

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 1-1

동아시아 태풍-제트 상호작용에 의한 상층난류 메커니즘 연구

이주현, 김정훈

서울대학교 지구환경과학부

깊은 대류 혹은 태풍(Tropical Cyclone, TC)에서 유도되는 상층 유출과 제트기류의 상호작용(TC-Jet Interaction, TJI)은 가장 강력한 제트기류가 존재하는 동아시아 및 북서 태평양 지역에서의 상층 난류의 빈번한 발생에 기여할 수 있다. Lee et al. (2025)은 2019년 태풍 하키비스 전향 시기, TJI에 의해 강화된 북서쪽 전면 지역의 관성 불안정이 태풍으로부터 뿜어 나오는 방사형 유출류를 가속화함으로써 대류 불안정과 함께 중강도 이상의 난류를 일으켰음을 보였다. 본 연구에서는 이를 바탕으로 ECMWF Reanalysis version 5 모델면 자료를 이용하여 하키비스 전 생애주기 동안 TJI로 유도되는 다양한 불안정에 의한 상층 난류 발생·발달 과정을 분석하였다. 난류 진단 지수로는 Turbulent Index 3 (TI3)를, TJI의 객관적인 기간 및 강도 정의를 위해서는 비회전성 바람에 의한 Negative Potential Advection (NPA)를 계산하였다. 그 결과, NPA가 0에 근접하는 태풍 전향 이전 시기에는, 태풍 북쪽 전면의 낮은 관성 안정도 구역의 존재에도 불구하고 상층 유출류 내에서 TI3는 나타나지 않았다. 반면 태풍 전향 이후 NPA가 $-2.0 \text{ PVU day}^{-1}$ 이상으로 급격하게 증가하자 태풍 북서쪽 전면에서는 $1.2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 이상의 높은 TI3가 나타났다. 이는 관성 불안정 발생으로 강화된 방사형 유출류가 유도하는 시어 불안정 지역과 일치하였으며, TJI가 태풍 상층 유출류 내 난류 발생에 중요 역할로 작용함을 시사하고 있다. 하키비스는 온대 저기압(Extratropical Cyclone, ETC)으로 전환되었으며, NPA는 $-1.2 \text{ PVU day}^{-1}$ 로 TJI는 지속되었다. ETC의 비단열 과정으로 생성된 상층의 낮은 잠재 와도(Potential Vorticity)는 유출류를 따라 중위도 제트로 유입되었으며, 이는 제트 스트릭의 강화와 태풍 풍하측 기압능의 증폭을 야기하였다. 능의 증폭은 남북 성분의 수평 바람 강화 및 로스비파 파괴로 이어진 것으로 분석되며, 남북 방향 제트 북쪽의 저기압성 시어가 매우 강한 영역을 따라 항공기 관측자료에서 중강도 이상의 난류가 보고되었다. 해당 지역에서는 로스비파 파괴에 기인한 기류 변형이 뚜렷하게 나타났으며, 특히 제트 스트릭 강화에 따른 연직 바람 시어 최댓값이 나타난 제트 코어 상층은 국지적으로 양의 PV 아노말리가 나타난 지역과 일치하였다. 이를 통해 태풍으로부터 유도된 비단열 과정에 의한 PV 변형이 난류 발생에 추가적인 요인으로 작용한 것으로 해석되며, ETC 단계에서는 깊은 대류와 수천 km 이상 떨어진 증폭된 기압능 인근에서도 TJI에 의해 간접적으로 유도된 매우 강한 연직 바람 시어로 인해 간헐적인 난류가 발생할 수 있음을 확인하였다.

Keywords: 상층 난류, 태풍, 동아시아 제트, 관성 불안정, 잠재 와도

※ 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」 (RS-2022-KM220310)의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-24683550)으로 수행되었습니다.

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 1-2

열대 성층권 준격년진동의 주기 변동 원인

김영하

서울대학교 기초과학연구원

열대 성층권에서는 서풍과 동풍이 교대로 나타나는 준격년진동(QBO: quasi-biennial oscillation)이 발생하며, 진동 주기는 약 20-35개월 내에서 불규칙하게 변한다. QBO는 성층권 대기 순환과 지표 기후를 경년 규모에서 조절하는 중요한 역할을 함에도 불구하고, 그 주기의 불규칙한 변동 원인은 여전히 명확히 규명되지 못했다. 본 연구에서는 QBO 주기의 변동이 주로 대기중력파의 변동성에 의해 주도되며, 기존의 연구들에서 중시되어온 Brewer-Dobson 순환의 계절변동은 부분적으로만 기여함을 보였다. 비교적 고해상도의 대기 재분석자료인 ERA5를 사용하여 중력파 활동의 시간적 변동을 포착하였고, 이것이 QBO 진행속도의 변동과 일치함을 통계적, 역학적 분석을 통해 확인하였다. 이러한 파동 활동의 변동은 열대 대류와 대류권계면층(tropical tropopause layer) 내 바람의 계절성에 기인하였다. 본 연구 결과는 다양한 규모의 운동(대류, 대규모순환, 중력파 등) 간 상호작용을 정밀하게 모의하는 것이 QBO 재현 및 계절예측 정확도 향상에 중요함을 시사한다.

Keywords: 준격년진동, 대기중력파, Brewer-Dobson 순환, 규모 간 상호작용

※ 이 연구는 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2023-00244727)

Influence of Stratospheric Aerosol Injection on Parameterized Convective Gravity Wave Forcing in the Equatorial Stratosphere

Hyun-Kyu Lee and Hye-Yeong Chun

Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University

This study investigates the influence of stratospheric aerosol injection (SAI) on parameterized convective gravity waves (CGWs) based on off-equatorial (GLENS) and equatorial (GEQ) injection experiments conducted with CESM1. The parameterized CGW momentum flux (CGWMF) is proportional to the square of the tropospheric heating. While the launched CGWMF in RCP8.5 during the late-future (LF; 2060–2069) increases by 16% compared to the present-day (PD; 2020–2029), SAI strategies suppress this strengthening. The equatorial injection strategy (GEQ) induces tropospheric cooling, which reduces the launched CGWMF by 14% relative to PD. Furthermore, SAI-induced stratospheric warming modifies stratospheric winds. In GEQ, localized equatorial warming produces a negative temperature curvature in the equatorial lower stratosphere, leading to the development of westerlies. Conversely, off-equatorial warming in GLENS produces a positive curvature that strengthens easterlies. Both the changes in convective sources and the modifications of zonal winds contribute to the CGW drag (CGWD). During the descending westerly QBO, the CGWD in GEQ is $-0.09 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ at 10 hPa during the LF period, which is different from $0.33 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in RCP 8.5. This is because GEQ produces negative wind shear in the middle stratosphere, preventing the dissipation of eastward-propagating CGWs. In contrast, although the launched CGWMF is weaker in GLENS, the CGWD in GLENS is $0.51 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$, much stronger than that in RCP8.5. This is because the positive wind shear develops below 10 hPa in GLENS, leading to more wave dissipation. During the descending easterly QBO, the magnitudes of CGWD in GEQ and GLENS (-0.40 and $-0.44 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$, respectively) are reduced compared to $-0.66 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in RCP8.5. This reduction is attributed to the weakened launched CGWMF at 100 hPa.

Keywords: Stratospheric aerosol injection, Convective gravity wave, Quasi-biennial oscillation, Geoengineering

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 1-4

온대저기압의 전지구적 특징 분석

이재덕¹, 장은철^{1,2}

¹공주대학교 지구환경연구소

²공주대학교 대기과학과

온대 저기압(ETC)은 열대에서 고위도로 과잉의 열·수증기·운동량을 운반하여 날씨와 기후 변동성에 영향을 주는 기상현상이다. 본 연구에서는 소용돌이도-류함수(vorticity-streamfunction) 장을 기반으로 한 라그랑지 추적 알고리즘을 제시하고, 이를 2014-2023년 ERA5 재분석에 적용해 전 지구 ETC의 특성을 분석하였다. ETC는 대체로 산맥의 풍하측(lee side)과 외해에서 발생하고, 풍상측(windward)과 극지에서 소멸하는 특징을 보인다. 대부분의 ETC는 외해 상에서나 극 방향으로 이동하면서 강해지며, 특히 북태평양과 북대서양 분지에서 그 경향이 뚜렷하다. 남반구의 ETC는 북반구보다 더 강하고, 더 자주 발생하며, 계절성이 약하고, 수명도 약간 더 길게 나타났다. 또한 최저 해면기압은 봄과 겨울철 약한 쌍봉(bimodal) 분포를 보였고, 이는 극지 및 중위도에서 ETC가 발생에 의한 것으로 분석되었다. 이러한 ETC의 반구 간 대비는 대체로 해양과 육지의 분포 차이로 설명될 수 있다.

Keywords: 온대저기압, Vorticity streamfunction, 온대저기압의 계절 변동, Bimodality

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상에 대한 분석·예보의 융합기술 고도화」(KMA2018-00121)의 지원으로 수행되었습니다.

Local energetics of extratropical transition: A case study of typhoon Hagibis (2019)

Yeeun Kwon, and Seok–Woo Son

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Tropical cyclones (TCs) that travel to the midlatitudes often undergo profound structural changes, transitioning into extratropical cyclones (ETCs). This transition, known as the extratropical transition (ET), has often been examined with the cyclone phase space diagram. However, the phase space diagram does not capture the dynamical processes responsible for ET. This study proposes a local energetics framework to examine ET dynamics, and its usefulness is demonstrated by applying it to TC Hagibis (2019) in the western North Pacific. All energy budget terms exhibit larger magnitude during ET phase than TC phase, indicating more active energy cycles. In both the TC and ET phases, eddy available potential energy increases as its generation and conversion from mean available potential energy dominate over the baroclinic conversion process. During ET, enhanced diabatic heating, warm temperature anomalies, and vertical motion appear ahead of the cyclone due to its interaction with the midlatitude jet. This leads to an asymmetric distribution of enhanced energy sources and energy conversions. While eddy kinetic energy also increases in the TC phase as baroclinic conversion exceeds boundary flux, it decreases during ET because of enhanced divergence of eddy geopotential flux ahead of the cyclone. These results show that local energetics can effectively capture asymmetric thermal and dynamical evolution during ET, offering a physical interpretation of TC-to-ETC transition processes.

Keywords: extratropical transition, local energetics, typhoon Hagibis (2019)

대기역학 및 수치모델링 분과 / 대기역학 1-6

Nonlinear Modification of Gravity Wave Momentum Flux Induced by Multiple Convective Cells

Jaemyeong Mango Seo, Jong-Jin Baik

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Convectively generated gravity waves play a crucial role in driving middle- and upper-atmospheric circulation through their momentum transport and deposition. Current parameterizations in global models usually treat subgrid convection as a single representative source per grid box, thereby neglecting potential nonlinear interactions among multiple convective cells. Building on an analytic framework previously used for single-cell heating, we revisit the formulation and extend it to multiple convective cells. In particular, we derive expressions for the momentum flux when two, several, or infinitely many cells interact, highlighting the emergence of cross-terms beyond the linear sum of individual contributions. These expressions allow us to quantify how the organization and spacing of convective cells modify the net gravity wave momentum flux. We further discuss how such modifications may affect parameterized gravity wave drag in coarse-resolution models. This study suggests a theoretical basis for discussing the potential role of convective organization in gravity wave parameterizations.

Keywords: Convective gravity waves, stratified atmosphere, momentum flux, nonlinear interaction, parameterization

※ 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」 (RS-2022-KM220310)의 지원으로 수행되었습니다.