

특별세션 9 / 지구대기 입체감시 1

기상청 지구대기감시망의 장기간 주요 관측 특성 및 향후 발전방안

박기준, 김수민, 김영아, 고희정, 신대근, 양세환, 유희정, 이수정, 부준오, 이선란, 김상백

국립기상과학원 지구대기감시연구과

기후변화 대응을 위한 과학적 근거 마련에는 장기간의 신뢰성 있는 대기감시가 필수적이다. 우리나라 기상청은 1990년대 초반부터 안면도, 고산, 울릉도·독도 등에서 지구대기감시소를 운영하며, WMO/GAW(Global Atmosphere Watch) 네트워크에 참여하여 온실가스를 비롯한 36종의 대기 성분을 장기적으로 관측하고 있다. 이 관측망은 지상, 항공, 해상, 원격감시를 포괄하는 입체적 체계를 갖추며, 세계적으로 가장 조밀한 수준의 국가 기반 지구대기 감시 체계로 발전하였다.

장기간의 연속관측 결과, 한반도의 이산화탄소 배경농도는 2024년 안면도 430.7 ppm, 고산 429.0 ppm, 울릉도 428.0 ppm으로 관측 이래 최고치를 기록하였으며, 최근 10년간 증가율은 전지구 평균과 유사하거나 때로는 더 크게 나타났다. 메탄과 아산화질소, 육불화황 등 주요 온실가스 역시 동기간 모두 최고치를 경신하여 기후위기 심화의 명확한 증거를 제시하였다. 반면 에어로졸, 반응가스, 강수 산성도 등은 점진적으로 개선되는 추세를 보여, 대기질 관리 정책 효과가 일부 반영된 것으로 해석된다.

향후 발전방안으로는 △ 지구대기 입체감시망 구축 및 운영 효율화 △ 지구대기 감시물질 기원 추적 및 분석기술 고도화, △ 지구대기 감시 물질별 복사강제력 산정 및 신기술 개발, △ 지구대기감시자료의 제공 확대 추진 및 국내외 협력, △ 지구대기감시 인력 양성 및 교육확대가 요구된다. 이를 통해 글로벌 기후변화 대응의 과학적 기반을 제공할 수 있을 것이다.

Keywords: 지구대기감시, 온실가스, 장기 관측, 기후변화, 발전방안

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “기후변화 입체감시 기술개발(KMA2018-00324)”의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 9 / 지구대기 입체감시 2

광주 지구대기위탁 관측소에서 에어로졸 특성 연구

조형진, Nauyryzbay Aslan, 박기홍

광주과학기술원 환경에너지공학과

에어로졸은 대기질과 인체 건강, 그리고 기후에 직간접적인 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나이다. 특히 100 nm 이하의 에어로졸은 호흡기 깊숙이 침투할 수 있어 건강 위해성이 높으며, 광학적·화학적 과정에도 기여한다. 이러한 이유로 국내 주요 거점에서의 체계적인 관측이 필요하다. 본 연구에서는 광주 지구대기위탁 관측소에 구축된 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)를 활용하여 에어로졸의 입경분포와 수농도 특성을 장기적으로 관측하였다. 이를 통해 도시 대기환경에서 에어로졸의 장기적 변동성과 기후변화 영향을 규명하고자 하였다.

관측 자료는 2020년 부터 2024년 까지 광주 지구대기 위탁 관측소에서 연속적으로 측정하였다. Reg-SMPS은 10 nm에서 400 nm까지의 입자 크기별 수농도 분포를 측정하며, DMA(Differential Mobility Analysis)(Model 3081, TSI, USA)와 응축 입자 계수기(Condensation Particle Counter, CPC)(Model 3788, TSI, USA)로 구성되어 있다. 관측 지점은 대한민국, 광주광역시에 있는 광주과학기술원(Gwangju Institute of Science and Technology, GIST) 캠퍼스 (35.13°N and 126.50°E)에 있다. 이 부지는 주거, 상업, 농업 지역으로 둘러싸여 있으며, 동쪽으로 약 1.8km 지점에 호남고속도로가 위치하고 있다.

광주 지구대기 위탁 관측소에서 관측된 결과, 2024년에 관측된 월별 총수농도(10-400nm)는 $4102 \pm 2812 \text{ \#/cm}^3$ 으로 최근 4년 (2020-2023년)의 월평균 ($4755 \pm 3167 \text{ \#/cm}^3$)에 비해 1월, 12월을 제외하고 모두 비슷하거나 낮았다. 2020년부터 2024년 월평균 10-25nm (Nucleation mode) 에어로졸 입경별 수농도는 광화학반응이 활발한 봄-여름에 높으며, 100-400nm (Accumulation mode) 에어로졸 수농도는 겨울에 높고 여름에 낮았는데, 이는 겨울철 높은 2차 배출 장거리 이동 에어로졸의 영향을 받은 것으로 보인다. 입경별 수농도 분포를 보았을 때, 전체적으로 bimodal distribution이 관측되며, nucleation mode 입자의 경우 기체-입자 변화에 의한 2차 생성이 중요한 역할을 한 것으로 보이고 accumulation mode 입자의 경우 1차 배출 입자와 성장한 2차 생성 입자로 구성되어 있다고 판단된다. 본 연구는 광주 지구대기위탁 관측소의 reg-SMPS 장기 관측 자료를 활용하여 에어로졸의 특성과 발생 메커니즘을 규명한 사례로, 향후 장기적이고 지속적인 관측 기반 연구의 중요성을 강조한다.

Keywords: 에어로졸, 입경별 수농도 분포, 도심

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-2468318)

특별세션 9 / 지구대기 입체감시 3

라디오미터 지상 관측을 통한 한반도 중심의 성층권 오존층 및 수증기 연직분포 자료 분석

가수현¹, 오정진²

¹숙명여자대학교 지구환경연구소

²숙명여자대학교 화학과

지구대기감시는 다양한 관측 장비 운영을 통해 생산되는 관측 자료의 축적과 분석, 활용이 필수적이며, 장기적 자료의 축적과 실시간 감시 체계 운영은 미래 기상기후 예측의 정확성을 높이는 데에도 일조한다. 특히 다양한 관측 장비 운영간의 상호보완적 관계는 검증시스템을 통해 정확한 관측 자료를 산출하게 함으로써 지구대기감시의 정확성이 향상되는 결과를 기대할 수 있다. 연직분포 관측에 특화된 장비 중 하나인 라디오미터는 대기 중 분자에서 방출되는 전파를 수신하는 형태의 수동 관측 형태로 운영되며, 지상, 항공, 위성에 탑재되어 기상 및 기후관측 자료를 생산하고 있다.

국내에서도 성층권 이상의 고도에 분포하는 오존과 수증기의 연직분포 감시를 위해 라디오미터가 활용되고 있다. 본 연구에서는 숙명여자대학교에서 다년간의 국가연구개발사업을 통해 개발한 성층권 오존 연직분포 관측용 110 GHz 라디오미터와 성층권-중간권 수증기 연직분포 관측용 22 GHz 라디오미터를 소개하고, 라디오미터 관측 운영 방법과 이 장비로부터 관측한 지난 10여 년간의 오존과 수증기 연직분포 변동 자료를 제시하였다.

라디오미터로부터 관측되는 오존 및 수증기의 분포는 고도 60 km의 분자 농도까지 관측할 수 있으며, 이는 기존존데의 고도 상한인 30 km를 초과한다. 따라서 대기 분자가 장기간 잔존하는 성층권 이상의 고도까지의 고도별 농도 분포 변화를 분석할 수 있으며, 지구 대기의 구조를 고도별로 세분화하여 입체적으로 분석할 수 있다. 라디오미터의 출력 신호를 대기 전파 스펙트럼으로 변환하기 위해 실온보정체와 액체 질소를 이용한 전파 보정 및 티핑커브보정을 통한 전파 처리를 수행하여 기상환경에 의한 스펙트럼 영향을 보정하였다. 주파수 변환 과정이나 분자 운동으로 인해 나타날 수 있는 방출주파수 이동을 관측 스펙트럼 피팅을 통해 보정하여, 산출 정확성을 향상시켰다.

Keywords: 오존층, 수증기, 연직분포, 마이크로파, 라디오미터

특별세션 9 / 지구대기 입체감시 4

플릭스 관측 기반 머신러닝 기법을 활용한 CO₂ 시비 효과 정량화

박주한¹, 강민석², 손승원¹, 조성식¹, 이승협¹, 이승훈¹, 천정화³

¹국가농림기상센터

²국립강릉원주대학교 대기환경과학과

³국립산림과학원 산림생태연구과

인간 활동으로 인한 대기 중 이산화탄소(CO₂) 농도의 지속적인 증가는 육상생태계의 총일차생산성(GPP; Gross Primary Productivity)을 증가시켜 높여 탄소 흡수량을 높일 수 있다. 이러한 현상은 CO₂ 시비 효과(CFE; CO₂ Fertilization Effect)로 불리나, 실제 관측된 GPP 증가는 기상 조건의 변화 등 다른 요인의 영향을 동시에 받기 때문에, CO₂ 농도만의 순수한 기여도를 정량화하기 어렵다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 기상청 기후변화감시 위탁관측소인 광릉활엽수림 플릭스타워(GDK)에서 2006년부터 2024년까지 수집된 30분 단위 에디공분산 GPP 자료와 기상 변수(하향단파복사량, 포차(VPD), 기온, 강수량) 및 임관 상부 CO₂ 농도 관측 자료를 통합하여 관측 자료 기반의 가상 실험 접근법을 적용하였다. 이를 위해 기상 변수와 CO₂ 농도를 입력 변수로 사용하는 GPP 예측 기계학습 모델을 개발하고, 이를 기반으로 모든 기상 변수는 유지한 채 CO₂ 농도만 관측 첫해인 2006년 수준으로 고정한 입력자료를 통해 CO₂ 농도 증가가 반영되지 않은 가상의 GPP(GPPclimatic)를 산출하였다. 이후 GPPclimatic과 실제 관측된 GPP와의 차이를 이용하여 CO₂ 농도의 독립적인 기여도를 분리하였다. GDK에서 관측된 대기 CO₂ 농도는 10년당 약 22 ppm 속도로 증가하고 있었으며, 모델 분석 결과 관측된 CO₂ 농도 범위(~372 ~ 442 ppm)에 걸쳐 GPP가 CO₂ 농도 증가에 비례하여 증가하고 있음을 확인하였다. 분석된 CFE는 $3.6 \times 10^{-4} \text{ mgCO}_2\text{ppm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 으로 나타났으며, 이는 연간 대기 중 CO₂ 농도가 약 2.2 ppm 증가할 때 연간 GPP가 약 6.8 gC m⁻² 증가함을 의미한다. 실제 연간 총 GPP 대비 CFE의 기여분은 -1%에서 4% 수준으로 나타났으며, 이러한 CFE 연간 변동성에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구는 장기 플릭스 관측과 CO₂ 농도 관측 자료의 통합 분석을 통해, 기후변화에 따른 생태계의 반응을 정량적으로 이해하는 데 기여하며, 다차원 관측 기반 연구의 중요성을 강조한다.

Keywords: CO₂ 시비 효과, 총일차생산성, 플릭스 관측, 기계학습모델, 기상-CO₂ 영향 분리 분석

※ 이 연구는 국립산림과학원의 “산림 장기생태 빅데이터를 활용한 산림생태계 온전성 평가 기술 개발”의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 9 / 지구대기 입체감시 5

WMO IG³IS 이행을 위한 온실가스 기원추적 시스템(INVERSE-KOREA) 개발현황 및 계획

신대근¹, Samuel Takele Kenea¹, 서원익¹, 홍진규², 권도윤², 구본훈², 김수민¹, 김상백¹

¹국립기상과학원 지구대기감시연구과
²연세대학교 대기과학과

국립기상과학원은 정밀하고 체계적인 온실가스 관측을 기반으로 30년 이상 대기 중 온실가스 농도 변화를 지속적으로 감시해 오고 있다. 최근에는 기상항공기, 기상관측선, 고층 타워 등 플랫폼을 확대하여 온실가스 입체관측망을 구축하였으며, 나아가 세계기상기구(WMO: World Meteorological Organization) Integrated Global Greenhouse Gas Information System(IG3IS, 통합 전지구 온실가스 과학 정보시스템) 프로젝트에 참여하여 한반도의 온실가스 배출, 흡수를 이해하고 기후위기 대응을 위한 과학적 근거자료를 마련하는 연구를 수행하고 있다. IG3IS는 대기수송모델 및 대기 중 온실가스 농도 관측자료를 기반으로 기존의 인벤토리 기반 상향식 배출정보를 상호 보완할 수 있는 하향식 온실가스 분석 시스템을 의미한다. INverse modelling for Validating and Evaluating of the Reduction of Sectoral greenhouse gas Emissions in KOREA(INVERSE-KOREA) 시스템은 WMO IG3IS와 연계된 국립기상과학원의 온실가스 분석 시스템으로, Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry(WRF-Chem) 대기화학모델과 Data Assimilation Research Testbed(DART) 자료동화 플랫폼을 기반으로 우리나라의 세 개 WMO GAW 감시소(안면도, 고산, 울릉도)에서 관측한 고정밀의 온실가스 농도자료를 활용한다. INVERSE-KOREA는 한반도 도메인의 고해상도(9 km) 격자형 온실가스 농도 분석장과 함께 하향식으로 분석된 온실가스 배출 정보를 제공한다. INVERSE-KOREA 모델은 '23년 이산화탄소, 메탄, 육불화황을 분석하기 위한 원형모델 개발이 완료된 이후 계속해서 모델 개선 및 평가를 진행하고 있다. 최근에는 모델 지형정보 및 Vegetation Photosynthesis and Respiration Model(VPRM) 테이블, 물리모수화 설정, 기상정보 자료동화 최적화 등에 대한 개선이 수행되었다. 국립기상과학원은 향후 지속적인 모델 개선 및 타 역모델링 시스템들과의 비교실험을 기반으로 온실가스 분석정보에 대한 신뢰성을 확보해 나갈 계획이다. 또한 최근 WMO에서 적극 추진 중인 Global Greenhouse Gas Watch(G3W, 전지구 온실가스 감시) 프로젝트를 지원하고, 국가 탄소중립 정책 수립을 위한 과학적 정보를 제공하고자 한다.

Keywords: 온실가스 기원추적 시스템, INVERSE-KOREA, 역모델링 시스템, WRF-Chem/DART, 온실가스 배출·흡수 정보

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상업무지원기술개발연구」 “기후변화 입체감시 기술개발(KMA2018-00324)”의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 9 / 지구대기 입체감시 6

한반도 기후변화감시 통합관리체계 발전 방안

이진아, 정윤선, 백선균, 김현경

기상청 기후과학국

「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」이 2024년 10월에 시행되었고, 범국가적으로 기후위기 대응을 위한 다양한 정책·연구가 활발히 추진되고 있다. 이에 기상청은 국가 기후변화감시·예측의 총괄 기관으로서의 역할을 강화하고, 한반도 기후변화감시 통합관리체계를 새롭게 마련하고자 한다.

첫째, 내륙 지구대기감시소 신설이다. 현재의 지구대기감시망은 안면도·제주고산·울릉도독도·포항 등 해안지역과 동해에 편중되어 있어, 한반도 내륙의 기후변화 특성을 충분히 반영하기 어렵다. 이를 보완하기 위해 추풍령 관측소를 활용하여 안면도 수준의 관측 인프라를 갖춘 내륙 지구대기감시소 설립을 추진하고 있다. 특히, 산·학·연 협력을 통해 내륙특화 관측요소를 발굴·적용함으로써 기존 관측망의 한계를 보완하고, 한반도 지구대기감시 역량을 한층 강화할 예정이다.

둘째, 지구대기감시 위탁관측소 운영체계 개선이다. 기존의 7개 위탁관측소를 조정·확대하고, 운영 효율성을 제고하여, 각 관측소에서 생산되는 자료의 품질과 활용도를 높이는 방향으로 개편을 추진하고자 한다.

셋째, 국가 기후변화감시 통합관리체계 구축이다. 이를 위해 기상청뿐 아니라 타 부처와 연구기관에 산재된 대기·해양·지표 분야의 감시자료를 수집·분석·가공하여 공동 활용할 수 있는 통합 플랫폼을 마련하고자 한다. 또한, GCOS(Global Climate Observing System, 전지구기후관측시스템) ECV(Essential Climate Variable, 핵심기후변수) 개념을 참고하여, 한반도 실정에 적합한 '한국형 핵심기후변수(K-ECV)'를 지정·관리함으로써 감시자료의 체계적 생산과 활용 기반을 구축할 계획이다.

이러한 한반도 기후변화 입체감시체계의 발전을 위해, 정부부처·기관이 참여하는 '국가 기후변화감시 협의체'와 민관학연 전문가 및 정보 수요자가 참여하는 '기후변화감시정보 수요자 협의체'를 구성·운영하여 협력과 소통을 강화할 예정이다.

Keywords: 기후변화감시, 지구대기감시, 핵심기후변수