

기후 분과 / 기후 1-1

지구 온난화 대책: 해수조기결빙(ESF)으로 행성 냉각

변희룡

한국기상학회

2024년의 열파는 고배출 시나리오(RCP8.5)를 넘어서는 수준이었다. COVID-19 기간에 강제적 배출 감축이 있었음에도 대기 중 CO₂ 농도에서 뚜렷한 변곡점을 보이지 않았으며, 향후 배출 저감조치도 효과를 내기 어려울 것으로 보인다. 이 때문에 그린·블루 카본의 흡수원과 CCUS를 모두 동원하더라도 탄소중립 달성은 불확실하다. 설령 달성하더라도, 기후 관성으로 인해 지구감온은 약 50여 년 이후에나 기대할 수 있어, 기후 위기론이 더욱 확산되고 있다. 특히 북극항로의 개방은 해빙 감소와 열염순환의 붕괴를 가속하는 중대한 위험 요인이다.

기존의 지구공학적 접근도 한계가 뚜렷하다. 성층권 에어로졸 주입(SAI)은 대부분 수치 실험 단계에 머물렀으며, SPICE(2012년)와 SCoPEX(2024년) 등은 중단되었다. 해양 구름 밝히기(MCB)는 2024년에 현장 실험이 저지되었고, GPAE(2025)도 중단되었다. 극지 해빙 위에 해수를 올려 얼리는 방법 역시 빙면적의 확대 효과가 제한적이다. 이런 상황에서 기후 종말론적 담론까지 등장하고 있다.

본 연구는 이러한 한계를 극복할 대안으로 해수조기결빙(Earlier Sea Freezing, ESF)을 제안한다. 염도 약 35(PSS-78)의 해수는 담수와 달리 빙점(-1.8°C)까지 감온할수록 밀도가 증가하는 특징이 있다. 표층수가 한랭 대기에 의해 냉각되면, 얼기 직전에 침강하고, 그 자리를 온난한 심층수가 채우면서 결빙이 지연된다. 전분 기반의 생분해성 필름을 해수면에 살포하면 이 대류는 부분적으로 차단되며, 필름 위에 쌓이는 눈·비·파랑비말이 한랭 대기와 직접 접촉하여 빠르게 얼어붙는다. 이를 통해 평균보다 10-60일 빠른 결빙을 유도할 수 있다.

형성된 얼음은 상부의 적설과 하부의 염분 방출(brine rejection)로 체적이 증가하고, 높아진 알베도는 추가 결빙과 보존을 촉진한다. 해빙기에는 이 얼음이 먼저 녹아 다년생 얼음을 보호하는 방패 역할을 한다. 두 작용의 결과로 해빙의 면적과 지속 기간이 확대되어 행성 알베도는 상승하고 지구가 냉각되며, 열염순환이 유지된다. 사용된 필름은 자연 분해되어 해양 생태계 순환에 편입된다.

초겨울 기준, 해수면과 대기온이 영하임에도 결빙되지 않은 해역은 약 410만 km²로 추정된다. 이 전역에 ESF를 적용한다는 이상화된 가정하에서 단순 계산한 결과 이듬해 전 지구 평균기온을 약 0.11°C 낮출 수 있다는 가능성을 확인했다. 본 결과는 개념증명 단계로서, 광역 살포 기술, 파랑·풍 조건에서의 성능, 생태독성·거버넌스·사회적 수용성 등에 대한 정량적 검증과 지역·계절별 최적화가 필요하다.

Key words: 탄소중립, 알베도 증대, 지구공학, 해수조기결빙(ESF), 전지구 냉각, 열염순환

기후 분과 / 기후 1-2

전 지구 도시에서의 녹지화에 따른 지구온난화 상쇄효과분석

김은섭¹, 김진수²

¹서울대학교 지속가능발전연구소
²한국과학기술원 건설 및 환경공학과

전 세계 도시들은 지난 수십 년간 가속화된 토지피복 변화로 인해 주변 지역 보다 빠른 표면 온난화를 경험하고 있다. 본 연구에서는 2000-2020년 기간 동안 99개 글로벌 도시를 대상으로, 도심지역과 주변 지역의 LST(Land Surface Temperature) 추세 차이를 분석하여 도시화 정도에 따른 추가적온난화를 정량화하였다. 특히 VCF(Vegetation Cover Fraction) 추세와 LST 추세의 관련성을 통해 도시별 녹지화에 따른 온난화 민감도를 도출하고, 도시 내부에서 관측된 최대 VCF 증가치를 잠재적 녹지화 한계치로 정의하여 최대 냉각 최대 잠재력을 추정하였다. 그 결과, 전 지구 평균적으로 도시 표면온도는 주변부보다 약 0.56 K/decade 더 빠르게 상승했으며, 도시화가 기여하는 온난화는 $+0.26 \pm 0.12$ K/decade, 녹지화에 따른 냉각 효과는 -0.07 ± 0.03 K/decade 수준으로 나타났다. 또한 녹지율이 낮은 도시일수록 녹지 확충에 따른 온도 저감 잠재력이 컸으나, 실제 달성 가능한 녹지화 한계를 고려할 경우 많은 도시에서 냉각 가능성이 도시화로 인한 가열을 전부 상쇄하기에는 부족함을 확인하였다. 최대 녹지화 시나리오에서 도출된 평균 냉각 효과는 -0.037 ± 0.26 K/decade이었으며, 녹지화로 극복되지 못한 온난화(residual LST)정도는 0.31 ± 0.25 K/decade 수준으로 평가되었다. 이러한 결과는 도시 열섬 완화를 위한 녹지화 전략이 일정 수준의 효과를 제공하지만, 온실가스 증가로 인한 배경 온도 상승과 도시화 가속을 고려할 때 전 지구적 기후 완화 수단으로서의 한계 또한 분명히 존재함을 보여준다. 본 연구는 도시별 녹지화 잠재력과 임계값을 정량화함으로써, 기후 적응 계획에서 녹지화 전략의 실질적 기여 범위를 설정하는 데 중요한 기초자료를 제공한다.

Keywords: Urban Heat Intensity, Climate Change Adaptation, Nature Based Solution, Urban Resilience

※ This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (RS-2024-00412800)

Regional Inter-Monthly Rainfall Patterns of the East Asian Summer Monsoon: Future Projections and Uncertainty Assessment

Yeon-Hee Kim, Seung-Ki Min

Division of Environmental Science and Engineering, POSTECH

East Asia is recognized as a hotspot vulnerable to precipitation increases under global warming. The East Asian summer monsoon exhibits distinct regional and inter-monthly rainfall variations, which makes careful evaluation of global climate model performance essential for reliable projections of future precipitation and related extremes. In this study, we assess Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models using metrics of inter-monthly variability in East Asian monsoon rainfall, and examine future projections along with their uncertainty sources. CMIP6 models capture the regional patterns of inter-monthly precipitation reasonably well, although with reduced rainfall amplitudes compared to observations. Compared with CMIP5, CMIP6 models simulate stronger precipitation and better reproduce observed features. Future projections suggest overall increases in precipitation across East Asia and its three subregions, both during the northward migration of the rain band and at the monsoon peak, with greater changes under high-emission scenarios. These increases are primarily driven by thermodynamic processes linked to enhanced moisture availability under global warming. Uncertainties in future projections are largely explained by internal climate variability and model spread associated with tropical ocean warming patterns. Circulation-related dynamic processes account for much of the model uncertainty, while scenario uncertainty is mainly associated with thermodynamic contributions.

Key words: East Asia summer monsoon, Future projection, Uncertainty Assessment, Inter-monthly rainfall pattern, CMIP6

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2020R1C1C1006569; NRF-2018R1A5A1024958)

기후 분과 / 기후 1-4

에어로졸 유도 북태평양 고기압 이상이 축치해 해빙 손실에 미치는 영향

홍윤기¹, S.-Y. Simon Wang², 윤진호³, 김진수⁴

¹서울대학교 기후변화연구센터

²카세사트대학교 농학과

³광주과학기술원 환경·에너지공학과

⁴한국과학기술원 건설및환경공학과

북극은 전지구 평균보다 빠른 속도로 온난화되면서 급격한 해빙 감소를 보이고 있다. 주로 인위적 에어로졸은 냉각 효과를 가져 북극 해빙 손실에 기여하지 않는 것으로 여겨졌으나, 본 연구는 에어로졸이 유도하는 대기순환 변화가 해양열수송을 통해 오히려 북극 해빙 감소를 가속화할 수 있음을 보여준다. 지구시스템모델을 이용한 단일강제력 실험을 통해 온실가스와 인위적 에어로졸의 개별 및 복합 효과를 비교 분석하였다. 에어로졸은 북태평양 고기압을 강화시켜 베링해협을 통한 북극으로의 해양열수송을 증가시키는 것으로 나타났다. 온실가스에 의한 온난화와 결합될 때, 에어로졸은 서부 축치해 지역의 해빙 감소에 더 큰 영향을 미쳤다. 그러나 이러한 동역학적 과정이 직접적인 열역학적 강제력에 비해 해빙 손실에 미치는 상대적 기여도는 아직 정량화되지 않은 상태이다. 이를 해결하기 위해 해양 동역학이 포함된 완전결합 지구시스템모델과 열역학적 과정만을 고려한 슬랩해양모델(Slab Ocean Model)을 비교하여 대기순환 변화에 의한 해양열수송이 해빙 손실에 미치는 영향을 정량화하였다. 그 결과, 대기순환 변화에 의한 해양열수송은 해빙 손실을 증폭시키는 역할을 하며, 특히 서부 축치해에서 동역학적 해양 과정이 전체 해빙 손실의 35%를 차지하는 것으로 나타났다. 완전결합 모델(CESM2)에서는 17%의 해빙 감소를 보인 반면, 슬랩해양모델(CESM2-SOM)에서는 11%에 그쳐, 에어로졸 유도 대기순환 변화가 해양열수송을 통해 축치해 지역의 해빙 감소를 가속화함을 정량적으로 확인하였다. 이러한 결과는 인위적 에어로졸이 단순한 냉각 효과를 넘어 대기-해양 순환 변화를 통해 북극 해빙 손실을 가속화할 수 있다는 새로운 관점을 제시하며, 복합 강제력 효과의 정량적 이해를 통해 북극 기후 변화 예측의 정확성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

Key words: 북극해빙, 인위적 에어로졸, 해양열수송, 북태평양 고기압

Negative CO₂ emissions to mitigate extremes in land hydrological cycle

Jongsoo Shin¹, Jong-Seong Kug², So-Won Park², Jonghun Kam³, Soon-Il An^{3,4,5},
So-Eun Park⁴, Hyoeun Oh^{6,7}, Sang-Wook Yeh⁸, Sujong Jeong^{9,10}, Chang-Kyun Park³,
Jin-Soo Kim¹¹

¹Woods Hole Oceanographic Institution

²School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

³Division of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH)

⁴Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

⁵Irreversible Climate Change Research Center, Yonsei University

⁶Center for Climate Physics, Institute for Basic Science

⁷Pusan National University

⁸Department of Marine Science and Convergent Engineering, Hanyang University

⁹Department of Environmental Planning, Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

¹⁰Climate Technology Center, Seoul National University

¹¹Low-Carbon and Climate Impact Research Centre at the School of Energy and Environment,
City University of Hong Kong

Global warming has profound effects on the terrestrial hydrological cycle, leading to alterations in regional extreme weather patterns. The primary goal of climate mitigating is to reduce the negative effects of climate extremes in the future. While it is well established that terrestrial precipitation increases with greenhouse warming, this study reveals that even with zero or negative emissions in the future, terrestrial precipitation will continue to rise beyond the amount during CO₂ peak period. In particular, under the negative emissions scenario, physiological feedback in terrestrial vegetation plays a pivotal role in this precipitation increase, driven by the enhanced transpiration in response to reduced CO₂ concentrations. Despite the overall rise in terrestrial precipitation, the study shows that extreme precipitation events and droughts become less severe globally under the negative emissions scenario, compared to the zero emissions scenario. This indicates that more aggressive climate mitigation efforts can bring greater socio-economic benefits by reducing hydrological extremes and improving water availability.

Keywords: Zero and negative emissions, Extreme precipitation, Physiological feedback

※ This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2022R1A3B1077622, NRF-2018R1A5A1024958). J.S. was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (RS-2024-00413360) and the Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) Grow The Base Fund. The CESM simulation was carried out on the supercomputer supported by the National Center for Meteorological Supercomputer of Korea Meteorological Administration (KMA), the National Supercomputing center with supercomputing resources, associated technical support (KSC-2021-CHA-0030), and the Korea Research Environment Open NETwork (KREONET).