

기후 분과 / 기후 7-1

2023년 남극 해빙의 급격한 감소에 미치는 대기순환과 해양 표층 온난화의 영향

김예현, 김연희, 민승기

포항공과대학교 환경공학부

남극 해빙은 전 지구 기후 시스템에서 중요한 역할을 하므로, 그 변동성을 지배하는 메커니즘을 이해하는 것은 필수적이다. 남극 해빙은 1979년부터 2015년까지 점진적으로 증가하다 2016년 이후 급격히 감소하기 시작하여, 2023년에 사상 최저치를 기록하였으며 이는 전년도 대비 기후값 기준 3 표준편차 이상 낮은 수준이었다. 2023년 남반구 겨울철에 강한 Zonal Wave 3 (ZW3) 패턴과 매우 높은 해양 표층(subsurface) 열 함량(Ocean Heat Contents)이 동시에 관측되었다. 2000년대 이후 시작된 남대양 온난화는 해빙 용해에 유리한 조건을 형성하였고, 2023년에 두드러진 ZW3 패턴은 남북 방향의 열 교환을 강화하여 해빙 감소를 가속화했다. 이러한 급격한 감소가 자연적으로 발생하는지 평가하기 위해, Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)의 산업화 이전 제어 (piControl) 시뮬레이션 자료(40개 모델, 23,299년)를 분석하여 유사한 극한 사례를 식별하고 그 공간 패턴을 비교하였다. CMIP6 모델에서 최근 20년 기준 평균 해빙 면적과 변동성이 관측값과 유사한 연도를 현재 기후와 유사한 사례로 선정하고 그 중에 3 표준편차 이상 감소한 사례들을 찾아 급격한 감소 사례로 정의하였다. 해당 사례들에 대해 합성 및 군집 분석 결과, 3 표준편차 이상 해빙 면적이 감소한 사례의 절반 이상에서 뚜렷한 ZW3 패턴이 나타났으며, 이는 2023년 관측과 유사한 지역에서의 해수면 온도 상승 및 해빙 농도 감소를 동반했다. 또한 조건부 확률 분석에 따르면, 내부 변동성만으로는 이러한 대규모 감소가 나타날 확률은 매우 낮지만(백년에 한 번), 2023년과 유사한 조건(강한 ZW3 패턴과 높은 OHC)이 결합될 경우 자연 상태에서보다 최대 5배까지 높아질 수 있음을 보여준다.

Keywords: 남극 해빙 감소, Zonal Wave 3(ZW3), 해양 표층 온난화, Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6)

기후 분과 / 기후 7-2

ENSO-동아시아 대류권 오존 관련성의 미래 변화와 역학적 기여

윤세민, 정지원, 문병권

전북대학교 과학교육학부/융합과학연구소

대류권 오존(O₃)은 단기체류 기후변화 유발물질(Short Lived Climate Pollutants, SLCP)이자 온실가스로서 지구온난화에 기여하는 동시에 인체와 생태계에 유해한 영향을 미친다. 오존 농도는 대기 순환, 전구물질 배출 등 다양한 요인에 의해 변하며, 특히 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)은 열대 태평양 해수면 온도의 변동을 통해 전 지구 대기 순환을 변화시켜 대류권 오존 분포에 큰 영향을 준다. 이 연구에서는 결합 모델 상호비교 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)의 SSP3-7.0 시나리오를 이용하여 8개 기후모델의 2015-2100년 자료를 분석하였다. 라니냐 지수와 북반구(0°-90°N) 및 동아시아(25°-40°N, 100°-150°E) 대류권 오존의 관계를 회귀분석하고, 21년 이동 회귀를 통해 장기 변화를 분석하였다. 그 결과, ENSO-오존 민감도는 21세기 후반(2081-2100)에 중반기(2051-2070)에 비해 뚜렷하게 강화되었으며, 특히 동아시아 상층 대류권에서 강한 반응이 나타났다. 반면 오존의 화학적 생성을 나타내는 net chemical tendency는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이는 동아시아 대류권 오존 증가가 화학적 요인보다는 ENSO에 의해 유도된 하강기류 강화, 대류 억제, 건조화 등 역학적 과정에 의한 것임을 확인하였다. 이 연구는 미래 기후에서 ENSO-오존 상관관계가 단순한 화학 반응의 강화가 아니라 대기 역학적 유입에 의해 주도될 수 있음을 의미한다. 이러한 결과는 오존의 장기 기후 예측에서 ENSO 변동성을 고려하는 것뿐만 아니라 화학적·역학적 기여를 구분하여 이해하는 것이 중요함을 보여준다.

Keywords: 엘니뇨-남방진동, 대류권 오존, CMIP6, 미래기후

※ 본성과는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 "신기후체제 대응 환경기술개발사업"의 연구개발을 통해 창출되었습니다. (2022003560001)

기후분과 / 기후 7-3

온난화에 따른 폭염 - 가뭄 복합 재해 기인 기후 리스크의 불균형적 증가

김용준, 예상욱

한양대학교 해양융합과학과

폭염-가뭄 복합 재해(Compound Drought-Heatwave Events, CDHEs)는 단일 재해보다 사회와 생태계에 훨씬 더 큰 피해를 유발하는 것으로 알려져 있으며, 전 세계적으로 그 발생 빈도가 증가하고 있다. 특히 고탄소 배출 시나리오에서는 21세기 후반 들어 CDHE 증가로 인해 사회·경제적 생산성 저하가 전망되어 이들의 발생 경향에 주목할 필요가 있다. 그러나 미래 기후 조건에서 현재의 CDHE 사회·경제적 리스크가 어떻게 변화할지에 대한 지역별 차원의 분석은 거의 이루어지지 않은 상황이다. 본 연구에서는 일별 CMIP6 모델 결과와 복합 재해 쌍 생성 알고리즘(MYRIAD-HESA)을 활용하여 1980-2100년 기간 동안 SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오 하에서의 CDHE 발생을 산출하였다. 이어 IPCC 제6차 평가보고서의 지역 구분을 기반으로 CDHE 사회·경제적 리스크를 평가하고, 지역별 변화 양상을 분석하였다. 리스크 평가는 연간 CDHE 발생 건수, 총 일수, 강도로 구성된 재해(Hazard) 항목과, 인구 밀도, 국내총생산(GDP)으로 구성된 노출(Exposure) 항목, 농경지 및 도심지 면적 비율과 1인당 GDP를 반영한 취약성(Vulnerability) 항목을 활용하여 수행되었다. 분석 결과, 현재 기후(2000-2024년) CDHE 리스크가 높은 지역일수록 미래 기후(2076-2100년) 리스크 증가 폭이 더욱 크게 확인되었으며, 이러한 현상은 고탄소 배출 시나리오에서 특히 두드러지게 나타났다. 이는 강한 온난화로 인한 지면-대기 상호작용 증폭이 현재 CDHE 주요 발생 지역에서 뚜렷하게 나타나면서, 이들 지역에서 추가적인 CDHE 급증이 초래되었기 때문으로 해석된다. 본 연구는 CDHE와 같이 특정 기후 피드백과 밀접히 연관된 이상 기후 현상이 온난화 하에서 지역별로 불균형적인 리스크를 초래할 수 있음을 보여준다. 또한, 현재의 탄소 배출 완화 수준이 미래 CDHE 리스크의 공간적 분포를 좌우할 수 있음을 시사하며, 이에 대한 정책적 대응의 시급성을 강조한다.

Keywords: 폭염-가뭄 복합 재해, 기후 리스크, 불균형성, 재해, 노출, 취약성

※ 이 연구는 환경부의 재원을 지원받아 한국환경산업기술원 “신기후체제대응환경기술개발산업”의 지원 (2022003560001)을 받아 수행되었습니다.

기후 분과 / 기후 7-4

Transformed Eulerian Mean (TEM)을 활용한 미래 겨울철 중위도 강수 전망 분석

허이제, 유창현

이화여자대학교 기후에너지시스템공학과

기후모델은 온난한 기후에서 북반구 중위도 강수의 증가를 일관되게 전망하고 있다. 선행 연구에 따르면 중위도 강수의 평균적 구조는 Transformed Eulerian Mean(TEM) 연직 운동과 밀접히 연관되어 있다. 본 연구에서는 중위도 강수 미래 변화가 TEM 연직 운동의 변화에 기인하는지, 그렇다면 TEM 연직 운동의 변화를 유발하는 메커니즘은 무엇인지 분석하였다. 나아가 이러한 중위도 강수 - TEM 연직 운동 미래 전망의 불확실성과 모델간 차이를 유발하는 과정이 무엇인지 규명하고자 하였다. 이를 위하여 CMIP6 historical과 SSP5-8.5 시나리오를 이용하였다. 다중모델 평균 결과, TEM 연직 운동이 강화되는 지역에서 중위도 강수가 증가하는 경향이 나타났으며, 이러한 연직 운동 증강은 겨울철 북반구 중·고위도 강수 증가와 유의한 상관성을 보였다. 특히 SSP5-8.5 시나리오에서는 이러한 연관성이 더욱 뚜렷하게 나타나, 강수 증가와 모델 간 편차가 TEM 연직 운동 경향과 밀접하게 연결되어 있음을 확인하였다. TEM 변화는 주로 에디 열수송의 연직 기울기 향에 의해 설명되었으며, TEM 순환 경향의 모델 간 차이 또한 주로 이 향의 변화에서 기인하는 것으로 나타났다. 반면 정적 안정도의 기여는 중위도에서 상대적으로 작았다. 이러한 결과는 에디에 의해 유도되는 역학적 상승 운동이 중위도 강수 변화를 형성하는 핵심 요인임을 보여주며, 해당 과정을 제약하는 접근이 중위도 강수 전망의 정확도 향상에 기여할 수 있음을 시사한다.

Keywords: Transformed Eulerian Mean (TEM), Midlatitude precipitation (중위도 강수), CMIP6, Inter-model spread

기후 분과 / 기후 7-5

북극 원격상관 보정을 통한 유라시아 겨울철 지상기온 계절예측성능 향상

심지한, 김백민, 김주현, 김근영

부경대학교 지구환경시스템과학부

중위도 겨울철 지상기온 계절예측은 북극 원격상관을 모의하는 과정에서 나타나는 체계적인 편향으로 인해 큰 어려움을 겪고 있다. APCC 다중모델앙상블(MME)에 포함된 대부분의 개별 모델들은 AO가 SAT에 미치는 영향을 잘못 모의하여, 유라시아 지역 예측성능을 저하시킨다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 본 연구에서는 모델이 왜곡된 AO-SAT 관계를 모의하는 대신 관측 기반으로 제약된 관계를 적용하는 AO 보정 기법을 도입하였다. 그 결과, 모든 APCC MME 모델에서 겨울철 SAT 예측성능이 일관되게 향상되었으며, 이는 해당 방법론이 특정 모델에 국한되지 않고 일반적으로 적용 가능함을 보여준다. 특히, 성능 향상의 정도는 모델 고유의 AO 예측성능과 뚜렷한 역상관을 보였는데, AO 변동성을 재현하는 능력이 가장 낮은 모델일수록 더 큰 개선 효과를 나타냈다(상관계수 $r = -0.65$). 이러한 결과는 AO 보정이 단순한 일괄적 조정이 아니라, 계절 예측 모델들이 공통적으로 겪는 구조적 한계를 보완할 수 있는 효과적인 접근임을 보여준다. 또한 AO 보정이 적용된 모델을 APCC MME에 포함할 경우, 유라시아 겨울철 예측성능이 뚜렷하게 개선되었으며, 이는 물리적 근거를 갖춘 후처리 기법이 계절 기후 예측의 발전에 중요한 기여를 할 수 있음을 시사한다.

Keywords: 북극진동보정, 계절예측, APCC MME

기후 분과 / 기후 7-6

CESM2에서 과소모의된 북극해 해양 열 수송이 해양에 미치는 영향

박정현^{1,2}, 김주홍², 김성중², 김백민^{1,*}

¹부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학과

²극지연구소 해양대기연구본부

북극에서의 해양-해빙 상호작용은 여전히 CMIP6 기후 모델이 직면한 핵심적인 과제 중 하나이다. 다수의 CMIP6 모델은 북극 해양의 수직 구조를 모의하는 과정에서 뚜렷한 편향을 보이며, 표층 해수는 지나치게 차갑고 염도는 높게 혹은 낮게 모의되는 반면, 심층 해수는 과도하게 따뜻하게 재현되는 경향이 있다. 한편, 해빙의 두께는 PIOMAS 자료와 비교하였을때, 과소추정하는 경향이 나타난다. 우리는 이러한 편차간 불일치를 CESM2를 통해서 살펴보았다.

CESM2 현재 실험 결과, 북극해 표면은 재분석 자료보다 더 차갑지만, 해빙은 얇게 모의되었으며 일부 지역에서는 해수면 염분이 과대 모의되었다. 추가 분석에서, CESM2는 북대서양을 통해 유입되는 해양 열 수송을 과소 모의하고 있었고, 이는 주로 해류 속도의 약한 모의에 기인하였다. 본 연구는 이를 개선하기 위해, Gent-McWilliams 매개화의 수평 확산도와 K-profile 매개화(KPP)의 연직 혼합 계수를 조정하는 민감도 실험을 수행하였다. 그 결과, 바렌츠해 개구부(BSO)와 프람 해협(Fram Strait)을 통한 열 수송의 변화가 해빙 두께에 큰 영향을 미친다는 사실이 확인되었다. 그러나 편향을 근본적으로 완화하기 위해서는, 향후 실험에서 해양 표면 온도 편향을 해양-대기 경계면의 열 플럭스로 변환시키는 새로운 접근이 필요하다.

Key words: 해양-해빙 상호작용, 해양 열 수송, CMIP6, 해빙 두께

※ 이 연구는 한국해양수산개발원의 극지연구 전문인력 양성 장학사업과 2025년 해양수산부재원으로 해양수산 과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (KIMST RS-2021-KS211500, 북극해 온난화-해양생태 계 변화 감시 및 미래전망 연구).