

우리나라 기후변화감시소 대상 온실가스 기원추적 연구

김재민¹, 박선주², 신호연², 이윤곤²

¹충남대학교 자연과학연구소

²충남대학교 지구환경·우주융합학과

온실가스는 지구온난화 및 기후변화를 유발하는 주요 원인 중 하나로, 주요 온실가스인 이산화탄소(CO₂)는 화석연료의 연소, 산업공정 등에서 주로 발생하며 긴 체류시간으로 대기 중 농도가 지속적으로 증가하고 있다. 대기 중 이산화탄소 농도의 시공간적 변화를 이해하고 탄소 배출 저감을 위한 지역 정책 수립을 위해 인위적인 CO₂ 배출이 CO₂ 농도 상승에 미치는 정량적인 기여를 파악하고 CO₂의 기원 지역을 추적하는 것은 중요한 연구 주제 중 하나이다. 본 연구에서는 STILT 모델(라그랑지안 수송 모델)과 EDGAR의 인위적 CO₂ 배출량 자료를 이용하여 우리나라 기후변화감시소를 대상으로 온실가스 기원추적 연구를 진행하였다. STILT 풋프린트 및 배출량 자료를 기반으로 지역별 기여도를 정량화 하였으며, 지역 기여도에 따른 대기 오염물질과 온실가스 사이의 비율 차이를 이용한 온실가스의 기원지역 추정 가능성을 평가하였다. 온실가스의 배출이 기후변화의 주요 원인으로 지목되고있는 가운데 본 연구결과는 우리나라 온실가스 농도 변화의 원인 파악 및 기후변화 감시에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

Key words: 온실가스, STILT, footprint, 배출량

※ 이 연구는 국립기상과학원의 “온실가스 통합활용 및 기원추적 시스템 개발” 사업의 지원으로 수행되었습니다.

비상의 표준화된 보편적 이중 모멘트 방안 적용이 여름철 강수 사례 모의에 미치는 효과

조중현¹, 박선영¹, 임교선^{1,2}, 방원배¹, 이규원^{1,2}

¹경북대학교 대기과학과 BK21 위험기상 교육연구팀

²경북대학교 대기원격탐사연구소

Weather Research and Forecasting (WRF) Double-Moment 6-class (WDM6) 구름 미세물리 모수화 방안은 벌크형 방안으로 감마 함수를 이용해 입자 크기 분포를 나타낸다. 이러한 벌크형 구름미세물리 모수화 방안은 계산 시간의 효율성 측면에서 장점을 가지고 있어 현업 및 연구에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 WDM6 내 비상에 대해 표준화된 보편적 이중 모멘트 방안을 적용한 새로운 방안을 개발하고 수치모델 적분을 수행함으로써 강수 모의를 평가하였다. 새롭게 적용된 표준화된 보편적 이중 모멘트 방안은 입자크기분포의 변동성을 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 개발된 WDM6 방안을 검증하기 위해서 2018 ~ 2019년 여름철 보성 지역에서 관측된 형태 매개변수 값을 모델에 처방하여 한반도에서 발생한 여름철 강수 사례에 대한 수치 실험을 수행하였다. 2013년 8월 6일 여름철 강수 사례에 대해 모의한 결과 기존 WDM6 방안에서 나타난 누적 강수의 공간 분포 모의 문제점이 새로운 WDM6 방안에서 개선됨을 확인하였다. 또한 5개의 강수 통계 점수 (Root Mean Square Error, Bias, Probability of Detection, False Alarm Ratio, Equivalent Threat Score)가 모두 향상됨을 확인하였다. Contour Frequency Altitude Diagram(CFAD) 분석 결과 새로운 WDM6 방안에서 약한 반사도 모의 빈도가 증가함으로써 레이더 관측과 유사한 결과를 나타냈다. 또한 대기 수상 분석을 통해 새로운 WDM6 방안에서 대기 중 비상의 혼합비가 증가하고 직경이 작아짐을 확인하였다. 추가적인 비상에 대한 상세미세물리 버짓 분석을 통해 대기 하층에서 강수 입자 증발과정에 의한 냉각효과가 새로운 WDM6 방안에서 증가함으로써 모의되지 말아야 할 대류를 억제함을 확인하였다. 이로 인해 새로운 WDM6 방안이 관측과 유사한 강수 분포를 모의함이 분석되었다. 추가적으로 비상의 증발에 의한 냉각의 효과를 제거한 민감도 실험을 통하여 하층 냉각의 효과가 비상의 증발에 의해 나타남을 확인하였다.

Key words: WRF, WDM6, 입자크기분포, 형태매개변수, 증발

※ 이 연구는 기상청 위험기상 선제대응 기술개발사업 (RS-2023-00240346) 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS-2023-00208394)의 지원을 받아 수행된 연구임.

WRF 모델의 해상도와 초기 및 경계 조건이 인천국제공항 주변 하층 기상장 예측에 미치는 영향

도유정¹, 임교선^{1,2}, 김기병¹, 신혜음³, 장은철⁴, 이규원^{1,2}

¹경북대학교 대기과학과 BK21 위험기상 교육연구팀

²경북대학교 대기원격탐사연구소

³미국국립대기연구센터

⁴공주대학교 대기과학과

인천국제공항은 대한민국에서 가장 큰 공항이며 2020년에는 아시아에서 국제 여객 수 1위를 기록하였다. 기상 요소 중 바람과 시정은 하층 항공 운항에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 알려져 있으며, 항공기의 이륙 및 착륙 시 정확한 바람장을 모의하는 것이 항공기 운항의 안전을 위해 중요한 요소이다. 한편 전지구 규모 모델의 예측장은 지역 규모 수치 모델의 초기 및 경계 조건으로 사용되며 이러한 초기 및 경계 조건은 모델의 예측 성능에도 영향을 미친다.

본 연구는 수치예보 모델의 초기 및 경계 조건과 수평 해상도가 인천국제공항 주변의 평균적인 하층 기상장 예측에 미치는 영향을 2-m 기온, 2-m 수증기 혼합비, 그리고 10-m 풍속을 중심으로 분석하였다. 지역 규모 실험과 고해상도 large-eddy simulation (LES)을 위해 Weather Research and Forecasting (WRF)를 사용하였다. 모델의 초기 및 경계 조건으로는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Global Forecast System (GFS)와 한국형 수치예보모델 Korean Integrated Model (KIM)에서 생성한 6시간 간격의 예측장을 사용하였다. 수치 모의 실험은 2021년 4월 한 달 동안 매일 00 UTC에 시작해 24시간 동안 수행하였다. 인천국제공항이 위치한 영종도 주변의 지상기상관측 및 종관기상관측 자료와 수치 모델의 모의 결과를 비교하였을 때 지역 모델이 전지구 모델의 예측장보다 2-m 기온, 2-m 수증기 혼합비, 그리고 10-m 풍속의 평균 시계열을 더 효과적으로 모의하는 것으로 나타났다. 또한, 100-m 격자 간격의 LES 실험은 주간 동안 1-km WRF에 비해 더 높은 2-m 수증기 혼합비와 더 낮은 10-m 풍속을 모의함으로써 모델이 모의한 시계열과 관측 시계열 간의 상관 관계가 저하되었다. 한편, 100-m LES는 해양에 인접한 관측소의 2-m 기온 및 육지에 위치한 관측소의 2-m 수증기 혼합비 시계열과 하층 기상장의 확률 밀도 함수에 대해 1-km WRF보다 더 관측에 가까운 결과를 보였다. 또한 특정 관측소의 값과 고해상도 모델 결과를 비교할 때 하층 기상장의 높은 공간 변동성으로 인해 주의가 필요함이 본 연구를 통해 분석되었다.

Key words: WRF, KIM, GFS, 초기 및 경계 조건, 수평 해상도

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2023-00208394).

국내 에어로졸 지상 원격 탐사 관측: 장기간 변화와 에어로졸 유형별 분포 분석

장성현¹, 엄준식^{1,2,3}

¹부산대학교 BK21 지구환경시스템 교육연구단, 지구환경시스템학부 대기과학전공

²부산대학교 대기환경과학과

³부산대학교 환경연구원

에어로졸은 자연적 원인 및 산업 활동 등과 같은 인위적 원인으로 발생하며, 대기 중 액체 및 고체 형태로 존재한다. 다양한 크기의 에어로졸은 물리적, 화학적 반응에 따라 화학적 조성이 변화하여 지구 기후에 영향을 미치며, 이에 대한 불확실성을 줄이기 위해 에어로졸 특성의 이해가 중요하다. 이를 위해 지상 기반 원격 탐사 방법들이 사용되며, 특히 선포도미터를 활용한 Aerosol Robotic Network (AERONET) 등이 대표적으로 널리 활용되고 있다. AERONET 관측 지점은 전 세계적으로 분포해 있으며, 국내에서도 2022년까지 총 43개의 관측 지점에서 자료를 산출하였다. 일부 관측 지점은 단기간만 운영되어 현재는 자료를 산출하고 있지 않지만, 20년 이상의 자료가 축적되어 있어 국내 에어로졸의 장기적인 추세 분석이 가능하다. 또한, 행정구역 별로 분포한 관측 지점을 통해 지역별 분석도 가능하다. 이와 더불어, 에어코리아에서 제공하는 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도 측정 자료가 각각 20년 이상과 8년 이상 축적되어 있어, 국내 에어로졸 광학 깊이(Aerosol optical depth; AOD)와 PM(PM₁₀과 PM_{2.5}) 농도의 변화 및 상관관계 분석이 가능하다. 현재 국지적인 범위에서 에어로졸 유형 분류 및 분포에 관한 연구는 활발히 이루어졌지만, 전국적인 분석은 상대적으로 부족하여 전국 및 지역별 에어로졸 유형 분류와 분포에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 2022년까지 국내에서 산출된 AERONET version 3 level 2.0 직접 산출 자료와 역산출 자료의 시공간적인 분포를 분석하였으며, 직접 산출 자료와 에어코리아의 PM 자료를 사용하여 전국 및 지역별 AOD와 PM 질량농도의 장기적인 추세 및 상관관계를 분석하였다. 또한, AERONET version 3 level 2.0 역산출 자료를 사용하여 Schmeisser et al. (2017)의 분류 방법을 적용함으로써 국내 전역과 지역별 에어로졸 유형을 분류하고 유형별 분포를 분석하였다. 그 결과로 국내 AERONET 자료는 봄철과 서부권(수도권, 충청도, 전라도)에 자료가 더 많은 시공간적으로 불균형한 분포를 보였다. 연평균 AOD와 PM 질량농도는 감소하는 추세를 보였으며, 이들 간에 통계적으로 유의미한 관계가 있음을 확인하였다. 또한, 국내 에어로졸은 주로 블랙 카본 및 블랙 카본과 혼합된 유형이 분포하였으며, 입자 크기가 작고 흡수성이 낮은 에어로졸도 상당히 분포하는 특징을 보였다.

Key words: 에어로졸, AERONET, 장기간 변화 추세, 에어로졸 유형별 분포

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부(NRF-2020R1A2C1013278), 교육부(No. 2020R1A6A1A03044834)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다.

ICE-POP 2018 자료를 이용한 나뭇가지형 강설 입자 성장층과 상승기류에 의한 강설 미세물리 과정 규명

정지혜¹, 김권일², 이정은¹, 이규원¹

¹BK21 위험기상 교육연구팀, 대기과학과, 대기원격탐사연구소, 경북대학교

²스토니브룩대학교 해양대기과학부

나뭇가지형 강설 입자 성장층(Dendritic growth layer, DGL)은 얼음과 물 사이의 포화 수증기압 차이가 최대가 되는 약 -15°C 근처의 영역으로, 강설 입자 성장에 중요한 역할을 한다. DGL에서 나뭇가지형 입자의 급격한 성장은 잠열 방출에 의한 상승기류, 부서지기 쉬운 구조로 인해 1차(Primary ice production, PIP) 또는 2차 얼음 생산(Secondary ice production, SIP)을 활성화시킨다. 하지만 미세물리 과정은 복잡성으로 인해 모델 내에서 표현하는 데 한계가 있고, 이는 강수 예측 성능을 떨어뜨리는 원인이 된다. 최근 이를 극복하기 위해 레이더 도플러 스펙트럼 분석 기술을 활용한 강설 미세물리 과정 규명 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 ICE-POP 2018(International Collaborative Experiments for Pyeongchang 2018 Olympic & Paralympic winter games) 동안 관측된 W-밴드 구름 레이더, Ka/Ku-밴드 이중편파레이더, 레윈존데 자료를 활용하여 DGL과 상승기류에 의한 강설 미세물리 과정을 상세히 분석하였다.

이중편파변수를 통한 강설 미세물리 분석을 위해 기둥형 연직 프로파일(Columnar vertical profile, CVP)을 생성하여 온도에 따른 CFAD(Contoured frequency by altitude diagram) 분석을 수행하였다. DGL 내 반사도 증가, 차등반사도와 비차등위상차 최대값, 교차상관계수 최소값은 강설 입자의 빠른 성장과 작은 침상형 입자의 생성을 반영하였다. 얼음 생성 및 성장 과정 상세 규명을 위해 쌍봉(bimodal)형 도플러 스펙트럼에서 기 생성되어 빠르게 낙하하는 입자(fast node)와 새로 생성되어 느리게 낙하하는 입자(slow node)를 구분한 후, 쌍봉형 도플러 스펙트럼이 깊은 층, 얇은 층, 두 개의 층을 가지는 기간으로 나누어 분석하였다. 깊은 층 사례는 상승기류가 약하고 액체수경로(Liquid water path, LWP)가 높은 환경에서 강설 입자가 상고대화(riming)에 의해 성장하였다. 얇은 층 사례에서는 상대적으로 상승기류가 강하고 LWP가 낮은 환경에서 부착 과정이 우세하였다. 두 개의 층을 가진 기간에는 DGL에서 입자가 새로이 생성되어 상고대화 및 부착에 의해 성장한 후, 상고대화 파열(rime splintering)에 의한 2차 얼음 생성이 주요한 온도층($-8\sim-3^{\circ}\text{C}$)에서 다시 새로운 입자가 생성되었다. 결론적으로 본 연구에서는 이중편파변수와 도플러 스펙트럼 분석을 통해 새로운 입자의 생성과 강설 입자 성장에 관한 미세물리 과정을 파악하였다.

Key words: 강설 미세물리, 얼음 생성, 상승기류, 이중편파레이더

※ 이 논문은 2022학년도 경북대학교 국립대학육성사업 지원비에 의하여 연구되었음

고해상도 격자 기반 재생에너지 잠재량 예측 모델 및 분석

김창기¹, 윤창열¹, 김진영¹, 김현구²

¹한국에너지기술연구원 신재생빅데이터연구실

²한국에너지기술연구원 재생에너지연구소

기후 변화 대응과 탄소 중립 목표 달성을 위한 에너지 전환은 전 세계적인 과제가 되었다. 특히, 기업과 국가가 RE100 캠페인에 동참하며 재생에너지 사용 비율을 높이려는 움직임이 활발해지는 상황에서 국가 차원의 재생에너지 보급을 효과적으로 추진하기 위해서는 신뢰성 있는 잠재량 분석과 그에 기반한 정책 수립이 필수적이다. 본 연구는 이러한 배경에서 국내 재생에너지 보급 및 정책 수립을 위한 기초자료로서, 국내 전 지역을 1km×1km 격자화하여 재생에너지 원별로 잠재량 산정 방법론을 개발하였다. 다만, 태양광과 풍력 발전이 국내 재생에너지에서 높은 비율을 보이고 있어 이 두 에너지원에 대해서 발표하고자 한다. 이 방법론은 위치별 지리정보(향, 경사, 고도)와 자원량(일사량), 토지활용도, 설비설치 가능면적 등의 데이터를 기반으로 각 격자별 에너지 생산성과 경제성을 분석하는 데 중점을 두었다. 이를 통해 복잡한 현실 조건을 단순화하면서도 한국의 실제 상황을 반영한 표준 데이터베이스를 구축하였다. 특히, 태양광 및 풍력 에너지의 잠재량을 산정하여 국가 신재생에너지 보급 정책의 합리적인 목표 설정에 기여하고자 하였다. 예를 들어, 풍력 발전의 경우 백두대간 보호구역, 경사도, 국토환경성평가지도 등 다양한 지리적, 환경적 요소를 고려한 시뮬레이션 분석을 통해 현실적인 잠재량을 평가하였다. 이러한 분석 결과는 11차 전력수급기본계획에 반영될 예정이며, 환경 규제, 기술 진보, 지원 정책 등의 요인을 종합적으로 고려하여 더욱 정확한 시장 잠재량을 제시할 것이다. 또한 격자 연산 방법론은 신재생에너지 시장 잠재량 산정의 객관성을 높이고 정책 활용성을 증대시키는 데 기여할 것으로 기대된다. 또한, 향후 경제성에 영향을 미치는 추가 요인들과 세부적인 지리정보의 보완을 통해 더욱 정교한 잠재량 분석이 가능할 것이다.

Key words: 재생에너지, 잠재량, 태양광, 풍력

※ 본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업 (C4-2423)으로 수행한 결과입니다.