오존존데 관측 기반 한반도 여름철 오존 연직 분포 특성 분석

구자호[1], 김상준[1], 나성균[1], 김주완[2], 강현규[2], 박진수[3]

[1]연세대학교 대기과학과
[2]공주대학교 대기과학과
[3]국립환경과학원

현재 한반도 대기환경 상황 중 가장 심각한 문제 중 하나는 대류권 오존에 대한 것으로서 오존 농도가 지표에서 너무 높게 나타나고 있으며, 그것이 지표를 넘어 자유대류권(free troposphere)에서도 미국의 환경 기준치 이상 수준의 높은 수치를 보인다는 점, 그리고 그 오존 농도가 계절에 무관하게 대부분의 지역에서 지속적으로 증가 추세를 보이고 있다는 점을 꼽을 수 있다. 특히 여러 대기화학 모델링 실험에서 인위적인 배출량을 모두 제거한 상황에서도 동아시아 지역, 특히 한반도 지역의 오존 농도가 매우 높은 특징을 보이고 있음이 드러나 배경 농도 자체가 높은 수치를 보이고 있다는 점이 기이하게 여겨지고 있다. 이 원인은 안타깝게도 아직 명확하게 이해되지 못하고 있는 상황으로서 대기화학적으로는 최근 그 비중이 늘어나고 있는 질산염과 관련한 화학과정으로 일부 설명하고 있지만 아직 그 설명이 충분하지는 못한 상황이다. 본 연구는 대류권 오존의 가장 근원이 되는 성층권 오존의 침투 현상이 한반도 지역 오존의 고농도에 영향을 줄 수 있는 가능성에 초점을 두고 오존존데 관측을 통해 어떤 유의미한 특성을 찾을 수 있을지를 살펴보았다. 2021년과 2022년 여름을 대상으로 하였으며 장마가 끝난 7-8월 대상으로 안면도, 오산, 포항 지역을 중심으로 총 77개의 오존존데 관측 자료를 확보하여 연구에 활용하였다. 2021년과 2022년 사이에 두드러진 차이점을 찾을 수 있었는데, 2021년에는 안면도와 포항 모두 오존 대류권계면의 변동성이 매우 크게 나타났지만 2022년에는 그렇지 않았으며, 2021년에는 대류권계면의 오존 농도가 약 3km 고도 오존 농도와도 높은 상관관계를 보일 정도로 그 영향력이 하층까지 깊이 확인되었으나 2022년에는 이보다 많이 약하게 나타나는 것이 확인되었다. 결정적으로 안면도에서 2021년과 2022년 관측 기간 중 가장 오존 농도가 높은 5개의 사례는 모두 2021년에, 가장 오존 농도가 낮은 5개의 사례는 모두 2022년에 나타나는 것을 확인하였고 이 두 대조되는 시기의 오존 연직분포를 평균하여 비교해보면 2021년에는 성층권에서 대류권으로 오존 농도가 매끄럽게 이어지는 반면 2022년에는 성층권 오존과 대류권 오존이 대류권계면 (약 15-17 km) 경계로 단절되어 있음을 확인할 수 있다. 비록 2년간의 차이일 뿐이라 아직 일반화하긴 어렵지만 성층권 오존의 대류권 침투가 크게 일어날수록 지표 오존이 높게 나타날 수 있는 가능성을 본 연구를 통해 확인할 수 있었으며 이에 대해 향후 추가적인 자료의 수집을 통해 좀 더 현상을 계속하여 살펴보고자 한다.

Key words: 오존존데, 오존 연직 분포, 성층권-대류권 물질교환

항공관측데이터 기반 한반도 권역별 대기오염물질 연직분포 패턴 분석

김지훈[1], 구자호[1], 박진수[2], Laura Pan[3], Paul Newman[4]

[1]연세대학교 대기과학과
[2]국립환경과학원
[3]National Center for Atmospheric Research
[4]NASA Goddard Space Flight Center Greenbelt MD

기체상의 대기오염물질은 직접적으로 인간의 호흡계통을 통해 체내에 급성,만성적인 악영향을 미친다. 이에 따른 기술적, 정책적 대안 수립을 위해 대기오염물질에 대한 이해의 필요성이 증대되었고, 대기의 복잡한 거동에 의해 배출 및 환경문제의 포괄적 이해를 위해서는 연직 구조가 고려되어야 한다. 위성 및 지상의 원격탐사를 통한 연직 데이터는 불확실성의 한계를 가지기에 in-situ 데이터와 상보적으로 활용되어야 한다. 그러나 대표적인 in-situ 데이터인 항공관측자료는 비용 등의 문제로 인해 데이터 확보에 제약이 있다. 이 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위한 노력으로서 한반도 상공에서 수행된 6개의 캠페인: KORUS-AQ, GMAP(2020), GMAP(2021), SIJAQ(2022), ACCLIP(2022), ASIA-AQ 의 항공관측 데이터를 확대 적용하였다. 항공기의 이동경로상 500m 이상 연속적으로 상승,하강하는 비행을 'Diagonal Snapshot'으로 정의했다. 이 Diagonal Snapshot은 Spiral data와 한반도 전체규모에서 연직적으로 비교 시 O_3, NO_2, CO, CO_2, CH_4 순으로 전 캠페인중 최대 9.84ppb, 1.30ppb, 30.86ppb, 76.78ppm, 17.92ppb의 RMSE를 보였다. 오염물질 배출특성에 의한 오염특성의 유사성을 기준으로 구분된 각 '지역'의 대기오염물질 연직분포 패턴을 Spiral data 뿐만 아니라 Diagonal Snapshot을 병용하여 분석한 결과 전반적으로 O_3은 큰 Variation을 가지는 well-mixed 패턴을 보였고, CO_2는 비교적 작은 변동폭의 well-mixed 패턴을 보였다. NO_2, CO, CH_4는 인위적 배출에 의해 지표 근처에서 가장 높은 농도를 보이고, 고도 증가에 따라 낮아지는 우하향 패턴을 공통적으로 보였다. 그러나 충청권을 중심으로 한 서부 지역에서 특정 고도에서의 피크로 인한 복잡한 패턴이 NO_2를 제외한 모든 물질에서 식별되었고, 지표 근처에서의 CO_2 고농도 사례에 의한 CO_2 우하향 패턴이 확인되었다. 이는 각각 대륙에서의 저고도 수송과 국지적 배출의 영향인 것으로 추정된다.

Key words: 항공관측자료, 대류권, 연직분포, 대기오염물질, Diagonal Snapshot

※ 본 성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 "신기후체제 대응 환경기술개발사업"의 연구개발을 통해 창출되었습니다.(2022003560006)

Observational Evidence of the Disparity Between Global Drought Hazard and Public Awareness

Murtaza Ahmad Dar, Jonghun Kam

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

Drought is a natural hazard with profound impacts on ecosystems and human societies globally. To improve drought mitigation strategies, a comprehensive understanding of global drought awareness is essential. This study examines the relationship between drought events and public awareness through the analysis of large-scale social monitoring data. By integrating meteorological data, passive social monitoring via Google Trends, and advanced statistical methods, we investigate the multi-dimensions of droughts from 2010 to 2021, including the characterization of historical drought events (e.g., intensity and duration) and the evolution of public awareness. Our findings indicate significant peaks in global drought events, notably in 2015–2016 and 2019–2020, which correspond with a significant increase in public awareness beginning in 2015. However, the recent decade has shown no substantial change in the global drought hazard. Additionally, we observe that long-lasting droughts significantly enhance awareness at both local and global levels, while high gross domestic product is associated with heightened awareness at the remote level. This study provides observational evidence of global disparities in drought awareness, emphasizing the pivotal role of European nations in promoting global awareness of drought hazards.

Key words: Drought Hazard, Drought Awareness, Drought Characteristics

Physics-informed AI modeling to assess the hydroclimatic extremes over the Pakistan in a Changing Climate

Hassan Raza, JonghunKam

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

Record event (RE) is the highest (or lowest) temperature or streamflow within a certain period of interest. Climate change has induced global surface warming causing more REs over the globe in recent decades. Exceptional surface temperature anomalies, varying precipitation patterns and glacial lake outbursts have exacerbated the REs in annual maximum and minimum streamflow records. In recent decades, Pakistan has experienced unprecedented floods and droughts. The 2010 and 2022 floods affected approximately 30 million people, which resulted in staggering economic losses of around 30 billion USD. In 2001 and 2017, severe droughts caused catastrophic crop failures. However, complex mountainous catchments in Pakistan makes spatio-temporal assessment of hydroclimatic extremes challenging. Particularly, current coarse-resolution climate models still misrepresent highly glacierized regions. The bias within the climate model records has a profound impact on the hydrological projections. Here, we use an observation-constraint physics-guided deep learning model to correct the bias within the climate models occurrence probability of REs in annual maximum and minimum streamflow. Then this trained deep learning model is used to project the occurrence probability of REs until 2099 under two radiative forcing scenarios (RCP 4.5 & RCP 8.5) from five CORDEX-SA regional climate models. This study focus on all four rivers in Pakistan. Results show the intensifying hydrological cycle through the frequent occurrence of REs in the study rivers. The Upper Indus River had almost similar occurrence probability of REs in annual maximum and minimum streamflow. However, Chenab and Kabul Rivers (Jehlum River) are more suspectable to REs in annual maximum (minimum) streamflow than other rivers. This study underscores the climate change driven increasing severity of the regional hydrological cycle over Pakistan. Timely prediction and early preparedness for unprecedented floods and droughts can leverage the secure and sustainable future of the escalating 240 million population. This study also highlights the potential of integrated modeling for the bias correction of climate records and projection of hydroclimatic extremes.

Key words: Record-breaking Hydroclimate Extremes; Climate Change; Physics-guided Deep Learning

SSP 시나리오를 활용한 호우재해 물리적 리스크 평가

김성민, 김현우, 한진영, 이재준, 장동현, 방철한

한국기상산업기술원 산업성장본부 기상기후빅데이터센터

기후변화는 전 세계적으로 심각한 영향을 미치고 있으며, 특히 호우재해와 같은 극한 기상 현상은 빈번해지고 있다. 이러한 기후변화로 인한 물리적 리스크는 국가 재정에 부담이 되고 있으며, 이에 대한 체계적인 분석과 대응이 필요하다. 이를 위해 기후변화 표준 시나리오를 활용한 분석이 중요해지고 있다.

기후변화 표준 시나리오는 SSP(Shared Socioeconomic Pathways) 시나리오를 활용하여 사회경제적 요인에 영향을 미치는 다양한 기후 조건을 반영하고 있다. 이러한 시나리오를 기반으로 물리적 리스크 산출 방법론을 개발함으로써, 기후변화로 인한 재정적 영향을 보다 정확하게 예측할 수 있다. 또한, 과거 데이터를 활용한 백테스팅을 통해 방법론의 신뢰성과 정확성을 검증하고, 이를 바탕으로 정책 결정 과정에 유용한 정보를 제공할 수 있다.

물리적 리스크 산출 방법론은 산업계에서도 유용하게 활용될 수 있다. 예를 들어, 기후변화로 인한 재무적 손실 발생 가능성을 예측함으로써 기업들은 재해에 대비한 리스크 관리 전략을 수립하여 기후공시에 대응할 수 있다. 특히, 보험업계는 이러한 모델을 활용하여 보다 정확한 보험료 산정과 손해 평가를 할 수 있다. 이를 통해 산업계는 기후변화에 보다 효과적으로 대응하고, 지속 가능한 발전을 이룰 수 있을 것이다.

본 연구는 국가 재정 데이터와 기후변화 표준 시나리오 자료를 활용하여 호우재해에 따른 물리적 리스크를 산출하는 모델을 제안하고, 그 성능을 평가하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 기후변화가 국가 재정에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 효과적인 대응 전략을 마련하는데 기여하고자 한다.

Key words: 기후변화 물리적 리스크, 호우재해, SSP 시나리오 분석

※ 이 연구는 한국기상산업기술원의 기상산업활성화 사업과 연계하여 수행되었습니다.

* Sung-Min Kim, Weather & Climate Big Data Center, Korea Meteorological Institute, e-mail : sungmin27@gmail.com

CMIP6 ScenarioMIPs의 기상장 재현성 평가

양정아[1], 백승원[2], 장성호[3], 김재만[4]

[1]건국대학교 사회환경공학부
[2](주)지오시스템리서치 해양예보사업부
[3]한국공학대학교 스마트팩토리융합학과
[4]한국공학대학교 컴퓨터공학과

기후변화의 영향을 고려하여 파랑과 폭풍해일과 같은 해양 기상의 장래 변화량을 예측하는 것은 연안역의 재해 경감 대책을 수립하는데 필수적이다. 해양 기상의 장래 변화량을 예측하기 위해서는 수치모델을 활용할 수 있는데, 이를 위해서는 입력자료로서 해상풍과 해면기압과 같은 기상장에 대한 정보가 필요하다. 해양기상의 robust한 장래 예측을 위해서는 CMIP6에 참여한 모든 AOGCM이 생산해 낸 기상장 정보를 활용하여 해양기상 모델링을 수행하면 되겠지만, 그러기에는 시간과 비용에 대한 부담이 크다. 이에 본 연구에서는 ERA5의 기상장 정보를 참 값으로 상정하고, 1979년부터 2014년까지의 과거기후에 대해 AOGCM이 생산해 낸 기상장 정보를 ERA5의 기상장 정보와 비교하였다. 모델 성능 평가에는 CMIP6 ScenarioMIPs에 참여하고 있는 58종의 AOGCM 중, 3종의 미래 기후 시나리오(SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5)와 해면기압과 해상풍 변수를 산출하는 21종의 AOGCM만을 활용하였다. 모델 성능은 해면기압, 남북방향의 풍속, 동서방향의 풍속의 3가지 변수에 대해 RMSEP (Root Mean Squared Error of Prediction)와 상관계수에 대한 성능지표를 산출하고, Rank sum, Weighted score, Total score의 해석을 통해 3가지 변수에 대한 모델 성능을 종합적으로 평가하였다. 분석 결과, 각 변수에 대한 값을 잘 재현하는 모델(RMSEP 기준)과 경향을 잘 재현하는 모델(상관계수 기준)이 상이하게 나타났다. 예를 들어 해면기압의 값을 잘 재현한 모델은 INM-CM4-8이고, 해면기압의 경향성을 잘 재현한 모델은 IITM-ESM으로 나타났다. 또한 해면기압과 해상풍에 대한 성능을 종합적으로 평가한 결과, Rank sum 평가에서는 MIROC6, CMCC-CM2-SR5, INM-CM5-0가, Weighted score 평가에서는 CMCC-CM2-SR5, MIROC6, ACCESS-ESM1-5가, Total score 평가에서는 CMCC-CM2-SR5, MIROC6, IPSL-CM6A-LR이 우수한 것으로 파악됐다. 이에 상기 결과들을 모두 고려하여 CMIP6 AOGCM 중 기압장과 바람장에 대한 재현 성능은 CMCC-CM2-SR5와 MIROC6이 가장 우수한 것으로 결론지었다. 향후 이 2가지 AOGCM이 생산한 기상장 자료를 사용하여 다양한 미래 기후 시나리오에 대한 동아시아 영역의 해양기상 장래 예측을 수행할 예정이다.

Key words: CMIP6, 전지구 대기-해양 결합 모델, 기상장, 해면기압, 해상풍

※ 이 연구는 상세 해양 기후변화 시나리오 산출기술 개발 사업(RS-2024-00404973)과 과학기술분야기초연구사업(2022R1C1C2009205)의 지원으로 수행되었습니다.