

2022년 한국기상학회

환경 및 응용기상 분과 봄 학술대회 초록집

2022년 4월 28일(목) ~ 4월 29일(금)
부산 벅스코(BEXCO)

주최: 사단법인 한국기상학회

주관: 사단법인 한국기상학회

환경 및 응용기상 분과위원회

학회 프로그램 일정표	1
학회 프로그램	2
초록	11
일반 구두	11
[일반구두1]대기조성	12
[일반구두2]대기환경모델링	19
[일반구두3]기상관측정보 활용	26
[일반구두4]대기환경과 기후관계성	32
짧은 구두	38
[짧은구두1]대기환경일반	39
[짧은구두2]응용기상	47
[짧은구두3]미세먼지 및 대기오염	54
[짧은구두4]온실기체 측정 및 분석	65

1. 행사명칭

- 사단법인 한국기상학회 2022년도 환경 및 응용기상 분과 봄 학술대회

2. 일시 및 장소

- 일 자 : 2022년 4월 28일(목) ~ 29일(금)
- 장 소 : 부산광역시 벅스코 (BEXCO)

3. 행사 주최 및 주관

- 주 최 : 사단법인 한국기상학회
- 주 관 : 사단법인 한국기상학회 환경 및 응용기상 분과위원회

4. 행사내용

- 개회식
- 학술대회 안내
- [초청강연1] Axel Timmermann (IBS 기후물리연구단)
- [초청강연2] 김대현 (워싱턴 대학교)
- [특별세션] 탄소중립을 향한 과학-기술-정책 융합 포럼

※ 첨부 내용

- 2022년 봄 학술발표대회 일정표
- 2022년 봄 학술발표대회 프로그램
- 2022년 봄 학술발표대회 일반 구두 및 짧은 구두 초록

※ 봄 학술대회 진행 연락처

- 한국기상학회 사무국
- 연락처) 02-835-1619

2022년 한국기상학회 환경 및 응용기상 분과 봄 학술대회 일정표

4월 28일(목)		
시간	프로그램	장소
8:40 ~ 9:40	등록	제 1전시관 2층
9:40 ~ 9:50	진행 안내 구자호 (환경 및 응용기상 분과위원장)	211-213
9:50 ~ 10:50	[짧은구두1] 대기환경 일반 구자호 (연세대학교)	211-213
10:50 ~ 11:00	휴식	
개회식		
11:00 ~ 11:20	개회사 (하경자 한국기상학회장) 축사 (박광석 기상청장)	214-218
11:20 ~ 11:50	[초청강연1] - Axel Timmermann (IBS 기후물리연구단)	214-218
11:50 ~ 12:20	[초청강연2] - 김대현 (워싱턴 대학교)	214-218
12:20 ~ 13:10	중식	
13:10 ~ 14:40	[일반구두1] 대기조성 김민중 (명지대학교)	211-213
14:40 ~ 15:00	휴식	
15:00 ~ 17:00	[특별세션] 탄소중립을 향한 과학-기술-정책 융합 포럼 장동영 (서울대학교)	211-213
17:00 ~ 17:10	휴식	
17:10 ~ 18:00	[짧은구두2] 응용기상 심성보 (국립기상과학원)	211-213
4월 29일(금)		
시간	프로그램	장소
9:00 ~ 10:30	[일반구두2] 대기환경모델링 박태원 (전남대학교)	211-213
10:30 ~ 10:45	휴식	
10:45 ~ 12:00	[일반구두3] 기상관측정보 활용 김정훈 (서울대학교)	211-213
12:00 ~ 13:20	중식	
13:20 ~ 14:35	[일반구두4] 대기환경과 기후관계성 장동영 (서울대학교)	211-213
14:35 ~ 14:50	휴식	
14:50 ~ 16:10	[짧은구두3] 미세먼지 및 대기오염 최우석 (세종대학교)	211-213
16:10 ~ 16:25	휴식	
16:25 ~ 17:40	[짧은구두4] 온실기체 측정 및 분석 박상서 (UNIST)	211-213

[짧은구두1]대기환경일반: 4월 28일(목) 9:50 ~ 10:50, 211-213

좌장 : 구자호 (연세대학교)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
9:50 ~ 10:50	서울 지역 야간 미세먼지 고농도 사례 보고	임소연, 이동희, 구자호	임소연	연세대학교
	도시 지역에서 건물 파사드와 대기 안정도가 오염물질 확산에 미치는 영향	김민지, 김재진	김민지	부경대학교
	Performance of two different schemes in WRF-Chem to simulate particulate matter in East Asian region	Naser Mohammadzadeh, Myong-In Lee, Ganghan Kim, Seunghee Lee	나셀	UNIST
	섬진강 유역의 수문기상학적 변화 추세와 극한 기후에 따른 변동성 분석 (1997-2020)	손연진, 감종훈	손연진	포항공과대학교
	한국 7개 지역에서 관측한 생태계 규모 꽃가루 비산량의 장기변화 분석	김종호, 정수종, 김규랑	김종호	서울대학교
	디지털카메라를 이용한 낙엽수의 개엽 시기 분석	김병연, 정수종, 김종호, 손성원	김병연	서울대학교
	손실 압축을 통한 수치예보 모델 테스트베드 저장장치 효율성 제고	최수혁, 이두나, 정은성	정은성	홍익대학교

[일반구두1]대기조성: 4월 28일(목) 13:10 ~ 14:40, 211-213

좌장 : 김민중 (명지대학교)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
13:10 ~ 13:25	호주지역 생체연소에 따른 UTLS 탄화수소 연직분포 변화	이동희, 구자호, 김진수, Patrick Sheese, Kaley Walker	이동희	연세대학교
13:25 ~ 13:40	안정동위원소 분석을 통한 대기 수은과 철의 기원 규명	이호인, 권세운	이호인	포항공과대학교
13:40 ~ 13:55	Atmospheric Mercury Depletion Event and Mercury Photoreduction in Snowpack of Mid-Latitude Coastal Island	Ju Hyeon Lee, Young Gwang Kim, Seung Hyeon Lim, Moonkyoung Cho, Jiwon Yun, Sae Yun Kwon	이주현	포항공과대학교
13:55 ~ 14:10	펜스와 수목이 학교 주변 흐름과 미세먼지(PM2.5) 농도에 미치는 영향 연구	박수진, 김재진, 최원식	박수진	부경대학교
14:10 ~ 14:25	타이어와 브레이크 마모가 도심 내 미세먼지에 미치는 영향	박선영, 김민중	박선영	명지대학교
14:25 ~ 14:40	버스 배출이 서울시 미세먼지에 미치는 영향: 압축천연가스 버스와 디젤 버스 비교를 중심으로	김은비, 김민중, 김재진, 최원식, 이상현	김은비	명지대학교

[특별세션]탄소중립을 향한 과학-기술-정책 융합 포럼

: 4월 28일(목) 15:00 ~ 17:00, 211-213

좌장 : 장동영 (서울대학교)

발표시간	제목		발표자	소속
15:00 ~ 15:15	포럼 개최 및 축사		하경자, 김조천, 조명희	한국기상학회장, 한국대기환경학회장, 국민의힘 국회의원
15:15 ~ 15:30	탄소중립 "지금 우리는 어디에 있나" - 과학		정수종	서울대학교
15:30 ~ 15:50	탄소중립 "지금 우리는 어디에 있나" - 기술		김구영	한국지질자원연구원
15:50 ~ 16:10	탄소중립 "지금 우리는 어디에 있나" - 정책		임서영	한국환경공단
16:10 ~ 17:00	토론: 탄소중립 달성을 위해 우리에게 필요한 것은 무엇인가?	1인당 7분 토론	예상옥	한양대학교
			이명인	UNIST
			유가영	경희대학교
			장태선	한국화학연구원
			채여라	한국환경연구원
			우정현	건국대학교
			신방실	KBS

[짧은구두2]응용기상: 4월 28일(목) 17:10 ~ 18:00, 211-213

좌장 : 심정보 (국립기상과학원)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
17:10 ~ 18:00	통합모델 기반의 항공기 착빙 예측 알고리즘 최적화 및 예측성 평가	김은태, 김정훈	김은태	서울대학교
	수도권 집중호우 사례를 통한 깊은 습윤 대류의 발달 메커니즘 분석	박이준, 김정훈	박이준	서울대학교
	Mode-S EHS 정보 기반의 바람 관측자료 생산 및 품질 검증	김정민, 김정훈	김정민	서울대학교
	PNU CGCM-WRF chain을 이용한 찰옥수수 수확일 장기예측	허지나, 김용석, 조세라, 심교문, 강민구, 안중배, 최명주, 김영현	허지나	국립농업과학원
	기계학습법 기반 서리발생 예측 모형 구축을 위한 데이터 학습 방법 비교	김용석, 심교문, 허지나, 강민구, 조세라	김용석	국립농업과학원
	기상인자를 이용한 벼 생산량 유사 연도 통계적 분석 방법 비교	김용석, 심교문, 허지나, 강민구, 조세라	김용석	국립농업과학원

[일반구두2]대기환경모델링: 4월 29일(금) 9:00 ~ 10:30, 211-213

좌장 : 박태원 (전남대학교)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
9:00 ~ 9:15	머신러닝을 이용한 부산 지역의 PM2.5 예측	이주희, 조예슬, 이서영, 명광민, 김영도, 구자호	이주희	연세대학교
9:15 ~ 9:30	K-mean clustering 기법을 활용한 지역별 고농도 오존 발생 원인 비교	김태희, 곽경환, 백광호, 박지해	김태희	강원대학교
9:30 ~ 9:45	에어로졸 역학-CFD 결합 모델을 이용한 자동차 비배기 입자의 도로 이격거리별 기여도 분석	김연욱, 곽경환, 이현호, 이승복	김연욱	강원대학교
9:45 ~ 10:00	Updated aerosol wet and dry deposition schemes in the WRF-Chem model	유영희, 민승기	유영희	포항공과대학교
10:00 ~ 10:15	Assessment of the Secondary Organic Aerosol Affection on Northeast Asia using WRF-Chem model and Data Assimilation	Ganghan Kim, Seunghee Lee, Hyeon-Kuk Kim, Chang-Keun Song, Seungseok Lee, Myong-In Lee	김강한	UNIST
10:15 ~ 10:30	Development of the Inverse Modeling System for Aerosol Emission Based on WRF-Chem and EnKF Data Assimilation	Seunghee Lee, Myong-In Lee, Ganghan Kim, Hyerin Kim	이승희	UNIST

[일반구두3]기상관측정보 활용: 4월 29일(금) 10:45 ~ 12:00, 211-213

좌장 : 김정훈 (서울대학교)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
10:45 ~ 11:00	한반도 대기정체의 특성 및 CORDEX-EA Phase 2 Multi-RCM 모의자료를 이용한 미래 전망	김도현, 김진욱, 변영화, 김태준	김도현	국립기상과학원
11:00 ~ 11:15	겨울철 도로 기하구조와 상태에 따른 기상요소 및 노면온도 변화 특성	김백조, 김유정, 김선정, 김건태, 김지완, 이용희	김백조	국립기상과학원
11:15 ~ 11:30	소형 윈드라이다를 이용한 초저고도 도심기상 관측	나성준, 성성철, 김제원	나성준	(주)동녘
11:30 ~ 11:45	기상감정을 통해 기상관측소 자료를 활용하기 어려울 때 사건사고 해결하는 방안: 2014년 부산 호우 사례	김중진, 조진대, 김동호, 권태순	김중진	서울대학교
11:45 ~ 12:00	농장단위 기상과 작물재해 예측 조기경보서비스 현황	심교문, 조세라, 김지원	조세라	국립농업과학원

[일반구두4]대기환경과 기후관계성: 4월 29일(금) 13:20 ~ 14:35, 211-213

좌장 : 장동영 (서울대학교)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
13:20 ~ 13:35	OCO-2 위성 관측 자료 활용 인공지능 모델 기반 탄소 산출 알고리즘 개발	김은빈, 최예지	김은빈	(주)에스아이에이
13:35 ~ 13:50	2022년 동해와 울진에 발생한 국내 최대 규모 산불이 기후와 대기질에 미치는 영향	장동영, 정수종, 박찬열, 최수민	장동영	서울대학교
13:50 ~ 14:05	한국 (초)미세먼지 대기질에 미치는 기상 영향의 중장기 변화 분석 및 시사점	이승민, 최기철, 최지원, 오혜련, 허선경	이승민	한국환경연구원
14:05 ~ 14:20	기후-대기화학 통합모형을 이용한 이차 유기 에어로졸의 기후적 효과 파악	양서희, 김민중, 조두성, 박록진, 이승언	양서희	명지대학교
14:20 ~ 14:35	기후변화 시나리오에 따른 CMIP6 자료의 한반도 대기질 전망	이태경, 구자호, 심정보	이태경	연세대학교

[짧은구두3]미세먼지 및 대기오염: 4월 29일(금) 14:50 ~ 16:10, 211-213

좌장 : 최우석 (세종대학교)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
14:50 ~ 16:10	여름철 일몰 이후 고농도 오존 지속 사례의 기상학적 원인 분석	김유정, 광경환	김유정	강원대학교
	드론을 이용한 겨울철 도심 및 교외 지역의 오염물질 연직 분포 비교	오효숙, 김수연, 손영진, 고원석, 김지민, 도현석, 김유정, 광경환	오효숙	강원대학교
	에어로졸 역학 모델을 이용한 초기 강우 시 입자상 물질의 크기별 세정효과 모의	강경구, 광경환, 이현호	강경구	강원대학교
	최근 서울 주말 대기질 악화: 국지적 영향보다 외부기여를 중심으로	최우석, 허창희, 허진우, 김가영, 김상우, 김진원	최우석	세종대학교
	군집분석을 활용한 수도권과 충청지역 미세먼지 농도의 공간분포 구분	최우석	최우석	세종대학교
	미세먼지 측정넷을 활용한 전국 지역별 초미세 입자 농도 및 크기 분포 분석	배연, 정수종, 유신이, 최수민, 박찬열	배연	서울대학교
	서울과 백령도 지역의 PM1.0과 PM2.5의 계절별 화학조성 특성 및 발생원 파악	오승미, 김주영, 권수진, 이지이	오승미	이화여자대학교
	2021년도 수도권과 호남권 지역의 PM1.0과 PM2.5의 화학조성 및 발생 특성 차이 비교	김주영, 오승미, 권수진, 이지이	김주영	이화여자대학교
	2050년 PM2.5 질량농도의 증가로 인한 인도와 중국에서 풀벌 시정 제한(limited visibility)의 대규모 변화 예측	조유리, 정수종, 장동영	조유리	서울대학교
	산불 발생에 따른 강릉지역 극초미세먼지 변화	유신이, 최수민, 정진숙, 박찬열	유신이	국립산림과학원

[짧은구두4]온실기체 측정 및 분석: 4월 29일(금) 16:25 ~ 17:40, 211-213

좌장 : 박상서 (UNIST)

발표시간	제목	저자	발표자	소속
16:25 ~ 17:40	서울 이산화탄소 배출량 검증을 위한 베이지안 인버스 모델 개발	심소정, 정수종, 오은실, 윤정민	심소정	서울대학교
	위성 관측을 이용한 발전소 CO2 배출량 산정 기술 개발	김연수, 정수종	김연수	서울대학교
	도심 타워 관측을 활용한 이산화탄소 연직 변동 특성 분석	박채린, 정수종	박채린	서울대학교
	서울 도시 대기 3차원 온실가스 모니터링	박하영, 정수종	박하영	서울대학교
	온실가스 모바일 플랫폼 기반 서울 도심 메탄 농도 진단	박정민, 정수종	박정민	서울대학교
	EOF를 이용한 메탄 농도의 시공간 변화 분석	김나현, 김민중	김나현	명지대학교
	PRISMA 위성의 초분광 영상 자료를 활용한 개별 메탄 배출원의 메탄 칼럼 농도 산정 알고리즘 최적화	이아름, 장동영, 김예인, 정수종	이아름	서울대학교
	위성자료 기반 한반도 대기 중 메탄 농도 분석	김예인, 정수종, 장동영, 주재원	김예인	서울대학교
	2020-2021년 서울지역 오존 전량 돕슨(Dobson) 분광계 관측 결과 및 판도라(Pandora) 분광계, OMI 위성, MERRA-2 재분석장 비교	박민주, 구자호	박민주	연세대학교

일반구두

[일반구두1]

대기조성

호주지역 생체연소에 따른 UTLS 탄화수소 연직분포 변화

이동희¹, 김진수², 구자호¹, Patrick Sheese³, Kaley Walker³

¹연세대학교 대기과학과

²취리히대학교 진화생물환경학부

³토론토대학교 물리학과

2019-2020년 호주 지역 대규모 산불로 인하여 남반구 대기 조성의 큰 변화가 일어났음이 여러 연구를 통해 발견되었다. 이에 본 연구는 호주지역 산불에 의한 남태평양 상부대류권-하부성층권(Upper Troposphere - Lower Stratosphere; UTLS)의 탄화수소(C_2H_2 , C_2H_6 , CH_3OH , $HCOOH$, $HCHO$, HCN) 및 일산화탄소(CO)의 연직분포 변화 특성을 위성자료를 통해 살펴보았다. 특히, 본 연구는 북호주 지역과 남동부 호주 지역의 산불이 대기조성에 미치는 영향의 일관성 또는 차이점 여부를 살펴보는 데 중점을 두고자 한다. 이를 위해 ACE-FTS v4.1의 탄화수소, 일산화탄소 자료와 MODIS 위성 센서의 Fire Count(FC) 및 Burned Area(BA)와 같은 산불정보를 사용하였다. 먼저 연구기간(2004-2020년)동안 FC 및 BA 계절 특징을 보면, 북호주는 남반구 봄철인 9-11월에 주기적인 산불이 발생하지만, 남동부호주는 뚜렷한 계절적 특징을 보이지 않는다. 그런데 호주 인근 남태평양지역 탄화수소 연직분포의 경우 대부분 봄철(9-11월)에 뚜렷한 혼합비의 증가가 관찰되어 북호주 지역 산불기여도가 조금 더 높을 것으로 추정된다. 실제로, 북호주, 남동부 호주의 산불 정보와 남태평양 탄화수소와의 고도별 상관성을 살펴보면, 북호주의 FC 및 BA와 대다수 탄화수소와의 상관성은 약 10km 고도까지 상관계수 (R)이 ~0.6 으로 유의미하지만, 남동부 호주 산불정보와 탄화수소의 상관성은 잘 나타나지 않는다. 이는 북호주/남동부 호주의 식생차이로 인해 산불이 발생하는 시기와 강도가 다르기 때문으로 추정된다. 또한 HCHO의 경우 지역적 차이 없이 FC 및 BA와의 상관성이 잘 나타나지 않는데, 보다 나은 이해를 위해 산불 이외 다른 조건의 영향을 추후 살펴볼 필요가 있다.

Key words: ACE-FTS, Hydrocarbon, Carbon monoxide, Wildfire, Biomass burning

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1C1C1011).

안정동위원소 분석을 통한 대기 수은과 철의 기원 규명

이호인¹, 권세윤¹

¹포항공과대학교 환경공학부

수은은 환경 내에서 활발히 순환하며, 특히 메틸화되면서 생체 축적성이 강해져 인체에 유해한 영향을 끼친다. 원소수은(Hg^0)은 대기 잔존 시간이 0.5-2년 정도로 길어 장거리 수송이 가능하며, 산화된 수은(Hg^{2+})과 입자상 수은(particulate bound Hg; PBM)은 자연적, 인위적인 다양한 배출원으로부터 발생된다. 환경으로 수은이 유입되는 주요 경로 중 하나인 대기 침적 과정에 대하여 수은의 기원을 정확히 파악하는 것은 수은 순환 시스템의 이해도를 향상시키는데 기여할 것이다. 본 연구에서는 포항 지역으로 침적되는 수은의 계절별 기원을 파악하고 유입 경로를 이해하기 위해 2021년 1월부터 기체상 수은(Hg^0)과 입자상 수은의 농도와 안정동위원소비를 분석하였다. 또한, 입자상 철은 직경 $1\mu\text{m}$ 를 기준으로 자연적 기원과 인위적 기원이 구분되는 것으로 알려져 있어 대기 철의 입자 크기별($>7.2\mu\text{m}$, $3.0-7.2\mu\text{m}$, $1.5-3.0\mu\text{m}$, $0.95-1.5\mu\text{m}$, $0.49-0.95\mu\text{m}$) 농도를 분석하였으며, 구분된 두 농도의 비(인위적 배출 농도/자연적 배출 농도)를 계산하여 오염원의 지표로 활용하였다. 입자상 수은의 계절별 농도는 겨울, 봄에 각각 $85.8\pm 98.3\text{ pg/m}^3$, $38.6\pm 31.7\text{ pg/m}^3$ 로 나타났으며, 총 철의 계절별 농도는 겨울, 봄, 여름에 각각 $1.05\pm 0.90\text{ }\mu\text{g/m}^3$, $1.40\pm 1.12\text{ }\mu\text{g/m}^3$, $0.35\pm 0.34\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 로 나타났다. 수은 안정동위원소 분석을 통해 기원을 확인해본 결과, 겨울에는 기체상 수은과 입자상 수은의 $\delta^{202}\text{Hg}$ 가 각각 -0.39% 과 -0.16% 로 비슷하게 나타났으며, 이는 인위적으로 배출된 수은의 안정동위원소비와 흡사하다. 봄에는 기체상 수은과 입자상 수은의 $\delta^{202}\text{Hg}$ 가 각각 -1.77% 과 0.05% 로 매우 달라 서로 다른 기원임을 알 수 있었으며, 기체상 수은은 해양 수계에서 휘발되어 거동한 것으로 파악된다. 철의 인위적/자연적 농도비는 겨울에 0.13 ± 0.04 , 봄에 0.07 ± 0.04 로 둘 사이에 유의미한 차이를 보였으며 계절별 입자상 총수은 농도 및 수은 안정동위원소비와도 비슷한 결과를 나타낸다. 이는 겨울에 인위적인 오염원, 봄에 자연적인 오염원의 영향을 많이 받았을 것임을 의미한다.

향후, 추가 분석을 진행하고 수은 안정동위원소 라이브러리와 비교하여 인위적 및 자연적 수은과 철의 기원을 명확히 규명하고, 역궤적 모델(backward trajectory model)을 통해 계절별 대기 수은의 거동을 파악할 계획이다.

Key words: 입자상 수은, 입자상 철, 안정동위원소, 계절적 변동

※ 이 연구는 기초연구실 지원사업(NRF-2020R1A4A1018818)의 지원으로 수행되었습니다.

Atmospheric Mercury Depletion Event and Mercury Photoreduction in Snowpack of Mid-Latitude Coastal Island

Ju Hyeon Lee¹, Young Gwang Kim¹, Seung Hyeon Lim¹,
Moonkyoung Cho¹, Jiwon Yun¹, Sae Yun Kwon^{1,2}

¹Division of Environmental Science and Engineering, POSTECH
²L_CREATE, Yonsei University

During the polar springtime, sunlight-induced photo-oxidation of atmospheric mercury (Hg) via coastal halogen causes substantial atmospheric Hg deposition to snowpack in the form of oxidized Hg²⁺. This is known as the Atmospheric Mercury Depletion Event (AMDE), observed primarily in the Arctic and Antarctic. Only a few studies have characterized Hg sources and mechanisms driving atmospheric-snowpack Hg exchange at mid-latitude coastal regions. Here, we measured Hg isotope ratios in total gaseous Hg (TGM) and snow samples from Mt. Halla, located at a coastal island of Jeju. Hg isotope ratios of snow samples collected at Mt. Halla were remarkably consistent ($\delta^{202}\text{Hg} = 0.02 \pm 0.02\%$, $\Delta^{199}\text{Hg} = -1.07 \pm 0.31\%$, 1 SD) with snow collected during the AMDE in the Arctic ($\delta^{202}\text{Hg} = 0.25 \pm 0.42\%$, $\Delta^{199}\text{Hg} = -1.08 \pm 0.18\%$, 1 SD) and different from snow affected by reactive surface uptake of gaseous elemental Hg (Hg⁰) ($\delta^{202}\text{Hg} = -1.27 \pm 0.22\%$, $\Delta^{199}\text{Hg} = -0.14 \pm 0.14\%$, 1 SD). Hg isotope ratios of TGM collected at the same site exhibited a $\delta^{202}\text{Hg}$ range of -2.33 to -0.80%. This negative $\delta^{202}\text{Hg}$ values in TGM reflect Hg evaded from the ocean surface, suggesting that our snow samples are likely affected by marine air masses containing coastal Hg and halogen. We found an increasing trend in Hg isotope ratios of snow samples (3rd day; $\delta^{202}\text{Hg} = 0.34 \pm 0.03\%$, $\Delta^{199}\text{Hg} = 0.03 \pm 0.02\%$, 1 SD) over the course of 3-day sampling. The slope of $\Delta^{199}\text{Hg}/\Delta^{201}\text{Hg}$ (1.00 ± 0.05) in snow samples were also consistent with the experimental slope caused by aqueous Hg²⁺ photo-reduction. This indicates that there is substantial evasion of lighter Hg isotopes during snow melting. Our study suggests evidence of the AMDE at mid-latitude coastal sites, facilitated by the coastal halogen and Hg evaded from the ocean surface.

Key words: Mercury stable isotope, Atmospheric Mercury Depletion Event, Snowpack

※ 이 연구는 한국연구재단 해양·극지기초원천기술개발사업(NRF-2021M1A5A1075513)의 지원으로 수행되었습니다.

펜스와 수목이 학교 주변 흐름과 미세먼지(PM_{2.5}) 농도에 미치는 영향 연구

박수진¹, 김재진², 최원식²

¹부경대학교 슈퍼컴퓨터센터

²부경대학교 환경대기과학과

본 연구에서는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 모델을 이용하여 펜스 설치와 수목 식재에 따른 학교 주변의 흐름과 미세먼지(PM_{2.5})의 확산 특성을 조사하였다. 대상 지역은 학교 주변과 내부에 수목이 식재되어 있으며, 주변 도로 배출오염원의 영향을 분석할 수 있는 부산 중구를 대상지역으로 선정하였다. 바람장과 미세먼지 농도장에 대한 수치 모델의 예측 성능을 평가하기 위해, 학교 옥상(4층)과 도로변에서 측정된 시간 평균 자료(2020년 06월 23일)와 비교·검증하였다. CFD 모델의 수치 도면 영역은 대상 지역 주변으로 500 m X 500 m로 설정하였고, 바람과 PM_{2.5}에 대한 초기·경계 조건은 LDAPS 모의 결과와 광복동 AQMS (AQMS 221112) 자료를 사용하였다. 대상기간 동안 새벽에는 주로 서풍 계열의 흐름이 나타났고, 주간에는 남동풍 계열의 흐름이 나타났다. CFD 모델은 풍향의 변화 경향을 잘 모의하였으며, 건물의 마찰 효과를 반영하여 풍속을 잘 모의하였다. PM_{2.5} 농도의 경우, CFD 모델은 주변에 장애물이 없는 학교 옥상에서 배경 농도와 거의 유사하게 모의하였고, 도로 배출의 영향으로 인해 도로변 주변에서는 주간에 측정 농도와 유사한 결과를 보였다. 펜스와 수목에 의한 주변 흐름과 PM_{2.5} 농도를 분석하기 위해, 펜스와 수목이 없는 경우를 기준실험으로 설정하고, 펜스와 수목의 높이를 2 m, 4 m로 설정하여 16방위에 대한 수치 모의를 수행하였다. 펜스를 설치한 경우, 기준 실험과 비교하여 학교 펜스 주변과 운동장에서 모든 풍향에 대해 전체적으로 PM_{2.5} 농도가 감소하였다. 펜스의 높이가 높을수록 PM_{2.5} 농도 감소가 크게 나타났으며, 학교 운동장과 비교하여 펜스 주변에서의 농도 감소가 상대적으로 크게 나타났다. 수목을 식재한 경우, 기준 실험과 비교하여 모든 풍향에 대해 PM_{2.5} 농도가 감소하였으나, 학교 운동장과 학교 경계지역의 농도 변화는 유사하게 나타났다. 수목의 높이가 높을수록 학교 내부의 PM_{2.5} 농도 감소가 크게 나타났다.

Key words: 미세먼지(PM_{2.5}), 전산유체역학 모델, 펜스 효과, 수목 효과

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019M3E7A1113103).

타이어와 브레이크 마모가 도심 내 미세먼지에 미치는 영향

박선영, 김민중

명지대학교 환경에너지공학과

도심에서의 많은 자동차는 다수의 오염물질을 배출하며 도심 미세먼지의 상당 부분을 기여한다고 알려져 있다. 이에 따라 비-배기성 배출에서 기인한 미세먼지에 대한 관심도 증가하고 있다. 자동차의 비 배기성 배출에 관한 연구는 주로 도로표면 마모 및 재비산먼지에 집중되어있지만, 타이어와 브레이크 마모에서 기인한 미세먼지 역시 많다는 것이 알려지면서 타이어와 브레이크 마모에서 기인한 미세먼지의 물리 화학적 특성 및 배출계수를 산정하고자 하는 연구들이 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 서울시내의 교통량과 미세먼지 및 미량 금속 성분의 관측 자료와 상세규모 대기화학 수송모형을 이용하여 자동차의 타이어와 브레이크 마모가 도심 내 미세먼지 농도에 미치는 영향을 파악하고자 한다.

이를 위하여 서울 은평구 지역을 대상으로 관측된 교통량과 잘 알려진 여러 연구의 타이어 및 브레이크 마모 배출계수를 이용하여 모델링을 진행하였다. 또한 농도를 결정하는데 중요한 공기 유입 비율은 50%의 값을 사용한 경우와 타이어와 브레이크의 마모에 대해 각각 5%와 12%로 가정하는 두 가지 경우에 대해 민감도 실험을 진행하였다. 모델 검증 및 최적의 배출계수와 공기유입 비율을 구하기 위하여 타이어와 브레이크 마모의 핵심 성분으로 알려진 중금속 성분인 Zn, Pb, K의 농도를 산정하여 도메인 내 측정된 관측 자료와 비교하였다. 공기유입비율은 타이어와 브레이크의 마모에 대해 각각 5%와 12%로 가정한 두 번째 경우가 더 우수한 모의 성능을 나타내었다. Zn과 Pb의 경우 EMEP/EEA의 성분비를 적용한 결과가 최적의 결과로 도출되었다. 하지만 K의 경우는 모든 경우에 있어 과소 모의를 하였다. 이는 K는 타이어와 브레이크 마모의 마커 외에도 재비산 먼지의 마커로써 잘 알려져 있어 타이어와 브레이크 마모의 마커로 사용하기 어렵다고 판단된다.

모델 결과 도메인 내의 일 평균 미세먼지 농도는 $2.33\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일 최고 $9.16\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 같은 날 서울시 은평구 불광동의 미세먼지 측정값은 하루평균 $11.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 이와 비교해 브레이크와 타이어 마모에서 기인한 미세먼지는 약 20%에 해당하며 중요 요소임을 알 수 있다. 따라서 상세규모 대기화학 모델링에서 타이어와 브레이크 마모에 의한 배출은 반드시 고려되어야 한다.

Key words: 타이어 마모, 브레이크 마모, 비 배기성 배출, 상세규모 대기질 모델링, CFD-chem

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부의)재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.NRF-2020R1C1C1008898)

버스 배출이 서울시 미세먼지에 미치는 영향: 압축천연가스 버스와 디젤 버스 비교를 중심으로

김은비¹, 김민중¹, 김재진², 최원식², 이상현³

¹명지대학교 환경에너지공학과

²부경대학교 환경대기과학과

³공주대학교 대기과학과

환경문제에 대한 시민들의 관심이 급증하면서 정부는 미세먼지 특별대책(2017)을 발표한 바 있다. 서울시는 도심 속 대기오염원에서 대중교통의 배기가스는 주행거리와 운행 시간이 길고 차량 수량이 많아 큰 비중을 차지하기에 초미세먼지 문제 해결을 위해 서울 시내버스를 압축 천연가스(CNG) 버스로 대체하였다. 서울시는 정책 도입 후 서울시 미세먼지의 농도가 낮아지면서 이를 CNG 버스의 도입 효과라고 발표한 바 있다. 그러나 서울시의 미세먼지 감소 현상은 단순한 버스 연료의 변화뿐만 아니라 여러 배출 저감 노력 및 외부 환경의 변화가 복합적으로 나타난 것이다. 향후 효과적인 정책 수립에 있어 실제 CNG 버스 배출로 인한 미세먼지 기여도 및 기존 디젤 기반 버스에서의 변경으로 인한 효과에 대한 구체적인 연구가 필요하다. CNG 버스는 경유버스에 비하여 NO_x, CO 배출량이 3-30 배 낮으며 PM 배출은 없어 에어로졸의 저감 효과를 보일 수 있다. 그러나 NO_x 기준을 만족을 위한 디젤, CNG 버스의 후처리 기술은 NH₃와 N₂O의 생산을 야기한다. 대기정책지원시스템(Clean Air Policy Support System, CAPPS)에서 CNG 버스 배출량을 산정하고 있지만 현실에서의 배출과 오차가 있을 수 있으며 도심 속 기상조건과 배출의 공간 분포에 따른 영향은 미세먼지 생성과 위해성에 중요하나 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구는 버스 교통량으로 인한 대기오염물질 배출량을 산정하고 모델링을 통해 오염물질 배출의 시·공간적 특성과 오염물질로 인한 에어로졸 생성을 H₂SO₄ - HNO₃ - NH₃ system을 기반으로 분석하여 CNG 버스 배출이 도심 속 미세먼지 저감에 미치는 영향을 파악한다. 또한 디젤 버스인 경우도 모의하여 CNG 버스로 인한 미세먼지 저감 정책의 효과도 살펴본다.

Key words: CNG Bus, Diesel Bus, PM_{2.5}, 암모니아(NH₃), CFD-Chem

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NFR-2020R1C1C1008898).

[일반구두2]

대기환경모델링

머신러닝을 이용한 부산 지역의 PM_{2.5} 예측

이주희¹, 조예슬¹, 이서영¹, 명광민², 김영도³, 구자호¹

¹연세대학교 대기과학과

²디아이랩(주)

³(주)웨더아이

초미세먼지는 인간 건강에 치명적인 악영향을 끼치기 때문에 그 질량농도(PM_{2.5})를 모니터링하여 제공하는 업무는 사회적으로 중요한 의미를 가진다. 환경부는 2015년부터 국내 250-300여 개 관측소에서 PM_{2.5}를 관측하여 그 정보를 에어코리아(AIRKOREA) 사이트를 통해 제공하고 있지만, 여전히 공간적으로 조밀한 미세먼지 오염 추적에 부족함이 많다. 최근 이 문제를 해결하고자 저가 관측 센서 기반으로 조밀하게 구축된 지상 관측망 및 고해상도 위성 관측을 활용하고 머신러닝을 통해 관측자료의 정확성을 끌어내는 연구 방법이 주목받고 있다. 이에 본 연구에서는 KT가 설치한 저가 센서 미세먼지 관측망과 천리안 위성의 GOCI(Geostationary Ocean Color Imager) 센서가 생산하는 고해상도 AOD(Aerosol Optical Depth) 자료를 바탕으로 Random Forest 방식의 머신러닝 기법을 적용하여 PM_{2.5}를 추정하고 검증하는 연구를 수행해보았다. 연구는 약 260여 개 KT 관측소가 운영된 부산지역에서 관측이 수행된 2018년 6월에서 2019년 12월까지의 19개월을 대상으로 수행되었다. 더욱 우수한 머신러닝 결과 확보를 위해 AOD를 포함한 11개의 변수를 추가로 고려하였는데, 이때 주로 기상정보를 많이 고려하게 된다. 필요한 기상장 정보는 ECMWF의 ERA5 재분석장 자료를 활용하였다. 최종적으로 예측한 PM_{2.5}를 관측자료와 10-fold Cross Validation 방법으로 비교해본 결과 6 × 6 km² AOD를 사용했을 경우 R² = 0.43이던 결과가 0.5 × 0.5 km² AOD를 사용했을 때 R² = 0.70으로 향상하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고해상도 위성 자료의 활용이 머신러닝 기반 PM_{2.5} 추정 품질을 높이는 데 크게 기여함을 보여준다.

Key words : PM_{2.5}, 머신러닝, 랜덤포레스트, 10-fold Cross Validation, AOD

※ 이 연구는 이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원 (No.2021-0-00459, 서비스 플랫폼 기반 미세먼지 예보정확도 향상 문제 해결) 및 2021년도 연세 시그니처 연구클러스터 사업 연구비의 지원을 받아 수행된 것임. (2021-22-0003)

K-mean clustering 기법을 활용한 지역별 고농도 오존 발생 원인 비교

김태희¹, 곽경환², 백광호³, 박지혜³

¹강원대학교 환경학과

²강원대학교 환경융합학부

³한국환경공단 대기측정망부

오존은 국내를 포함한 세계 각국에서 대기오염물질로 규정하고 있다. 대기의 오존농도를 개선하기 위한 여러 노력이 있었지만, 우리나라의 오존은 대도시를 중심으로 꾸준히 악화되고 있다. 우리나라는 환경정책기본법이 시행되고 있으나 대부분 지역에서 환경기준을 초과하고 있다. 오존은 NO_x, VOC와 같은 전구물질들이 복잡한 광화학 반응을 통해 생성되며, 광화학적 반응, 수송 등을 통해 그 농도가 시·공간적으로 변화한다. 오존의 농도 분포는 배출원의 종류나 기상조건에 의해 지역적으로 다양하게 나타나기 때문에, 대기의 오존농도를 효과적으로 저감하기 위해서는 지역별 생성원인을 파악하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 k-mean clustering 기법을 통해 2017년부터 2019년까지의 대기오염측정망에서 관측된 오존의 농도데이터와 오존의 전구물질에 해당하는 VOC 및 NO_x의 배출량, 8시간 평균 오존농도 데이터를 활용하여 지역별 오존농도의 특성을 분류하였다. 국내의 오존 주의보가 발령되는 기간인 4월 15일부터 10월 15일까지의 8시간 평균 오존농도를 사용하여 군집분류 하였다. VOC와 NO_x의 배출량은 CAPSS 2018 자료를 활용하였다. 군집분석은 R 4.1.1을 사용하였고 최적화된 군집 개수는 NbClust package를 사용하였다.

군집분석결과 국내 오존현황은 3가지 특성으로 분류되었다. 배출량은 많지만 실제 오존농도가 높지 않은 배출우세지역, 배출량은 적지만 오존농도는 고농도가 발생하는 수송우세지역, 배출량이 적고 오존농도도 낮은 교외지역으로 분류되었다. 배출우세지역은 서울, 인천, 부산, 울산, 대구와 같은 대도시와 포항, 광양, 여수, 충남 당진과 같은 공단이 포함된 지역으로 연간 배출량이 매우 높으며 오존의 전구물질에 대한 배출량이 매우 높지만, 실제 고농도 오존은 발생하지 않는 지역이다. 수송 우세지역은 58개 지역이며, 교외지역은 76 지역으로 분류되었다. 오존의 고농도가 발생하는 지역은 실제 배출량이 많지 않음에도 고농도가 발생하는 지역이 다수 분류되었다. 오존에 대한 효율적인 저감을 위해서는 배출우세지역과 수송지역을 고려한 오존우심지역을 설정하여 관리하는 것이 필요함을 알 수 있었다.

Key words: 오존, NO_x, VOC, k-mean clustering, 수송 과정, 2차 생성

※ 본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원(NIER-2021-01-02-114)의 지원과 2021년도 환경부 “미세먼지관리 특성화대학원 사업”의 지원을 받아 수행하였습니다.

에어로졸 역학-CFD 결합 모델을 이용한 자동차 비배기 입자의 도로 이격거리별 기여도 분석

김연욱¹, 곽경환², 이현호³, 이승복⁴

¹강원대학교 환경의생명융합학과

²강원대학교 환경융합학부

³공주대학교 대기과학과

⁴한국과학기술연구원 환경복지연구단

도시 지역의 대기 중 존재하는 입자의 주요 배출원은 도로 이동 오염원이 가장 많이 차지하고 있다. 자동차에서 배출되는 입자는 엔진에서 배출하는 배기(exhaust) 입자와 비배기(non-exhaust) 입자로 구분된다. 배기 입자는 화석 연료 연소 및 연료 휘발 때문에 생성된 입자이며 비배기 입자 물질은 타이어, 브레이크, 도로 재비산 등으로 생성된 입자를 말한다. 비배기 입자는 기술적 한계로 실제 도로 환경에 대해서는 파악하는 데 한계가 있다. 이에 실제 도로 환경에 대해 모의할 수 있고 비배기 입자를 구분할 수 있는 수치모델을 이용하여 도로 주변에서의 비배기 입자에 대한 도로 이격거리별 분포를 파악하고 비배기 입자의 배출계수 민감도를 확인하고자 했다. 본 연구에서 사용한 수치모델은 전산유체역학(Computational Fluid Dynamic, CFD)모델과 에어로졸 역학 모듈(Particle Matter Dynamic, PMDYN)이 결합된 모델(PMDYN-CFD)이다. PMDYN-CFD 모델은 입자상 물질의 에어로졸 역학 과정이 반영되어 있어 연소 입자, 응축성 입자, 마모 입자, 비산먼지 입자의 응집, 성장 등을 모사할 수 있다. 본 연구의 모의 및 측정 지역은 경부고속도로 안성천교를 일대이며, 모의 대상 기간은 2020년 5월 26일 07~19시다. PMDYN-CFD 모델의 초기 기상장 자료는 WRF(v4.2) 모델의 결과 자료를 연직 내삽한 것이다. PMDYN-CFD 모델에 입력한 배출계수는 차종별(경형, 중형, 대형, 화물차)로 산출된 배기 입자 배출계수(여과성 입자, 응축성 입자)와 엔진별로 산출된 비배기 입자 배출계수(타이어, 브레이크, 도로 재비산) 값을 이용했다. PMDYN-CFD 모델의 배경농도는 측정 지역에서 Scanning Mobility Particle Sizer(SMPS)와 Optical particle sizer(OPC) 장비로 측정한 값을 입력했다. 본 연구에서는 비배기 입자에 대한 민감도를 확인하기 위해 타이어, 브레이크, 도로 재비산에 대한 배출계수를 각각 다르게 적용하여 도로 이격거리별 기여도 및 농도 분포를 확인했다. 비배기 배출계수에 대한 민감도 실험 결과, 총 입자 수 농도 및 총 질량 농도 기여도는 도로 주변에서 가장 컸다.

Key words: PMDYN-CFD, 입자상 물질, 타이어 마모 입자, 브레이크 마모 입자, 도로 재비산 입자

※ 이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-기후변화대응 기술 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M1A2A2103954).

Updated aerosol wet and dry deposition schemes in the WRF-Chem model

Young-Hee Ryu and Seung-Ki Min

Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

Wet and dry deposition schemes of aerosols in the WRF-Chem version 4.1.2 are updated based on recent observational findings. In-cloud scavenging was traditionally thought to be more important in aerosol wet removal than below-cloud scavenging. However, recent field measurements indicated a considerable contribution of below-cloud scavenging of 50%–60% to total wet deposition. On the other hand, the modeled contribution of in-cloud scavenging in the previous version of WRF-Chem was too large (88%–95%), likely due to the binary representation of cloud fraction. Therefore, this study adopts a continuous-type cloud fraction and implements a semi-empirical below-cloud scavenging parameterization. The new scheme markedly increases (decreases) the contribution of below-cloud (in-cloud) scavenging to 63%–66% (34%–37%), well capturing the observational estimates. The magnitude of total wet deposition is increased by 18.2% for SO_4 , 7.16% for NO_3 , and 14.8% for NH_4 , showing better agreements with observations particularly for SO_4 and NH_4 deposition. The increased wet removal with the new scheme reduces and better reproduces surface $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentrations, which is also partly attributed to the increased contribution of below-cloud scavenging. In the previous WRF-Chem, dry deposition velocity was too high for coarse mode particles when friction velocity is large, which underestimates surface PM_{10} concentration. The updated dry deposition scheme that is constrained by recent observations effectively improves PM_{10} performance by reducing the dry deposition velocity for coarse mode particles.

Key words: wet deposition, dry deposition, aerosol, WRF-Chem

Assessment of the Secondary Organic Aerosol Affection on Northeast Asia using WRF-Chem model and Data Assimilation

Ganghan Kim¹, Seunghee Lee¹, Hyeon-Kuk Kim¹, Chang-Keun Song¹, Seungseok Lee¹, and Myong-In Lee¹

¹Department of Urban Environmental Engineering, UNIST

Northeast Asia is one of the regions that can observe significant long-range transports of atmospheric chemicals and aerosols. Previous studies are mostly focused on the data assimilation skills applied to WRF-Chem and introducing the forecast performance of using assimilation for the atmospheric aerosols. In this study, the sensitivity test for the different chemical and aerosol models between MOZART-GOCART and RACM-MADE/VBS. For the experiment, the same emission inventories based on KU-CREATE 2018 have been applied. GOCART scheme is a simple scheme for using fewer resources, and contains a common build for data assimilation has been prepared. However, GOCART lacks the secondary organic aerosol (SOA) formation, especially for the nitrogen oxides. MADE/VBS can cover the SOA formation and species are more separated by modal than GOCART. Between GOCART and MADE/VBS results, the major difference of PM_{2.5} showed that MADE/VBS can simulate the aerosol concentration higher than GOCART. For the model, MADE/VBS is more reliable to the observation than GOCART. For most of the elemental carbons, organic carbons, and sea salts, MADE/VBS results maintained a higher concentration than GOCART. For the gaseous precursor chemicals, the higher concentrations are concentrated over the northeastern part of China for NO₂, and for SO₂, showed lower concentration than GOCART. Based on the NO₂ concentrated region, nitrogen compound might be affecting more the Eastern China, Manchu region, and South Korea.

Key words: 3DVAR Data Assimilation, WRF-Chem, GOCART, MADE/VBS, Secondary Organic Aerosol

※ This study was supported by the Basic Science Research Program of the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education, Science and Technology (NRF-2021R1A2C1008210). The model simulations were performed by using the supercomputing resource of the Korea Meteorological Administration (National Center for Meteorological Supercomputer).

Development of the Inverse Modeling System for Aerosol Emission Based on WRF-Chem and EnKF Data Assimilation

Seunghee Lee, Myong-In Lee, Ganghan Kim and Hyerin Kim
School of Urban and Environmental Engineering, UNIST, Ulsan

East Asia is a high pollutant region as it has experienced rapid economic growth, which has increased anthropogenic emissions. Despite the regulation policies introduced to reduce air pollutant, air pollution is still an important international agenda that needs to be resolved. There is a growing demand for accurate and reliable predictions of air quality. To improve air quality prediction performance of chemical transport model, unlike atmospheric models, it is necessary to improve the uncertainty of species emission as well as the uncertainty of initial condition. The aerosol data assimilation is one of the most effective ways of improving aerosol forecasts skill by updating the chemical initial conditions. The Ensemble Kalman Filter (EnKF) algorithms is flexible and easy to apply inverse modeling because the flow-dependent background error covariance generated by short ensemble forecasts. We developed the inverse modeling system to simultaneously optimize the chemical initial conditions and source emissions based on an EnKF system coupled to the Weather Research and Forecasting with Chemistry (WRF-Chem) model. The EnKF is optimized by alleviating the sampling problem through a multiphysics approach, prognostic variable perturbation, inflation, and covariance localization. A set of Observing system simulation experiment (OSSE) was conducted to evaluated the performance of this emission inversion system. The results of OSSEs suggest that the uncertainties in a priori emission can be efficiently reduced by this method and lead to improvements in the forecasting of air quality.

Key words: Inverse modeling, Top-down emission, Data Assimilation, EnKF, WRF-Chem, Air quality forecast

※ This study was supported by the Basic Science Research Program of the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education, Science and Technology (NRF-2021R1A2C1008210). The model simulations were performed by using the supercomputing resource of the Korea Meteorological Administration.

[일반구두3]

기상관측정보 활용

한반도 대기정체의 특성 및 CORDEX-EA Phase 2 Multi-RCM 모의자료를 이용한 미래 전망

김도현, 김진욱, 변영화, 김태준
국립기상과학원 기후변화예측연구팀

산업활동에 의해 생성된 미세먼지는 인체에 악영향을 미치는 가운데, 한반도에서는 겨울철 및 봄철을 중심으로 미세먼지 농도가 높게 나타나고 있다. 미세먼지의 농도는 오염 물질의 배출량 뿐만 아니라 환기 효과 및 외부로부터의 오염 물질 유입 등과 관련된 대규모 대기순환에도 영향을 받을 수 있다. 특히, 대기순환이 정체되어 환기 효과가 감소하는 대기정체 현상은 미세먼지 농도에 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 한반도 겨울철 및 봄철의 대기정체와 관련된 대기순환의 특성 및 미래 변화를 전망하였다. 이를 위하여, 미세먼지 관측자료 및 대기장 재분석 자료를 이용하여 대기정체의 특성을 조사하였으며, CORDEX-EA Phase 2에 속하는 지역기후모델 5종의 모의자료 대기장을 이용하여 미래 대기정체를 전망하였다. 또한, 대기정체의 정량화를 위하여 동아시아 지역의 상층 제트기류, 하층 남북 풍속 및 지상 풍속의 세 가지 기후 요소를 이용하여 계산되는 Modified Korean Particulate matter Index(MKPI)를 이용하였다. 가장 먼저, MKPI와 한반도 대기정체 간의 상관성을 분석하였으며, 동아시아 상층의 기압능(제트기류 북상) 및 하층의 동서 기압경도 약화(북풍 약화) 아노말리를 가지는 대기정체의 특성을 MKPI가 잘 반영함을 확인하였다. 이러한 MKPI와 대기정체 간의 높은 상관성을 바탕으로, 미래 후반기(2081-2100년)의 대기정체 빈도 변화를 MKPI를 이용하여 살펴보았다. 즉, 고농도 시나리오(SSP5-8.5) 하에서는 대기정체의 빈도(MKPI \geq 1)가 현재 기간에 비해서 50.8% 증가할 것으로 전망되었으며, 이는 동아시아 상층 제트기류 북상, 하층 북풍 약화 및 지상 풍속 감소 모두에 영향을 받을 것으로 확인되었다. 또한, 고농도 온실가스 환경은 대기정체의 빈도 뿐만 아니라 지속 기간도 증가시킬 것으로 전망되었다(23.7%). 한편, 저농도 온실가스(SSP1-2.6) 하에서는 대기정체 빈도가 7.3% 증가하는 데 그쳐, 온실가스의 저감이 대기정체 빈도 변화 억제에 효과가 있을 것임을 확인하였다. 마지막으로, 온실가스 변화에 따른 대기정체의 빈도 증가는 동아시아 상층의 기압능 및 하층의 남북 기압경도 강화와 연관될 것으로 보이며, 추후 북태평양 고기압의 확장 등의 대기정체 변화 메커니즘에 대한 연구가 진행될 예정이다.

Key words: 대기정체, Modified Korean Particulate matter Index, 지역기후모델, CORDEX-EA Phase 2

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 “신기후체제 대응 기후변화시나리오 개발·평가”(KMA2018-00321)의 지원을 통해 수행되었습니다.

겨울철 도로 기하구조와 상태에 따른 기상요소 및 노면온도 변화 특성

김백조¹, 김유정¹, 김선정¹, 김건태¹, 김지완¹, 이용희¹

¹국립기상과학원 재해기상연구부

최근 겨울철 도로 위 안개나 살얼음 등으로 인한 대형교통 사고가 자주 발생하여 사회·경제적 피해가 증가하고 있다. 특히, 도로살얼음은 국지적으로 발생하고 육안으로 구분이 어려워 도로 주행자들의 심각한 위협요인이 되고 있다. 이에 효과적으로 대응하기 위해서 기상관측차량을 통한 도로살얼음 취약구간에 대한 도로기상 및 노면정보 집중관측이 요구된다. 국립기상과학원 보유 기상관측차량을 이용하여 2020년 12월부터 2022년 2월까지 경상남북도 내륙지역의 주요 고속도로를 대상으로 총 105회의 도로기상 및 노면정보(노면온도, 노면상태) 집중관측을 수행하였다. 본 연구에서는 이를 통해 생산된 집중관측자료를 토대로 도로 기하구조와 상태에 따른 기상요소 및 노면온도의 변화 특성을 조사하였다. 전체 집중관측에서 도로결빙과 관련된 기온과 강수량 변화가 특징적으로 나타난 날을 분석사례(13일)로 선정하였다.

도로 위 기온과 노면온도의 변화에 미치는 기상요인으로는 기온 변화와 강수발생 여부 등과 밀접한 종관기상상태가 중요하였다. 도로의 해발고도와 구조, 주변 지형, 그리고 교통량 등과 같은 도로교통 요인도 기온과 노면온도 변화에 커다란 영향을 주는 것으로 조사되었다. 광주대구고속도로에서 터널이 밀집된 구간에 대한 세부적인 분석에서 터널 내부에서는 노면온도가 기온보다 높다가 터널 밖으로 나오면서 반대의 양상이 뚜렷하게 나타났다. 이로 인해 터널 내외부에서 노면온도가 기온보다 변화가 심함을 알 수 있었다. 고정식과 이동식 도로기상 관측자료간의 비교에서 교량 위 고속도로 방음벽 안쪽에 설치된 도로기상관측시스템의 영향으로 기온, 기압, 노면온도는 다른 고정식 관측지점들보다 그 차이가 컸다. 살피재터널에서 습도가 다소 높게 관측되었는데, 이는 다른 관측지점이 대부분 교량인데 비해 구릉지에 위치한 터널의 영향으로 판단된다. 도로결빙은 기존에 잘 알려진 교량과 터널의 인근, 그늘진 도로(골 지역) 뿐만 아니라 고속도로 휴게소나 TG&IC에서도 관측되었다. 또한 도로 위 수막 형성에 영향을 미치는 풍속과 습도와 같은 기상요소도 도로결빙에 중요함을 밝혔다.

Key words: 도로살얼음, 기상관측차량, 집중관측, 도로기상, 노면온도

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「재해기상 목표관측·분석·활용기술 개발」(KMA2018-00123)과 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 「2021년 국민생활안전 긴급대응연구사업」(과제번호: 2020MBE9A1047306)의 일부 지원으로 수행되었습니다.

소형 윈드라이다를 이용한 초저고도 도심기상 관측

나성준¹, 성성철¹, 김제원¹

¹(주)동녘 기업부설연구소

지방 균형발전의 정책 방향에도 불구하고 우리나라 뿐 아니라 전세계적으로 도시로의 집중 현상이 가속화되고 있다. 또한 최근에는 UAM(Urban Air Mobility) 등 도심 항공에 대한 국가적 투자가 이루어지고 있는데 이 또한 도시기상의 가장 큰 연구 목적 중 하나로 부상하고 있다. 도시기상 연구에 있어 대기경계층을 파악하고 대기경계층 내에서도 다양한 지표 구조에 따른 바람, 기온, 습도 등의 연직구조를 분석함으로써 대기의 상태를 연구한다. 특히 국립기상과학원은 수도권 도시기상관측장비를 설치 운영하고 있는데 이 중 윈드라이다는 6조를 운영하면서 연직바람을 관측하고, 라이오미터 7조를 운영하면서 기온과 습도 연직관측을 실시하고 있다.

대기경계층 내 바람의 분포는 지표 마찰의 영향으로 높이에 따라 강해지는 형태를 가지지만 도시지역, 특히 고층빌딩이 밀집한 곳에서는 건물의 영향으로 그 형태 및 구조는 매우 복잡해진다. UAM 산업이 발전하게 되면 지표면으로부터 수백m 이내에서 도시의 빌딩 사이로 개인형 도심항공기, 드론 등이 운행될 것이므로 복잡한 바람과 난류 연구의 필요성이 더욱 커질 것이다.

(주)동녘은 2021년 하반기에 초저고도 내 연직 바람을 관측할 수 있는 윈드라이다를 구매하여 현재 도심에서 연직 바람관측을 수행하고 있다. 구매한 장비의 관측 한계고도가 350m로 낮은 단점이 있지만, 해당 고도 내에서는 기존 관측장비보다 정밀한 관측이 가능하다. 국립기상과학원 수도권 연직바람관측장비인 Leosphere Wind Cube 200은 6km 고도까지 관측이 가능하지만 최소관측고도 100m를 시작으로 50m 간격으로 관측을 수행한다. 반면 (주)동녘에서 보유중인 Leice WindMaster 350은 최소관측고도 40m를 시작으로 350m까지 10m 간격으로 보다 정밀한 관측을 수행한다. 또한 국립기상과학원 장비는 무게가 230kg이기 때문에 고정 관측만 가능하지만, (주)동녘의 관측장비는 무게가 30kg로 손쉽게 이동이 가능하고 소비전력 80W의 저전력 장비로서 전원이 공급되지 않는 장소에서도 차량, 캠핑용 배터리를 이용하여 10시간 이상 관측이 가능하다.

이와 같이 저전력의 이동이 용이한 연직바람관측장비를 이용하여 도심의 초저고도 내에서 정밀한 바람 관측결과를 공유함으로써 향후 많은 연구자들과 함께 어떠한 방향으로 관측장비를 활용할 수 있을지 논의가 되었으면 한다.

Key words: 연직바람관측장비, 윈드라이다, 대기경계층, 빌딩풍, UAM

※ 이 연구는 기상청 스마트시티 기상기후 융합기술개발 사업 및 미래유망민간기상서비스 성장기술개발 사업의 지원으로 일부 수행되었습니다.

기상감정을 통해 기상관측소 자료를 활용하기 어려울 때 사건사고 해결하는 방안: 2014년 부산 호우 사례

김중진^{1,3}, 조진대^{2,3}, 김동호³, 권태순³

¹서울대학교 기초과학연구원

²경북대학교 천문대기과학과

³한국기상감정사협회

현재 전국적으로 ASOS 102곳, AWS 510곳, AAOS 11곳으로 총 623곳에서 기상관측을 시행하고 있다. 그러나 623곳의 관측망이 전국의 모든 도로망과 산지, 해안가를 사각지대 없이 커버하는 것은 불가능하다. 안개, 호우, 폭염, 강풍 등 날씨에 의한 사건사고가 발생한 곳이 근처 관측소와의 거리가 멀어서 원인을 직접적으로 따지기 어려울 때 관측된 주변 기상 자료를 바탕으로 특정 지점의 과거 기상을 재구성하여 그 기상현상이 특정 사건에 미친 영향의 정도를 판단하는 것을 기상감정이라고 한다. 기상감정은 관측 사각지대에서 발생한 사건을 과학적인 방법으로 기상현상을 해석하여 사건을 처리하는 보험회사 또는 손해사정사에게 재협의를 할 수 있는 기회를 제공한다. 본 연구에서는 ERA-5 재분석 자료 및 UM GDAPS, 한반도 지상관측자료를 통해 2014년 8월 25일, 부산 내륙을 중심으로 집중호우가 발생했던 날, 부산 북구 지역의 옥상 배관 누수 사건에 대한 보상 여부 사례를 다루어 기상감정을 통해 관측소와의 거리가 먼 곳에서 발생한 호우 강도를 추정했다. 호우가 발생한 곳의 지형을 고려한채 종관장과 보조분석도를 재분석 자료로 구현해서 호우 여건을 분석하고, K-PRISM 분석법으로 사건 지점과 주변 AWS지점 간의 거리 가중치와 고도에 따른 강수량 특성을 반영하여 사건 지점에서의 강수량을 추정했다. 본 방법을 통해 국지적인 지형 요건에 의해 관측망에서 탐지하지 못한 기상현상을 재구성하여 사고 피해자의 과실을 조정 할 수 있도록 기대한다.

Key words: 기상감정, 재분석 자료, 기상현상, 호우 사례

농장단위 기상과 작물재해 예측 조기경보서비스 현황

심교문¹, 조세라¹, 김지원¹

¹국립농업과학원 농업환경부 기후변화평가과

기후변화에 따른 이상기상의 상시화로 전 세계적으로 기후관련 재해발생이 급증하고 있다. 국내에서도 이상기상의 빈발로 농작물 생산성 저하 등 농업분야 기상재해 피해가 증가하고 있다. 특히, 2020년의 농업재해 피해액(농업재해 피해 복구지원액 + 농작물 재해보험금 지급액)은 약 15,978억원으로 2015년 대비 약 23배 증가한 것으로 조사되었다. 이와 같은 기후변화에 따른 이상기상의 상시화 시대에서는 재해관리가 기존의 사후복구 중심의 위기관리에서 사전예방 중심의 위험관리로 패러다임의 전환이 필요하며, 위험관리의 핵심은 예측을 통한 사전 알림 서비스이다. 하지만, 이러한 위험관리 기반의 농업분야의 재해관리 체제는 국내의 복잡한 지형과 소규모 농장에서 다양한 작물이 재배되고 있는 농업특성이 충분히 고려되어야만 가능하다. 즉, 농장규모의 상세한 기상정보와 작물의 생육상황에 맞는 재해위험 예측정보가 요구된다. 농촌진흥청 국립농업과학원에서는 2014년부터 총 3단계를 걸쳐, “농장맞춤형 기상재해 위험관리 체계 구축” 연구를 산학연 공동으로 수행하고 있다. 1단계로 2014년부터 2017년까지는 핵심기술을 개발하면서 섬진강 수계 10개 시군에 핵심기술을 적용하여 시범서비스를 수행했고, 2018년부터 2019년까지는 전라북도 14개 시군을 대상으로 광역단위 현장실증 연구를 수행하였다. 2020년부터는 핵심기술의 적용 지역을 순차적으로 전국 155개 시군으로 확대하면서 정확도를 향상시키는 고도화 연구를 병행하고 있다. 2022년 3월 현재 40개 시군에 핵심기술을 적용하여 시범적으로 서비스를 실시하고 있다. 핵심기술은 첫째로 농장단위(30~270m 격자)로 각종 기상정보(예측 혹은 관측)를 상세화하는 기술이고, 둘째로 작물의 생육상황에 맞게 기상위험을 판정하는 기술이며, 셋째는 농장단위의 기상 및 재해위험 예측정보를 대응지침과 함께 개별 농가에게 서비스하는 기술이다.

Key words: 농장기상, 작물재해, 생육단계, 조기경보서비스

※ 이 연구는 신농업기후변화대응체계구축 사업(PJ014880_전국 농업기상재해 통합서비스 체계 구축)의 지원으로 수행되었습니다.

[일반구두4]

대기환경과 기후관계성

OCO-2 위성 관측 자료 활용 인공지능 모델 기반 탄소 산출 알고리즘 개발

김은빈¹, 최예지¹

¹(주)에스아이에이 인공지능연구소

최근 인공지능 모델이 발전함에 따라 데이터에 기반하여 위성 관측으로부터 대기 변수를 산출하는 역변환 알고리즘 개발이 가능해지고, 복사전달 모델이나 대기상태에 대한 정보 없이 위성 관측 복사량만으로 대기 변수를 산출하는 인공지능 알고리즘이 여러 연구를 통해 개발되고 있다. 본 연구에서는 탄소 관측 위성인 OCO-2 위성의 Level1b 산출물을 이용하여 기계 학습과 딥러닝 기반의 Level2 자료 산출 알고리즘을 개발하였다. OCO-2 위성에서 관측된 1016개 분광 채널의 복사량과 관측 지점, 위성과 태양의 위치 정보를 입력 자료로 사용하여, XGBoost 모델과 Multi-layer Perceptron (MLP) 모델을 이용하여 학습을 수행하였다. XGBoost는 앙상블 트리 모델 중 약한 분류기를 앙상블하여 강력한 예측 모델을 만들고자 하는 Boosting 계열의 기계 학습 방법으로 테이블 형태의 데이터에 대해 좋은 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 XGBoost 와 MLP 모델로 실험한 결과를 비교 분석한 결과, XGBoost 모델이 더 좋은 성능을 보이는 것을 확인하였다. 또한 기계학습 방법을 사용할 때 데이터 크기가 커짐에 따라 계산 시간이 오래 걸리는 문제를 GPU 병렬 오픈소스 라이브러리인 NVIDIA RAPIDS를 사용하여 구현하였으며, 단일 CPU만을 사용할 때보다 계산 시간이 200배 단축되는 것을 확인하였다. 본 연구에서는 탄소 인공위성 관측 Level1b 자료를 XGBoost 와 MLP 모델을 사용하여 Level2 데이터를 산출한 실험 결과를 비교 분석하고, 모델 훈련 시 입력으로 사용된 변수의 중요도에 대한 분석을 진행하여 이에 관한 결과를 발표하고자 한다.

Key words : 기후변화, 탄소 측정, 기계 학습, 위성 관측

※ 이 연구는 우수신진연구 사업(NRF-2022R1C1C1005666)의 지원으로 수행되었습니다.

2022년 동해와 울진에 발생한 국내 최대 규모 산불이 기후와 대기질에 미치는 영향

장동영^{1,2}, 정수종^{1,2}, 박찬열³, 최수민³

¹서울대학교 환경대학원 환경계획학과

²서울대학교 환경계획연구소

³국립산림과학원

2022년 3월에 강릉-동해, 울진-삼척에 발생한 산불은 2000년 이후로 국내 최악의 산불로 동해와 삼척 지역 산림의 36%와 22%를 소실하였고 이는 약 24000ha의 면적에 해당한다. 이번 산불은 자연발화 및 방화로 원인을 추정하였지만, 산불의 강화 및 지속 조건에는 기후변화가 영향을 받았을 것으로 여겨진다. 영동지역(강릉, 동해, 삼척, 울진)의 2000년 1월부터 2022년 2월까지 겨울철 강수 및 기온 변화를 분석결과를 강수량은 10년당 12.6 mm 감소했고, 기온은 10년당 0.4°C 증가하는 기온 온난화와 건조화 경향을 보였다. 이는 산불 발생 시 산불을 지속시켜 그 피해를 확장 시켰으며, 이는 탄소흡수원인 산림 소실로, 동해와 울진 지역의 산림에 저장된 1,704,938 tC 탄소가 대기 중으로 방출되었을 것으로 추정된다. 이로 발생한 대기 중 오염 물질은 대기 중 PM2.5의 초미세먼지의 농도를 순간적으로 20배 이상 증가시켰으며, 이는 2021년에 산림청에서 설치한 측정넷의 관측 자료의 비교한 결과, 산불 기간 동안 강릉의 PM1.0이 산불로 인한 대기질 영향이 적었던 평창의 PM1.0 비해 최대 약 23배 정도 증가한 것으로 나타났다. 본 연구는 기후변화로 인해 국내외 산불의 강화되고 있으며, 탄소 중립과 대기질 관리의 두 가지 목표를 위해서 산불의 피해 연구 및 관리가 매우 중요함 보여준다.

Key words: 산불, 대기질, 이산화탄소, 기후

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C3002868).

한국 (초)미세먼지 대기질에 미치는 기상 영향의 중장기 변화 분석 및 시사점

이승민¹, 최기철¹, 최지원¹, 오혜련², 허선경²

¹한국환경연구원 기후대기연구본부

²서울대학교 지구환경과학부

본 연구에서는 (초)미세먼지 대기질과 기상·기후 여건 간의 관련성을 규명하기 위하여 과거 약 20년간(2001-2019년)의 (초)미세먼지 농도 및 주요 기상·기후 인자들의 변동·변화 경향에 대한 다양한 분석을 수행하였다. 특히, 기후변화와와의 관련성을 파악하고자 기간 내 최저 연평균 농도를 기록하였던 2012년을 기준으로 이전(P₁)과 이후(P₂)를 구분하여 비교 분석하였다. 미세먼지 농도와 주요 기상 요소의 시계열 변화를 분석한 결과 P₂ 기간의 초미세먼지 농도 감소 정체는 풍속 약화와 관련이 있는 것으로 추정된다. 또한 P₂ 기간에 농도가 높고 장기간 지속되는 초미세먼지 고농도 사례의 발생 빈도가 증가하는 경향이 관찰되었다. 이러한 사례들은 대기 정체의 영향을 많이 받는 사례로서 국지적 배출·기상 뿐만 아니라 기후변화에 따른 광역적 기상 시스템의 변화와 연관 지어 살펴볼 필요가 있다. P₁ 기간에 비해 P₂ 기간에 온난화로 인한 해수면 온도 상승 및 북극 해빙 면적의 감소폭이 뚜렷하게 증가하였고, 이에 따라 한반도 주변의 기압 패턴이 변화(알류시안 저기압 강화 및 유라시아 고기압 약화)하여 고농도 미세먼지 발생에 유리한 기상 여건이 조성될 가능성이 높아진 것이 원인으로 추정된다. 배출 등 미세먼지 농도에 미치는 기상 외 요인의 영향을 제거하고 기상의 영향만을 평가하기 위하여 분석 기간에 대한 배출고정-기상변화 모델링을 수행하였다. 그 결과 동일한 배출 조건에서 연평균 초미세먼지 농도는 최대 19% 폭으로 변동하여(연평균 농도 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가정했을 때 4.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 변동) 초미세먼지 농도에 대한 기상변화의 기여가 상당한 것으로 분석되었다. 또한 P₂ 기간에 미세먼지 대기질에 대한 배출변화의 영향이 감소하여 상대적으로 기상변화의 영향에 민감해졌음을 확인하였다. 이러한 결과는 과거에 배출 저감 중심의 관리를 통해 미세먼지 농도를 낮출 수 있었으나, 최근 들어 기상 요인과 기상 외 요인의 기여가 서로 비슷한 수준이 되었기 때문에 향후 대기질 관리에 대한 기상 및 기후변화의 영향을 매우 중요하게 고려해야 함을 시사한다.

Key words: (초)미세먼지, 기상, 기후변화, 대기화학모델링, 농도 기여도

※ 이 연구는 한국환경연구원의 2019년 기본과제 「기후변화를 고려한 미세먼지 예측 및 중장기 관리정책 수립 연구(RE2019-23-01)」 및 2020년 기본과제 「기후변화에 따른 미세먼지 대기질 변화 추정 및 관련 정책 지원 연구(RE2020-24-04)」의 지원으로 수행되었습니다.

기후-대기화학 통합모형을 이용한 이차 유기 에어로졸의 기후적 효과 파악

양서희¹, 김민중¹, 조두성², 박록진³, 이승언³

¹명지대학교 환경에너지공학과

²National Center for Atmospheric Research

³서울대학교 지구환경과학부

전 세계에서 흔하게 관측되는 이차 유기 에어로졸(SOA)은 대기 중 산화물질과 휘발성 유기화합물의 광화학 반응을 통해 생성된다. SOA는 빛을 반사하는 무색탄소 뿐만 아니라 빛을 흡수하는 유색탄소를 포함하고 있어 대기 안정도와 구름 형성 및 발달 등 강한 기후적 효과를 지닐 것으로 예상된다. 따라서 SOA의 기후적 효과 파악에 대한 연구가 필요하다. 하지만 현재까지 정교한 SOA 농도 및 기후적 효과 파악이 가능한 기후-대기화학 모형은 SOA 모의에 있어 화학적 복잡성과 높은 컴퓨팅 파워 소모로 인해 모의에 한계를 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 경험적 매개변수를 이용한 단순화를 통해 컴퓨팅 파워 및 화학적 복잡성을 최소화한 SOA 모의 방식을 기후-대기화학 모형에 접합하고 기후적 효과를 분석하고자 한다. 본 연구는 1980-2019년 장기간 모델링을 수행했으며 SOA 농도가 높은 동아시아 구역을 중심으로 분석을 수행했다. 또한 파장별 굴절지수를 다르게 적용한 유색 및 무색탄소의 경우와 SOA를 모의하지 않은 경우를 구분하여 기상 변화 차이를 통해 광흡수 민감도 분석을 수행했다. SOA 모의 성능 평가에는 SOA 대기화학 모델에서 흔히 사용하는 Volatility basis set(VBS) 방식 모의 결과와 관측 자료를 이용했다. 모의 결과 단순화한 SOA 농도는 관측 및 VBS 방식을 통한 SOA 농도와 유사한 크기 및 분포를 나타냈으며 기존 방식의 과소모의 문제를 개선했다. SOA 민감도 분석 결과, 유색탄소의 광흡수는 하층 및 상층의 온도와 연직 안정도 뿐만 아니라 구름 형성과 발달, 강수와 습도 변화에 유의미한 차이를 일으킴을 확인했다. 따라서 SOA가 높은 동아시아 지역에서는 SOA의 광흡수로 인해 강한 기후적 효과가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 SOA의 광흡수는 북태평양 지역 등에서의 기상 변화를 일으켜 대규모 기후 변동에도 영향을 줄 수 있음을 확인했다. 본 연구 결과는 기후 모의 시 정교한 SOA 모의와 정확한 굴절지수 선정을 통한 기후적 효과 파악의 중요성을 의미한다.

Key words: 이차 유기 에어로졸, 기후적 효과, 유색탄소, 갈색탄소, 동아시아 기후

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2020R1C1C1008898).

기후변화 시나리오에 따른 CMIP6 자료의 한반도 대기질 전망

이태경¹, 구자호¹, 심성보²

¹연세대학교 대기과학과

²국립기상과학원 기후변화예측연구팀

본 연구에서는 기후변화에 따른 대기질의 변화가 지역규모, 특히 한반도 지역에서 어떻게 발생하는지 살펴보고자 Climate Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) 모델의 O₃, NO₂, SO₂, CO, PM_{2.5} 자료를 이용하여 기후변화 시나리오 (Shared Socioeconomic Pathways, SSPs)에 따른 한반도 오염물질들의 농도 전망을 살펴보았다. 이 과정에서 국립환경과학원의 대기오염측정 자료와의 비교 분석을 통해 기후모델 자료의 품질에 대한 평가도 진행하였다. CMIP6 기체 오염물질 (O₃, NO₂, SO₂, CO)의 경우 지상관측자료와 비교했을 때 O₃의 농도를 과대하게, 이외 오염물질의 농도는 과소하게 나타내었다. 그러나 계절 변동성은 모델과 관측 모두 유사한 특징을 보임으로서 기후변화 시나리오에 따른 대기질 변화라는 정성적인 분석은 기후모델 결과물로도 충분히 수행할 수 있음을 확인할 수 있었다. 다만 CMIP6 자료는 PM_{2.5}의 농도를 잘 나타내지는 못했다. 관측 PM_{2.5}는 겨울에는 높고 여름에는 낮은 뚜렷한 계절 변동성을 보이지만 CMIP6 PM_{2.5}는 계절에 따른 농도 변화가 미미했는데 한반도에서 미세먼지 오염의 계절적 차이가 크다는 점을 감안할 때 미세먼지 문제와 관련하여 기후모델 자료의 활용은 신중할 필요가 있음을 살펴볼 수 있었다. 기후변화 시나리오에 따라 오염물질들의 미래 농도 변화 특성은 확연한 차이를 보였다. 지속 가능한 발전을 지향하는 SSP1-2.6 시나리오에서는 오염물질들의 농도가 가장 크게 감소했다. 현재의 발전 정도가 유지되는 SSP2-4.5 시나리오에서는 SSP1-2.6 시나리오에서보다는 오염물질 농도 감소가 더디었다. SSP3-7.0, SSP5-8.5 시나리오에서는 나머지 두 시나리오보다 오염물질 농도 감소가 적었고, SSP3-7.0 시나리오에서는 미래에도 대기오염이 현재와 비슷한 정도로 유지되었다. 본 분석은 CMIP6와 관측 자료를 비교·검증함으로써 모델의 불확실성을 파악하고, 미래 전망을 분석함으로써 대기질 개선 정책과 기후변화 완화정책 이행에 도움이 되고자 한다.

Key words: 기후변화, CMIP6, 지구시스템 모델, 대기오염, 에어로졸

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2020R1C1C1011).

짹은구두

[짧은구두1]

대기환경일반

서울 지역 야간 미세먼지 고농도 사례 보고

임소연¹, 이동희¹, 구자호¹

¹연세대학교 대기과학과

대기 중 미세먼지 농도가 개인의 생활방식에 미치는 영향이 증가함에 따라 일간 미세먼지 농도 변화에 대한 분석의 중요도가 높아지고 있다. 선행연구들을 통해 미세먼지 질량농도(PM_{2.5})가 하루 중 오전, 오후 출퇴근 시간 부근에 최댓값을 가지는 경향이 있음이 확인되어 왔으며, 이 중 주로 활동량이 많은 주간의 미세먼지 농도 증감에 사회적 관심이 집중되어 왔다. 그러나 본 연구에서는 환경부 PM_{2.5} 관측자료를 이용하여 서울 지역 미세먼지 농도의 일 변동을 분석하는 과정에서 주간이 아닌 야간에 하루 중 미세먼지 농도의 최댓값이 나타나는 다수의 사례를 발견하였다. 보통 저녁 9-11시에 그 최대값이 나타나는데 특히 이런 신호가 서울 남서쪽에서 좀 더 분명하게 나타나는 경향을 살펴볼 수 있었다. 역계적 분석 등을 수행해본 결과 특이한 배출원의 영향이 있는 것으로 보기는 어렵다는 결론을 내렸고, 현재로서는 오후 퇴근시간에 배출된 대기오염물질들이 일몰 이후 안정화된 대기에 갇혀 누적됨에 따른 현상으로 추정된다. 다만 이런 야간의 미세먼지 농도의 증가가 유독 서울에서 높게 나타나는 이유를 좀 더 살펴볼 필요가 있다고 보여지며, 고층 건물의 밀도 및 배치에 의해 미세먼지의 확산이 잘 일어나지 않을 수 있는 가능성을 살펴볼 필요가 있을 것으로 생각된다. 결론적으로, 관측자료 분석을 통해 서울 지역에서 시민들의 미세먼지 노출 영향 진단에 있어 낮보다는 밤시간대의 활동이 더 중요할 수 있다는 교훈을 얻었으며, 이 영향력을 좀 더 정확하게 진단하고자 향후 도시기상모델링 연구팀과의 협업을 모색해보고자 한다.

Key words: 미세먼지 농도 일변동, 야간 활동, 지역별 미세먼지 농도, 미세먼지 저감 정책

※ 이 연구는 2021년도 연세대학교 연구비의 지원을 받아 수행된 것임 (2021-22-0076)

도시 지역에서 건물 파사드와 대기 안정도가 오염 물질 확산에 미치는 영향

김민지¹, 김재진²

¹부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

²부경대학교 환경대기과학과

도시 지역 건물 협곡에서는 대기질 악화 가능성이 있고, 운전자와 보행자 등의 대기오염물질에 대한 노출 가능성이 높다. 건물 협곡의 흐름 특성과 대기오염물질의 공간적 분포를 분석하는 것은 대기질을 예측하고 완화하는데 기여할 수 있다. 최근, 국외에서는 다양한 건물 파사드를 대상으로 상세 주변 흐름을 분석하는 연구가 진행되고 있다. 또한, 대기안정도는 건물 협곡의 대기오염물질 확산에 영향을 미치는 민감한 요인이다. 따라서, 보다 현실적인 바람장을 상세하게 구현하기 위해서는 건물 파사드와 대기안정도를 고려한 정밀한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 대표적인 주거용 건물 파사드 형태인 발코니가 있는 건물을 대상으로 대기안정도에 따른 건물 협곡 내부의 흐름과 대기오염물질의 공간적 분포를 조사하였다. 발코니가 없는 건물 협곡과 비교하여 건물 파사드가 대기오염물질의 거동에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에 사용한 수치 모델을 발코니가 있는 건물을 대상으로 수행한 풍동 실험을 통해 검증하였다. 모닌-오브코프 상사이론(Monin-Obukhov Similarity Theory)에 근거한 유입류 조건을 고려함으로써 대기안정도 변화를 고려하였다. 건물 파사드는 국지적으로 건물 협곡 내 대기오염물질 확산을 방해하는 효과가 있었고, 건물 협곡 하층에서는 대기오염물질 농도가 증가하였다. 대기안정도 변화는 건물 협곡 내의 대기오염물질 농도 분포의 변화에 기여하였다.

Key words: 전산유체역학 모델, 파사드, 건물 협곡, 대기안정도, 대기오염물질

Performance of two different schemes in WRF-Chem to simulate particulate matter in East Asian region

Naser Mohammadzadeh, Myong-In Lee, Ganghan Kim, and
Seunghee Lee

School of Urban and Environmental Engineering, UNIST, Ulsan

East Asia which contains developed countries such as China and South Korea has suffered from local and transported pollution during last years. Several studies used numerical models to simulate atmospheric aerosol and chemical components. In the current study two different schemes RACM-MADE/VBS and MOZCART (MOZART/GOCART), were employed in the WRF-Chem model for simulation surface $PM_{2.5}$ and PM_{10} mass concentration over two domain with 27 and 9 km grid resolution during the GMAP/SIJAQ period (15 Oct to 25 Nov 2021). We classified the GMAP/SIJAQ period into four cases (26 Oct to 28 Oct, 1 Nov to 7 Nov, 13 Nov to 17 Nov and 18 Nov to 22 Nov) which are classified as their high episode event. To general explanation, the simulated surface $PM_{2.5}$ via the two schemes showed a large underprediction over whole two domains except south west of china and some polluted areas in South Korea, while the simulated PM_{10} between two schemes has significant differences. Meanwhile, MOZCART's result is relatively closer to ground-based observation than RACM. To more details, we choose 3 cities in South Korea (Seoul, Ulsan and Jeju island) with different locations to identify which region can effect by local and long range transport emission. Our findings show that high episode event with almost same magnitude occurred in each city during four periods. In addition, it seems to be transported pollution form china occurred in the 4th period.

Key words: RACM-MADE/VBS, MOZCART (MOZART/GOCART), WRF-Chem, GMAP/SIJAQ, PM_{10} , $PM_{2.5}$, air pollution

※This study was supported by the Basic Science Research Program of the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education, Science and Technology (NRF-2021R1A2C1008210).

섬진강 유역의 수문기상학적 변화 추세와 극한 기후에 따른 변동성 분석 (1997-2020)

손연진¹, 감중훈²

¹포항공과대학교 환경공학부 통합과정

²포항공과대학교 환경공학부 조교수

가속화되는 기후변화 속에서 극한 기후의 발생은 더욱 빈번해지고 그 강도도 더욱 심각해지고 있다. 섬진강은 우리나라 5대강 중 하나로 가장 큰 유량변동계수를 가지고 있고, 여름철에 강수가 집중되는 한반도의 특성상 가뭄이나 홍수의 발생 확률이 높을 뿐만 아니라, 홍수에서 가뭄 또는 가뭄에서 홍수로의 극한 수문 기상 변화가 일어날 수 있다. 지속가능한 수자원을 확보하고 수재해의 악영향을 최소화하기 위해서는 기후변화로 인한 기상학적인 변화를 반영한 수자원 관리와 수문학적 위험관리가 필요하다. 본 연구에서는 섬진강 유역의 관측자료 기반 그리드 기상 데이터(CRU)와 수문 관측소(56개)에서 10년 이상 장기 관측된 일유량 자료(1997년 - 2020년)와 수온 자료를 이용하여 비모수 검정방법을 통한 계절별 추세분석 (Mann-kendall test) 과 변동점 탐색 (Pettitt), 유량과 기상 데이터 사이의 계절별 상관관계(Kendall rank correlation coefficient), 강수량별 계절성 변동을 분석하였다. 연구에 앞서 유량 데이터에 대해 누락된 관측값으로 부터 발생할 수 있는 불확실성을 고려하기 위해, 연구 기간동안 결측치의 월별 비율을 조사 후 누락데이터가 없는 일별 유량자료를 사용하여 월평균 유량과 연평균 유량 값을 계산하였다. 관측기간동안 결측된 값이 없는 18개의 관측소를 대상으로 연구를 진행하였고 유량(봄,여름,가을,겨울),기온(봄, 여름), 수온(봄,겨울) 의 경우 통계적으로 의미 있는 증가 추세와 변동점(신뢰도>99%)이 탐지되었다. 계절별 상관분석에서는 특히 강수량과 하천 유량, 그리고 기온과 수온과 양의 상관관계가 전 계절에 걸쳐 뚜렷하게 나타났고, 여름철 강수량과 기온의 음의 상관관계가 뚜렷하게 나타났다. ($p \leq 0.05$). 극한 기후에 따른 변동성을 분석하기 위해, 전체 연구 기간을(1997 - 2020) 연 강수량을 기준으로 강수량이 많았던 6년과 작았던 6년, 나머지 12년을 각각, 홍수해, 가뭄해, 평년으로 나누어서 강수량, 유량, 기온, 수온에 대해 연간 변동분석을 진행했다. 그 결과, 가뭄해에 비해 홍수해 동안 겨울철 수온이 증가하고 여름철 수온은 감소하는 특징을 보였다. 이러한 유량과 수온, 기상인자들과의 계절별 추세분석과 변동점 탐색, 상관분석 결과를 바탕으로 섬진강의 기후와 수문의 관계를 이해함으로써 기후변화로 인한 극한 가뭄이나 홍수에 대응하는 지역사회 회복력을 높일 수 있을 것이다.

Key words: 수문기후, 비모수 검정, 경향성 분석, 변동성 분석, 상관분석

※ 본 연구는 중견연구지원사업에 의해 수행되었습니다. (NRF-2021R1A2C1093866)

한국 7개 지역에서 관측한 생태계 규모 꽃가루 비산량의 장기변화 분석

김종호¹, 정수종¹, 김규량²

¹서울대학교 환경대학원

²국립기상과학원 재해기상연구부

일반적으로 봄철 식물의 꽃가루는 이산화탄소 농도 증가로 인한 시비효과(fertilization effect)와 기온 상승으로 인한 식물생산량 증가로 꽃가루의 비산기간이 길어지고 비산량 또한 늘어날 것으로 기대된다. 하지만 각 수종은 사실 온도증가에 대해 서로 다른 생태적 전략을 취하기 때문에 꽃가루의 비산량 변화는 수종에 따라 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서는 기상과학원이 한국의 7개 주요 도시들을 기점으로 2007년부터 2019년까지 관측한 9개 수종에 대한 일별 꽃가루 농도를 기반으로 (*Pinus*, *Quercus*, *Alnus*, *Ginkgo*, *Juniperus*, *Betula*, *Castanea*, *Ulmus*, *Juniperus*) 생태계 규모 꽃가루 비산량의 장기변화를 분석하였다. 관측된 자료에 나타난 우리나라 연평균 꽃가루는 11317 grain/m³ 정도이며, 1년에 111 grain/m³ 씩 줄어들고 있는 것으로 나타났다. 9개 속 중 5개 속(소나무, 참나무, 오리나무, 향나무, 개암나무)에서는 꽃가루 비산량이 줄어들고 있는 것으로 나타났다. 특히 관측된 모든 꽃가루의 58% 이상을 차지하는 소나무의 꽃가루가 최근 1년에 414.94 grain/m³ 씩 크게 줄어들고 있는 것으로 나타났다. 반면에 은행나무, 밤나무, 그리고 느릅나무 3개 속의 꽃가루 양이 늘어나며, 특히 은행나무 꽃가루의 비산량은 1년에 71.27grain/m³ 늘어났다. 결과적으로 9개 수종의 합으로 나타나는 생태계 규모 꽃가루의 비산량은 전체적으로 감소하고 있지만 구성하고 있는 개별 수종의 변화 경향은 다르다는 것이다. 따라서 온난화에 대한 종 다양성을 고려하는 것이 향후 기후변화에 대한 비산 대응 전략에도 중요한 역할을 할 것이라 기대한다.

Key words: 꽃가루 비산, 비산량, 꽃가루 구성, 기온, 기후변화

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2020002770001)

디지털카메라를 이용한 낙엽수의 개엽 시기 분석

김병연¹, 정수종¹, 김종호¹, 손성원²

¹서울대학교 환경대학원

²국립수목원 식물자원연구과

본 연구는 수목원에서 다양한 종류의 디지털카메라로 촬영한 수목 사진을 이용하여 나무의 개엽 시기(이하 사진 기반 개엽일)를 분석하였다. 연구에서 도출한 사진 기반 개엽일은 수목원에서 사람이 눈으로 관측한 개엽 시기(이하 공식 개엽일)와의 비교를 통해 정확도를 판단하였다. 본 연구에서 이용한 수목 사진들은 2009년부터 2020년까지 수목원 3곳(청주 미동산수목원, 춘천 강원도립화목원, 포천 국립수목원)에서 촬영한 낙엽수 9종(개나리, 당단풍나무, 미선나무, 백목련, 산수유, 산철쭉, 아까시나무, 은행나무, 진달래)의 개체 사진이다. 사진 기반 개엽일은 사진에서 초록색의 비율을 나타내는 지수인 Green Chromatic Coordinate (GCC)를 이용하여 봄철에 GCC의 상승 변화율이 가장 큰 기간의 시작일로 설정하였다. 사진 기반 개엽일을 공식 개엽일과 비교한 결과, 두 종류의 개엽일 사이 상관관계수(r)는 0.52로 나타났다. 또한 평균제곱근오차(RMSE)는 10.93으로 두 종류의 개엽일은 약 11일의 차이가 있음을 확인하였다. 두 종류의 개엽일을 수종별로 분석했을 때, 상관관계수는 백목련에서 $r=0.71$ 로 가장 높았고, RMSE는 당단풍나무에서 7.01로 가장 낮은 것으로 나타났다. 두 종류의 개엽일 사이에서 차이가 발생한 데에는 개엽 시기 이전에 영향을 주는 수종마다 다른 꽃 색상, 균일하지 않은 기상 환경과 촬영 당시의 카메라 설정 등이 원인으로 작용했을 것으로 추정된다. 연구 과정에서 이러한 원인을 개선한다면 디지털카메라로 촬영한 사진을 이용한 개엽 시기 분석의 정확성과 활용성은 더 높아질 것이다. 이를 바탕으로 디지털카메라를 이용한 식물계절학 연구는 다른 계절과 성장 시기의 분석에서도 활용될 수 있을 것으로 기대하고 있다.

Key words: 식물계절학, 디지털카메라, 개엽, GCC

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C3002868).

손실 압축을 통한 수치예보 모델 테스트베드 저장장치 효율성 제고

최수혁¹, 이두나¹, 정은성¹

¹홍익대학교 소프트웨어융합학과

이제까지 수치예보 모델 구동을 위해, 연구자들은 슈퍼컴퓨터를 사용해야만 했으며, 다수의 사용자로 인해 많은 부하를 겪어지게 되었다. 이에 따라 기존의 슈퍼컴퓨터에서만 진행되었던 수치예보 모델의 연구, 개발을 각 협업 기관이나 단체, 대학의 중, 소규모 서버에서도 구동할 수 있도록, 기상청 측에서 저해상도 결합모델인 Low GloSea6를 개발하였다. GloSea6-GC3.2의 시험 버전인 u-av133 suite를 기반으로 개발되었으며, 기반을 둔 모델은 forecast, hindcast, monthly mean task로 구분되는 반면, Low GloSea6는 forecast만으로 구성되었으며, 기존 60km의 격자 크기를 170km까지 늘려 해상도를 낮춘 모델이다. 그러나 해당 모델 역시 대량의 데이터(netCDF 등)를 생성하며, 이로 인해 테스트베드의 데이터 전송 및 저장에 심각한 부담이 가중되고 있다. 따라서 테스트베드의 저장장치 효율성 제고를 위한 압축 기법으로써, 얻을 수 있는 압축률이 제한되어있는 무손실 압축 기법 대신에, 손실 압축 기법을 활용하고자 한다. 이에 본 연구에서는 여러 가지 손실 압축기(Lossy compressor)를 소개하고, 적용 시 기대되는 효과에 대해 서술한다. SZ는 과학 데이터를 위한 고속 손실 압축기로, 200~300MB/s의 압축 및 압축 해제 속도를 가지고 있으며, PnetCDF, HFD5, ADIOS의 주요 I/O 라이브러리에 통합되어 있다. ZFP는 또 다른 고속 손실 압축기로, CPU와 GPU 모두에서 비교적 높은 압축률과 빠른 압축 속도로 알려져 있다. 또한 Intel IPP, HDF5, ADIOS, VTK-m, TTK, E4S등의 폭넓은 I/O 라이브러리를 지원한다. 이 말고도, 앞의 두 압축기를 기반으로 GPU의 고성능 CUDA 라이브러리를 활용하여 매우 높은 처리량을 보여주는 손실 압축기인 cuSZ와 cuZFP도 있다. 또한 state-of-the-art로, 비트 및 가감산 연산과 같은 초경량 연산만을 사용하며 CPU, GPU 모두에서 구현된 초고속 손실 압축기인 UFZ(ULTRA-FAST ERROR-BOUNDED LOSSY COMPRESSION FRAMEWORK)가 있다. 손실 압축은 저장공간 오버헤드를 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 사후 분석을 위한 고충실도(High-Fidelity)를 유지할 수 있어, 특히나 가용한 컴퓨터 자원이 제한적인 테스트베드에서 해당 연구는 필수적이며, 또한 생성되는 대량의 데이터 처리를 위한 압축 알고리즘을 추가함으로써 모델 시뮬레이션에 걸리는 시간을 단축할 수 있을 것으로 기대한다.

Key words: 수치예보 모델, Low GloSea6, 테스트베드, 손실 압축, 고속 압축

※ 이 연구는 기상청 “기후 및 기후변화 감시 예측 정보 응용 기술개발 (KMI-2021-01310)”의 지원으로 수행되었습니다.

[짧은구두2]

응용기상

통합모델 기반의 항공기 착빙 예측 알고리즘 최적화 및 예측성 평가

김은태¹, 김정훈¹

¹서울대학교 지구환경과학부

착빙은 항공기가 과냉각수적을 함유하고 있는 구름을 통과할 때 동체 표면에 수적들이 충돌하여 얼음이 형성되는 현상으로 정의된다. 이는 수적량이 많을수록 형성되는 얼음의 양은 늘어나 항공기의 양력 감소, 마찰과 무게 증가로 연료 효율을 감소시키고 계기 및 엔진 고장을 유발할 수 있어 착빙 발생 영역을 사전에 파악하여 대비하는 것은 안전한 항공기 운항을 위해 필수적이다. 본 연구는 수치모델 기반 퍼지로지 착빙 예측 알고리즘인 Simplified Forecast Icing Potential(이하 SFIP)을 기상청 전지구모델인 통합모델에 최적화함으로써 한반도 착빙 발생 예측성을 향상시키는 것이 목적이다. SFIP 알고리즘을 구성하는 각 기상 변수별 멤버십 함수는 관측과 이론을 바탕으로 착빙 발생의 잠재력을 평가하도록 구성되어 있다. 본 연구에서는 SFIP의 초기 값인 수치모델 기반 기상변수들을 장기간 착빙 발생 보고 자료 위치에서의 확률밀도함수를 이용하여 재구성하고 이를 멤버십 함수로 활용한다. 또한, 개별 함수들의 최적의 가중치 조합을 찾음으로써 예측성 향상을 도모하였다. 최적화 및 예측성 평가에는 2015년 10월 1일부터 2018년 7월 31일까지 수집된 약 27만 건의 조종사 보고 자료를 이용하였다. 최적화에 앞서 통합모델의 착빙 환경에 대한 모의 특성을 평가하기 위해 재분석 자료와 비교한 결과는 통합모델이 구름 수액량을 과소모의하여, 구름 빙정량을 추가로 이용한다면 예측 성능이 향상될 수 있음을 보였다. Receiver Operating Characteristics(이하 ROC) 검증 방법론의 정량적 알고리즘 예측성 평가 지표인 Area Under ROC Curve(이하 AUC)을 이용해 최적화 전후를 비교한 결과는 중강도 이상의 착빙 예측에 대해 AUC가 0.728에서 0.752로 약 3% 증가하였다. 통합모델 사용 시 최적의 성능을 가지는 가중치 조합은 상대습도, 연직 바람 속도, 구름 물 함량(수액량+빙정량) 각각에 대해 0.35, 0.15, 0.5로 나타났다. 대량의 검증 자료를 이용함에 따라 누적된 모델 예측 실패 사례를 최소화하기 위해 구름 물 함량을 제한해 24시간 예측에 대해 평가한 성능은 0.858으로 크게 증가해 모델의 구름 영역 예측이 착빙 예측에 있어 중요함을 보였다.

Key words : 착빙, 조종사 보고자료(PIREP), 통합모델(UM GDAPS), SFIP

※ 이 연구는 기상·지진See-At기술개발연구사업(KMI2020-01910)의 지원으로 수행되었습니다.

수도권 집중호우 사례를 통한 깊은 습윤 대류의 발달 메커니즘 분석

박이준¹, 김정훈¹

¹서울대학교 지구환경과학부

본 연구에서는 항공기의 위험한 운항 및 풍수해를 발생시키는 중규모 깊은 습윤 대류(Deep Moisture Convection; 이하 DMC) 발생 메커니즘 연구를 위해 2019년 9월 10일 수도권에서 발생한 집중호우 사례를 분석하였다. 해당 사례는 발달 과정에서 뚜렷한 2가지 단계가 나타났다. 10일 오전에는 중규모 대류 시스템이 시간당 15 mm 강수를 발생시키는 단일 셀의 형태로 존재했지만, 같은 날 밤에는 다중 셀로 발달하여 시간당 40 mm 이상까지 집중호우를 발생시켰다. 본 연구에서는 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 수평 해상도를 지닌 ERA5 재분석자료를 이용하여 상승, 수증기, 그리고 불안정도의 시·공간 변화를 분석하였다. 종관 규모에서는 북태평양 고기압의 가장자리를 따라 지상 저기압이 북상하였고, 이 저기압이 한반도 서해안에 접근하면서 전면부의 큰 수분속이 10일 오전 단일 셀 발달에 영향을 끼쳤다. 또한, 한반도를 중심으로 북태평양 고기압과 시베리아 고기압이 세력을 확장하고 있었다. 특히, 대륙 고기압의 찬 공기 유입으로 한반도에 강한 온위경도가 형성되고 전선발생함수(frontogenetical function)가 크게 증가하였다. 이로 인해 단일 셀은 다중 셀로 발달하였고 기울어진 대류를 따라 수분속수렴(Moisture Flux Convergence) 또한 크게 증가하였다. 대류 발달에 미치는 불안정성의 영향을 분석하기 위해 대류가용 위치에너지(Convective Available Potential Energy, 이하 CAPE)와 수직 불안정의 수직 범위(Vertical extent of Realizable Upright instability, 이하 VRU)를 사용하였다. 단일 셀은 대기가 조건부 중립상태에 가깝기 때문에 큰 VRU 깊이와 작은 CAPE가 특징이었다. 하지만 다중 셀은 비스듬한 대류 위치에서 강하게 나타나는 비단열가열의 수직 변화의 효과가 VRU 깊이와 CAPE를 크게 증가시켰다. 전선발생함수, 수분속수렴, 그리고 CAPE 모두 대류 강도의 증가를 잘 설명하였으며 단일 셀에서 다중 셀로 발달하는 과정에서 대류의 규모와 기울어지는 각도가 증가하였다.

Key words: 깊은 습윤 대류, 전선발생함수, 수분속수렴, 대류가용위치에너지

※ 이 연구는 기상·지진See-At기술개발연구사업(KMI2020-01910)의 지원으로 수행되었습니다.

Mode-S EHS 정보 기반의 바람 관측자료 생산 및 품질 검증

김정민¹, 김정훈¹

¹서울대학교 지구환경과학부

민간 항공기에서 관측되는 기상 정보는 수치모델 자료동화를 통한 초기 자료의 품질향상 및 단기 예측성 향상에 중요한 역할을 하며, 항공운항에 위험 요소인 대기 중 난류의 객관적 위치 및 강도를 추정하는데 필수적인 관측 자료이다. 본 연구에서는 인천국제공항에서 2021년 4월 7일부터 2021년 8월 24일까지 약 3개월 간 지상 수신기를 통해 수집된 Mode-Selective Enhanced Surveillance(이하 Mode-S) 항공기 자료로부터 약 1-Hz 주기를 가지는 바람 벡터 자료를 생산하였다. 추정된 Mode-S 바람자료는 ERA5 재분석 자료 및 Aircraft Meteorological Data Relay(이하 AMDAR) 항공기 관측 자료와 삼중 비교를 통해 그 품질을 평가하였다. Mode-S 기반 바람 관측 자료는 AMDAR 자료와 같이 모든 민간 항공기에 의해 제공되지 않고 항공기 운항 상태에 따라 평균 10초에서 30초 동안의 평균된 기상정보만 보고되는 기존의 항공기 자료의 시공간적 공백을 채울 수 있다. Mode-S 기반 바람 관측 자료의 개수는 주어진 시·공간에서 이용 가능한 AMDAR 관측 자료 개수의 약 2배에 이르며, 본 연구 기간 동안에는 평균적으로 하루에 약 150,000개의 관측 자료를 제공한다. 원시 Mode-S 기반 자료에 세계기상기구에서 제안하는 품질 관리 절차 및 추가적인 보정을 수행한 후, Mode-S 기반 바람 자료와 ERA5 재분석 바람 자료 간 Root Mean Square Error(이하 RMSE)는 기존의 AMDAR와 ERA5 자료 사이의 RMSE와 유사한 크기로 나타났다. Mode-S (AMDAR)와 ERA5 사이의 500hPa에서의 동서바람에 대한 RMSE는 약 2.2 m s^{-1} (2.0 m s^{-1})이며, 고도가 200 hPa로 증가함에 따라 4.9 m s^{-1} (3.1 m s^{-1})로 증가함을 보였다. 남북바람에 대한 RMSE 결과에서도 동서바람과 유사한 추세가 발견되었지만, 900 hPa와 1000 hPa 사이의 지상 근처 및 대류권 하부 경계층 고도 아래에서는 Mode-S 기반 자료에서 약 4.3 m s^{-1} 의 뚜렷한 양의 편향이 관찰되었다. 이에 대한 원인은 추가적인 연구가 필요한 실정이다. 전반적으로 Mode-S 기반 바람 자료의 품질은 AMDAR와 유사하였으며, Mode-S 자료를 통해 얻은 공항 근처 지상 및 경계층에서의 대용량 고품질의 바람 자료는 공항 근처 급변풍 및 저고도 시어 관측과 공항 주변 고해상도 수치모델 구축에 필요한 양질의 정보를 제공할 것으로 기대된다.

Key words: 항공기, 바람, Mode-S EHS, AMDAR, 품질 검증

※ 이 연구는 한국연구재단(NRF-2019R111A2A1060035)의 지원과 기상·지진See-At기술개발연구사업(KMI2020-01910)의 지원으로 수행되었습니다.

PNU CGCM-WRF chain을 이용한 찰옥수수 수확일 장기예측

허지나¹, 김용석¹, 조세라¹, 심교문¹, 강민구¹, 안중배², 최명주², 김영현²

¹농촌진흥청 국립농업과학원

²부산대학교 대기환경과학과

옥수수는 세계 3대 작물이면서 우리나라 전역에 재배되고 있는 중요한 식량 작물 중의 하나이다. 본 연구에서는 선행연구에서 밝혀진 찰옥수수의 생육과 온도와 의 관계를 이용하여 찰옥수수의 수확일을 사전에 예측하는 방법을 고안하고, 추정 능력을 평가하였다. 먼저 일별 기온을 예측하기 위해 부산대학교(Pusan National University) 전지구 접합대순환 모형(CGCM)과 WRF(Weather Research and Forecasting) 지역기후모형을 이용하여 구축한 PNU CGCM-WRF chain을 활용하였다. PNU CGCM-WRF chain 기반의 6개월 예측 기온을 파종일(4월 5일 가정)부터 수확 기준 온도(1,650~2,200°C)까지 누적하는 적산온도 기법을 이용하여 수확일을 추정하였다. 추정 능력을 평가하기 위해 과거 30년 기간(1991~2020년)에 대해 예측된 기온과 관측된 기온 자료를 이용하여 추정한 수확일을 비교 분석하였다. 즉, 찰옥수수 수확일 추정 능력은 기온 예측 능력에 의존한다고 가정하였다. 정량적으로 예측 기온 기반 수확일은 DOY 187~210로 관측 기온 기반 수확일(DOY 188~211) 보다 1.1~1.3일 정도 늦게 모의되었다. 정성적으로 예측된 수확일 분포도는 지형적 효과가 반영되어 주변지역보다 상대적으로 고도가 높은 지역과 고위도 지역에서 수확일 지연 패턴이 잘 나타났다. 본 연구를 통해 6개월 장기 기후 예측 정보가 사전에 작물의 생육환경 변화를 추정하고 농작업 의사결정을 지원할 수 있는 정보로 활용 가능하다는 것을 보여준다.

Reference

Hur, J., Y. S. Kim, S. Jo, K. M. Shim, J.-B. Ahn, M.-J. Choi, Y.-H. Kim, M. Kang, W. J. Choi, 2021: Estimation of Waxy Corn Harvest Date over South Korea Using PNU CGCM-WRF Chain, Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, 23(4), 405~414

Key words: 지역기후모델, 접합대순환모델, 장기예측, 옥수수, 수확일

※ 이 연구는 농촌진흥청 “신농업기후변화대응체계구축사업(과제번호: PJ014891)”의 지원으로 수행되었습니다.

기계학습법 기반 서리발생 예측 모형 구축을 위한 데이터 학습 방법 비교

김용석, 심교문, 허지나, 강민구, 조세라
국립농업과학원 기후변화평가과

서리는 봄철 과수작물의 꽃이 피기 시작할 무렵 발생하여 꽃봉우리에 피해를 주고 결국 결실을 맺지 못하게 하기 때문에 과수농가는 많은 피해를 입고 있으며, 농작물 수확시기인 가을철에는 수확물의 상품성을 크게 떨어뜨려 큰 피해를 입히기도 한다. 이러한 서리를 예방하기 위해서는 서리발생을 미리 예측할 수 있는 기술의 개발이 필요하며, 서리발생 예측 기술은 과거 데이터기반으로 구축되기 때문에 데이터의 구성이 중요한 요인으로 작용한다. 그래서 본 연구에서는 서리가 발생한 날과 서리가 발생하지 않은 날을 분류하기 위해 최저기온 등 8가지 기상요소의 데이터를 이용하여 3가지 방법으로 데이터 세트를 구성하고 정확도를 비교하였다. 첫번째는, 데이터 비율이 불균형한 원시 데이터를 이용하여 서리가 발생한 날에 대한 4,424개의 데이터세트와 서리가 발생하지 않은 날에 대해서는 43,673개의 세트로 구성하여 랜덤포레스트(Random Forest)을 이용한 분류모형을 구축하였다. 두번째는, 서리가 발생한 날과 서리가 발생하지 않은 날의 학습 데이터 비율을 똑같이 설정하기 위해 서리가 발생한 날의 데이터 세트는 랜덤으로 추출하여 서리가 발생한 날의 데이터 개수와 동일하게 맞추어 각각 4,424세트로 구성하였다. 그리고 세번째는, 지역별로 기상요인이 서리 발생에 미치는 영향이 다를것으로 예상되어, 군집분석(k-means)를 이용하여 24지점에 대한 군집분석을 실시하였고, 그룹화 된 지역을 통합하여 서리가 발생한 날과 발생하지 않은 날에 대해 분류모형을 앞의 방법과 동일하게 구축하였다. 본 연구에서 구축한 모형의 연구 결과는 첫번째 방법에서 학습 데이터 세트의 양이 가장 많아 정확도가 평균적으로 0.93로 가장 높게 나타났지만 균형화 된 정확도에서는 0.79로 낮았으며, 두번째 방법에서의 정확도는 평균적으로 0.90의 정확도를 나타냈다. 그리고 세번째 방법에서는 평균적으로 0.88의 정확도를 나타나 이번 연구의 결과에서는 두번째 방법으로 구축된 모형이 가장 효율적인 것으로 나타났다.

Key words: 서리, 모형, 랜덤포레스트

※ 이 연구는 농촌진흥청 “신농업기후변화대응체계구축사업(PJ01515101, 농장단위 상세기상정보 활용 농업재해정보 분석 연구)”의 지원으로 수행되었습니다.

기상인자를 이용한 벼 생산량 유사 연도 통계적 분석 방법 비교

김용석, 심교문, 허지나, 강민구, 조세라
국립농업과학원 기후변화평가과

최근 기후변화로 인하여 곡물 가격이 매우 가파르게 상승하고 있다. 특히, 쌀은 우리나라 주식으로서 정부의 수급 조절 정책이 매우 중요하게 적용되는 곡물 중 하나이다. 매년 여러 연구기관에서 다양한 방법으로 벼의 작황을 예측하고 있으며, 그에 따라 벼의 생산과 관련된 정책이 이루어지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 정확한 벼 생산량을 추정하기 보다는 과거의 유사한 패턴의 기상환경을 나타낸 연도를 찾아내어 벼 생산량을 간접으로 추정하는데 참고자료로 활용될 수 있도록 수행되었다. 벼 생산량과 관련된 유사연도 분석을 위해 각 연도별 벼 생산량을 수집하여 벼 생산량이 비슷한 연도가 벼 생육기간의 기온, 강수량, 일조시간 데이터 패턴에서도 유사성을 나타내는지를 다양한 통계기법을 이용하여 비교 분석하였으며, 유사 연도 분석을 위한 가장 적절한 통계기법을 찾아내기 위해 실험을 수행하였다. 실험을 위해 통계청의 2011년~2020년에 대한 전국 벼 생산량 자료를 수집하였고, 기상자료는 기상청 종관기상관측자료(ASOS)의 61지점에 대한 기온, 강수량, 일조시간을 평균하여 사용하였다. 유사연도 분석을 위해서는 분류분석 기법 중 하나인 랜덤포레스트(Random Forest)를 이용하였으며, 유사연도를 그룹화 하기 위해 k-maens와 다차원척도법(Multidimensional scaling)을 수행하였다. 또한 유클리디안 거리(Euclidean Distance), 동적시간워핑(Dynaminc Time Wrapping)방법을 이용하여 2020년을 기준으로 유사한 연도를 분석하는 실험을 수행하였다.

Key words: 벼, 생산량, 유사연도, 기온, 강수량, 일조시간

※ 이 연구는 농촌진흥청 “신농업기후변화대응체계구축사업(과제번호: PJ0500801)”의 지원으로 수행되었습니다.

[짧은구두3]

미세먼지 및 대기오염

여름철 일몰 이후 고농도 오존 지속 사례의 기상학적 원인 분석

김유정¹, 곽경환¹

¹강원대학교 환경융합학부

오존은 일정 농도 이상 장시간 노출될 경우 시각 장애 및 폐기능 저하 등 다양한 환경성 질환이 발생할 수 있다. 야간에 발생한 오존의 고농도 상승은 지역적, 계절적 원인이 아닌 종관 기상계와 관계가 있다는 선행연구는 있었으나 관측값을 기반으로 한 연구여서 관측값과 비교할 수 있는 지역적 한계로 모델을 통한 분석 연구가 필요하다. 본 연구에서는 중규모 기상 모델(Weather Research and Forecasting, WRF)을 이용하여 늦은 오후까지 고농도 오존이 지속되는 원인을 파악하고자 한다. 대상 기간은 2018년 6월 18일(일몰 이후에도 고농도 오존 지속되는 사례)와 2018년 6월 2일(일몰 전 고농도 오존이 종료되는 사례)이며, 모의 영역은 강원도 춘천시를 포함한 3km x 3km 도메인을 사용하였다. 오존 농도는 주거 지역에 위치해 있는 춘천 석사동 도시 대기 측정소(AQMS)자료를 사용하였으며, 수치 모의 결과는 1시간 간격으로 북춘천 종관 기상 관측(ASOS)와 오산 레윈 존데 관측값에 대하여 검증하였다. 18일과 2일 사례에서 오존이 잘 발생하는 지상 기상(기온, 습도, 풍속)의 유사한 일변화를 보였지만, 상층 대기의 연직 풍속 일변화에서는 차이를 보였다. 특히 고농도 오존이 지속되는 사례에서는 고농도 오존이 지속되는 늦은 시간까지 대기경계층이 높게 모의되었다. 또한, 두 사례의 지상(950hpa)과 상층(880hpa) 풍속 차 변화가 뚜렷하게 보였으며, 늦은 오후까지 고농도 오존으로 지속될 때 지상과 상층의 풍속 차가 적게 유지됨을 확인하였다.

Key words: 오존, 중규모 모델, WRF, 종관기상, 상층대기, 기압 풍속차

드론을 이용한 겨울철 도심 및 교외 지역의 오염물질 연직 분포 비교

오효숙¹, 김수연², 손영진¹, 고원석², 김지민², 도현석¹, 김유정², 곽경환²

¹강원대학교 환경의생명융합전공

²강원대학교 환경융합학부

도시 지역은 녹지 면적 감소, 인공 구조물 발달, 높은 차량 밀도 등으로 도시화가 점차 가속화되고 있다. 이는 도시 열섬 현상을 일으키는 요인이며, 지역간 대기 연직 분포의 차이를 발생시켜 지상에 오염물질 확산에도 영향을 줄 수 있다. 오염물질 분포 파악을 위한 연직 관측 방법은 다양하지만, 최근 드론을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 접근성이 편리하며, 원하는 지점과 고도에서 이동식 오염물질 측정 장비를 통해 실시간 농도를 기록할 수 있다는 장점이 있다. 이에 본 연구는 드론을 이용하여 도심 및 교외 지역의 겨울철 대기오염물질과 기상 요인을 측정하고, 두 지역 간에 연직 기상과 오염물질 분포 차이를 비교하였다. 측정 대상 지역은 도심 지점은 강원도 춘천시 퇴계사거리, 교외 지점은 춘천 수변공원이다. 도심 지역은 아파트와 교차로로 구성되어 있으며, 교외 지역은 인근에 북한강이 위치하며, 주행 차량과 구조물이 많지 않아 비교 측정 지점으로 적합하다. 측정 기간은 2022년 2월 14일부터 17일이며 오전, 오후 사례로 나누어 지점마다 각 총 15, 16회씩 수행하였다. 측정 방법은 지상 0 m부터 고도 150 m까지 30 m 간격으로 지상을 제외한 각 지점에서 40초 정지 비행을 수행하였다. 드론에 온·습도계 (Imet-XQ2), BC(MA200), PM_{2.5}(Side pak), O₃(Aeroqual S500) 측정 장비를 함께 적재하여 연직 분포 변화를 살펴보았다. 두 지역의 연직 기온 분포를 보면 도심 지역에서는 지상에서 고도 90 m까지 약 1.5 °C 낮아지지만, 교외 지역에서는 약 1°C 감소하는 경향을 보였다. 또한, 연직 오염물질 분포는 BC의 경우 도심 지역에서 교외 지역보다 지상의 농도는 약 1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 이상 높지만, 최상층 고도에서는 두 지점 모두 유사한 낮은 농도를 기록하였다. 이는 오전 시간대에 뚜렷하게 나타났으며, 온도 격차가 더 클수록 농도 감소 폭이 더욱 증가하였다. 이를 통해 인위적 배출 요인이 다양한 도심 지역에서 고농도 현상이 발생할 때, 지역 자체 기상 환경에 따라 연직 확산 분포가 달라질 수 있음을 확인하였다.

Key words: 드론 측정, 도심 및 교외 지역, 연직 오염물질 분포, 기상요인

※ 본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF-2020R1C1C1012354)의 지원과 2021년도 환경부 “미세먼지관리 특성화대학원 사업”의 지원을 받아 수행하였습니다.

에어로졸 역학 모델을 이용한 초기 강우 시 입자상 물질의 크기별 세정효과 모의

강경구¹, 곽경환^{1,2}, 이현호³

¹강원대학교 환경의생명융합학과

²강원대학교 환경융합학부

³공주대학교 대기과학과

습식 침적은 구름 내 세정과정인 rainout과 구름 밑 세정과정인 washout이 있으며, 대기 중 입자상 물질의 중요한 제거 과정이다. Washout은 빗방울이 대기 중에 떠다니는 입자상 물질과 충돌하여 제거되는 과정으로 강우 강도, 물방울의 입경과 상관성이 높을 뿐만 아니라 입자상 물질의 크기에 따라 제거되는 방식이나 효율이 다르다. 본 연구에선 강우 외적인 효과를 제거하기 위해 강우 중 PM_{2.5} 최소값인 시점을 기준 강우 세정효과를 분석하였다. 세정효과는 초당 농도 감소 기울기인 세정계수(λ , s⁻¹)로 정량화하였고, 이를 에어로졸 역학(Particle Matter Dynamics, PMDYN) 모델 내에 적용하여 강우 시 수농도 감소를 모의하였다. 본 연구에서는 Optical Particle Counter(Grimm model 1.109)와 Scanning Mobility Particle Sizer(TSI 3910 nanoscan SMPS), 자동 기상관측 장비(AWS)에 강우량계(RG3-M, Onset Computer)를 장착해 동일한 건물에 설치하여 2018년 11월부터 2021년 6월까지 춘천시 강원대학교에서 강우량과 입자상 물질의 농도를 측정하였다. OPC와 SMPS를 이용한 측정은 강우 예보 최소 6시간 전부터 강우 전후를 포함하는 시간 동안 1분 간격으로 이루어졌다. 강우 강도(mm/hr)는 강우 중 PM_{2.5} 최소 시점까지의 평균 시간당 강우량을 기준으로 세 항목으로 구분하였다. 강우 중 입자상 물질의 크기별 농도 감소를 모의하기 위해 10 nm ~ 9 μm 범위인 입자 크기를 17개의 bin으로 설정하였다. 입력자료는 강우 강도별 대표 일자의 강우 시작 시점의 10분 평균 입자의 크기별 수농도값과 시간별 강우강도를 사용하였다. 분석 결과 전체 사례에 대한 입자 크기별 세정계수는 $-1.84 \times 10^{-5} \sim 1.26 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로, 선행연구보다 약 3배 큰 값을 보였다. 이는 개선된 분석 방법을 통해 강우 외적인 효과가 빠진 세정계수 값을 얻을 수 있다는 것을 의미한다. 강우 강도별 세정계수와 PMDYN 모델을 이용한 모의 결과와 측정 결과를 비교했을 때, 강우 중 강우 외적인 효과를 받지 않는 강우 초반의 수농도 감소를 잘 모의하였다. 개선된 세정효과 분석 방법은 강우 세정효과의 정량화 및 기상효과가 적용된 대기질 모델에서 대기 오염물질 농도 모의 성능을 개선하는 데 기여할 것이다.

Key words: 입자상 물질, 입자 크기분포, 강우 세정효과, 에어로졸 역학 모델

최근 서울 주말 대기질 악화: 국지적 영향보다 외부기여를 중심으로

최우석¹, 허창회², 허진우², 김가영², 김상우², 김진원³

¹세종대학교 데이터사이언스학과

²서울대학교 지구환경과학부

³국립기상과학원 기후변화예측연구팀

본 연구에서는 2016-2019 기간의 겨울철(11-3월) 주말 서울 대기질이 이전 기간과 비교해 크게 악화되었다는 것을 밝혀내었다. 특히 직경이 $2.5 \mu\text{m}$ 보다 작은 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 농도는 주중(수-목)과 비교해 주말 동안 30%까지 높게 나타났다($p < 0.01$). 2007-2015 기간에는 서울 주말 초미세먼지 농도가 주중과 비교해 10% 낮았다는 점을 감안할 때, 이러한 대기질의 주간변동 변화는 예상하지 못한 갑작스러운 변화로 판단된다. 최근 서울 주말 대기질 악화는 대기중 화학반응에 의한 미세먼지 2차 생성, 중국 산둥반도와 징진지 지역에서의 외부 수송, 경기 남부와 충청 지역으로부터의 국내 수송이 주요 원인으로 나타났다. 주말의 고농도 초미세먼지 농도는 질산염(NO_3^-), 암모늄(NH_4^+), 황산염(SO_4^{2-}) 등 대기 중 미세먼지의 무기성분으로 일부 설명이 가능했다. 또한 대기질 모델 기반 기여도 분석을 통해 주말과 주중사이 차이의 약 40%가 서울보다 남쪽에 위치한 국내 배출에 의한 영향으로 밝혀졌다. 그러나 경기 남부와 충청 지역의 산업 부문에 의한 배출과 국내 전력 생산량은 그 주간 변동성을 고려해볼 때, 이러한 주말 대기질 악화를 유발시킬 수 있는 잠재적 요소로 설명되지 않는 것으로 나타났다. 따라서 명확한 서울의 대기질 개선전략을 수립하기 위해서는 지역적인 배출에 대한 정확한 계산과 미상의 배출원에 대한 연구가 더 필요하다.

Key words: 대기질, 주말, $\text{PM}_{2.5}$, 2차 생성, 배출원 기여

※ 이 연구는 세종대학교 신입교원지원사업(20220206)의 지원으로 수행되었습니다.

군집분석을 활용한 수도권과 충청지역 미세먼지 농도의 공간분포 구분

최우석

세종대학교 데이터사이언스학과

서울을 비롯한 수도권은 인구가 매우 밀집하여 많은사람들이 겨울철 고농도 미세먼지(PM₁₀, 직경 10 μm 이하 입자)에 자주 노출되고 있다. 미세먼지 농도는 외부로부터의 수송, 국지적인 직접 배출, 미세먼지 전구물질들의 대기중 화학반응으로 인한 2차 생성 등 다양한 원인으로 인해 증가할 수 있다. 본 연구에서는 수도권과 충청지역을 미세먼지 변동성에 따라 군집분석으로 총 4가지 지역으로 구분하였다. 첫 번째 지역은 경기 남부와 충청남도 동부지역으로 분류되었고, 두 번째 지역은 인천과 경기 서부, 서울 대부분의 자치구가 분류되었다. 세 번째 지역은 서해와 맞닿아 있는 충청남도 서부 지역과, 네 번째 지역은 경기 동부 지역이 분류되었다. 각 지역의 미세먼지 농도 변동성은 국지적인 대기오염물질 배출과 풍향 및 풍속 등 기상조건에 의해 조절되는 것으로 나타났다. 미세먼지 변동성에 위해 구분된 지역 분류는 기존 우리나라 행정구역 분류와 다르게 나타났다. 대기오염물질 배출과 대기질 관리를 위한 대부분의 정책이 행정구역 단위로 수립되고 시행된다는 점을 고려해 볼 때, 본 연구는 지역별 미세먼지 농도 분포를 고려한 세부지역별 대응이 보다 효율적인 대기질 관리 방안이라는 점을 제시한다.

Key words: PM₁₀, 수도권, 군집분석, 지역 구분, 정책

※ 이 성과는 정부 과학기술정보통신부 의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1C1C1003659)

미세먼지 측정넷을 활용한 전국 지역별 초미세 입자 농도 및 크기 분포 분석

배연¹, 정수종¹, 유신이², 최수민², 박찬열²

¹서울대학교 환경대학원

²국립산림과학원 도시숲연구센터

현재 우리나라는 에어코리아 미세먼지 농도(PM10)과 초미세먼지 농도(PM2.5)를 기준으로 지역별 대기질을 평가하고 있다. 그러나 PM10과 PM2.5는 자동차 및 발전소와 같은 연소원에서 배출하는 nuclei mode($<0.1 \mu\text{m}$)와 accumulation mode($0.1\sim 2.0 \mu\text{m}$) 입자부터 주로 타이어 마모 등 기계적인 과정에 의해 발생하는 coarse mode($>2.0 \mu\text{m}$)의 입자를 모두 포함하여, PM10과 PM2.5만을 지표로 활용할 경우 오염원에 따른 미세먼지 농도 영향을 평가하기 어렵다. 특히 직경이 $1\mu\text{m}$ 미만의 입자는 대부분 연소과정에서 발생하므로 연소 과정에서 발생하는 입자와 기계적으로 생성된 입자의 양을 구분하기 위해서는 PM1 농도 분석이 필수적이다. 산림과학원에서 운영하고 있는 미세먼지 측정넷은 2021년 말일 기준 전국 20개 지역에 설치되어 PM10, PM2.5, PM1 질량 농도와 직경이 $0.25\mu\text{m} \sim 0.32\mu\text{m}$ 일 때 32개 직경 구간에 대해서 수농도를 제공하고 있다. 본 연구에서는 위 미세먼지 측정넷 자료를 활용하여 우리나라 전 지역을 대상으로 주 오염원에 따른 PM10, PM2.5, PM1 질량 농도의 경향성을 파악하고 현재까지 알려진 적 없는 지역별 초미세 입자의 수 농도 및 크기 분포를 제시하였다. 또한 미세먼지 측정넷은 동일 지역 내에 3개의 측정 기기를 각각 공단 지역, 주거 지역, 숲 지역 등 다른 환경에 설치하여 운영하므로, 본 연구에서는 동일 지역 내 각기 다른 환경에 설치된 기기들의 미세먼지 농도 차이 값을 활용하여 주변 환경의 미세먼지 농도 영향을 분석하였다. 전국적으로 미세먼지 농도가 가장 높은 2021년 3월을 대상으로 황사 시기와 강수 시기를 제외한 뒤 분석한 결과, 해안가에 위치한 지점을 제외하고 모든 지역에서 PM1이 PM 10에서 차지하는 비중이 60%이었으며, 수도권 인근 도시에서 특히 PM1의 영향이 크게 나타났다. 동일 지역 내에서는 주변 환경이 숲일 경우 대부분의 시간대에서 시간 평균 PM 농도가 낮게 나타났다.

Key words: 대기질, 미세먼지 측정넷, PM1, 수농도

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2020002770001)

서울과 백령도 지역의 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 계절별 화학조성 특성 및 발생원 파악

오승미¹, 김주영¹, 권수진², 이지이¹

¹이화여자대학교 환경공학과

²서울대학교 보건대학원

우리나라의 수도인 서울에서는 자체적으로 배출 및 생성되는 미세먼지와 함께 중국으로부터 불어오는 황사로 인해 고농도 미세먼지 사례가 빈번하게 관측되고 있다. 미세먼지는 입경에 따라 발생 기원과 화학적 특성이 다르며, 일반적으로 인간 활동에 의해 인위적으로 배출되거나 대기 중 화학반응을 통해 2차 생성된 미세먼지는 자연적으로 발생한 미세먼지에 비해 크기가 작다고 알려져 있다. 현재 우리나라에서 규제하고 있는 PM_{2.5}(초미세먼지)와 더 작은 입경을 갖는 PM_{1.0}(극초미세먼지)의 화학적 특성을 비교 분석하는 사전 연구가 2019년 및 2020년에 진행된 바 있으나, 연구 기간이 짧고 시료수가 제한적이어서 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 일반적인 오염 특성을 구체적으로 파악하는 데 한계가 있었다. 따라서, 본 연구에서는 2021년에 도심지역인 서울과 배경지역인 백령도에서 각 계절별로 15개 이상의 PM_{1.0}과 PM_{2.5} 시료를 채취하여 질량농도, 탄소성분(유기탄소 및 원소탄소), 이온성분(Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻)을 분석하고, 선행 연구와 비교하여 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 일반적인 화학조성 특성의 차이를 파악하고자 하였다. 서울과 백령도에서 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 질량농도 및 화학조성은 작년과 유사하였으며, PM_{2.5} 내 PM_{1.0}의 질량비율이 70% 이상으로 PM_{1.0}이 PM_{2.5} 질량농도의 대부분을 결정함을 알 수 있었다. PM_{1.0}과 PM_{2.5} 모두 서울은 일반적으로 OC>NO₃⁻>SO₄²⁻>NH₄⁺>EC, 백령도는 OC>SO₄²⁻>NO₃⁻>NH₄⁺>EC 순의 화학조성비를 가졌다. 인위적으로 배출되거나 2차 생성된다고 알려져 있는 OC, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ 등 성분들의 경우 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 상관성이 높게 나타났지만, Ca²⁺, Mg²⁺ 등 자연에서 기원한다고 알려진 화학성분들은 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 상관성이 낮아 PM_{1.0}보다 더 큰 입경을 가진다는 것을 알 수 있었다. 서울과 백령도에서 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 OC/EC 비율은 작년보다 다소 증가한 경향을 보였으나, 백령도에서는 작년과 유사하게 PM_{2.5}의 OC/EC 비율이 PM_{1.0}에 비해 다소 높았는데, 이는 PM_{1.0} 내의 EC 비율이 낮았기 때문으로 판단된다. 추후 연구에서는 PMF 모델을 이용하여 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 발생원 유사성과 차이점을 파악하고, 계절별 고농도 사례를 선정하여 고농도 발생시 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 증가비율을 비교분석하며, 역계적 분석을 통해 유입 기류별 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 오염특성을 파악하고자 한다.

Key words: PM_{1.0}, PM_{2.5}, 화학성분, PMF, 발생원

※ 이 연구는 국립환경과학원의 수도권지역 PM1 특성 및 관리방안(III) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

2021년도 수도권과 호남권 지역의 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 화학조성 및 발생 특성 차이 비교

김주영¹, 오승미¹, 권수진², 이지이¹

¹이화여자대학교 환경공학과

²서울대학교 환경보건학과

미세먼지는 국내 주요 대기오염물질로, 대기질과 대기 가시도를 악화시키고 인체에 유해하며 기후변화에 영향을 주어 국제적으로 관리 및 규제 대상이 되고 있다. 미세먼지는 입자의 공기역학적 직경이 10 μm 이하인 PM_{1.0}과 2.5 μm 이하인 PM_{2.5}로 구분된다. 미세먼지는 입경 분포에 따라 구성성분과 특성이 상이한데, 공기역학적 직경이 1 μm 이하인 PM_{1.0}의 경우 PM_{2.5}의 약 80% 정도를 차지하며 PM_{1.0}과 PM_{2.5}보다 인위적 배출원에 의한 영향을 더욱 잘 반영하는 특성을 갖는다. 따라서 인위적 배출원에 의한 고농도 미세먼지 발생 사례가 잦은 지역의 경우, 효율적인 대기질 관리를 위해 PM_{1.0}에 대한 집중적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 수도권과 호남권에서의 PM_{1.0}과 PM_{2.5} 연구를 통해 (1) 국내 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 계절별 발생 특성을 이해하고, (2) 두 지역에서 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 유사점 및 차이점을 비교분석하고, (3) 수도권과 호남권에서의 미세먼지 발생 특성의 차이를 파악하고자 한다. 연구는 수도권과 호남권 지역에 각각 위치한 국립환경과학원 대기오염집중측정소에서 2021년 여름, 가을, 겨울 계절 동안 채취한 시료에 대한 질량농도, 이온 성분(Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺), 탄소 성분(OC, EC) 분석을 바탕으로 진행되었다. PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 질량농도는 여름, 가을, 겨울 계절 중 여름을 제외한 나머지 계절에서 모두 호남권이 수도권보다 비교적 낮은 농도로 나타났다. PM_{1.0}/PM_{2.5} 비율은 두 지역에서 모두 80% 이상의 높은 수치를 가지며 PM_{1.0}의 PM_{2.5}에 대한 기여도가 높은 것으로 파악되었다. PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 화학조성 분석 결과, 두 지역에서 모두 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 화학조성 중 OC와 이차생성 무기이온(NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺)이 가장 지배적으로 나타났다. OC/EC 상관성 분석 결과, OC/EC 상관성의 결정계수는 두 지역에서 비슷한 정도로 나타난 반면, OC/EC 비율은 수도권이 호남권에 비해 크게 나타났다. 두 지역의 화학적 특성의 차이를 기반으로, 특정 계절 대기 중 화학 반응으로 인한 이차생성 무기이온과 OC의 생성이 수도권에서 더욱 활발하게 나타나는 것으로 판단하였다. 추가적으로, 역계적 분석과 기체상 전구물질의 산화 특성 분석을 통해 기단의 중·장거리 이동과 대기 중 화학 반응에 따른 오염원 및 생성기작을 파악하여 수도권과 호남권에서 PM_{1.0}과 PM_{2.5}의 화학조성과 발생 특성 차이 및 유사성을 구체적으로 규명하고자 한다.

Key words: PM_{1.0}, PM_{2.5}, 수도권, 호남권

※ 이 연구는 국립환경과학원의 수도권지역 PM₁ 특성 및 관리방안(III) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

2050년 PM2.5 질량농도의 증가로 인한 인도와 중국에서 꿀벌 시정 제한(limited visibility)의 대규모 변화 예측

조유리¹, 정수종¹, 장동영²

¹서울대학교 환경대학원 환경계획학과

²서울대학교 환경계획연구소

에어로졸에 의한 광소멸은 태양 주변에 나타나는 선형편광의 세기 또한 감소시킨다. 대다수의 곤충은 비행에 필수적인 방향 설정에 전천에 나타나는 선형편광의 특성을 읽고 활용한다, 따라서 선형편광의 세기가 감소하는 것은 곤충의 시정 또한 감소하는 것을 의미한다. 꿀벌(*Apis mellifera*)은 곤충의 편광 활용 비행에 있어 가장 많이 연구된 종으로, 전천에 분포하는 편광의 세기가 최소 15%일 때 정확한 방향 설정을 하는 것으로 알려져 있다. 광소멸은 직경이 작은 입자의 농도에 지배적으로 영향을 받기 때문에 대기 중 초미세먼지(PM2.5)의 질량농도는 선형편광도의 감소 정도를 예측하는 설명변수로 사용될 수 있다. 이 연구에서는 관측을 통해 정량화한 PM2.5-선형편광도 관계식을 바탕으로, EMAC 모형이 현재의 대기오염물질의 배출량 추세 시나리오를 바탕으로 예측한 2050년 PM2.5 질량농도의 분포에 따라 꿀벌이 비행 중 시정 제한을 겪는 지역의 규모(시정제한규모)와 빈도(시정제한일수)를 전 지구적으로 추정하였다. 연구 결과, 2050년에 전 지구적으로 최소 1천만 km² 이상 지역에서 꿀벌이 시정 제한을 겪는 것으로 나타났다. 이는 2010년 대비 16% 증가한 수치이다. 이 지역 중 2010년과 비교하여 시정제한일수가 최소 1일 이상 증가한 지역의 면적은 4.4백만 km²으로, 인도와 중국이 이 면적의 40%를 차지한다. 인도에서는 시정제한일수의 증가가 70만 km² 지역에서 예측되며, 이는 인도 전체 식생 면적의 30%에 해당한다. 주로 북부 지역에서 시정제한면적과 시정제한일수의 증가가 예측되며, 시정제한일수가 최장 106일에 달할 것으로 추정되었다. 중국에서는 1백만 km²의 지역에서 시정제한일수의 증가가 예측되며 이는 중국 전체 식생 면적의 약 20%를 차지한다. 시정제한면적과 시정제한일수의 증가가 주로 동북부에서 예측되며, 시정제한일수가 최장 49일에 달하는 것으로 추정되었다. 중국과 인도는 꿀벌과 같은 수분매개자에 의존하는 작물의 생산량이 각각 세계 1, 2위로, 두 나라의 식생 면적 중 최소 20% 이상인 지역에서 꿀벌의 시정제한일수가 증가한다는 것은 이들 지역의 생태계서비스 저하를 넘어 전 지구적 식량 안보가 위협받을 수 있음을 시사한다.

Key words: 에어로졸, 선형편광, PM2.5, 수분매개자, 생태계서비스

※ 이 연구는 기상청 <육지 식생 모수화 개선 및 초기화 기법 개발>(KMI2020-01118)의 지원으로 수행되었습니다.

산불 발생에 따른 강릉지역 극초미세먼지 변화

유신이¹, 최수민¹, 정진숙¹, 박찬열¹

¹국립산림과학원 도시숲연구과

산불 발생 빈도와 강도는 기상, 연료, 지형에 의해 영향을 받는다. 한국 동해안 지형과 봄철 기상 조건은 산불 발생확률을 높이고, 침엽수림 연료는 산불 피해를 높인다. 그동안 산불 발생은 재산·인명·산림 피해 측면에서 연구되었으며, 동해안 지역은 바다와 가까워서 대기오염물질 영향에 대한 실증적 관측자료는 없었다. 특히, 산불의 인간건강 영향 측면에서, 인간 호흡기 계통의 건강 영향이 큰 극초미세먼지(PM_{1.0}, 지름이 0.1 μ m 이하 입자)의 동태는 중요하다. 본 연구는 산불 발생에 따른 극초미세먼지 변화를 분석하여, 산불의 인간건강 영향 효과를 파악하는데 기초자료를 수집하고자 분석하였다. 국립산림과학원에서 구축한 산림 미세먼지 측정넷(Asian Initiative for Clean Air Networks, AiCAN)의 강릉관측소 3개 지점자료를 활용하여 2022년 강릉산불 발생 시기, 강릉 산림, 주거, 해안지역의 PM_{1.0}과 기상자료를 비교하고, 수농도(개수/cm³) 분석을 통해 극초미세먼지 특성을 파악하였다. 산불 발생 기간(3월 4일~3월 8일) 산림, 주거, 해안 지역의 최대 PM_{1.0} 농도는 각각 169.2 μ g/m³, 234.5 μ g/m³, 190.6 μ g/m³으로 나타났으며 이는 산불 발생 전보다 약 7배, 8배, 8배 높은 수치였다. 수농도 변화는 산불 발생 후 0.25~0.3 μ m 크기의 미세먼지가 증가하였고, 산림과 해안지역은 각각 3시간 10분과 3시간 20분, 주거지역은 7시간으로 오랜 기간 높은 수농도를 유지하였다. 이는 산림 자체의 특성과 기상 조건의 영향으로 3개 측정점별로 다른 것으로 판단된다. 산림과 해안지역은 각각 1.5%, 1.7%의 높은 풍속이 관찰되었고 대기 순환이 활발히 이루어졌음을 보여준다. 또한, 산림 내 높은 풍속은 입자간 충돌을 일으켜 빠른 입자 성장 및 침강에 영향을 작용한 것으로 보인다. 산림과 해안지역 사이에 있는 주거지역은 두 지점에서 불어오는 바람이 만나는 곳으로 낮은 풍속(0.9m/s)이 관찰되었고, 이로 인해 PM_{1.0}이 대기 중에 오래 정체되어 있던 것으로 판단한다. 본 연구 결과는 산불이 산림자원 뿐만 아니라 인간건강에 영향을 미칠 수 있는 관측 자료를 제공한 측면에서 의미가 있으며, 세대별 미세먼지 노출 위험성을 포함한 인간건강 영향에 관한 장기적 연구 과제가 필요함을 시사한다. 또한, 산불 발생 빈도가 높은 지역에서 산불 발생 전에 연료 관리는 취약 계층의 인간건강 측면에서 필수적인 조치임을 나타낸다.

Key words: 건강 영향, 산불 발생, 극초미세먼지, 기상 조건, 노출 위험성

※ 이 연구는 국립산림과학원 미세먼지 대응 도시숲 연구(R&D) 과제 (FE0100-2019-06-2022)의 지원으로 수행되었습니다.

[짧은구두4]

온실기체 측정 및 분석

서울 이산화탄소 배출량 검증을 위한 베이지안 인버스 모델 개발

심소정, 정수중, 오은실, 윤정민

서울대학교 환경대학원

한국을 포함한 125개 이상의 국가들은 기후 위기에 대응하기 위하여 2050 탄소 중립을 선언하였다. 탄소중립을 달성하기 위해서는 전 세계 온실가스 배출량의 70% 이상을 차지하는 도시의 배출량을 선도적으로 제한할 필요가 있다. 전 세계 도시 중 다섯 번째로 온실가스 배출량이 많은 서울의 대기 중 온실가스 농도 상승을 효과적으로 줄이기 위해서는 서울 내 이산화탄소 배출량을 정확히 산정하고, 탄소중립 정책 이행에 따른 배출량의 저감 평가를 지속적으로 실시하여야 한다. 하지만 현재 산정된 이산화탄소 배출량은 에너지 소비 통계자료의 제한된 활동도와 배출계수의 한계로 인해 불확실성이 높아 실질적인 탄소중립 감축 목표를 설정하기에 어려움이 있다. 또한 서울은 지형이 복잡하고 도심 내 지면 이용도가 다양하기 때문에 탄소저감 정책 이행에 따른 배출량의 시공간적 변화를 파악하는 것이 까다롭다. 이를 해결하기 위해 본 연구팀에서는 대기 관측기반 고해상도 베이지안 인버스 모델을 구축하여 서울의 최적화된 상세한 시공간적 이산화탄소 배출량을 2020 4월을 대상으로 산정하였다. 본 인버스 모델에는 3개 관측소에서 연속적으로 측정된 대기 중 이산화탄소 농도 자료가 사용되었으며, 고해상도의 배출량 자료, 대기 수송 모델인 WRF-STILT 모형이 활용되었다. 베이지안 인버스 모델을 통해 추정된 최적화된 이산화탄소 배출량 결과는 서울을 대상으로 1km 및 1시간의 고해상도의 시공간 해상도를 가진다. 구축된 베이지안 인버스 모델을 통해 서울 이산화탄소 배출량을 검증한 결과, 기존의 이산화탄소 배출량 값이 과대평가되었음을 밝혀냈다. 구축된 베이지안 인버스 모델은 서울의 이산화탄소 배출량을 정밀하게 검증하고, 탄소저감 정책 이행에 대한 객관적이고 과학적인 평가에 적극적으로 활용될 것으로 기대한다.

Key words: 도심 이산화탄소 배출, 베이지안 인버스 모델, 서울, 자료동화, 배출량 검증

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C3002868).

위성 관측을 이용한 발전소 CO₂ 배출량 산정 기술 개발

김연수¹, 정수종¹

¹서울대학교 환경대학원

2050년 탄소 순 배출량 0을 목표로 하는 탄소중립을 실현하기 위해 CO₂ 배출량을 정확하게 파악하는 것이 필수적이며, 특히 단위 면적 당 CO₂ 배출량이 많은 발전소, 열원 등 대형 배출원에 대한 모니터링이 중요하다. 우리나라는 대형 배출원에 대하여 매년 온실가스 배출량 명세서를 작성하여 보고하도록 규정하고 있지만 자료 제한, 미보고 혹은 누락 등으로 인해 이들 사업장에서 자체적으로 보고하는 통계 기반 배출량과 실제 배출량 간 차이가 발생할 수 있다. IPCC에서는 통계 기반 배출량의 한계를 인식하여 2019 개정 지침에서 이를 검증·보완할 수 있는 방법 중 하나로 대기 중 CO₂ 농도를 이용한 배출량 산정 방법을 제시하였다. 이러한 방법을 이용하여 CO₂ 배출량을 산정할 시 산정하고자 하는 배출원 규모에 적합한 수준의 해상도를 갖는 관측 자료가 요구되므로 이전까지는 위성 관측 자료가 제한적으로 활용되었다. 하지만 최근 위성 해상도가 크게 개선되면서 위성 관측 CO₂ 농도를 이용한 사업장 수준 CO₂ 배출량 산정 가능성이 확인되었다. 본 연구에서는 OCO-2(Orbiting Carbon Observatory-2) 위성의 관측 자료를 사용하여 사업장 수준에서 우리나라 대형 CO₂ 배출원의 배출량과 그 불확실성을 산정하였다. 이를 위해 먼저 배경 농도 대비 유의미한 농도 상승(enhancement)을 보였던 지역을 plume 후보로 선정하였다. 이후 모든 plume 후보에 대하여 위성 통과 시각의 풍속 및 풍향을 고려하여 CO₂ 배출량을 계산하였다. 배출량 산정 결과의 불확실성에는 위성의 관측 오차에서 비롯되는 불확실성, 풍속·풍향의 불확실성, 배경 지역 설정에서 발생하는 불확실성이 포함되었다. 또한, 본 연구에서 제시하는 산정 방법의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 자체 산정한 CO₂ 배출량을 일 단위로 제공하는 일부 배출원에 대하여 상호 비교를 수행하였다. 본 연구는 위성 관측 자료에 기반하여 우리나라 모든 지역에 일률적으로 적용할 수 있는 산정 방법을 제시했다는 점에서 의의를 가지며, 해당 방법을 적용할 경우 빠른 시일 내에 CO₂ 대규모 배출 현황을 파악할 수 있을 것이라 기대할 수 있다.

Key words: OCO-2, CO₂ 배출량, 대형 배출원, CO₂ plume

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C3002868).

도심 타워 관측을 활용한 이산화탄소 연직 변동 특성 분석

박채린¹, 정수종¹

¹서울대학교 환경대학원 환경계획학과

본 연구에서는 서울 중심부의 서로 다른 고도(113, 420 m)에서 측정된 이산화탄소 농도 자료를 활용하여 도시 대기의 수직적인 이산화탄소 농도 변화 특성을 평가하였다. 두 고도 사이의 이산화탄소 농도 차이(ΔCO_2)는 오전 7시에 19.9 ppm으로 최고 농도를 오후 4시에 3.9 ppm으로 최저 농도를 보이며 뚜렷한 일변동을 보였다. 대기 경계층 (planetary boundary layer; PBL)이 두 관측 고도 위로 높아지는 낮 시간에는 두 고도의 이산화탄소 농도가 매우 높은 상관관계($r=0.87$)를 보이고 ΔCO_2 가 작게 나타났다. 하지만, PBL이 낮아져 두 관측 고도 사이에 위치하는 밤 시간에는, 두 고도의 이산화탄소 농도 상관관계가 0.55로 급격하게 감소하고 ΔCO_2 가 증가하였다. 이러한 PBL 높이에 따른 ΔCO_2 변화 원인을 파악하고자, Weather and Research Forecasting - Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (WRF-STILT) 대기 수송 모델 시뮬레이션을 수행하였다. 모델 시뮬레이션 결과, PBL이 높게 위치하는 낮 시간에는 두 고도 모두 관측지 인근 도심 지역의 CO_2 농도를 관측하는 반면, 밤 시간에 PBL 위에 위치하는 관측지는 인근 지역이 아닌 외부에서 수송 되어온 공기의 CO_2 농도를 측정하는 것으로 나타났다. 즉, 밤 시간의 ΔCO_2 는 도심 내부와 외부의 CO_2 농도 차이를 의미한다. 이러한 밤 시간 ΔCO_2 특성을 활용하여, 인간 활동 감소로 CO_2 배출량이 줄어든 COVID-19기간 동안의 서울 내 CO_2 농도 변화를 평가하였다. 그 결과, 코로나 기간 동안 사회적 거리두기 정책이 시행됨에 따라 ΔCO_2 가 코로나 이전 26.5 ppm에서 최대 6.2 ppm까지 크게 감소한 것으로 나타났다. 이는 도심 연직 관측을 통해 도시의 CO_2 배출량 변화를 실시간으로 감시할 수 있음을 보여주며 추후 도심 연직 관측이 탄소 저감 정책 평가 등에 활용 될 수 있음을 시사한다.

Key words: 이산화탄소, 지상 관측, 대기 수송 효과, 대기 경계층, 대기 수송 모델

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C3002868).

서울 도시 대기 3차원 온실가스 모니터링

박하영, 정수종

서울대학교 환경대학원

화석연료 연소로 인한 대기 중 인위적인 CO₂ 농도의 증가는 기후변화를 일으키는 주된 원인이며 이를 저감하기 위한 노력이 시급하다. 이를 위해 온실가스 배출을 더욱 잘 관리하기 위해서는 국가 수준부터 지역 및 도시 수준까지 모든 공간적 규모에서 배출량을 모니터링 및 정량화하는 것이 필요하다. 한국은 2050년까지 탄소중립을 선언하였으며, 이번 겨울은 그 약속 이후 도시 대기 중 온실가스의 현황을 진단하는 첫해가 된다. 또한, 서울은 온실가스 배출량이 많은 대도시이며 기후변화 완화에 있어 중요한 역할을 할 수 있다. 따라서 본 연구는 2022년 2월 14일부터 2월 25일까지 12일의 기간 동안 서울의 온실가스에 대한 3차원 모니터링 캠페인을 진행하였다. 본 연구의 목적은 지상 고정 - 지상 모바일 - 항공기 - 위성용 이종 입체 관측 파이프를 시도함으로써 향후 정확한 입체 관측을 위한 사전 지식을 얻고자 한다. 캠페인 기간 동안 지상관측 분광계 장비인 EM27/SUN을 활용하여 서울 대도시의 대기 중 이산화탄소, 메탄 및 일산화탄소의 연직농도 (XCO₂, XCH₄, XCO)를 관측하였고, 이동식 관측을 통해 도심 지역의 CO₂와 CH₄ 농도를 파악하였다. 또한, 온실가스 농도를 넓은 분포로 실시간 측정이 가능한 항공관측과 위성의 집중 “타겟” 관측도 캠페인 동안 진행되었다. 본 연구를 통해 그동안 국내 온실가스 관측 위성의 부재로 파악하기 힘들었던 서울 도심 온실가스의 3차원 구조를 파악하여 온실가스 거동 메커니즘, 플룸탐지, 배출량 검증 등 다양한 연구에 활용하고 서울의 미래 온실가스 현황을 모니터링할 계획이다.

Key words: EM27/SUN, 모바일관측, 항공관측, 위성관측, 3차원 온실가스 모니터링

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2020002770001).

온실가스 모바일 플랫폼 기반 서울 도심 메탄 농도 진단

박정민, 정수중, 주재원, 장동영
서울대학교 환경대학원

다양한 기반시설이 존재하며 많은 인구가 거주하는 메가시티 서울은 2019년 국가 온실가스 인벤토리 기준 총 메탄 배출량의 9.77%(2,688.74Gg CO₂ eq)을 기여하고 있다. 이러한 서울시 메탄 배출량 정보는 실제 관측이 아닌 통계기반 인벤토리를 작성한 것이라 연간 총량을 추정하는데 유용하지만, 실제 대기 중 메탄의 농도 분포는 이해가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구는 도시 대기 중 메탄 농도 현황을 진단하기 위한 시작으로 전기차를 이용한 모바일 온실가스 관측 플랫폼을 개발하고 서울 도심 주요 지점에 대한 도로상 메탄 농도 측정을 진행하였다. 시범 모바일 관측은 2022년 1월부터 3월까지 총 21회 실시하였고 관측 시간은 오전 10시 30분부터 오후 4시 30분까지 이루어졌으며 서울시 8개 구 1,400km 이상 구간의 메탄 농도 데이터를 수집하였다. 서울시 주요 메탄 배출원으로 예상되는 노후주택·아파트·상가단지, 물재생센터, 발전소 및 지역난방시설, 대기오염물질 배출시설 등을 주요 관측 지점으로 선정하여 그 일대를 중심으로 관측을 진행하였다. 관측 결과, 관측지 인근 오염원이 없는 경우 2,000~2,200ppb의 메탄 배경농도를 보였다. 모바일 관측 경로 내 주요 배출원은 천연가스버스로, 약 500ppb 이상의 배출량이 관측되었으며, 국가 온실가스 인벤토리에서 이미 배출량을 산정 중인 물재생센터의 경우, 인접 도로에서는 3,000ppb 이상의 배출량이 관측되었다. 그 밖에 관측한 주요 배출원은 은마아파트단지, 무악주상복합단지, 코엑스·홈플러스 옥상주차장 환기구, 당인리 화력발전소 등이며, 배출원 주변은 배경농도보다 200~3,000ppb 높은 메탄 농도를 보여주었다. 본 메탄 모바일 관측을 통해 도시지역 내 국가 온실가스 인벤토리에 포함되지 않았거나, 정확한 배출량이 산정되지 않았던 배출원이 있음을 확인할 수 있었으며, 정확한 국가 온실가스 배출량의 산정을 위한 정밀한 온실가스 관측이 필수적으로 선행되어야 한다는 것을 보여준다.

Key Words: CH₄, 온실가스, 모바일 관측, 도심 메탄누출, 대기 메탄 농도 진단

※ 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C3002868).

EOF를 이용한 메탄 농도의 시공간 변화 분석

¹김나현, ¹김민중

¹명지대학교 환경에너지공학과

메탄은 주요 기후 변화 유발물질로 대기 중에서 이산화탄소에 이어 2번째로 높은 복사강제력을 지니고 있다. 메탄의 농도는 최근에도 매년 1% 이상씩 증가하고 있으며, 매년 최고치를 경신함에 따라 메탄 농도 증가의 위험성에 대한 인식도 높아지고 있다. 메탄은 긴 대기 중 잔류시간으로 인하여 배출뿐 아니라 여러 기상 요소 및 화학 과정이 메탄 농도분포에 영향을 미칠 것으로 생각되지만, 이에 관한 연구는 아직 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)의 메탄 재분석 자료와 통계적 분석 방법인 empirical orthogonal function (EOF)을 이용하여, 메탄의 시공간적 변동에 영향을 미칠 수 있는 주요 요인을 분석해 보고자 하였다. EOF의 분석을 앞서 CAMS 재분석 자료의 신뢰도 확인을 위하여 재분석 자료를 안면도에서 측정된 종합 기후변화감시 자료와 하와이의 관측자료와 비교하였다. CAMS 재분석 자료는 농도의 편차를 지니고 있었지만, 농도의 선형 증가 추세 및 연내 변동은 잘 모의하였다. EOF 분석을 진행하였을 때, EOF의 주요 모드는 배출의 영향 및 산화 과정에 따른 농도 변화 뿐 아니라 기상요인에도 큰 영향을 받는 것으로 분석되었다. 선형적인 메탄의 농도 증가 추이는 주로 배출의 영향이 큰 것으로 파악되었으나 세부적인 농도의 분포는 기상적 요인 크게 작용하는 것으로 분석 되었다. 추가적인 분석을 위하여 EOF의 주요 모드에 기상 변수를 회귀 분석하였으며, 메탄 농도는 미치는 대규모 기후변동에도 영향을 받는 것으로 파악되었다.

Key words: 메탄 농도, EOF 분석, CAMS, 시공간 변화 분석

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. NRF-2020R1C1C1008898).

PRISMA 위성의 초분광 영상 자료를 활용한 개별 메탄 배출원의 메탄 칼럼 농도 산정 알고리즘 최적화

이아름¹, 장동영², 김예인¹, 정수종^{1,2}

¹서울대학교 환경대학원 환경계획학과

²서울대학교 환경계획연구소

메탄은 천연가스(LNG) 사용, 농업, 쓰레기 매립 등의 활동 중에 발생하며, 이산화탄소보다 21배 높은 지구온난화지수를 갖는 주요 온실가스이다. 최근 전 세계적으로 주요 국가들이 ‘글로벌 메탄 서약’을 통해 2030년까지 2020년 대비 최소 30%의 메탄 배출량 감축을 계획하고 있어, 메탄 배출원의 상세한 모니터링이 필요한 시점이다. 이전 메탄 모니터링에 사용된 위성 자료들은 공간 해상도가 수 km로 좋지 않아 개별 메탄 배출원의 모니터링에 적용하기 어려웠다. 그러나 최근 30m 공간 해상도의 초분광 센서를 갖는 위성인 PRISMA의 등장으로 좁은 공간 범위 내 점 배출원(Point source)에 대한 메탄 배출량 관측 가능성이 보고된 바 있다. 본 연구에서는 PRISMA 위성을 활용하여 메탄 칼럼 농도 산출 알고리즘의 개발 및 최적화를 목적으로 한다. 알고리즘은 메탄의 흡수 파장대인 2210-2400nm에서 Iterative Maximum A Posteriori-Differential Optical Absorption Spectroscopy (IMAP-DOAS) 방법을 기반으로 작성되었으며, 대기 상단 반사도 자료를 활용하여 메탄 칼럼 농도를 산출한다. 이후 개별 메탄 배출원에 의한 메탄 플럼 탐지를 위해 픽셀 간 T-test와 가우시안 필터링이 사용되었다. 본 연구를 통해 산출된 높은 공간 해상도의 메탄 칼럼 농도는 추후 개별 메탄 배출원에 대한 배출량 산정 연구 시 기초 자료로써 활용될 예정이다.

Key words: 메탄, PRISMA, IMAP-DOAS

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2020002770001)

위성 자료 기반 한반도 대기 중 메탄 농도 분석

김예인¹, 정수중^{1,2}, 장동영², 주재원²

¹서울대학교 환경대학원

²서울대학교 환경계획연구소

메탄은 이산화탄소에 이어 두 번째로 중요한 온실가스로 효과적인 기후변화 대응을 위해서는 메탄의 흡수 및 배출 특성을 이해하는 것이 중요하다. 전 지구적으로 위성 관측은 한정된 지점에서의 지표관측을 보완하고 대기 중 메탄 분포를 파악하는 수단으로 주목받고 있다. 본 연구에서는 Greenhouse Gases Observing Satellite (GOSAT)와 TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) 위성 관측 자료를 이용하여 대기 중 메탄 농도의 시공간적 변동 특성을 분석하였다. 먼저 2009년부터 현재까지 지속적인 관측을 수행하고 있는 GOSAT 위성자료를 이용하여 메탄 장기 변동을 살펴보았다. 2010년부터 2020년까지의 한반도 장기 메탄 평균 농도는 1843.7 ppb이며, 연평균 8.34 ppb의 추세로 지속해서 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 동일 기간 동북아시아 지역의 평균 농도 1835.6 ppb보다 다소 높으며, 연평균 증가 추세 8.40 ppb와 비슷한 수준이다. 또한 GOSAT과 TROPOMI 위성 자료를 각각 활용하여 월별 평균 메탄 농도를 확인하였다. 이때 관측 수가 상대적으로 불충분한 여름철은 분석 기간에서 제외하였으며, GOSAT과 TROPOMI 모두 가을철 (9월, 10월, 11월) 평균 메탄 농도가 여름을 제외한 연 평균에 비해 13 ppb 가량 가장 높다는 공통점을 보였다. 나아가 TROPOMI 위성 자료를 통해 지역별 메탄 변동과 해당 지역 배출원과의 상관관계를 파악하고자 하였다. 본 연구는 대기 중 메탄의 특성을 이해하는 데에 위성 자료가 활용될 수 있음을 보여주며, 추후 구체적인 농도 분포 및 배출원 규명을 위해 지속적인 위성 관측 자료 개발 및 연구가 필요함을 강조한다.

Key Words: 온실가스, 메탄, 기후변화, 원격탐사, 인공위성

※ 본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 도시생태 건강성 증진 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다. (2020002770001)

2020-2021년 서울지역 오존 전량 돕슨(Dobson) 분광계 관측 결과 및 판도라(Pandora) 분광계, OMI 위성, MERRA-2 재분석장 비교

박민주¹, 구자호¹

¹연세대학교 지구천문대기학부(대기과학)

서울과 같은 중위도 도시 지역은 오존 전량 관측을 통해 오존량 변동 경향을 파악하고, 시민들의 야외 활동 시 오존량 주의 여부를 알릴 수 있다. 오존은 연직 방향으로 특징적인 분포를 보이는 기체이다. 연직 전량 중 90%를 차지하고 농도가 6-8ppm로 높게 나타나는 성층권 오존은 생성 및 소멸과정에서 태양 복사 중 생명체에 유해한 자외선A(320-400nm), 자외선B(280-320nm)를 흡수한다. 오존은 연간 태양 입사량이 높은 저위도 성층권에서 주로 생성되지만 브루어-돕슨(Brewer-Dobson) 순환에 의해 고위도로 수송되어 중위도 지역에서 높은 값을 보인다. 즉 성층권 오존량 변화는 기후와 연관을 가지므로 지속적인 추적이 필요하다. 대류권 오존은 주로 배기가스에 포함된 질소산화물(NOx), 휘발성 유기화합물(VOC)을 촉매로 하는 광화학 반응으로 생성된다. 오존 기체는 생명체에 산화제로 작용하기 때문에 대류권 오존 감시 또한 중요하다.

연세대학교 오존 관측소는 1984년부터 현재까지 돕슨(Dobson) 분광계를 이용해 오존 전량을 관측 중이며, 2004년 기상청 지구대기 감시위탁관측소로 지정되고 2012년 판도라(Pandora) 분광계가 추가되며 오존 전량 관측의 정확도를 높이고 있다. 2020-2021년 지상 돕슨, 판도라 관측 결과를 대기 상층으로부터 관측된 OMI¹⁾ 위성과 MERRA-2²⁾ 재분석장의 결과와 비교함으로써 현재 관측의 유효성을 검토해보고자 한다.

Key words: 오존, 분광계, 대기 감시, 브루어-돕슨 순환, 자외선

1) Ozone Monitoring Instrument

2) (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Application)