속 파우더 공정 등
- 포집 입경: PM10 및 PM2.5 (이동형 포집기를 활용하여 24시간 측정 수행)

주요 연구성과

작업장 오염원 성분 분석

PM10 분석 결과

원소	함량 (PPM)	정량한계 (PPM)	시험방법	원소	함량 (PPM)	정량한계 (PPM)	시험방법
Al	404.5	50	ICP-AES	Hg	불검출	5	ICP-MS
As	17.4	5	ICP-MS	Mg	153.53	50	ICP-AES
Ba	23	5	ICP-MS	Mn	37.6	5	ICP-MS
Ca	36.2	5	ICP-MS	Na	540.29	50	ICP-AES
Cd	불검출	5	ICP-MS	Ni	11.4	5	ICP-MS
Co	불검출	5	ICP-MS	Pb	68.1	5	ICP-MS
Cr	9.05	5	ICP-MS	Sb	7.2	5	ICP-MS
Cu	37.3	5	ICP-MS	Sr	불검출	5	ICP-MS
Fe	16,793.73	*	ICP-AES	Ti	28.9	5	ICP-MS
K	500	50	ICP-AES	V	11.5	5	ICP-MS
Li	50.6	5	ICP-MS	Zn	190	50	ICP-AES

PM2.5 분석 결과

원소	함량 (PPM)	정량한계 (PPM)	시험방법	원소	함량 (PPM)	정량한계 (PPM)	시험방법
Al	75.7	50	ICP-AES	Hg	불검출	5	ICP-MS
As	14.5	5	ICP-MS	Mg	40.53	5	ICP-MS
Ba	7.78	5	ICP-MS	Mn	23.3	5	ICP-MS
Ca	16.1	5	ICP-MS	Na	220.29	50	ICP-AES
Cd	불검출	5	ICP-MS	Ni	6.39	5	ICP-MS
Co	불검출	5	ICP-MS	Pb	43.4	5	ICP-MS
Cr	불검출	5	ICP-MS	Sb	불검출	5	ICP-MS
Cu	20.6	5	ICP-MS	Sr	불검출	5	ICP-MS
Fe	633.73	50	ICP-AES	Ti	7.77	5	ICP-MS
K	300	50	ICP-AES	V	13.1	5	ICP-MS
Li	18.4	5	ICP-MS	Zn	130	50	ICP-AES

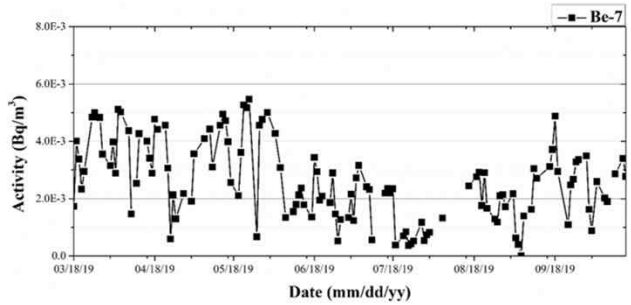
- PM10 및 PM2.5의 시료 분석 결과 As, Ba, Fe 및 Pb 등의 독성 원소가 크게 증가한 것을 확인함
- 일반적으로 PM2.5 영역에 존재한다고 알려진 As와 V는 이번 측정에서도 대부분 PM2.5 영역에서 대부분의 양 차지하는 것을 확인
- ICP 분석의 경우 정량 한계(> 5 PPM)가 높아 추후 NAA 분석을 위한 추가 분석이 필요함

더 많은 작업자들이 공기질 문제를 겪고 있을 것으로 예상

주요 연구성과

평가지표: ① 연구목표 달성도
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

감마 핵종 분석 연속 자료 생성



Be-7 (우주선 기원) 방사능 시계열

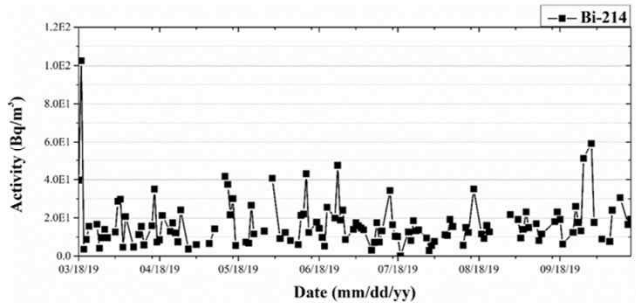
5개 핵종 분석

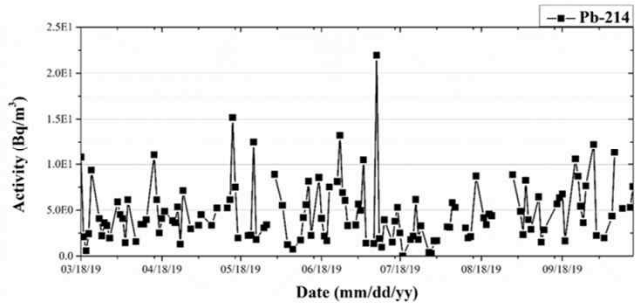
Bi-214 (U 계열) 방사능 시계열

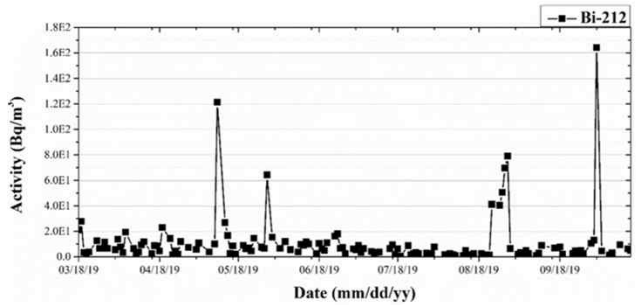
Pb-214 (U 계열) 방사능 시계열

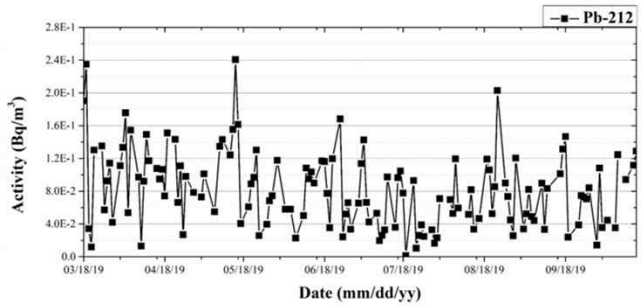
Bi-212 (Th 계열) 방사능 시계열

Pb-212 (Th 계열) 방사능 시계열







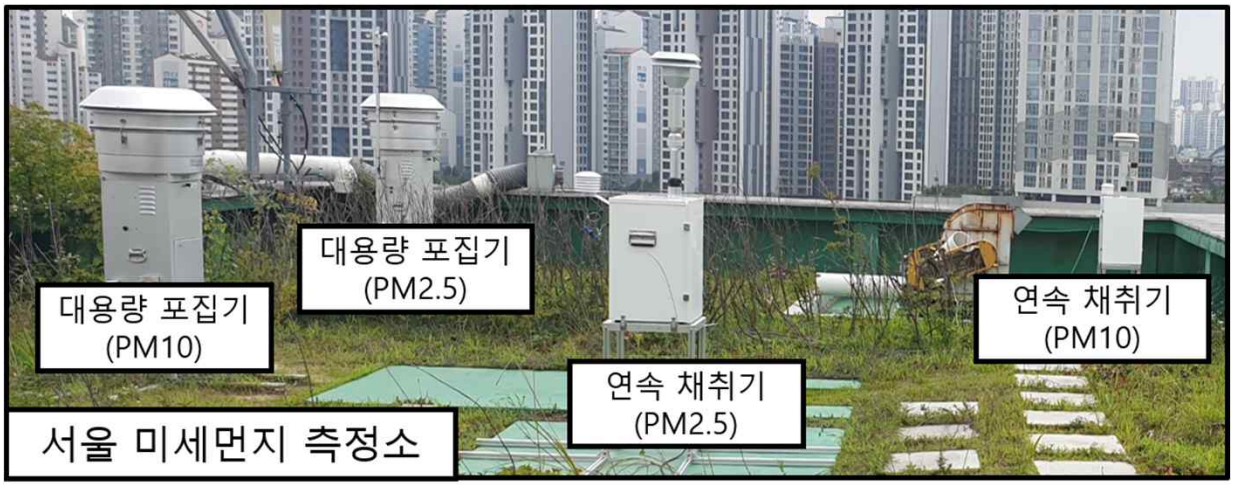


Ⅳ. 3차년도 연구개발 수행실적

KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

주요 연구성과

일별 성분 자료 생성을 위한 연속 채취기 추가 도입



- 측정 주기: 일일 측정 [평일 및 주말: 1일 간격]
  - 채취 주기: 24 시간
- 낮은 분석 감도를 위한 PTFE membrane 필터 적용
- 중량법을 활용하여 PM 농도 평가 자체 수행
- 포집기 모델: FDS-200 with PM10 and PM2.5 inlet

주요 연구성과

신규 도입 연속 채취기 운영 관리

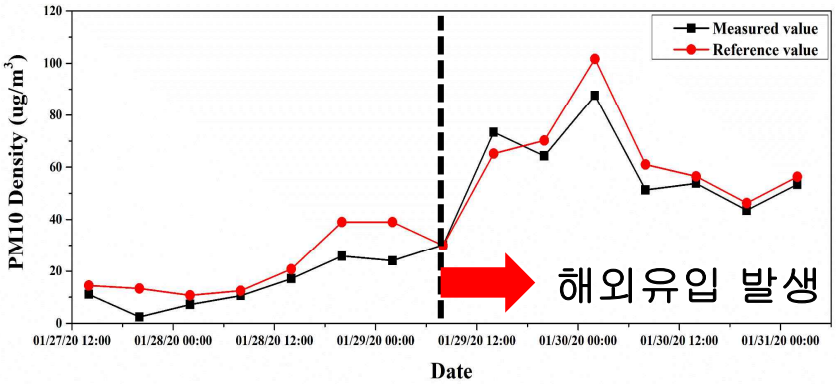
- 대전 측정소 운영: 6 개월 (운영 시작일 2020년 5월 – 현재)
- 서울 측정소 운영: 3 개월 (운영 시작일 2020년 5월 – 현재)
- 핵종 분석 샘플 수집 및 PM 질량 농도 자료 생산(주변 측정소와 비교)

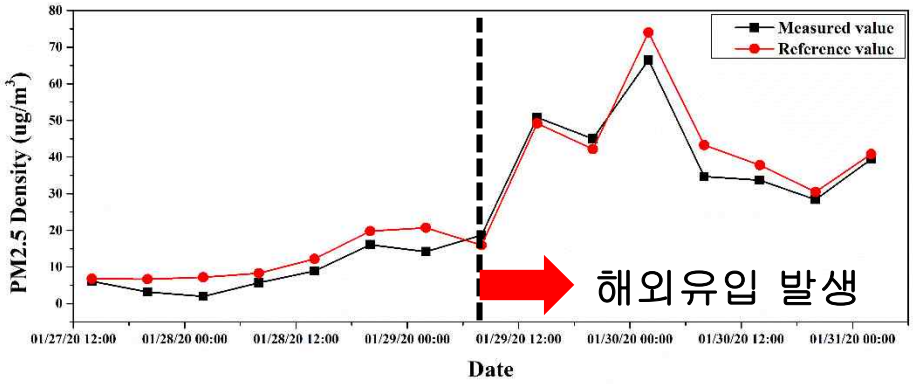
		PM2.5			문평동		구성동			PM10			문평동		구성동		
	2020년	Cor.Volume[m³]	Mass[mg]	PM density[μg/m³]	평균값	표준편차	평균값	표준편차	특이사항	2020년	Cor.Volume[m³]	Mass[mg]	PM density[μg/m³]	평균값	표준편차	평균값	표준편차	특이사항
4. 9	05.07-08	23.844	0.244	10.233	11.7	2.4	7.5	2.5		05.07-08	23.85	0.571	23.941	28.7	14.9	23.8	8.9	
5. 10	05.08-09	23.706	0.333	14.047	17.5	6.8	13.2	7.5		05.08-09	23.721	0.573	24.156	30.9	31.5	23.1	11.4	
6. 11	05.09-10	23.901	0.149	6.234	7.1	4.3	3.3	3.0		05.09-10	23.914	0.247	10.329	7.4	5.5	8.7	5.6	
7. 12	05.10-11	24.039	0.655	27.247	25.7	10.5	19.6	8.2		05.10-11	24.056	1.044	43.399	44.7	26.0	39.2	19.0	
1	05.11-12	23.656	0.644	27.224	24.6	9.0	19.8	7.0		05.11-12	23.673	1.393	58.843	72.2	15.5	70.7	17.0	
2	05.12-13	23.987	0.325	13.549	17.9	4.1	13.0	5.4		05.12-13	24.002	1.059	44.121	50.4	24.3	47.6	24.3	
3	05.13-14	24.081	0.234	9.717	13.8	5.3	9.1	4.3		05.13-14	24.097	0.613	25.439	28.1	7.4	26.0	8.5	
4	05.14-15	23.66	0.404	17.075	21.7	7.1	15.9	6.4		05.14-15	23.674	1.635	69.063	83.8	28.0	75.0	22.0	
5	05.15-16	23.885	0.344	14.402	16.6	5.8	7.0	3.9		05.15-16	23.899	0.527	22.051	13.0	9.5	17.2	10.0	
6	05.16-17	23.714	0.455	19.187	17.7	5.2	13.5	3.6		05.16-17	23.722	0.633	26.684	24.1	8.4	25.5	7.0	
7	05.17-18	23.334	0.568	24.342	30.2	6.7	20.3	7.0		05.17-18	23.338	0.986	42.249	42.0	14.6	35.0	10.5	
8	05.18-19	23.508	0.367	15.612	16.2	10.3	11.0	8.7		05.18-19	23.523	0.646	27.462	27.8	23.3	23.9	14.4	
9	05.19-20	24.106	0.127	5.268	9.1	3.7	4.4	3.1		05.19-20	24.121	0.289	11.981	11.2	10.6	12.0	12.3	
10	05.20-21	24.082	0.184	7.641	11.6	3.7	6.2	3.4		05.20-21	24.093	0.324	13.448	12.3	5.1	11.0	5.2	
11	05.21-22	23.876	0.412	17.256	20.2	4.7	15.7	5.0		05.21-22	23.881	0.633	26.506	30.5	7.1	25.5	5.9	
12	05.22-23	21.787	0.497	22.812	24.7	6.2	18.5	4.6		05.22-23	21.799	0.843	38.671	39.2	8.9	36.9	7.9	
	05.23-24	정전으로 인한 장비 정지								05.23-24	정전으로 인한 장비 정지							
	05.24-25									05.24-25								
13	05.25-26	23.821	1.052	44.163	32.6	11.1	30.4	14.5		05.25-26	23.828	1.430	60.013	64.7	30.0	51.8	28.1	
14	05.26-27	23.623	0.551	23.325	23.4	14.6	19.9	13.5		05.26-27	23.636	0.715	30.250	39.3	22.1	33.3	16.1	
15	05.27-28	23.725	0.542	22.845	24.1	6.9	16.0	9.6		05.27-28	23.731	0.789	33.248	36.5	12.0	25.0	10.3	
16	05.28-29	23.598	0.527	22.332	24.3	8.9	18.5	8.0		05.28-29	23.609	0.773	32.742	43.5	15.9	34.3	8.2	
17	05.29-30	23.642	0.416	17.596	24.3	6.4	20.5	10.4		05.29-30	23.653	0.644	27.227	35.3	10.7	32.3	10.6	
18	05.30-31	23.51	0.630	26.797	30.7	11.1	27.1	8.4		05.30-31	23.523	0.881	37.453	40.8	15.0	38.2	8.4	
19	05.31-01	23.441	0.540	23.037	26.4	10.3	21.5	10.9		05.31-01	23.452	0.688	29.337	31.3	11.9	31.0	13.1	
1	06.01-02	23.627	0.281	11.893	8.4	3.5	5.3	3.0		06.01-02	23.986	0.404	16.843	10.0	5.1	10.3	3.7	
2	06.02-03	23.465	0.367	15.640	19.5	9.9	13.3	7.9		06.02-03	23.985	0.639	26.642	29.4	13.1	28.2	13.4	
3	06.03-04	23.155	0.423	18.268	23.7	6.6	16.0	5.4		06.03-04	23.985	0.884	36.856	45.9	16.1	39.1	14.7	
4	06.04-05	23.075	0.430	18.635	25.2	2.5	20.6	5.1		06.04-05	23.985	1.208	50.365	84.5	30.6	72.4	22.4	
5	06.05-06	23.177	0.591	25.499	34.6	10.0	26.3	5.3		06.05-06	23.984	1.396	58.205	68.6	9.8	76.6	10.3	
6	06.06-07	23.295	0.690	29.620	30.2	11.7	26.6	5.3		06.06-07	23.983	1.505	62.753	66.6	16.3	75.2	3.6	
7	06.07-08	23.361	0.581	24.871	29.7	6.3	32.2	7.3		06.07-08	23.985	1.342	55.952	55.9	16.7	77.0	0.0	에어코리아에 수치 결과값이 없음
8	06.08-09	23.242	0.772	33.216	35.4	7.6	30.0	6.0		06.08-09	23.252	1.453	62.489	72.7	18.7	52.6	15.2	
9	06.09-10	23.131	0.714	30.868	35.9	5.5	34.1	4.2		06.09-10	23.135	1.330	57.489	66.9	10.6	58.1	10.5	
10	06.10-11	23.113	0.375	16.225	20.8	13.9	15.8	12.9		06.10-11	23.121	0.634	27.421	30.8	23.4	28.4	19.5	
11	06.11-12	23.003	0.399	17.346	16.9	7.5	13.4	6.9		06.11-12	23.002	0.700	30.432	31.0	14.0	22.6	9.1	
12	06.12-13	23.228	0.627	26.993	21.9	11.7	18.5	10.0		06.12-13	23.235	0.996	42.866	47.0	25.4	39.5	18.0	
13	06.13-14	23.058	0.111	4.814	4.7	2.3	3.8	3.0		06.13-14	23.058	0.268	11.623	8.3	4.3	9.5	4.0	
14	06.14-15	23.306	0.283	12.143	11.1	6.8	9.6	6.5		06.14-15	23.314	0.607	26.036	22.1	13.9	25.4	12.0	
15	06.15-16	23.306	0.405	17.377	16.8	4.6	13.6	5.2		06.15-16	23.315	0.660	28.308	26.8	10.3	24.7	7.9	
16	06.16-17	23.183	0.634	27.348	28.3	6.6	26.3	5.9		06.16-17	23.19	0.962	41.483	43.2	7.4	47.8	8.1	
17	06.17-18	23.268	0.517	22.219	22.3	5.7	21.0	6.1		06.17-18	23.274	0.777	33.385	34.5	6.9	36.7	10.4	

주요 연구성과

해외 유입 평가를 위한 임시 측정소 운영 (백령도)

- 설치 위치 및 기간
  - ✓백령도 대기집중측정소 인근(직선거리 **1.5 km**)
  - ✓백령도: **2020. 01. 27. ~ 31.**
- 측정 간격: **6**시간
- 이동형 포집기 이용 **PM2.5** 및 **PM10** 포집
- 중량법 활용하여 **PM** 농도 평가
- 측정 중 고농도일 발생, **NAA** 분석 수행 중





주요 연구성과

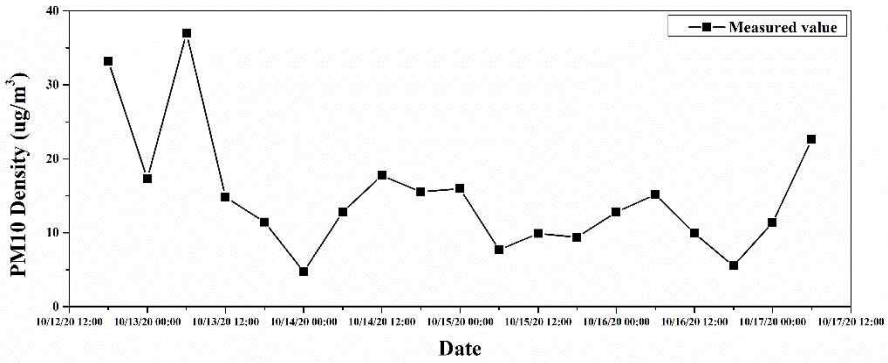
해외 유입 및 국내 배경 준위 평가를 위한 임시 측정소 운영

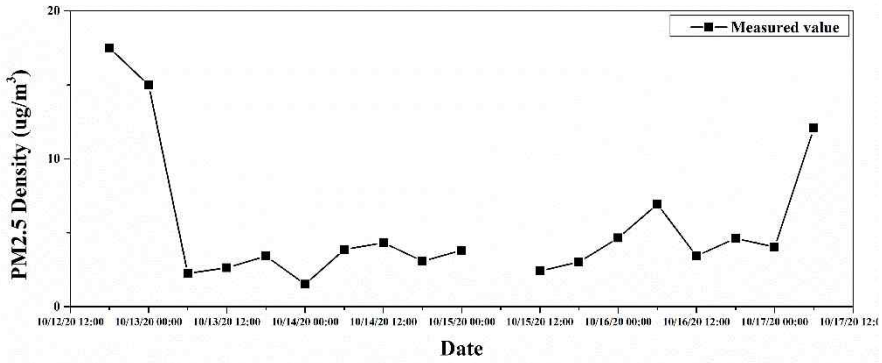
- 설치 위치 및 기간

✓위치: 고산 기상관측소 인근(직선거리 **1.7 km**)

✓기간: **2020. 10. 12. ~ 18.**

- 측정 간격: **6**시간 **(17-18**일 **24**시간 측정**)**
- 이동형 포집기 이용 **PM2.5** 및 **PM10** 포집
- 중량법 활용하여 **PM** 농도 평가
- 측정 중 고농도일 발생, **NAA** 분석 수행 중





주요 연구성과

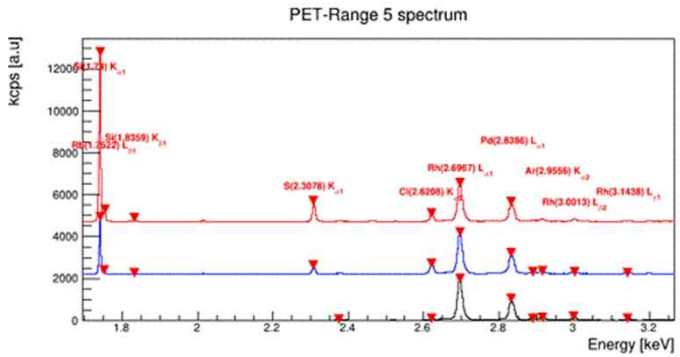
WD-XRF 측정 및 미세먼지 성분 모니터링

WD-XRF로 측정된 약 20개 핵종

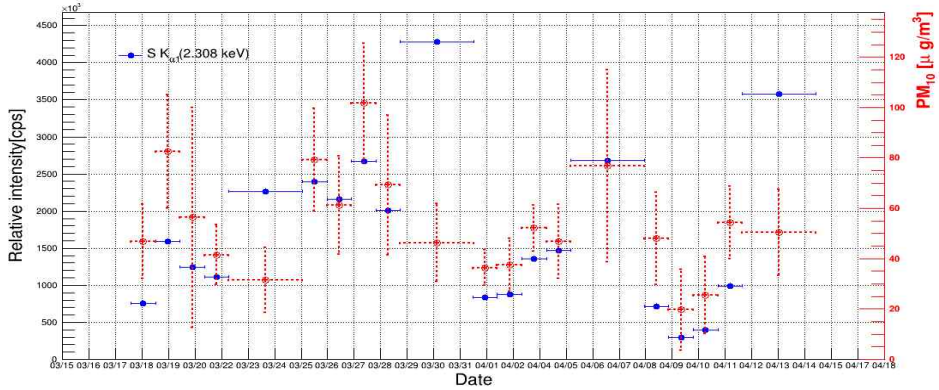
1.74085 keV	Si
5.96219 keV	Cr
2.83345 keV	Cl
2.30808 keV	S
0.881721 keV	Ce
6.40191 keV	Fe
6.64631 keV	Ho
3.69253 keV	Ca
1.48749 keV	Al
3.31491 keV	K
2.01427 keV	P
0.524975 keV	O
2.37612 keV	Mo
1.25509 keV	Mg
2.99968 keV	Ag
2.51695 keV	Tc
4.51227 keV	Ti
3.96042 keV	I
3.1418 keV	Cd

Tiger S8 (Bruker)

• **매일 약 20개 핵종 상시 모니터링 vs. PM 농도**



예) S 원소

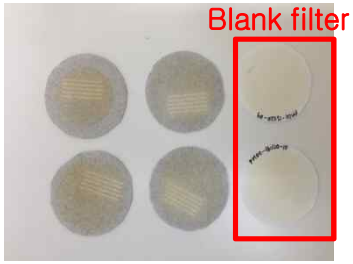


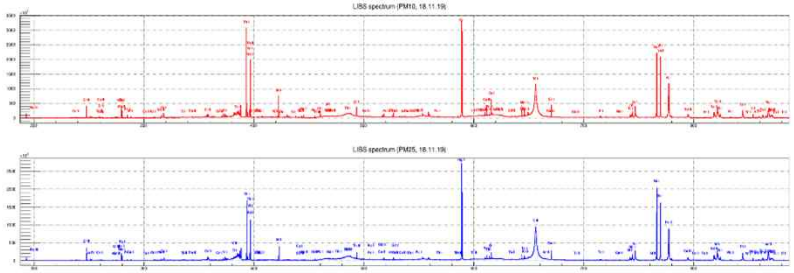
➡ **2019. 3.18~ 현재 측정 데이터 저장 및 분석결과 공유 가능**

주요 연구성과

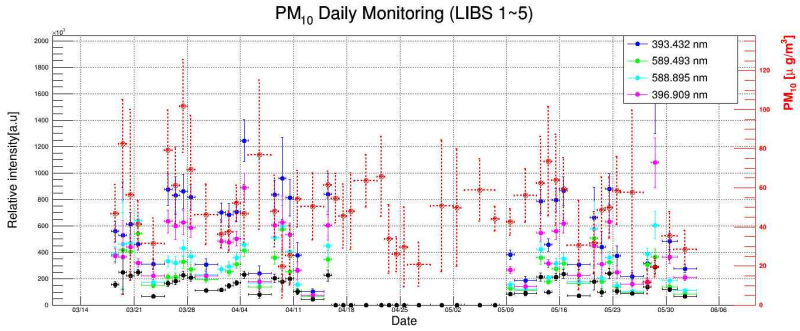
Laser-Induced Breakdown Spectroscopy 분석

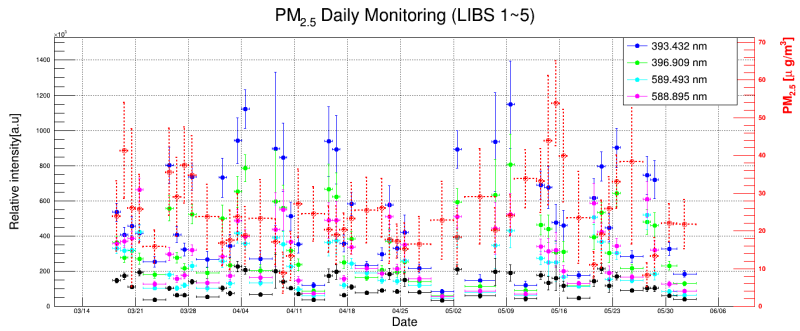
WD-XRF와 유사하게 준실시간 분석이 가능한 플라즈마 분광법
- 다양한 원자분광선이 존재하여 XRF보다 약 2배 가량 많은 원소를 감별 가능





LIBS spectra (PM10, PM2.5)





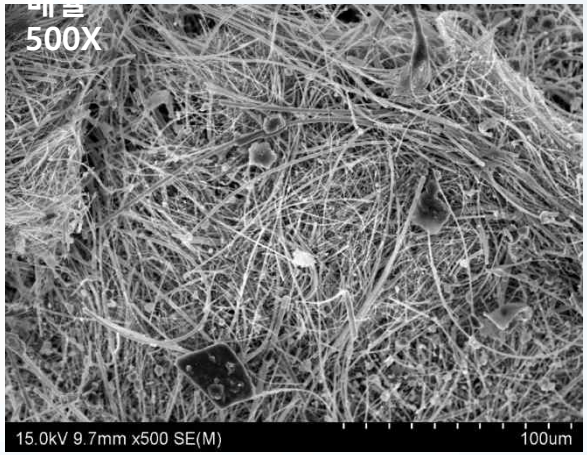
➡ WD-XRF와 LIBS 분석을 통해 다양한 원소들의 함량 변화를 모니터링함

주요 연구성과

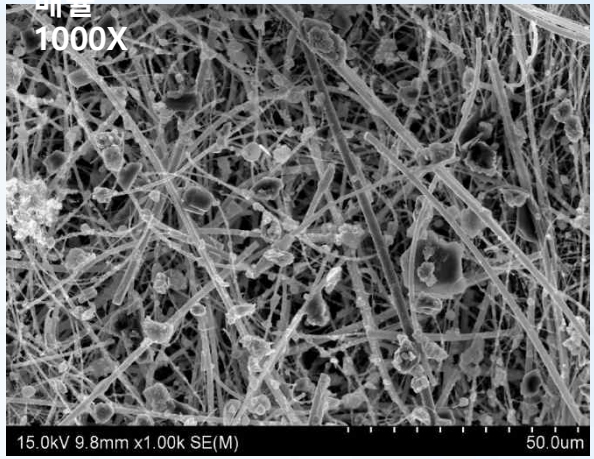
평가지표: ① 연구목표 달성도
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

전자 현미경 이용 입경 분석

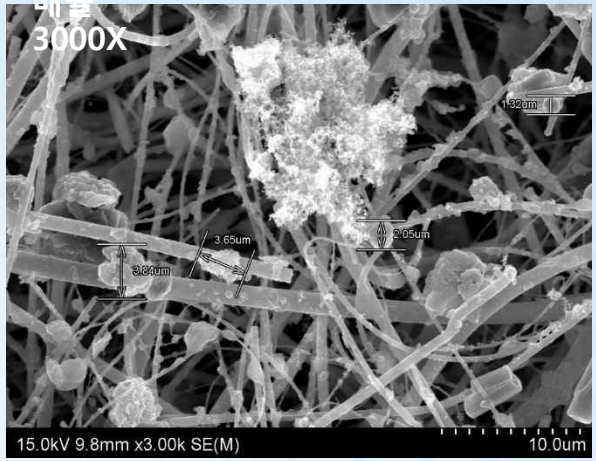
배율 500X



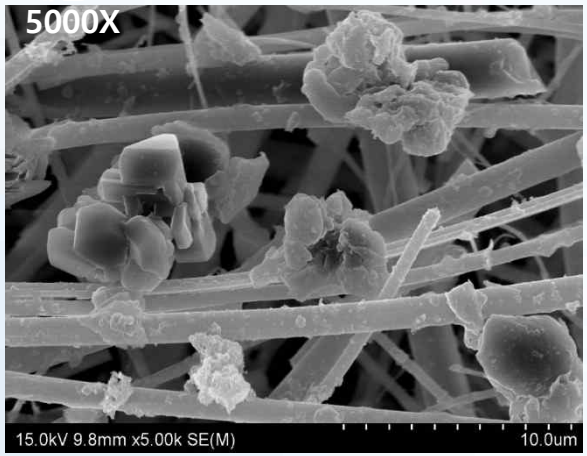
배율 1000X



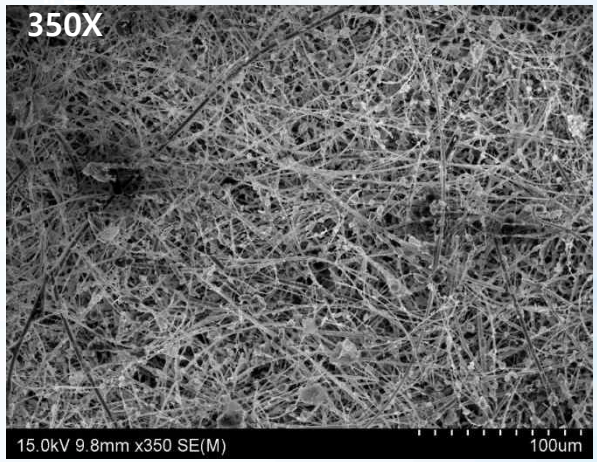
배율 3000X



배율 5000X



배율 350X



FE-SEM 분석 조건

1. 전자빔 가속 에너지 : 15 kV
2. WD(Working distance : 9.8mm
3. Pt coating 15mA , 40sec

주요 연구성과

석영 공 필터 중의 불순물 원소들에 의한 영향 평가

- 실제 미세먼지 시료에서 31종의 원소를 분석함 (2019년 일본 교토대 NAA 분석결과)
- 석영 재질의 공 필터 중에서 22종의 불순물 원소가 검출되었음
- 불순물 원소 및 실제 미세 먼지 중의 원소 함량의 변동에 의하여 정밀도가 변함
- 각 분석원소들에 대한 정밀도(불확도)를 평가하고 분석값의 신뢰도를 추정하였음
- Fe 원소의 경우 : 공 필터 중 함량 1.05E-02 ± 3.53E-03 mg/31.2cm^2, 데이터의 신뢰도 있음

Sample	Division	Mean	SD	Min	Max	Median	Geo Mean	N
Seoul-PM10	Elemental Mass(mg)	2.54E-01	2.12E-01	2.73E-02	9.36E-01	2.17E-01	1.80E-01	17
	Mass concentration(ng/m3)	2.19E+03	1.37E+03	4.44E+02	4.98E+03	2.26E+03	1.70E+03	17
	Uncertainty(%)	3.14	3.56	0.38	12.93	1.63	1.96	17
Seoul-PM2.5	Elemental Mass(mg)	1.90E-01	1.50E-01	1.37E-02	6.03E-01	1.63E-01	1.31E-01	17
	Mass concentration(ng/m3)	1.65E+03	1.12E+03	1.55E+02	3.92E+03	1.61E+03	1.22E+03	17
	Uncertainty(%)	4.72	6.44	0.59	25.82	2.17	2.69	17
Daejeon-PM10	Elemental Mass(mg)	1.59E-01	1.72E-01	4.21E-02	7.78E-01	1.03E-01	1.19E-01	17
	Mass concentration(ng/m3)	1.14E+03	6.06E+02	4.16E+02	2.56E+03	9.32E+02	1.00E+03	17
	Uncertainty(%)	3.64	2.20	0.45	8.40	3.43	2.98	17
Daejeon-PM2.5	Elemental Mass(mg)	1.15E-01	1.40E-01	2.09E-02	6.28E-01	7.09E-02	8.12E-02	17
	Mass concentration(ng/m3)	8.09E+02	5.14E+02	2.05E+02	2.06E+03	6.45E+02	6.92E+02	17
	Uncertainty(%)	5.46	3.74	0.56	16.92	4.99	4.35	17

주요 연구성과

미세먼지 시료의 원소 별 정밀도 수준 및 예상 검출하한

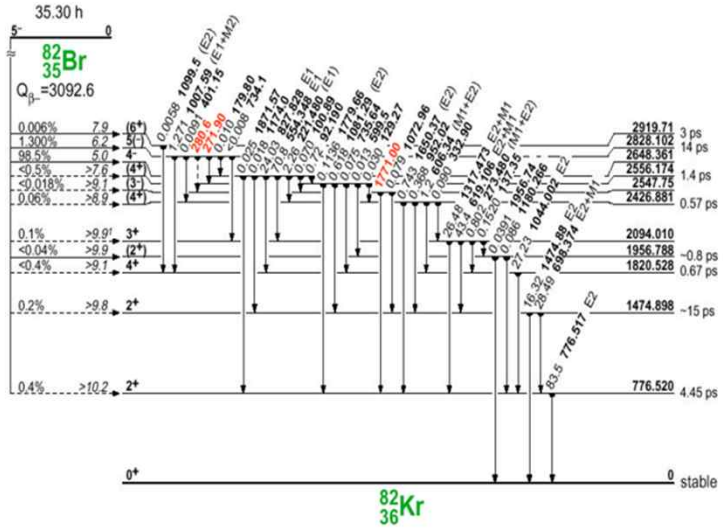
PM10 미세먼지 시료에서 14종의 원소에 대한 결과(Oregon 대학 분석결과 기반)

Element	Concentration in Air(ng/m^3)	Error(%)	Mean Error (%)	Expected DL(ng/m^3)	No. of detection
As	0.49 ~ 9.51	2.31 ~ 9.39	3.59	0.17	49
Br	1.84 ~ 26.8	2.96 ~ 9.85	4.70	0.61	49
Cl	19 ~ 1420	3.60 ~ 41.8	15.1	18	48
Co	0.005 ~ 0.59	3.35 ~ 34.2	13.2	0.005	48
Cr	0.02 ~ 6.49	3.95 ~ 9.0	6.93	0.007	46
Fe	55 ~ 1521	1.60 ~ 20.4	6.68	35	48
I	0.97 ~ 12.7	10.3 ~ 36.8	17.2	0.9	47
In	0.0003 ~ 0.64	5.15 ~ 49.8	14.1	0.003	48
La	0.072 ~ 1.54	1.46 ~ 5.60	3.72	0.03	49
Mn	0.48 ~ 58.8	2.72 ~ 40.8	13.2	0.4	49
Sb	0.04 ~ 4.22	3.04 ~ 18.0	5.05	0.03	49
Sc	0.011 ~ 0.304	1.21 ~ 7.42	3.69	0.003	49
V	0.78 ~ 12.9	2.54 ~ 47.9	8.15	0.7	46
Zn	5.0 ~ 149	1.59 ~ 16.8	5.34	2.5	49

주요 연구성과

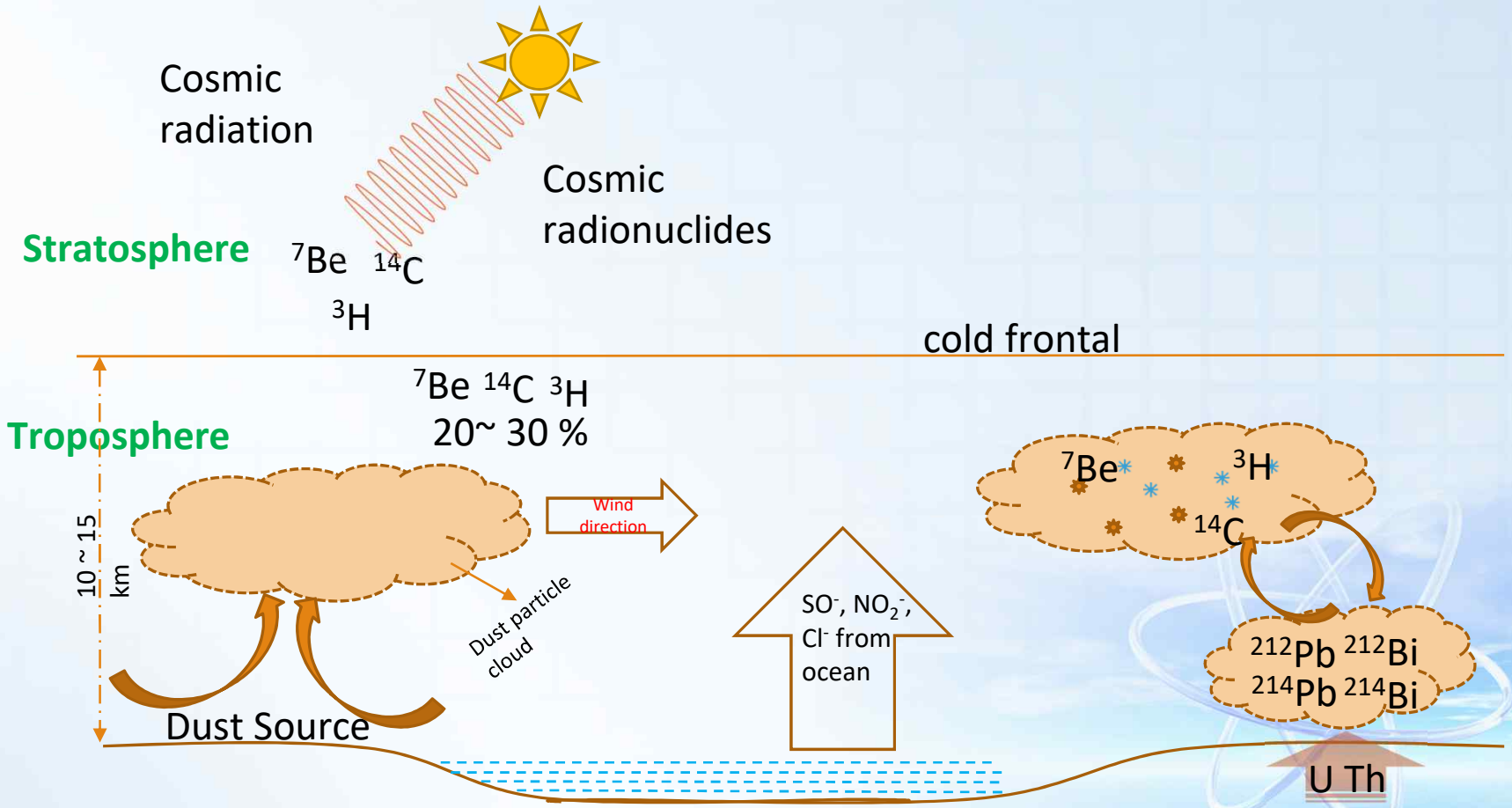
정밀도 및 검출하한 향상을 위한 참동시중첩효과 보정법 확립

- 2020년 부터 low volume 채집기로 미세먼지를 샘플링 하고 있음
- High volume 채집기와 비교하여 채집 시료의 질량이 수십 배 감소하게 됨
- 즉 일반적인 방사화 분석 조건을 적용하면 각 원소에 대한 정밀도 및 검출 민감도가 낮아지게 됨
- 이를 극복하기 위해 근거리에서의 감마선 측정이 필요하며
- 다중 감마선 방출 핵종의 경우 참동시중첩효과가 커져 분석값의 신뢰도 확보를 위한 보정이 필요

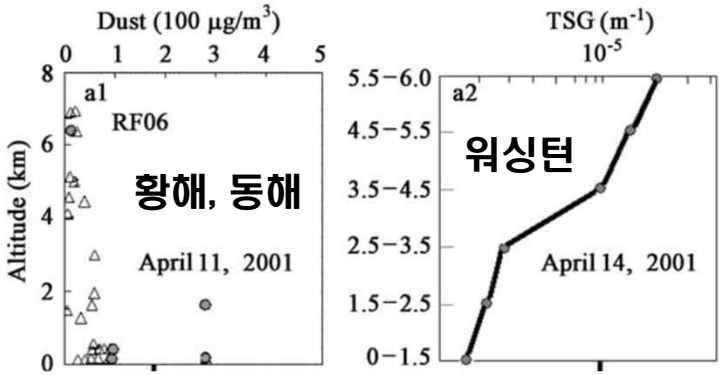


Nuclide	Energy (keV)	보정계수 산출 수식
Br-82	554.3	1/{1-(0.796)εt,776-(0.612)εt,619-(0.395)εt,698-(0.382)εt,1317-(0.235)εt,1474-(0.012)εt,1044-(0.012)εt,273}
Br-82	776.5	1/{1-(0.648)εt,554-(0.335)εt,619-(0.335)εt,698-(0.324)εt,1317-(0.326)εt,1044-(0.284)εt,827-(0.027)εt,221-(0.016)εt,1007-(0.015)εt,606-(0.010)εt,273-(0.010)εt,1650-(0.009)εt,92}

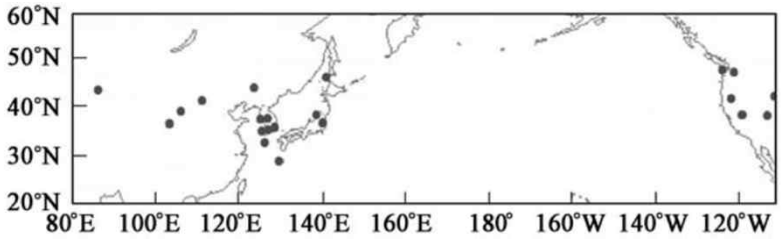
황사로 인한 미세먼지 측정



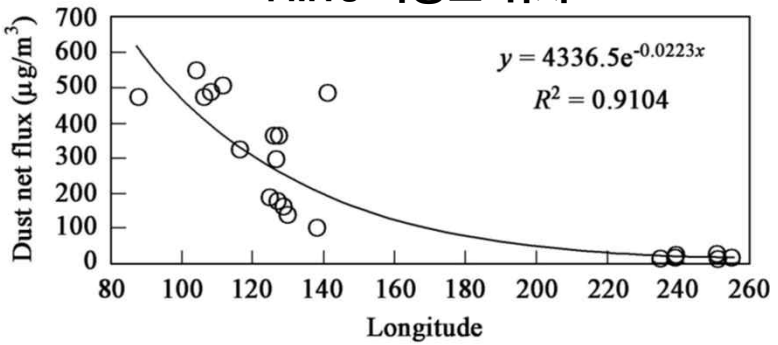
2001년 강한 황사로 인한 미세먼지 이동



< 고도 별 미세먼지 분포>



<PM10 측정소 위치>



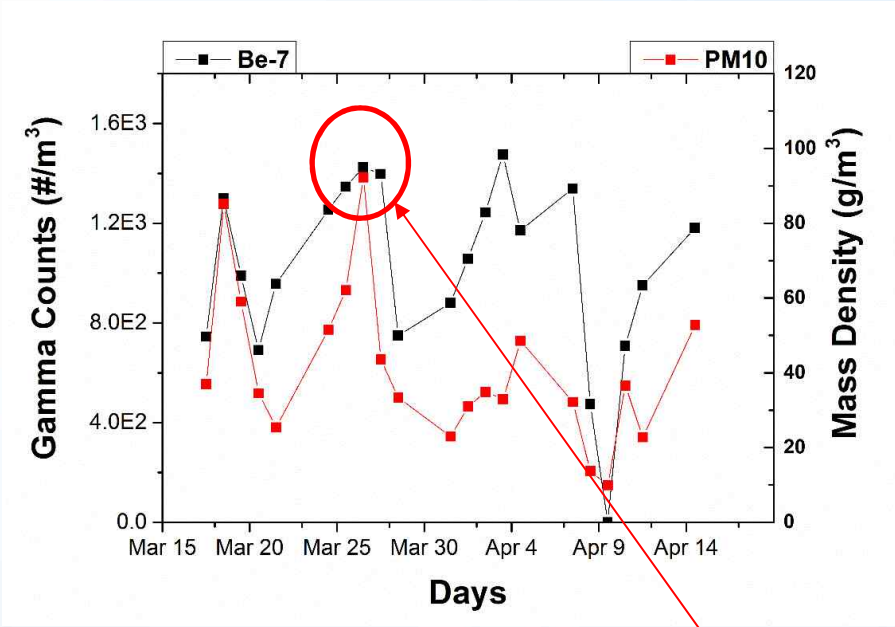
<경도에 따른 황사로 발생한 PM10 농도 변화>

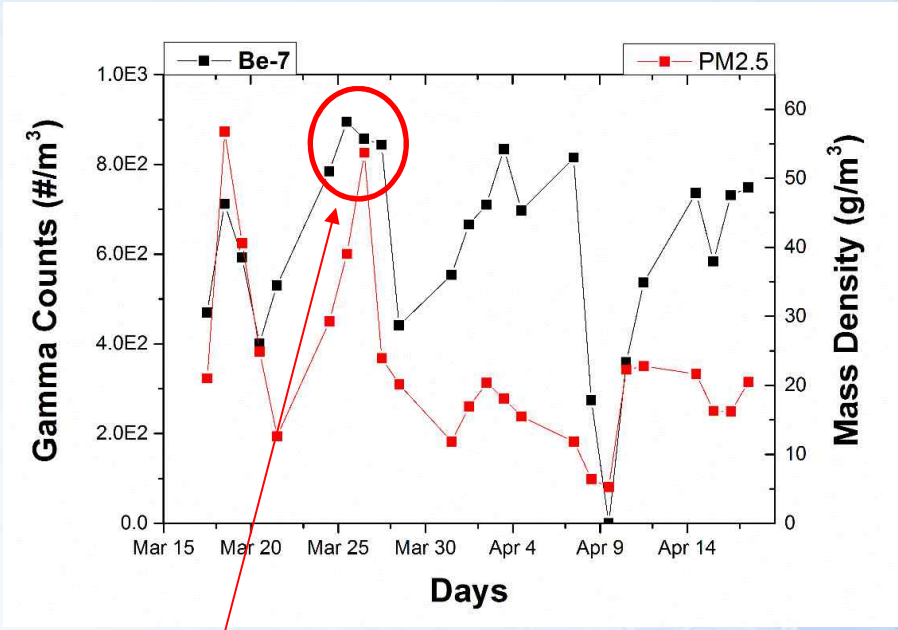
- ❖ 고 고도의 미세먼지는 상당히 먼 거리를 움직임
- ❖ 미세먼지는 거리에 따라 지수 함수로 감소함

주요 연구성과

평가지표: ⑤ 전단계와 연계하여 계속 연구 수행의 필요성

하강 미세먼지 모니터링



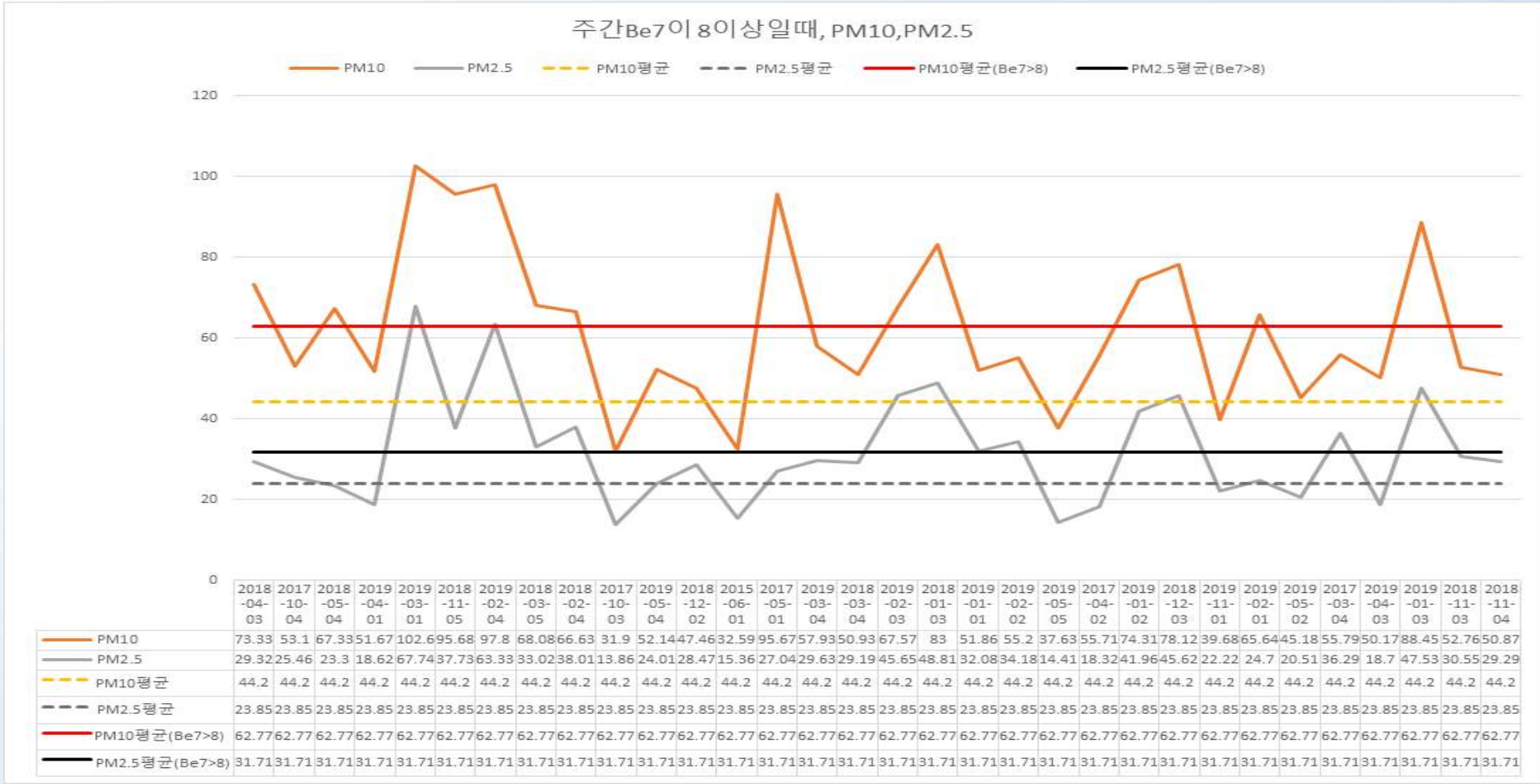


고 고도 기원 미세먼지가 많이 포집된 날

미세먼지 입체 분석용

주요 연구성과

Be-7 과 미세먼지

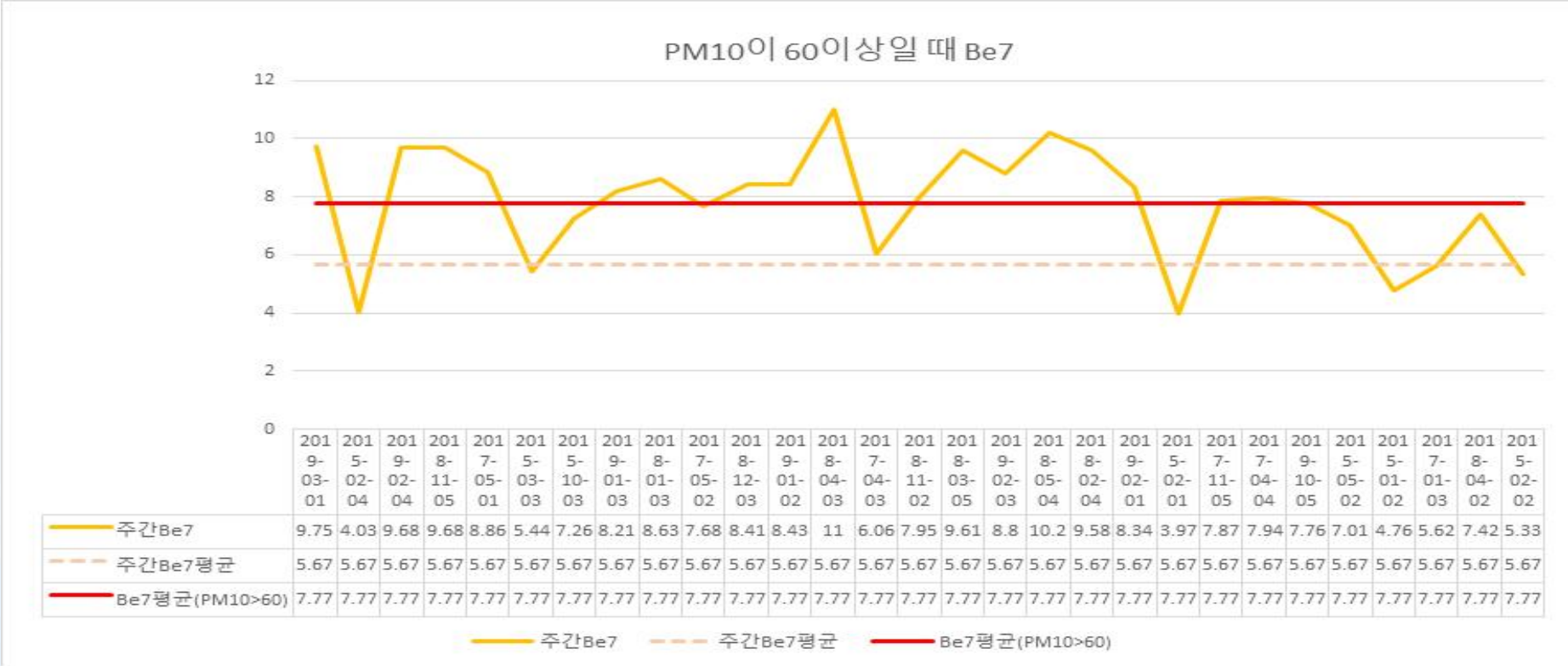


	2018-04-03	2017-10-04	2018-05-04	2019-04-01	2019-03-01	2018-11-05	2019-02-04	2018-03-05	2018-02-04	2017-10-03	2019-05-04	2018-12-02	2015-06-01	2017-05-01	2019-03-04	2018-03-04	2019-02-03	2018-01-03	2019-01-01	2019-02-02	2019-05-05	2017-04-02	2019-01-02	2018-12-03	2019-11-01	2019-02-01	2019-05-02	2017-03-04	2019-04-03	2019-01-03	2018-11-03	2018-11-04
PM10	73.33	53.1	67.33	51.67	102.6	95.68	97.8	68.08	66.63	31.9	52.14	47.46	32.59	95.67	57.93	50.93	67.57	83	51.86	55.2	37.63	55.71	74.31	78.12	39.68	65.64	45.18	55.79	50.17	88.45	52.76	50.87
PM2.5	29.32	25.46	23.3	18.62	67.74	37.73	63.33	33.02	38.01	13.86	24.01	28.47	15.36	27.04	29.63	29.19	45.65	48.81	32.08	34.18	14.41	18.32	41.96	45.62	22.22	24.7	20.51	36.29	18.7	47.53	30.55	29.29
PM10평균	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2	44.2
PM2.5평균	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85	23.85
PM10평균(Be7>8)	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77	62.77
PM2.5평균(Be7>8)	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71	31.71

Be-7 이 강한 신호를 낼 때 PM 10, PM 2.5 는 각각 42%, 33% 증가

주요 연구성과

Be-7 과 미세먼지



	2019-03-01	2015-02-04	2019-02-04	2018-11-05	2017-05-01	2015-03-03	2015-10-03	2019-01-03	2018-01-03	2017-05-02	2018-12-03	2019-01-02	2018-04-03	2017-04-03	2018-11-02	2018-03-05	2019-02-03	2018-05-04	2018-02-04	2019-02-01	2015-02-01	2017-11-05	2017-04-04	2019-10-05	2015-05-02	2015-01-02	2017-01-03	2018-04-02	2015-02-02
주간Be7	9.75	4.03	9.68	9.68	8.86	5.44	7.26	8.21	8.63	7.68	8.41	8.43	11	6.06	7.95	9.61	8.8	10.2	9.58	8.34	3.97	7.87	7.94	7.76	7.01	4.76	5.62	7.42	5.33
주간Be7평균	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67	5.67
Be7평균(PM10>60)	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77	7.77

고농도 미세먼지가 불때 Be-7 이 37% 강한 신호

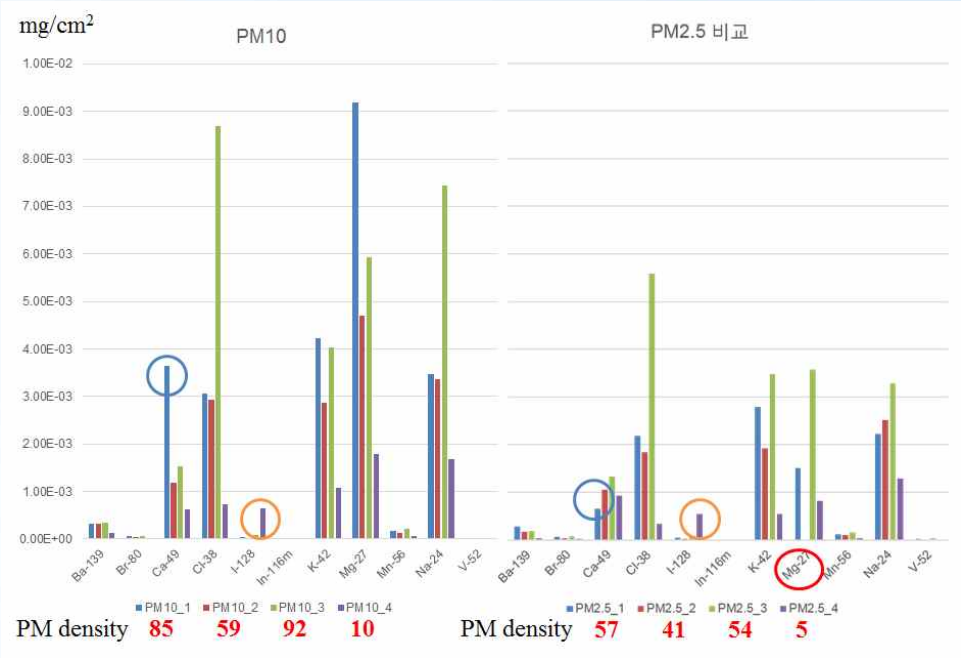
기존: 고농도 미세먼지가 붑니다.

본 연구 이후: 고 고도 발(장거리) 미세먼지가 증가하면서, 고농도 미세먼지가 붑니다.

주요 연구성과

평가지표: ② 연구방법 및 추진체계의 효율적 추진여부
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

미세먼지 오염원 평가

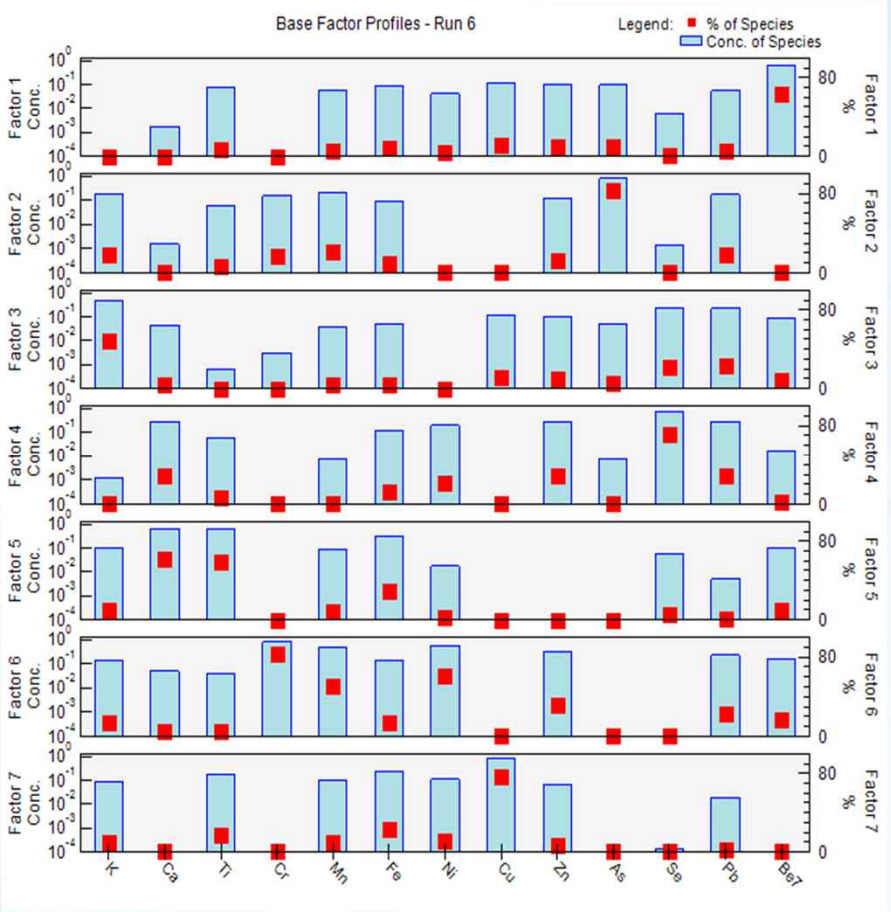


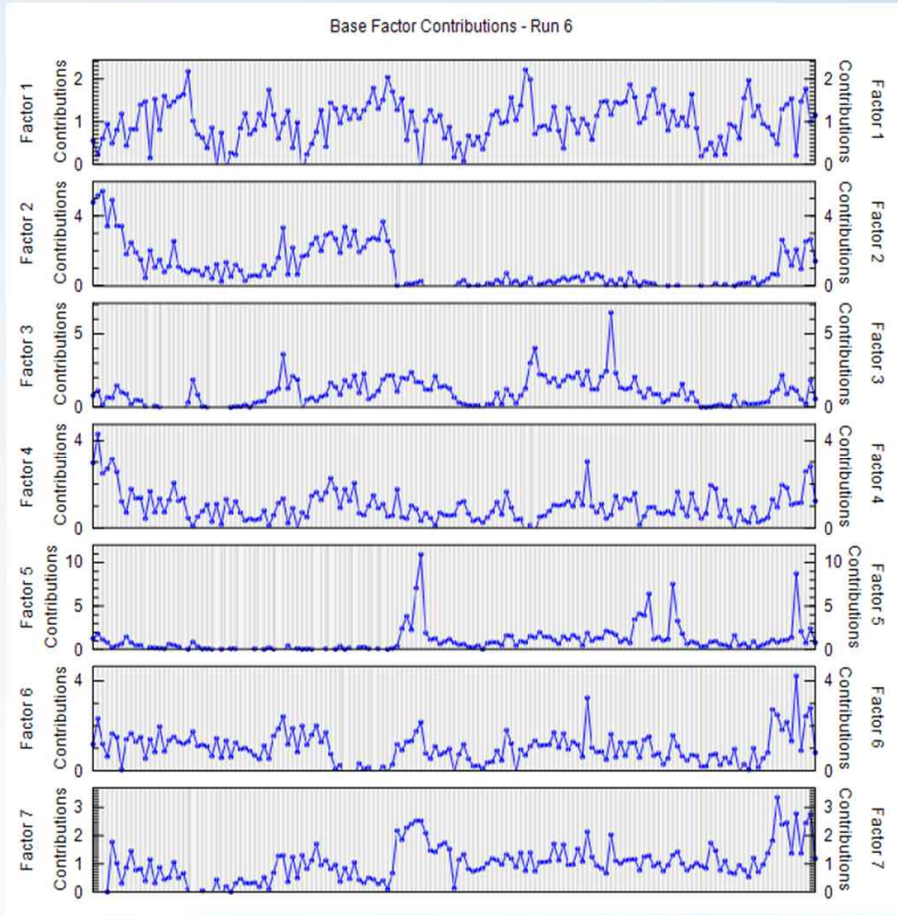
1. 인접일은 비슷한 성분들이 유지되는 현상이 일부 관찰 -> 미세먼지 원인 분석
2. 성분 측면에서 PM 10과 2.5의 다른 패턴이 관찰 -> 초 미세먼지 원인 분석
3. 해수염 등 다른 지표 -> 바다 건너온 미세먼지 해석 가능

주요 연구성과

평가지표: ② 연구방법 및 추진체계의 효율적 추진여부
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

PMF를 활용한 오염원 분류



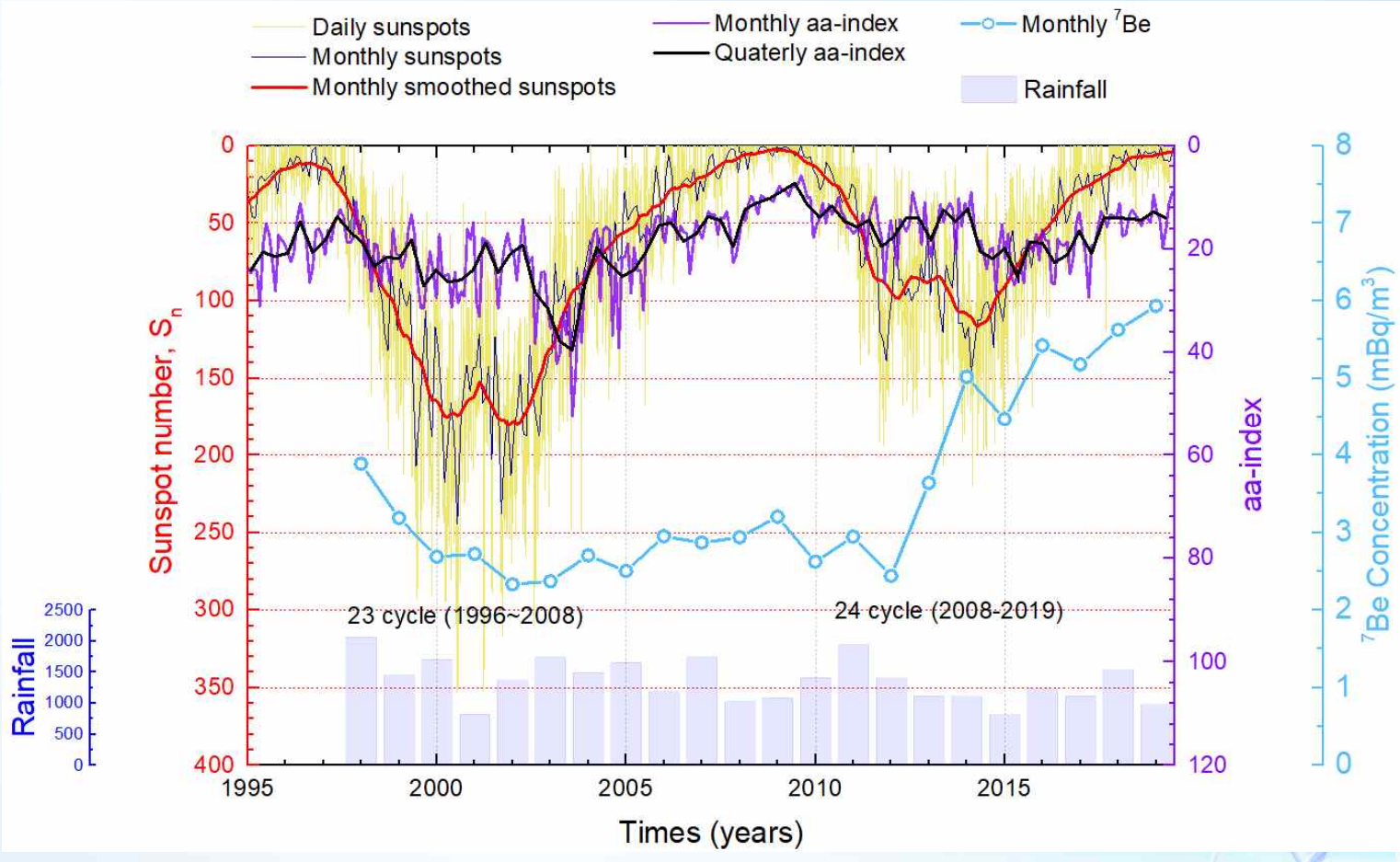


그룹은 확실하게 정의되나 -> 기간, 위치, 변수마다 달라 통계적 접근 필요

주요 연구성과

평가지표: ② 연구방법 및 추진체계의 효율적 추진여부
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

태양 흑점, 지구 자기장 변화와의 상관 관계

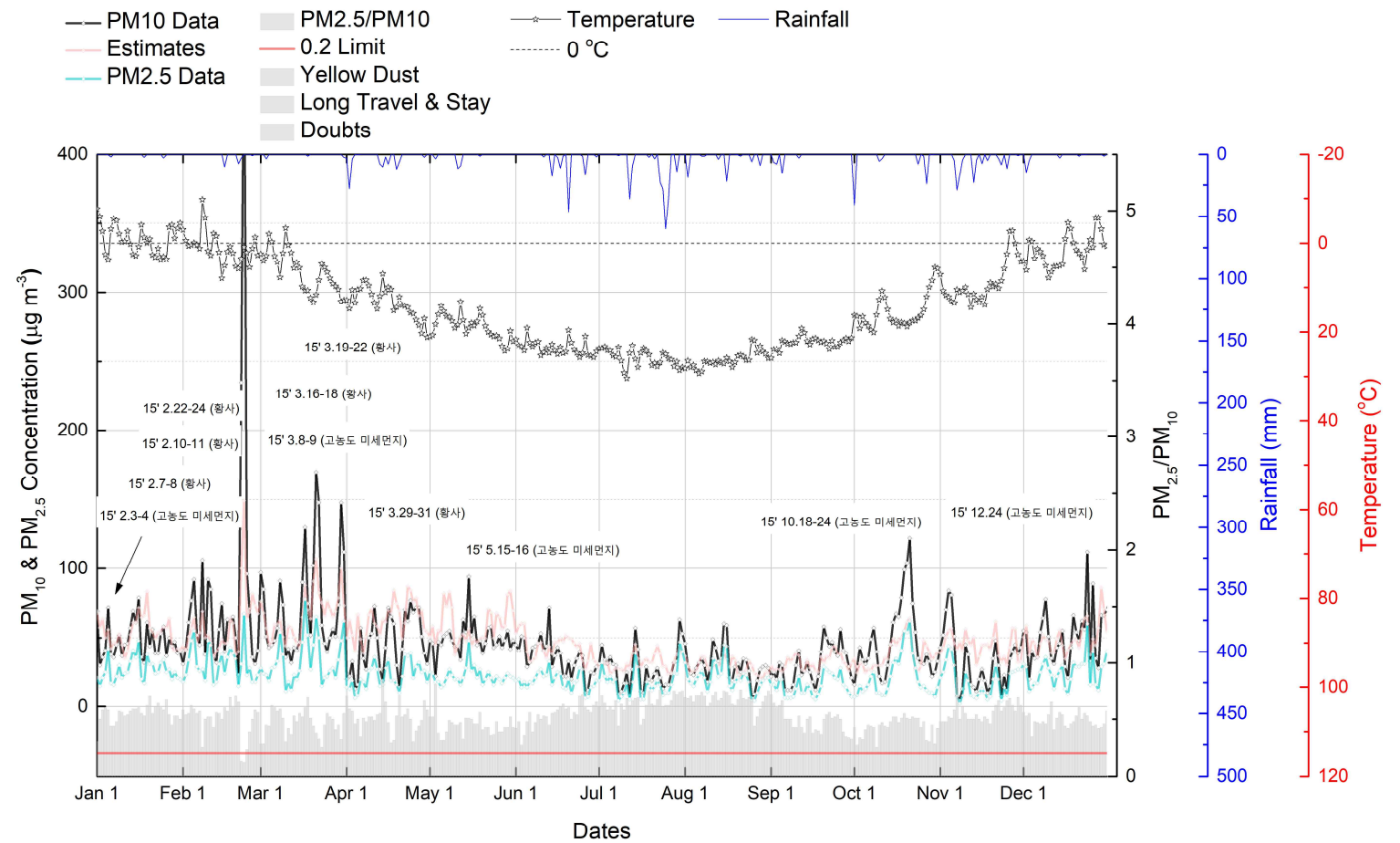


연구는 다양하게 시도, 과제 측면에서는 문제를 좁혀갈 필요

주요 연구성과

평가지표: ② 연구방법 및 추진체계의 효율적 추진여부
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

국내 미세먼지 DB 구축

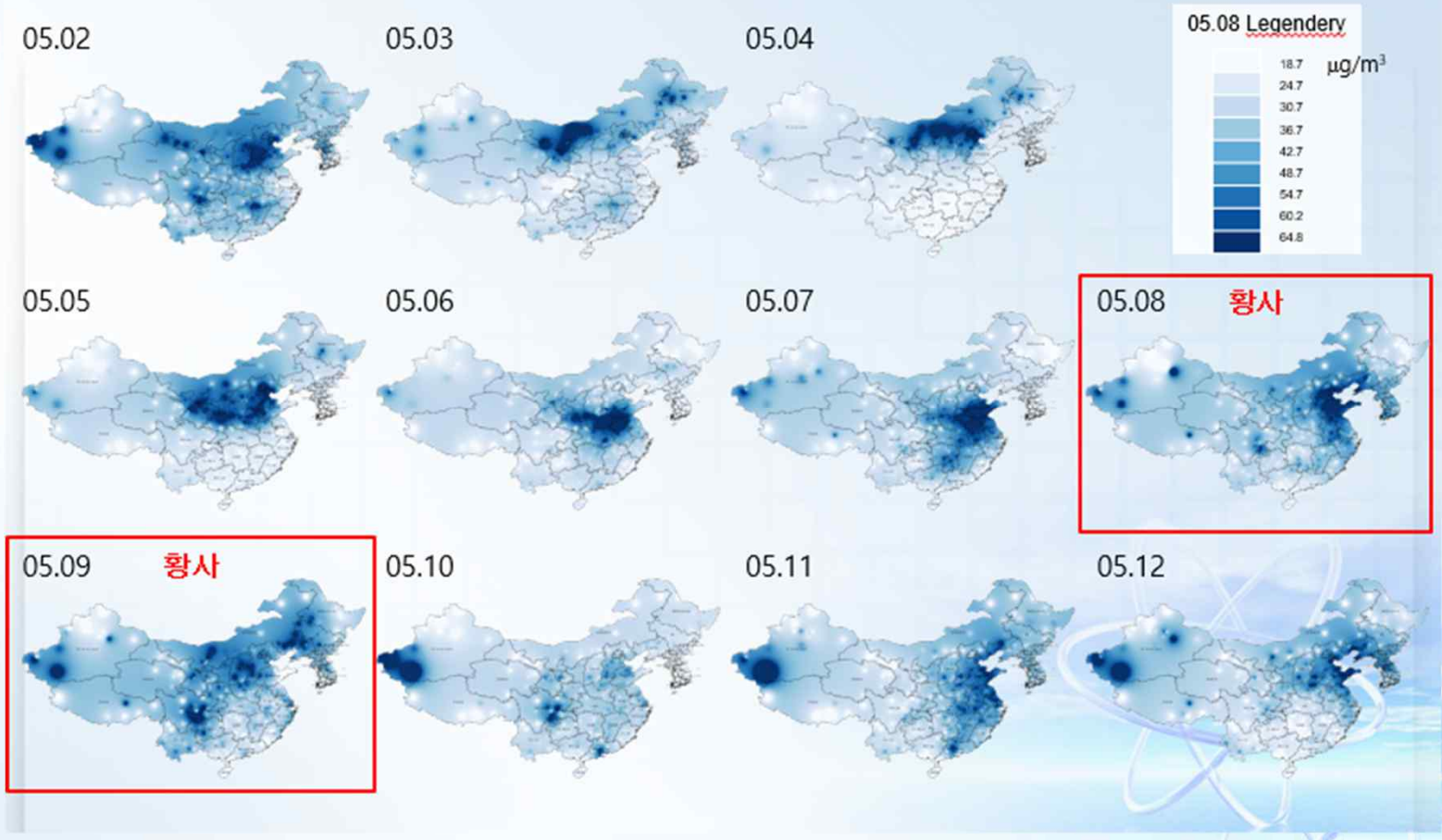


기상 정보 40개 이상

주요 연구성과

평가지표: ② 연구방법 및 추진체계의 효율적 추진여부
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

중국 미세먼지 DB 구축

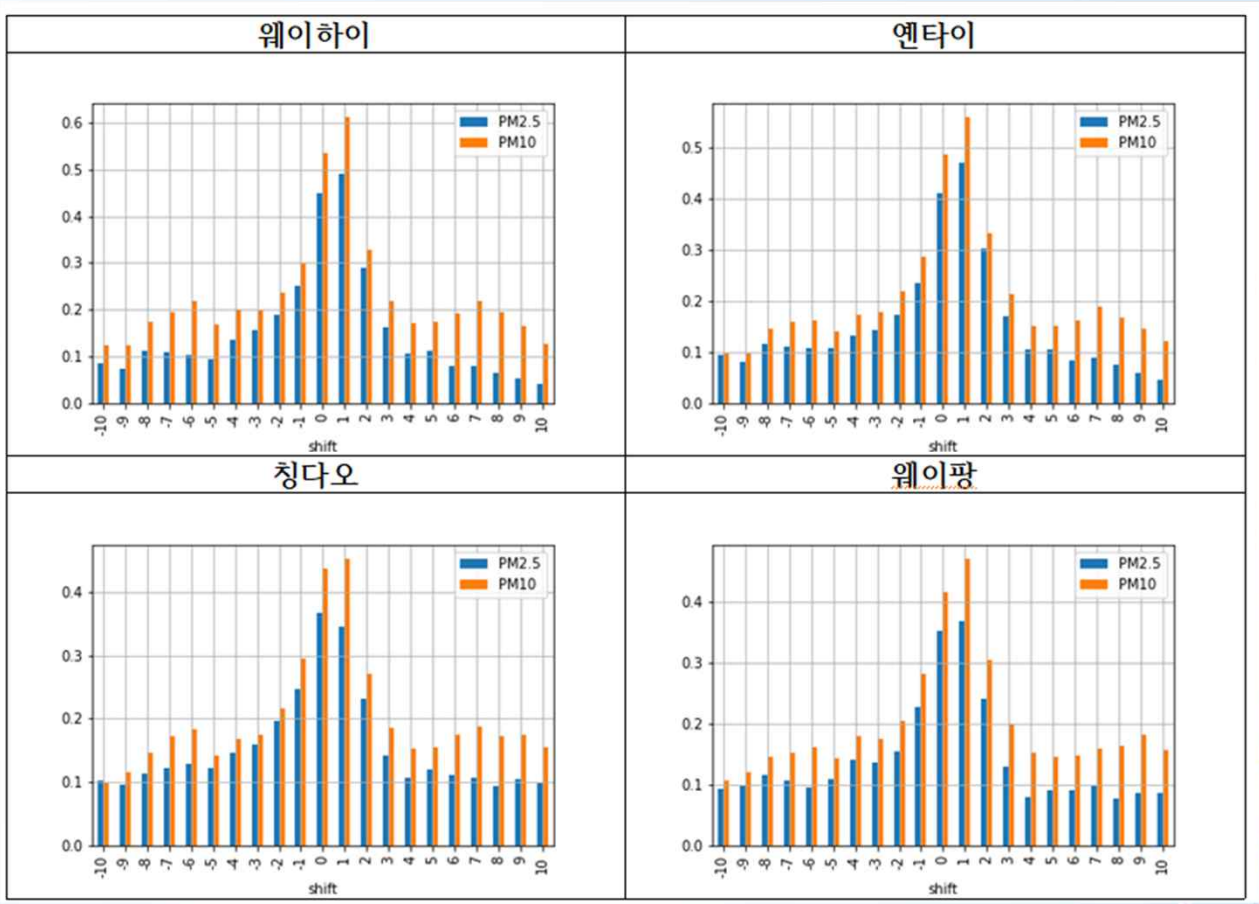


각 성 및 자치구 169개 데이터 수집

주요 연구성과

평가지표: ② 연구방법 및 추진체계의 효율적 추진여부
④ 연구성과의 우수성 및 활용가능성

산둥 반도 미세먼지 역학 조사(feat. AI 팀)



1. 국내 VS 국외(중국) 미세먼지 상관성 관계를 분석하면

당일보다 하루뒤의 농도와 상관성 -> 하루 걸려서 넘어옴

주요 연구성과

중국과 교차 상관도 분석 결과

한국과의 거리에 따라
상관도가 현저하게 저하

주요 연구성과

월경성 미세먼지 이동시간

※ 각 지역별 correlation 피크 값이 발생하는 shift 시각은 다음과 같음.

	산둥성				랴오닝성	천진	베이징	허베이성
	웨이하이	옌타이	칭다오	웨이팡	다롄	천진	베이징	스자좡
서울까지 직선거리	430km	490km	610km	700km	492km	862km	955km	1,100km
PM10	11	12	12	14	16	26	26	30
PM2.5	13	16	12	15	18	21	24	20

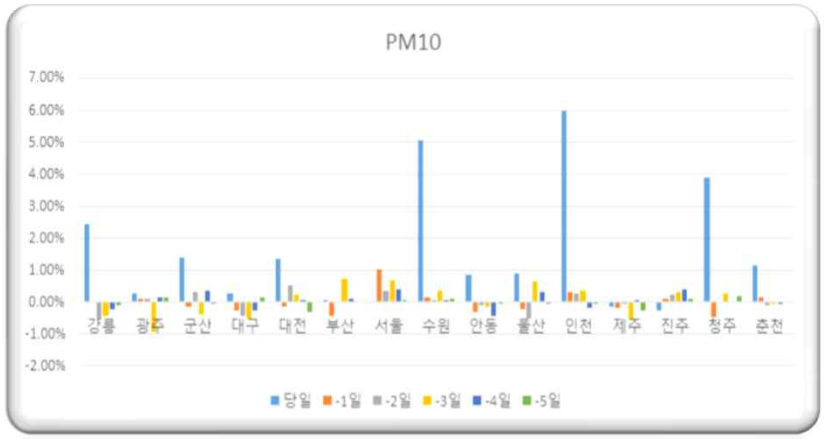
- 대체적으로 거리에 비례하여 PM10 피크가 발생하는 것을 확인할 수 있음.
- PM 2.5는 PM10에 대비 상관계수가 낮음.
- 산둥성 지역의 미세먼지가 약 11~15시간 안에 서울에 도달하는 것으로 예상할 수 있음.

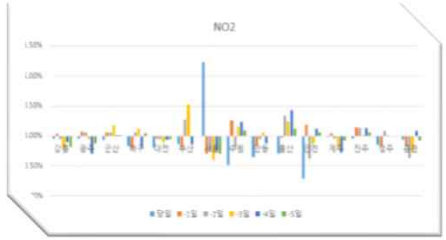
1. 한국과의 거리가 멀수록 shift 되는 것이 순차적으로 나타남

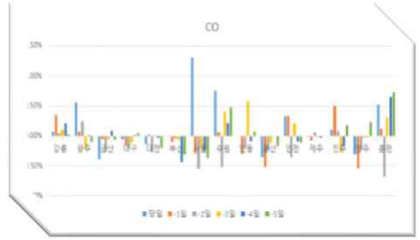
주요 연구성과

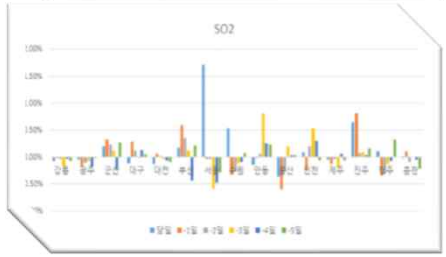
인공지능을 활용한 상관도 분석

➢ 상관도 분석









❖ **미세먼지 군집은 도시 기준으로 이틀간 체류**

- 지난 5일간 15개 도시의 기상, 대기질, PM10과 서울의 데이터를 이용 상관관계분석
- 향후 얻어지는 NAA, XRF, 자연방사선핵종의 데이터를 추가하여 분석할 예정

정량 연구성과

분석 정밀도 향상 및 분석 절차 확립

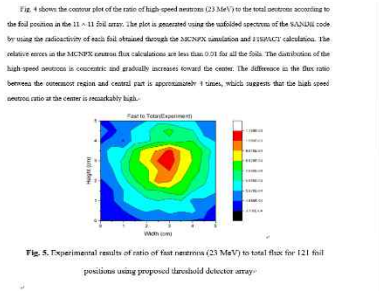


Fig. 5. Experimental results of ratio of fast neutrons (23 MeV) to total flux for 121 foil positions using proposed threshold detector array

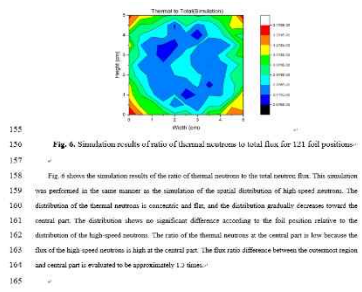


Fig. 6. Simulation results of ratio of thermal neutrons to total flux for 121 foil positions

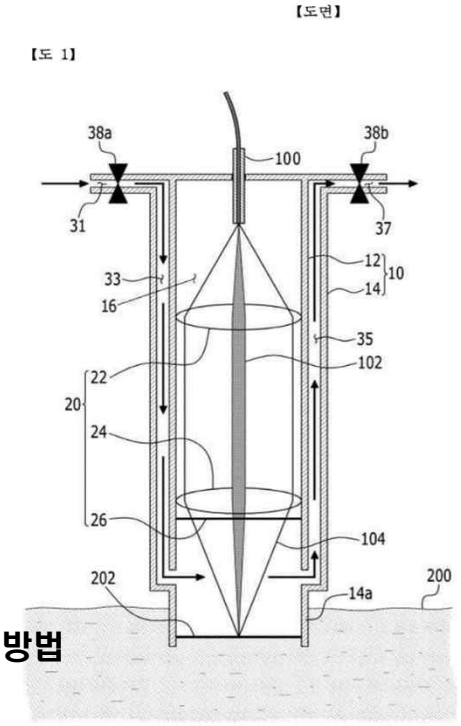
Measurement of neutron spectrum parameters for NAA irradiation holes in the Jordan research and training reactor

Evaluation of Spatial Distribution of Fast and Thermal Neutrons Using Array-Type Threshold Detectors

SCI 2편

국내 특허 : 액체시료용 레이저 유도 플라즈마 분광장치
국내 특허 : 비접촉식 미소입자 절대 질량 측정 장치 및 측정 방법
국외 특허 : 방사화 특성 평가 방법 관련 특허
국내 특허 : 동시 계수 기반 즉발감마선 방사화 영상 장치 및 이를 이용한 영상 생성 방법
국내 특허 : 방사선량을 이용한 미세먼지 농도 및 성분 분석 방법

국외 특허 1건 및 국내 특허 4건, 국내 특허 등록 1건



47

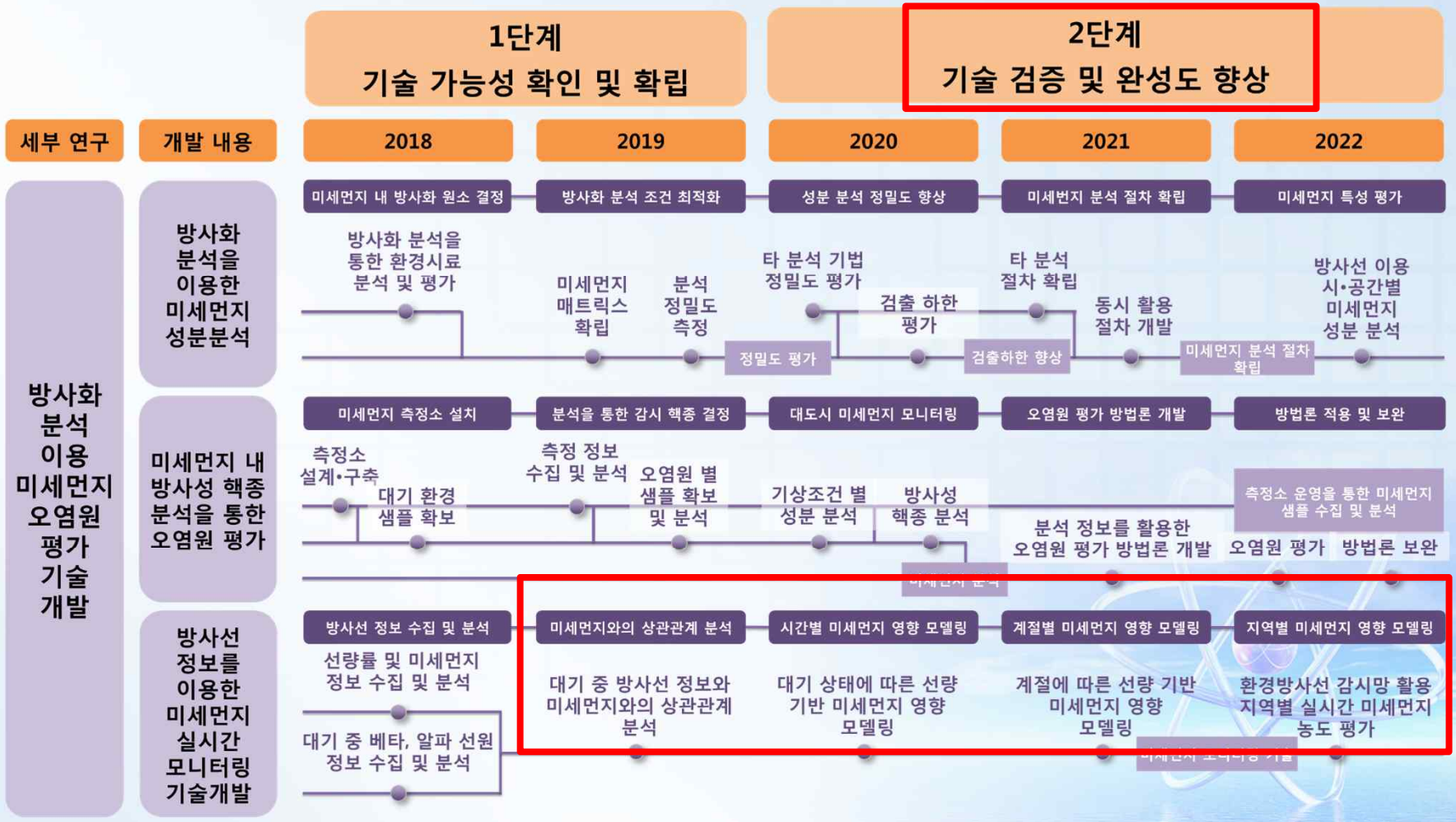
V. 연구 계획

KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

연차별 연구목표 및 내용

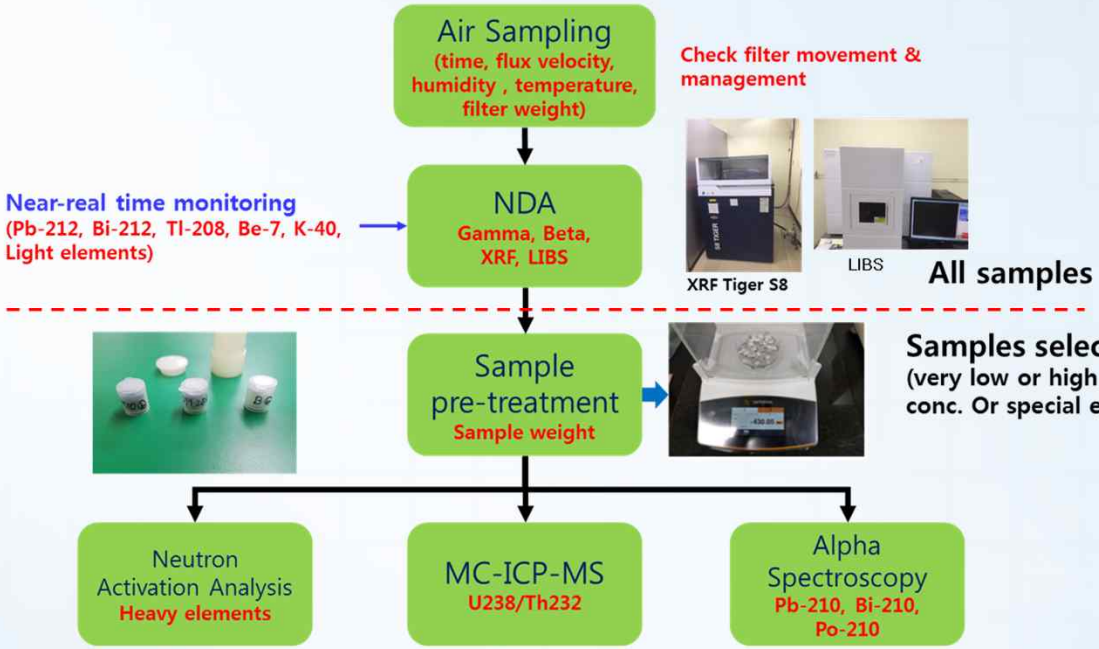
평가지표: ⑥ 차기단계 및 최종목표의 구체성 및 명확성

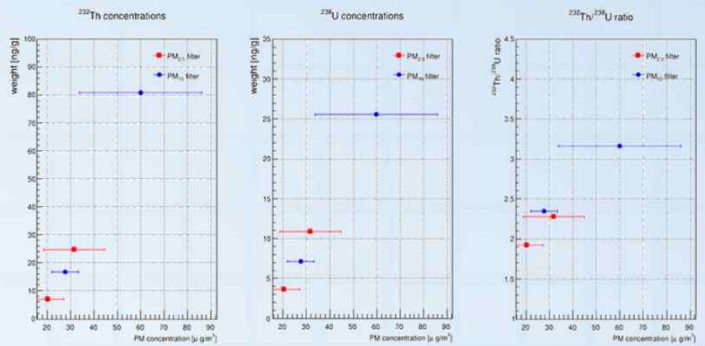
2단계: 기술 검증 및 분석 정밀도 향상

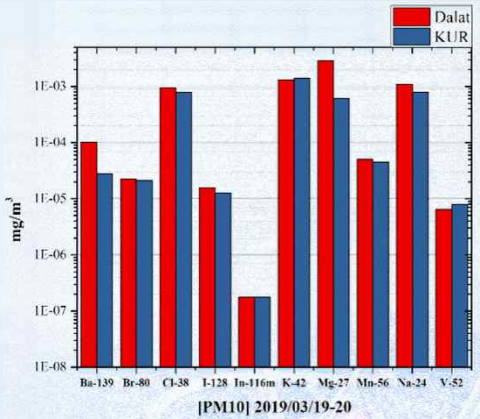


주요 연구계획

미세먼지 성분 분석 정밀도 향상 → 국가 데이터로 편입





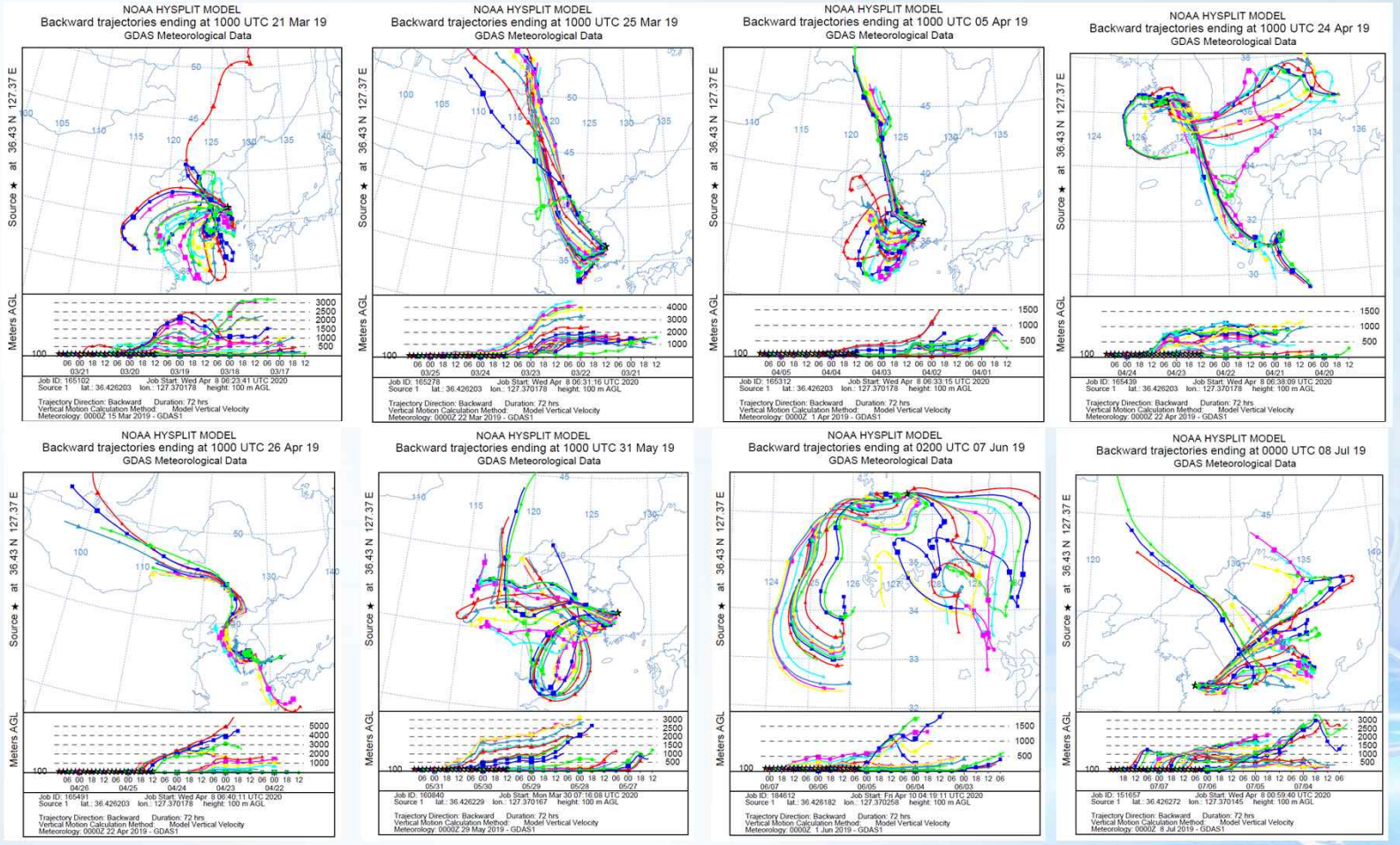


- ❖ 중금속 포함 31개 이상의 미세먼지 성분 분석을 위한 다양한 핵분석 기술의 활용
- ❖ 타 분석 기법 간 정밀도 향상 및 검출 하한 향상 연구
- ❖ 국가적 미세먼지 성분 분석 역량 강화

주요 연구계획

평가지표: ⑤ 전단계와 연계하여 계속 연구 수행의 필요성

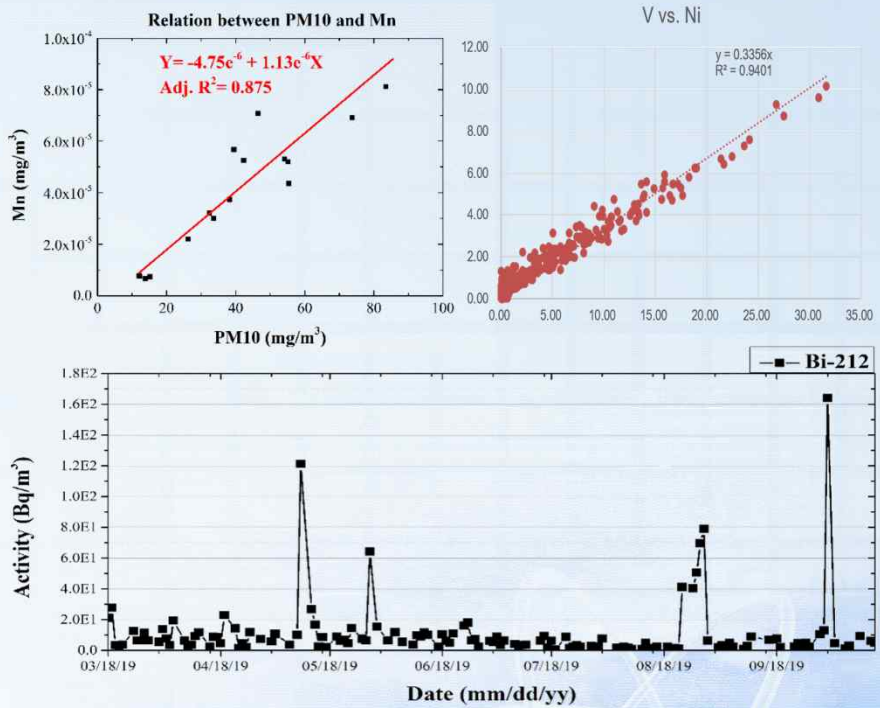
월경성 미세먼지 분석 연구 -> 새로운 마커 개발



주요 연구계획

평가지표: ⑤ 전단계와 연계하여 계속 연구 수행의 필요성

국내 대도시 미세먼지 모니터링 연구 → 미세먼지 모니터링 기술 개발

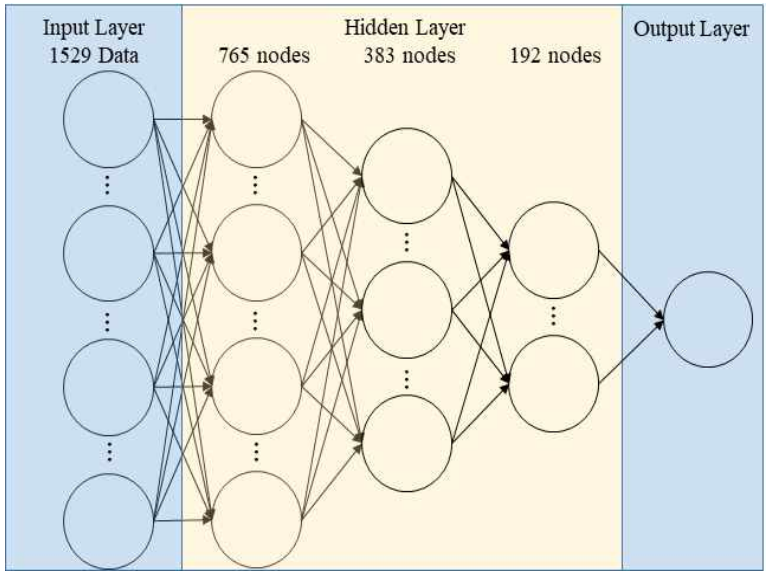


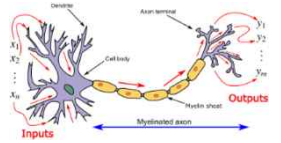
- ❖ 상시 측정소 및 임시 측정소 운영을 통한 미세먼지 샘플 확보
- ❖ 기상 조건 별 미세먼지 내 원소 성분 및 농도와의 연관성 확인
- ❖ 방사성 핵종에 대한 연속 데이터 생성

주요 연구성과

인공지능을 활용한 상관도 분석

➢ 인공지능(인공신경망) 구축





입력자료:15개 도시의 기상, 대기질, PM10 (5일간)

아웃풋: 서울의 PM10 농도

프레임워크: TensorFlow

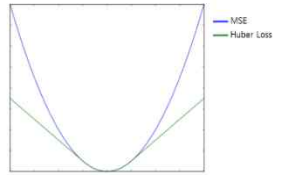
활성화 함수: ReLU

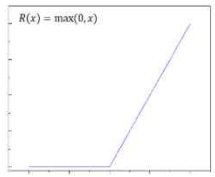
비용함수: Huber Loss

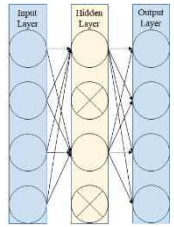
Drop Out 적용

학습률: 0.006 (Exponential Decay 적용)

데이터 중 70% 학습, 15% 검증,
15% 테스트로 사용







❖ 당일의 서울 PM농도를 3.5%(평균제곱오차)로 예측

Contribution of fossil fuel sources to $PM_{2.5}$ in Seoul constrained by carbon, nitrogen, and oxygen isotopic ratios

임세희 이미혜
고려대학교 이과대학 지구환경과학과

충남연구원 2021.10.14

Issues

2015년 $PM_{2.5}$ 대기환경 기준 & 2017~2019 고농도 사례 발생으로 제기된 대기화학 이슈

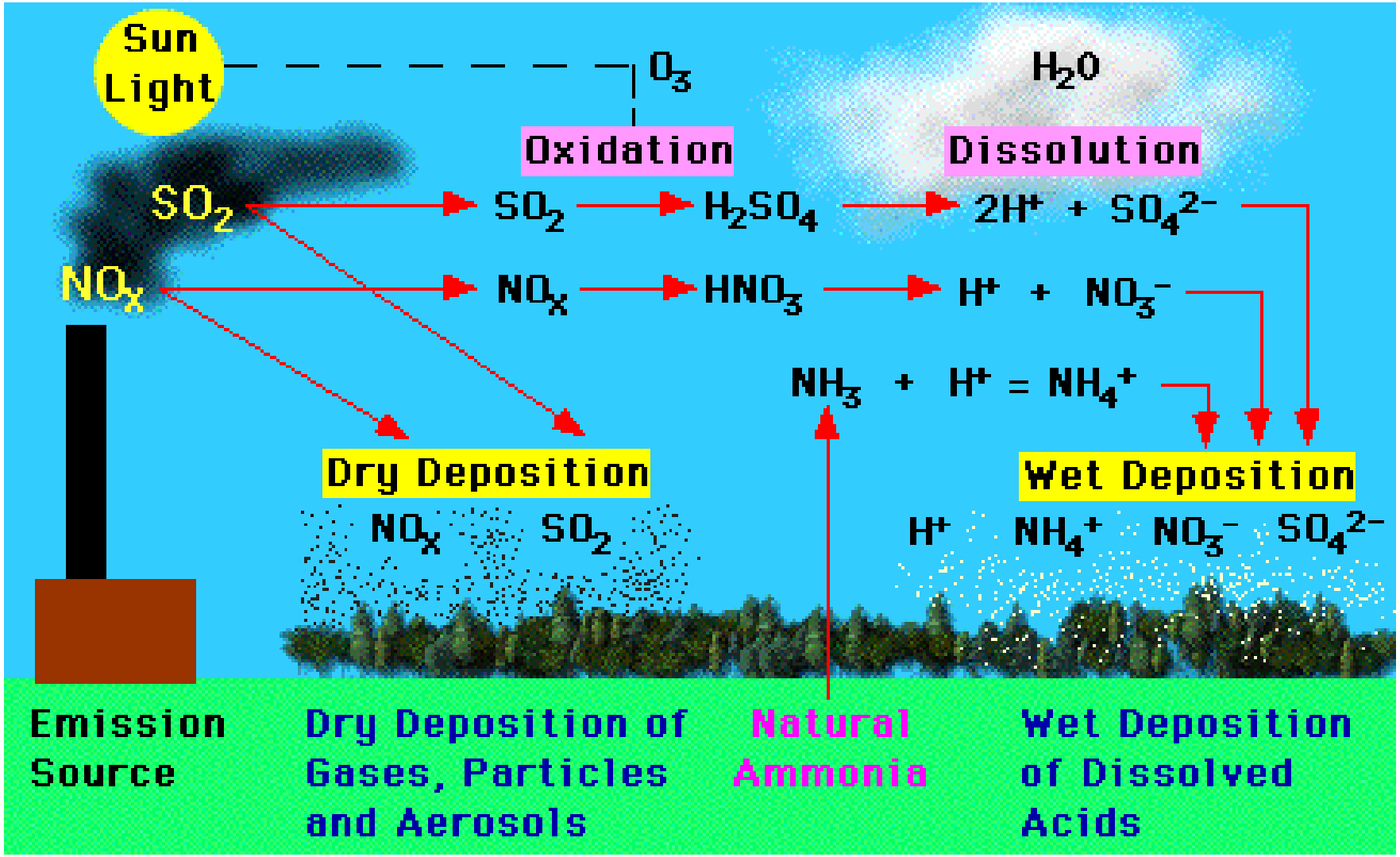
- Cold months 미세먼지 사례 시 고농도 질산염 NO_3^- (예: ~ 100 μg/m^3 @ 백령 2019.03)
  NO_3^- (NH_4NO_3) 생성기작 or 유입기작
  전구기체 (NH_3 & HNO_3) 배출원 [NOx 배출량 감소]
  생성기작 (HNO_3^-) oxidation pathways (heterogeneous reaction)
- Warm months 황산염 유기탄소 증가
  SO_4^{-2} formation mechanism & sources
- NOx – NOy cycle ↔ Ox – HOx cycle [대기자정능력]

<참고> Gas to Particle Conversion

DRH : deliquescence relative humidity

Mechanism	Leading Compounds	Factors	Condition
Nucleation	H_2SO_4 (+ H_2O NH_3)	SO_2 oxidation low condensational sink	clean & warm / daytime
Gas – Solid Equilibria	HNO_3 NH_3	NOx oxidation RH (DRH 62% CRH 25-32%)	polluted & cold / day + night
Growth of existing particles	Low vapor pressure species	oxidation of hydrocarbons	polluted & warm / day + night

Acid generation & deposition @ 1980s



Acidic gases

Sulfur Oxidation

Gas phase

$SO_2 + OH + M \rightarrow HSO_3 + M$

$HSO_3 + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2$ (fast)

$SO_3 + H_2O + M \rightarrow H_2SO_4 + M$

Aqueous phase

SO_2 (gas) $\leftrightarrow$ $SO_2 + H_2O$

$SO_2 + H_2O \leftrightarrow HSO_3^- + H^+$

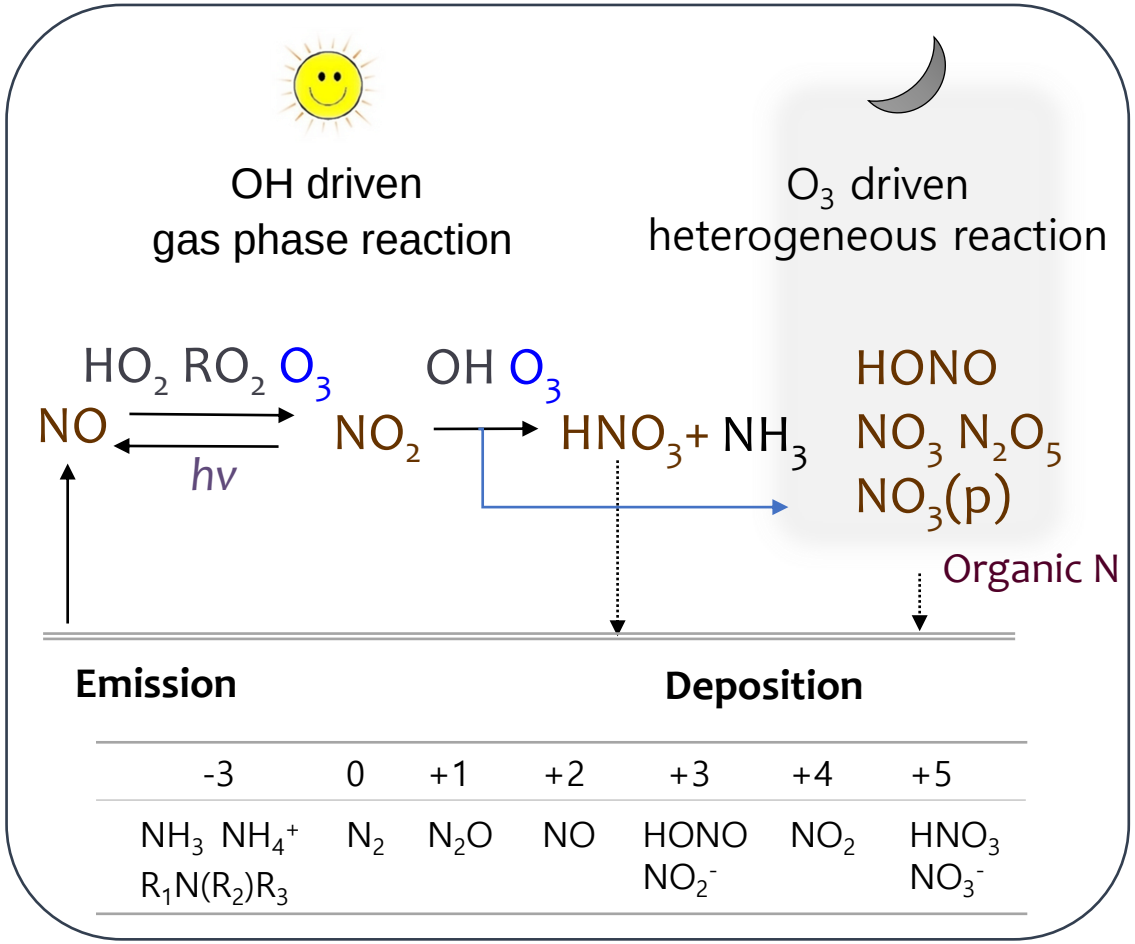
H_2O_2 (gas) $\leftrightarrow$ H_2O_2 (aqueous)

$HSO_3^- + H_2O_2 (+ H^+) \rightarrow HSO_4^- + H_2O$ (pH < 5)

$HSO_3^- + O_3 \rightarrow HSO_4^- + O_2$

$HSO_4^- \rightarrow H^+ + SO_4^{2-}$

Nitrogen Oxides Chemistry



Isotopes

$PM_{2.5}$ NO_3^-

Sources : NOx from fossil [coal / vehicle] and non-fossil [biomass burning vs. biogenic soil]

Formation processes : OH (day) vs. O_3 (night) driven oxidation

- Stable isotopes : powerful tools to identify sources and formation processes

  $\delta^{15}N$: formation & source fingerprint [NO_3^- separated from NH_4^+]

  Isotope fractionation during HNO_3 formation

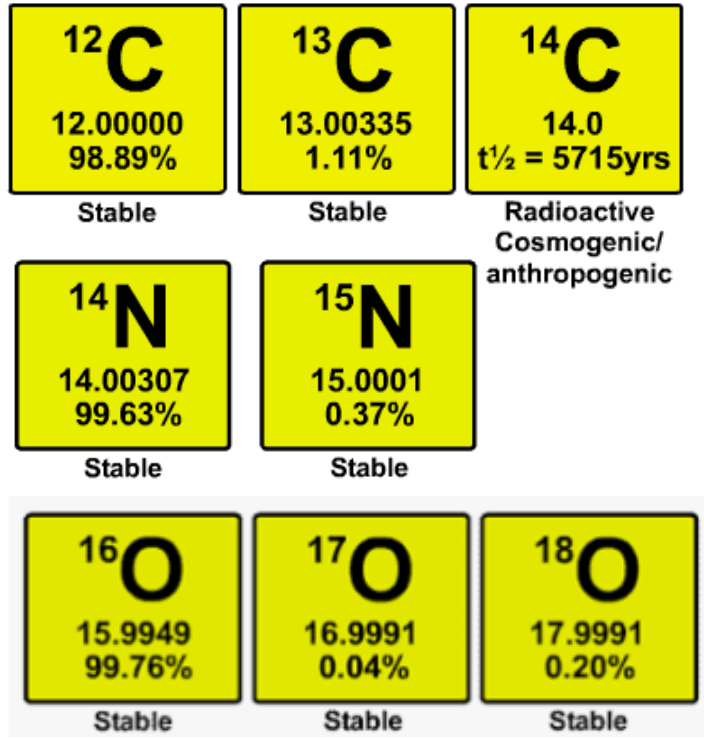
  $\Delta^{17}O$ (^{17}O-excess) : Oxidation pathway of nitrate [OH or O_3 driven]

  Mass-independent fractionation during O_3 formation → $\Delta^{17}O$ of terminal O_3

  Transfer of $\Delta^{17}O$ via the NOx–O_3 oxidation to NO_3^-

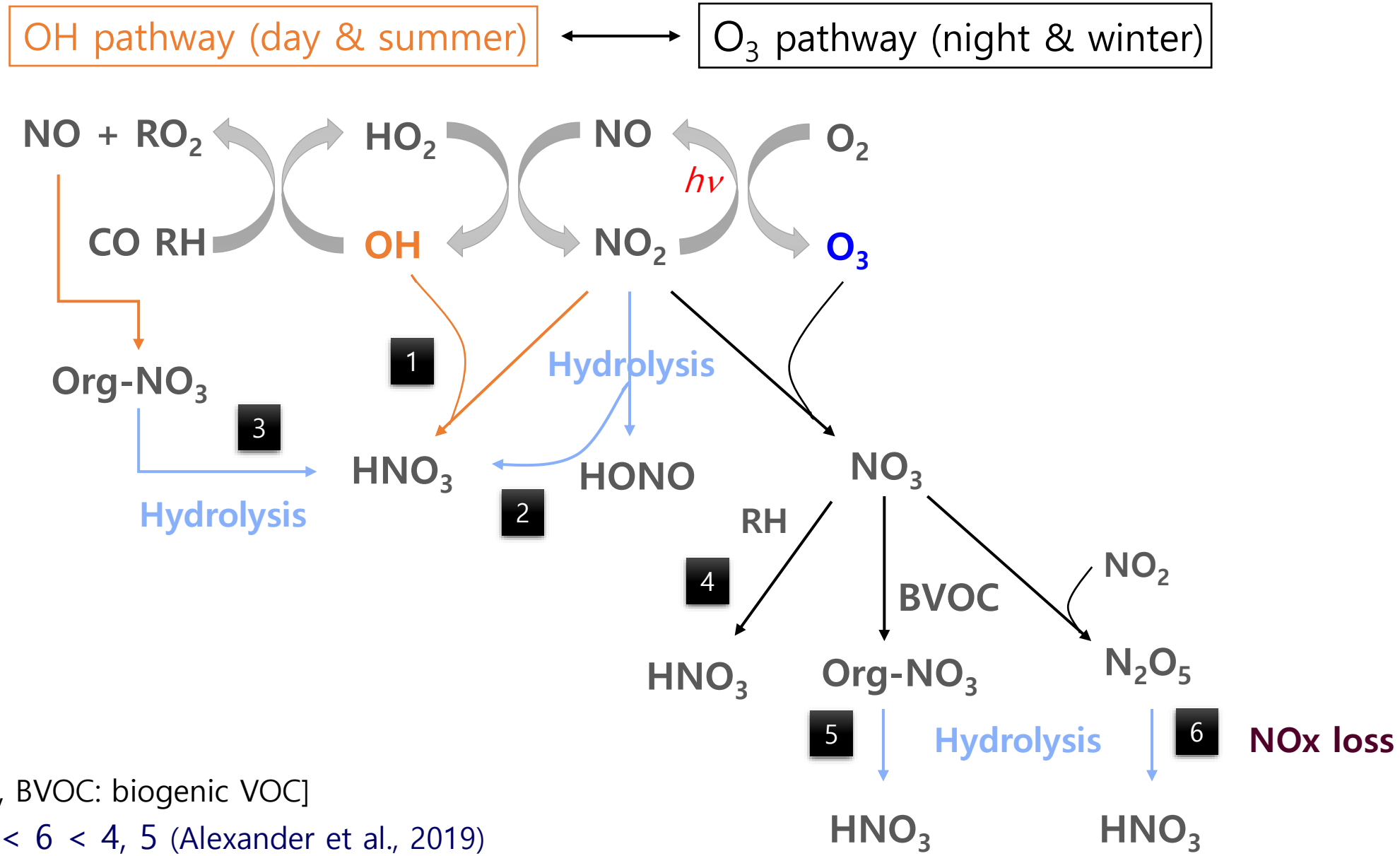
- Dual isotopes of $\delta^{15}N$ (NO_3^-) and $\Delta^{17}O$ (NO_3^-)

  Insight into the photochemical cycle and formation pathway of NO_3^-



$$\Delta^{17}O\ (NO_3^-) = \delta\ ^{17}O\ (NO_3^-) - 0.52 * \delta^{18}O\ (NO_3^-)\ \text{(Thiemens, 2006)}$$

Particulate nitrate formation & transformation



[RH: hydrocarbon, BVOC: biogenic VOC]

$\Delta^{17}O$: 3 < 1, 2 < 6 < 4, 5 (Alexander et al., 2019)

$PM_{2.5}$ sampling & analysis

	Sampling	
Location	Korea Univiversity (Anam-dong)	
Sampling period	Apr.-Sep. 2018 (Warm)	Nov. 2018-Mar. 2019 (Cold)

Chemical composition	# samples	Analytical method
Total Carbon (TC), Total Nitrogen (TN)	78, 70	Elemental analyzer, UC Irvine
Inorganic water-soluble ions	78	Ion Chromatography, KU
Trace gases		KU
$\delta^{13}C$ $\delta^{14}C$ (TC) $\delta^{15}N$ (TN)	78, 70	Isotope ratio mass spectrometer (IRMS) @ UC Irvine
$\delta^{15}N$ (NO_3^-) (NH_4^+) $\delta^{17}O$ $\delta^{18}O$ (NO_3^-)	33	IRMS @ IGE

$PM_{2.5}$ Isotope measurement

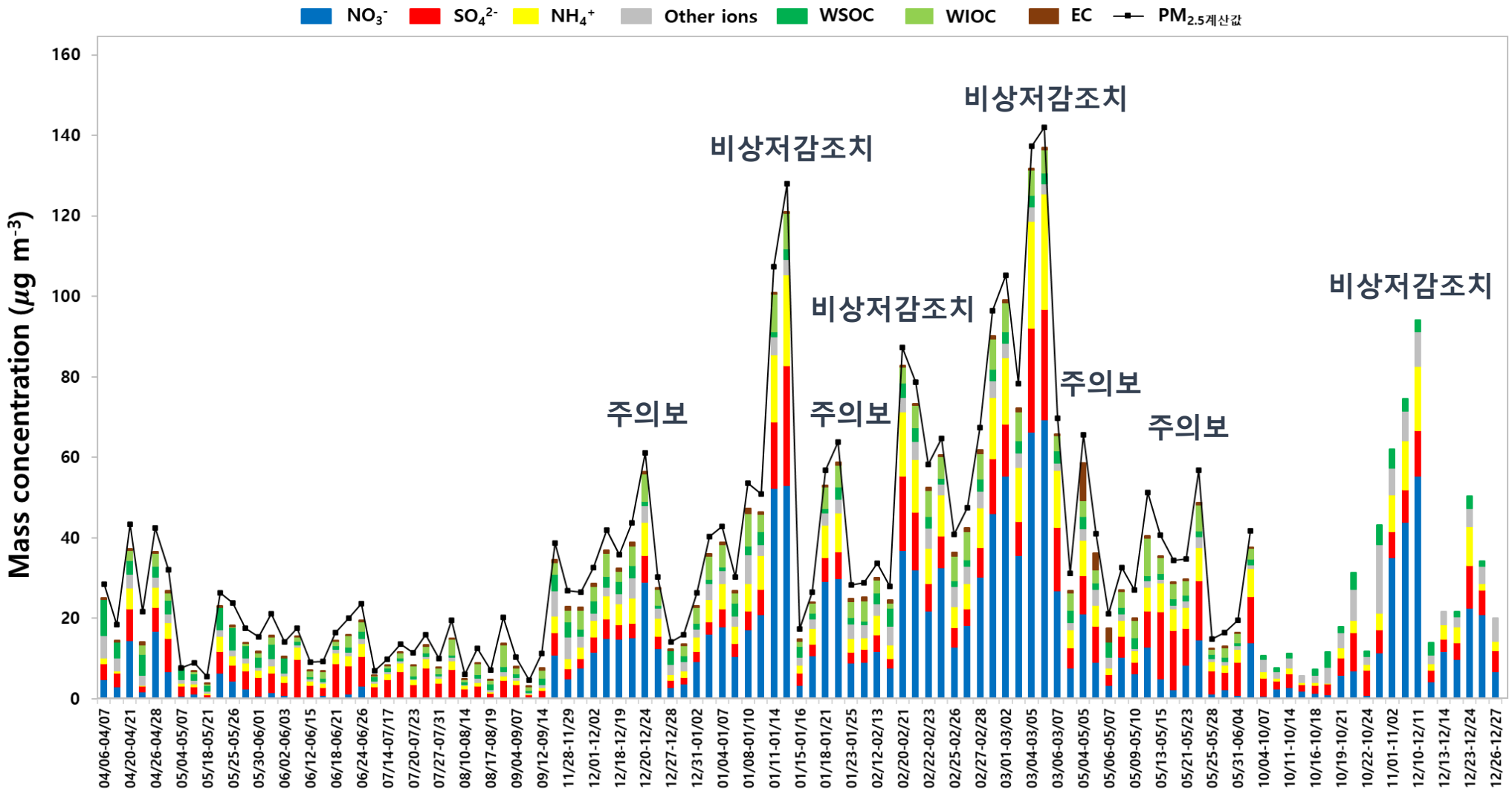
$PM_{2.5}$ high-vol filter samples for 1~4 days from 2018. 04 to 2019. 12

여름 Warm season (April ~ September)	겨울 Cold season (October ~ March)

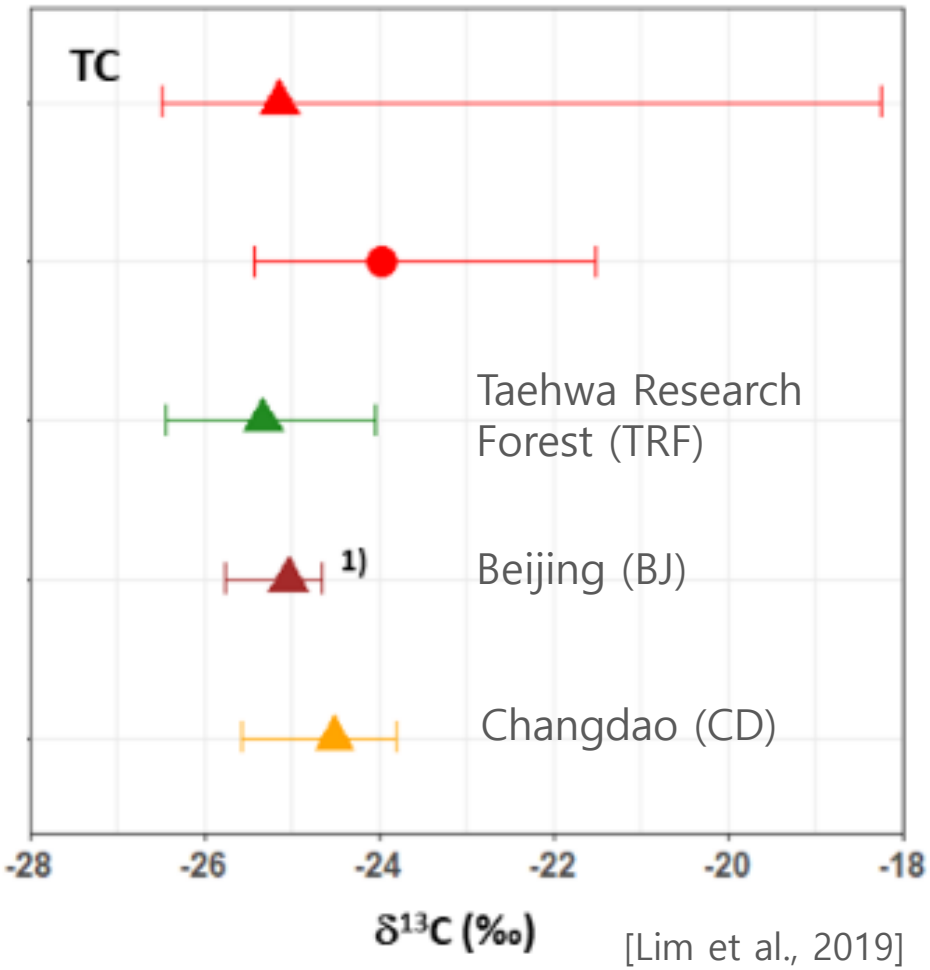
Carbon	Nitrogen	Oxygen	Sulfur
Total Carbon	Total Nitrogen Nitrate Ammonium	Nitrate	
$\Delta^{14}C$, $\delta^{13}C$	$\delta^{15}N$	$\delta^{17}O$, $\delta^{18}O$, $\Delta^{17}O$	

Emission sources	Oxidation pathway
fossil – biomass liquid - solid fossil Agriculture-livestock-power plant-vehicle	OH vs. O_3 oxidation

$PM_{2.5}$ Chemical composition



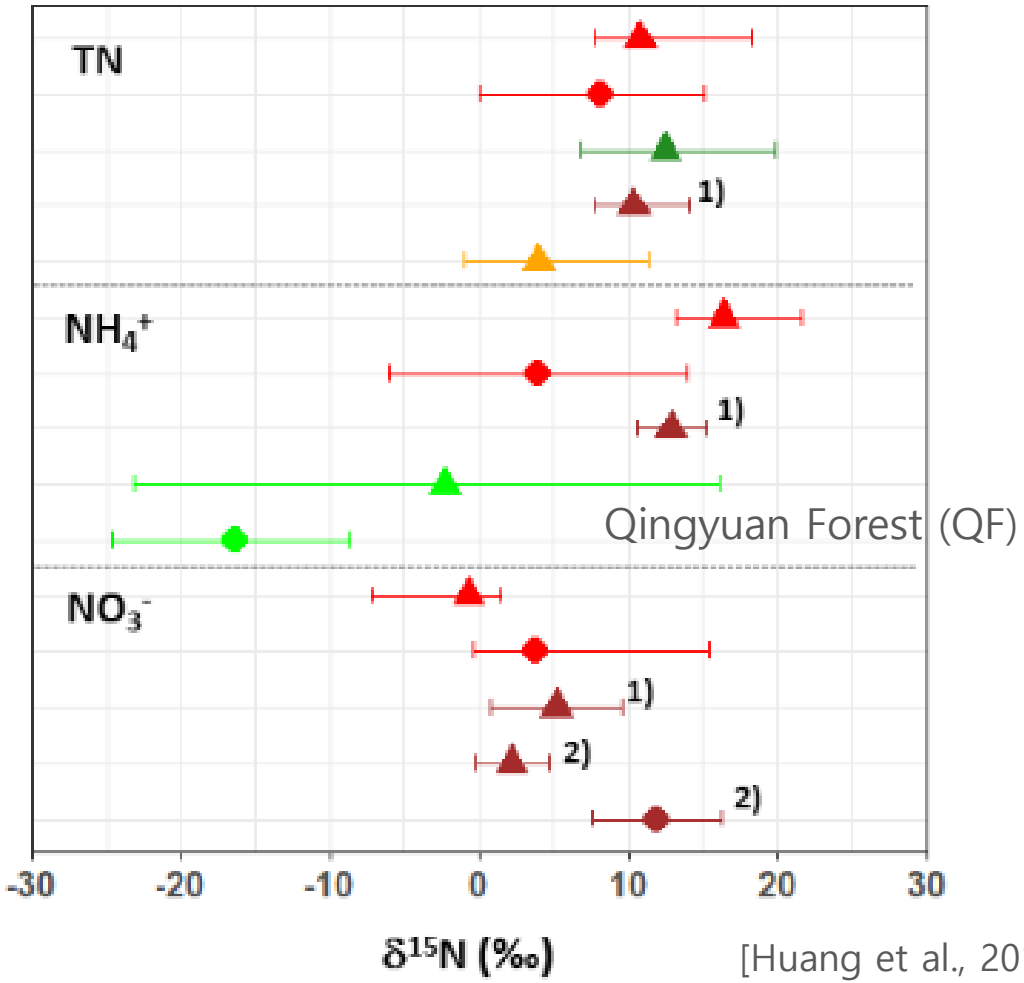
Results : $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$



Season
Cold
Warm

Site (color)
Seoul
TRF
BJ
CD
QF

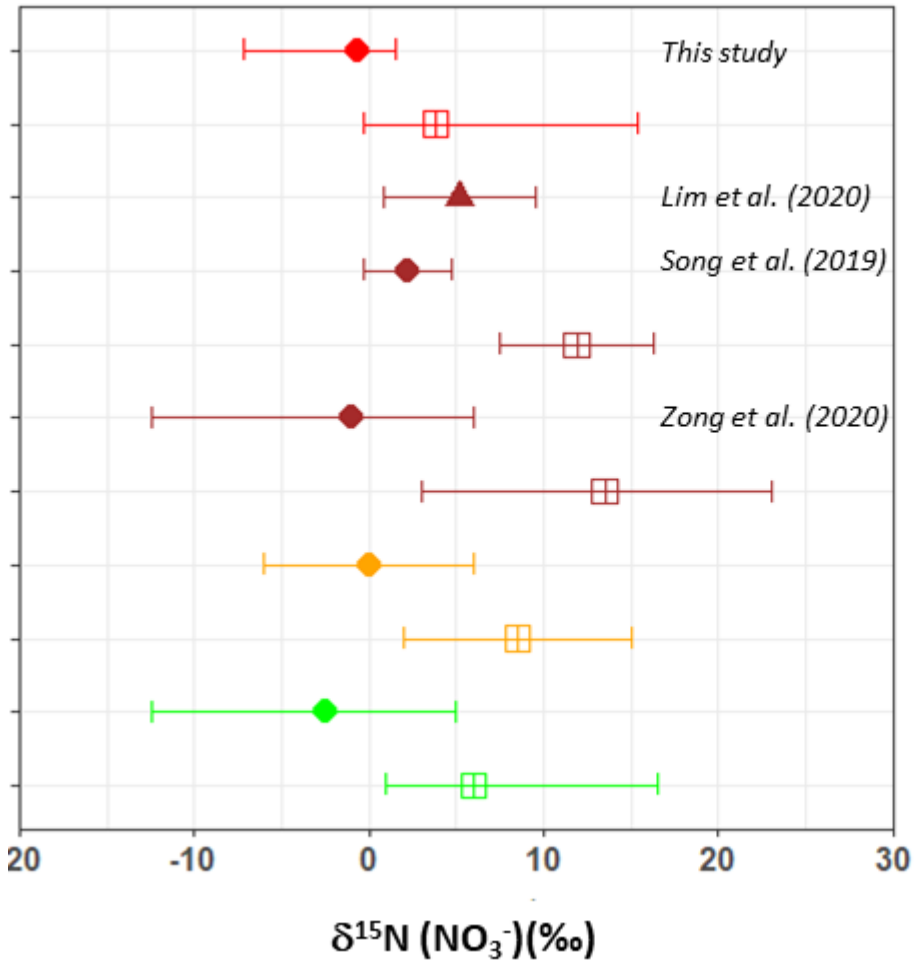
[Lim et al., 2019]

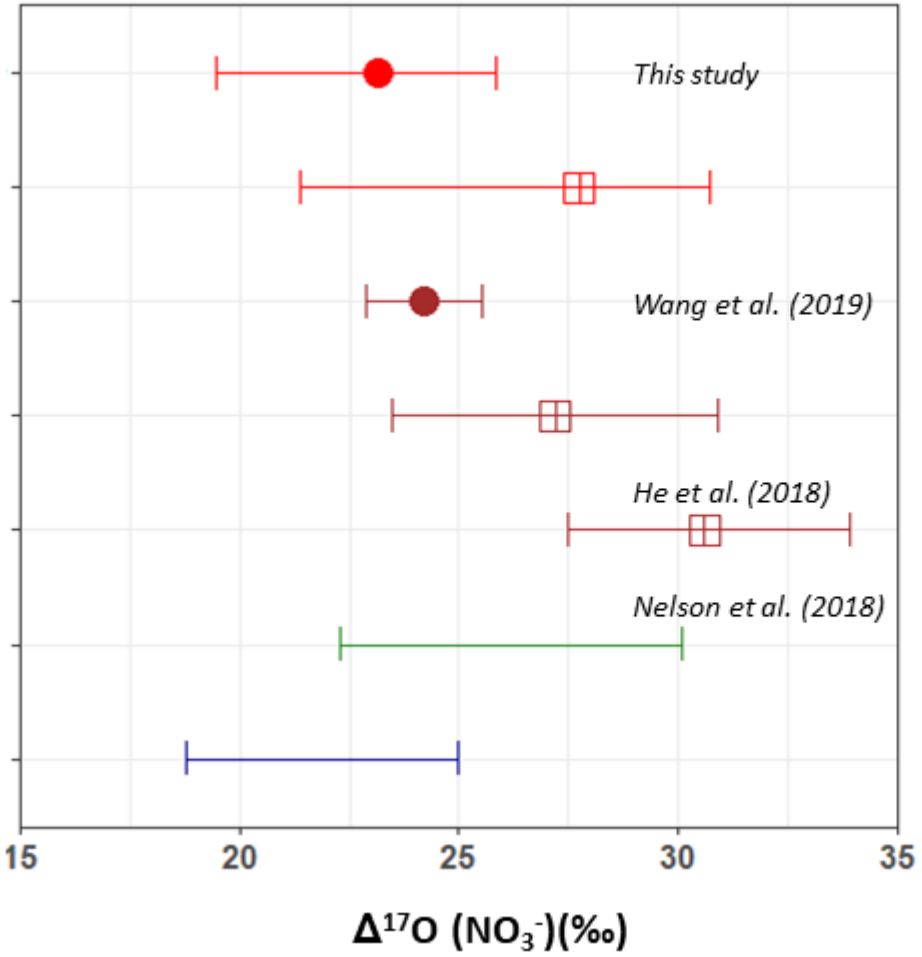


[Huang et al., 2019]

Lim et al., *Envi. Sci. & Technol.*, in review

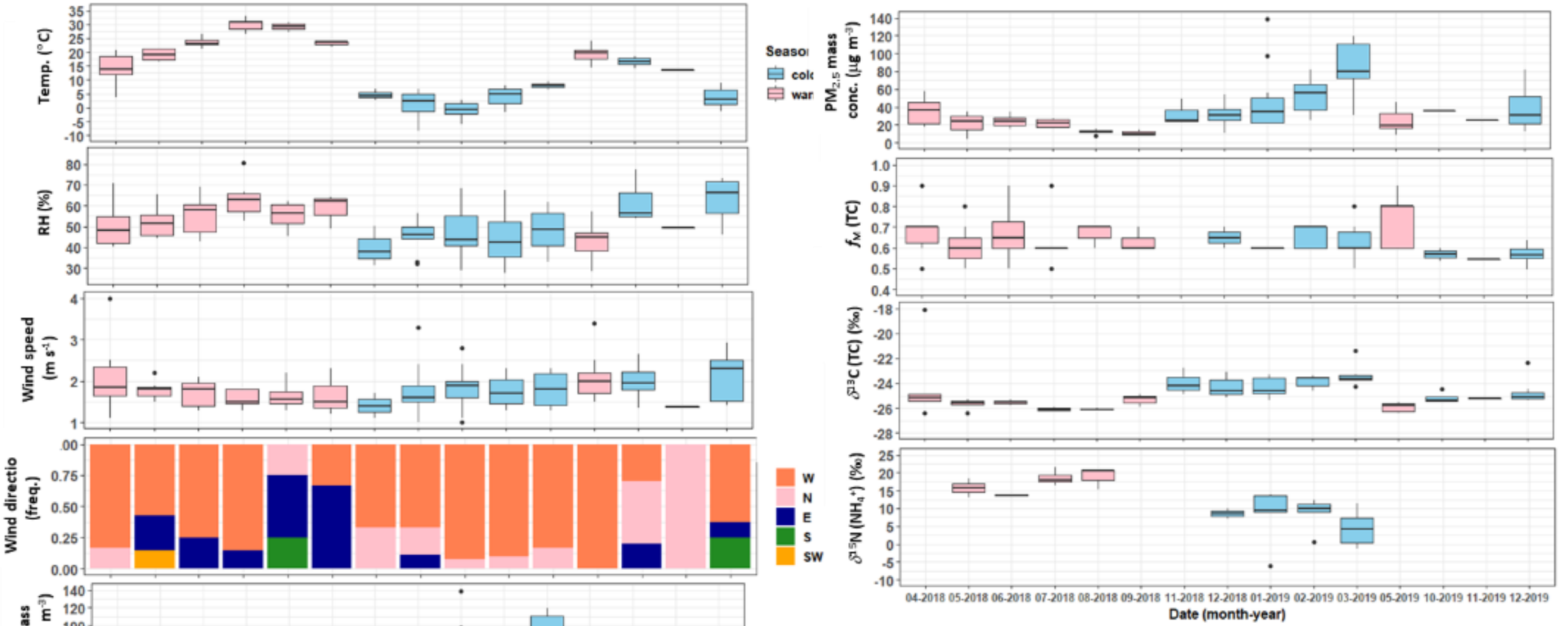
Results : $\delta^{15}N$ (NO_3^-) and $\Delta^{17}O$ (NO_3^-)



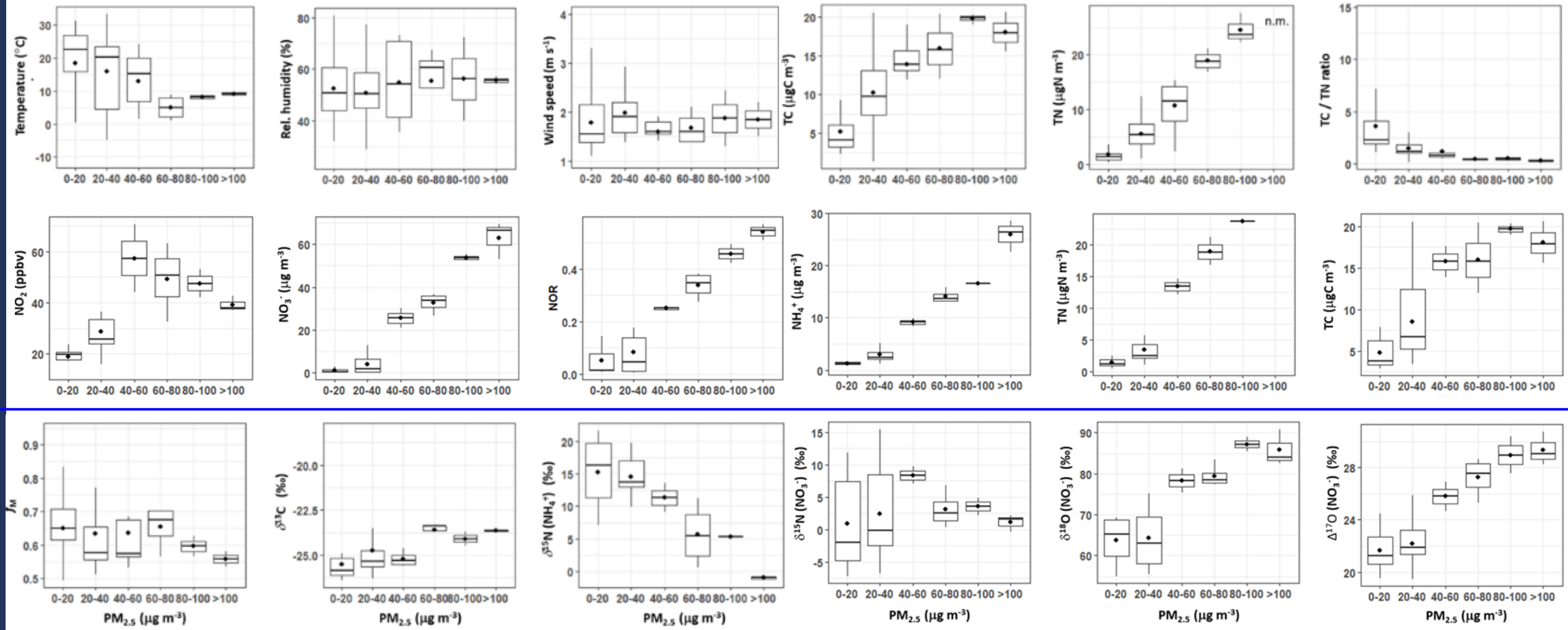


Lim et al., *Atmos. Chem. Physic. Discussion, 2021*

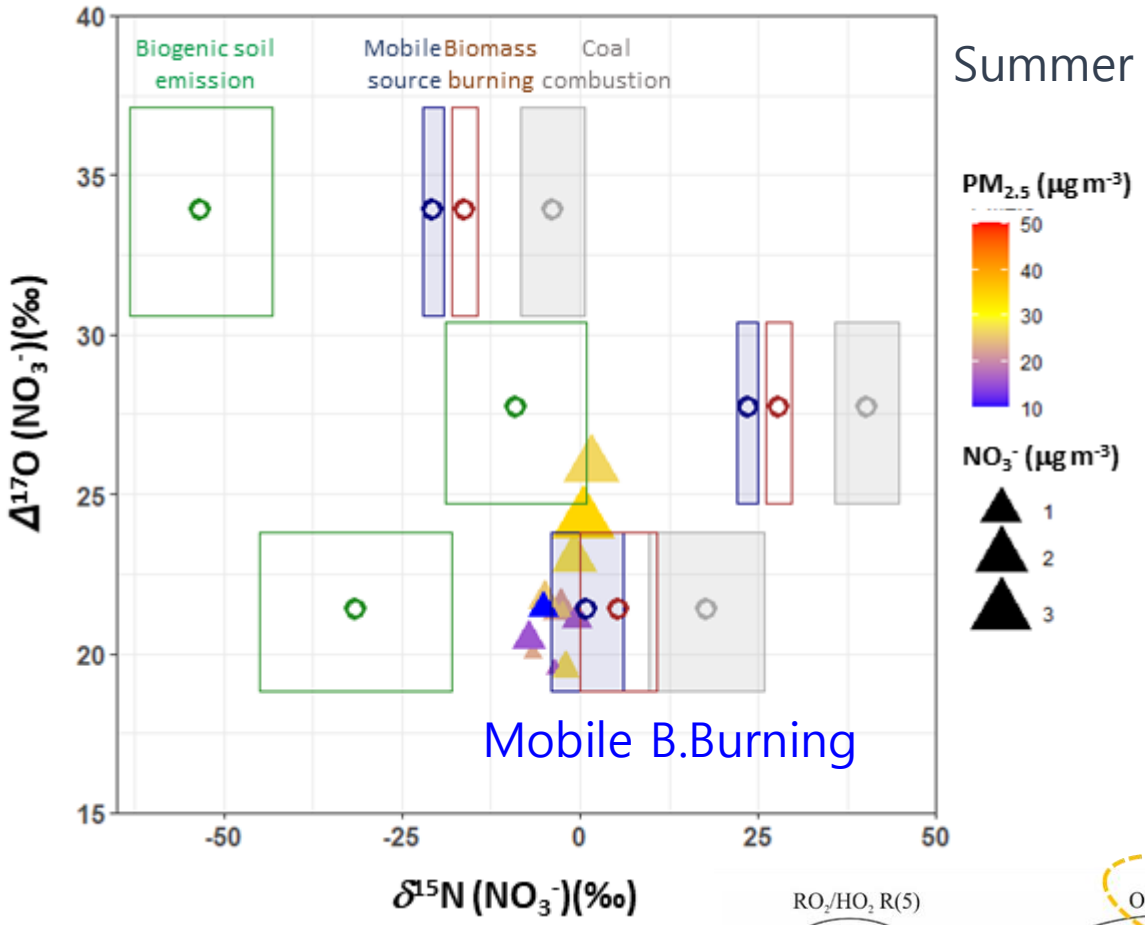
Results : Seasonal variations

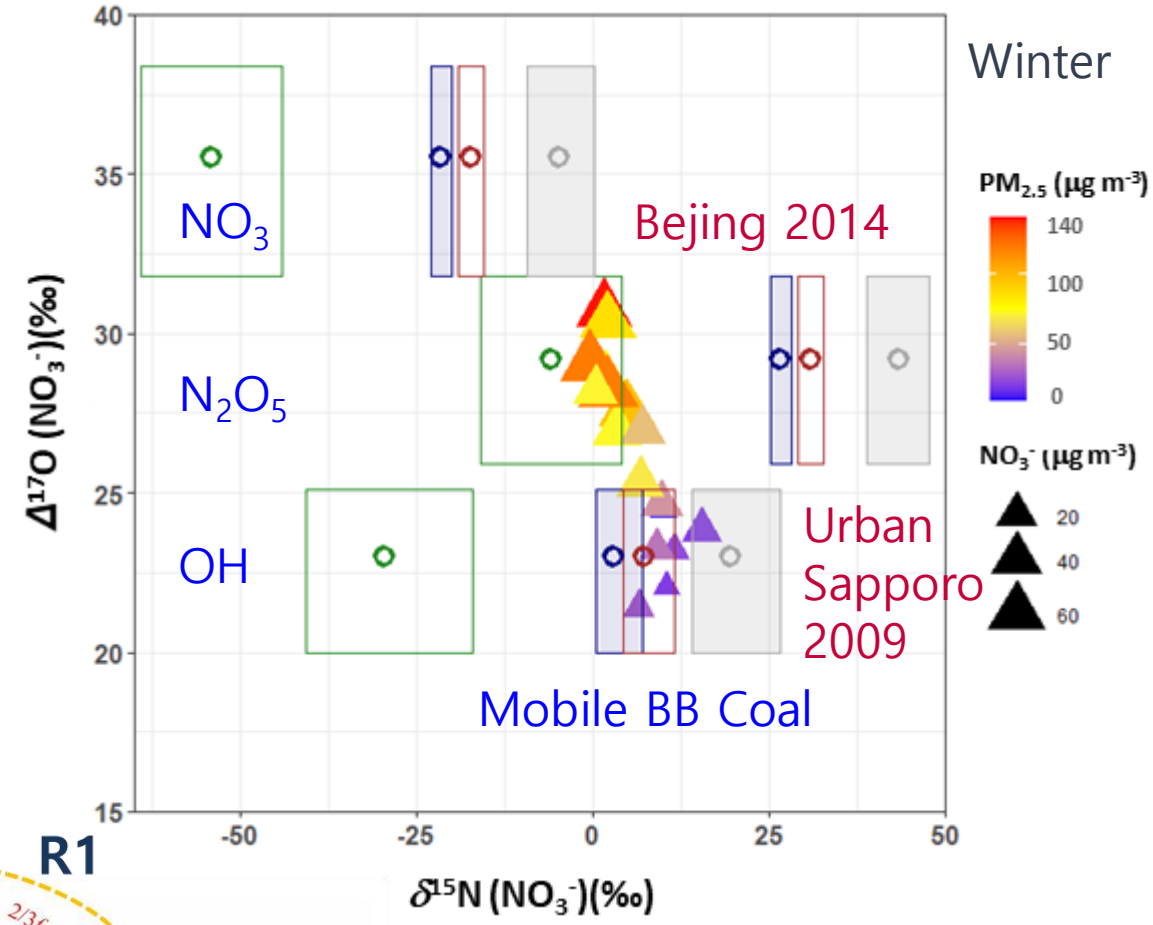


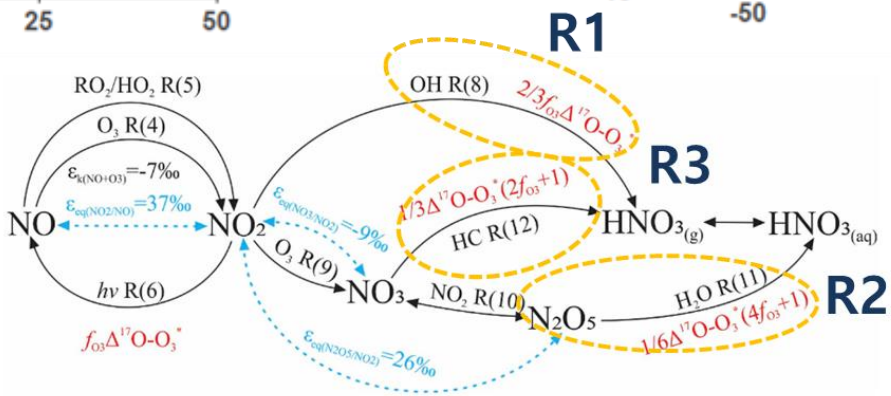
Results : Variations as a function of $PM_{2.5}$ mass conc.



Dual Isotope signature

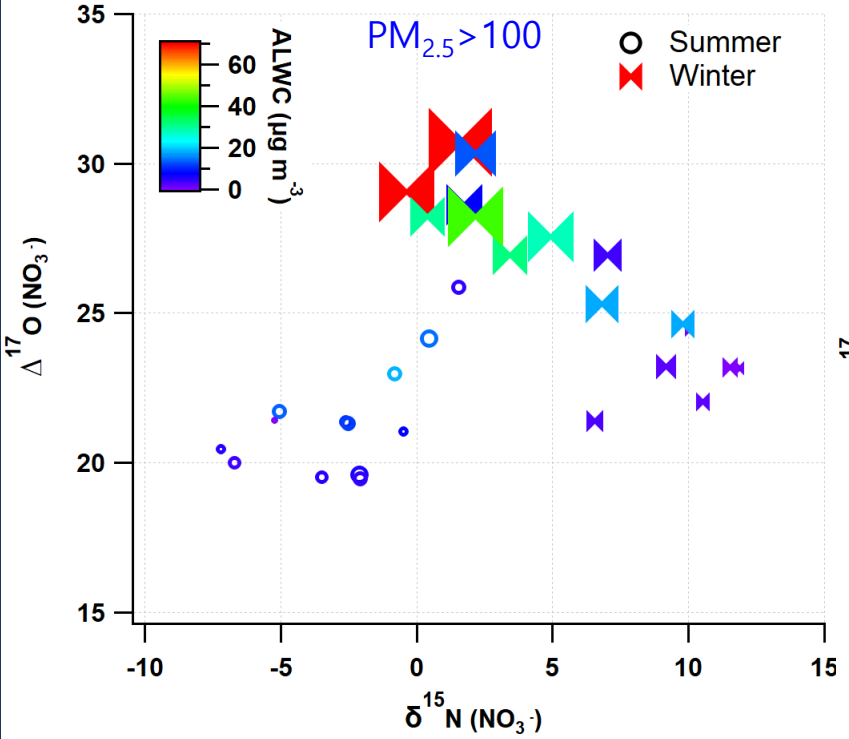




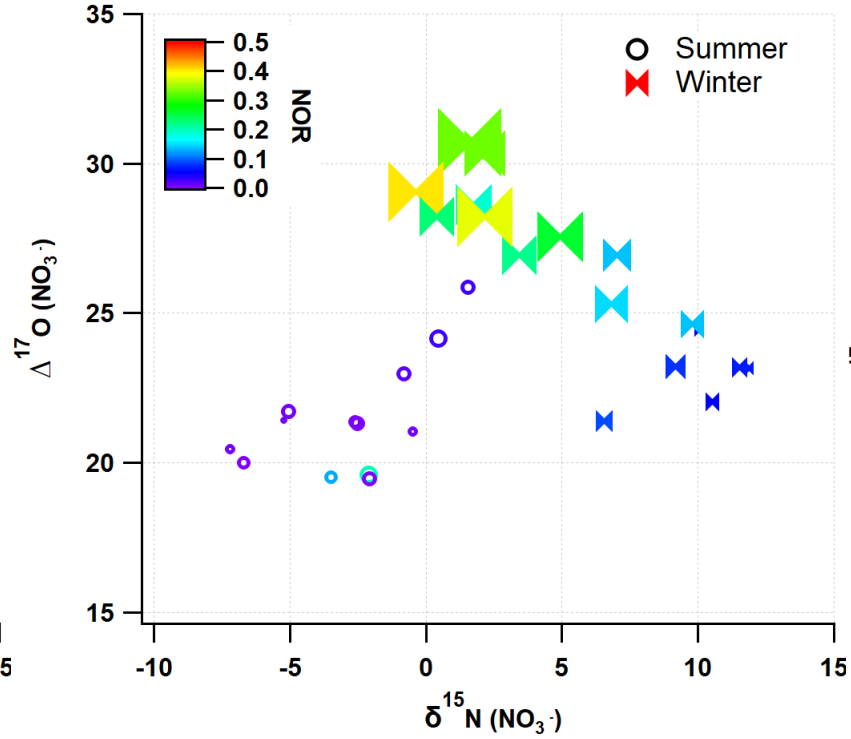


Formation pathway & Source

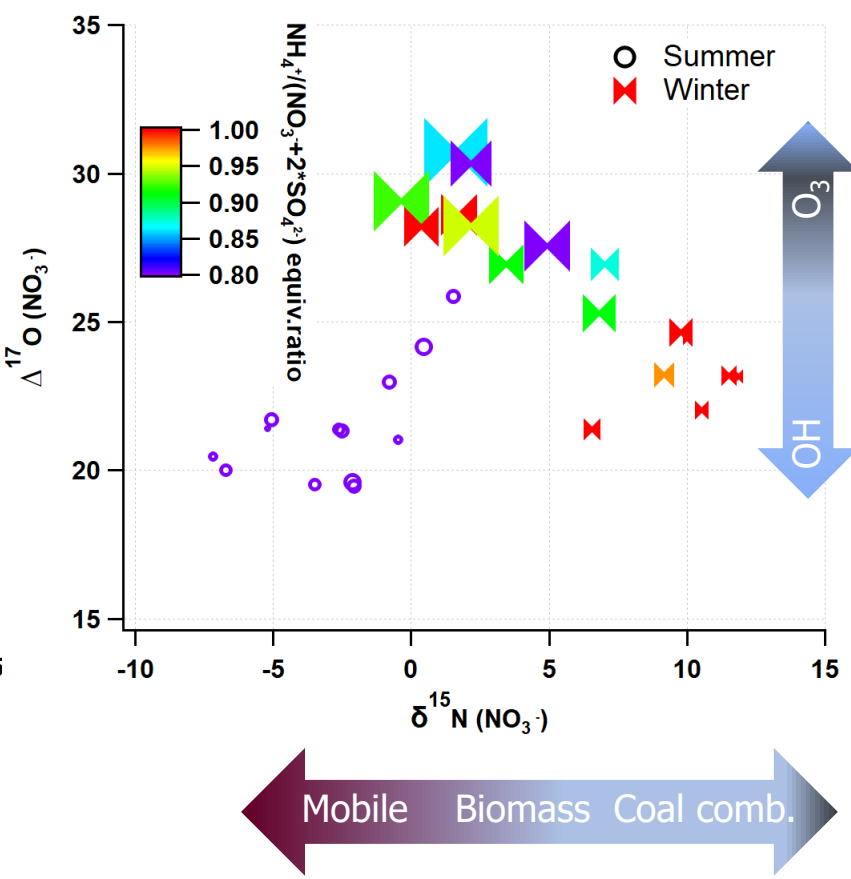
Aerosol Liquid Water Content



Nitrogen Oxidation ratio



Equivalent Ratio



Formation pathway & Source

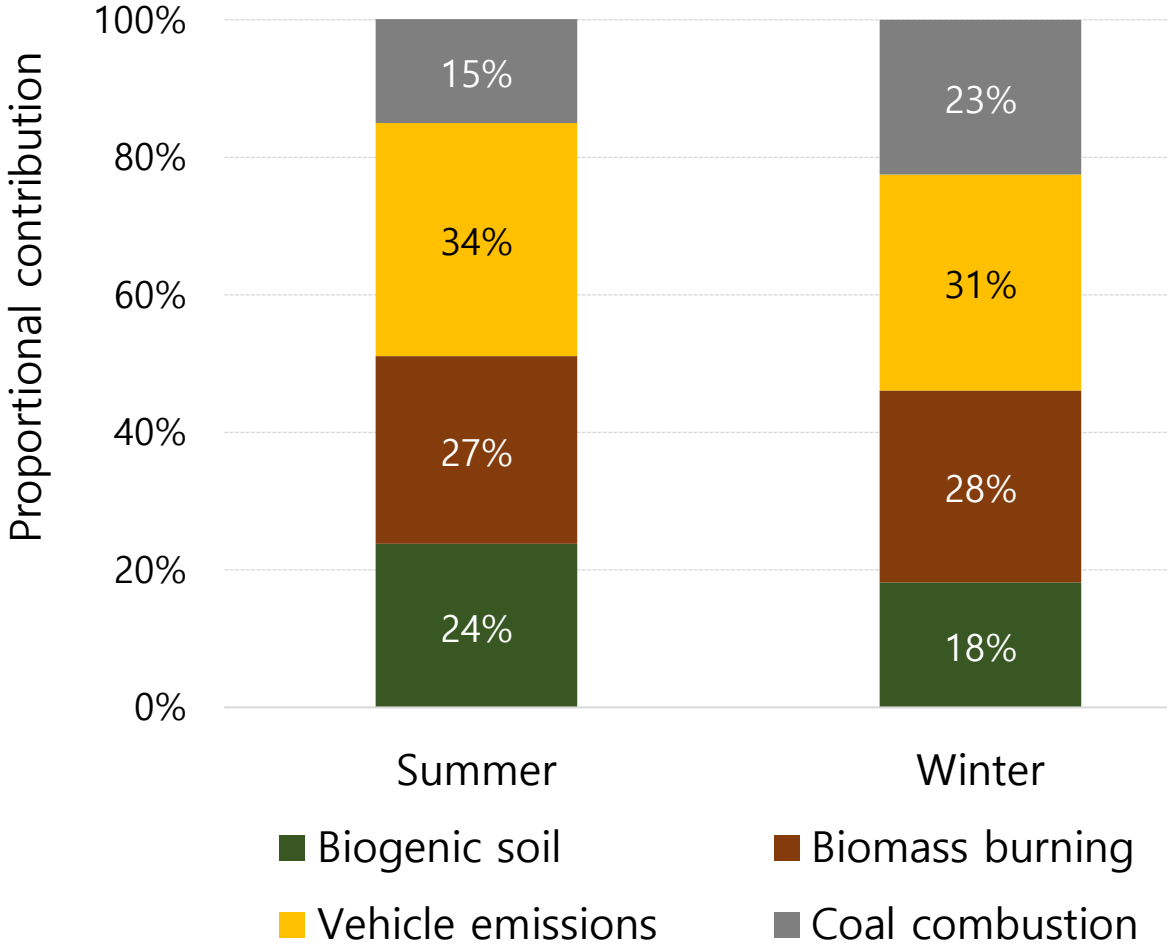
$\Delta^{17}O$ (NO_3^-)	OH	O_3
Warm (n=14)	87 %	13 %
Cold (n=17)	62 %	24 %
$PM_{2.5}$>75 (n=5)	30 %	40 %

Global 41 % < 1 km

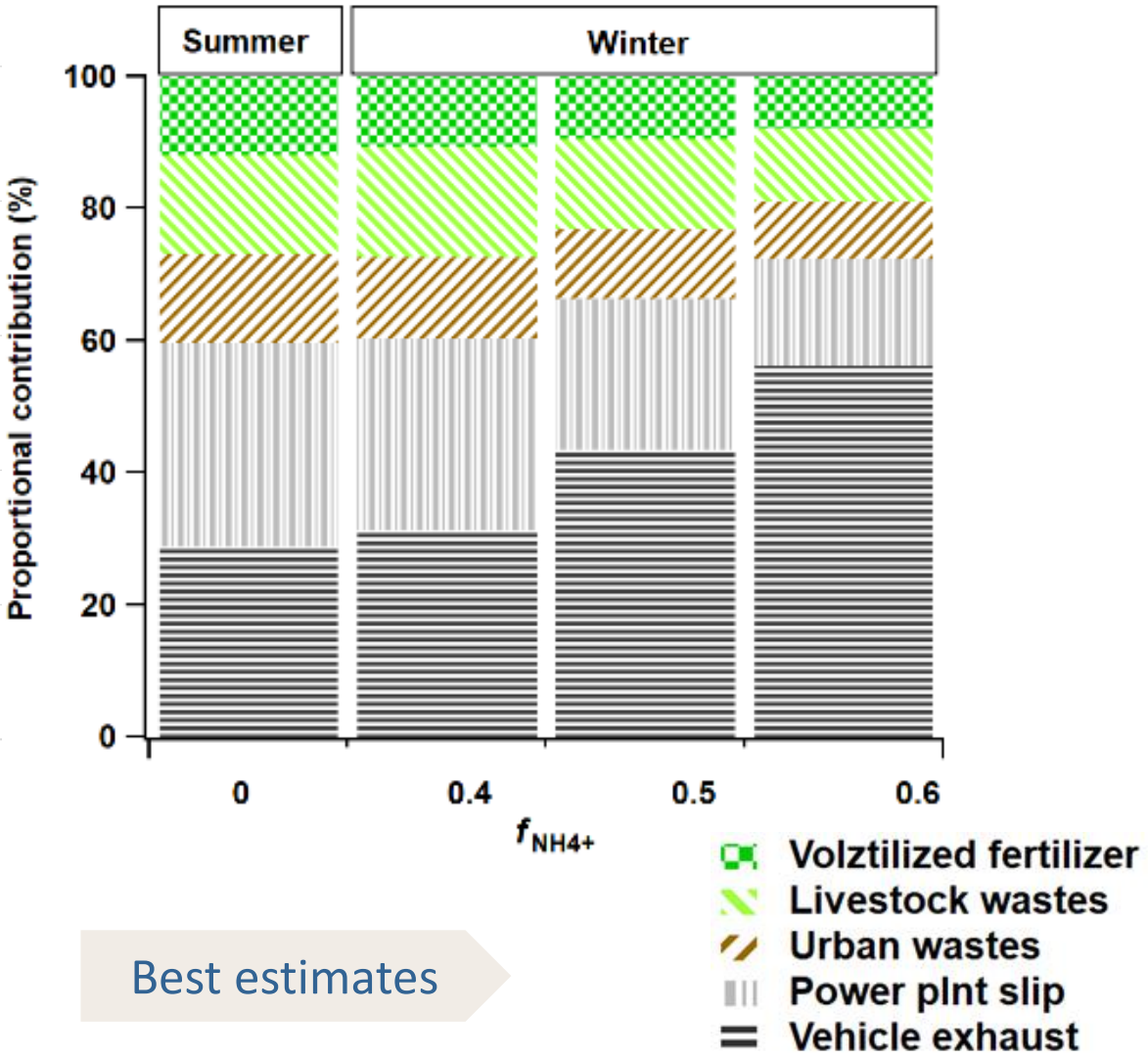
$\Delta^{14}C$ (TC)	Seoul	Beijing
Non-fossil	63 %	48 %
Fossil	37 %	52 %

NOx and NH_3 sources

NOx from NO_3^-



NH_3 from NH_4^+



Best estimates

이 연구는 미세먼지 국가전략프로젝트의 일부로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

경청해 주셔서 감사합니다