

라그랑지안 확률 모델링을 활용한 확률분포 기반 난류 및 대류 모수화의 개발

신지훈

국립부경대학교 환경대기과학전공

본 발표에서는 새로운 확률분포 기반 난류 및 대류 모수화의 개발에 대해 논한다. 확률론적 대류 모수화의 개발과정 중에 확률미분방정식을 사용하여 난류와 대류의 확률 분포를 동시에 모수화 할 수 있는 방안이 새롭게 연구되었다. 라그랑지안 확률 모델(Lagrangian Stochastic Model; LSM)은 속도 벡터와 스칼라에 대한 확률미분방정식을 사용하여 임의의 난류 확률분포를 모의할 수 있으며, 기존의 난류모델 종결문제를 해결하여 난류수송이 정확하게 계산된다. LSM을 사용하여 대기 경계층을 모의하였을 때, 불안정 경계층의 유입과정과 열 플럭스 수직 프로파일이 큰 에디 모사(LES) 결과와 유사하게 모의되었다. LSM은 불안정 경계층의 비대칭적이고 왜곡된 온도-수직속도의 결합분포를 재현하였다. 또한, 상대적으로 모수화가 어려운 안정경계층의 대류 강도 및 평균장 프로파일이 LES 앙상블 결과와 유사하게 모의되었다. LSM의 모의 결과를 모닌-오브코프 상사성 이론(Monin-Obukhov Similarity Theory; MOST)과 비교 검증한 결과, 온습도 및 수평 바람의 수직 경도, 수직 속도의 표준 편차가 상사성 이론의 예측과 밀접하게 일치하였다. 그러나 LSM은 지표 근처에서 수평 속도의 분산을 과대모의하였으며 이를 해결하기 위해서는 지표 근처 난류의 압력수송, 압력재분배, 소산이 향상되어야 한다. 앞으로 LSM은 습윤 대류와 같이 비균질성이 극히 높은 난류 현상을 모의할 수 있도록 확장될 것이며, 이를 위해 난류 소산을 비균질적으로 계산하는 방안을 제시한다. 본 발표에서는 추가적으로 LSM의 계산 속도를 향상하는 방법들과 LSM을 물리 기반 딥러닝 모수화에 활용하는 방안 또한 논한다.

Key words: 확률 모델링, 난류 모수화, 대류 모수화

온실가스 배출 속도 차이에 따른 폭염의 노출도 비교

박인홍

한양대학교 ERICA 해양융합과학과

탄소 중립을 달성하는 것은 전 세계적인 과제이며, 이 목표를 달성하는 방법은 기후 변화 적응과 완화에 매우 중요하다. 그러나 탄소 중립 도달 시기의 차이, 즉 온실가스 배출 속도 차이에 따라 기후 시스템이 어떻게 반응할지는 불확실하다. 본 연구에서는 CO₂ 배출량과 지구 평균 온도 사이의 선형 관계를 기반으로 파리협정 목표(2.0°C) 이산화탄소 배출량에 빠르게 도달했을 때와 느리게 도달했을 때, 평균 및 극한 기후 반응의 차이를 비교하였다. CMIP6의 다중 모델 시뮬레이션 결과, 두 시나리오(목표 이산화탄소 배출량에 빠르게 도달했을 때와 느리게 도달했을 때) 사이에는 25년 차이가 나타났으며, 빠른 목표 달성 시나리오와 느린 목표 달성 시나리오 사이에 지구 온난화를 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 나타났다. 하지만, 지역적으로 유의한 차이가 있었다. 목표 이산화탄소 배출량에 빠르게 도달한 시나리오는 육지 지역에서 온난화가 더 강화되는 것으로 나타난다. 또한, 이러한 배출률의 차이는 폭염에 노출되는 정도에도 영향을 미쳤으며, 지역별로도 뚜렷한 차이를 보인다. 본 발표에서는 온실가스 배출 속도 차이에 따른 극한과 평균에 대한 지역별 기후 반응의 차이와 이와 관련된 물리적 메커니즘에 대해 논의할 것이다.

Key words: 온실가스 배출속도 차이, 기후변화 위험성 평가, 폭염

Irreversibility of global climate system and its potential predictability

오지훈

서울대학교 지구환경과학부

Since the Industrial Revolution, persistent anthropogenic CO₂ emissions have driven long-term, large-scale global warming. To mitigate these changes, international efforts like the Paris Agreement aim to reduce atmospheric CO₂ through policies such as net-zero or negative emissions. However, the effectiveness of CO₂ reduction remains uncertain due to the complex, nonlinear nature of the Earth system, raising the question of whether climate change is fully reversible. This dissertation explores climate irreversibility, focusing on how the climate responds to various mitigation scenarios. Using large-ensemble experiments with state-of-the-art climate models, it analyzes responses to different CO₂ forcing scenarios through the lens of climate hysteresis and irreversibility.

Chapter I investigates large-scale hysteresis in the global climate, particularly the non-linear response of the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) to CO₂ forcing. While global temperatures show a linear response to CO₂, the ITCZ exhibits delayed recovery, shifting sharply southward as CO₂ levels decrease. This delay is linked to slower cooling in the Southern Ocean and delayed recovery of the AMOC, which affects global energy exchanges. The findings suggest that these oceanic processes play a key role in driving hysteresis in regional hydrological cycles.

The second part of Chapter I highlights the role of ocean heat storage in long-term climate irreversibility. Although oceans act as a thermal buffer, heat stored in the deep ocean is released much more slowly than it is absorbed, leading to multi-century regional warming even after CO₂ reduction. This pattern is particularly pronounced in subpolar regions and the equatorial Pacific, impacting regional sea surface temperatures (SST) and precipitation patterns, which may hinder climate recovery even after emissions are curbed.

Chapter II addresses uncertainties in climate response across different models and ensemble members, with the Arctic being the most uncertain region during CO₂ removal. Variations in Arctic Ocean salinity and density influence AMOC recovery, affecting the rate of Arctic cooling. Furthermore, the chapter reveals that some ensemble members show AMOC collapse in response to mitigation, while others show recovery, depending on whether the AMOC crosses a tipping point. This underscores the importance of understanding AMOC dynamics and the urgency of timely climate action, as even small delays in mitigation can push the AMOC into an irreversible collapse.

Overall, this dissertation emphasizes the complexity of climate irreversibility and the need for long-term, proactive adaptation and mitigation strategies to minimize enduring changes in the Earth's climate system.

Key words: 탄소 중립, 지구시스템 모델, 이력현상, 비가역적변화, 대서양 자오면 순환

A study on interaction between the tropical Pacific mean states and El Niño–Southern Oscillation

Geon-Il Kim

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Understanding the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) is crucial for accurate climate predictions, as it significantly influences global weather patterns and socio-economic conditions. This study investigated the interactions between ENSO and the tropical Pacific mean state. It examines the decadal modulation of ENSO amplitude, focusing on changes in ocean circulation and stratification, particularly the roles of subtropical–tropical cells and thermocline feedback. In contrast, ENSO asymmetry is found to be a key driver of tropical Pacific decadal variability (TPDV), with nonlinear rectification effects contributing to changes in the mean state. In addition to the internal variability perspective, the impact of changes in the tropical mean state resulting from external forcing on ENSO variability has been elucidated through the analysis of various scenarios. This study provides insights into the complexities of climate variability by elucidating the intricate relationship between the El Niño–Southern Oscillation and the tropical Pacific mean state, contributing to enhanced precision in future climate change projections.

Key words: ENSO, air–sea interaction, Tropical Pacific decadal variability, Earth system model.

In-Situ Generation of Planetary Waves and its Impacts on the Middle Atmosphere

유지희, 전해영

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

대기 행성파는 지구 경도를 둘러싸는 대규모 대기 섭동으로, 대류권에서 중층대기로 연직 전파하여 에너지와 운동량을 전달함으로써, 중층대기 순환과 변동성에 주요하게 기여한다. 행성파는 대규모 산악과 대륙-해양 온도 차에 의해 주로 발생하나, 순압/경압 불안정과 지역적인 중력파 강제력에 기인한 준지균 잠재와도 섭동의 비-보존강제력에 의해 중층대기에서 현장 여기되기도 한다. 이들은 발생지에 에너지 및 운동량을 변화시킬 뿐만 아니라 하향 전파를 통해 성층권 돌연승온에도 영향을 미친다. 현장 여기 행성파의 상당한 영향에도 불구하고, 중층대기 관측 및 수치모델의 부족은 이들의 특성과 영향에 대한 이해를 제한해 왔다. 그에 따라 본 연구에서는 행성파의 현장 발생과 그것이 중층대기에 미치는 영향을 전구 재분석장과 이상화된 전지구 순환모형을 이용하여 조사하였다.

첫 주제에서는 열권까지 확장한 이상화된 전지구 순환모형을 기반으로 중력파 강제력만에 의한 행성파의 현장 여기를 조사하였다. 이를 위해, 행성파의 주 원천인 산악과 또 다른 현장 원천인 불안정을 제거하고, 북반구의 겨울 중위도 중간권에 사인 형태의 중력파 강제력을 처방한 효율적인 이상 실험이 설계되었다. 현장 생성된 행성파는 처방된 중력파 강제력과 같은 동서파수를 지배적으로 가지며, 진폭은 중력파 강제력의 최대 진폭에 비례하는 반면, 동서파수의 제공에는 반비례하였다. 이들은 발생지뿐 아니라, 남반구 중간권 상부까지 전파하며, 상당한 에너지와 운동량을 평균류에 전달하였다. 이 같은 행성파의 반구간 전파는 반구간 역학적 커플링의 또 다른 가능한 메커니즘으로 제안되었다.

두 번째 주제에서는 2021년 북반구와 2002년 남반구에서 발생한 성층권 돌연승온 동안 현장 생성된 행성파가 극 와동의 깨짐에 미친 영향을 조사하였다. 서로 다른 반구에서 발생한 돌연승온임에도 불구하고, 공통적으로 순압/경압 불안정에 의해 현장 발생한 동서파수 2의 행성파가 성층권 중부의 극 와동 깨짐을 유발하며, 그 영향은 성층권 하부까지 확장되었다. 극 와동의 불안정화는 동서파수 1 행성파의 이례적 소산으로 서풍 제트가 동풍으로 전환되며 주 돌연승온으로 발달하는 과정에서 필연적으로 발생하였다. 본 결과는 주 돌연승온의 발생에 따른 경압/순압 불안정의 발달과 그에 기인한 행성파가 극 와동의 형태로 결정되는 돌연승온의 특성에 크게 영향을 미칠 수 있음을 암시한다. 이는 대류권 파동만으로 충분히 설명되지 않았던 돌연승온 사례들의 이해를 위해 현장 여기 행성파가 필수적으로 고려되어야 함을 시사한다.

Key words: 행성파 현장 생성, 순압/경압 불안정, 중층대기, 비보존강제력, 성층권 돌연승온

이산화질소 연직기주농도의 시공간 변동성이 지상 판도라 관측 및 위성 검증에 미치는 영향

박종욱, 김상우

서울대학교 지구환경과학부

대기 중 이산화질소(NO_2)의 공간적 분포와 변동 특성을 정확하게 이해하는 것은 광화학 반응에 대한 이해를 높이고 이산화질소가 전구물질의 역할을 하는 오존 및 이차생성 에어로졸의 효과적인 저감 전략을 개발하기 위해 필수적이다. 본 연구에서는 지상 판도라 분광계와 TROPOMI 위성으로부터 관측된 이산화질소 연직기주농도를 이용하여 도심 및 교외 지역에서 나타나는 이산화질소의 시공간적 변동 특성을 파악하고, 이러한 변동 특성이 지상 원격 관측 자료를 이용하여 위성 산출물의 검증을 시도하는 과정에서 어떻게 고려되어야 하는지를 분석하였다. 높은 시간 해상도의 판도라 직달일사 관측자료로부터 산출된 이산화질소 연직기주농도의 시간적 변동성은 서울과 같은 도심 지역에서, 여름보다는 겨울에, 하루 중에는 정오 부근에 가장 크게 나타났다. 서울의 두 지점(서울대학교, 연세대학교)에서의 판도라 관측자료로부터 같은 도시 내에서도 지역적 배출원이나 대기경계층 내의 바람장에 따라 관측되는 이산화질소 농도가 크게 달라지는 것을 확인하였으며, 이는 곧 도심 지역 판도라 관측자료에서 나타나는 이산화질소의 높은 시간변동성이 도심 내 배출원의 공간적 비균질성과 지표 부근에서의 이류의 영향으로 해석 가능함을 시사한다. 이렇듯 높은 이산화질소의 공간적 비균질성에 기인하여 일반적으로 매우 좁은 영역에서 대표성을 지니는 것으로 여겨지는 판도라 직달일사 관측조차도 관측 기하조건(관측 방위각)에 따라 0.1 DU 이상의 유의미한 차이를 보였다. 다만, 판도라 직달일사 관측의 제한된 수평적 공간 대표성과 도심에서 나타나는 이산화질소의 높은 공간적 비균질성은 제한된 공간 해상도를 가지는 TROPOMI와 같은 위성과 지상 판도라 관측자료를 비교·검증하는 과정에서 중요한 오차 요인으로 작용한다. 이러한 특성을 고려하기 위하여 전세계 다양한 대기 환경 조건에서 위성과 지상 판도라 관측 자료의 비교를 위한 최적의 정합(collocation) 방법에 대하여 분석한 결과, 일반적으로 도시 지역에서는 정합 관계에 있는 판도라와 위성 관측값을 상호 비교 전에 각각 평균을 취한 후 비교하는 것이 위성 관측의 공간 평균 효과에 따른 랜덤 오차를 상쇄하는데 효과적이었다. 이러한 접근은 위성 관측시 낮은 신호대잡음비로 상대적으로 랜덤 오차의 영향이 크게 나타나는 포름알데히드와 같은 기체상 물질을 검증하는데에도 적용하는 것이 효과적임을 확인하였다.

Key words: 이산화질소, 판도라 분광계, 위성 산출물 검증, 시공간적 변동성