

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “오로라 발생과 극지 고층대기 교란 및 기후 변동성과의 상관 관계 규명”
과제의 위탁연구 “오로라 화학물질 수송 과정에서 대기중력파의 역할 수치모델 연구” 과제의
단계보고서로 제출합니다.



| | | |
|---------------|---|-------------|
| (본과제) 총괄연구책임자 | : | 지 건 화 |
| 위탁연구기관명 | : | 연세대학교 산학협력단 |
| 위탁연구책임자 | : | 송 인 선 |
| 위탁참여연구원 | : | 심 자 순 |
| “ | : | 이 원 석 |

요 약 문

I. 제 목

오로라 화학물질 수송 과정에서 대기중력파의 역할 수치모델 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구의 최종 목표는 오로라 입자에 의해 생성된 대기 화학물질 수송 과정에 대기 중력파가 미치는 역할을 규명하는 것이다. 이를 위하여 본 연구에서는 중력파 모수화를 개선하고 개선된 중력파 모수화를 전층대기모델에 장착한 뒤 모델 성능 개선 실험을 수행하였다. 아직 명확히 밝혀지지 않은 고층대기 화학 과정에 미치는 중력파의 영향을 파악하는 것은 중요하며, 이를 통하여 오로라가 발생하는 극지고층대기에 대한 과학적 이해도를 높일 수 있을 것이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 전층대기모델 (Whole atmosphere model: WAM)의 실험 체계 구축
 - 단순화된 WAM과 NCAR WACCM6 수행 시스템 구축
 - 양 기관의 시스템에서 동일한 실험에 대해 동일한 결과가 나오는지 확인
2. 산악 2차 중력파를 이용한 중력파 모수화 개선
 - 모수화 개선 공식 제시
 - 모수화를 통해 단순화된 WAM 성능 개선 (자오면 순환 및 화학물질 수송)
3. 개선된 중력파 과정과 WACCM6를 이용한 오로라 화학물질 수송 실험
 - 새로운 2차 모수화 공식 (혹은 방법론)을 WACCM6에 장착
 - 사례 실험을 통해 새로운 중력파 모수화를 장착한 WACCM6를 이용한 오로라 기인 화학물질 수송 실험

IV. 연구개발결과

본 과제를 통하여 극지연구소 고층대기탐 서버 및 연세대학교 연구실 서버에 단순화된 WAM과 WACCM6 수행 시스템을 동일하게 구축하였다. 한편, 본 과제를 통하여 총 3편의 SCI 논문 (Kam et al., 2021; Lee et al., 2021; Song et al., 2023)이 게재되었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 결과는 전층대기모형 내 중력과 모수화 개선 연구의 기반이 될 것이며, 이는 보다 현실적인 전층대기모형 개발에 활용될 것이다. 또한 본 연구의 결과는 지자기 폭풍과 연관된 화학 현상이 지면 근처 기후 변화에 주는 영향을 판단하는데 활용될 것이다.



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

A numerical study on the roles of atmospheric gravity waves in the transport of aurora-induced chemicals

II. Purpose and Necessity of R&D

The purpose of the study is to investigate the role of atmospheric gravity waves (GWs) in the process of transporting atmospheric chemicals produced by aurora particles. In this study, the improved GW drag (GWD) parameterization is mounted on the Whole atmosphere model (WAM) and the changed model performance is investigated. It is important to understand the effect of GWs on upper atmospheric chemical processes that have not yet been clarified, and this will improve our understanding of the polar upper atmosphere where aurora occurs.

III. Contents and Extent of R&D

1. Establishment of an experimental system for WAM

- Establishment of the simplified WACM and NCAR WACCM6 system
- Validation of modeling results using two different systems

2. Improving the GWD parameterization using secondary orographic GWs

- A formula for improving the parameterization
- Improving the simplified WAM using the parameterization (meridional circulation and chemical transportation)

3. Experiments on the transportation of aurora chemicals using WACCM6 with the improved GWD parameterization

- Mounting the improved GWD parameterization to WACCM6
- Case study for aurora chemical transportation using WACCM6

IV. R&D Results

The simplified WAM and WACCM6 systems were installed on the Polar Aeronomy and Space science Laboratory (PASL) in KOPRI and Mathematical Atmospheric Physics Laboratory (MAPL) in Yonsei University. And, three SCI papers (Kam et al., 2021; Lee et al., 2021; Song et al., 2023) are published.

V. Application Plans of R&D Results

The results of this study will be the basis of the improved secondary GW parameterization, and it will be used to develop a more realistic whole atmospheric model. In addition, the results of this study will be used to determine the effect of chemical processes associated with geomagnetic storms on climate change near the surface.



목 차

| | |
|--|----|
| 제 1 장 서론 | 15 |
| 제 2 장 국내외 기술개발 현황 | 16 |
| 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 | 19 |
| 제 1 절 전층대기모델의 실험 체계 구축 | 19 |
| 1. 극지연구소 고층대기탑 AURORA 서버에 구축 | 20 |
| 1.1 AURORA 서버에 SWAD 구축 | 20 |
| 1.2 AURORA 서버에 NCAR WACCM6 (CESM2) 수행 시스템 구축 | 22 |
| 2. 연세대학교 대기과학과 수리대기물리 연구실 Lumos 서버에 구축 | 24 |
| 2.1 Lumos 서버에 SWAD 구축 | 24 |
| 2.2 Lumos 서버에 WACCM6 시스템 구축 | 26 |
| 제 2 절 산악 2차 중력파를 이용한 중력파 모수화 개선 | 27 |
| 1. 산악에 의한 2차 중력파에 기초한 모수화 개선 | 28 |
| 2. 개선된 모수화를 통한 모델 성능 개선 평가 분석 | 30 |
| 2.1 동서평균 동서류 구조 분석 | 33 |
| 2.2 동서평균 온도 구조 분석 | 40 |
| 2.3 하부 열권 화학물질 혼합비 분포 분석 | 43 |
| 2.4 북반구 고위도 중층대기 실험 결과 및 성층권 돌연 승온과의 연관성 | 48 |
| 2.5 중력파에 의한 동서평균 동서 가속도 구조 분석 | 58 |
| 2.6 엘리야센-팜 속 발산 구조 분석 | 63 |
| 2.7 남북방향 잔여순환 구조 분석 | 65 |
| 제 3 절 개선된 중력파 과정과 WACCM6를 이용한 오로라 화학물질 수송 실험 | 67 |

| | |
|-----------------------------------|----|
| 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 | 68 |
| 제 5 장 연구개발결과의 활용계획 | 70 |
| 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 | 71 |
| 제 7 장 참고문헌 | 72 |



표 차 례

| | |
|---|----|
| 표 1-1. 극지연구소 고층대기팀 AURORA 서버 소프트웨어 환경 | 17 |
| 표 2-1. 다양한 이상화된 모델 (SWAD) 실험 설계 정리표 | 27 |



그림 차례

| | |
|--|----|
| 그림 1-1. 태양 활동의 강약에 따른 복사 평형 온도의 분포 및 차이 | 16 |
| 그림 1-2. 극지연구소 AURORA 서버 내 SWAD 모델 (위) 수행 시작 및 (아래) 수행종료 시 로그 화면 | 18 |
| 그림 1-3. 극지연구소 AURORA 서버에 설치된 CESM2의 모델 component 정보 | 19 |
| 그림 1-4. 극지연구소 AURORA 서버 내 CESM2 수행 결과 | 20 |
| 그림 1-5. 연세대학교 Lumos 서버 내 모델 (위) 수행 시작 및 (아래) 수행 종료 시 로그 화면 | 22 |
| 그림 1-6. 연세대학교 Lumos 서버 내 CESM2 수행 결과 | 23 |
| 그림 2-1. 시간에 따른 (a부터 d까지) 대류 중력파와 2차 중력파의 변화 양상 (Holton & Alexander, 1999) | 24 |
| 그림 2-2. 동서방향 평균류 강제력에 대한 2차 중력파의 전파를 위에서 본 모습 (Vadas et al., 2003) | 25 |
| 그림 2-3. 개선된 2차 산악중력파 모수화 계산 코드 | 26 |
| 그림 2-4. 400 hPa에서 지정되는 비산악 중력파 운동량 속의 위도별 분포. | 28 |
| 그림 2-5. 중력파 간헐성 인자의 연직 변화에 대한 설정 | 29 |
| 그림 2-6. 1월에 대한 동서평균 동서류의 기후값 (SPARC) 및 primary 중력파 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 동서류. | 30 |
| 그림 2-7. SWAD 모델에서 primary 중력파 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 동서류. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 10 m s^{-1}$ 로 설정함. | 31 |
| 그림 2-8. 그림 2-7과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 31 |
| 그림 2-9. 그림 2-7과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 32 |
| 그림 2-10. 그림 2-7과 동일. 단, primary 중력파 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 32 |
| 그림 2-11. 그림 2-10과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 32 |
| 그림 2-12. 그림 2-10과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 33 |
| 그림 2-13. 그림 2-11과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 으로 설정함. | 34 |
| 그림 2-14. 그림 2-13과 동일. 단, primary 중력파 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함. | 34 |
| 그림 2-15. 7월에 대한 동서평균 동서류의 기후값 (SPARC) 및 primary 중력파 간헐성 인자에 따른 | |

| | |
|---|----|
| SWAD 모델에서의 동서평균 동서류. 단, CTRL1과 CTRL2 실험만 수행됨. | 35 |
| 그림 2-16. 그림 2-15와 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정하고, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 35 |
| 그림 2-17. 그림 2-16과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 36 |
| 그림 2-18. 1월에 대한 동서평균 온도의 기후값 (SPARC) 및 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 온도. | 38 |
| 그림 2-19. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 온도. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 38 |
| 그림 2-20. 그림 2-19과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 38 |
| 그림 2-21. 그림 2-20과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 39 |
| 그림 2-22. 그림 2-21과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함. | 39 |
| 그림 2-23. 1월에 대한 동서평균 동서류 (CTRL0) 및 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 하부 열권 생성 화학 물질 혼합비 분포. | 41 |
| 그림 2-24. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 화학 물질 혼합비. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 10 m s^{-1}$ 로 설정함. | 41 |
| 그림 2-25. 그림 2-24와 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 41 |
| 그림 2-26. 그림 2-24와 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 42 |
| 그림 2-27. 그림 2-24와 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 42 |
| 그림 2-28. 그림 2-27과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 42 |
| 그림 2-29. 그림 2-27과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 43 |
| 그림 2-30. 그림 2-28과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 으로 설정함. | 43 |
| 그림 2-31. 그림 2-30과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함. | |

| | |
|---|----|
| 그림 2-32. Primary 중력과 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도에서의 동서평균 화학 물질 혼합비의 시간-고도 분포 | 46 |
| 그림 2-33. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 북위 60도의 동서평균 화학 물질 혼합비의 시간-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 10 m s^{-1}$ 로 설정함. | 46 |
| 그림 2-34. 그림 2-33과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 47 |
| 그림 2-35. 그림 2-33과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 47 |
| 그림 2-36. 그림 2-33과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 48 |
| 그림 2-37. 그림 2-36과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 48 |
| 그림 2-38. 그림 2-36과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 49 |
| 그림 2-39. 그림 2-37과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 으로 설정함. | 49 |
| 그림 2-40. 그림 2-39과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함. | 50 |
| 그림 2-41. Primary 중력과 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도에서의 동서평균 동서류의 시간-고도 분포 | 51 |
| 그림 2-42. Primary 중력과 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도, 고도 10hPa에서의 동서평균 동서류의 시계열 | 51 |
| 그림 2-43. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 북위 60도의 동서평균 동서류의 시간-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 53 |
| 그림 2-44. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 북위 60도, 고도 10hPa의 동서평균 동서류의 시계열. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 53 |
| 그림 2-45. 그림 2-43과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 54 |
| 그림 2-46. 그림 2-44와 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 54 |

| | |
|--|----|
| 그림 2-47. 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 동서 가속도의 위도-고도 분포 | 56 |
| 그림 2-48. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 동서 가속도의 위도-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 56 |
| 그림 2-49. 그림 2-48과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 57 |
| 그림 2-50. 그림 2-49와 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 10 m s^{-1}$ 로 설정함. | 57 |
| 그림 2-51. 그림 2-49와 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 57 |
| 그림 2-52. 그림 2-48과 동일. 단, 2차 중력파에 의한 동서평균 동서 가속도에 대한 결과임. | 59 |
| 그림 2-53. 그림 2-52와 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 59 |
| 그림 2-54. 그림 2-52와 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 59 |
| 그림 2-55. 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 엘리아센-팜 속 발산 (Eliassen-Palm flux divergence; EPD)의 위도-고도 분포 | 60 |
| 그림 2-56. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 EPD의 위도-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 61 |
| 그림 2-57. 그림 2-56과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 61 |
| 그림 2-58. 그림 2-56과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. | 61 |
| 그림 2-59. 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 남북방향 잔여순환 (\bar{v}^*)의 위도-고도 분포. | 62 |
| 그림 2-60. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달의 위도-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함. | 63 |
| 그림 2-61. 그림 2-60과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함. | 63 |

그림 2-62. 그림 2-60과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 로 설정함. 63

그림 3-1. 동서평균 동서류 (CTRL1)과 하부 열권에서 생성된 화학물질의 시간-평균된 자오면 분포. 여기서 SCGW-1 및 SCGW-3 (SCGW-8)은 고도 100 km에서 primary 중력파의 효과를 50% (10%)로 줄인 실험이며, SCGW-1은 2차 중력파 운동량 속을 비산악 중력파 최대의 10%로 설정 (0.16 mPa) 하였고, SCGW-3 및 SCGW-8은 2차 중력파 운동량 속을 비산악 중력파 최대로 설정 (1.6 mPa) 한 실험이다. 64



제 1 장 서론

극지는 지구 자기장이 우주로 열려있는 지역으로서, 근지구 우주 환경 내에서 생성된 오로라 입자 (전자 혹은 양성자)가 극지 고층 대기로 자기력선을 따라 쉽게 유입될 수 있다. 자기력선을 따라 유입되는 오로라 입자는 고도 100 km 부근의 하부 열권에서 대기 구성 분자들과 상호작용하면서 그 지역에서 질소 산화물 (NO_x)이나 산화수소 라디칼 (HO_x)를 생성할 수 있다.

오로라 입자에 의해서 생성된 질소 산화물은 산화수소 라디칼에 비해 생존 기간이 수개월 이상으로 길어 대기 순환에 의해 먼 지역으로 수송될 수 있다. 열권 하부의 질소 산화물을 수송할 수 있는 질량 순환은 중간권 상부 및 열권 하부에서 여름 반구에서 겨울 반구로 향하는 자오면 순환 (양극을 관통하는 거대한 단일 세포 형태의 자오면 순환)이며, 이 자오면 순환은 대기 중력파에 의한 각운동량 강제력에 의해 생성된다.

대기 중력파에 의해 생성된 자오면 질량 순환은 오로라 입자에 의해 생성된 질소 화합물을 겨울철 극 제트 내부로 수송하며, 이렇게 수송된 질소 화합물은 극 제트 내부 오존을 소멸하게 하는 화학 반응을 일으킬 수 있다. 극야 지역에서 오존은 적외 복사를 통해 극야 제트 내부의 온도를 떨어뜨리는데, 오로라 입자로 인한 오존의 소멸로 인해 극야 제트 내부의 온도를 상승시켜 극 제트 역학에도 영향을 줄 수 있다.

대기 중력파가 유도하는 자오면 질량 순환은 보통 중간권계면 (중간권과 열권의 경계) 부근에 위치하는 것으로 알려져 있으나, 실제로 많은 모델에서 겨울철 중간권계면의 고도를 훨씬 낮게 모의하고 있다. 위성 레이더 관측은 겨울 중간권계면은 대체로 뚜렷하지 않으며 고도 90-100 km에 위치함을 보여주나, 많은 전지구 모델은 겨울 중간권계면 고도를 대체로 약 10 km 정도는 아래로 모의하고 있는 실정이다. 모델의 겨울 중간권계면의 이러한 오차는 모델 내 대기 중력파 과정이 계산하는 중력파 운동량 강제력의 오차로 인한 것일 수 있다. 추가로 이러한 중력파 운동량 강제력에 동반되는 난류에 의한 연직 혼합이 모델에서 작게 모의되는 것에 의해서도 기인할 수 있다. 본 연구에서는 두 가지 가능한 요인 중에서 중력파 운동량 강제력의 오차를 줄이는 것에 초점을 두고 연구하였다.

겨울철 중력파 강제력의 오차를 줄이기 위해서, 겨울철 양반구 모두에서 중요한 역할을 하는 산악파가 깨어지면서 유도하는 2차 중력파에 대한 효과를 고려해 보고자 하였다. 산악에 의한 1차 중력파는 보통 제트의 크기를 줄이는 역할만 하지만 산악에 의한 2차 중력파는 제트의 크기를 크게 만드는 역할도 하기 때문에, 모델에서 과도하게 낮은 중간권계면의 고도를 높이는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단되고 있다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

대기 중력파는 저층대기에서 다양한 과정을 통해 발생한다. 그 다양한 과정은 지형, 대류, 대류권 제트의 지균 조절, 극제트로부터의 자발적인 파동 방출로 구분될 수 있다. 각 과정에 대한 연구는 아래에 나열 되었다.

- 지형: M. J. Alexander & Teitelbaum, 2007, 2011; Becker & Vadas, 2020; Fritts et al., 2016, 2021; Hindley et al., 2021; Hoffmann et al., 2013, 2016; Lund et al., 2020; Plougonven et al., 2008; Sato et al., 2012; Smith et al., 2013; Vadas & Becker, 2019; R. Walterscheid et al., 2016; Watanabe et al., 2006.

- 적은 대류: M. J. Alexander et al., 1995; Beres et al., 2002; Fovell et al., 1992; Heale et al., 2019; Holton & Alexander, 1999; Holt et al., 2017; Horinouchi et al., 2002; Lane et al., 2001, 2003; Liu et al., 2014; Pandya, 1999; Piani et al., 2000; Song et al., 2003; Stephan & Alexander, 2015; Taylor & Hapgood, 1988; Vadas, Taylor, et al., 2009; Vadas, Yue, et al., 2009; R. L. Walterscheid et al., 2001; Yue et al., 2009.

- 대류권 제트의 지균 조절: Fritts & Luo, 1992; Luo & Fritts, 1993; Vadas & Fritts, 2001; Watanabe et al., 2008).

- 극제트로 부터의 자발적인 파동 방출: S. Alexander et al., 2011; Becker et al., 2022; Chen et al., 2013; Dörnbrack et al., 2018; Gassmann, 2019; O'Sullivan & Dunkerton, 1995; Plougonven & Zhang, 2014; Sato & Yoshiki, 2008; Shibuya et al., 2017; Yoshiki & Sato, 2000; Yoshiki et al., 2004; Zülicke & Peters, 2006, 2008.

위의 과정을 통해서 발생한 대기 중력파는 상향으로 그 에너지가 전파하고, 수 배의 밀도 규모 고도까지 전파하면서 증폭될 수 있다. 실제로 이렇게 전파된 파동은 파동의 위상 속도와 평균류의 바람이 같아지는 임계 고도나 임계 고도가 아닌 곳이라도 과도하게 강해진 진폭으로 인해서 (정확하게 지수함수적 증가된 진폭으로 인해서) 부력적 (중력적) 붕괴 및 소산 (난류 및 분자 점성에 의한 소산)을 겪으면서 평균류와 상호작용하게 된다 (Fritts & M. J. Alexander, 2003; Hines, 1960; Pitteway & Hines, 1963; Vadas, 2007)

위의 과정을 통해서 최초로 발생한 중력파 (1차 중력파, primary gravity waves)가 임계 고도나 붕괴/소산을 통해서 평균류를 변화시킬 때, 1차 중력파는 평균류에 운동량과 에너지를 전달하고, 특히 국지적인 평균류 규모의 body force를 만들어내게 된다. 이 국지적인 평균류의 body force가 2차 중력파 (secondary gravity waves)라는 새로운 중력파를 생성하게 된다 (Becker & Vadas, 2018; Heale et al., 2020; Vadas & Becker, 2018; Vadas

& Liu, 2009, 2013; Vadas et al., 2003, 2018).

1차 중력파가 독립적으로 고립되어 존재하고, 이 1차 중력파가 붕괴 혹은 소산되는 경우, 이 1차 중력파가 유도하는 2차 중력파는 1차 중력파의 수평 파장의 1/4에서 수 배에 달하는 수평 파장을 가질 수 있다. 하지만, 1차 중력파이 파동 붕괴 지역에서 다양한 파동들과 상쇄 혹은 보강 간섭을 한다면, 생성되는 2차 중력파의 파장은 1차 중력파의 수평 파장보다 훨씬 작아질 수 있다 (Vadas & Crowley, 2010; Vadas & Becker, 2018, 2019).

2차 중력파는 1차 중력파가 붕괴되는 과정에서 발생하는 비선형 상호작용을 통해 매우 작은 수평 파장을 갖는 중력파로서 생성될 수 있다 (Chun & Kim, 2008; Heale et al., 2020; Lane et al., 2003; Lund et al., 2020; Satomura & Sato, 1999; Snively & Pasko, 2003). 하지만, 이러한 작은 수평 파장의 2차 중력파는 수평 위상 속도도 작아서 발생한 지역에서 멀지 않은 곳에서 평균류에 재흡수되는 경향이 있기는 하지만, 일부분은 발생 지역을 벗어나서 멀리까지 전파하기도 한다 (Fritts et al., 2021; Heale et al., 2020).

관측에서 흔히 2차 중력파와 관련해서는 생선 뼈 구조 (fishbone structure)라는 것이 발견된다 (Vadas et al., 2018). 이 구조는 1차 중력파의 중력파 운동량 강제력이 발생한 위치에서 온도 섭동을 시간-고도 분포로 표시했을 때, 1차 중력파의 body force에서 위 아래로 서로 다른 상향/하향 위상 속도를 갖고 전파하는 2차 중력파가 만드는 온도 구조이다. 이러한 생선 뼈 구조는 1차 중력파 body force가 위치한 고도를 중심으로 고도에 대해서 대칭적인 온도 섭동 구조를 보인다. 이러한 생선 뼈 구조는 1차 중력파 운동량 강제력의 방향의 직각 방향이 아닌 한, 어떠한 위치에서도 발견될 수 있다 (Vadas et al., 2003).

겨울철 극지 성층권 및 중간권에서는 관성 중력파 형태의 중력파가 자주 관측된다. 이러한 파동은 남극 지역 관측 기지인 맥머도 (Chen & Chu, 2017; Chen et al., 2013, 2016; Zhao et al., 2017), 쇼와 기지 (Shibuya et al., 2017), ALOMAR (Baumgarten et al., 2015; Strelnikova et al., 2020), 독일 쾰른스본 (Strelnikova et al., 2021), 알래스카 (Nicolls et al., 2010; Li et al., 2021), 그리고 안데스 라이다 관측소 (Huang et al., 2017)에서의 관측을 통해서 보고되어 왔다. 이러한 관성 중력파는 주로 1차 산악파에 의해 생성된 2차 혹은 다중 차수 중력파일 수 있음은 이미 알려져 있으며 (Becker & Vadas, 2018; Vadas & Becker, 2018), 이러한 연구들이 본 위탁 연구의 근간을 이룬다.

1차 산악파에 의한 2차 중력파 외에도 최근 다른 원천 혹은 과정에 의한 2차 중력파에 대한 연구가 보고된 바 있다 (Vadas et al., 2023). 이 연구에 따르면, 2016년 1월 극제트 와동에 의해 발생한 관성 중력파 (Becker et al. 2022)가 수평 바람의 연직 시어가 큰 중층 대기에서 대규모 흐름으로부터의 운동에너지 수송을 통해서 증폭되며, 이 증폭 과정이

평균류로부터 중력파로의 빠른 에너지 추출을 가능케 하는 것을 보인다. 이러한 제트로부터 발생한 1차 중력파가 붕괴/소산되면서 국지적인 평균류 운동량 강제력을 유도하고 이 운동량 강제력이 2차 중력파를 유도할 수 있음이 보고된 바 있다.

본 연구에서는 아직 극제트 vortex가 유도하는 1차 중력파가 야기하는 2차 중력파까지는 다루지 않고 있다. 겨울철 상부 중간권에서의 바람 구조가 오로라 화학 물질의 수송에 중요하고, 성층권에서 강한 1차 중력파 항력을 줄 수 있는 산악에 의한 1차 중력파를 우선적으로 고려하고자 한다. 대류권-성층권 제트에 의한 중력파에 의한 운동량 강제력은 보통 중간권 중상부에서 이미 강하기 때문에 2차 중력파가 전파하는 고도 거리가 짧을 것으로 판단하여 본 연구에서는 산악에 의한 1차 중력파가 유도하는 2차 중력파에 초점을 맞추었다.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 전층대기모델의 실험 체계 구축

본 연구에서 전층 대기 역학 과정 연구를 위한 시스템 (System for Whole Atmosphere Dynamics research: SWAD)은 미국 국립 대기연구소 (NCAR) 지구시스템 모델의 대기 모델에 장착되어 있는 준암시-준라그랑지안 (Semi-implicit and semi-Lagrangian) 역학 모델 (Williamson & Olson, 1994)를 활용하여 제작하였다. 모델은 이론적으로 고안된 복사 평형 온도를 넷징시킴으로써 구동된다. 역학 코어에 대한 자세한 기술은 Collins et al. (2004)에서 확인할 수 있다. 복사 과정 외에 중력과 항력 모수화 (NASA GEOS6 모수화: Molod et al. 2012) 및 상층의 분자확산에 의한 혼합 과정이 포함되어 있다. 모델 최상층은 약 140 km로서 열권 하부를 포함하며, 하층에는 현실적인 지형을 포함하고 있다.

이상화된 전지구 모델에서 사용하는 복사 평형온도는 Held and Suarez (1994)를 기반으로 Polvani and Kushner (2002)가 성층권으로 확장시켰다. Gerber and Polvani (2009)는 이 복사 평형 온도를 산악이 있는 대기에 적용하면서, 북반구 겨울철 온도 감률이 더 강해져야 함을 보였다. 최근 Cohen et al. (2014)는 이러한 복사 평형 온도를 중간권까지 확장하고, 모델에 중력과 항력 모수화를 포함시켜 보다 완결된 형태의 역학 모델에 활용하였다. 본 연구에서는 이러한 복사 평형 온도를 하부 열권까지 확대하여, 전층 대기 모델을 통해서 태양 변동성의 효과를 확인할 수 있도록 이상화된 전지구 모델을 개발하였다. 본 연구에서 사용한 복사 평형 온도의 예는 아래 그림 1-1에서 확인할 수 있다.

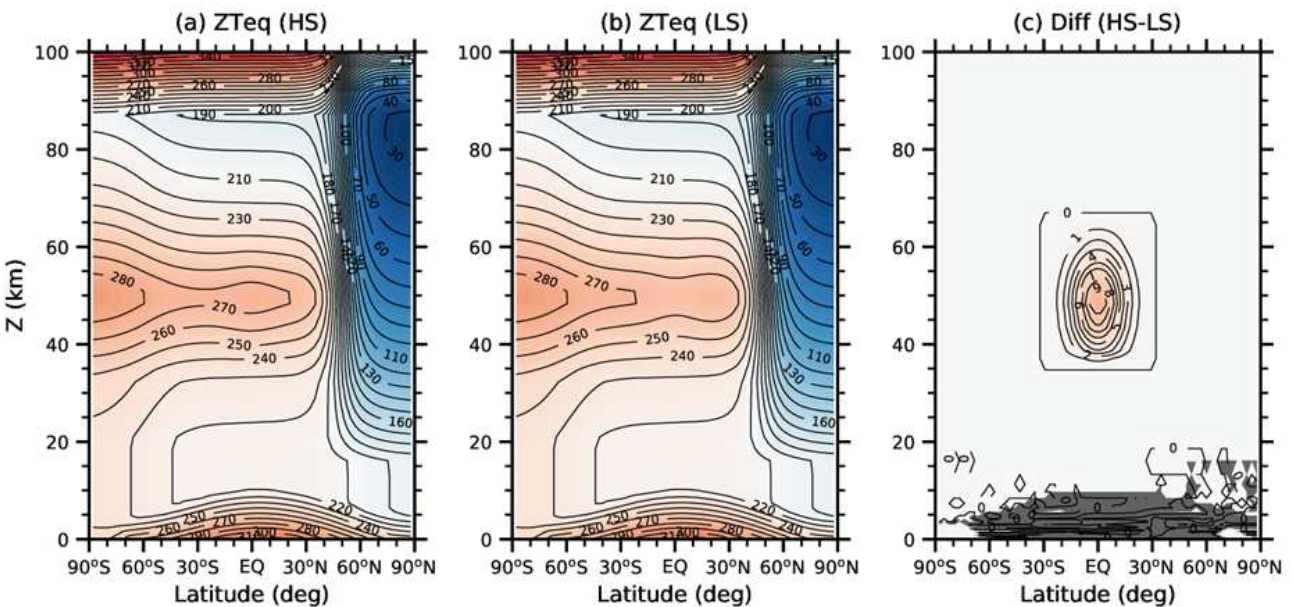


그림 1-1. 태양 활동의 강약에 따른 복사 평형 온도의 분포 및 차이

1. 극지연구소 고층대기탑 AURORA 서버에 구축

1.1 AURORA 서버에 SWAD 구축

극지연구소 고층대기탑 AURORA 서버의 소프트웨어 환경은 아래 표 1-1과 같다.

표 1-1. 극지연구소 고층대기탑 AURORA 서버 소프트웨어 환경

| 소프트웨어 종류 | 대상 및 내용 |
|-----------------------------------|--|
| 서버 AURORA OS | CentOS 7 Linux, 커널: 3.10.0-957.10.1.el7.x86_64 |
| 컴파일러 (Compiler) | INTEL 포트란 및 C 컴파일러, 19.0.3.199 20190206 빌드 버전 |
| | 포트란 컴파일러 (ifort) 옵션: -g -O2 -fp-model source -convert big_endian -assume byterecl -ftz -traceback -assume reloc_lhs -free |
| 병렬 라이브러리 | MPICH v3.3 (http://www.mpich.org) (단일 노드에서만 사용) MVAPICH v2.2 (Infiniband 환경에서는 MVAPICH 2.2 사용) |
| 푸리에 분석 모듈 | FFTW v3.3.8/3.3.10 (http://fftw.org/) |
| Network Common Data Form (NetCDF) | NetCDF-C: 4.6.3/4.8.1 (https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf) NetCDF-FORTRAN: 4.4.5 NetCDF-C++: 4.3.0 |
| Parallel NetCDF (PnetCDF) | PNetCDF: 1.6.1/1.12.3 (https://trac.mcs.anl.gov/projects/parallel-netcdf) Network File System 환경에서는 PNetCDF가 잘 작동하지 않는다는 CESM 측의 조언을 받아, 실제 output 생성에서 PNetCDF는 사용하지 않음 |

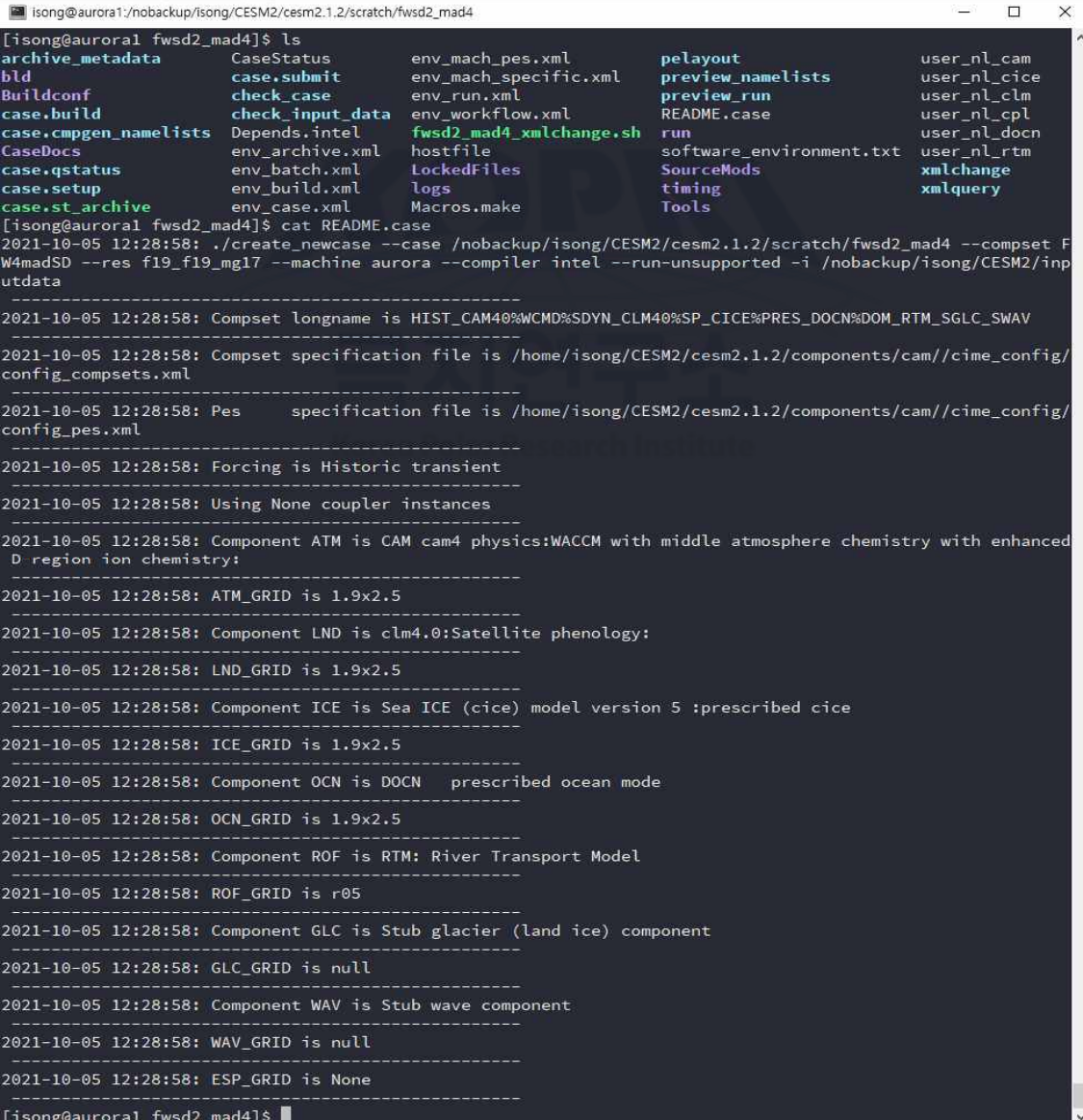
서버 내 SWAD 설치 테스트를 위하여 총 16개의 프로세스를 이용해서 모델의 1개월 적분을 수행하였으며, 그 결과 생성된 로그 파일의 시작 부분과 종료 부분은 그림 1-2와 같다.

모델 수행 시작 시 로그 화면 (그림 1-2 위)을 확인해보면, 처음에 총 16개의 병렬 프로세스가 계산에 참여하고 있음을 알 수 있으며, 모델 수행 종료 시 로그 화면 (그림 1-2 아래)에서는 1월 1일부터 1월 31일까지 총 1개월 동안의 모델 수행이 완료되었음을 확인할 수 있다.

1.2 AURORA 서버에 NCAR WACCM6 (CESM2) 수행 시스템 구축

본 연구에서는 NCAR에서 개발하여 배포하는 Community Earth System Model (CESM)의 2.1.2/2.1.3 버전을 극지연구소 고층대기팀 AURORA 서버에 설치한 뒤 테스트하였다. 서버에 설치된 CESM2.1.2/2.1.3은 CESM2의 안정화된 버전이며, PNetCDF를 제외하고는 (PNetCDF 1.10.0이 사용됨) 위의 표 1-1에 정리된 것과 동일한 소프트웨어 환경에서 NCAR CESM2를 컴파일하고 설치하였다.

모델의 테스트를 위해서 COMPSET (NCAR CESM에서 제공하는 실험군)으로는 중층대기 D-region 화학과정을 사용하고, 대류권과 성층권까지의 역학을 MERRA2 재분석 장을 따라가도록 하는 Specified Dynamics (SD) 모드를 이용하였다.



```
[isong@aurora1 fwsd2_mad4]$ ls
archive_metadata      CaseStatus            env_mach_pes.xml     pelayout              user_nl_cam
bld                   case.submit           env_mach_specific.xml preview_namelists     user_nl_cice
Buildconf             check_case            env_run.xml          preview_run           user_nl_clm
case.build            check_input_data     env_workflow.xml    README.case          user_nl_cpl
case.cmpgen_namelists Depends.intel         fwsd2_mad4_xmlchange.sh run                   user_nl_docn
CaseDocs              env_archive.xml      hostfile             software_environment.txt user_nl_rtm
case.qstatus          env_batch.xml        LockedFiles          SourceMods            xmlchange
case.setup            env_build.xml        logs                 timing                xmlquery
case.st_archive       env_case.xml         Macros.make          Tools

[isong@aurora1 fwsd2_mad4]$ cat README.case
2021-10-05 12:28:58: ./create_newcase --case /nobackup/isong/CESM2/cesm2.1.2/scratch/fwsd2_mad4 --compset F
W4madSD --res f19_f19_mg17 --machine aurora --compiler intel --run-unsupported -i /nobackup/isong/CESM2/inp
utdata
-----
2021-10-05 12:28:58: Compset longname is HIST_CAM40%WCM40%SDYN_CLM40%SP_CICE%PRES_DOCN%DOM_RTM_SGLC_SWAV
-----
2021-10-05 12:28:58: Compset specification file is /home/isong/CESM2/cesm2.1.2/components/cam//cime_config/
config_compsets.xml
-----
2021-10-05 12:28:58: Pes      specification file is /home/isong/CESM2/cesm2.1.2/components/cam//cime_config/
config_pes.xml
-----
2021-10-05 12:28:58: Forcing is Historic transient
-----
2021-10-05 12:28:58: Using None coupler instances
-----
2021-10-05 12:28:58: Component ATM is CAM cam4 physics:WACCM with middle atmosphere chemistry with enhanced
D region ion chemistry:
-----
2021-10-05 12:28:58: ATM_GRID is 1.9x2.5
-----
2021-10-05 12:28:58: Component LND is clm4.0:Satellite phenology:
-----
2021-10-05 12:28:58: LND_GRID is 1.9x2.5
-----
2021-10-05 12:28:58: Component ICE is Sea ICE (cice) model version 5 :prescribed cice
-----
2021-10-05 12:28:58: ICE_GRID is 1.9x2.5
-----
2021-10-05 12:28:58: Component OCN is DOCN  prescribed ocean mode
-----
2021-10-05 12:28:58: OCN_GRID is 1.9x2.5
-----
2021-10-05 12:28:58: Component ROF is RTM: River Transport Model
-----
2021-10-05 12:28:58: ROF_GRID is r05
-----
2021-10-05 12:28:58: Component GLC is Stub glacier (land ice) component
-----
2021-10-05 12:28:58: GLC_GRID is null
-----
2021-10-05 12:28:58: Component WAV is Stub wave component
-----
2021-10-05 12:28:58: WAV_GRID is null
-----
2021-10-05 12:28:58: ESP_GRID is None
-----
[isong@aurora1 fwsd2_mad4]$
```

그림 1-3. 극지연구소 AURORA 서버에 설치된 CESM2의 모델 component 정보

그림 1-3은 극지연구소 AURORA 서버에 설치된 CESM2의 모델 component 정보를 나타낸다. 대기 모델인 CAM은 CAM version 4 물리 과정 (physics)를 사용하는 WACCM이며, middle atmosphere chemistry with enhanced D-region ion chemistry를 장착하고 있다. 대기 모델 뿐만 아니라, 지면 모델 LND, 빙상 모델 ICE, 데이터 기반 해양 모델 OCN (DOCN), 지표면 물 소송 모델인 ROF등이 포함되어 있음을 확인할 수 있다.

그림 1-4는 CESM2.1.2를 이용하여 SD-WACCM with D-region ion chemistry로 5일 적분을 수행한 결과이다. 이상화된 모델과 유사하게 NSTEP으로 표시된 줄 오른쪽에서 전 지구 평균 질량 및 에너지와 같은 통계량이 적혀있으며, 이 값들을 이용하여 다른 시스템에 설치된 WACCM 모델의 적분 결과와 비교할 수 있다. 연세대학교 Lumos 서버와의 비교 결과는 섹션 2-2에서 확인할 수 있다.

```

isong@aurora1:/nobackup/isong/CESM2/cesm2.1.2/archive/fwsd2_mad4/logs
INFLD_REAL_3D_3D: read field U
INFLD_REAL_3D_3D: read field V
INFLD_REAL_2D_2D: read field PS
INFLD_REAL_3D_3D: read field T
INFLD_REAL_3D_3D: read field Q
INFLD_REAL_3D_3D: read field U
INFLD_REAL_3D_3D: read field V
INFLD_REAL_2D_2D: read field PS
INFLD_REAL_2D_2D: read field SHFLX
INFLD_REAL_2D_2D: read field QFLX
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAUX
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAU
INFLD_REAL_2D_2D: read field TS
INFLD_REAL_2D_2D: read field SHFLX
INFLD_REAL_2D_2D: read field QFLX
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAUX
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAU
INFLD_REAL_2D_2D: read field TS
READ_NEXT_METDATA: Read meteorological data
do_press_fix_llnl: dpress_g = 36.3907503984991
do_press_fix_llnl: dpress_g = 36.3907503985038
nstep, te 241 0.26207068304866223E+10 0.26206496079592805E+10 -0.31640294509377130E-02 0.98526
485150012872E+05

-----
euvac_set_etf: f107,f107a = 67.6999969482422 67.8014475504557
-----

Number of completed timesteps: 240
Time step 241 partially done to provide convectively adjusted and time filtered values for history tape.
***** END OF MODEL RUN *****
10405,2 Bot

```

그림 1-4. 극지연구소 AURORA 서버 내 CESM2 수행 결과

2. 연세대학교 대기과학과 수리대기물리 연구실 Lumos 서버에 구축

2.1 Lumos 서버에 SWAD 구축

극지연구소 AURORA 시스템은 2019년에 도입된 것으로 다소 오래된 소프트웨어 환경을 갖추고 있다. 반면 연세대학교 대기과학과 수리대기물리 연구실 Lumos 시스템은 2021년에 도입된 것으로, 당초 연구 계획은 비교적 최신의 소프트웨어 환경을 구성하여 모델링을 수행할 예정이었다. 그러나 연구 과정에서 최신의 Intel 컴파일러가 예상치 못한 다양한 문제를 일으키는 것을 발견하였고, 이로 인하여 컴파일러 버전을 2019년 (19.0.3.199 20190206 빌드)로 낮추어 극지연구소 서버와 동일하게 설정한 뒤 실험을 수행하였다. 컴파일러 버전에 따른 SWAD 실험 결과 차이 분석을 해본 결과, 19.0.3.199 보다 높은 버전의 컴파일러를 사용했을 때 단순화된 모델이나 NCAR CESM2를 설치하는데 사용했던 라이브러리의 빌드에 실패하거나 극지연구소와 동일한 모델링 결과를 생산하지 못하는 문제를 발견하였다.

연세대학교 수리대기물리 연구실에 구축된 전산 시스템은 극지연구소 고층대기팀의 전산 시스템과 하드웨어 측면에서는 다르지만 소프트웨어 측면에서는 완전히 동일하도록 설정하였다. 당초 AURORA 시스템에서는 MPICH 3.3을 사용하고 있었으나, 이 경우 인피니밴드를 통한 속도 향상을 기대하기 어렵기 때문에, 극지연구소 시스템과 연세대학교 모두 MVAPICH 2.2를 설치한 뒤, SWAD와 CESM2를 빌드하는데 사용하였다.

그림 1-5는 연세대학교 Lumos 서버에서의 SWAD 수행 결과이다. 모델 수행 종료 시 로그 화면에서 'NSTEP = 2159'의 우측에 적혀진 숫자는 아래와 같으며, 이는 앞서 그림 1-2에서 보인 바와 같이 극지연구소 AURORA 서버의 결과와 일치한다.

```
nstep, te 2159 0.32875772204416924E+10 0.32874445178302226E+10
-0.10994088541362383E-01 0.98636571942868512E+05

NSTEP = 2159 2.367811135069020E-06 2.530885693621314E+02 9.86366E+04
0.000000000000000E+00 1.07 1.23
```



```

songi@lumos1.yonsei.ac.kr...elMPI_Intel/LS40ys
[EnvParInit]: Participating processes          16
(EnvParInit): -----
(EnvParInit):   NAME   TASK#
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           0
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           1
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           2
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           3
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           4
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           5
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           6
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           7
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           8
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr           9
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr          10
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr          11
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr          12
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr          13
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr          14
(EnvParInit): lumos1.yonsei.ac.kr          15
(ReadEnvNL): Reading namelist for environment
(GetUnit): Input unit is obtained :          99
1
(FreeUnit): Unit is freed                      99
***** Time Manager Configuration *****
Calendar type:      NO_LEAP
Timestep size (seconds): 1200
Start date (yr mon day tod): 2000 1 1 0
Stop date (yr mon day tod): 2000 1 31 0
Reference date (yr mon day tod): 0 1 1 0
Current step number: 0
Current date (yr mon day tod): 2000 1 1 0
*****
(PIOInitialize): PIO_OFFSET : 8
(PIOInitialize): PIO_OFFSET BIT SIZE : 64
:0
1,1 Top

```

```

songi@lumos1.yonsei.ac.kr...elMPI_Intel/LS40ys
NSTEP = 2156 2.371935666350878E-06 2.530880324479584E+02 9.86366E+04 0.000000000000000E+00 1.09 1.23
(IWGCMRun): Current Date and Time (sec) : 20000130 82800
nstep, te 2157 0.32875768904912643E+10 0.32874445178302226E+10 -0.10966752951055484E-01 0.98636571
942868555E+05
NSTEP = 2157 2.370537107429986E-06 2.530882110388768E+02 9.86366E+04 0.000000000000000E+00 1.04 1.09
(IWGCMRun): Current Date and Time (sec) : 20000130 84000
nstep, te 2158 0.32875770552938342E+10 0.32874445178302226E+10 -0.10980406443062047E-01 0.98636571
942868613E+05
NSTEP = 2158 2.369150530491356E-06 2.530883900020632E+02 9.86366E+04 0.000000000000000E+00 0.99 1.27
(IWGCMRun): Current Date and Time (sec) : 20000130 85200
nstep, te 2159 0.32875772204416924E+10 0.32874445178302226E+10 -0.10994088541362383E-01 0.98636571
942868512E+05
NSTEP = 2159 2.367811135069020E-06 2.530885693621314E+02 9.86366E+04 0.000000000000000E+00 1.07 1.23
(IWGCMRun): Current Date and Time (sec) : 20000131 0
(HistWriteSPH): File ls40.2000-01-31-00000.nc is created
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(IWGCMRun): End of Run
(WriteRestFileSPH): Restart file is written
(IWGCMRun): End of Run
----- END OF MODEL RUN -----
7282,1 Bot

```

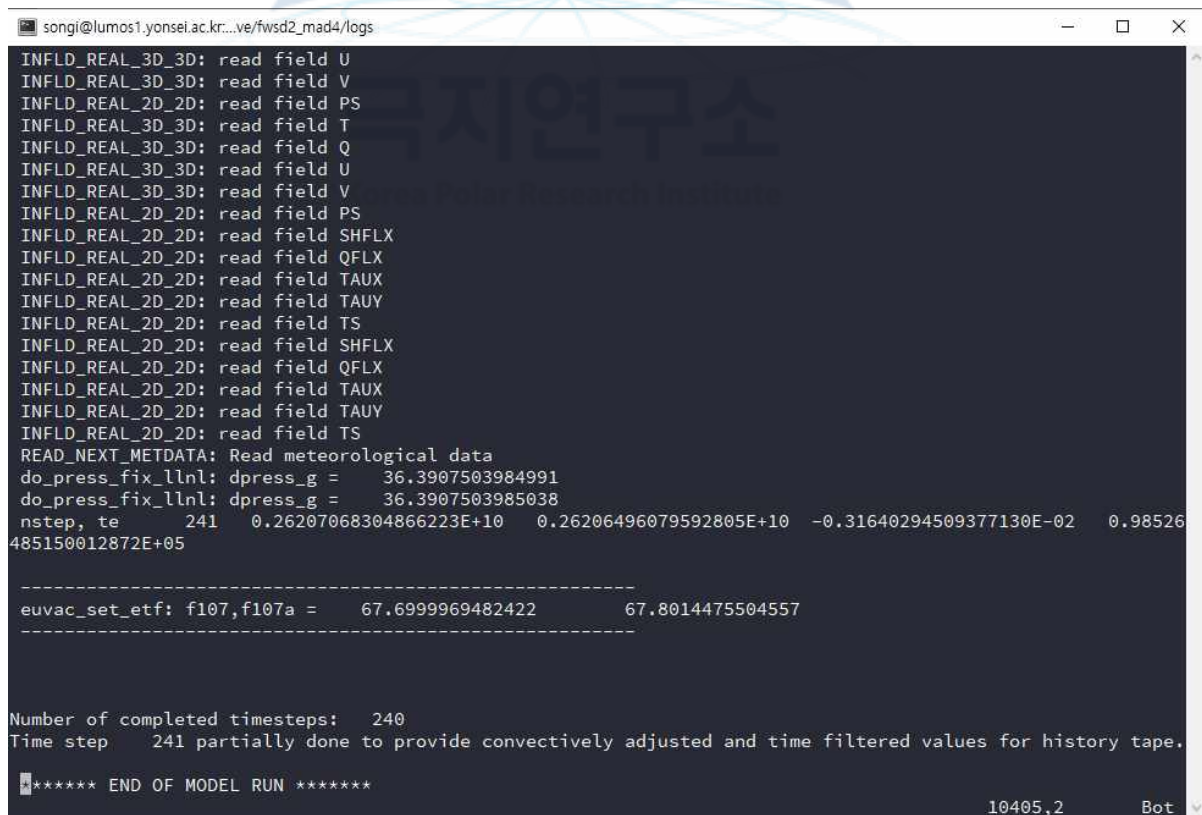
그림 1-5. 연세대학교 Lumos 서버 내 모델 (위) 수행 시작 및 (아래) 수행 종료 시 로 그 화면

2.2 Lumos 서버에 WACCM6 시스템 구축

연세대학교 Lumos 서버에도 극지연구소 AURORA 서버와 동일하게 CESM2.1.2을 설치하였으며, AURORA 시스템의 소프트웨어 환경과 동일한 환경을 사용하였다. 컴파일러 버전이나 기타 라이브러리 환경이 조금만 변경되더라도 극지연구소 시스템의 결과와 다른 모델링 결과를 낼 수 있기 때문에, 세부 소프트웨어 환경을 정확히 일치시킨 뒤 모델링을 수행하였다.

그림 1-6은 연세대학교 Lumos 서버에서 수행된 CESM2.1.2의 SD-WACCM 5일 적분 결과이다. 이상화된 모델에서와 마찬가지로 NSTEP 우측에 표기된 모델링 결과값을 확인해보면 아래와 같으며, 그림 1-4에서 나타난 극지연구소 AURORA 서버에서의 실험 결과와 정확하게 일치하는 것을 확인할 수 있다.

```
nstep, te 241 0.26207068304866223E+10 0.26206496079592805E+10  
-0.31640294509377130E-02 0.98526485150012872E+05
```



```
songi@lumos1.yonsei.ac.kr...ve/fwsd2_mad4/logs  
INFLD_REAL_3D_3D: read field U  
INFLD_REAL_3D_3D: read field V  
INFLD_REAL_2D_2D: read field PS  
INFLD_REAL_3D_3D: read field T  
INFLD_REAL_3D_3D: read field Q  
INFLD_REAL_3D_3D: read field U  
INFLD_REAL_3D_3D: read field V  
INFLD_REAL_2D_2D: read field PS  
INFLD_REAL_2D_2D: read field SHFLX  
INFLD_REAL_2D_2D: read field QFLX  
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAUX  
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAU  
INFLD_REAL_2D_2D: read field TS  
INFLD_REAL_2D_2D: read field SHFLX  
INFLD_REAL_2D_2D: read field QFLX  
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAUX  
INFLD_REAL_2D_2D: read field TAU  
INFLD_REAL_2D_2D: read field TS  
READ_NEXT_METDATA: Read meteorological data  
do_press_fix_llnl: dpress_g = 36.3907503984991  
do_press_fix_llnl: dpress_g = 36.3907503985038  
nstep, te 241 0.26207068304866223E+10 0.26206496079592805E+10 -0.31640294509377130E-02 0.98526485150012872E+05  
-----  
euvac_set_etf: f107,f107a = 67.6999969482422 67.8014475504557  
-----  
Number of completed timesteps: 240  
Time step 241 partially done to provide convectively adjusted and time filtered values for history tape.  
***** END OF MODEL RUN *****  
10405,2 Bot
```

그림 1-6. 연세대학교 Lumos 서버 내 CESM2 수행 결과

제 2 절 산악 2차 중력파를 이용한 중력파 모수화 개선

관측에 비해서 모델에서의 겨울철 중간권계면의 고도는 현저히 낮게 형성되며, 이로 인하여 모델에서 중간권 제트의 역전이 관측보다 낮은 고도에서 나타난다는 사실은 여러 선행 연구들을 통해서 알려진 바 있다 (Becker & Vadas, 2018; Dempsey et al., 2021). 이러한 계통 오차를 줄이는데 기여할 수 있는 방법으로서 산악 중력파와 같이 강한 대기 파동이 유도하는 평균류의 가속도가 큰 규모의 2차 중력파를 만든다는 이론 (Vadas et al., 2003)을 고려해 볼 수 있다.

아래 그림 2-1은 Holton and Alexander (1999)에서 수치 모의한 대류에 의한 중력파가 고층에서 깨지면서 평균류를 가속시키는 모습을 보여준다. 대류권 (저층)에서 올라오는 파동이 깨지면서, 작은 규모의 2차 중력파와 함께 큰 수평 파장을 갖는 2차 중력파도 생성되는 모습을 확인 할 수 있다.

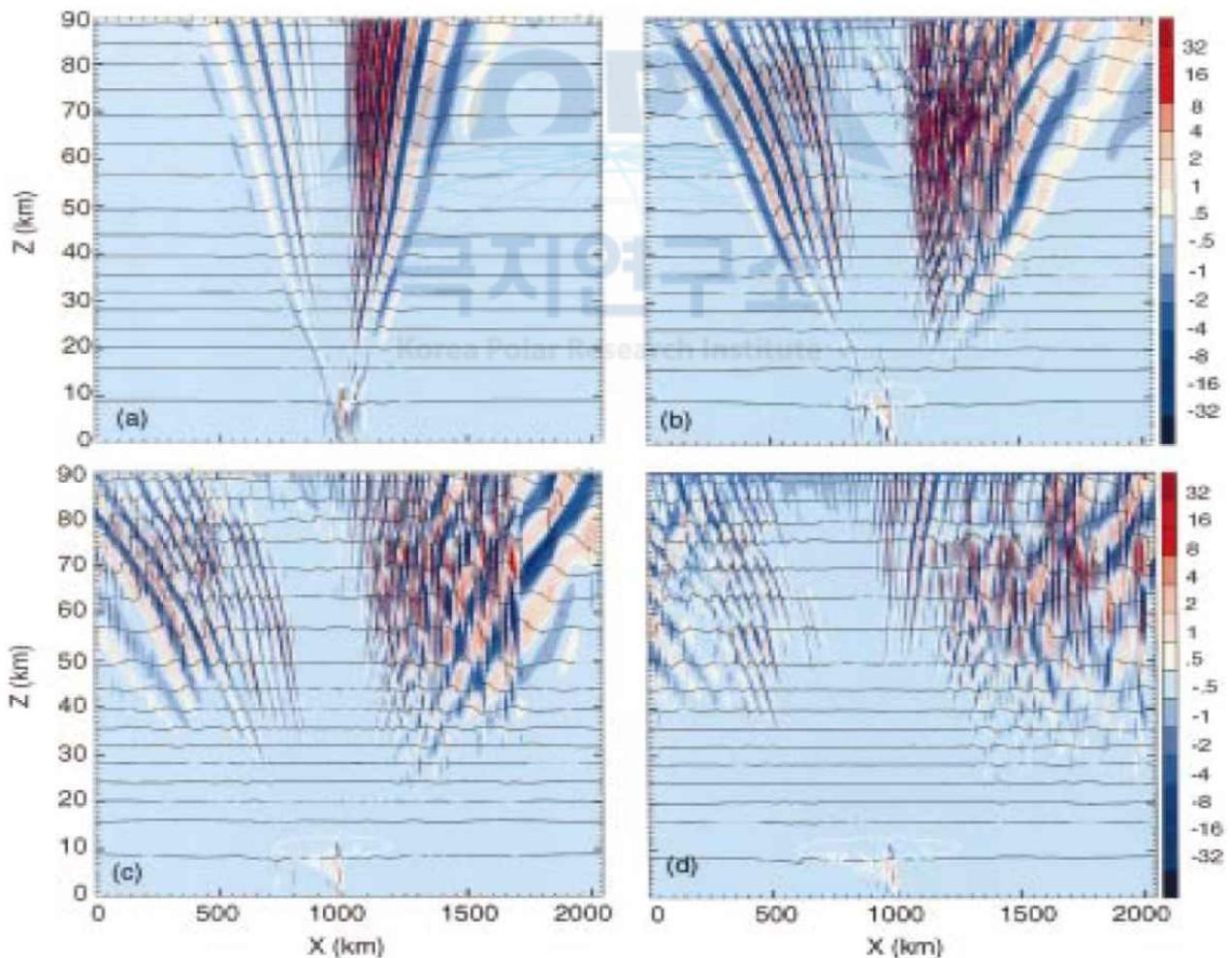


그림 2-1. 시간에 따른 (a부터 d까지) 대류 중력파와 2차 중력파의 변화 양상 (Holton & Alexander, 1999)

1. 산악에 의한 2차 중력파에 기초한 모수화 개선

1차 중력파 붕괴 과정에서 발생하는 수평 파장이 큰 2차 중력파 (물리적으로 중요한 2차 중력파; 수평 파장이 작은 2차 중력파는 작은 규모의 난류로 급속히 소산되어 물리적 효과가 적음)는 아래의 그림 2-2에서 보이는 바와 같이 파동의 전파 특성이 결정된다. 대체로 대규모 2차 중력파는 1차 중력파가 유도하는 평균류의 방향과 그 반대 방향으로 전파한다. 이 때, 생성된 2차 중력파의 수평 파장은 대체로 평균류 강제력의 규모의 2배 정도이며, 이는 대략 1차 중력파 파장의 4배 정도에 해당한다 (Vadas et al., 2018).

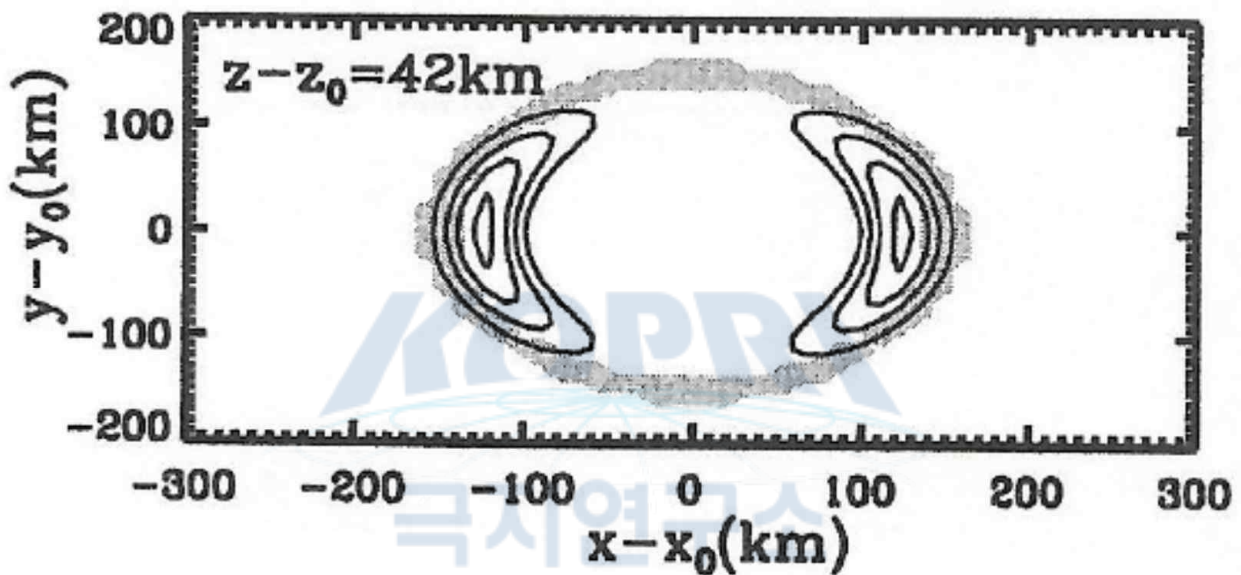


그림 2-2. 동서방향 평균류 강제력에 대한 2차 중력파의 전파를 위에서 본 모습 (Vadas et al., 2003)

본 연구에서는 대류권에서 가장 강한 1차 중력파 (또는 primary 중력파로 표기)를 생성하는 산악파에 대해서, 산악파가 깨지는 고도에서 대규모 2차 중력파를 생성시키고, 이렇게 생성된 2차 중력파가 다시 중간권계면을 향해 상향으로 전파하면서 격자규모 흐름과 추가적인 상호작용을 하도록 이상화된 전지구 모델에 장착된 중력파 항력 모수화를 개선하고자 한다. 이 중력파 항력 모수화는 현재 MERRA2 재분석 장을 생성하는데 사용되는 NASA GMAO의 GEOS6 전지구 모델에 장착되어 있다.

현재 2차 중력파 모수화는 1차 중력파 모수화의 알고리즘을 활용하여 코딩 및 모델 내 장착이 완료된 상태이며 아래 그림 2-3은 2차 중력파를 계산하는 코드 일부분을 보여준다.

```

!if (defined OROSC)
!
! Orographic secondary gravity wave
!
ubtogwmax = 0._r8
DO k = 1, PVER
  ubtogw = SQRT(utgw(k)**2 + vtgw(k)**2)
  IF (ubtogw > ubtogwmax) THEN
    ubtogwmax = ubtogw
    kbotosc = k
  END IF
END DO

IF (ubtogwmax*86400._r8 > 1.0_r8) THEN

!WRITE(1000+iam,*) i, kbotosc, ubtogwmax * 86400._r8
CALL GWOroScnd(i, PCOLS, PVER, csw, &
  u, v, t, pmid, pint, &
  pdel, rpdel, lnpint, rlat, kldv, &
  kldvnm, ksrc, ksrcnm, rdpldv, tausw, &
  ubi, ubm, xv, yv, sgwv, kbotosc, &
  utgw, vtgw)

Solve for the drag profile

CALL GWDragProf(i, PCOLS, PVER, &
  sgwv, sgwv, kbotosc, ktoposc, csw, u, &
  v, t, pint, pdel, rpdel, lnpint, &
  rlat, rhoi, ni, ti, nm, dt, &
  alpha, dback, kldv, kldvnm, ksrc, ksrcnm, &
  rdpldv, tausw, ubi, ubm, xv, yv, &
  utgw, vtgw, ttgw, tauosx, tauosy, feos, &
  fepos, utosrc, vtosrc, ttosrc, &
  tau0x, tau0y, effgwbkg)

Add the secondary tendencies to the spectrum tendencies

DO k = 1, PVER
  dudt_osc(i,k) = utgw(k) + utosrc(k)
  dvdt_osc(i,k) = vtgw(k) + vtosrc(k)
  dtdt_osc(i,k) = ttgw(k) + ttosrc(k)
  dudt_gwd(i,k) = utgw(k) + utosrc(k) + dudt_gwd(i,k)
  dvdt_gwd(i,k) = vtgw(k) + vtosrc(k) + dvdt_gwd(i,k)
  dtdt_gwd(i,k) = ttgw(k) + ttosrc(k) + dtdt_gwd(i,k)
END DO
tauoscx(i) = tau0x
tauoscy(i) = tau0y

END IF
!endif

```

그림 2-3. 개선된 2차 산악중력파 모수화 계산 코드

2. 개선된 모수화를 통한 모델 성능 개선 평가 분석

Vadas et al. (2018)에서는 중간권 역학 과정에 2차 중력파가 주도적인 영향을 미칠 수 있음을 보였다. 본 연구에서는 대류권에서 생성되어 중간권까지 전파하는 primary 중력파의 중요성은 줄이고 2차 중력파의 효과를 높일 경우, 모델이 어떻게 반응하는지 살펴보기 위하여, 아래 표 2-1과 같이 다양한 이상화된 모델 실험을 수행하였다.

표 2-1. 다양한 이상화된 모델 (SWAD) 실험 설계 정리표

| SWAD 실험 | | Primary 중력파 간헐성 인자 (intermittency factor): ϵ_{prim} (= 0.125) | | | |
|-------------|---|---|--------------|--------------|--------------|
| | | | $\times 0.5$ | $\times 0.2$ | $\times 0.1$ |
| CTRL 실험 | | CTRL0 | CTRL1 | CTRL2 | CTRL3 |
| SCGW 실험 | | - | SCGW1XYZ | SCGW2XYZ | SCGW3XYZ |
| 2차 중력파 특성 값 | X | a: 2차 중력파 운동량 속의 크기가 primary NOGW maximum과 동일 (즉, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$) b: 2차 중력파 운동량 속의 크기가 primary NOGW maximum의 3배 (즉, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$) | | | |
| | Y | 1: 2차 중력파 ground-based 위상 속도 $c_{scnd} = \pm 10 m s^{-1}$ 2: 2차 중력파 ground-based 위상 속도 $c_{scnd} = \pm 20 m s^{-1}$ 3: 2차 중력파 ground-based 위상 속도 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ | | | |
| | Z | a: 2차 중력파의 수평 파장 = 1500 km b: 2차 중력파의 수평 파장 = 700 km c: 2차 중력파의 수평 파장 = 300 km d: 2차 중력파의 수평 파장 = 150 km | | | |

한편, 중력파 모수화는 산악과 비산악 중력파로 구분된다. 산악 중력파에서 필요한 산악이 생성하는 중력파 운동량 속은 McFarlane (1987)의 전통적인 방식을 사용하여 계산하며, 비산악 중력파 운동량 속은 400 hPa에서 아래의 그림 2-4와 같은 위도 분포를 갖는 것으로 가정된다. 이 위도 분포는 비산악 중력파가 강수 과정과 연관되어 있다는 가정하에 설계된 것으로 NASA GEOS6 모델에서 현재 사용되고 있다. 그림에서 검은색 선은 GEOS6에서 사용되는 기본값이며, 붉은색 선은 SWAD에서 사용되는 값으로 열대지역 준 2년주기 진동을 열대지역 적도파가 없는 저해상도 SWAD 모델에서 생성하고, 중고위도 중간권계면 바람 오차를 완화시키기 수정되었다.

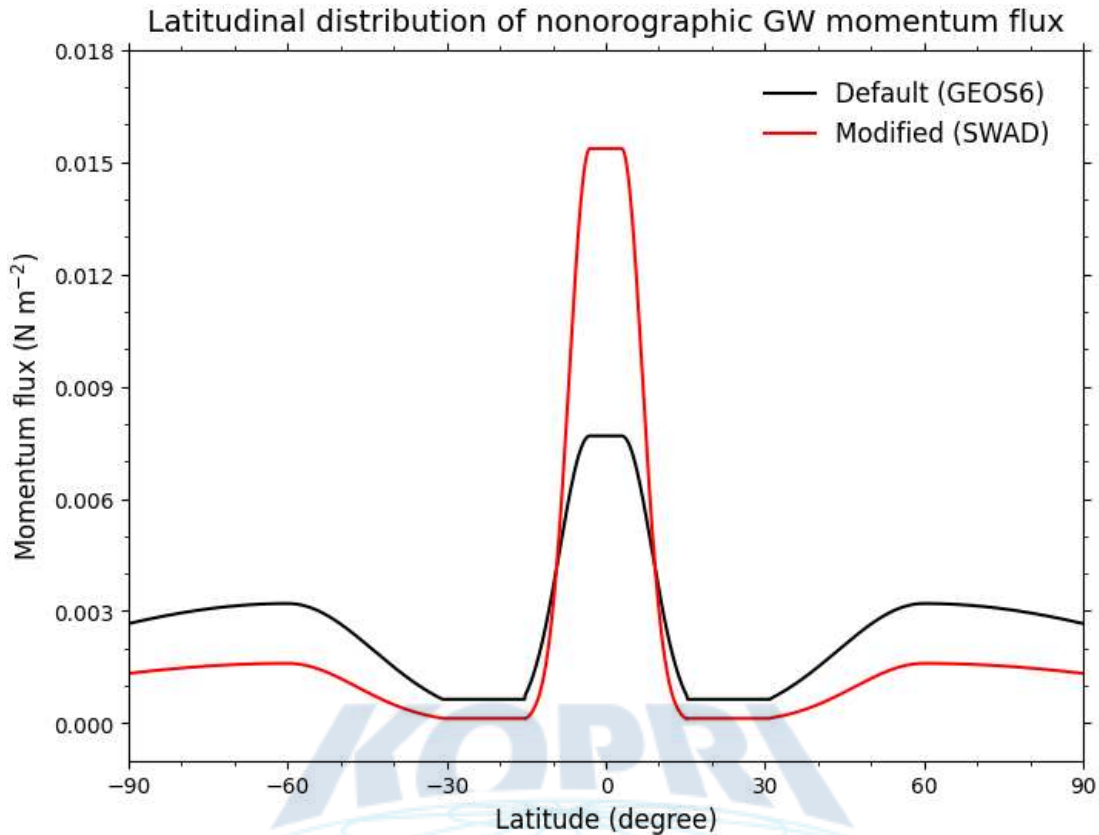


그림 2-4. 400 hPa에서 지정되는 비산악 중력과 운동량 속의 위도별 분포.

본 실험에서는 대류권에서 생성되어 고층대기로 전파하는 주 (primary) 중력과 (산악과와 비산악과 모두 포함)의 중력과 항력에 곱해지는 efficiency factor (혹은 intermittency factor)가 연직 분포를 갖게 함으로써 (아래 그림 2-5 참조), 중간권에서의 primary 중력파의 효과를 줄일 수 있도록 설정하였다. 성층권까지는 대체로 1의 값을 갖고 중간권에서 감소하여 고도 100 km에서 줄어든 값 (즉, 0.1, 0.2, 또는 0.5배)을 갖도록 설정하였다. 실제 중력과 항력 모수화에서 사용하는 intermittency factor는 산악과 비산악에 대해서 모두 0.125를 사용하며, 아래 그림으로 주어진 구조 함수가 이 0.125에 곱해지는 방식으로 모수화에 활용된다. 중력파에 대한 간헐성 인자를 사용하더라도, 모델 열대지역 성층권에서 발생하는 준2년주기 진동은 큰 영향이 없었으나, 북반구 고위도 성층권 돌연 승온으로 인한 바람 역전의 경우, 빈도에 있어서는 크게 차이가 나지는 않는 것으로 판단되었다.

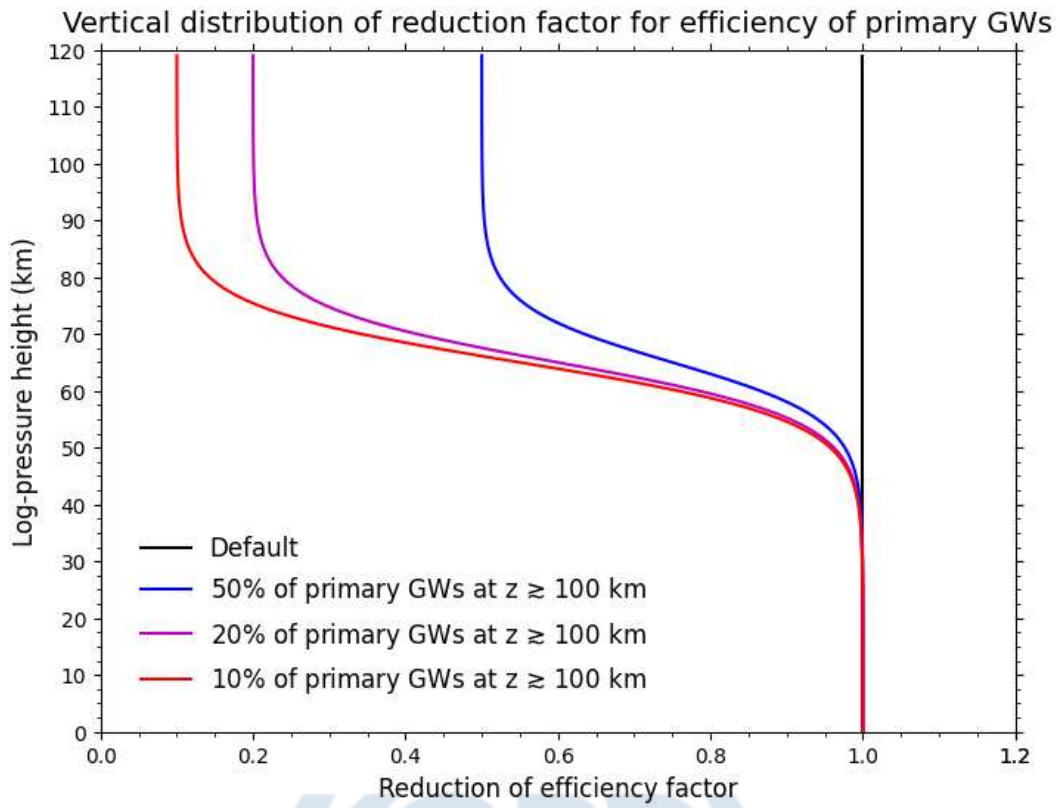


그림 2-5. 중력과 간헐성 인자의 연직 변화에 대한 설정



2.1 동서평균 동서류 구조 분석

그림 2-6(a)는 1월 달 동서평균 동서류의 SPARC 기후값이며, (b)-(e)는 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 동서류의 위도-고도 단면도이다. Primary 중력과의 간헐성 인자를 고도에 따라 많이 줄일수록 (즉, CTRL0 → CTRL3), 중간권계면의 고도는 점차 올라가는 것을 확인할 수 있다. 겨울 반구뿐만 아니라 여름 반구에서의 중간권계면 고도도 점차 상승하긴 하지만, 전반적으로 CTRL1-3에서는 중간권계면 고도를 관측값과 유사하게 모의하는 것으로 나타났다. 그러나 CTRL0에서 CTRL3으로 갈수록 성층권 극와동 (polar vortex)의 세기가 점차 커지는 경향성이 뚜렷하게 나타났다. 따라서, 중간권계면 고도 및 성층권 극와동의 세기를 모두 고려하였을 때, CTRL1 혹은 CTRL2가 가장 관측과 유사하게 동서평균 동서류를 모의한 것으로 판단된다.

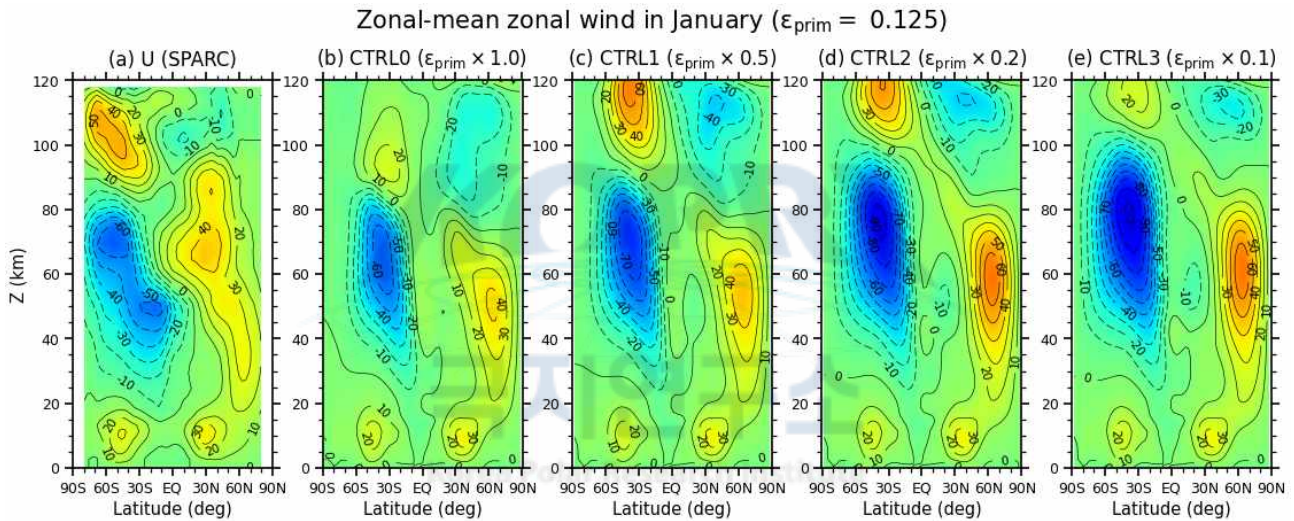


그림 2-6. 1월에 대한 동서평균 동서류의 기후값 (SPARC) 및 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 동서류.

그림 2-7은 CTRL1과 동일한 primary 중력과 간헐성 인자가 적용된 SCGW1 실험 결과이며, 이 때 위상 속도는 $\pm 10 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정하였다. 해당 실험의 경우 동서평균 동서류의 구조는 2차 중력과의 수평 파장에 대해서 크게 의존하지 않는 것으로 보인다. 다만 2차 중력과의 수평 파장이 작을수록 중간권계면의 바람 역전이 다소 약해지는 결과를 보였다.

그림 2-8은 CTRL1과 동일한 primary 중력과 간헐성 인자가 적용된 SCGW1 실험 결과이며, 위상 속도는 $\pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정되었다. 해당 실험에서 겨울 반구의 결과는 앞선 그림 2-7과 유사하였으나, 여름 반구의 경우 관측에서 좀 더 멀어지는 결과를 보였다. 이러한 결과는 현재 산악 2차 중력파가 작동하는 조건 (primary 산악 중력파의 크기가 $0.1 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$ 보다 큰 경우)이 약한 primary 산악 중력파도 2차 중력파를 여름 반구에서 잘 생성해내도록 설정되어 있기 때문인 것으로 추측된다.

Zonal-mean zonal wind in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$)

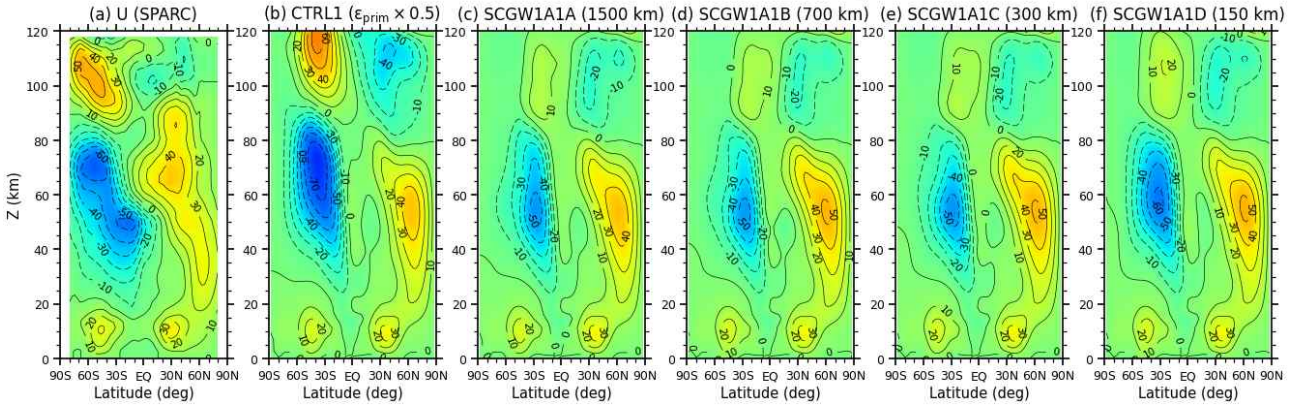


그림 2-7. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 동서류. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean zonal wind in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

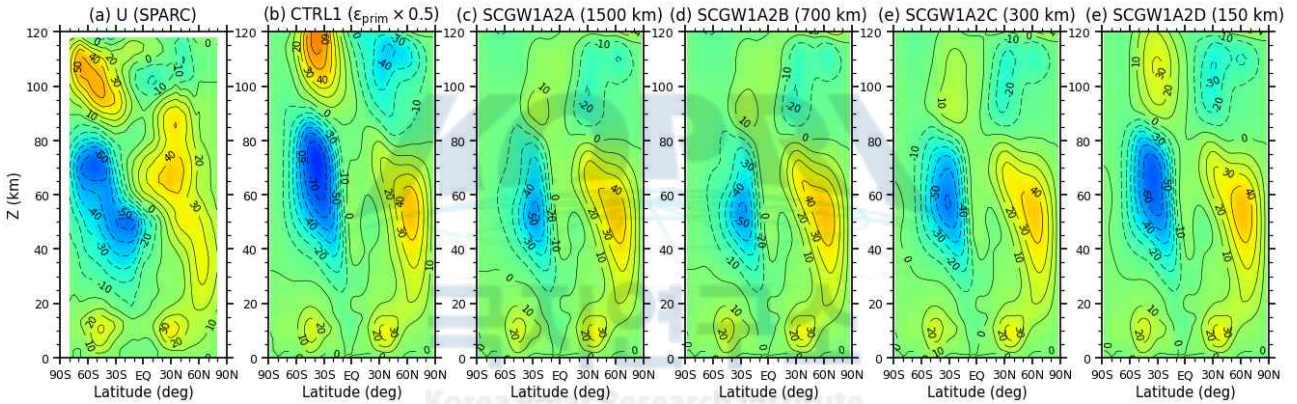


그림 2-8. 그림 2-7과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

그림 2-9는 위상 속도를 $\pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정한 실험 결과이다. 해당 실험에서는 중간권계면 역전이 더욱 약해지는 모습을 확인할 수 있었다. 한편, 긴 수평 파장을 갖는 2차 중력파는 비교적 낮은 고도의 중층대기에서부터 깨질 수 있는데, 겨울 반구에서는 특별히 더 좋은 모델링 결과를 보여주진 않았으며, 오히려 여름 반구에서는 좀 더 관측과 큰 차이를 갖는 결과를 보였다.

그림 2-10은 중력과 간헐성 인자를 0.2배로 설정한 SCGW2 실험 결과이며, SCGW1 실험과 비교했을 때 유의미한 차이를 보이지 않았다.

그림 2-11은 SCGW2 실험에서 $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정한 실험 결과를 보여주며, 마찬가지로 동일한 위상속도의 SCGW1 실험과 유사한 결과를 보였다.

Zonal-mean zonal wind in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

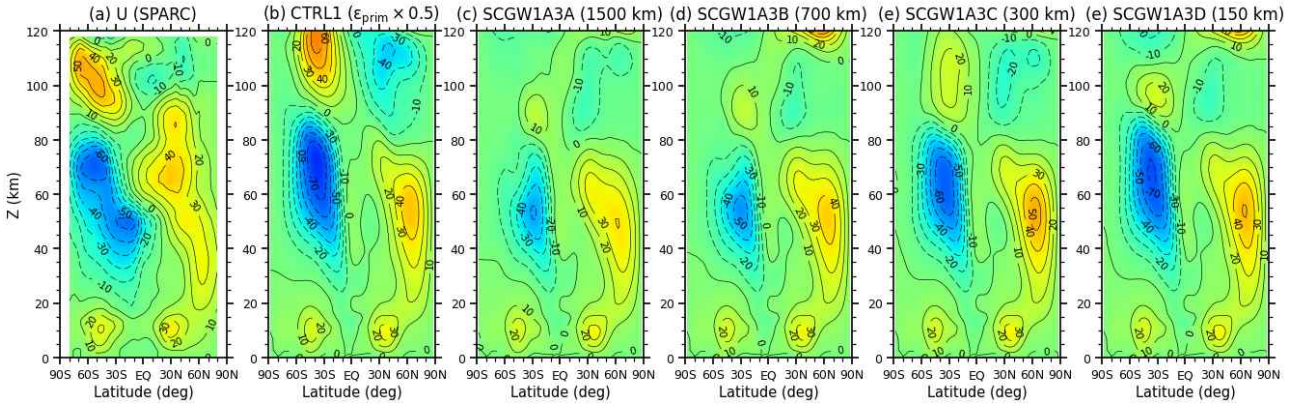


그림 2-9. 그림 2-7과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean zonal wind in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$)

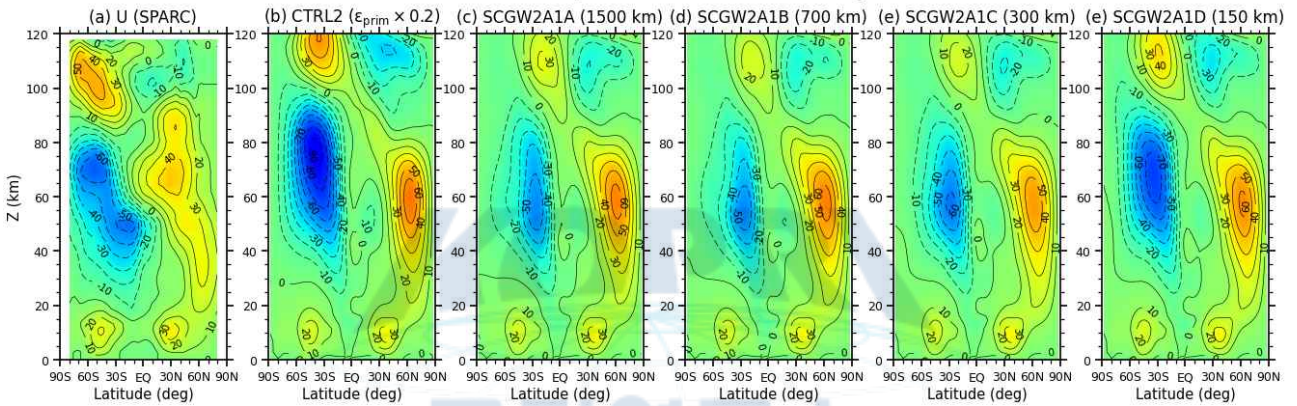


그림 2-10. 그림 2-7과 동일. 단, primary 중력파 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Zonal-mean zonal wind in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

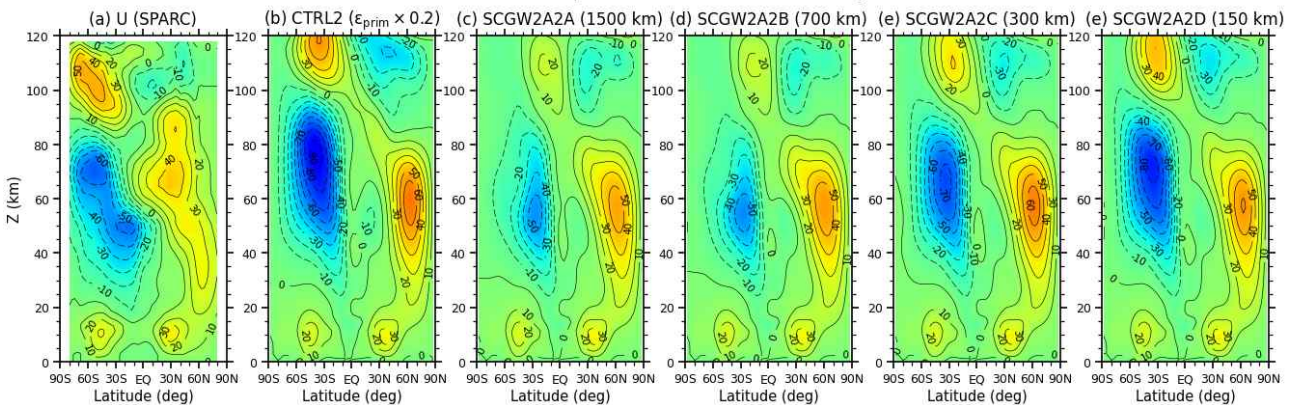


그림 2-11. 그림 2-10과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

그림 2-12는 SCGW2 실험에서 $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정한 실험 결과이다. 앞서 SCGW1A3D 실험 결과와 함께 SCGW2A3D 실험 결과는 가장 관측 기후값과 유사한 동서평균 동서류 구조를 보였다. CTRL2 실험에서는 성층권 제트의 크기가 SPARC에 비해서 큰 값을 보인 반면에, SCGW2 실험에서는 성층권 제트의 크기가 SPARC 기후값에 더 근접해진 것을 확인할 수 있다. 이는 2차 중력파에 의한 서향 강제력이 성층권 제트의 크기를 줄이는 역할을 할 수 있기 때문으로 보인다.

그림 2-13은 2차 중력파의 진폭을 3배 증가시킨 실험 결과이다. 해당 실험에서는 특히 여름 반구의 결과가 관측과 많은 차이를 보였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 2차 중력파의 진폭을 줄이던가 2차 중력파가 발생하는 primary 산악 중력파의 크기 기준을 현재보다 좀 더 높임으로써 여름 반구의 약한 primary 산악 중력파가 2차 중력파를 생성해 내지 못하도록 설정할 필요가 있다. 다만, 겨울 반구의 제트 구조는 관측 기후값과 상당히 유사한 결과를 보였으며, 2차 중력파의 수평 파장을 변경하여 실험한 경우에도 전반적으로 관측과 유사한 모델링 결과를 보여주었다.

그림 2-14는 중력파 간헐성 인자를 10%로 설정한 CTRL3 및 SCGW3 실험 결과이다. 해당 실험의 경우 겨울 반구 중간권계면이 거의 없어져서 관측과 가장 유사한 구조를 보여준다. 다만, SCGW3B 실험은 2차 중력파의 진폭을 3배로 증가시킨 실험으로써, 여름 반구의 바람 구조가 관측과 제법 차이를 보였다. 여름 반구의 모델링 결과를 개선하기 위해서는 여름 반구에서 발생하는 2차 산악 중력파의 발생 빈도를 잘 조절할 필요가 있을 것으로 보이며, 이를 위해서는 2차 중력파 발생을 판단하는 primary 산악 중력파 강제력의 기준값을 수정해야 할 것으로 생각된다.

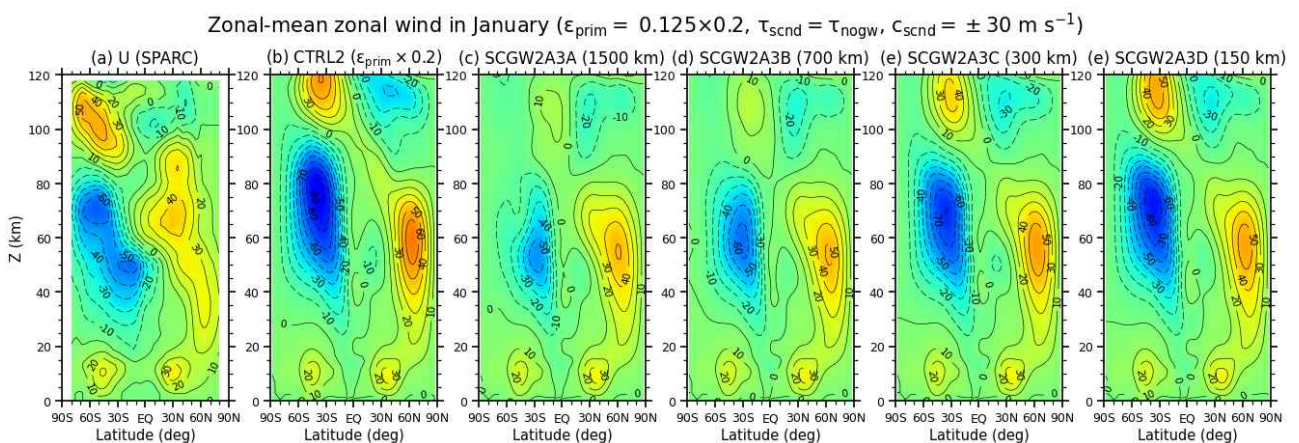


그림 2-12. 그림 2-10과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 m s^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean zonal wind in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

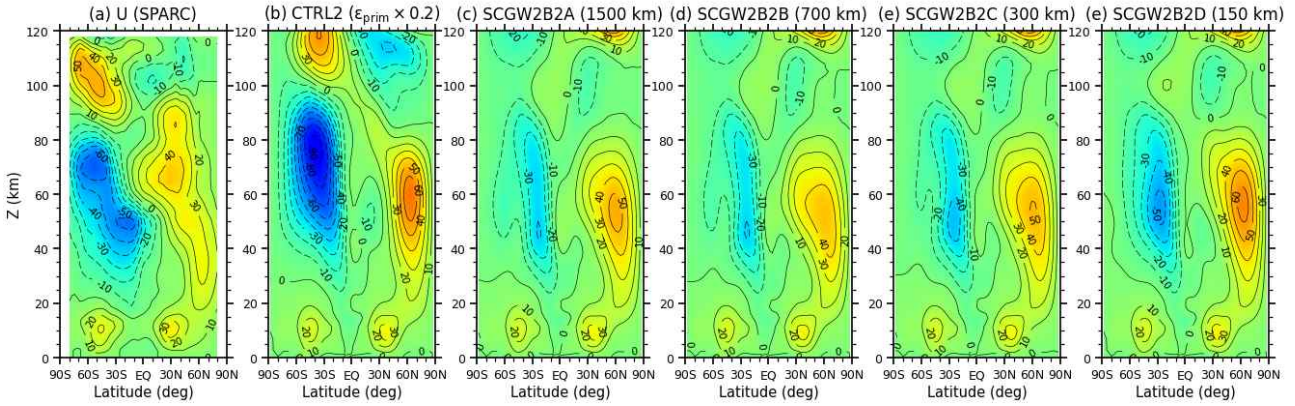


그림 2-13. 그림 2-11과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 으로 설정함.

Zonal-mean zonal wind in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

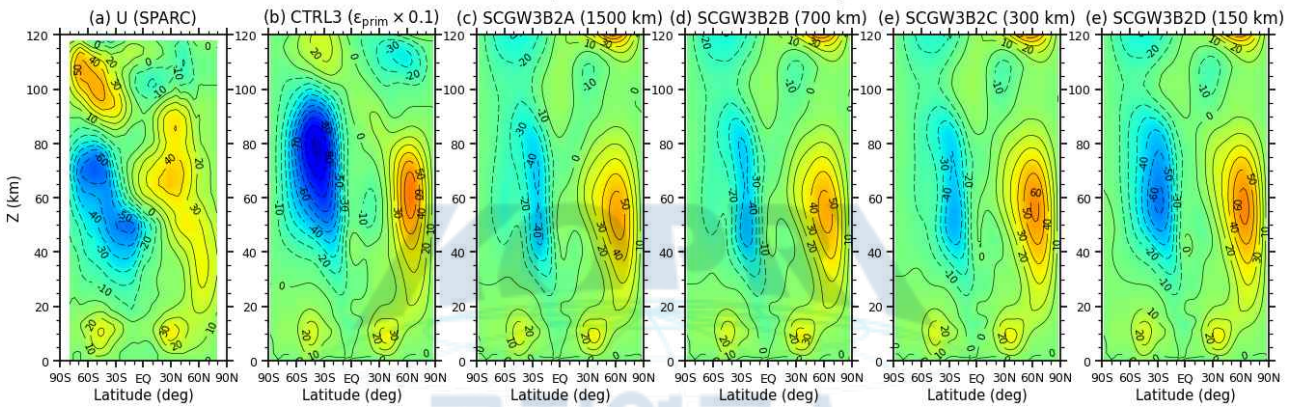


그림 2-14. 그림 2-13과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함.

그림 2-15는 7월 달에 대한 실험 결과를 보여준다. 이 때, CTRL1과 CTRL2 실험만이 수행되었으며, primary 중력과의 간헐성 인자를 50%와 20%로 줄이는 경우 양 반구에서 중간권계면의 고도가 올라가는 것은 1월 달과 동일하게 관찰되었다. 여름 반구 중간권계면을 기준으로 하면 CTRL1이 조금 더 관측과 가까워 보이나, 겨울 반구 중간권계면을 기준으로 하면 CTRL2의 결과가 더 개선된 것으로 보인다. CTRL 실험에서 간헐성 인자를 감소시킬 경우, 남반구 성층권 제트의 크기가 기후값에 비해서 점점 더 과도하게 증가되는 경향도 확인할 수 있었다.

그림 2-16은 CTRL1 및 SCGW1 실험 결과를 나타낸다. SCGW1A 실험의 경우 CTRL1에 비해서 겨울 반구 중간권계면이 더 상승하였다. 하지만 겨울 반구 성층권 제트의 강도가 지나치게 강화되는 문제가 발생하였다. 이 문제를 해결하기 위해서는 2차 중력과 운동량속의 크기를 증가시키는 처방이 필요할 수 있다. 다만, 이 경우에는 겨울 반구의 모델링값이 개선되더라도 여름 반구의 결과가 더 나쁘게 나타날 가능성이 있다. 따라서, 양 반구의 결과값을 동시에 개선 시키기 위해서는 여름 반구에서 2차 산악 중력파가 잘 발생하지 않도록 파동 발생 조건을 조절할 필요가 있을 것으로 보인다.

그림 2-17은 CTRL2 및 SCGW2 실험 결과를 나타낸다. CTRL2에 비해서 SCGW2A 실험에서는 겨울 반구 중간권계면의 고도가 더 상승하여 관측과 유사한 결과를 보였다. 하지만, 여름 반구의 바람 구조가 관측에서 많이 벗어난다는 문제점은 SCGW1A 실험에서와 유사한 형태로 나타났다. 한편, 겨울 반구 제트의 세기는 지나치게 많이 강화되는 문제점을 보였다. 앞서 1월 달 실험에서와 마찬가지로 겨울 반구에서만 특별히 2차 중력파의 크기를 3배 정도 증가시킬 방법이 필요할 것으로 판단되며, 이 때 진폭을 3배 증가시키면 전반적으로 2차 중력파의 서향 파동 강제력이 성층권에서 비례해서 강해진다는 사실은 이미 확인된 바 있다.

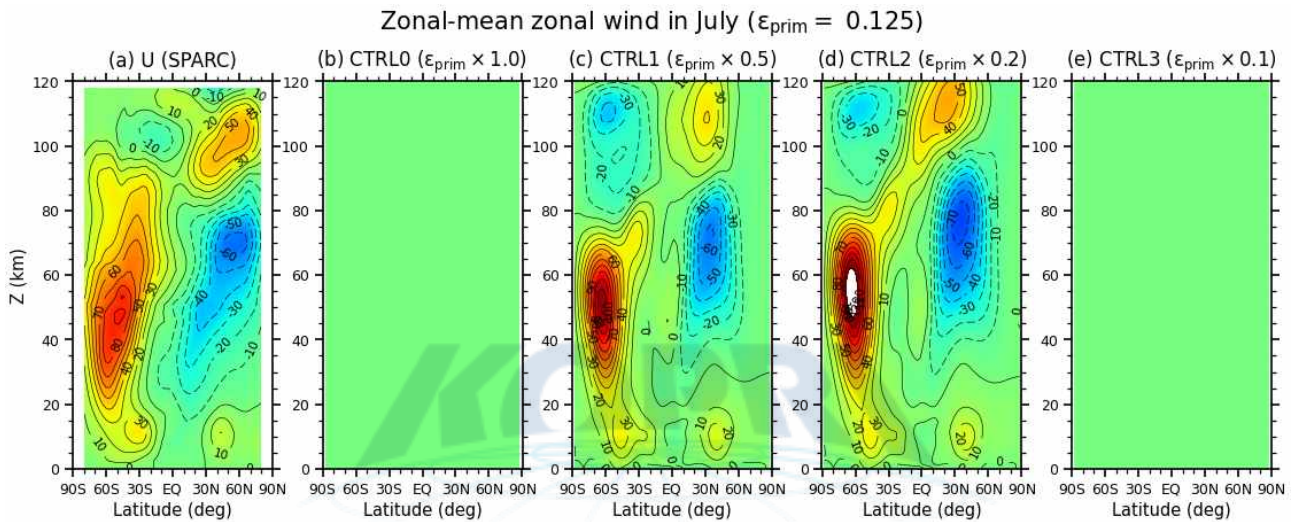


그림 2-15. 7월에 대한 동서평균 동서류의 기후값 (SPARC) 및 primary 중력파 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 동서류. 단, CTRL1과 CTRL2 실험만 수행됨.

Korea Polar Research Institute

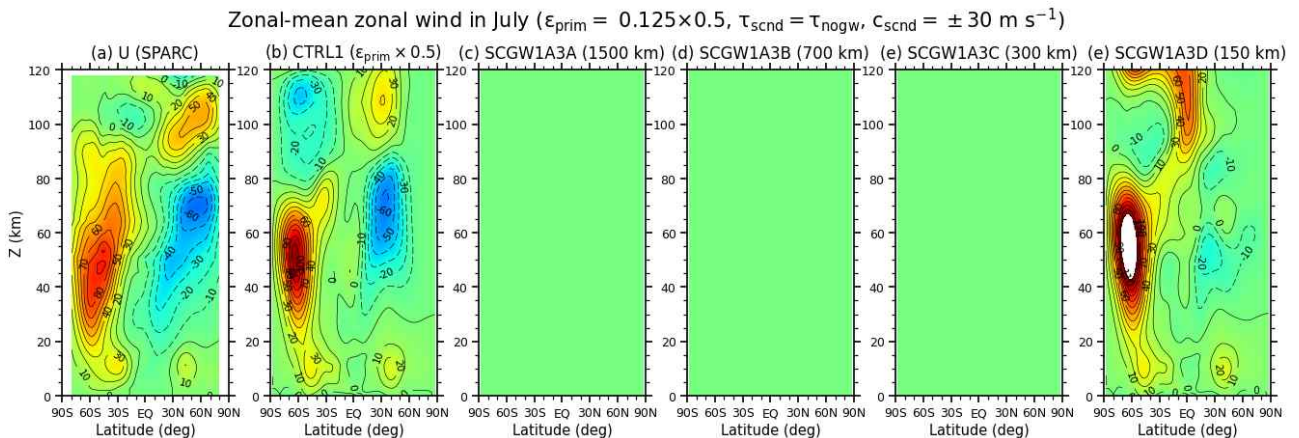


그림 2-16. 그림 2-15와 동일. 단, primary 중력파 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{\text{prim}} = 0.125 \times 0.5$)로 설정하고, $c_{\text{scnd}} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean zonal wind in July ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

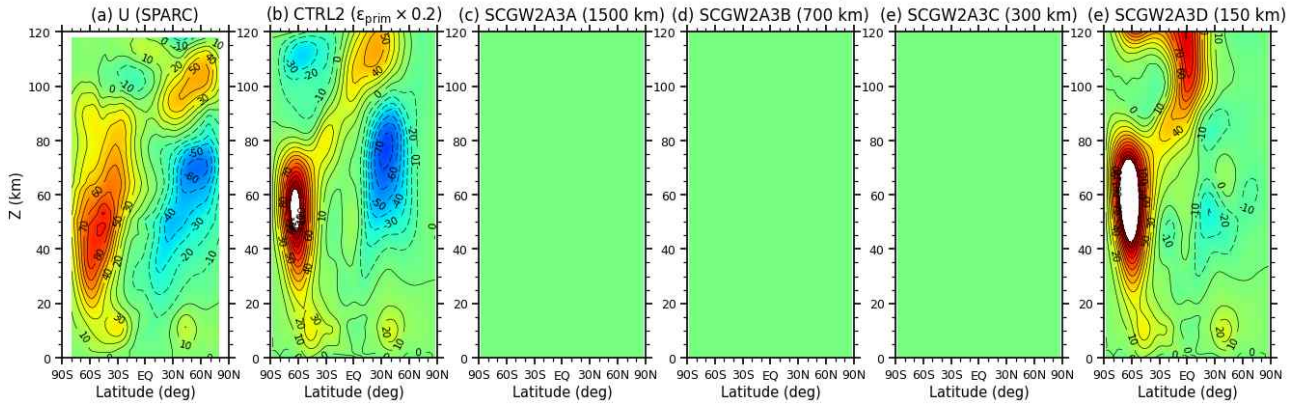


그림 2-17. 그림 2-16과 동일. 단, primary 중력파 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.



2.2 동서평균 온도 구조 분석

Primary 중력파의 간헐성 인자를 조절하면 바람뿐만 아니라 온도 구조도 함께 변화한다. 그림 2-18은 1월에 대한 동서평균 온도의 기후값 및 SWAD 모델 결과를 나타낸다. CTRL0에서 CTRL3로 감에 따라 겨울 반구 극지역 하부 중간권의 온도가 낮아지면서 SPARC 기후값과 유사해졌다. 하지만, CTRL3에서는 온도가 지나치게 낮게 나타났으며, CTRL1 또는 CTRL2가 가장 관측 온도 기후값의 구조를 가장 잘 모의하는 것으로 나타났다. 여름 반구 중간권계면 온도는 CTRL0이 가장 잘 모의한 반면에 CTRL3로 갈수록 중간권계면 온도가 조금씩 상승하는 것으로 보인다.

그림 2-19는 CTRL1 및 SCGW1 실험 결과를 나타낸다. SCGW1A3 실험에서 2차 중력파의 수평 파장이 큰 경우에는 여름 반구 중간권계면 온도가 과도하게 상승하는 것을 확인할 수 있다. SCGW1A3C나 SCGW1A3D의 경우와 같이 2차 중력파의 수평 위상 속도가 30 m s^{-1} 이고, 수평 파장이 300 km 혹은 150 km일 때 가장 SPARC 기후값과 유사한 결과를 모의하는 것으로 나타났다.

그림 2-20은 CTRL2 및 SCGW2 실험 결과를 나타낸다. SCGW2A3 실험에서도 앞선 실험과 마찬가지로 2차 중력파의 수평 파장이 큰 경우에는 여름 반구 중간권계면 온도가 과도하게 상승하는 문제가 있었으며, SCGW2A3C나 SCGW2A3D의 경우와 같이 2차 중력파의 수평 위상 속도가 30 m s^{-1} 이고, 수평 파장이 300 km 또는 150 km일 때 가장 기후값과 유사한 결과를 모의하였다. 하지만 SCGW1A3과 비교해서 SCGW2A3C나 SCGW2A3D에서 여름 반구 중간권계면의 온도가 조금 더 상승한 모습을 확인할 수 있었다.

그림 2-21은 SCGW2B2 실험 결과를 보여준다. 2차 중력파의 운동량 속의 크기가 3배 더 증가했을 때, 겨울 반구의 온도 구조는 성층권계면 부근에서 SPARC 기후값과 비슷하게 나타났다. 특이한 점은 겨울 반구 극지역 하부 성층권의 온도가 더 낮아진다는 점이다. 이러한 현상이 나타나는 이유는 향후에 추가 연구가 필요할 것으로 보인다. 반면, 여름 반구에서는 중간권계면의 온도가 SPARC 기후값과 비교하여 상당히 증가되는 것을 확인할 수 있다. 그 결과 앞의 동서평균 동서류 구조에서와 같이 바람 역전이 발생하지 않았다. 앞에서 언급했듯이 2차 중력파는 겨울 반구에서는 모델링 결과를 개선시키는데 도움이 되는 것으로 보이나, 여름 반구에서는 2차 중력파 자체가 오히려 모델링 결과를 악화시키는 것으로 판단된다.

그림 2-22는 SCGW3B2 실험 결과이며, 해당 실험의 경우 SCGW2 실험과 유사한 결과를 보였다.

Zonal-mean temperature in January ($\epsilon_{prim} = 0.125$)

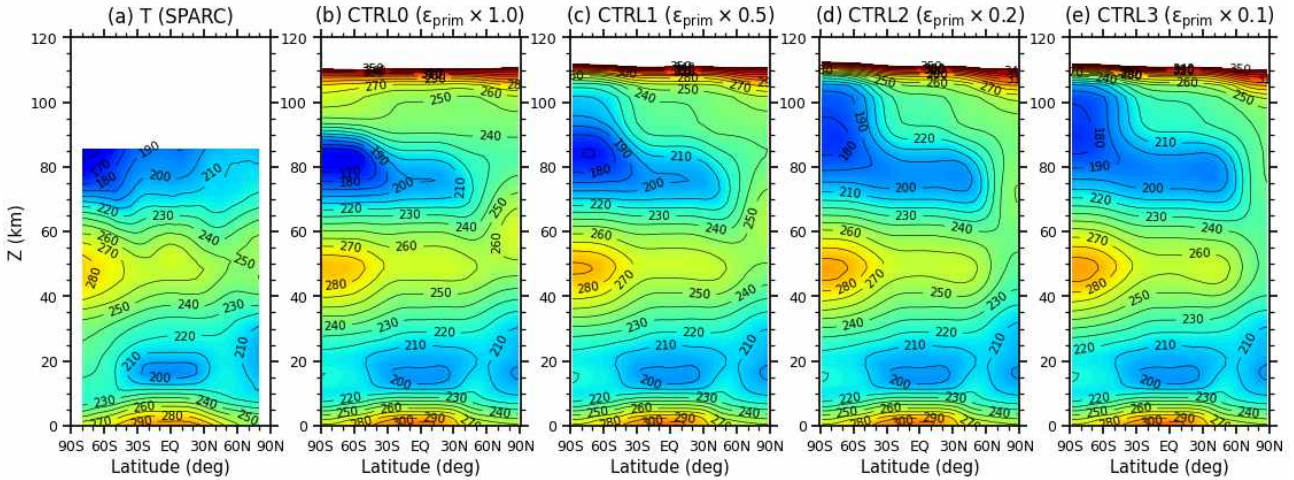


그림 2-18. 1월에 대한 동서평균 온도의 기후값 (SPARC) 및 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 온도.

Zonal-mean temperature in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

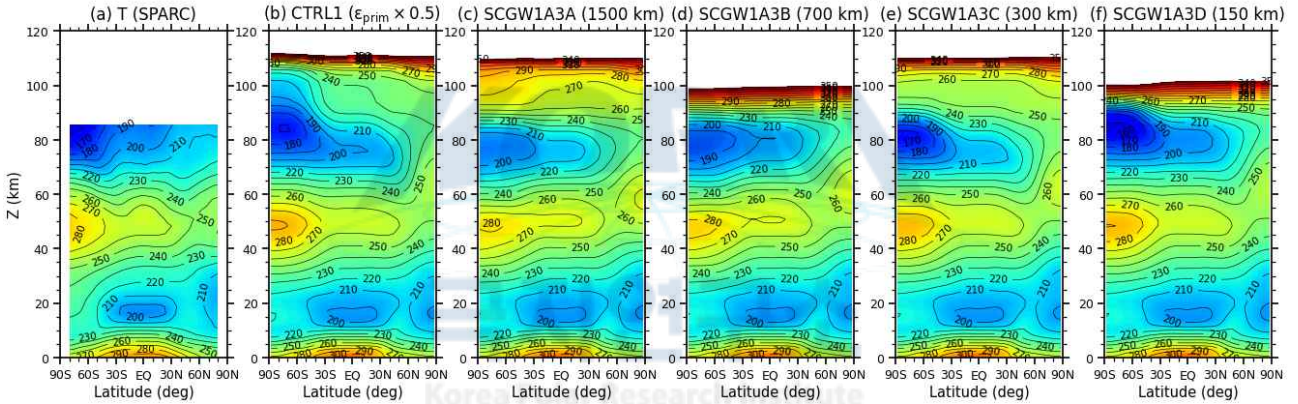


그림 2-19. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 온도. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean temperature in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

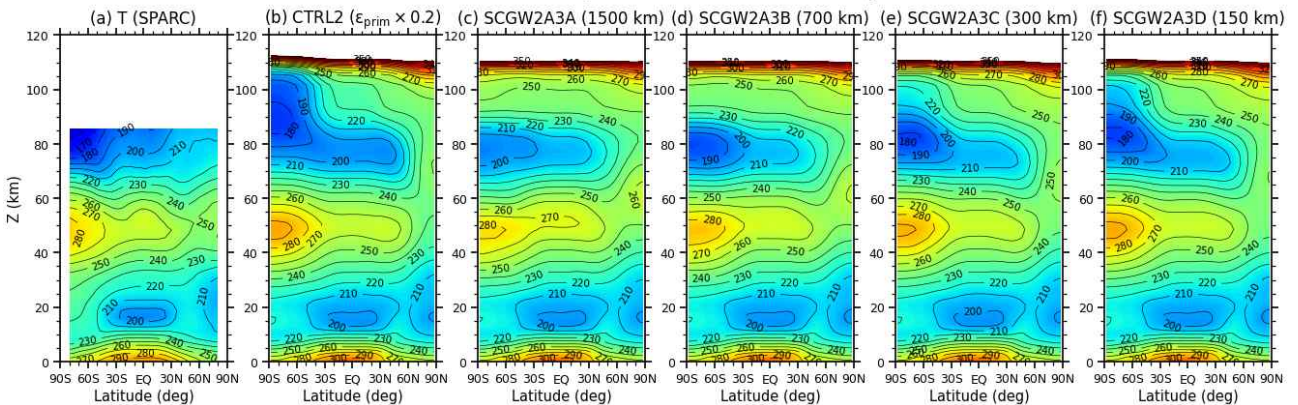


그림 2-20. 그림 2-19과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Zonal-mean temperature in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

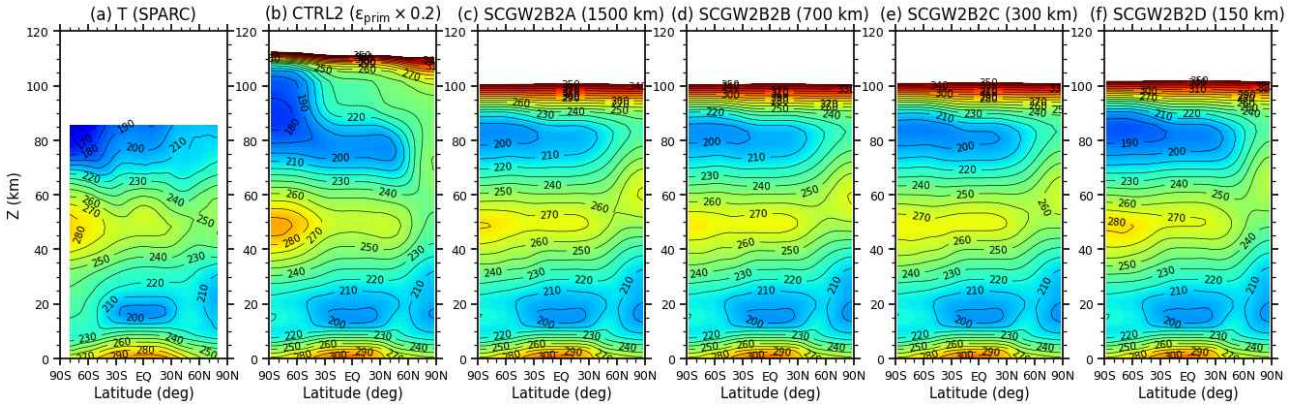


그림 2-21. 그림 2-20과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean temperature in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

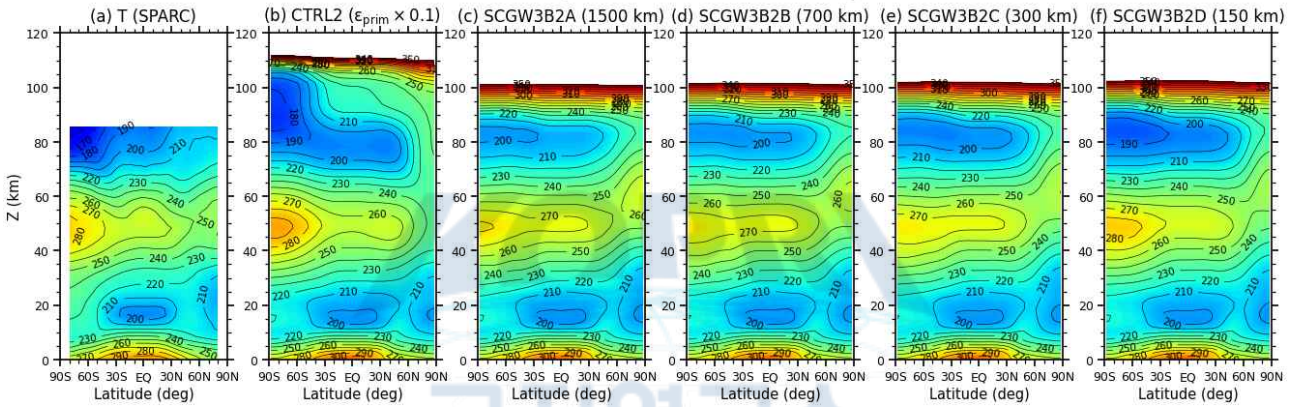


그림 2-22. 그림 2-21과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함.

2.3 하부 열권 화학물질 혼합비 분포 분석

그림 2-23은 1월에 대한 동서평균 동서류 (CTRL0) 및 primary 중력파 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 하부 열권 생성 화학 물질 혼합비의 위도-고도 단면도이다.

Primary 중력파의 간헐성 인자를 줄일수록 고도 100 km, 위도 60도에서 매시간 생성되도록 설정한 화학물질의 하향 수송이 강해지는 것을 확인할 수 있다. CTRL0에서는 고도 90-100km에서 이 화학물질이 상당한 정도로 갇혀있는 것을 확인할 수 있는 반면, CTRL3에서는 성층권 고도까지 하강하는 것을 확인할 수 있다. 예를들어, 화학물질 혼합비 농도가 $1.e^{-5}$ 인 contour를 봤을 때, CTRL0에서는 북반구에서 고도 70 km 아래로 contour가 내려오지 못하지만, CTRL3에서는 고도 35 km까지 내려오는 것을 확인할 수 있다.

반면에 2차 중력파를 포함시키는 경우에는 (그림 2-24), 하부 열권에 주어졌던 화학물질의 혼합비 구조가 SCGW1에서는 CTRL1과 비슷하거나 하향 수송이 다소 약해지는 결과를 보였다. CTRL 실험에선 primary 중력파의 간헐성 인자가 줄어들면서 중간권계면의 고도가 올라가고 그에 따라 하부 열권의 화학물질의 하향 수송이 증가하는데, SCGW1에서도 중간권계면의 고도가 올라감에도 화학물질의 하향 수송이 약해지는 것은 직관적으로 이해되지 않는 결과이다. 이를 이해하기 위해서는 중간권 라그랑지안 순환을 보여주는 잔여순환 순환을 살펴볼 필요가 있으며, 잔여 순환 분석 결과는 섹션 2-7에서 다룰 예정이다.

그림 2-25는 CTRL1 및 SCGW1A2 실험 결과를 나타낸다. 2차 중력파의 수평 파장에 대한 민감도가 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 2차 중력파의 수평 파장이 짧아질수록 화학물질의 하향 수송은 점점 더 약해졌다. 위상 속도가 10 m s^{-1} 일 때 보다 (그림 2-24) 20 m s^{-1} 로 설정했을 때, 화학물질의 하향 수송이 더 많이 약화된 것을 알 수 있다.

그림 2-26은 위상 속도를 30 m s^{-1} 로 설정한 실험 결과이다. 앞선 두 실험 결과보다 더 약해진 화학물질 하향 수송을 확인할 수 있다. 구체적으로 살펴보면 SCGW1A3D의 실험의 경우, 겨울 반구 극지역에서 열권 하부 화학물질의 하향 수송은 거의 발생하지 않는 것으로 보인다. 하지만 SCGW1A3D에서 중간권계면의 바람 구조는 SPARC 기후값과 비교하여 크게 차이 나지 않은 수준이었다.

그림 2-27은 primary 중력파 간헐성 인자를 20%로 조절한 SCGW2A1 실험 결과이다. 하부 열권 고위도 지역에서 생성되는 화학물질은 겨울 반구 극지역에서 성층권으로 수송되는데, 2차 중력파가 고려된 실험에서는 일관되게 하향 수송이 약해졌으며, 2차 중력파의 수평 파장이 짧을수록 하향 수송은 더 약해지는 모습을 보였다. 수평 파장이 짧아지는 경우 saturation 운동량 속이 증가하면서 파동이 더 높은 고도에서 깨지게 된다. 즉, 2차 중력파의 수평 파장이 짧을수록 중간권 상부 혹은 열권 하부에서 화학물질의 하향 수송을 막는 순환이 유도되는 것으로 파악된다.

Zonal-mean mixing ratio q_{chem} in January ($\epsilon_{prim} = 0.125$)

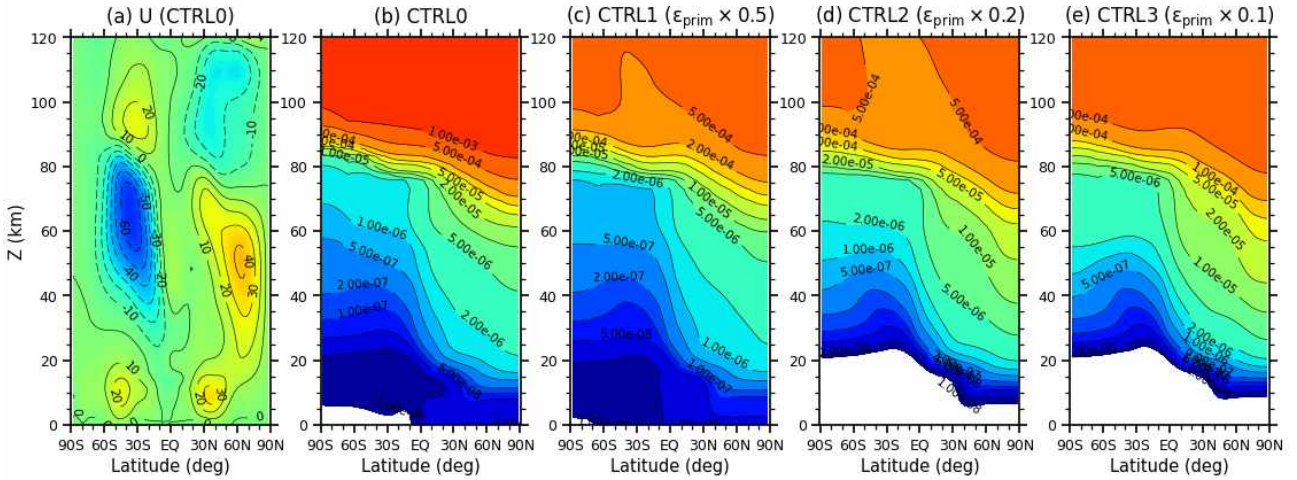


그림 2-23. 1월에 대한 동서평균 동서류 (CTRL0) 및 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 하부 열권 생성 화학 물질 혼합비 분포

Zonal-mean mixing ratio q_{chem} in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$)

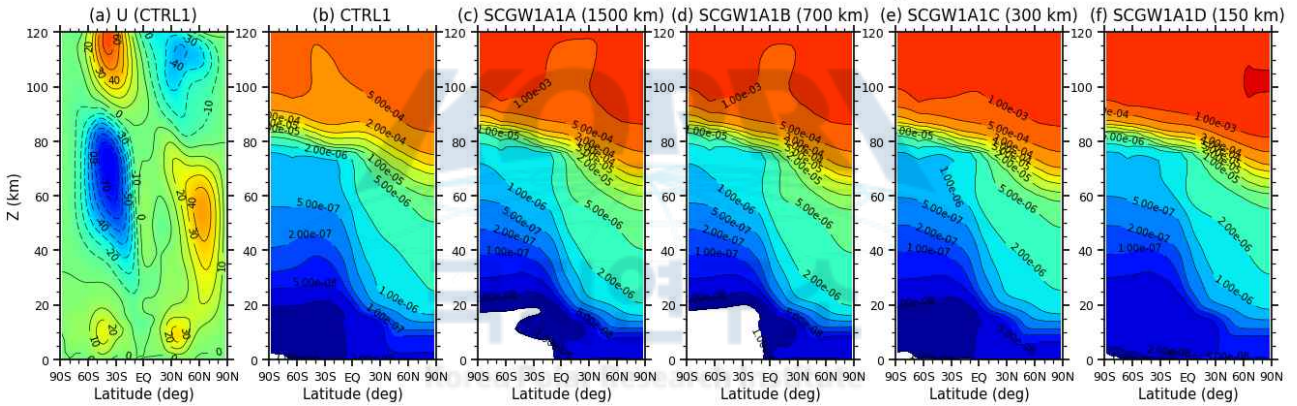


그림 2-24. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 화학 물질 혼합비. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean mixing ratio q_{chem} in January ($\epsilon_{prim} = 0.125$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

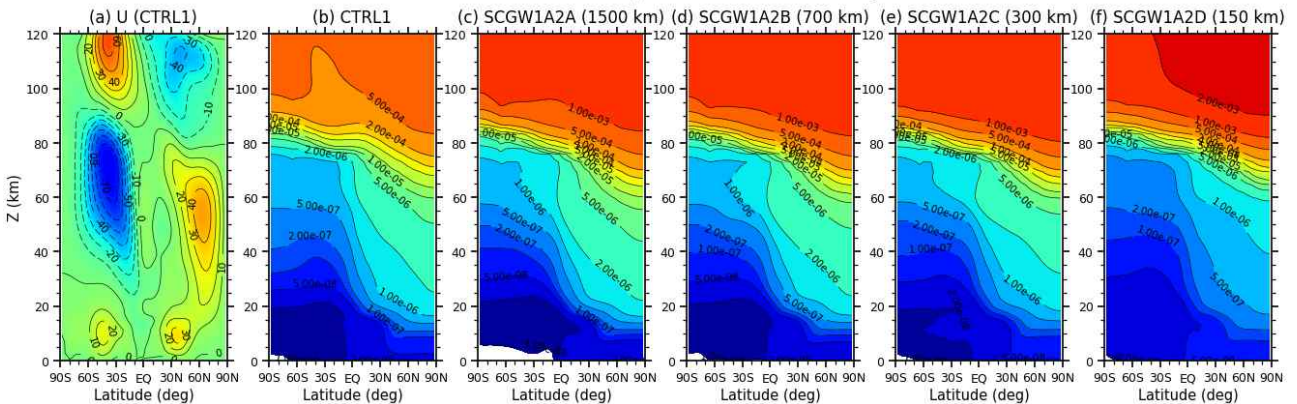


그림 2-25. 그림 2-24와 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean mixing ratio q_{chem} in January ($\epsilon_{prim} = 0.125$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

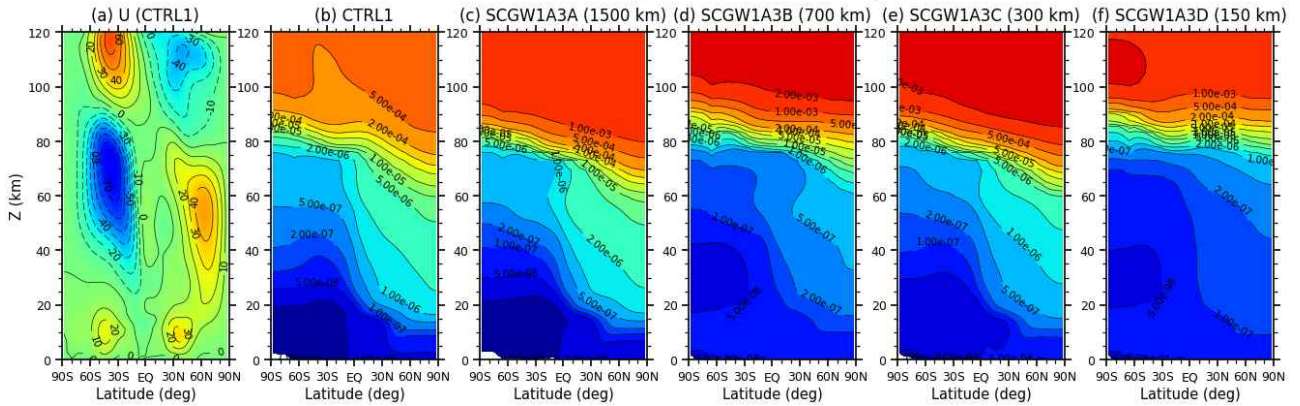


그림 2-26. 그림 2-24와 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean mixing ratio q_{chem} in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$)

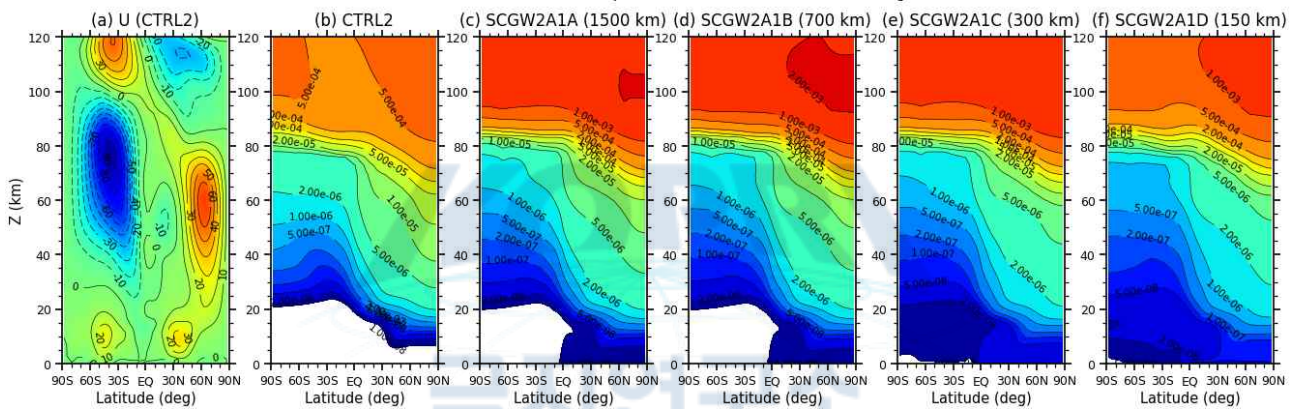


그림 2-27. 그림 2-24와 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Zonal-mean mixing ratio q_{chem} in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

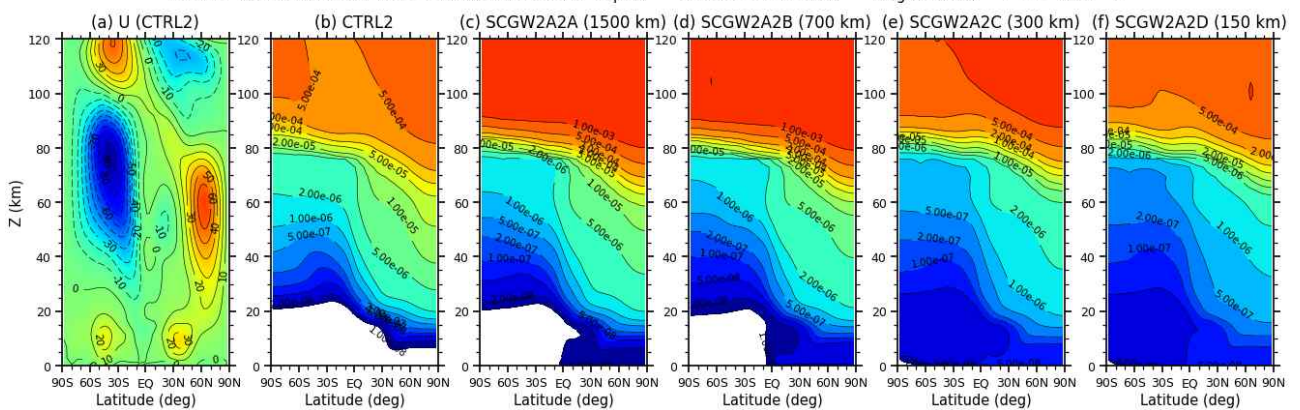


그림 2-28. 그림 2-27과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

그림 2-28은 SCGW2A2 실험 결과이다. SCGW2에서 2차 중력파의 위상속도가 20 m s^{-1} 로 커지면, 화학물질의 하향 수송이 더 악화되는 모습을 보였으며, 이는 SCGW1에서도 동일하게 확인된 바 있다.

그림 2-29는 2차 중력파의 위상속도가 30 m s^{-1} 로 높은 SCGW2A3 실험 결과이며, 이 경우 화학물질의 하향 수송은 더욱 약해짐을 확인할 수 있었다. 하향 수송이 약해지는 정도는 2차 중력파의 수평 파장이 150 km 인 경우에 가장 심하게 나타났다. 결과적으로 2차 중력파의 위상 속도가 클 수록 그리고 수평 파장이 짧을수록 화학물질의 하향 수송이 짧아지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 2-30은 2차 중력파 운동량 속의 크기를 늘린 SCGW2B2 실험 결과이다. 이 경우 화학물질의 하향 수송은 좀 더 약하게 나타났다.

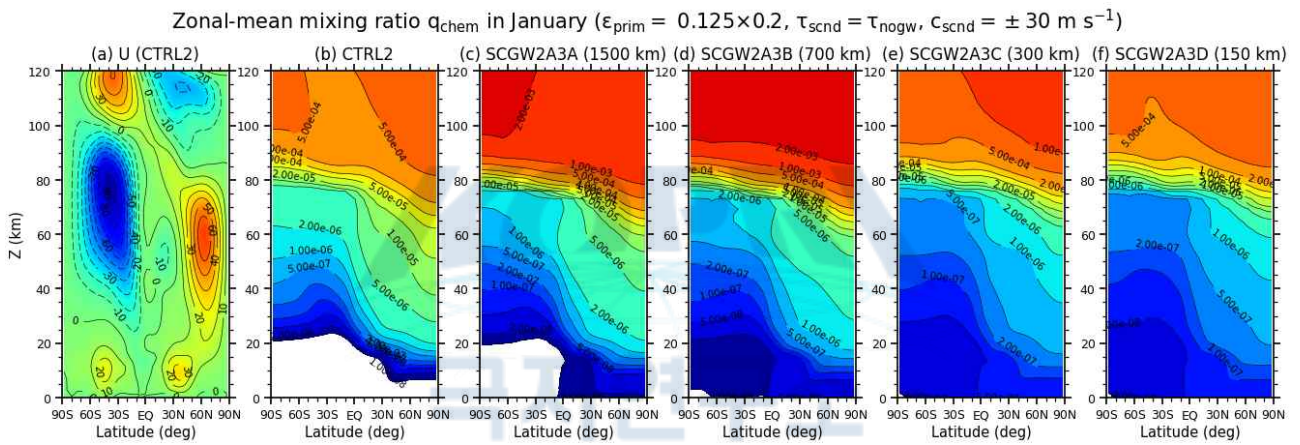


그림 2-29. 그림 2-27과 동일. 단, $c_{\text{scnd}} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

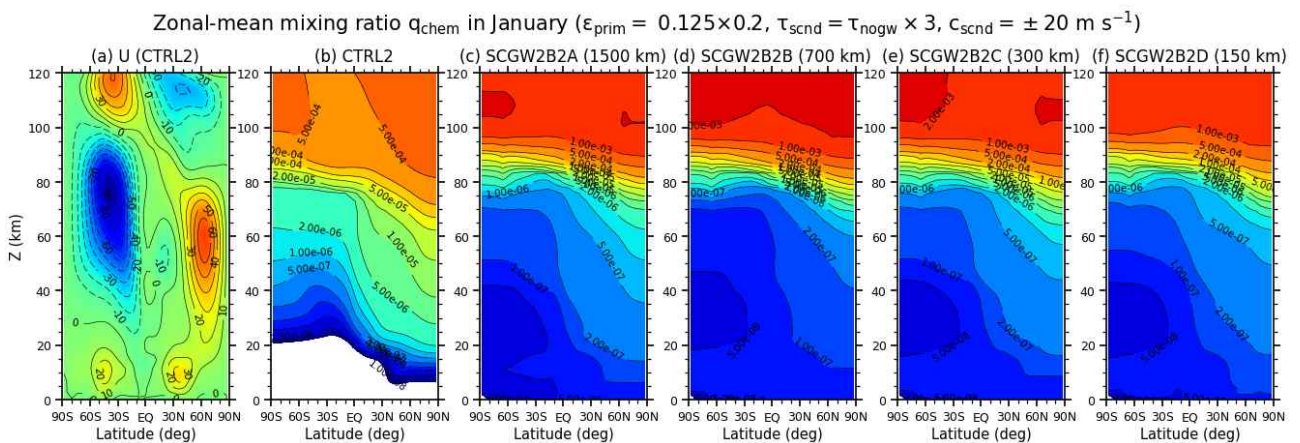


그림 2-30. 그림 2-28과 동일. 단, $\tau_{\text{scnd}} = \tau_{\text{nogw}} \times 3$ 으로 설정함.

Zonal-mean mixing ratio q_{chem} in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

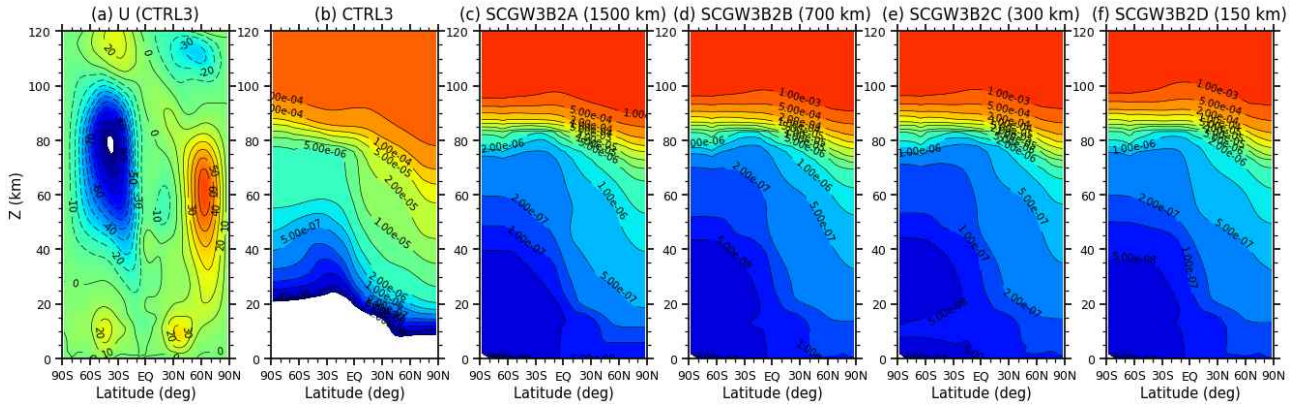


그림 2-31. 그림 2-30과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함.

그림 2-31은 primary 중력과 간헐성을 더 줄인 CTRL3과 SCGW3 실험 결과이다. 이 경우 하향 수송이 약간 강화된 결과가 나타났다. 하지만, 전반적으로 2차 중력파가 화학물질의 하향 수송을 방해하고, primary 중력파 효과가 약화됨으로써 화학물질이 하향 수송이 강화되는 결과가 나타났다.



2.4 북반구 고위도 중층대기 실험 결과 및 성층권 돌연 승온과의 연관성

그림 2-32는 primary 중력파 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도에서 동서평균 화학물질 혼합비의 시간-고도 단면도를 나타낸다. 겨울 반구 고위도에서는 primary 중력파 간헐성이 작아질수록 화학물질의 하향 수송이 더 강화되는 것을 확인할 수 있다. 화학물질의 하향 수송은 시간적으로 연속적으로 일어나는 것은 아니며, 성층권 돌연 승온과 관련되어서 하향 수송이 간헐적으로 발생하는 것으로 보인다.

그림 2-33은 CTRL1 및 SCGW1A1 실험 결과이다. 전반적으로 2차 중력파를 고려했을 때 화학물질의 하향 수송이 약화되는 모습을 확인할 수 있었다. 하지만 2차 중력파의 수평 파장이 매우 큰 경우에는 CTRL1보다 화학물질 수송이 다소 증가하는 모습이 보이기도 한다. 반면 2차 중력파의 수평 파장이 작아질수록 하향 수송은 더 약해지는 결과가 뚜렷하게 나타났다.

그림 2-34는 위상 속도를 20 m s^{-1} 로 증가시킨 실험 결과이다. 위상 속도가 증가함에 따라 하향 수송은 더욱 약해지는 것을 확인할 수 있으며, 하향 수송이 약화되는 정도는 2차 중력파의 수평 파장이 짧을수록 더 강하게 나타났다.

그림 2-35는 위상 속도를 30 m s^{-1} 로 증가시킨 실험 결과이다. 화학물질의 하향 수송은 30 m s^{-1} 일 때와 비슷하거나 더 약해지는 것을 확인할 수 있었으며, 앞선 결과와 마찬가지로 하향 수송이 약화되는 정도는 2차 중력파의 수평 파장이 짧을수록 더 강하게 나타났다.

그림 2-36은 CTRL2 및 SCGW2A1의 결과이다. 이 경우 화학물질의 하향 수송이 더 강화되는 모습을 볼 수 있으며, 2차 중력파의 수평 파장이 줄어들수록 하향 수송이 줄어드는 경향성이 분명하게 나타났다.

그림 2-37은 SCGW2A2의 결과이다. 이 실험의 경우 앞선 실험과 비교해보았을 때, 화학물질의 하향 전파 특성은 비슷하며 강도는 다소 약해진 것으로 보인다.

그림 2-38은 SCGW2A3의 결과이다. 하향 수송은 20 m s^{-1} 일 때와 비슷하거나 더 약해지는 것을 확인할 수 있다. 화학물질의 하향 수송이 약화되는 정도는 수평 파장이 짧을수록 더 강하게 나타났다.

그림 2-39는 2차 중력파의 운동량 속을 증가시킨 SCGW2B2 실험 결과이다. 이 경우 전반적으로 북반구 고위도 하향 수송은 더 많이 감소한 모습을 확인할 수 있다.

그림 2-40은 CTRL3 및 SCGW3B2 실험 결과를 나타낸다. 이 경우 CTRL에서는 하향 수송이 증가하지만 2차 중력파를 고려한 경우에는 하향 수송이 거의 없을 정도로 약해진 모습을 확인할 수 있었다.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125$)

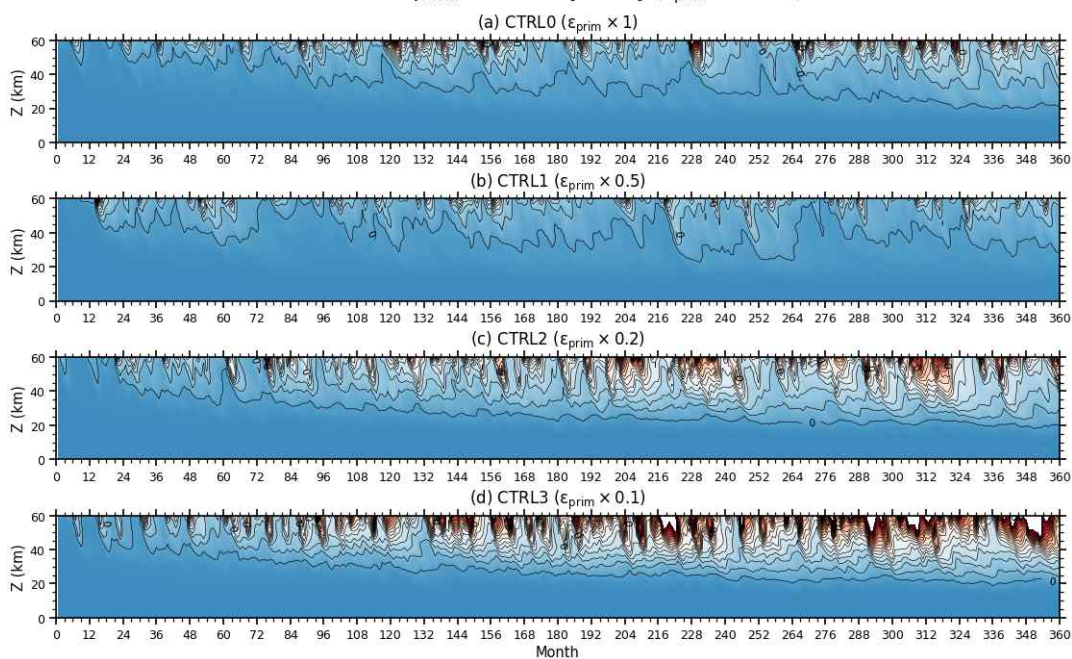


그림 2-32. Primary 중력과 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도에서의 동서 평균 화학 물질 혼합비의 시간-고도 분포

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$)

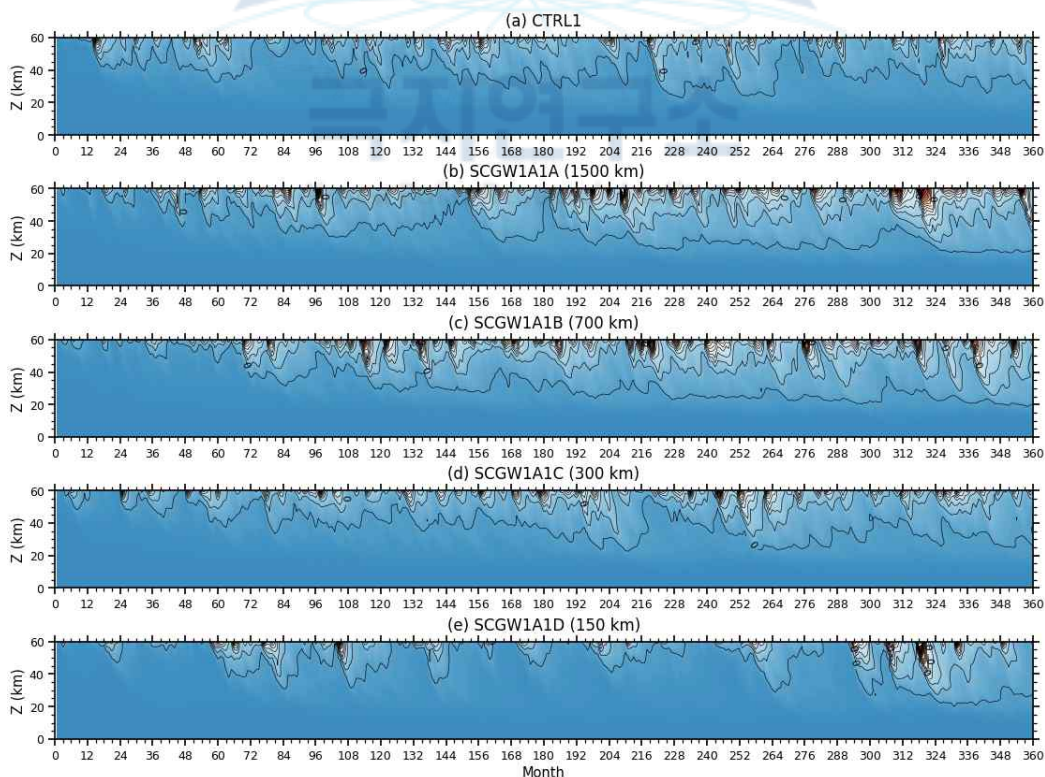


그림 2-33. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 북위 60도의 동서평균 화학 물질 혼합비의 시간-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

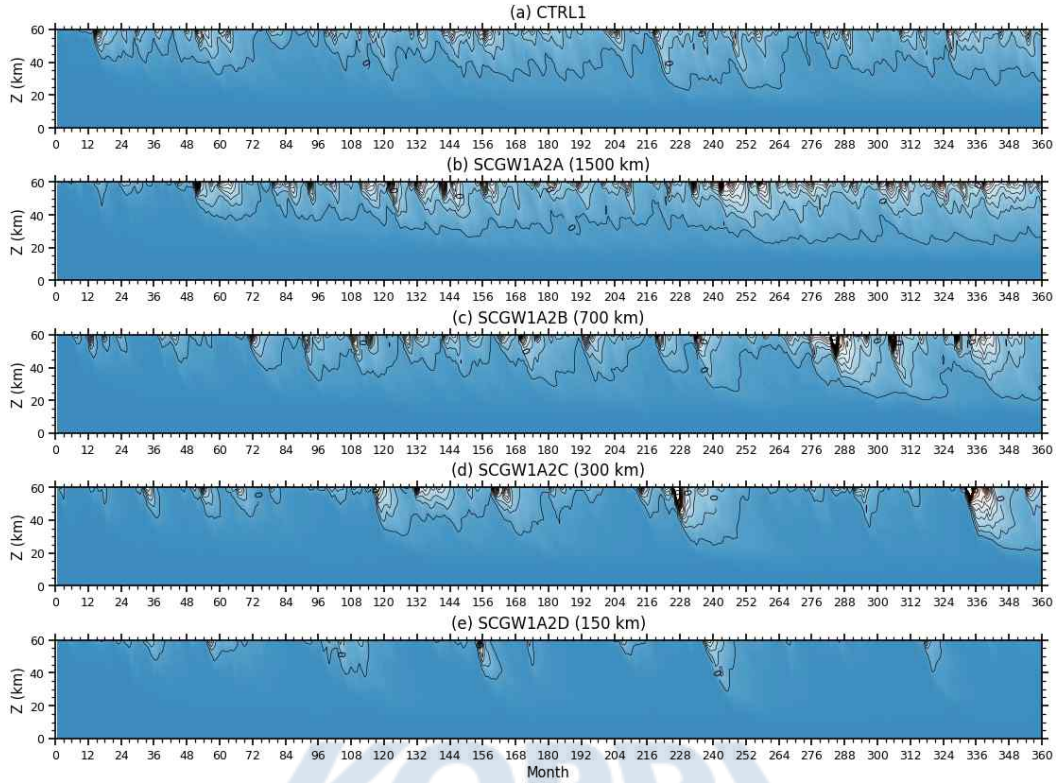


그림 2-34. 그림 2-33과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

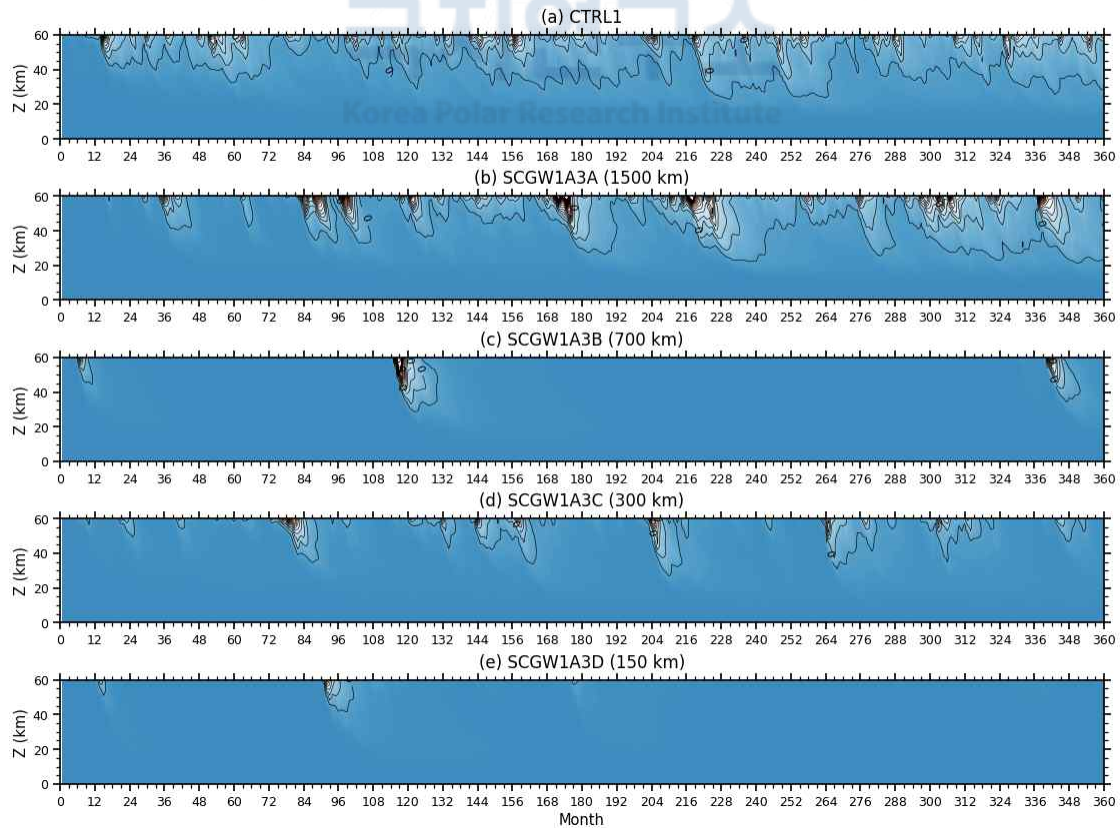


그림 2-35. 그림 2-33과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$)

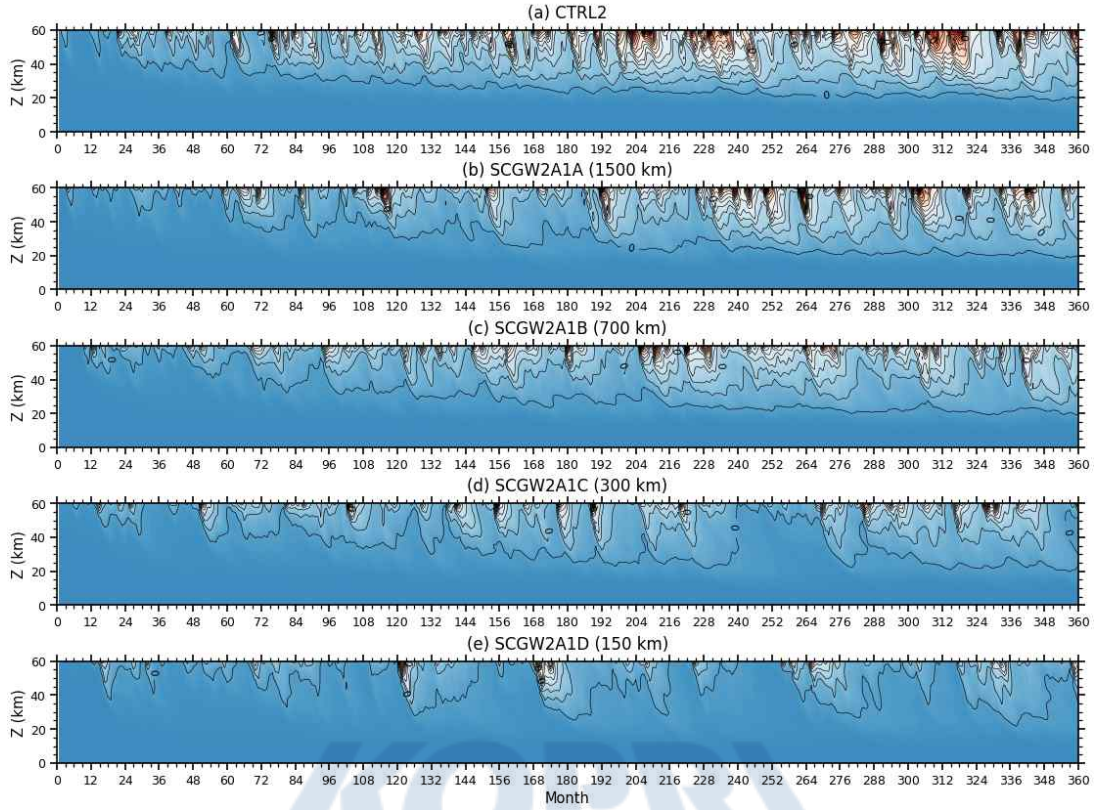


그림 2-36. 그림 2-33과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

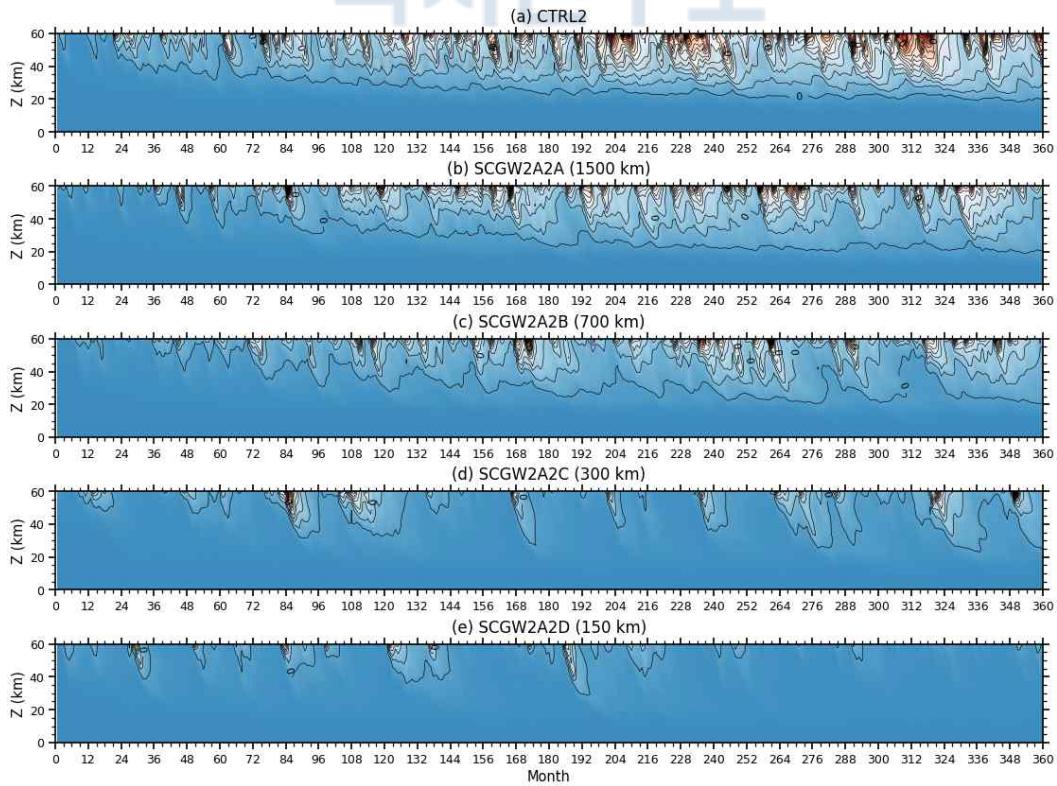


그림 2-37. 그림 2-36과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

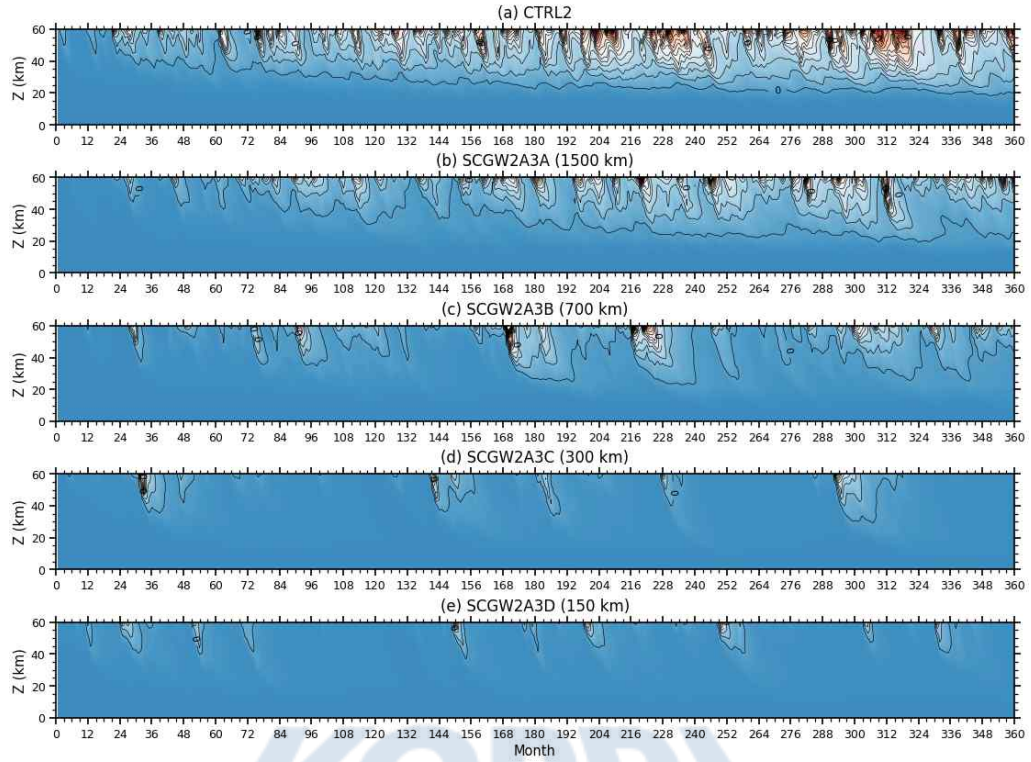


그림 2-38. 그림 2-36과 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

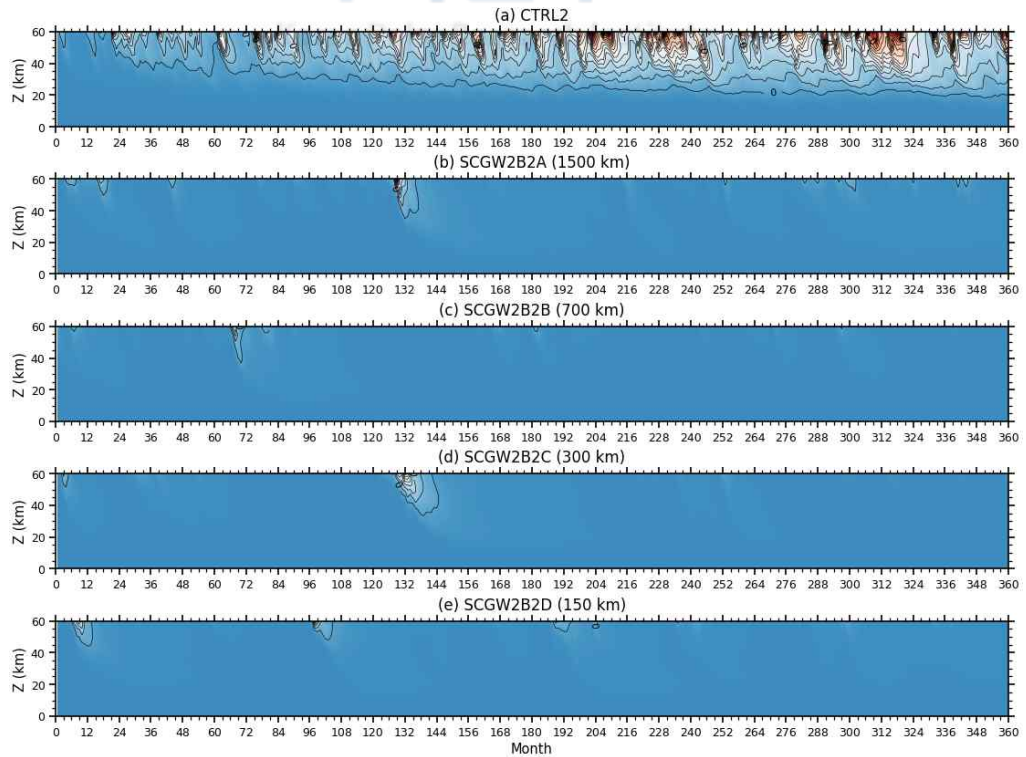


그림 2-39. 그림 2-37과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 으로 설정함.

Zonal-mean q_{chem} at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

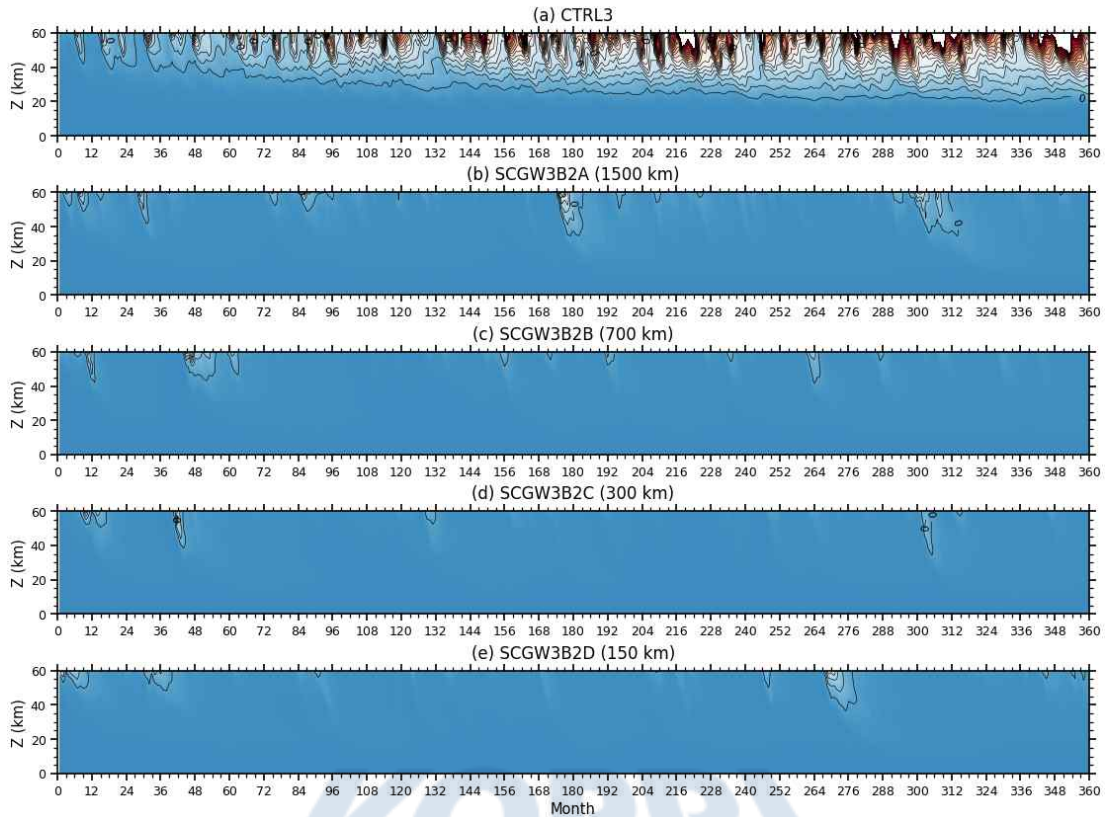


그림 2-40. 그림 2-39과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.1배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.1$)로 설정함.

극지연구소

하부 열권이나 중간권 상부에서 발생한 화학물질이 성층권까지 수송되는 것은 중층대기의 하향 수송류에 크게 의존할 수 있다. 물론 2차 중력파를 포함시킴으로써 하부 열권 혹은 상부 중간권에 특징적인 순환이 발생하여 하부 열권에서 생성된 화학 물질이 성층권으로 수송되는 것을 방해할 수는 있지만, 그렇지 않은 경우라면 중층대기 하향 수송류가 화학물질 수송에 있어서 매우 중요하다. 이러한 중층대기 하향 수송을 결정하는 주요 요인이 성층권 돌연 승온 및 이와 연관된 겨울 반구 극지 하향 수송이다.

그림 2-41은 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도에서의 동서평균 동서류의 시간-고도 단면도이다. CTRL 실험에서 중간권 위쪽 고도에서의 primary 중력과 간헐성 인자의 변화는 특별히 성층권 돌연 승온 발생 빈도에 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.

그림 2-42는 북위 60도, 고도 10 hPa에서의 동서평균 동서류의 시계열을 나타낸다. Major 성층권 돌연 승온의 발생은 해당 위도/고도에서의 동서평균 동서류가 서풍에서 동풍으로 역전될 때로 정의된다. 앞선 그림의 결과와 마찬가지로, primary 중력과 간헐성 인자의 변화는 성층권 돌연 승온 발생 빈도와 큰 연관성이 없는 것으로 보인다.

Zonal-mean zonal wind at 60N for January ($\epsilon_{\text{prim}} = 0.125$)

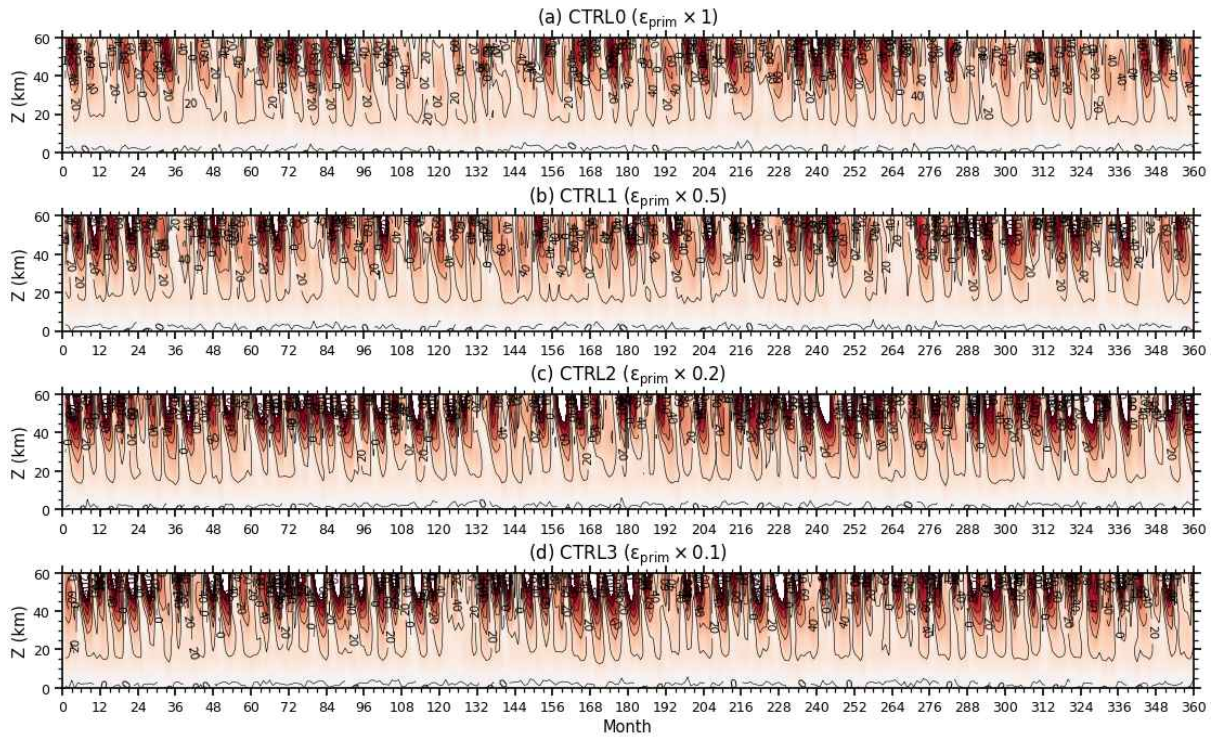


그림 2-41. Primary 증력과 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도에서의 동서평균 동서류의 시간-고도 분포

Monthly zonal-mean zonal wind at 60N, 10hPa for January ($\epsilon_{\text{prim}} = 0.125$)

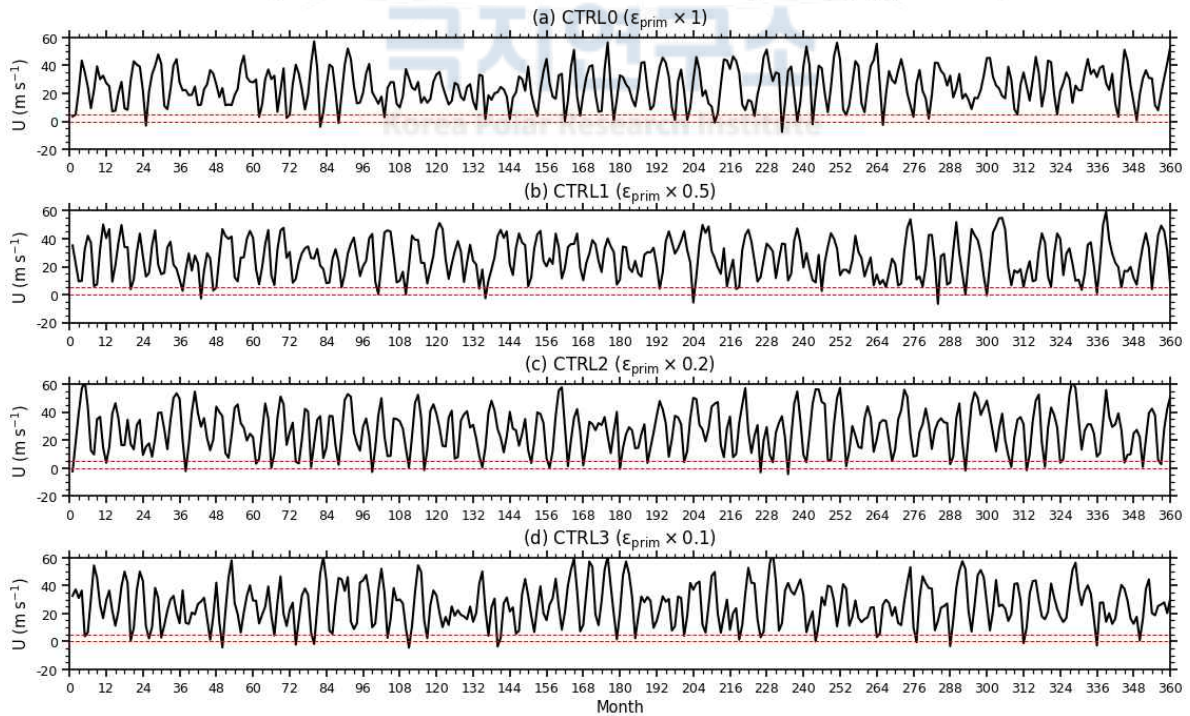


그림 2-42. Primary 증력과 간헐성 인자에 따른 1월 달 북위 60도, 고도 10hPa에서의 동서평균 동서류의 시계열

그림 2-43은 SCGW1A3A 실험의 결과이다. 해당 실험에서 성층권 돌연 승온 사례는 모두 비슷한 빈도와 양상을 띄는 것으로 보인다.

그림 2-44은 앞의 그림과 동일하나 고도 10 hPa에서의 시계열을 나타내며, 앞선 실험 결과들과 마찬가지로 성층권 돌연 승온 빈도에는 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

그림 2-45는 CTRL2 및 SCGW2A3 실험의 결과이다. 해당 실험에서도 앞선 결과와 마찬가지로 성층권 돌연 승온의 빈도는 크게 변하지 않는 것으로 보인다.

그림 2-46은 앞의 그림과 동일하나 고도 10 hPa에서의 시계열을 나타내며, 성층권 돌연 승온 사례의 빈도 차이는 보이지 않았다. 결과적으로 (특히 수평 파장이 짧은) 2차 중력파가 화학물질의 하향 수송을 방해하는 역할을 하는 것은 중층대기 순환을 변화시켜서 일어나는 것이 아니라 중간권 상부 혹은 열권 하부의 순환 변화를 통해 일어나는 것으로 보인다.



Zonal-mean zonal wind at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

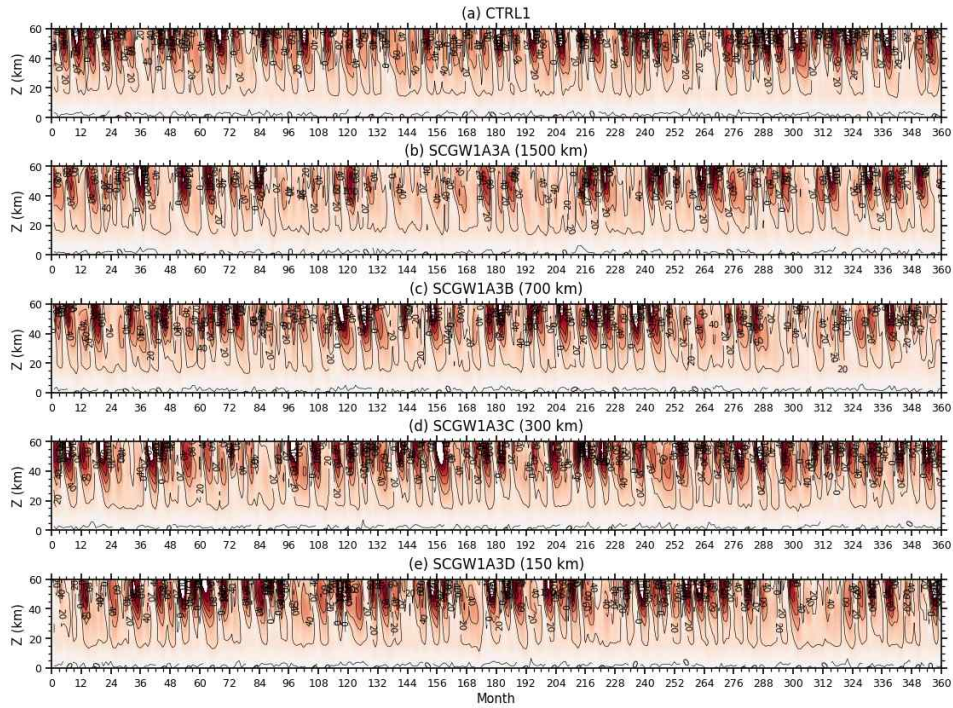


그림 2-43. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 북위 60도의 동서평균 동서류의 시간-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Monthly zonal-mean zonal wind at 60N, 10hPa for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

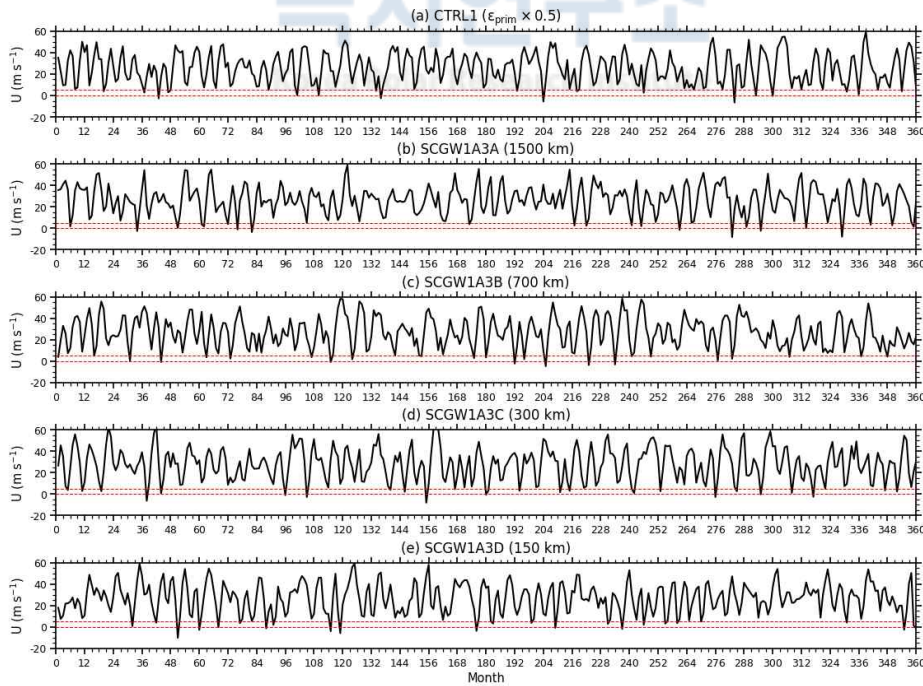


그림 2-44. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 북위 60도, 고도 10hPa의 동서평균 동서류의 시계열. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Zonal-mean zonal wind at 60N for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $C_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

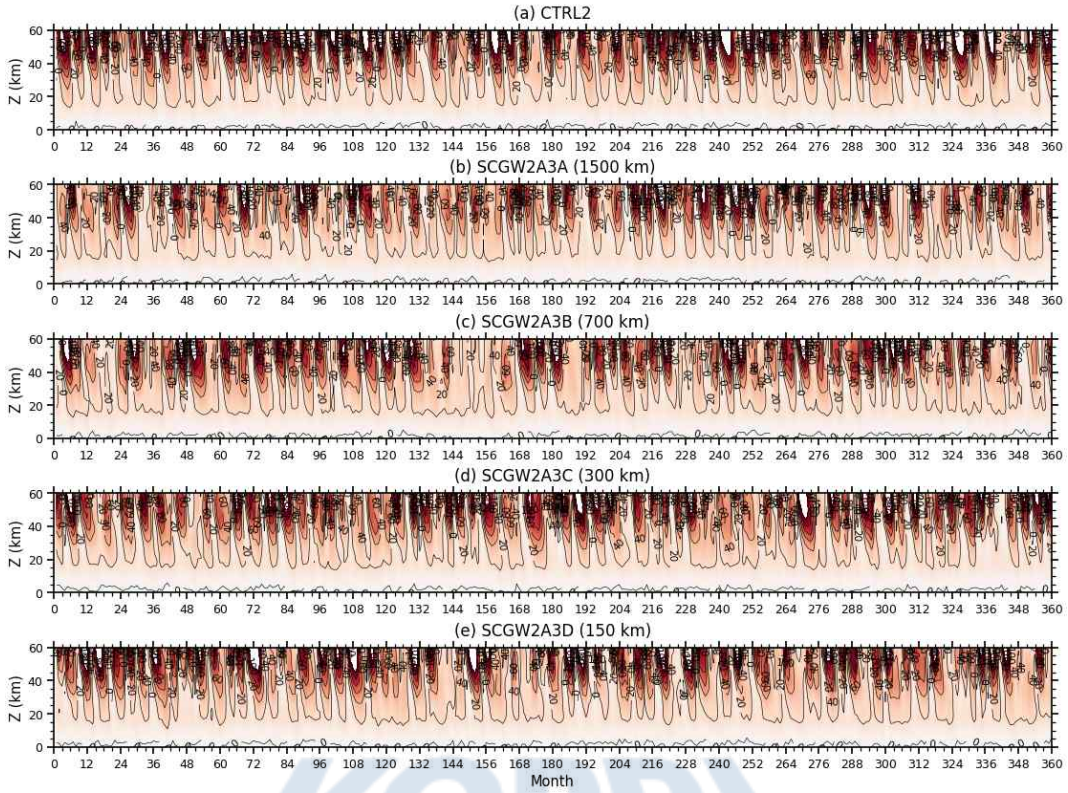


그림 2-45. 그림 2-43과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Monthly zonal-mean zonal wind at 60N, 10hPa for January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $C_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

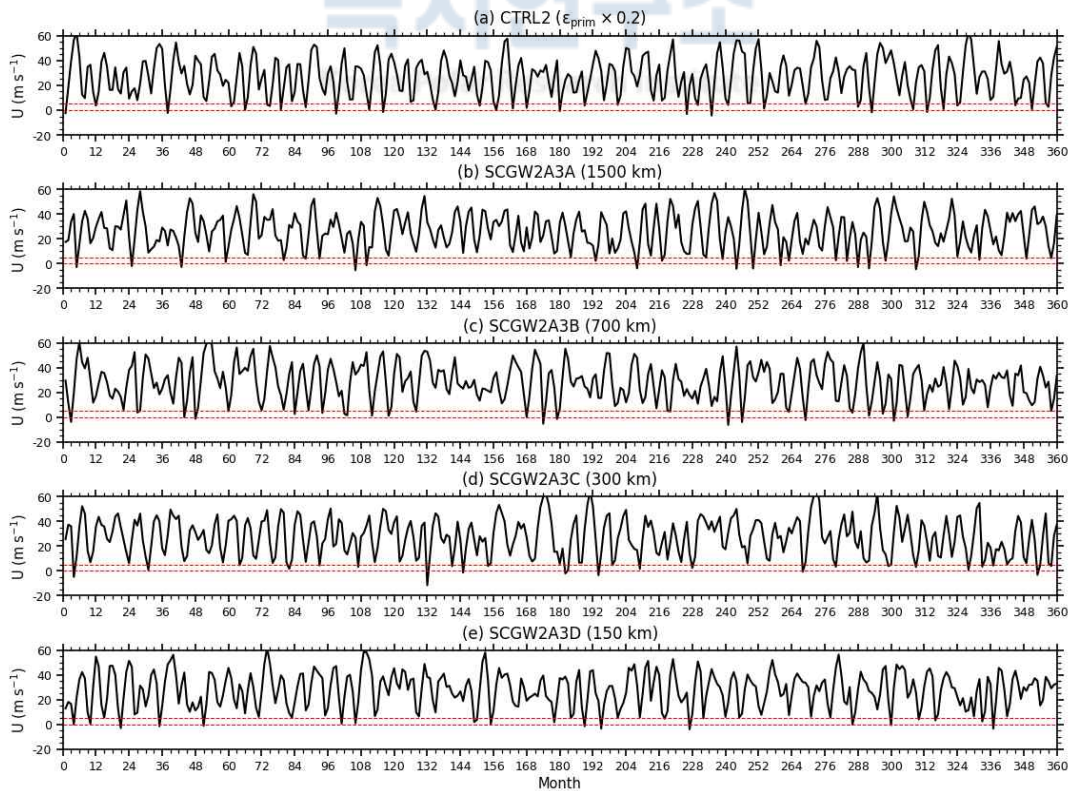


그림 2-46. 그림 2-44와 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

2.5 중력파에 의한 동서평균 동서 가속도 구조 분석

중층대기 및 상층의 잔여 순환을 분석하기에 앞서서 CTRL과 SCGW 실험에서 중력과 강제력은 어떠한 구조를 갖는지 조사할 필요가 있다.

그림 2-47은 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 동서 가속도의 위도-고도 단면도를 나타낸다. CTRL에서 primary 중력과 간헐성 인자가 줄어들어 따라, 전체 중력과 강제력 (gravity wave drag; GWD)의 구조도 상층으로 올라가는 모습을 보인다. 패턴이 상향으로 이동함에 따라 잔여 순환도 더 높은 고도에서 형성될 것으로 예상되며, 그에 따라 여름 반구(남반구)에서 겨울 반구(북반구)로 향하는 흐름이 높은 고도에서 형성될 것으로 추정된다. 잔여 순환에 관한 분석은 섹션 2-7에서 다뤄질 것이다.

그림 2-48은 CTRL1 및 SCGW1A3 실험 결과를 나타낸다. 2차 중력파의 수평 파장이 150 km일 때, 여름 반구 (남반구) 중간권에서 CTRL1과 비슷한 동쪽으로 향하는 강제력이 나타났다. 여름 반구에서 SCGW1A3D와 CTRL1과 비슷한 모습을 보인다는 것은 해당 지역에서 상향 잔여 순환이 강하게 발생하여 온도의 역전이 비교적 현실적으로 일어나는 것을 의미한다. 추가적으로 2차 중력파의 수평 파장이 1500 km와 700 km인 실험의 여름 반구에서는 2차 중력파가 전반적으로 모델링 결과에 악영향을 주는 것은 확인할 수 있다.

그림 2-49는 CTRL2와 SCGW2A3 실험 결과이다. 이전 그림과 비교했을 때 전반적으로 중력과 강제력의 패턴이 상향으로 올라가는 모습을 볼 수 있으며, SCGW1에서와 같이 1500 km 및 700 km인 수평 파장을 갖는 2차 중력파 실험은 여름 반구(남반구)에서 악영향을 주는 것으로 보인다.

그림 2-50은 위상 속도를 10 m s^{-1} 로 줄인 SCGW2A1 실험의 결과이다. 해당 실험의 경우 중간권계면의 고도나 바람 구조의 측면에서 SPARC 기후값과 비슷해지지 않았다. 2차 중력파의 수평 파장을 150 km로 가정하더라도 중력과 강제력의 패턴이 여름 반구(남반구)에서 CTRL2와 비슷해지지 않았으며, 수평 파장이 긴 2차 중력파는 여름 반구(남반구)의 모델링 결과를 악화시키는 것을 확인할 수 있다.

그림 2-51은 2차 중력파 진폭을 증가시킨 SCGW2B2 실험의 결과이다. 겨울 반구 (북반구)의 서향 중력과 강제력은 CTRL2와 비교했을 때, 최대 값은 작지만 더 낮은 고도에 형성되어 성층권 제트의 크기를 줄여주는데 기여할 수 있을 것으로 보인다. 그러나, 여름 반구 (남반구)에서는 CTRL1과는 매우 다른 중력과 강제력 구조를 형성하여 온도 역전을 제대로 모의하지 못하는 결과를 보였다. 해당 실험에서는 150 km의 수평 파장을 갖는 2차 중력파를 가정하더라도 여름 반구에서 모델링 상황이 개선되지 않는 것으로 보인다.

Total zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125$)

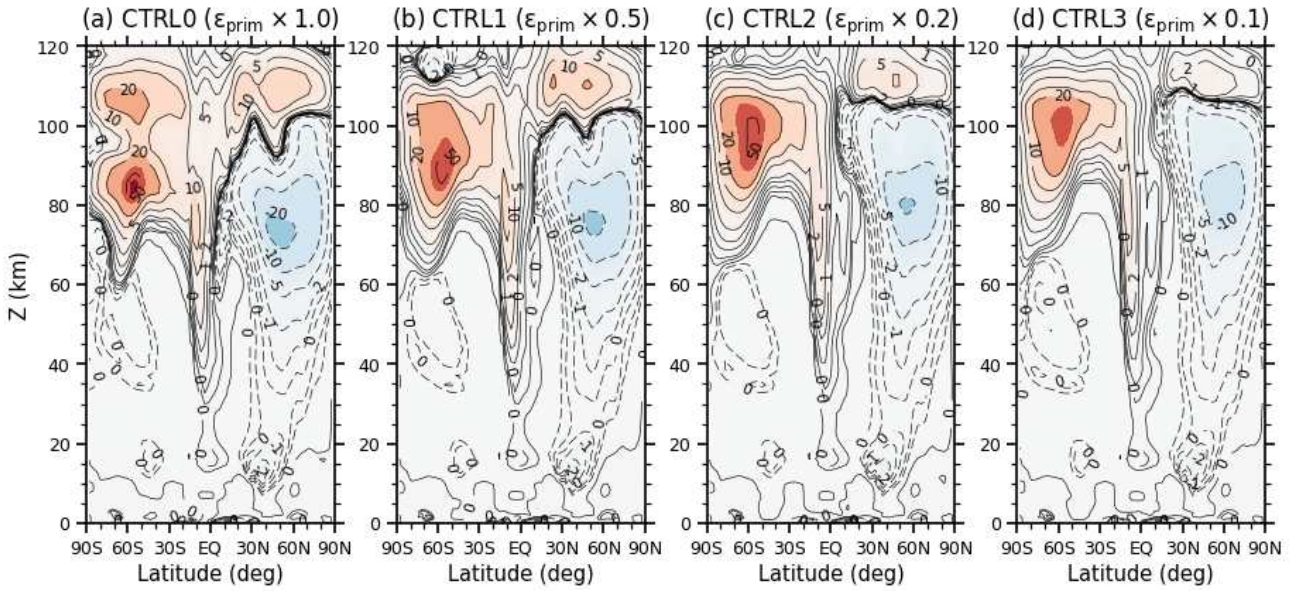


그림 2-47. 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 동서평균 동서 가속도의 위도-고도 분포

Total zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

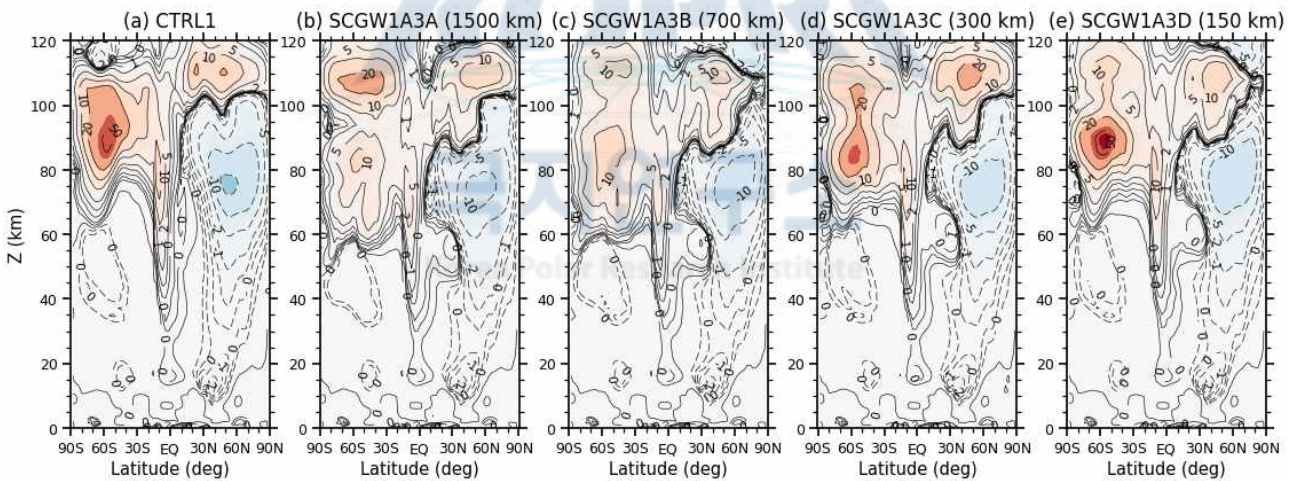


그림 2-48. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 동서평균 동서 가속도의 위도-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Total zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

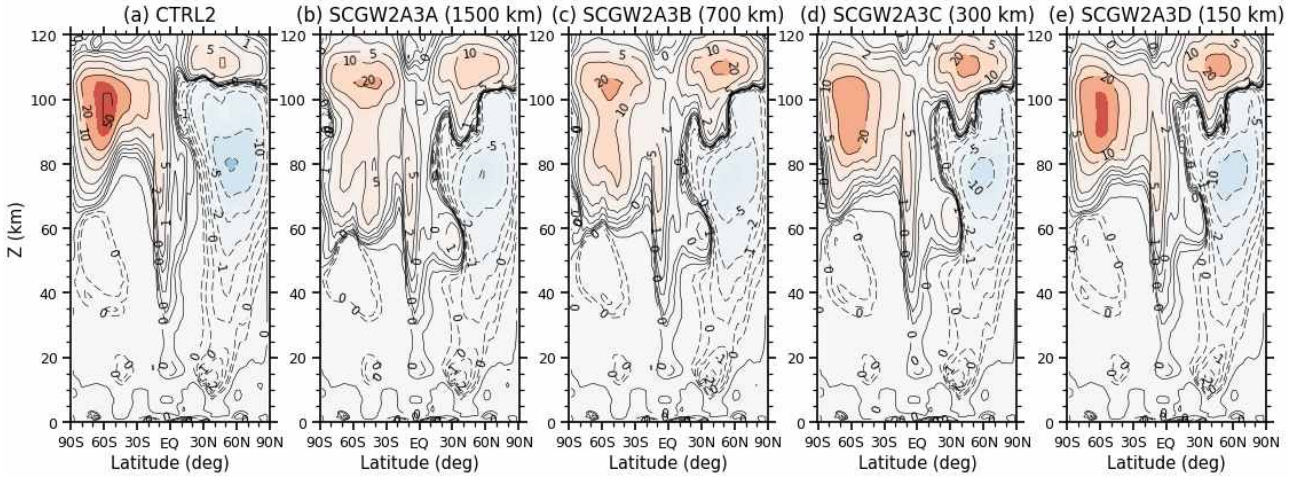


그림 2-49. 그림 2-48과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Total zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$)

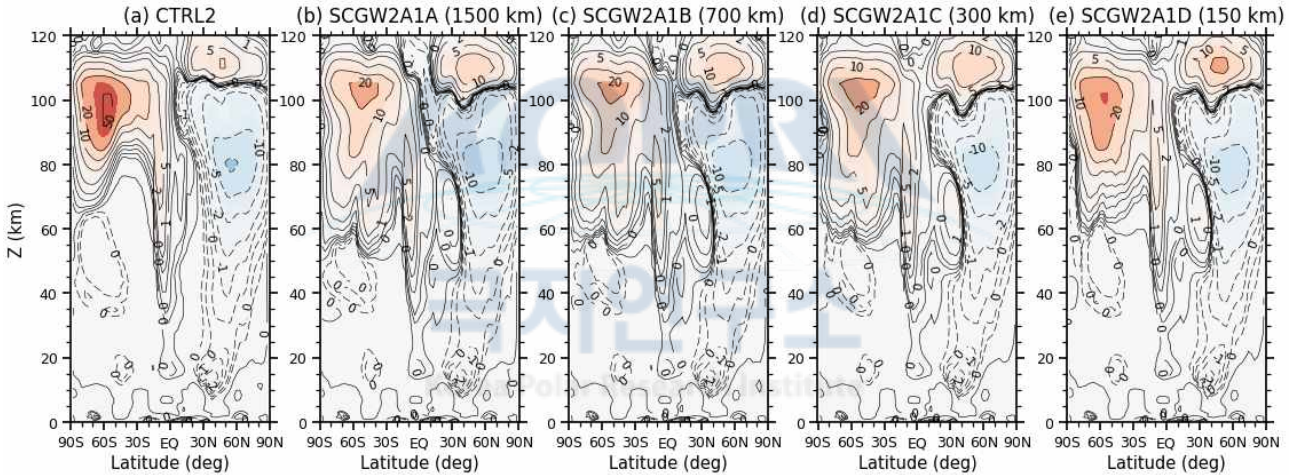


그림 2-50. 그림 2-49와 동일. 단, $c_{scnd} = \pm 10 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Total zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

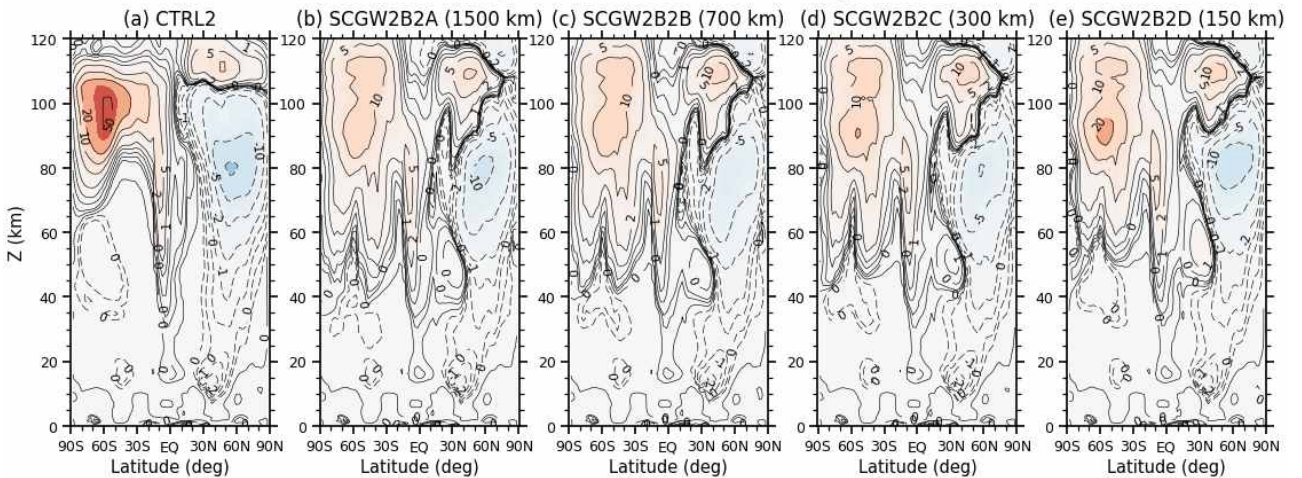


그림 2-51. 그림 2-49와 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

그림 2-52은 2차 중력파 강제력에 의한 동서방향 강제력의 위도-고도 단면도이다. 양반구 모두에서 동쪽에서의 강제력이 나타났으며, 2차 중력파가 겨울 반구 (북반구) 중간권 상부 및 열권 하부에서 강한 동향 강제력을 제공할 수 있다는 결과는 2차 중력파가 겨울 반구 중간권계면 부근 바람의 구조를 SPARC 기후값과 유사하게 바꾸는데 영향을 줄 수 있다는 의미로 해석할 수 있다. 게다가 성층권에서는 2차 중력파가 서향 강제력을 줄 수 있어서, primary 중력파가 줄어들더라도 성층권 제트가 과도하게 강화되는 것을 막아주는 역할도 할 수 있는 것으로 예상된다.

그림 2-53은 CTRL2 및 CSGW2A3 실험의 결과이다. 해당 실험에서 2차 중력파의 강제력은 더 강해졌다. 2차 중력파의 진폭이 크게 주어진 것은 아니지만, 2차 중력파에 대한 breaking level이 높아지면서 2차 중력파에 의한 강제력도 더 커진 것으로 추정된다. 여름 반구 (남반구)에서의 2차 중력파 강제력은 여전히 지나치게 낮은 고도에서부터 시작하는 것으로 보인다. 즉, 여름 반구의 동풍을 60-70 km 고도에서부터 강하게 역전시키는 문제를 일으키는 것으로 보인다.

그림 2-54는 2차 중력파의 진폭을 증가시킨 CSGW2B2 실험의 결과이다. 주목할 점은 겨울 반구 (북반구) 서향 강제력이 성층권 중부에서부터 시작되며 성층권 중부 이상 고도에서는 계속적으로 동향 강제력이 나타나 중간권계면 부근 바람의 현실성을 높이는데 도움을 주는 것으로 보인다는 점이다. 반대로 여름 반구 (남반구)에서는 지나치게 낮은 고도에서부터 동향 강제력이 작동하여 남반구 성층권의 동풍이 붕괴되어 나타나는 것으로 보인다. 따라서, 여름 반구에서 2차 중력파 강제력을 크게 줄일 수 있다면, 겨울 및 여름 반구 모두에서 개선된 모델링 결과를 얻을 수도 있을 것으로 예상된다.

Secondary zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

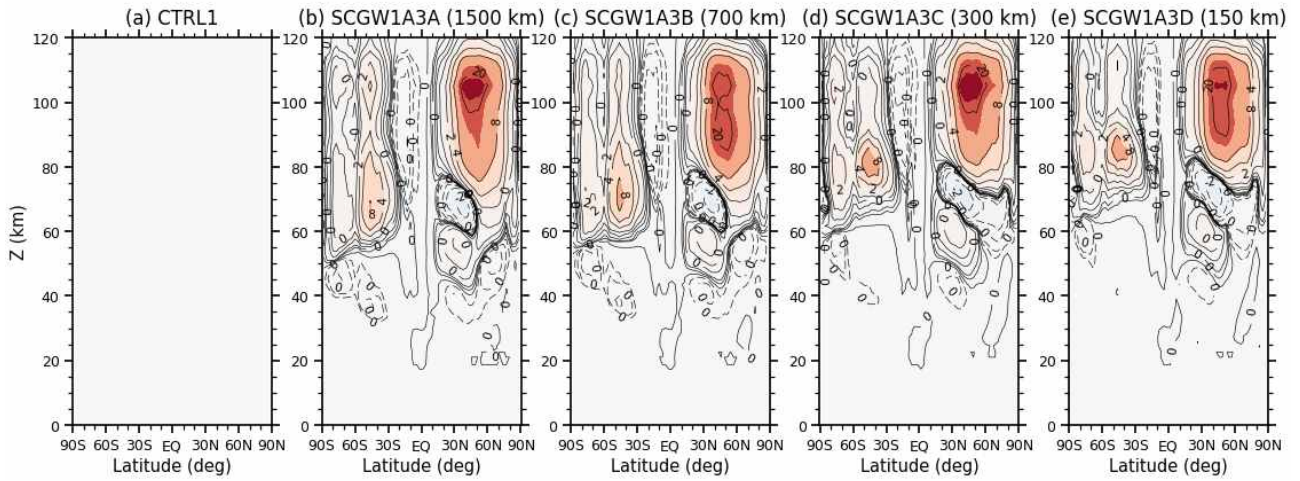


그림 2-52. 그림 2-48과 동일. 단, 2차 중력파에 의한 동서평균 동서 가속도에 대한 결과임.

Secondary zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

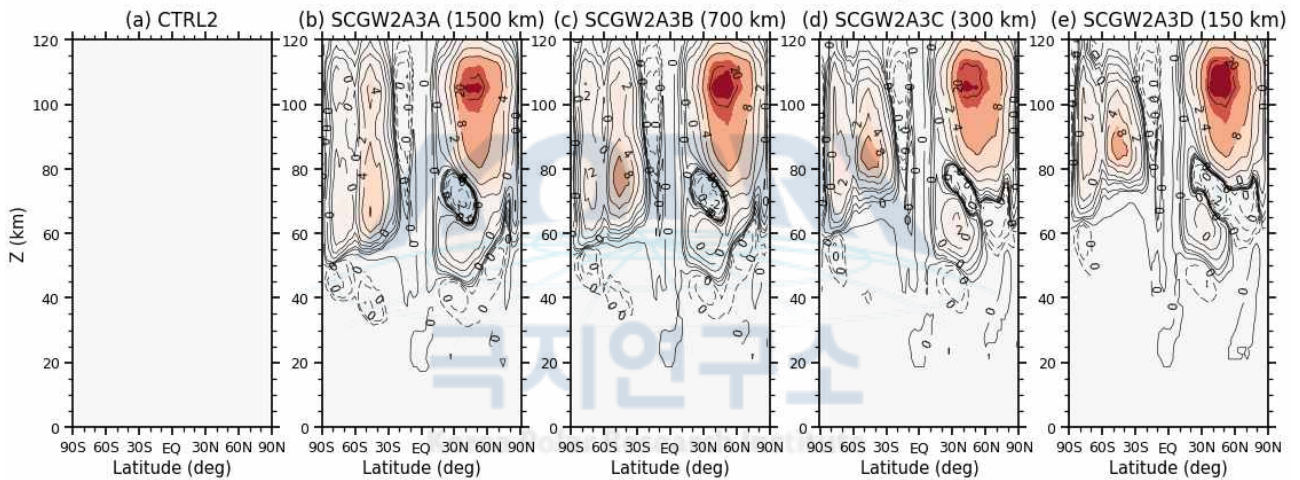


그림 2-53. 그림 2-52와 동일. 단, primary 중력파 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Secondary zonal GWD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

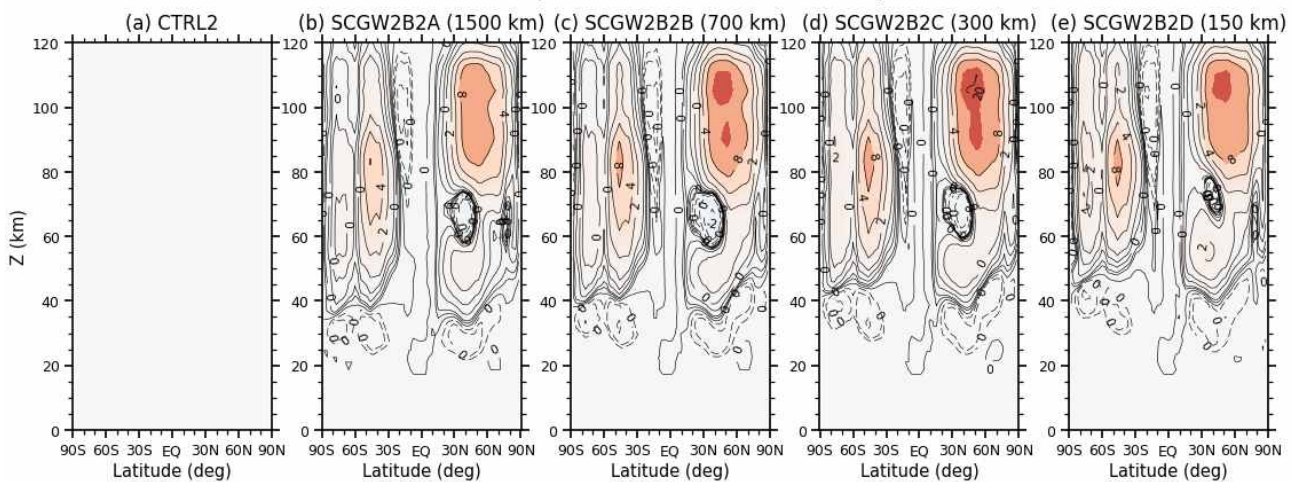


그림 2-54. 그림 2-52와 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

2.6 엘리아센-팜 속 발산 구조 분석

그림 2-55는 격자에서 분해되는 규모의 행성과 강제력을 나타내는 엘리아센-팜 속 발산 (Eliassen-Palm flux divergence; EPD)의 위도-고도 단면도를 보여주는 그림으로 1월 달에 대한 primary 중력과 간헐성 인자를 바꾸었을 때의 SWAD 모델 결과를 나타낸다. EPD는 간헐성 인자가 중간권 상부에서 줄어들수록, 전반적으로 더 고층으로 올라가는 형태를 보이며, 이러한 형태는 여름 반구 (남반구)에서 두드러지게 나타났다. 한가지 주목할만한 특성은 겨울 반구 (북반구)에서 간헐성 인자가 줄어들수록 성층권 상부 및 중간권에서 서향 EPD가 증가하면서 감소된 서향 중력과 강제력을 보충하는 역할을 한다는 점이다.

그림 2-56은 CTRL1 및 SCGW1A3 실험 결과이다. 해당 실험에서 여름 반구의 EPD 구조는 수평 과장이 큰 2차 중력과 경우에는 CTRL1과 차이가 많이 나는 것으로 보인다. 2차 중력과 수평 과장이 짧아질수록 EPD의 구조는 CTRL1으로 비슷하게 접근하는 것으로 보인다. 다만, 겨울 반구(북반구) 중간권 상부 고위도 지역의 양의 EPD는 약화된 것으로 보인다.

그림 5-57은 primary 중력과 간헐성 인자를 20%로 줄인 CTRL2 및 SCGW2A3B 실험 결과이다. 해당 실험의 경우 여름 반구 중간권계면 부근의 서향 EPD가 짧은 과장을 갖는 2차 중력파를 설정하였을 때 더 강하게 나타났다.

그림 5-58은 2차 중력과 크기를 늘린 SCGW2B2 실험 결과이다. 해당 실험에서는 겨울 반구 EPD가 더 넓은 지역에서 음의 값을 보였으며, 양의 EPD는 많이 사라진 것을 확인할 수 있다.

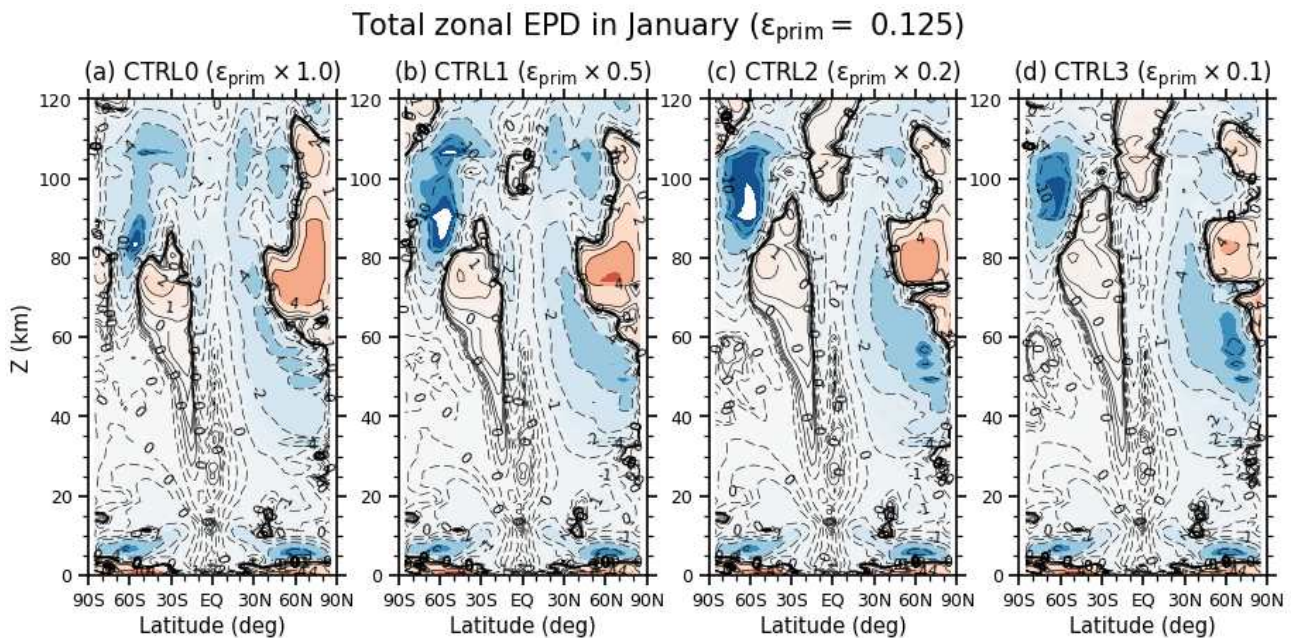


그림 2-55. 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 엘리아센-팜 속 발산 (Eliassen-Palm flux divergence; EPD)의 위도-고도 분포

Total zonal EPD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

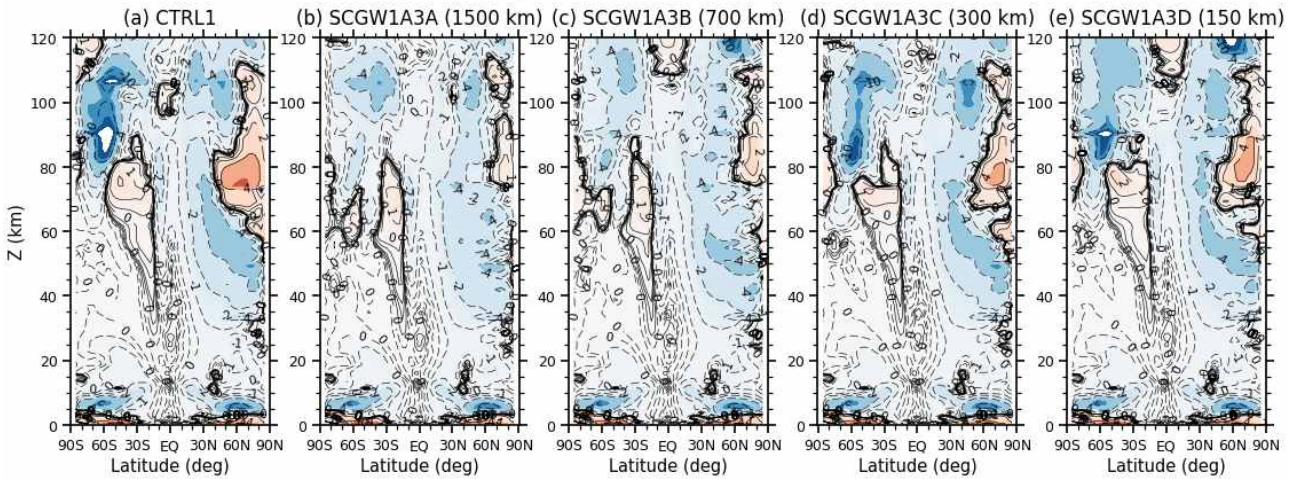


그림 2-56. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 EPD의 위도-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Total zonal EPD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

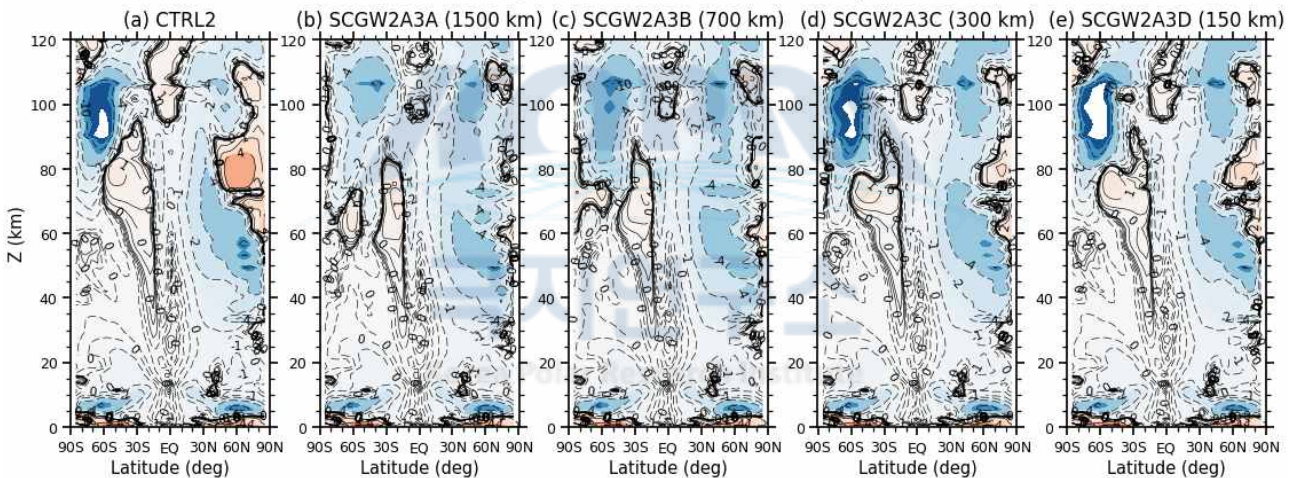


그림 2-57. 그림 2-56과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Total zonal EPD in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

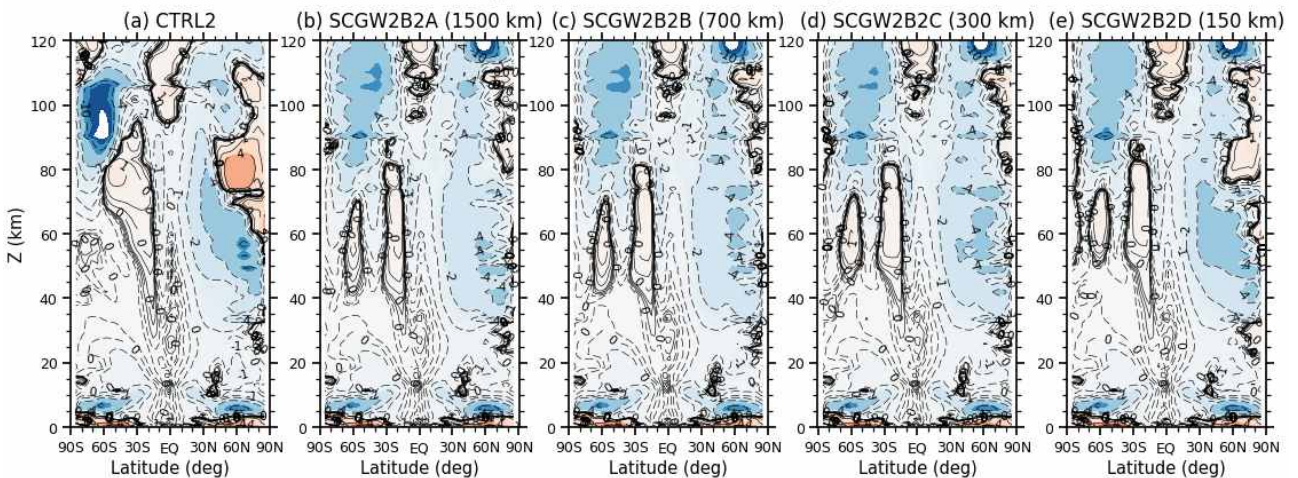


그림 2-58. 그림 2-56과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

2.7 남북방향 잔여순환 구조 분석

그림 2-59는 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 남북방향 잔여순환 (\bar{v}^*)의 위도-고도 단면도이다. 간헐성 인자가 줄어들수록, 여름 반구에서 겨울 반구로 향하는 pole-to-pole 순환이 나타나는 고도가 높아지는 것으로 보인다. 이러한 구조는 하부 열권에서 만들어진 화학물질 수송에 더 유리한 구조로 보인다.

그림 2-60은 CTRL1 및 SCGW1A3 실험의 결과이다. 2차 중력파를 고려한 경우, 겨울 반구(북반구) 고위도 열권에서는 남향 순환이 강해지고 중간권 상부에서는 북향 순환이 강해지는 것으로 나타났다. 이는 극지역에서 상향하는 흐름이 생성된다는 의미이며, 이를 통해 현재 2차 중력파를 고려하였을 때 화학물질의 하향 수송이 방해되는 이유를 가늠할 수 있다.

그림 2-61은 CTRL2 및 SCGW2A3 실험의 결과이다. 해당 실험에서는 2차 중력파의 수평 파장이 짧을 때 CTRL 실험과 가장 유사한 잔여순환 구조를 보였다.

그림 2-62는 SCGW2B2 실험의 결과이며, 전반적으로 CTRL2의 결과와 상당부분 차이나는 잔여순환 구조를 나타내었다.

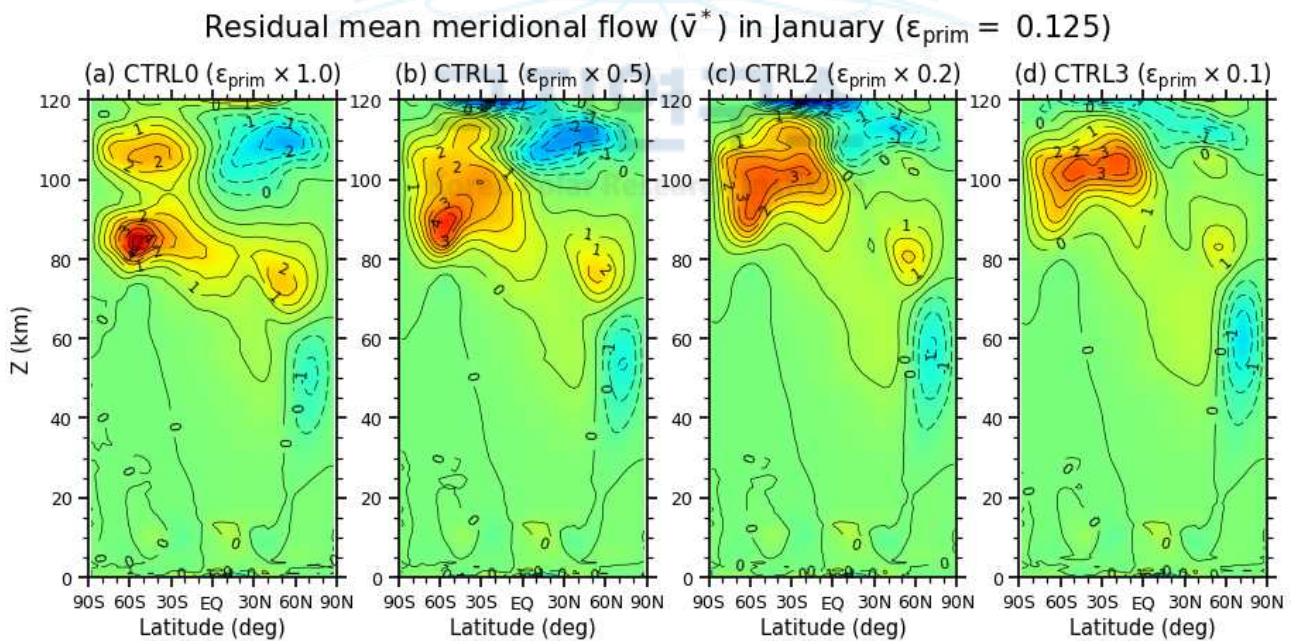


그림 2-59. 1월에 대한 primary 중력과 간헐성 인자에 따른 SWAD 모델에서의 남북방향 잔여순환 (\bar{v}^*)의 위도-고도 분포.

Residual mean meridional flow (\bar{v}^*) in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

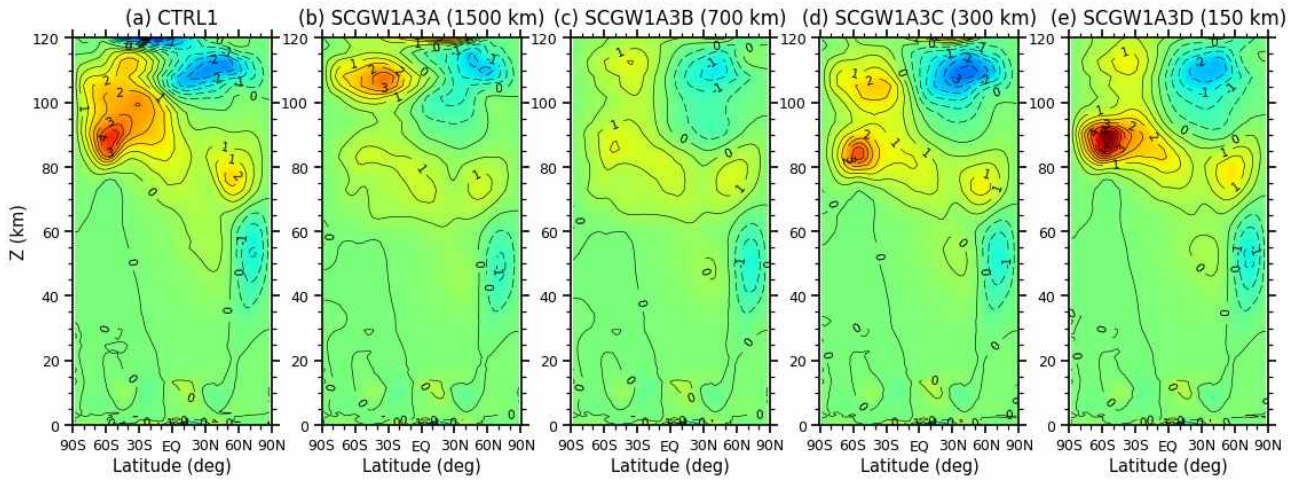


그림 2-60. SWAD 모델에서 primary 중력과 간헐성 인자를 0.5배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.5$)로 설정했을 때, CTRL1 및 SCGW1 실험에서의 1월 달 \bar{v}^* 의 위도-고도 분포. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$ 이고 $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

Residual mean meridional flow (\bar{v}^*) in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw}$, $c_{scnd} = \pm 30 \text{ m s}^{-1}$)

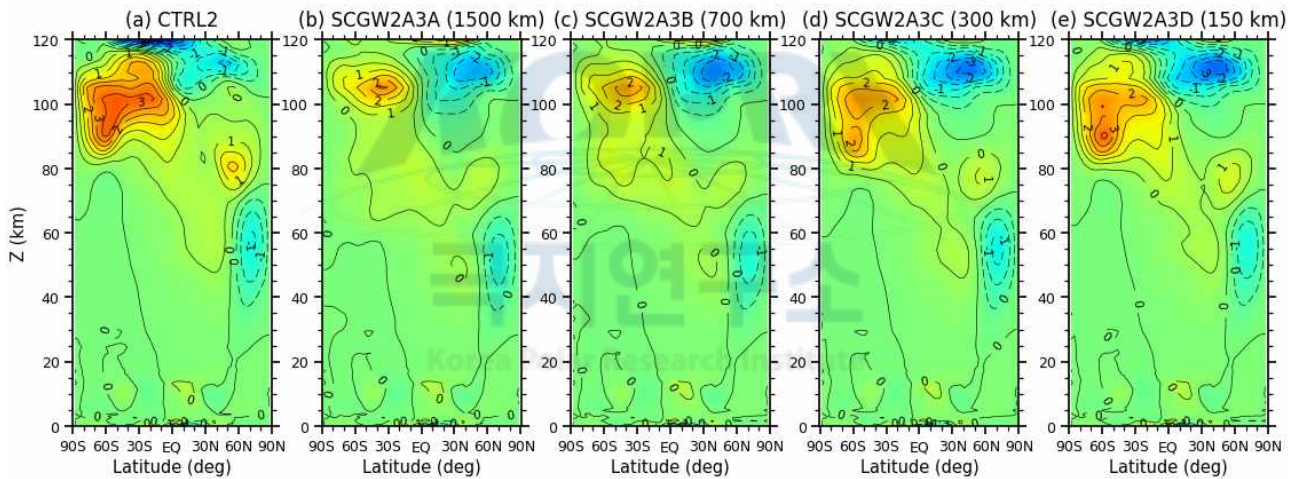


그림 2-61. 그림 2-60과 동일. 단, primary 중력과 간헐성 인자를 0.2배 ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$)로 설정함.

Residual mean meridional flow (\bar{v}^*) in January ($\epsilon_{prim} = 0.125 \times 0.2$, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$)

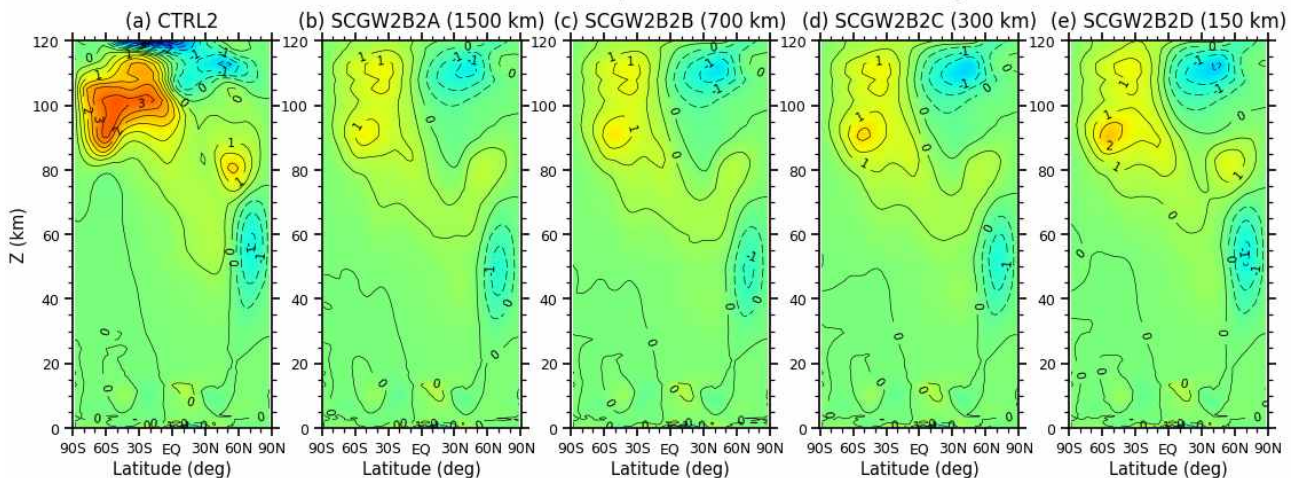


그림 2-62. 그림 2-60과 동일. 단, $\tau_{scnd} = \tau_{nogw} \times 3$ 이고, $c_{scnd} = \pm 20 \text{ m s}^{-1}$ 로 설정함.

제 3 절 개선된 중력파 과정과 WACCM6를 이용한 오로라 화학물질 수송 실험

현재 이상화된 모델인 SWAD를 이용하여 다양한 민감도 실험을 진행 중이며, 이 민감도의 결과 (2차 중력파 운동량 속의 크기, 2차 중력파에 대한 간헐성 모수 추정 등)를 바탕으로 WACCM6에 대한 실험이 수행될 예정이다. 하지만, 본격적인 WACCM6를 이용한 실험은 2단계에서 좀 더 많이 수행될 것이다. 2차 중력파가 중간권 상부 및 열권 하부의 바람 구조에 영향을 주고, 그 결과 같은 지역의 자오면 순환에 영향을 줄 수 있다는 점에서 고에너지 입자 강수 (energetic particle precipitation)를 동반하는 오로라가 발생할 때, 열권 하부에서 발생하는 화학물질의 공간적 수송에 영향을 줄 수 있다. 본 연구의 궁극적인 목표가 중간권 상부 및 열권 하부 순환을 바꿀 수 있는 2차 중력파가 오로라 화학물질의 수송에 어떠한 영향을 주는지 알아보는 것이므로, 2차 중력파와 화학물질의 수송과의 연관성에 대한 조사도 반드시 필요하다. 이러한 조사를 위해서 SWAD 실험에 오로라가 주로 발생하는 E-region 고도 100 km에서 양반구 위도 60도에서 매시간마다 특정 화학물질이 생성된다고 가정하였다. 이 특정 화학물질의 분자량은 NO_2 와 유사하게 46.01 g/mol로 지정하였다. 아래의 그림은 이 특정 물질의 분포를 각 SWAD 실험마다 보인 결과이다. 성층권 돌연 승온이 있는 경우 고층의 화학 물질이 성층권 아래로 급속도로 수송되는데, CTRL1과 SCGW 실험 사이에서 돌연승온의 빈도가 크게 다르지는 않았지만, SCGW 실험에서 성층권 돌연 승온이 좀 더 강하게 나타난 것으로 판단되며, 그러한 이유로 화학물질의 연직 수송이 2차 중력파 실험에서 더 강하게 나타난 것으로 보인다.

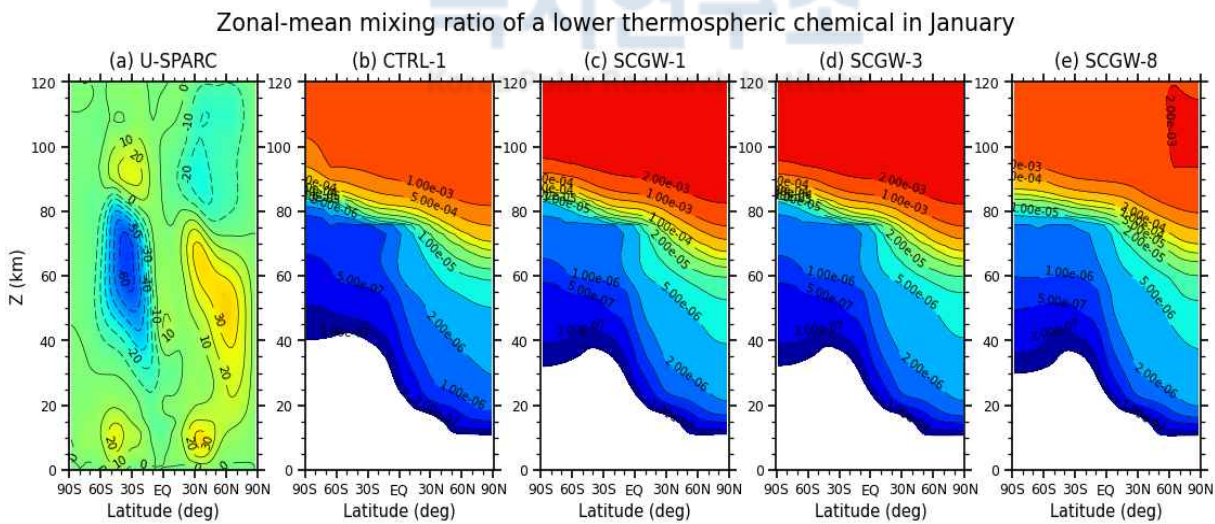


그림 3-1. 동서평균 동서류 (CTRL1)과 하부 열권에서 생성된 화학물질의 시간-평균된 자오면 분포. 여기서 SCGW-1 및 SCGW-3 (SCGW-8)은 고도 100 km에서 primary 중력파의 효과를 50% (10%)로 줄인 실험이며, SCGW-1은 2차 중력파 운동량 속을 비산약 중력파 최대의 10%로 설정 (0.16 mPa) 하였고, SCGW-3 및 SCGW-8은 2차 중력파 운동량 속을 비산약 중력파 최대로 설정 (1.6 mPa) 한 실험이다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

○ 목표 달성도

| 년도 | 연구목표 | 주요 달성실적 | 목표 달성도 (%) |
|------------|---|--|------------|
| 1차년도(2020) | 미참여 | | 100% |
| 2차년도(2021) | 전층대기모델의 실험체계 구축 및 산악 2차 중력파를 이용한 중력파 모수화 개선 | <ul style="list-style-type: none"> - 극지연구소 고층대기탐 서버에 시스템 구축 - 연세대학교 연구실 서버에 시스템 구축 - 중력파모수화 개선 및 모델 성능 개선 | 100% |
| 3차년도(2022) | 개선된 중력파 과정과 WACCM6 (CESM2)를 이용한 오로라 기인 화학물질 수송 실험 | <ul style="list-style-type: none"> - 개선된 중력파 모수화를 WACCM6에 장착 | 100% |

본 과제를 수행하면서 달성한 1단계 (2021-2022년도) 연구 업적은 다음과 같다.

(1) 학술지 논문

1. Lee, W., Song, I.-S., Kim, J.-H., Kim, Y.-H., Jeong, S.-H., Eswaraiah, S., & Murphy, D. J. (2021). The observation and SD-WACCM simulation of planetary wave activities in the upper atmosphere during the 2019 Southern Hemisphere sudden stratospheric warming. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029094. <https://doi.org/10.1029/2021JA029094>
2. Kam, H., Song, I.-S., Kim, J.-H., Kim, Y. H., Song, B.-G., Nakamura, T., et al. (2021). Mesospheric short-period gravity waves in the Antarctic Peninsula observed in all-sky airglow images and their possible source locations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2021JD035842. <https://doi.org/10.1029/2021JD035842>
3. Song, B.-G., Chun, H.-Y., Song, I.-S., Lee, C., Kim, J.-H., & Jee, G. (2023). Long-term characteristics of the meteor radar winds observed at King Sejong Station, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037190. <https://doi.org/10.1029/2022JD037190> (연구책임자 교신저자 논문)

(2) 학술대회 발표

1. **Song, I.-S.**, Kim, Y.-H., and Chun, H.-Y., 2021: Classification of mesoscale atmospheric waves according to velocity aspect ratios and spontaneous generation of waves. *2021년도 한국기상학회 봄 학술대회 (대기역학 및 수치모델링 분과)*, online (2021. 04. 22. - 23.)
2. **Song, I.-S.**, Lee, C., Chun, H.-Y., Kim, J.-H., Jee, G., Song, B.-G., and Bacmeister Julio, 2021: Propagation of Gravity Waves and Its Effects on Pseudomomentum Flux in a Sudden Stratospheric Warming Event. *AOGS 2021 virtual 18th annual meeting*, online (2021. 08. 01. - 06.)
3. **Song, I.-S.**, Kim, Y.-H., and Chun, H.-Y., 2021: Classification of mesoscale atmospheric waves according to velocity aspect ratios and spontaneous generation of waves. *2021 AGU fall meeting*, online (2021. 12. 13. - 17.)
4. **Song, I.-S.**, 2022: A Modeling Study on Effects of Secondary Waves. *5th international ANGWIN workshop*, KOPRI (Incheon), Republic of Korea (2022. 10. 05. - 07.)
5. **Song, I.-S.**, 2022: A Modeling Study on (Orographic) 2nd GWs. *2022 KOPRI workshop*, Howard Johnson Incheon Airport (Incheon) (2022. 07. 07.)
6. **Shim, J. S.**, 2022: What I learned from 2022 CCMC/CEDAR Workshop. *2022 KOPRI workshop*, Howard Johnson Incheon Airport (Incheon) (2022. 07. 07.)
7. **Shim, J. S.**, **Song, I.-S.**, and CCMC Team, 2022: Ionosphere-Thermosphere Modeling and Forecasting Capabilities Assessment, *The 3^d Korea Geoscience Union 연례학술대회*, 평창 (2022. 08. 17. - 19.)
8. **Lee, W.**, **Song, I.-S.**, and Kim, Y. H., 2022: Seasonal variation of quasi-10-day wave activity during 2012-2016 in the southern high-latitude MLT region based on meteor radar observations and SD-WACCM simulations, *The 3^d Korea Geoscience Union 연례학술대회*, 평창 (2022. 08. 17. - 19.)

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

2차 중력과 모수화와 이를 이용한 모델링은 해외 저널에서 아직 발견되지 않는 최신의 연구로 판단된다. 전리권 D-region (고도 70-100 km) 이온 화학을 포함하더라도 중간권 계면의 자오면 순환이나 난류 혼합의 역할이 화학물의 극 제트로의 수송에 중요하다는 것이 알려지고 있다는 점에서 (Smith-Johnsen et al., 2018), 본 연구의 결과는 고층대기 화학 과정에서 중력과의 영향을 보다 명확히 하는데 활용될 수 있다.

태양 활동 및 지자기 폭풍과 연관된 우주 기원 입자의 기후에의 영향에 대한 연구는 기상 재분석 자료를 이용하여 이미 수행되어 왔으며, 이러한 통계적 연구들은 지자기 폭풍과 관련하여 극지 해수면 부근에 분명한 기후 아노말리가 나타나는 것을 보여주었다 (Seppälä et al., 2013). 그러나 이러한 추정이 모델링으로 확인되어 진 적은 없다. 본 연구는 지자기 폭풍과 연관된 화학 현상이 지면 근처 기후 변화에 주는 영향을 판단하기 위한 중요한 정책적 기초를 제공하게 될 것이다.



제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ NCAR CESM 모델 정보 및 CESM을 이용한 최신 해외 연구 사례

본 연구에서 사용된 NCAR CESM 모델은 지구 기후 시스템을 모의하기 위한 결합 모델로써, 지구 대기, 해양, 육지, 해빙 등을 동시에 모의하는 별도의 모델들과 하나의 중심 coupler/moderator로 구성되어있으며, 많은 연구자들에 의해서 다양한 지구 시스템 연구에 활용되고 있다. 본 과제에서 이용된 CESM2 모델의 릴리즈 노트 및 세부 모델 정보는 다음의 링크에서 확인할 수 있다 (<https://www.cesm.ucar.edu/models/cesm2/>).

본 연구 과제를 수행하면서 과제의 내용과 관련되어 CESM이 활용된 몇가지 최근 연구들의 내용을 정리하면 다음과 같다. 먼저, Smith et al. (2020)는 WACCM6를 이용하여 중층대기에서의 Interhemispheric coupling 프로세스에 관한 연구를 수행하였고, Dempsey et al. (2021)은 WACCM6 및 the extended Canadian Middle Atmosphere Model (eCMAM)과 고층대기 유성레이다 관측 자료를 활용하여, 남반구 겨울철의 중간권계면 부근에서 지배적으로 나타나는 서풍을 모델이 잘 모의하지 못함을 보였다. 한편, Hindley et al. (2022)는 South Georgia island의 중간권계면 관측자료를 통해 드러난 바람 및 파동 특성을 WACCM 모형 결과와 비교 분석하였다.

제 7 장 참고문헌

- Alexander, M. J., Holton, J. R., & Durran, D. R. (1995). The gravity wave response above deep convection in a squall line simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 52(12), 2212–2226. <https://doi.org/10.1175/1520-0469>
- Alexander, M. J., & Teitelbaum, H. (2007). Observation and analysis of a large amplitude mountain wave event over the Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 112(D21), D21103. <https://doi.org/10.1029/2006JD008368>
- Alexander, M. J., & Teitelbaum, H. (2011). Three-dimensional properties of Andes mountain waves observed by satellite: A case study. *Journal of Geophysical Research*, 116(D23), D23110. <https://doi.org/10.1029/2011JD016151>
- Alexander, S., Klekociuk, A., & Murphy, D. (2011). Rayleigh lidar observations of gravity wave activity in the winter upper stratosphere and lower mesosphere above Davis. *Journal of Geophysical Research*, 116(D13), D13109. <https://doi.org/10.1029/2010JD015164>
- Banks, P., & Kockarts, G. (1973b). *Aeronomy Part B* (p. 355). Academic Press.
- Baumgarten, G. (2010). Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(6), 1509–1518. <https://doi.org/10.5194/amt-3-1509-2010>
- Baumgarten, G., Fiedler, J., Hildebrand, J., & Lubken, F.-J. (2015). Inertia gravity wave in the stratosphere and mesosphere observed by Doppler wind and temperature lidar. *Geophysical Research Letters*, 42(24), 10929–10936. <https://doi.org/10.1002/2015GL066991>
- Becker, E. (2012). Dynamical control of the middle atmosphere. *Space Science Reviews*, 168, 283–314. <https://doi.org/10.1007/s11214-011-9841-5>
- Becker, E. (2017). Mean-flow effects of thermal tides in the mesosphere and lower thermosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 74(6), 2043–2063. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-16-0194.1>
- Becker, E., & Vadas, S. L. (2018). Secondary gravity waves in the winter mesosphere: Results from a high-resolution global circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(5), 2605–2627. <https://doi.org/10.1002/2017JD027460>
- Becker, E., & Vadas, S. L. (2020). Explicit global simulation of gravity waves in the thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125(10), e2020JA028034. <https://doi.org/10.1029/2020JA028034>
- Becker, E., Vadas, S. L., Bossert, K., Harvey, V. L., Zulicke, C., & Hoffmann, L. (2022). A high-resolution whole-atmosphere model with resolved gravity waves and specified large-scale dynamics in the troposphere and stratosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(2), e2021JD035018. <https://doi.org/10.1029/2021JD035018>

- Beres, J. H., Alexander, M. J., & Holton, J. R. (2002). Effects of tropospheric wind shear on the spectrum of convectively generated gravity waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(11), 1805–1824. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<1805:eotwso>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<1805:eotwso>2.0.co;2)
- Bossert, K., Vadas, S. L., Hoffmann, L., Becker, E., Harvey, V. L., & Bramberger, M. (2020). Observations of stratospheric gravity waves over Europe on 12 January 2016: The role of the polar night jet during the DEEPWAVE campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(21), e2020JD032893. <https://doi.org/10.1029/2020JD032893>
- Chen, C., & Chu, X. (2017). Two-dimensional Morlet wavelet transform and its application to wave recognition methodology of automatically extracting two-dimensional wave packets from lidar observations in Antarctica. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 162, 28–47. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.10.016>
- Chen, C., Chu, X., McDonald, A. J., Vadas, S. L., Yu, Z., Fong, W., & Lu, X. (2013). Inertia-gravity waves in Antarctica: A case study using simultaneous lidar and radar measurements at McMurdo/Scott Base (77.8°S, 166.7°E). *Journal of Geophysical Research*, 118(7), 2794–2808. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50318>
- Chen, C., Chu, X., Zhao, J., Roberts, B. R., Yu, Z., Fong, W., et al. (2016). Lidar observations of persistent gravity waves with periods of 3–10 h in the Antarctic middle and upper atmosphere at McMurdo (77.83°S, 166.67°E). *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(2), 1483–1502. <https://doi.org/10.1002/2015JA022127>
- Chun, H.-Y., & Kim, Y.-H. (2008). Secondary waves generated by breaking of convective gravity waves in the mesosphere and their influence in the wave momentum flux. *Journal of Geophysical Research*, 113(D23), D23107. <https://doi.org/10.1029/2008JD009792>
- Cohen, N. Y., Gerber, E. P., & Buhler, O. (2014). What drives the Brewer–Dobson circulation?. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71(10), 3837–3855. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-14-0021.1>
- Collins, W. D., Rasch, P. J., Boville, B. A., Hack, J. J., McCaa, J. R., Williamson, D. L., ... & Dai, Y. (2004). Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0). *NCAR Tech. Note*, 226, 1326–1334.
- Cot, C., & Barat, J. (1986). Wave-turbulence interaction in the stratosphere: A case study. *Journal of Geophysical Research*, 91(D2), 2749–2756. <https://doi.org/10.1029/jd091id02p02749>
- Dempsey, S. M., Hindley, N. P., Moffat-Griffin, T., Wright, C. J., Smith, A. K., Du, J., & Mitchell, N. J. (2021). Winds and tides of the Antarctic mesosphere and lower thermosphere: One year of meteor-radar observations over Rothera (68°S, 68°W) and comparisons with WACCM and eCMAM. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 212, 105510. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105510>
- Dornbrack, A. (2021). Stratospheric mountain waves trailing across Northern Europe. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78, 2835–2857. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0312.1>

- Dornbrack, A., Gisinger, S., Kaifler, N., Portele, T. C., Bramberger, M. R. M., Gerding, M., et al. (2018). Gravity waves excited during a minor sudden stratospheric warming. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(17), 12915–12931. <https://doi.org/10.5194/acp-18-12915-2018>
- Eckermann, S. D., Doyle, J. D., Reinecke, P. A., Reynolds, C. A., Smith, R. B., Fritts, D. C., & Dornbrack, A. (2019). Stratospheric gravity wave products from satellite infrared nadir radiances in the planning, execution, and validation of aircraft measurements during DEEPWAVE. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(9), 2049–2075. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-19-0015.1>
- Ern, M., Hoffmann, L., & Preusse, P. (2017). Directional gravity wave momentum fluxes in the stratosphere derived from high-resolution AIRS temperature data. *Geophysical Research Letters*, 44(1), 475–485. <https://doi.org/10.1002/2016GL072007>
- Fiedler, J., Baumgarten, G., Uwe, B., Hoffmann, P., Kaifler, N., & Lubken, F.-J. (2011). NLC and the background atmosphere above ALOMAR. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 11(12), 5701–5717. <https://doi.org/10.5194/acp-11-5701-2011>
- Fovell, R., Durran, D., & Holton, J. (1992). Numerical simulation of convectively generated gravity waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49(16), 1427–1442. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1992\)049<1427:nsocgs>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<1427:nsocgs>2.0.co;2)
- Fritts, D., & Luo, Z. (1992). Gravity wave excitation by geostrophic adjustment of the jet stream, part 1: Two-dimensional forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 49(8), 681–697. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1992\)049<0681:gwebga>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<0681:gwebga>2.0.co;2)
- Fritts, D., Smith, R., Taylor, M., Doyle, J., Eckermann, S., Dornbrack, A., et al. (2016). The deep propagating gravity wave experiment (DEEPWAVE): An airborne and ground-based exploration of gravity wave propagation and effects from their sources throughout the lower and middle atmosphere. *Bulletin American Meteorology Social*, 97(3), 425–453. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00269.1>
- Fritts, D. C., & Alexander, M. J. (2003). Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, 41, 1003. <https://doi.org/10.1029/2001/RG000106>
- Fritts, D. C., Lund, T. S., Wan, K., & Liu, H.-L. (2021). Numerical simulation of mountain waves over the Southern Andes. Part II: Momentum fluxes and wave-mean-flow interactions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78(10), 3069–3088. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0207.1>
- Gassmann, A. (2019). Analysis of large-scale dynamics and gravity waves under shedding of inactive flow components. *Monthly Weather Review*, 47(8), 2861–2876. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-18-0349.1>
- Gelaro, R., McCarty, W., Suarez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., et al. (2017). The

- Modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30(14), 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Gerber, E. P., & Polvani, L. M. (2009). Stratosphere-troposphere coupling in a relatively simple AGCM: The importance of stratospheric variability. *Journal of Climate*, 22(8), 1920–1933. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2548.1>
- Gong, J., Wu, D., & Eckermann, S. (2012). Gravity wave variances and propagation derived from AIRS radiances. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(4), 1701–1720. <https://doi.org/10.5194/acp-12-1701-2012>
- Harvey, V. L., Pierce, R. B., Fairlie, T., & Hitchman, M. H. (2002). A climatology of stratospheric polar vortices and anticyclones. *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 4442. <https://doi.org/10.1029/2001JD001471>
- Hauchecorne, A., & Chanin, M.-L. (1980). Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km. *Geophysical Research Letters*, 7(8), 565–568. <https://doi.org/10.1029/GL007i008p00565>
- Heale, C. J., Bossert, K., Vadas, S., Hoffmann, L., Dornbrack, A., Stober, G., et al. (2020). Secondary gravity waves generated by breaking mountain waves over Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(5), e2019JD031662. <https://doi.org/10.1029/2019JD031662>
- Heale, C. J., Snively, J. B., Bhatt, A. N., Hoffmann, L., Stephan, C. C., & Kendall, E. A. (2019). Multilayer observations and modeling of thunderstorm generated gravity waves over the midwestern United States. *Geophysical Research Letters*, 46(23), 14164–14174. <https://doi.org/10.1029/2019GL085934>
- Held, I. M., & Suarez, M. J. (1994). A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75(10), 1825–1830. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1994\)075<1825:APFTIO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1994)075<1825:APFTIO>2.0.CO;2)
- Hindley, N. P., Wright, C. J., Gadian, A. M., Hoffmann, L., Hughes, J. K., Jackson, D. R., et al. (2021). Stratospheric gravity-waves over the mountainous island of south Georgia: Testing a high-resolution dynamical model with 3-D satellite observations and radiosondes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(10), 7695–7722. <https://doi.org/10.5194/acp-21-7695-2021>
- Hines, C. O. (1960). Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights. *Canadian Journal of Physics*, 38(11), 1441–1481. <https://doi.org/10.1139/p60-150>
- Hoffmann, L., Grimsdell, A. W., & Alexander, M. J. (2016). Stratospheric gravity waves at southern hemisphere orographic hotspots: 2003–2014 AIRS/Aqua observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(14), 9381–9397. <https://doi.org/10.5194/acp-16-9381-2016>
- Hoffmann, L., Xue, X., & Alexander, M. J. (2013). A global view of stratospheric gravity wave

- hotspots located with Atmospheric Infrared Sounder observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(2), 416–434. <https://doi.org/10.1029/2012JD018658>
- Hoffmann, L., & Alexander, M. (2009). Retrieval of stratospheric temperatures from Atmospheric Infrared Sounder radiance measurements for gravity wave studies. *Journal of Geophysical Research*, 114(D7), D07105. <https://doi.org/10.1029/2008JD011241>
- Holt, L. A., Alexander, M. J., Copy, L., Liu, C., Molod, A., Putman, W., & Pawson, S. (2017). An evaluation of gravity waves and gravity wave sources in the southern hemisphere in a 7 km global climate simulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(707), 2481–2495. <https://doi.org/10.1002/qj.3101>
- Holton, J., & Alexander, M. (1999). Gravity waves in the mesosphere generated by tropospheric convection. *Tellus B*, 51(1), 45–58. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v51i1.12305>
- Horinouchi, T., Nakamura, T., & Kosaka, J.-I. (2002). Convectively generated mesoscale gravity waves simulated throughout the middle atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 29(21), 2007. <https://doi.org/10.1029/2002GL016069>
- Huang, K. M., Liu, A. Z., Zhang, S. D., Yi, F., Huang, C. M., Gong, Y., et al. (2017). Simultaneous upward and downward propagating inertia-gravity waves in the MLT observed at Andes Lidar Observatory. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(5), 2812–2830. <https://doi.org/10.1002/2016JD026178>
- Kaifler, N., Kaifler, B., Ehard, B., Gisinger, S., Dornbrack, A., Rapp, M., et al. (2017). Observational indications of downward-propagating gravity waves in middle atmosphere lidar data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 162, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.003>
- Kam, H., Song, I.-S., Kim, J.-H., Kim, Y. H., Song, B.-G., Nakamura, T., et al. (2021). Mesospheric short-period gravity waves in the Antarctic Peninsula observed in all-sky airglow images and their possible source locations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2021JD035842. <https://doi.org/10.1029/2021JD035842>
- Lane, T. P., Reeder, M. J., & Clark, T. L. (2001). Numerical modeling of gravity waves generated by deep tropical convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(10), 1249–1274. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1249:nmogwg>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1249:nmogwg>2.0.co;2)
- Lane, T. P., Sharman, R. D., Clark, T. L., & Hsu, H.-M. (2003). An investigation of turbulence generation mechanisms above deep convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(10), 1297–1321. <https://doi.org/10.1175/1520-0469>
- Langenbach, A., Baumgarten, G., Fiedler, J., Lubken, F.-J., Savigny, C., & Zalach, J. (2019). Year-round stratospheric aerosol backscatter ratios calculated from lidar measurements above northern Norway. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(7), 4065–4076. <https://doi.org/10.5194/amt-12-4065-2019>
- Lee, W., Song, I.-S., Kim, J.-H., Kim, Y.-H., Jeong, S.-H., Eswaraiah, S., & Murphy, D. J.

- (2021). The observation and SD-WACCM simulation of planetary wave activities in the upper atmosphere during the 2019 Southern Hemisphere sudden stratospheric warming. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *126*, e2021JA029094. <https://doi.org/10.1029/2021JA029094>
- Li, J., Collins, R., Lu, X., & Williams, B. (2021). Lidar observations of instability and estimates of vertical eddy diffusivity induced by gravity wave breaking in the arctic mesosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *126*(4), e2020JD033450. <https://doi.org/10.1029/2020JD033450>
- Lindzen, R. S. (1981). Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown. *Journal of Geophysical Research*, *86*(C10), 9707–9714. <https://doi.org/10.1029/jc086ic10p09707>
- Liu, H.-L., McInerney, J. M., Santos, S., Lauritzen, P. H., Taylor, M. A., & Pedatella, N. M. (2014). Gravity waves simulated by high-resolution whole atmosphere community climate model. *Geophysical Research Letters*, *41*(24), 9106–9112. <https://doi.org/10.1002/2014GL062468>
- Lund, T. S., Fritts, D. C., Wan, K., Laughman, B., & Liu, H.-L. (2020). Numerical simulation of mountain waves over the Southern Andes. Part I: Mountain wave and secondary wave character, evolutions, and breaking. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *77*(12), 4337–4356. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-19-0356.1>
- Luo, Z., & Fritts, D. C. (1993). Gravity wave excitation by geostrophic adjustment of the jet stream, part II: Three-dimensional forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *50*(1), 104–115. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<0104:gwebga>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<0104:gwebga>2.0.co;2)
- Marks, C. J., & Eckermann, S. D. (1995). A three-dimensional nonhydrostatic ray-tracing model for gravity waves: Formulation and preliminary results for the middle atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *52*(11), 1959–1984. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<1959:atdnrt>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<1959:atdnrt>2.0.co;2)
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., Bacmeister, J., Song, I. S., & Eichmann, A. (2012). The GEOS-5 atmospheric general circulation model: Mean climate and development from MERRA to Fortuna (No. GSFC. TM. 01153.2012).
- Nicolls, M. J., Varney, R. H., Vadas, S. L., Stamus, P. A., Heinselman, C. J., Cosgrove, R. B., & Kelley, M. C. (2010). Influence of an inertia gravity wave on mesospheric dynamics: A case study with the Poker flat incoherent Scatter radar. *Journal of Geophysical Research*, *115*, D00N02. <https://doi.org/10.1029/2010JD014042>
- O'Sullivan, D., & Dunkerton, T. J. (1995). Generation of inertia-gravity waves in a simulated life-cycle of baroclinic instability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *52*(21), 3695–3716. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052<3695:goiwia>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052<3695:goiwia>2.0.co;2)
- Pandya, R. E., & Alexander, M. J. (1999). Linear stratospheric gravity waves above convective thermal forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *56*(14), 2434–2446.

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<2434:lsgwac>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<2434:lsgwac>2.0.co;2)

Piani, C., Durran, D., Alexander, M. J., & Holton, J. R. (2000). A numerical study of three dimensional gravity waves triggered by deep tropical convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 57(22), 3689–3702.

[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<3689:ansotd>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<3689:ansotd>2.0.co;2)

Pitteway, M., & Hines, C. (1963). The viscous damping of atmospheric gravity waves. *Canadian Journal of Physics*, 41(12), 1935–1948. <https://doi.org/10.1139/p63-194>

Plougonven, R., Hertzog, A., & Teitelbaum, H. (2008). Observations and simulations of a large-amplitude mountain wave breaking over the Antarctic Peninsula. *Journal of Geophysical Research*, 113(D16), D16113. <https://doi.org/10.1029/2007JD009739>

Plougonven, R., & Zhang, F. (2014). Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts. *Reviews of Geophysics*, 52(1), 33–76. <https://doi.org/10.1002/2012RG000419>

Polvani, L. M., & Kushner, P. J. (2002). Tropospheric response to stratospheric perturbations in a relatively simple general circulation model. *Geophysical Research Letters*, 29(7), <https://doi.org/10.1029/2001GL014284>

Sato, K., Tani, S., Watanabe, S., & Kawatani, Y. (2012). Gravity wave characteristics in the southern hemisphere revealed by a high-resolution middle-atmosphere general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 69(4), 1378–1396.

<https://doi.org/10.1175/JASD-11-0101.1>

Sato, K., & Yoshiki, M. (2008). Gravity wave generation around the polar vortex in the stratosphere revealed by 3-hourly radiosonde observations at Syowa Station. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65(12), 3719–3735. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2539.1>

Satomura, T., & Sato, K. (1999). Secondary generation of gravity waves associated with the breaking of mountain waves. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(22), 3847–3858. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<3847:sgogwa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<3847:sgogwa>2.0.co;2)

Sawyer, J. S. (1961). Quasi-periodic wind variations with height in the lower stratosphere. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 8(371), 24–33.

<https://doi.org/10.1002/qj.49708737104>

Schoch, A., Baumgarten, G., & Fiedler, J. (2008). Polar middle atmosphere temperature climatology from Raleigh lidar measurements at ALOMAR (69°N). *Annales Geophysicae*, 26(7), 1681–1698. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1681-2008>

Seppälä, A., Lu, H., Clilverd, M. A., & Rodger, C. J. (2013). Geomagnetic activity signatures in wintertime stratosphere wind, temperature, and wave response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(5), 2169–2183. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50236>

Shibuya, R., Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Tomikawa, Y., Nishimura, K., & Kohma, M. (2017). Quasi-12h inertia-gravity waves in the lower mesosphere observed by the pansy radar at Syowa Station (39.6°E, 69.0°S). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(10),

6455–6476. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6455-2017>

- Smith, S. M., Vadas, S. L., Baggaley, W. J., Hernandez, G., & Baumgardner, J. (2013). Gravity wave coupling between the mesosphere and thermosphere over New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, *118*(5), 2694–2707. <https://doi.org/10.1002/jgra.50263>
- Smith-Johnsen, C., Marsh, D. R., Orsolini, Y., Nesse Tyssøy, H., Hendrickx, K., Sandanger, M. I., ... & Stordal, F. (2018). Nitric oxide response to the April 2010 electron precipitation event: Using WACCM and WACCM-D with and without medium-energy electrons. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *123*(6), 5232–5245. <https://doi.org/10.1029/2018JA025418>
- Snively, J. B., & Pasko, V. P. (2003). Breaking of thunderstorm-generated gravity waves as a source of short-period ducted waves at mesopause altitudes. *Geophysical Research Letters*, *30*(24), 2254. <https://doi.org/10.1029/2003GL018436>
- Song, B.-G., Chun, H.-Y., Song, I.-S., Lee, C., Kim, J.-H., & Jee, G. (2023). Long-term characteristics of the meteor radar winds observed at King Sejong Station, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *128*, e2022JD037190. <https://doi.org/10.1029/2022JD037190>
- Song, I.-S., Chun, H.-Y., & Lane, T. P. (2003). Generation mechanisms of convectively forced internal gravity waves and their propagation to the stratosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *60*(16), 1960–1980. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2003\)060<1960:gmocfi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<1960:gmocfi>2.0.co;2)
- Stephan, C., & Alexander, M. J. (2015). Realistic simulations of atmospheric gravity waves over the continental U.S. using precipitation radar data. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *7*(2), 823–835. <https://doi.org/10.1002/2014MS000396>
- Strelnikova, I., Almowafy, M., Baumgarten, G., Baumgarten, K., Gerding, M., Lubken, F.-J., & Ern, M. (2021). Seasonal cycle of gravity wave potential energy densities from lidar and satellite observations at 54°N and 69°N. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *78*(4), 1359–1386. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0247.1>
- Strelnikova, I., Baumgarten, G., & Lubken, F.-J. (2020). Advanced hodograph-based analysis technique to derive gravity-wave parameters from lidar observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, *13*(2), 479–499. <https://doi.org/10.5194/amt-13-479-2020>
- Taylor, M. J., & Hapgood, M. A. (1988). Identification of a thunderstorm as a source of short period gravity waves in the upper atmospheric nightglow emissions. *Planetary and Space Science*, *36*(10), 975–985. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(88\)90035-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90035-9)
- Vadas, S. L. (2007). Horizontal and vertical propagation and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources. *Journal of Geophysical Research*, *112*(A6), A06305. <https://doi.org/10.1029/2006JA011845>
- Vadas, S. L. (2013). Compressible f-plane solutions to body forces, heatings, and coolings, and

application to the primary and secondary gravity waves generated by a deep convective plume. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(5), 2377–2397.

<https://doi.org/10.1002/jgra.50163>

Vadas, S. L., & Becker, E. (2018). Numerical modeling of the excitation, propagation, and dissipation of primary and secondary gravity waves during wintertime at McMurdo Station in the Antarctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9326–9369. <https://doi.org/10.1029/2017JD027974>

Vadas, S. L., & Becker, E. (2019). Numerical modeling of the generation of tertiary gravity waves in the mesosphere and thermosphere during strong mountain wave events over the Southern Andes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124(9), 7687–7718. <https://doi.org/10.1029/2019JA026694>

Vadas, S. L., & Crowley, G. (2010). Sources of the traveling ionospheric disturbances observed by the ionospheric TIDDBIT sounder near Wallops Island on October 30, 2007. *Journal of Geophysical Research*, 115(A7), A07324. <https://doi.org/10.1029/2009JA015053>

Vadas, S. L., & Crowley, G. (2017). Neutral wind and density perturbations in the thermosphere created by gravity waves observed by the TIDDBIT sounder. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(6), 6652–6678. <https://doi.org/10.1002/2016JA023828>

Vadas, S. L., & Fritts, D. C. (2001). Gravity wave radiation and mean responses to local body forces in the atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(16), 2249–2279. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<2249:gwrarmr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<2249:gwrarmr>2.0.co;2)

Vadas, S. L., & Fritts, D. C. (2005). Thermospheric responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *Journal of Geophysical Research*, 110(D15), D15103. <https://doi.org/10.1029/2004JD005574>

Vadas, S. L., Fritts, D. C., & Alexander, M. J. (2003). Mechanism for the generation of secondary waves in wave breaking regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 60(D15), 194–214. <https://doi.org/10.1029/2004JD005574>

Vadas, S. L., & Liu, H.-L. (2009). Generation of large-scale gravity waves and neutral winds in the thermosphere from the dissipation of convectively generated gravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 114(A10), A10310. <https://doi.org/10.1029/2009JA014108>

Vadas, S. L., & Liu, H.-L. (2013). Numerical modeling of the large-scale neutral and plasma responses to the body forces created by the dissipation of gravity waves from 6 h of deep convection in Brazil. *Journal of Geophysical Research*, 118(5), 2593–2617. <https://doi.org/10.1002/jgra.50249>

Vadas, S. L., & Nicolls, M. J. (2012). The phases and amplitudes of gravity waves propagating and dissipating in the thermosphere: Theory. *Journal of Geophysical Research*, 117(A5), A05322. <https://doi.org/10.1029/2011JA017426>

- Vadas, S. L., Taylor, M. J., Pautet, P.-D., Stamus, P. A., Fritts, D. C., Liu, H.-L., et al. (2009). Convection: The likely source of medium-scale gravity waves observed in the OH airglow layer near Basilia, Brazil, during the SpreadFEx campaign. *Annales Geophysicae*, 27(1), 231-259. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-231-2009>
- Vadas, S. L., Yue, J., She, C.-Y., Stamus, P., & Liu, A. (2009). A model study of the effects of winds on concentric rings of gravity waves from a convective plume near Fort Collins on 11 May 2004. *Journal of Geophysical Research*, 114(D6), D06103. <https://doi.org/10.1029/2008JD010753>
- Vadas, S. L., Zhao, J., Chu, X., & Becker, E. (2018). The excitation of secondary gravity waves from local body forces: Theory and observation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), 9296-9325. <https://doi.org/10.1029/2017JD027970>
- von Zahn, U., Cossart, G., Fiedler, J., Fricke, K., Nelke, G., Baumgarten, G., et al. (2000). The ALOMAR Rayleigh/Mie/Raman lidar: Objectives, configuration, and performance. *Annales Geophysicae*, 18(7), 815-833. <https://doi.org/10.1007/s00585-000-0815-2>
- Walterscheid, R., Gelinias, L., Mechoso, C., & Schubert, G. (2016). Spectral distribution of gravity wave momentum fluxes over the Antarctic Peninsula from Concordiasi superpressure balloon data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(13), 7509-7527. <https://doi.org/10.1002/2015JD024253>
- Walterscheid, R. L., Schubert, G., & Brinkman, D. G. (2001). Small-scale gravity waves in the upper mesosphere and lower thermosphere generated by deep tropical convection. *Journal of Geophysical Research*, 106(D23), 31825-31832. <https://doi.org/10.1029/2000jd000131>
- Wang, L., & Geller, M. A. (2003). Morphology of gravity-wave energy as observed from 4 years (1998-2001) of high vertical resolution U.S. radiosonde data. *Journal of Geophysical Research*, 108(D16), 4489. <https://doi.org/10.1029/2002JD002786>
- Watanabe, S., Kawatani, Y., Tomikawa, Y., Miyazaki, K., Takahashi, M., & Sato, K. (2008). General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, 113(D12), D12110. <https://doi.org/10.1029/2008JD010026>
- Watanabe, S., Sato, K., & Takahashi, M. (2006). A general circulation model study of the orographic gravity waves over Antarctica excited by katabatic winds. *Journal of Geophysical Research*, 111(D18), D18104. <https://doi.org/10.1029/2005JD006851>
- Williamson, D. L., & Olson, J. G. (1994). Climate simulations with a semi-Lagrangian version of the NCAR Community Climate Model. *Monthly weather review*, 122(7), 1594-1610. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<1594:CSWASL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<1594:CSWASL>2.0.CO;2)
- Yoshiki, M., Kizu, N., & Sato, K. (2004). Energy enhancements of gravity waves in the Antarctic lower stratosphere associated with variations in the polar vortex and tropospheric disturbances. *Journal of Geophysical Research*, 109(D23), D23104. <https://doi.org/10.1029/2004JD004870>

- Yoshiki, M., & Sato, K. (2000). A statistical study of gravity waves in the polar regions based on operational radiosonde data. *Journal of Geophysical Research*, *105*(D14), 17995–18011. <https://doi.org/10.1029/2000jd900204>
- Yue, J., Vadas, S. L., She, C.-Y., Nakamura, T., Reising, S. C., Liu, H.-L., et al. (2009). Concentric gravity waves in the mesosphere generated by deep convective plumes in the lower atmosphere near Fort Collins. *Journal of Geophysical Research*, *114*(D6), D06104. <https://doi.org/10.1029/2008JD011244>
- Zhang, F., Wang, S., & Plougonven, R. (2004). Uncertainties in using the hodograph method to retrieve gravity wave characteristics from individual soundings. *Geophysical Research Letters*, *31*(11), L11110. <https://doi.org/10.1029/2004GL019841>
- Zhao, J., Chu, X., Chen, C., Lu, X., Fong, W., Yu, Z., et al. (2017). Lidar observations of stratospheric gravity waves from 2011 to 2015 at McMurdo (77.84°S, 166.69°E), Antarctica: 1. Vertical wavelengths, periods, and frequency and vertical wavenumber spectra. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(10), 5041–5062. <https://doi.org/10.1002/2016JD026368>
- Zulicke, C., & Peters, D. H. W. (2006). Simulation of inertia-gravity waves in a poleward breaking Rossby wave. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *63*(12), 3253–3276. <https://doi.org/10.1175/JAS3805.1>
- Zulicke, C., & Peters, D. H. W. (2008). Parameterization of strong stratospheric inertia gravity waves forced by poleward breaking Rossby waves. *Monthly Weather Review*, *136*(1), 98–119. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2060.1>