<별표 10호>. 위탁연구 최종보고서 <개정 2023. 1. 9.>

연구결과보고서 서식

Ⅰ. 인쇄규격

1. 크기 : A4 신판(가로 210mm*세로 297mm)
2. 제본 : 좌철
3. 용지
   1)표지 200g/m . 양면 아트지
   2)내용 80g/m . 모조지
4. 인쇄방법:
   1) 표지 : 바탕 백색, 활자 흑색
   2) 내용 : 흑색 지정활자로 인쇄한다. 그림 또는 그래프 등이 삽입된 경우 연구책임자의 재량에 따라 칼라로 인쇄 가능, 양면 또는 단면인쇄

Ⅱ. 편집순서

KOPRI 극지연구소

1. 표 지(앞면)
2. 제출문
3. 보고서 초록
4. 요약문
5. Summary
6. 목 차
7. 본 문
8. 뒷면지

Ⅲ. 참고사항

※ 전자조판 인쇄시에는 이 요령에 준한다.

표 지

(뒷면)	(측면)	(앞면)
주 의 (편집 순서8) (16 포인트 고딕체) ↑ 7cm ↓	제 목 위탁 기관 이름 ↑ 5cm ↓	↑ 7cm ↓ **오로라 화학물질 수송 과정에서 대기중력파의 역할 수치모델 연구** (20 포인트 중고딕체) A Numerical Study on the Roles of Atmospheric Gravity Waves in the Transport of Aurora-induced Chemicals (16 포인트 명조체) 한국해양과학기술원부설 극지연구소 (20 포인트 중고딕체) ↓ 7cm ↑

KOPRI 극지연구소

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 최종보고서로 제출합니다.

2025. 1. 31

(본과제) 총괄연구책임자 : 지 건 화

위탁연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 송 인 선

위탁참여연구원 : 심 자 순
“ : 송 병 권
“ : 이 원 석
“ : 김 지 우
“ : 신 재 형
“ : 김 경 수

보고서 초록

위탁연구과제명	오로라 화학물질 수송 과정에서 대기중력파의 역할 수치모델 연구				
위탁연구책임자	송 인 선	해당단계 참여연구원수	6	해당단계 연구비	110,000,000원 (3년)
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교 산학협력단		참여기업명	해당사항 없음	
국제공동연구	상대국명 : 미국 상대국연구기관명 : 미국립대기연구소 (NCAR)				

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서 면수	

- 극지 고층대기는 태양 및 우주환경 (혹은 자기권)으로부터 유입되는 다량의 입자가 지구로 들어오는 통로이다. 특히 태양 활동이 강할 때, 태양으로부터 방출된 고에너지 물질이 지구 자기장을 자극하면서 오로라가 발생하면, 이때 유입된 다량의 입자들은 지구 대기와의 이온 화학 반응을 통해 산화질소 (NOx)나 산화수소 (HOx)를 열권 하부 (고도 100 km 부근) 극지 고층대기에 생성할 수 있다.

- 오로라와 연관되어 생성된 화학물질 중 NOx는 상당히 긴 생존 기간 (6개월 이상)을 가지며, 남북 및 연직으로 장거리 이동할 수 있다. HOx는 화학적으로 불안정한 라디칼로서 생존 기간이 짧아 원격 이동 효과가 크지는 않다. 생존 기간이 긴 NOx는 고층대기 및 중층대기에서 오존 파괴 물질로 알려져 있다.

- 강한 태양 활동 및 오로라와 연관되어 발생하는 NOx의 전지구적인 수송은 오존 화학이나 복사 과정의 측면에서 중•고층대기 대기 순환에 영향을 줄 수 있다. 실제로, NOx에 의해 겨울 성층권 극 소용돌이(polar vortex)안의 오존이 감소할 수 있고, 감소된 오존에 의한 장파 복사 (9.6 μm)이 감소하여 극 소용돌이 내부의 온도를 증가시킬 수 있다.

- 본 연구에서는 저해상도 전층대기 전지구 예측 모델에 장착된 중력파 항력 모수화에 2차 중력파의 개념을 도입하여, 기초적인 형태의 2차 중력파 모수화를 모델에 장착하였으며, 이 새로운 모수화를 통해 증가된 중간권•열권 난류 확산으로 인해, 오로라와 연관되어 생성된 NOx가 성층권 더 낮은 고도까지 수송될 수 있음을 보였다.

- 테스트에 사용된 모델은 미국립대기연구소 (NCAR)에서 개발한 Whole Atmosphere Community Climate Model version 6 (WACCM6)이며, 이 모델은 산악, 깊은 대류, 전선에 의한 1차 중력파의 항력을 기본적으로 계산하고 있다. 2차 중력파는 3개의 1차 중력파 항력이 발생하는 대류권 상부부터 중간권 중하부까지의 고도에서 발생하여 상층으로 전파하는 것으로 가정하였다.

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	오로라, 산화질소, 오존, 1차, 2차 대기중력파, 난류 에디 확산
	영 어	Aurora, Nitrogen Oxide, Ozone, Primary and secondary gravity waves, turbulent eddy diffusion

KOPRI 극지연구소

요 약 문

Ⅰ. 제 목

오로라 화학물질 수송 과정에서 대기중력파의 역할 수치모델 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

극지 고층대기는 태양 및 우주환경 (혹은 자기권)으로부터 유입되는 다량의 입자가 지구로 들어오는 통로이다. 태양으로부터 방출된 고에너지 물질이 지구 자기장을 자극하면서 오로라가 발생하면, 이때 유입된 다량의 입자들은 지구 대기와의 이온화학 반응을 통해 산화질소 (NOx)나 산화수소 (HOx)를 열권 하부 (고도 100 km 부근) 극지 고층대기에 생성할 수 있다. 생성된 화학물질은 시공간적으로 수송되어 중·고층대기 오존을 감소시키고 성층권 극 소용돌이에 영향을 줄 수 있다. 모델에서 아격자 과정으로 모수화되는 대기 중력파는 오로라로 인해 발생한 화학 물질의 수송에 영향을 줄 수 있어, 중력파 모수화의 과정이 정교해질수록 화학 물질의 수송 또한 변화할 수 있다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 전지구 기후 모델의 대기중력파 항력을 개선하기 위해서 2차 대기중력파 과정을 포함시키는 작업을 수행한다. 2차 대기중력파 항력은 대류권의 산악이나 비산악 (대류 혹은 전선)이 유도하는 중략파 항력 자체가 다시 유도하는 대기중력파를 의미하는 것으로, 중·고층대기 바람 및 순환에 2차 대기중력파가 중요한 역할을 할 것으로 예상되는 최근 연구 결과가 다수 발표되고 있다. 본 연구에서는 간단한 역학 모델에서 테스트된 2차 대기중력파 모수화 과정을 미국립대기연구소(National Center for Atmospheric Research; NCAR)에서 개발한 Whole Atmosphere Community Climate Model version 6 (WACCM6)에 장착하고, 그 결과를 화학 과정이 단순하게 처리된 30년 모델 실험 (AMIP 형태의 대기 모델 기후 실험)와 중층대기 화학 및 전리권 D 이온 화학이 포함된 15년 실험 (CMIP6 historical run)을 통해 2차 대기중력파가 중·고층대기 순환 및 오로라 화학 물질의 수송에 주는 영향에 관해 조사하였다.

Ⅳ. 연구개발결과

2차 중력파는 1차 산악 및 비산악 대기중력파 항력이 발생하는 대류권 상부부터 중간권에

서 발생하는 것으로 가정하였다. 구체적으로는 300 hPa (고도 12 km)부터 0.1 hPa (고도 약 65 km)까지의 고도를 7개로 나누고 각 고도에서 측정된 1차 대기중력파 항력이 임계 값을 넘을 경우, 2차 대기중력파가 발생하는 것으로 가정하였다. 발생하는 2차 대기중력파는 1차 대기중력파 항력의 일직선 상으로 수평적으로 해당 고도 수평 바람에 상대적으로 전파하는 것으로 가정하였다. 이렇게 큰 고유위상속도 (큰 c – U)를 갖는 2차 대기중력파는 임계 고도를 만날 가능성이 적은 채로 중간권 및 열권 하부까지 전파할 수 있다.

2차 대기중력파가 장착된 모델은 전층대기 전지구 모델이 갖고 있던 계통 오차 중 하나인 겨울철 중간권계면 바람의 역전 현상을 개선할 수 있었다 (겨울철 중간권계면에서는 서풍이 불어야 하나 대부분 모델에서는 동풍으로 역전되어 있음). 또한, 큰 값의 $(c-U)$로 인해, 2차 대기중력파는 강한 난류 에디 혼합을 일으킬 수 있었다 [난류 에디 혼합계수는 $(c-U)^4$에 비례함]. 따라서, 2차 대기중력파가 붕괴하는 중간권 상부 및 열권 하부에 강한 연직 난류 혼합을 만들어 낼 수 있다. 이 강한 연직 난류 혼합은 통상적으로 중간권 상부 혹은 열권 하부에서 생성되는 오로라 화학 물질인 NOx를 성층권계면 아래까지 좀 더 강하게 수송시킬 수 있었으며, 이에 따라 2차 대기중력파가 장착된 경우 오로라 화학 물질이 좀 더 강하게 겨울철 성층권 극 소용돌이에 영향을 끼칠 수 있음을 확인할 수 있었다.

2차 대기중력파를 장착하더라도 난류 혼합을 변화시키지 않은 실험에서는 오로라 화학물질의 하향 수송이 크게 증가하지 않은 것으로 보아, 난류 혼합에 의한 화학물질의 수송이 핵심적인 역할을 할 수 있음을 알 수 있었다. 2차 대기중력파의 장착이 중·고층대기 자오면 물질 순환 (TEM 순환)에는 큰 변화를 주지는 않은 것으로 판단되면, 겨울 반구의 성층권 돌연 승온의 빈도에 있어서도 의미 있는 정도의 변화를 주지는 않은 것으로 판단된다. 다만, 2차 대기중력파를 장착한 실험 중 하나에서 극지역 NOx의 하향 수송이 더 활발한 경우가 있었고, 이에 관한 연구는 좀 더 수행되어야 할 것으로 보인다.

KOPRI 극지연구소

V. 연구개발결과의 활용계획

2차 대기중력파에 의한 유체 body force나 난류 혼합에 대한 모수화는 아직 대부분의 전지구 기후 모델에서 활용되고 있지 않다. 최근 WACCM을 이용한 연구에서 모델의 수평 해상도가 좋아지는 경우, 더 강한 하향 화학물질 수송이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 저해상도에서 사용하는 대기중력파 항력 모수화가 적은 난류 혼합을 일으키기 때문인 것으로 파악한 연구가 있었다. 본 연구의 결과는 저해상도라 하더라도 2차 대기중력파의 효과를 적절히 고려하면, 중·고층대기에서 난류 에디 혼합에 의한 하향 오로라 화학물질 수송을 증가시킬 수 있음으로 보여주고 있다. 더 나아가, 겨울철 극지 중간권계면 바람도 2차 대기중력파로 계통 오차를 해결할 수 있음도 보여주고 있다. 따라서 본 연구의 결과는 오로라 화학물질이 중층대기 극 소용돌이에 주는 영향이나 오존 화학에 주는 영향을 재정립하는데 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 본 연구 결과는 현재 연구 논문으로 출간 준비 중이다.

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

Energetic particles is generated from the Sun and space environment (magnetosphere), and their precipitation occurs in the polar upper atmosphere. Energetic particle precipitation (EPP) generate nitric oxides (NOx) and hydrogen oxices (HOx) around 100 km in altitude through ion chemistry. The induced chemicals are transported meridionally and vertically, depleting ozone and affecting winter polar vortex in the middle atmosphere. Refined gravity wave parameterizations (GWPs) can substantially affect the transport of the auroral chemicals

III. Contents and Extent of R&D

This study incorporates secondary gravity wave (SGW) processes in a global climate model to improve the representation of gravity wave drag. SGW drag refers to gravity waves induced by the dissipation of primary gravity waves, which are originally triggered by orographic (mountains) or non-orographic (convection or fronts) sources in the troposphere. Recent studies have highlighted the critical role of SGWs in governing middle and upper atmospheric winds and circulation. In this study, an SGW parameterization, tested in simplified dynamic models, is implemented into WACCM6 developed by NCAR. We investigate the impact of SGWs on middle and upper atmospheric circulation and the transport of auroral chemical species through two types of simulations: a 30-year atmospheric climate experiment (AMIP-style) with simplified chemistry, and a 15-year CMIP6 historical run that includes middle atmosphere and ionospheric D-region ion chemistry."

IV. R&D Results

The generation of SGWs was assumed to occur between the upper troposphere and the

mesosphere, where primary orographic and non-orographic gravity wave drag (GWD) is exerted. Specifically, the altitude range from 300 hPa (~12 km) to 0.1 hPa (~65 km) was divided into seven layers; SGWs were assumed to be triggered whenever the primary GWD at these altitudes exceeded a specific threshold. These SGWs are assumed to propagate horizontally in line with the primary GWD relative to the local horizontal wind. Due to their large intrinsic phase speeds ($c-U$), these SGWs can propagate higher up to the mesosphere and lower thermosphere (MLT) with a lower probability of encountering critical levels.

The model with SGW parameterization successfully mitigated the systematic bias of wind reversal at the winter mesopause—a common issue in whole-atmosphere global models where easterly winds often appear instead of the observed westerlies. Furthermore, due to the large values of $c-U$, the SGWs induced strong turbulent eddy mixing, as the turbulent eddy diffusion coefficient is proportional to $(c-U)^4$. Consequently, the breaking of SGWs in the upper mesosphere and lower thermosphere generated enhanced vertical turbulent mixing. This enhanced mixing facilitated the downward transport of NOx, auroral chemical species typically produced in the MLT, to below the stratopause. This confirms that SGWs allow auroral chemicals to exert a stronger influence on the winter stratospheric polar vortex.

In sensitivity experiments where SGWs were implemented but turbulent mixing remained unchanged, the downward transport of auroral chemicals did not increase significantly. This suggests that transport via turbulent mixing plays a essential role. While the inclusion of SGWs did not lead to substantial changes in the Transformed Eulerian Mean (TEM) residual circulation or the frequency of Stratospheric Sudden Warmings (SSW) in the winter hemisphere, one simulation with SGWs showed more active downward transport of polar NOx. This requires further investigation.

KOPRI 극지연구소

V. Application Plans of R&D Results

Parametrizations for fluid body forces or turbulent mixing induced by SGWs are not yet utilized in most global climate models. A recent study using WACCM indicated that higher horizontal resolutions lead to stronger downward chemical transport, identifying the insufficient turbulent mixing in low-resolution gravity wave drag parameterizations as the primary cause. Our findings demonstrate that even at low resolutions, appropriately accounting for SGW effects can increase the downward transport of auroral chemicals through turbulent eddy mixing in the middle and upper atmosphere. Moreover, it shows that SGWs can resolve systematic biases in winter polar mesopause winds. Therefore, the results of this study are expected to play a crucial role in redefining the impact of auroral chemicals on the middle atmospheric polar vortex and ozone chemistry. These findings are currently being prepared for publication in a research journal.

목 차

제 1 장 서론 ····· 8

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 12

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 14

제 1 절 대기중력파 모수화 ····· 14

제 2 절 역학 모델 SWAD ····· 20

제 3 절 단순화된 화학이 장착된 WACCM ····· 44

제 4 절 중층대기 화학 및 전리권 D층 이온화학이 포함된 WACCM ····· 68

제 5 절 중층대기 자오면 순환 및 성층권 돌연 승온에의 영향 ····· 81

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 85

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 86

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 88

제 7 장 참고문헌 ····· 90

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서론

극지 고층대기는 태양 및 우주환경 (혹은 자기권)으로부터 유입되는 다량의 입자가 지구 자기력선을 따라서 지구로 들어오는 통로에 놓여 있다. 태양으로부터 방출된 고에너지 물질이 지구 자기장을 자극하면 (이때 오로라도 발생), 이때 유입된 다량의 입자들은 지구 대기와의 이온화학 반응을 통해 산화질소 (NOx; N, NO, 및 NO_2)나 산화수소 (HOx; H, OH, 및 HO_2)를 열권 하부 (고도 100 km 부근) 극지 고층대기에 생성할 수 있다 (Sinnhuber et al., 2012). 이러한 현상을 energetic particle precipitation (EPP)라고 부르며, 생성된 화학물질은 화학적 반응성이 매우 좋은 물질로서 중간권과 성층권에서 오존을 제거하는 반응을 일으킨다 (Brasseur & Solomon, 2003; Funke et al., 2011; Fytterer et al., 2015; Jackman et al. 2008, 2001; Verronen et al., 2006). 이 화학물질은 시공간적으로 수송되어 중·고층대기 오존을 감소시키는 동시에 성층권 극 소용돌이에 열적으로 영향을 줄 수 있다.

EPP로 인해 NOx나 HOx가 생성되는 지역에서 발생하는 화학 조성의 변화나 열역학적 변화를 직접 효과(direct effects)라고 부르며, 생성된 화학물질이 시공간적으로 이동하면서 생성 지역과 다른 지역에서 화학 조성 및 열역학적 변화를 일으키는 것을 간접 효과(indirect effect)라고 부른다 (Randall et al., 2007). 성층권에서 NOx의 수명은 고도와 환경에 따라 달라지는데, 특히 어둡고 추운 극지방의 겨울철에는 화학적 분해 과정이 억제되어 수명이 1개월 이상으로 길어진다 (Brasseur & Solomon, 2005). 극지역 겨울철 중간권계면 부근의 대기는 극 소용돌이(polar vortex)와 그 내부에서 발생하는 하강 기류가 지배한다. 이 하강 기류를 타고 극 소용돌이 위의 높은 고도에서 생성된 NOx가 성층권까지 내려올 수 있다. 성층권으로 내려온 NOx는 이후 햇빛이 비치기 시작하면 촉매 반응을 통해 오존을 파괴하는 역할을 하기 시작한다. 오존층이 얇아지면 복사의 관점에서 극 소용돌이 내부 온도의 섭동이 일어나고, 전지구 자오면 순환에도 섭동이 발생한다. 이러한 간접 효과는 성층권 혹은 중간권에 교란이 일어나는 성층권 돌연 승온과 같이 현상이 발생하는 경우 특히 더 중요하다 (Meraner & Schmidt, 2016; Orsolini et al., 2017; Holt et al., 2013).

우주 환경에서 극지 고층대기를 통해 지구로 들어오는 입자들은 주로 양성자와 전자들이며, 이들이 대기에 주는 영향은 이 입자들이 얼마가 큰 운동에너지를 갖느냐에 따라 다르다 (Vitt & Jackman, 1996). 양성자는 대체로 태양으로부터 직접 방출되어 지

구에 도달하기 때문에, 이 경우를 보통 태양 양성자 이벤트 (solar proton event; SPE)라고 부른다. 이 양성자 이벤트는 상당히 간헐적으로 일어나지만, 중・고층대기 오존이나 기타 미량 기체의 분포에 큰 영향을 줄 수 있다 (예, Funke et al., 2011; Jackman et al., 2001; Verronen et al., 2006). 반면에 오로라와 연관된 전자들은 지구의 플라스마권에서 기인하며, 오로라 서브스톰 발생시 1-30 keV까지 가속되어 지구 고층대기로 들어온다 (Fang et al., 2008). 중간 수준의 에너지를 갖는 전자 (medium energy electrons; MEE)의 경우, 전자의 운동에너지는 30 keV보다 보통 크고, 지자기 폭풍이 발생하는 경우 지구 레디에이션 벨트에서 생성되어 처음에는 수 백 keV의 에너지를 갖다가 지구 고층대기로 들어오면서 30 keV 정도로 감소하게 된다 (Horne et al., 2009).

이와 같은 EPP의 효과를 전지구 기후 모델에 물리적으로 일관성 있는 방식으로 장착하기 위해서, EPP의 에너지 대역에 따른 화학물질의 생성 혹은 소멸, 그리고 시공간적인 수송이 고려되어야 한다. 본 연구에서 활용하고 있는 미국립대기연구소(NCAR)에서 개발한 Community Earth System Model (CESM)의 전층대기 모델 컴포넌트인 WACCM은 SPE 및 MEE에 의한 대기 이온화율과 NOx 및 HOx 생성량을 명시적으로 계산하고 있으며, 동시에 고에너지 입자를 통해 생성된 NOx 및 HOx의 화학 반응 및 시공간적 이동을 계산한다 (Marsh et al., 2013). SPE와 MEE외에도 WACCM은 galactic cosmic ray (GCR)에 의한 이온화율도 고려하고 있다. 현재 CESM은 Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) 실험을 기준으로 SPE, MEE, 그리고 GCR이 세 가지의 고에너지 입자의 효과를 고려하고 있다. 또한 WACCM은 EPP의 효과를 보다 더 관측과 비교할 수 있는 수준으로 현실적으로 모의하기 위해서 전리권 D층 이온 화학을 장착하고 있다 (Kóvacs et al., 2016; Verronen et al., 2016).

앞서 언급했듯이 태양 혹은 우주환경 (플라스마 권 혹은 자기권)에서 극지 고층대기로 유입되는 고에너지 입자 (양성자 혹은 전자)들은 중간권계면 혹은 하부 열권에서 NOx나 HOx를 생성한다. 실제로 Smith-Johnsen et al. (2017)의 관측 연구에 따르면, 고층대기로 유입된 전자는 1-750 keV의 에너지 대역을 가질 수 있으며, 이 전자가 에너지를 대기로 전달하는 고도는 60-120 km에 해당함을 보인 바 있다. 이 경우 NO와 연관된 간접 효과는 60 km 고도 아래에서도 관측될 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 이러한 고에너지 입잔 (전자)의 관측적 직・간접 효과 제대로 모델링 하기 위해서는 중간권 및 열권 하부의 자오면 순환 (혹은 물질 순환)에 대한 수치 모의를 제대로 할 필요가 있다. 이미 잘 알려져 있듯이, 겨울철 극 소용돌이 위에서 생성된 오존 파괴 물질인 NOx 등이 하강 기류를 통해 성층권 극 소용돌이 내부까지 들어오기 위해서는 모델에서 중간권에 나타나는 pole-to-pole 물질 순환 (여름 반구 극에서 겨울 반구 극

으로 향하는 순환)이나 연직 난류 확산에 의한 기체 혹은 입자의 연직 수송이 제대로 모의 될 필요가 있다.

중간권 및 열권 하부에서 물질 수송에 관여하는 대표적인 현상으로 대기 중력파를 들 수 있다. 이미 오래전부터 대기 중력파가 중간권 상부의 pole-to-pole 물질 순환을 일으킬 수 있음은 잘 알려져 왔으며, 정설로 받아들여지고 있다 (Lindzen 1981; Holton 1982). 통상적으로 이러한 중력파는 대류권에서 발생하여 중층대기 (성층권-중간권) 혹은 고층대기 (열권)으로 전파하는 것으로 인식되어왔으나 최근 많은 연구들은 대류권에서 발생해서 상층으로 전파하는 중력파(1차 중력파)가 붕괴하면서 생성되는 2차 중력파의 효과도 상당히 중요할 수 있음을 보여 왔다 (Becker & Vadas, 2018, 2022; Kam et al., 2021; Kogure et al., 2020; Vadas & Becker, 2018, 2019; Vadas et al., 2003; Vadas et al., 2018, 2023).

2차 중력파의 특성이나 세기에 관해서는 여전히 부분적으로 혹은 특정 지역에 국한되어 알려져 있기는 하지만, 이러한 2차 중력파가 명시적으로 부분적으로라도 모의 될 수 있는 모델의 경우, 겨울철 중간권 상부의 바람의 편차 (관측에서는 서풍이 나타나는데, 대부분 모델에서 동풍으로 역전됨)가 상당히 줄어들어 있는 모습은 시사하는 바가 크다 (Becker & Vadas, 2018). 열권 하부까지 포함하는 많은 전층 대기 기후 및 일기예보 모델들(예, Gelaro et al., 2017; Koshin et al., 2020; McCormack et al., 2017; Pedatella et al., 2014)이 분석장 생산을 위해서 다양한 관측 자료를 사용하여 왔다. 관측 중에서 중층대기를 포함할 수 있는 관측 자료로는 GPS radio occultation, AURA MLS 온도, 수증기 및 오존 자료, SABER 온도, 그리고 SSMI/S 상층 대기 sounding (UAS) data (Swadley et al., 2008)가 포함된다. 하지만 겨울철 중간간 상부 바람과 관련된 계통 편차는 관측 자료가 동화된 모델 결과 (즉, 분석장)에서도 완전히 해결되지 않는 것으로 보인다. 그 이유를 종종 전층 대기 모델에서 사용하고 있는 중력파 항력 모수화의 불확실성에서 찾아왔다 (Harvey et al., 2022; McCormack et al., 2021).

본 연구에서는 보통 대류권에서 발생하는 것으로 가정되는 1차 중력파가 붕괴하면서 가속도를 생성하는 고도에서 발생하는 2차 중력파가 Vadas et al. (2003)에서와 같이 1차 중력파에 의한 가속도의 수평 방향 선상에서 발생하는 것으로 가정하고, 관측에 기반한 적절한 수평 파장과 연직 파장을 갖는 2차 중력파가 1차 중력파가 유도하는 가속도 층에서 발생한다고 가정하여 2차 중력파에 대한 모수화를 제안하고자 한다. 이 2차 중력파 모수화는 우선 간단한 형태의 전지구 역학 모델에 장착하여 적절한 튜닝 작업을 거친다. 이 튜닝 작업을 통해 2차 중력파의 수평 파장, 연직 파장 (혹은 위상 속도)와 운동량 속 크기를 결정한다. 역학 모델에서 테스트된 2차 중력파 모델은 CESM

의 대기 모델 물리과정 버전 6에 기반을 두고 단순화된 화학 과정을 갖는 WACCM6에 장착하여 30년 AMIP 실험을 수행할 예정이다 (AMIP은 해양의 SST 변화를 과거의 관측으로 처방한 실험을 의미). 이 AMIP 실험을 통해서 겨울 중간권 상부의 바람의 계통 오차가 완화되는지 여부를 판단할 것이며, 동시에 모델이 표현해야 할 다른 기후적 순환의 모습이 그대로 유지되는지도 평가할 것이다. 마지막으로 2차 중력파 모수화가 장착된 WACCM6와 중층대기 화학 과정 및 전리권 D층 이온 화학이 결합된 모델을 이용하여 2000년부터 2014년까지 15년 기간에 대한 현실적인 EPP 세기 및 분포에 대한 수치 실험을 수행하고자 한다 (CMIP6 historical run). 이를 통해 중간권 상부 혹은 열권 하부에서 생성된 NOx와 같이 오존 파괴 물질이 성층권까지 수송되는 양상과 중력파에 의한 난류 에디 혼합의 영향을 분석할 것이다. 난류 에디 혼합과 관련해서는 Liu (2025)의 연구를 참고할 예정이다. 마지막으로 2차 중력파에 대한 모수화의 장착이 성층권 돌연 승온과 같은 겨울철 극지역 소용돌이의 변동성에도 큰 영향을 주는지 같이 살펴보고자 한다.

KOPRI
극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

대기 중력파와 관련된 연구에 있어서, 2차 중력파와 관련된 연구는 전 세계적으로 많이 진행되어 있으나, 대부분의 연구는 이론 (Vadas et al. 2003), 관측 (Kam et al. 2021; Kogure et al. 2020; Vadas et al., 2018), 그리고 고해상도 모델링 (Becker & Vadas 2018, 2022)과 관련되어 있다. 여기서 고해상도 모델링이라 함은 수평적으로는 전지구 25 km 격자, 연직으로는 300-400 m 해상도를 통상적으로 의미한다. 고해상도 모델에서는 저해상도 모델에서 사용하는 중력파 항력 모수화를 사용하지 않는 특징을 보인다. 현실에서 슈퍼컴퓨팅의 파워가 빠르게 좋아지고 있다고는 하지만, 국가 기관 수준이 아닌 한, 대부분의 기후 모델은 아직까지도 저해상도로 실행되는 경우가 많아, 2차 중력파에 대한 모수화 과정은 여전히 연구 및 예측의 영역에서 필요한 물리 과정인 것으로 보인다. 현재까지 2차 중력파 모수화에 대한 연구 논문은 세계적으로 출간되지는 않은 것으로 보인다.

전지구 기후 모델과 관련해서, 현재 기상청을 중심으로 국가기후예측모델개발사업 (2025년에 시작하여 7개년 사업을 목표로 하고 있음)을 기상청 기후국 R&D로 진행하고 있으며, 본 위탁 연구의 책임자도 해당 사업에 중력파 과정과 복사 과정과 같은 중층대기 물리 모수화 개발에 참여하고 있다. 결과적으로, 아직 국내 독자의 기후 예측 및 연구를 위한 독자 모델은 존재하지 않는 상황이다. 현재 기상청 현업 수치예보 모델의 구조를 거의 그대로 따라간다고 하더라도, 모델의 상단이 80 km 정도인 상황이어서 중간권 상부나 열권 하부까지는 모델이 수치 모의할 수 있는 상황은 아니다. 게다가 모델 개발 계획에서 화학 과정에 대한 부분이 매우 단순하게 되어 있어 (오존과 관련된 전체 화학물질에 대한 과정을 결합하는 것은 과제에 포함되어 있지 않음), 향후 수년 혹은 십여 년 후까지 국내에서 명시적인 화학 과정이 결합된 전지구 기후 예측/연구 모델은 보유하기는 쉽지는 않을 것으로 보인다. 따라서 본 연구에서는 미국 NCAR에서 제공하는 중층대기 화학과정이 결합된 CESM을 기준 모델로 활용하였다.

1차 중력파 과정과 관련해서는 기상청 현업 수치예보 모델에도 NCAR WACCM과 유사하게 산악, 대류 및 전선에 의한 중력파 모수화가 장착되어 있다. 다만, 국내 모델에도 아직 2차 중력파의 효과는 모수화 형태로 포함되어 있지 않다. NCAR WACCM에서는 3개의 서로 다른 원천이 만들어내는 1차 중력파가 유도하는 격자 규모 가속도를 계산하고는 있으나, 동시에 발생하는 난류 에디 확산의 효과는 모델에 포함되어 있지 않은 상황으로 개선이 필요한 상황이다. WACCM의 경우도 난류 에디 확산 계수가

열역학 변수 (온도)와 기체 및 입자상 물질에 대해서만 적용되게 되어 있는 문제점이 있다 (난류 확산 계수는 열이나 스칼라뿐만 아니라 운동량에도 적용되는 것이 물리적으로 일관성이 있음). 그리고 다중 중력파가 서로 야기하는 난류 혼합이 각각의 중력파의 소산에 주는 영향은 포함되어 있지 않다. 또한, 기상청 모델에서 산악과 비산악 중력파 과정에 있어서, 에너지 보존이나 운동량 보존이 서로 상이하게 계산되고 있어, 이에 대한 일관성 제고가 필요한 상황이다.

국내에서 자체적으로 개발한 중·고층대기를 위한 화학 과정 모듈은 존재하지 않는 것으로 보인다. 기상청과 같은 기관에서도 미국이나 유럽에서 개발된 기존의 화학 모듈을 변형해서 사용하는 상황인 것으로 보인다. 아울러 전리권 D층에 대한 이온 화학과 같은 과정은 전혀 국내에서는 연구나 개발 측면에서 고려되고 있지 못한 상황이다. 특히, 하부 열권과 같이 고층 대기와 연관되는 부분에 있어서, 기상청 쪽의 관심이 매우 적은 상황이다. 최근 신 우주 시대가 열리면서, 저궤도 혹은 초저궤도 위성에 대한 관심이 증폭하고 있는 상황에서, 위성 운영의 안정성에 대한 예측이나, 우주에서 운영 후 추락하는 물체의 궤적에 대한 예측에 대한 수요가 높아지고 있는 상황이다. 초저궤도 위성이나 우주 물체와 관련된 안정성 문제에서 전지적으로 중성인 대기의 밀도나 바람에 대한 예측이 중요한 가운데, 미국에서는 국립해양대기국 (National Oceanic and Atmosphereic Administration; NOAA)에서 운영하는 모델의 상단을 고층까지 높혀 위성이 운영되는 고층 대기의 밀도를 예보에 활용하고 있다 (Fang et al., 2022). 아직 한국에서는 이러한 움직임이 초보적인 단계에 있기는 하나, 한국천문연구원을 중심으로 NCAR CESM 모델을 고도 600 km까지 확장한 버전인 WACCM-X (WACCM with thermospheric eXtension)을 활용하여 예측 작업에 활용하는 연구를 수행하고 있다.

KOPRI 극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 대기중력파 모수화

본 연구에서 사용할 대기중력파 모수화는 Lindzen (1981)의 선형 이론에 기초한 방법론으로 뒤에서 설명할 역학 모델(System for Whole Atmosphere Dynamics researches; SWAD)과 NCAR WACCM6에서 모두 이 방식의 모수화를 사용하고 있다. SWAD에서는 WACCM6와 비교해서 훨씬 간단하게 산악과 비산악 대기중력파로만 구분하여 모수화 계산을 수행하고 있다. SWAD에서 사용하는 산악 중력파 모수화는 McFarlane (1987)의 방법론을 사용하고 있고, 비산악 중력파 모수화는 Molod et al. (2012)에서 제시된 방법을 사용하고 있다. 여기서 언급할 모수화는 컬럼 모수화이기 때문에, 대기 컬럼을 통과하는 파동의 전파나 파동의 시간적 전파를 고려하지는 못한다. 비컬럼 모수화의 경우에는 Song and Chun (2008)이나 Song et al. (2020)을 참고할 수 있다.

Molod et al. (2012)에서의 비산악 대기중력파 항력 모수화에서는 아래 Fig. 1에서와 같은 남북 구조를 갖는 비산악 대기중력파 운동량 속 (flux) 크기의 최대값의 분포를 400 hPa에 일률적으로 적용하고 있다. 매 수평 격자에서 비산악 대기중력파는 9개의 파동으로 이루어진 Gaussian 스펙트럼 형태로 주어지고, Fig. 1에 보여진 분포는 그 Gaussian 스펙트럼이 최대값의 분포를 나타낸다. Molod et al. (2012)에서도 설명되어 있지만 Fig. 1과 같은 구조의 분포는 강수량의 위도 분포를 참고해서 만든 것으로 대류 및 전선 현상이 모두 강수 현상과 연관되어 있음에 착안해서 고안된 것이다.

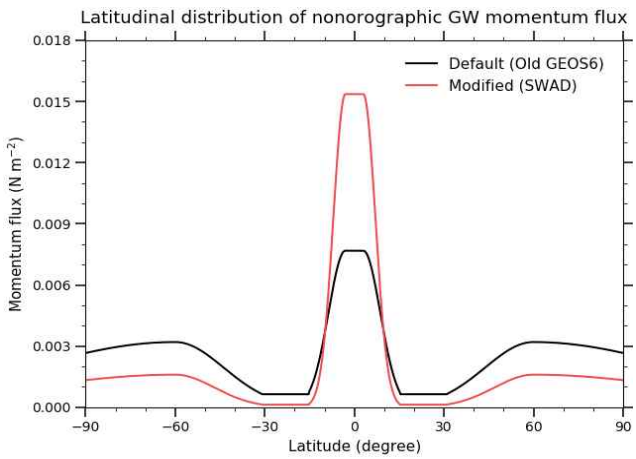

Figure 1: Latitudinal distributions of the maximum magnitude of non-orographic momentum flux given at the middle troposphere for (black) SWAD and (red) NASA GEOS6 model,.

대기중력파 모수화에서 파동은 파동이 발생하는 것으로 가정되는 고도의 수평 바람에 대해서 2차원적 (수평-연직)으로 전파하는 것으로 가정한다. 가령, 400 hPa의 바람이 서풍(eastward wind)이었다면, 비산악 대기중력파는 동서 방향으로 -40 m/s부터 +40 m/s까지 10 m/s 간격으로 9개의 파동이 발생하여 상층으로 전파하는 것으로 가정한다. 즉, 지면에 대해서 서쪽으로 40, 30, 20, 10 m/s의 위상 속도, 0의 위상 속도, 그리고 동쪽으로 10, 20, 30, 40 m/s의 위상 속도를 갖게 된다. 총 9개의 파동이 발생하는 것으로 가정한다. 산악 대기중력파의 경우는 파동이 발생하는 모델 층을 중규모 산악의 높이를 고려하여 별도로 계산하는 과정이 포함되어 있다. 산악 중력파의 경우는 무조건 지면에 대해서 0의 위상 속도를 갖는다. 자세한 내용은 McFarlane (1987)을 참조.

2차 대기중력파 모수화는 Vadas et al. (2003)의 이론과 물리적으로 일관성을 갖도록 하기 위하여 1차 대기중력파 (primary gravity waves; PGW)가 만들어내는 가속도의 방향과 평행한 방향으로 2차 대기중력파가 전파하는 것으로 가정한다. Figure 2에서 보인 바와 같이, PGW의 가속도 방향으로 U+c와 U-c의 (지상 기준) 위상 속도를 2차 파동이 갖는 것으로 가정한다. 여기서 U는 PGW의 가속도가 발생한 고도에서의 모델 수평 바람을 PGW 가속도 방향으로 투영한 바람을 의미한다. 이 같은 방식으로 2차 대기중력파는 U를 중심으로 $|c|$의 고유 위상 속도를 갖는 파동이 된다. 본 연구에서는 고유 위상 속도 |c|가 60 m/s가 되도록 하여, 상당히 큰 연직 파장을 갖는 2차 파동이 되도록 설정하였다 (정역학 대기중력파의 연직 파장은 고유 위상 속도에 비례하고 안정도에 반비례한다). 이는 Vadas et al. (2018)에서와 같은 관측 연구를 통해 드러난 2차 대기중력파의 연직 파장 15-20 km를 반영하기 위해서 설정된 값이다.

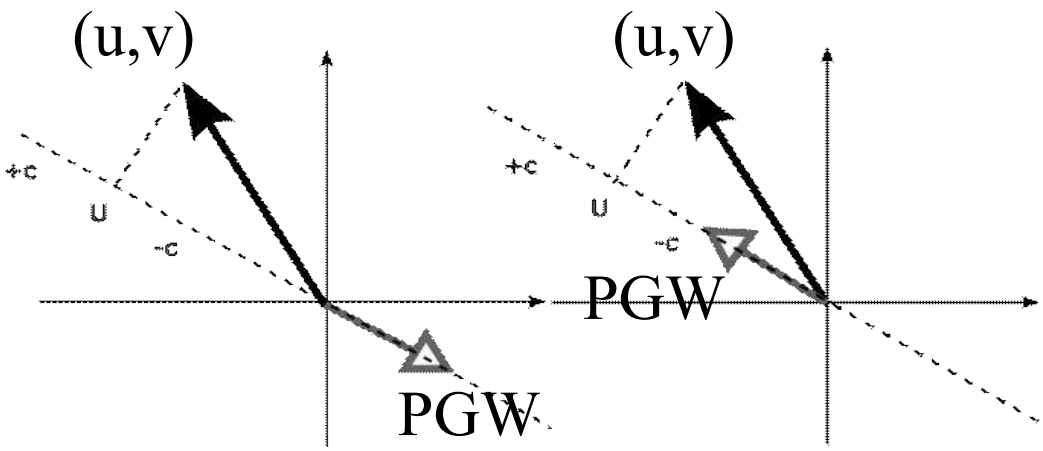

Figure 2: (Hallow arrow) Vectors of acceleration due to primary gravity waves (PGWs) and (Filled arrow) horizontal wind vector at the altitude of the acceleration of PGWs. Two monochromatic secondary gravity waves (SGWs) will have ground-based phase speed of $U-c$ and $U+c$, respectively, in the sense of the acceleration of PGWs.

2차 대기중력파의 생성은 단일 층에서만 이뤄지는 것은 아니고, 총 7개의 층에서 발생하는 것으로 가정하고, 산악 및 비산악 1차 대기중력파가 모두 2차 파동을 만드는 것으로 가정하였다. 구체적으로, 언급한 총 7개 층은 각각 100-300 hPa, 30-100 hPa, 10-30 hPa, 3-10 hPa, 1-3 hPa, 0.3-1 hPa, 0.1-0.3 hPa의 층이다. 0.1 hPa은 약 고도 65 km에 해당하며, 중간권 중상부부터 열권까지 2차 파동이 유도하는 효과를 볼 목적으로 중간권 중상부에서 생성될 2차 대기중력파의 효과는 무시하였다. Figure 3은 산악에 의한 1차 대기중력파가 상향으로 전파하면서 유도하는 대기중력파 항력과 연관된 7개의 층에서 발생하는 2차 파동에 대한 예시를 도식으로 나타낸 것이다. 7개 각각의 층에서 1차 대기중력파가 0.1 m/s/day 이상의 최대 가속도를 만들어내는 모델 층에서 2차 파동이 발생하는 것으로 가정하였다. 이 2차 파동의 수평 파장은 1500 km, 연직 파장은 0.02 rad/s의 안정도에 대해서 20 km 정도의 연직 파장을 갖도록 고유 위상 속도(intrinsic phase speed)는 60 m/s로 가정하였다. 2차 대기중력파에 대한 수평 파장이 보통의 모델의 수평 격자 간격보다 충분히 크기 때문에 2차 파동의 경우에는 간헐성 인자 (intermittency factor)를 1로 두었다. 참고로, 1차 대기중력파의 경우에는 간헐성 인자를 0.125로 두었고, 수평 파장은 산악 및 비산악 파장 모두에 대해서 100 km로 가정하였다. 각 층에서 발생하는 개개의 2차 대기중력파는 SWAD의 1차 파동의 운동량 속의 최대값(6.4×10^{-3} N m^{-2})의 약 3%에 해당하는 1.92×10^{-4} N m^{-2}로 두었다.

KOPRI 극지연구소

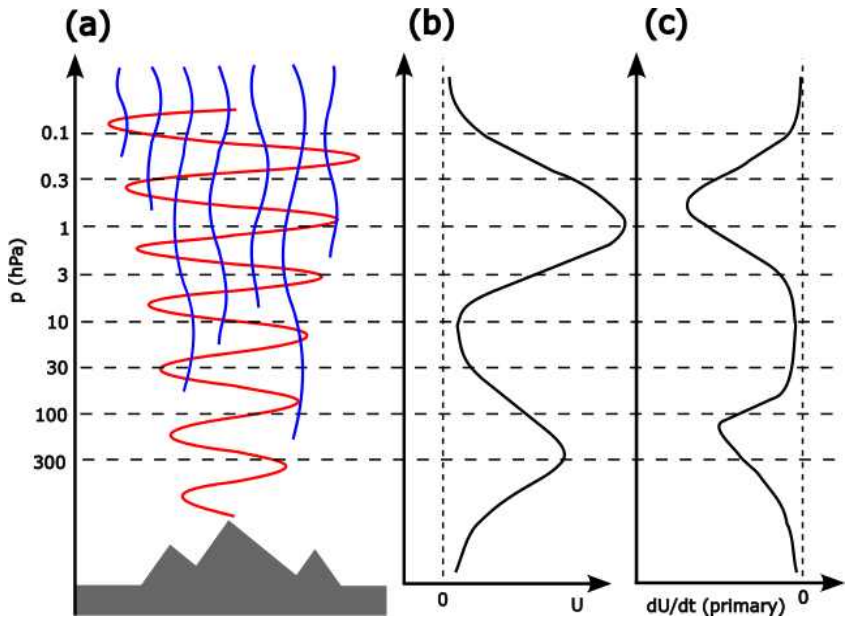

Figure 3: (a) Primary gravity waves (wavy curves in red) generated from topography and secondary gravity waves (wavy curves in blue) induced by the body force of the primary orographic gravity waves; (b) Hypothetical vertical profile of zonal wind; and [c] the vertical profile of the body force due to primary gravity waves shown in panel (a)..

위와 같이 기술된 2차 대기중력파 모수화 과정과 더불어, 역학 모델 SWAD 및 WACCM을 이용하여 1차 대기중력파의 효과를 중간권 중상부 이상의 고도에서 감소시키는 다양한 실험을 수행하였다. 이를 위하여 Fig. 4에 나타낸 것과 같이 고도 75 km 중심으로 서서히 1차 대기중력파의 효과가 감소하도록 간헐성 인자가 위로 갈수록 점차 줄어들도록 하였다. 간헐성 인자는 통상적으로 상수로 가정하고, 모수화에서 계산하는 가속도 항에 곱해져 과도한 가속도가 나오지 않도록 조절하는 역할을 한다. 따라서 고도에 따라서 간헐성 인자가 줄어들게 되면, 고도에 따라서 1차 대기중력파가 만들어내는 가속도의 크기도 점차 줄어들게 된다. Fig. 4에서 보는 것과 같이 고도 100 km에서 1차 대기중력파에 대한 간헐성 인자가 10% (빨강)로 줄어드는 경우와 50% (파랑)로 줄어드는 경우를 고려하였다. 이 같이 고도에 따라 변하는 간헐성 인자는 산악 및 비산악 (대류 및 전선) 1차 파동에 모두 적용된다.

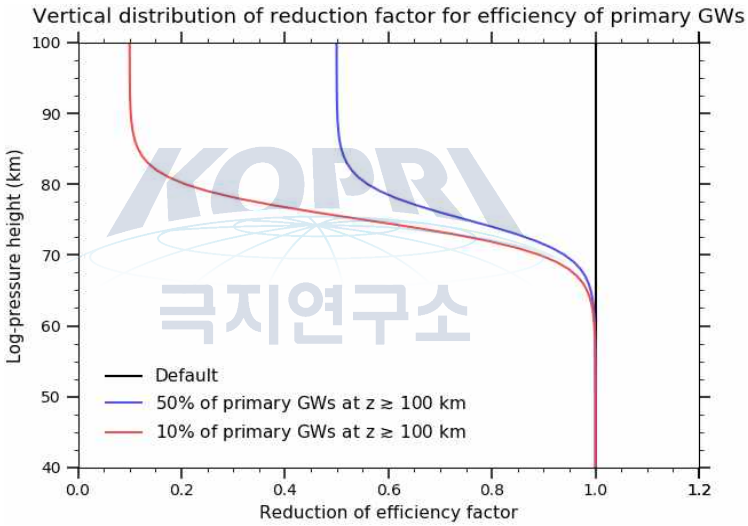

Figure 4: Vertical profiles of intermittency factor for primary gravity waves. Note that decrease of values is given by hyperbolic tangent function that decreases around 75 km in altitude.

간헐성 인자를 고도에 대해서 감소하게 만든 설정은 관측적 사실로부터 어느 정도 뒷받침될 수 있다. Liu et al. (2022), John & Kumar (2012), 그리고 Park et al. (2014) 연구 모두에서 하층에서부터 중간권계면을 지나면서 대기중력파의 진폭이 급격하게 감소하는 고도 구간이 있을 수 있음을 논의한 바 있다. 이러한 급격한 변화는 Ern et al., (2022)이 논의한 바와 같이 이러한 진폭의 연직 감소는 주로 겨울철 극 소용돌이 위에서 나타나는 것을 관측으로 나타났다. 따라서, 현재 연구에서와 같이 1차 대기중력파의 감소와 그로 인한 1차 대기중력파 가속도의 감소를 전체 위도에서 동일하게 준 점은 과도하게 단순화된 가정일 수 있다. 관측적으로 파동의 진폭이 급격하게 감소하는 구간

의 존재가 연직 상향으로 전파하는 파동이 붕괴되면서 강한 가속도를 생산하면서 생기는 것인지, 아니면 어떤 다른 이유로 인해서 파동의 진폭이 고도에 따라 급격하게 감소하는 것인지 명확하지는 않다.

SWAD든 WACCM이든 현재 대기중력파 항력 모수화에서 사용되는 파동 소산 메커니즘은 배경 난류 확산 계수나 분자 확산 계수, 그리고 파동 포화 과정을 포함한다. 하지만, 하나의 모델 수평 격자에서 다중 대기중력파를 고려하는 Lindzen 타입 방법에서 개개의 대기중력파가 유도하는 난류 확산에 의해 다른 파동이 소산되는 과정은 포함되고 있지 않다는 점에서 파동의 붕괴로 인한 파동의 소산은 과소 모의되고 있다는 점은 분명해 보인다. 추가로, 1차 대기중력파가 동심원을 그리면서 고층까지 전파하는 경우에 발생하는 파군의 팽창으로 인해 발생하는 파동 activity 밀도의 감소와 같은 현상도 모수화에서 고려되고 있지 않다. 이러한 파동 밀도의 감소는 난류 확산에 의한 감소와는 상관없는 파동 진폭의 고도에 따른 감소를 의미한다. 따라서 이와 같이 보다 현실적인 상황이 고려된 경우에는 1차 대기중력파의 간헐성 인자를 고도에 따라 감소하도록 설정하는 것이 지지를 받을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용하는 WACCM6에서 사용하는 1차 대기중력파 모수화는 산악, 대류 및 전선에 의해 발생하는 대기중력파를 각각 개별적으로 다룬다. 산악의 경우는 Scinocca and McFarlane (2000)의 방안에 근거해 NCAR의 Julio Bacmeister가 재작성한 방안을 사용한다. 이 방안에서는 지면에 나타나는 산악에 의한 바람 응력 (stress)를 하층에 작용하는 흐름 저지 (flow blocking), 하층 항력 (low-level drag) 그리고 대기중력파 stress로 나누어 계산한다. 즉, 기본적으로 산악에 의한 응력의 일부로 흐름 저지나 하층 항력 부분과 대기중력파로 분배시켜 계산하는 방식이다. 이는 NCAR CESM 모델의 대기 모델인 Community Atmospheric Model version 6 (CAM6)의 물리과정 페키지가 장착되면서 모델에 포함된 과정들이다. 참고로, SWAD에 사용하는 McFarlane (1987)은 CAM4에서 사용하던 산악 대기중력파 방안으로 이 경우 지형에 의한 바람 응력은 모두 대기중력파의 응력인 것으로 단순하게 가정하여 처방되었었다.

WACCM6에서 사용하는 대류에 의한 대기중력파는 Beres et al. (2004)의 방안을 사용하며, 모델의 적운 모수화에서 계산되는 깊은 대류에 의한 대류 가열률과 대류가 유도하는 대기중력파의 운동량 속 스펙트럼을 연결하여 대류에 의한 대기중력파 모수화를 계산하는 방식이다. 파동 운동량 속의 연직 변화는 Lindzen 방식의 계산법을 그대로 이용한다. 마지막으로 전선이 유도하는 대기중력파와 관련해서는 Charron and Manzini (2002)의 방안을 사용한다. 이 방안은 전선에 의한 파동이 수평적으로 어떤 장소에서 발생하는지에 대한 정보를 전선에 의한 flow deformation 항을 통해서 계산하

고, 실제 상층으로 전파시키는 파동 운동량 속의 스펙트럼은 SWAD의 비산악 중력파 모수화에서와같이 Gaussian 형태의 파동을 고려한다.

SWAD와 WACCM6의 대기중력파 항력 모수화에서 모두 파동이 붕괴될 때 발생하는 비가역적 열 항을 고려한다. 그 비가역적 열은 Medvedev and Klaassen (2003)의 유도와 정확히 일치하며, 다음과 같이 계산된다.

$$Q = -(U-c)\frac{\partial}{\partial z}(\bar{\rho}\overline{u'w'})$$

파동 운동량 속 $\overline{u'w'}$의 연직 변화의 부호는 $U-c$의 부호와 같아 위의 항은 항상 양의 값이 된다. 즉, Q는 파동이 붕괴함에 따라 파동 에너지가 소산되면서 발생하는 열에너지를 의미한다. 다만, SWAD의 경우, Q는 2차 대기중력파에 대해서 강제로 0인 것으로 두었다. 실제로 Q의 값이 $U-c$가 큰 2차 파동에 대해서 과도하게 커져서 너무 강한 가열을 중간권과 열권에 주는 문제 때문에, 강제로 0으로 처방하였다. WACCM6의 경우 난류 혼합을 고려하면서 이러한 문제가 나타나지는 않은 것으로 보인다.

WACCM6에서는 모수화되는 개개의 대기중력파가 유도하는 난류 에디 혼합계수를 또한 계산하고, 이 계수를 이용하여 온도와 기체상 및 입자상 물질의 연직 혼합을 별도로 계산한다. SWAD에는 아직 이러한 난류 혼합을 고려하지는 못하고 있다. 특징적으로 WACCM6의 난류 혼합은 운동량에 대해서는 이뤄지지는 않고 있다. 하지만, 난류 혼합이 존재한다면, 열과 운동량을 동시에 혼합하는 것이 일반적이기 때문에, 이 부분은 향후에 개선되어야 할 점으로 판단된다. 참고로 개개의 대기중력파에 의한 난류 혼합 계수는 Holton이 (1982) 유도한 바와 같이 다음과 같이 $(U-c)^4$에 비례하도록 계산된다.

$$D = \frac{k(U-c)^4}{N^3}\left[\frac{1}{2H} - \frac{3}{2}\frac{dU/dz}{(U-c)}\right]$$

위의 식에서 알 수 있듯이, 난류 혼합 계수가 $(U-c)^4$에 비례한다는 점이 특징적인 점이다. 즉, 2차 대기중력파의 운동량 속이 다소 작아 가속도가 아주 크지 않다고 하더라도, $U-c$의 값이 크면 난류 확산 계수는 상당히 커질 수 있다는 점을 주목해야 한다. 우리의 연구에서 가정된 2차 대기중력파가 큰 값의 고유 위상 속도(즉, 큰 값의 $c-U$)를 갖는 것으로 가정하였기 때문에, WACCM6에서 2차 대기중력파가 큰 값의 난류 혼합을 만들어 낼 것을 기대할 수 있다.

제 2 절 역학 모델 SWAD

이 모델은 대기 하층(대류권)부터 고층(열권 하부)까지의 역학적 연결을 연구하기 위해 제작된 물리적으로 단순화된 역학적 대기 대순환 모델로서, SWAD는 System for Whole Atmosphere Dynamics researches의 줄임말이다 (Song, 2023).

SWAD 모델의 주요 내용은 핵심 항목별로 다음과 같이 정리할 수 있다. 모델의 기본 구조 및 유체역학 코어는 NCAR CAM3를 기반으로 하며, 원시 방정식이라고 불리는 정역학 및 얕은 대기 근사 방정식을 사용한다. 수평적으로는 구면 조화 함수(Spherical Harmonics; SPH) 변환을 사용하며, 주로 T42 해상도(64×128 격자)에서 구동된다 (T85로도 구동할 수 있음). 남북 격자는 가우스-르장드르(Gauss-Legendre) 격자 및 구적법 방식을 이용한다. 연직 방향으로는 지면 근처에서는 지형을 따르고 80 hPa 위에서는 등압면을 따르는 하이브리드 좌표계를 이용한다. 연직 방향으로 대기는 지면부터 약 130km 고도까지 총 66개 층으로 구분된다. 시간 적분으로는 2-step 준-암시적(semi-implicit) 방안을 사용하고, 물질 수송에는 준-라그랑지안(semi-Lagrangian) 방안을 적용하여 효율성과 정확성을 제고하고 있다. 물리 과정으로는 복잡한 실제 현상을 계산하는 대신, 핵심적인 역학 연구를 위해 물리 과정을 이상화하여 반영했다. 복사 과정은 온도를 평형 상태로 되돌리는 뉴턴 방법(Newtonian relaxation)을 사용한다. 복사 과정과 관련해서는 뒤에 좀 더 자세히 설명할 예정이다. 대기중력파 모수화로, 산악과 관련해서는 McFarlane (1987)을 사용하고, 비산악 방안으로는 NASA GEOS-5 모델의 방식을 채택하여 강수량 분포와 유사한 중력파 발생을 모사한다 (Fig. 1 참조). 대기중력파 항력 모수화와 관련해서는 1절에서 대략적인 설명을 하였으나, SWAD 만의 특징적인 면은 뒤에서 좀더 자세히 다룬다. 비산악 대기중력파 항력 모수화에서 사용하는 남북 운동량 속 구조는 모델 내에서 QBO 현상을 재현하는 데 기여한다. 그리고 공기 밀도가 희박한 0.5 hPa 이상의 고층 대기에서 운동량과 온도를 제어하기 위해 분자 확산 과정을 사용한다.

SWAD 모델만의 주요 특징으로는 성층권 돌연승온(SSW)의 빈도를 조절할 수 있는 장치를 들 수 있다. 구체적으로 특정 매개변수(tunable parameters)를 통해 극 소용돌이의 강도를 조절함으로써, SSW 발생 빈도를 인위적으로 제어할 수 있다. 이 방법을 이용하면 로스비 파(Rossby wave)의 수직 전파를 연구하는 데 상당히 유용할 수 있다. 또한, 적도 하부 성층권에 임시 동풍 모멘텀 강제력(ad-hoc eastward momentum forcing)을 주입하는 장치를 갖고 있다. 이 장치는 모델에 복잡한 적도 대류 과정이 없더라도 대규모 적도 파동을 통한 QBO 현상을 내부적으로 생성하기 위함이다. 요약하

자면, SWAD는 대류권과 중층 대기(성층권·중간권) 사이의 역학적 상호작용을 정밀하게 분석하기 위해, 복잡한 물리 계산은 덜어내고 핵심적인 대기 운동 원리에 집중한 연구용 모델이라고 할 수 있다.

SWAD에서 사용하는 단순화된 복사 과정은 위도와 고도(압력)의 함수로 주어진 복사평형 온도에 모델의 온도가 적응하도록 하는 방식으로 작동한다. 이러한 방식은 이미 Held and Suárez (1994)와 Polvani and Kushner (2002)에서 사용하던 방식이다. 기존의 방식은 복사평형 온도를 주로 성층권계면 아래의 대기에 대해서 적용한 반면, SWAD의 경우는 열권 하부까지 수치 모의하는 관계로 복사평형 온도를 고층대기까지 임의로 확장하였다. 복사 평형 온도를 정의하기 위해서 우선 대류권에서의 복사 평형 온도는 다음과 같이 정의한다.

$$T_r^{TR}(p,\phi;\epsilon) = \max\left[\, T_{TP}\,(T_{\max} - \delta T(p,\phi;\epsilon))(p/p_0)^{\kappa}\right],$$

여기서 p는 기압 (hPa), p_0는 1000 hPa; T_{TP}는 대류권계면 온도 (200 K) $T_{\max}$는 지표 부근 최대 복사 평형 온도 (315 K); $\delta T(p,\phi;\epsilon)$은 위도($\phi$)와 계절 변수($\epsilon$)에 따른 온도 변화량; ϵ이 양수이면 지표 최대 온도 지점이 남반구로, 음수이면 북반구로 이동한다. $\epsilon = 0$은 춘추분(equinoxes)을 의미한다.

대류권 복사 평형 온도의 실질적인 구조를 결정하는 δT는 다음과 같이 주어진다:

$$\delta T(p,\phi;\epsilon) = \delta_y \sin^2\phi + \epsilon \sin\phi + \delta_z \ln(p/p_0)\cos^2\phi,$$

여기서 δ_y는 60 K, δ_z는 10 K이고, ϵ은 day of year에 따라서 -10K에서 +10 K 사이에서 선형적으로 변화한다. 양의 값의 ϵ은 T_{TR}^{r}의 지면에서의 최대값을 남반구쪽으로 이동시켜 북반구를 겨울 반구로 만들고, 음의 값의 ϵ은 T_{TR}^{r}의 지면 최대값을 북반구로 이동시켜 남반구를 겨울 반구로 만드는 역할을 한다.

중층대기 (Middle Atmosphere; MA) 복사 평형 온도는 겨울철 극 소용돌이 지역과 그 외의 지역의 가정 평균으로 다음과 같이 결정한다.

$$T_r^{MA}(p,\phi;\epsilon) = [1 - W(p,\phi;\epsilon)]\, T_{NPV}(p,\phi) + W(p,\phi;\epsilon)\, T_{PV}(p,\phi),$$

여기서 T_{PV}는 극 소용돌이 지역 온도; T_{NPV}는 그 외 지역 온도 (미국 표준 대기를 기반으로 대류권계면 온도를 216.65 K에서 200 K로, 대류권계면 고도를 11 km에서 13.5 km로, 대류권계면 압력을 223 hPa에서 100 hPa로 수정된 값으로 사용; Carmichael, 2022), 그리고 $W(p,\phi;\epsilon)$은 위도와 기압에 따른 매끄러운 가중치 함수이다. T_{PV}는 Polvani and Kushner (2002)에서와 같이 $T_{TP}(p/p_{TP})^{R_d\gamma/g}$로 주어진다. γ는 복사 평형 온도의 연직 온도 감률을 나타내고, T_{TP}는 대류권계면 온도 200 K을 나타낸다.

가중치 함수 $W(p,\phi;\epsilon)$은 위도와 압력에 대해서 부드럽게 변하는 함수로 다음과 같이 변수 분리된 형태로 정의된다.

$$W(p,\phi;\epsilon) = W_p(p)\,W_\phi(\phi)d(\epsilon),$$

여기서 $W_p(p)$는 열권까지 확장된 연직 방향 가중치 인자이고, $W_\phi(\phi)$는 남북 가중치로 Polvani and Kushner (2002)에서와 같이 $(1/2)\left[1+sgn(\epsilon)\tanh((\phi-sgn(\phi)\phi_{pv})/\delta\phi)\right]$로 주어진다. ϕ_{pv}는 극 소용돌이 위도의 절대값 (50도)을 나타내고, $\delta\phi$는 10도를 의미한다. $d(\epsilon)$는 계절 변화를 위해 정의된 함수로서 -1과 1 사이에서 계절에 따라 진동한다.

위에서 정의된 T_r^{MA}를 열권까지 확장해서 정의하기 위해서, T_{PV}는 상향으로 확장한다. 전통적으로 사용하던 T_{PV}는 100 hPa과 0.001 hPa (97 km) 사이에서 정의되는 함수로 가정했었으나, SWAD에서는 T_{PV}를 p < 0.0001 hPa에서는 100 K으로 두고, 0.001 hPa과 0.0001 hPa 사이에서 log pressure에 대해서 선형적으로 내삽해서 변하도록 하였다. $W_p(p)$는 $0.65+0.35\times\tanh[\ln(p/0.001)]$로 주어지고, 0.01 hPa보다 위에서는 단순하게 1로 주어지고, 0.01 hPa 위에서는 서서히 감소하고, 0.0001 hPa (110 km)에서는 0.3의 값으로 수렴하는 형태가 된다. 열권에서 $W_p(p)$가 1보다 충분히 작은 0.3의 값을 갖기 때문에, 열권에서는 복사 평형 온도는 T_{NPV}쪽으로 더 많은 가중이 되고, 연직으로 빠르게 증가할 수 있다.

앞서 정의한 T_r^{TR}과 T_r^{MA}를 연직 방향으로 결합하여, 결합된 복사 평형 온도은 T_r^C를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$T_r^C(p,\phi;\epsilon) = \begin{cases} T_r^{TR}(p,\phi;\epsilon),\ p \geq 100hPa \\ T_r^{MA}(p,\phi;\epsilon),\ p < 100hPa \end{cases}$$

여기서 T_r^C는 열권까지 확장된 복사 평형 온도를 나타내며, 위도 및 압력 뿐만 아니라, ϵ의 함수로서 계절 변동을 나타낼 수 있다.

성층권 돌연 승온의 빈도를 조절하기 위한 장치로서, Martineu et al. (2018)에서와 같이 겨울 및 여름 극 지역 하부 성층권의 복사 평형 온도를 다음과 같이 조절하는 증분 (increment) ΔT_r^P를 T_r^C에 더한다 (겨울철 극지 하부 성층권의 복사 평형 온도가 상승하면 성층권 돌연 승온이 좀 더 자주 일어나는 경향성을 보인다):

$$\Delta T_r^P = \left[-\Delta T_r^{PW} H^{PW}(\phi) + \Delta T_r^{PS} H^{PS}(\phi)\right) H^{PV}(z)$$

여기서 ΔT_r^{PW}와 ΔT_r^{PS}는 각각 겨울 및 여름 극지역 하부 성층권에서의 복사 평형 온도의 증분을 나타낸다. 이 증분은 겨울 극지역 하부 성층권의 온도를 H^{PW}를 이용해서 증가시키고, 여름 극지역 하부 성층권의 온도를 H^{PS}를 이용해서 낮게 만들기 위한 조절 장치로서, 이 증분 자체는 적도 방향으로 반대칭적인 구조를 갖게 되면, 하부 성층권에 영향이 국한되도록 하기 위해서 고도 16 km 정도에서 적용되도록 H^{PV}를 정의한다. 위의 식에서 정의도 남북 및 연직(압력) 방향의 구조 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} H^{PW}(\phi) &= 1 + sgn(\epsilon)\tanh[(\phi - sgn(\epsilon)60^\circ)/5^\circ], \\ H^{PS}(\phi) &= 1 - sgn(\epsilon)\tanh[(\phi + sgn(\epsilon)60^\circ)/5^\circ], \\ H^{PV}(z) &= \exp[-(z-16km)^2/(5km)^2] \end{aligned}$$

SWAD에서 사용하는 복사 평형 온도는 보다 이상적인 모델이지만 조금은 더 현실적인 모의를 위해서 성층권계면 부근에 튜닝을 위한 증분을 포함하고 있다. 아래의 ΔT_r^S는 최종적으로 T_r^C에 더해지게 된다:

$$\Delta T_r^S = \Delta T_r^{S0}\left[H^{SS}(\phi)d(\epsilon) + H^{SE}(\phi)(1-d(\epsilon))\right] H^{SV}(z),$$

여기서 ΔT_r^{S0}는 10 K으로 성층권계면에서의 증분이다. ΔT_r^S는 춘추분때 성층권계면 부근과 겨울 극지역 성층권계면 부근에서 0으로 접근하도록 설계되어 있다. 이를 위해서 위의 식에서 H^{SV}는 성층권계면 부근에만 작동하도록 하는 인자이며, H^{SS}는 동지/하지 때의 성층권계면에서의 증분이며, H^{SE}는 춘추분때의 성층권에서의 증분으로 각각은 다음과 같이 주어진다.

$$H^{SS}(\phi) = (1/2)\left[1 - sgn(\epsilon)\tanh((\phi - sgn(\epsilon))40^\circ/5^\circ\right],$$
$$H^{SE}(\phi) = (1/4)\left[2 - \tanh((\phi - 70^\circ)/5^\circ + \tanh((\phi + 70^\circ/5^\circ)\right],$$
$$H^{SV}(\phi) = (1/2)\left[\tanh((z - 30km)/(5km) - \tanh((z - 65km)/(5km)\right]$$

최종적인 복사 평형 온도 (혹은 복사 이완 온도)는 다음과 같이 결정된다:

$$T_r = T_r^C + \Delta T_r^P + \Delta T_r^S.$$

이렇게 정의된 복사 평형 (이완) 온도에 모델의 온도가 적응하도록 다음과 같이 넛징 형태의 강제력을 주는 것이 이상화된 복사 과정이며, 넛징은 다음과 같이 계산된다:

$$\partial_t T = -k_T(\sigma, \phi)(T - T_r),$$

여기서 $\sigma = p/p_s$로 정의되고, p_s는 지면 기압이다; k_T는 열적 이완 계수로서 다음과 같이 σ의 함수로 주어진다 (이 공식은 Held and Suarez (1994)가 제안한 것과 유사하다):

$$k_T(\sigma, \phi) = \begin{cases} k_a + (k_s - k_a)\max[0, (\sigma - \sigma_b)/(1 - \sigma_b)]\cos^4\phi & \sigma > 10^{-7} \\ k_a + (k_t - k_a)\max[0, (\sigma_t - \sigma)/\sigma_t], & \sigma \le 10^{-7}, \end{cases}$$

여기서 σ_b = 0.7이고 σ_t = 10^{-7}; k_a = 1/40 day^{-1}, k_s = 1/4 day^{-1}, k_t = 1/0.4 day^{-1}. k_T는 경계층 위 ($\sigma < \sigma_b$)에서는 k_a가 되고, 계속 연직으로 증가하여 $\sigma < 10^{-7}$에서는 k_t가 된다.

SWAD 모델에서의 대기중력파 항력 모수화는 대기 모델의 컬럼에 대한 에너지 보존과 운동량 보존을 위한 특별한 계산을 수행한다. 다만, WACCM6에서와 같이 난류 혼합에 의한 에너지 변화를 계산하지는 않는다.

SWAD의 대기중력파 모수화에서는 파동의 플럭스는 다음과 같이 정체 상태의 파동 액션 밀도 보존 방정식을 만족하는 것으로 가정한다. 이 가정은 대부분의 컬럼 대기중력파 모수화에서 전제하고 있는 가정이다:

$$\partial_z(c_{gz}A) = D_A,$$

여기서 A는 대기중력파 액션 밀도로서 $E/\hat{\omega}$로 주어진다 (E는 대기중력파의 총 에너지

이고 $\hat{\omega}$는 대기중력파의 고유 진동수 ($\omega - kU$)를 의미). c_{gz}는 파동의 군속도의 연직 성분이고, D_A는 $D/\hat{\omega}$로 정의되는 액션 소산 항이고, D는 대기중력파 에너지 소산 항이다. k는 파동의 수평 파수, ω는 지상에서 관측된 파동의 진동수, U는 파동의 수평 전파 방향으로 투영된 수평 바람, 그리고 c는 지상에서 관측된 파동의 수평 위상 속도 ($c = \omega/k$).

위의 식에서 $A = E/\hat{\omega}$와 $D_A = D/\hat{\omega}$임을 이용하면, 위의 파동 액션 밀도 보존 방정식은 다음과 같이 엘리아센-팜 방정식으로 변형된다:

$$\partial_z\left(\overline{p'w'} + U\bar{\rho}\overline{u'w'}\right) = U\partial_z\left(\bar{\rho}\overline{u'w'}\right) + D,$$

여기서 $c_{gz}E = \overline{p'w'}$이고 $kc_{gz}A = kc_{gz}(E/\hat{\omega}) = \bar{\rho}\overline{u'w'}$인 관계식 (Fritts & Alexnader, 2003)을 이용하였다. 또한, u', w', 그리고 p'은 각각 대기중력파가 유도하는 대기 중 수평 바람, 연직 바람, 그리고 압력의 섭동이다. $\bar{\rho}$는 격자 규모의 밀도이다.

붕괴하는 대기중력파에 의한 격자 규모 바람에 변화율 (즉, 가속도)는 다음과 같이 계산된다:

$$\partial_t U = -(1/\bar{\rho})\partial_z(kc_{gz}A) = -(1/\bar{\rho})\partial_z\left(\bar{\rho}\overline{u'w'}\right),$$

위의 방정식에 $\bar{\rho}U$를 곱하면, 대기중력파 붕괴에 의한 운동에너지 (K_m) 변화를 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$\partial_t K_m = -\partial_t\left[(1/2)\bar{\rho}U^2\right] = -U\partial_Z\left(\bar{\rho}\overline{u'w'}\right).$$

이 결과를 앞의 엘리아센-팜 방정식에 대입해 보면, 위의 식에 존재하는 $U\partial_z\left(\bar{\rho}\overline{u'w'}\right)$라는 항이 격자 규모 흐름과 대기중력파와의 운동에너지 교환 항이 됨을 알 수 있다.

대기중력파의 붕괴는 파동의 운동량 속의 고도에 따른 감쇠를 일으킨다. 이 감쇠를 파동의 운동량 속이 포화 운동량 속을 넘을 수 없다는 Lindzen (1981)의 선형 이론에 근거한다. 현재 모수화에서 포화 운동량 속은 다음과 같이 계산된다.

KOPRI 극지연구소

$$F_{ms} = \varepsilon F_c(\bar{\rho}/2)(k/N)|U-c|^3,$$

여기서 ε은 Holton (1982)에서 처음 도입된 간헐성 인자로서, 대기중력파가 붕괴하는 시공간적 규모가 모델의 격자 및 시간 적분 간격보다 작다는 점에 착안해 도입된 파라미터이다. F_c는 McFarlane (1987)에서 도입된 임계 프루드 수를 의미한다. 실제에서 ε (< 1)과 F_c는 튜닝 파라미터의 역할을 한다. F_c는 모두 파동에 대해 0.5로 가정하였다.

SWAD에서 간헐성 인자는 1차 산악 대기중력파에 대해서는 0.0625, 1차 비산악 대기중력파에 대해서는 0.125, 그리고 2차 대기중력파에 대해서는 1.0으로 두었다. 현재 모수화에서 2차 파동의 수평 파장은 1500 km 정도로 상당히 대규모 파동으로 두었다. 이 가정은 몇 가지 관측과 모델링 결과에 근거하여 결정하였다 (Liu et al., 2019; Vadas & Becker, 2018; Vadas et al., 2018). 1차 산악 대기중력파에 대해서, 수평 파장은 100 km로 두었고, 1차 비산악 대기중력파에 대해서는 수평 파장은 중고위도 ($|\phi| > 40^\circ$)에서는 100 km로 두나, 열대지역으로 갈수록 700 km로 증가하도록 하였다. 열대지역에서 큰 수평 파장의 비산악 대기중력파를 가정하는 것은 대기중력파가 임계 고도를 만나기 전에 붕괴할 수 있도록 하기 때문에 준2년 주기 진동을 모델 내부에서 자발적으로 생성하는데 있어서 상당히 중요한 역할을 할 수 있다. (Campbell & Shepherd, 2005).

KOPRI 극지연구소

대기중력파의 붕괴에 의한 운동량 속의 수송은 비가역적 열을 발생시킨다. 소위 정상 상태의 파동에 대한 엘리아센-팜 관계식으로 불리는 $\overline{p'w'} = -(U-c)\bar{\rho}\overline{u'w'}$를 앞서 언급한 엘리아센-팜 방정식에 대입하면, 다음과 같은 결과를 얻게 된다:

$$D = -(U-c)\partial_z(\bar{\rho}\overline{u'w'}).$$

대기중력파 붕괴에 의한 가속도[$-\partial_z(\bar{\rho}\overline{u'w'})$]의 부호는 $c-U$의 부호와 같기 때문에, 위의 식에서 D는 항상 음수가 된다. 이는 D라는 항이 대기중력파의 에너지가 파동의 붕괴로 인해 격자 규모 흐름으로 전환되는 손실 항 임을 의미한다. 따라서, Medvedev & Klaassen (2003)에서 논의되었듯이, 대기중력파 붕괴로 인한 격자 규모 흐름의 잠재에너지의 변화는 다음과 같이 적을 수 있다:

$$\partial_t P_m = \bar{\rho} c_p \partial_t \overline{T} = -D.$$

대기중력파가 정상 상태라고 가정하는 상황에서 ($\partial_t E = 0$), 파동의 붕괴와 연관된 격자 규모 흐름의 운동에너지와 잠재에너지의 합을 구하면, 다음과 같은 대기중력파의 에너지 속과 연관된 방정식이 유도됨을 알 수 있다.

$$\partial_t(K_m + P_m) = \partial_t E_m = -U\partial_z F_m - D = -\partial_z F_e,$$

여기서 E_m은 격자 규모 흐름 총 에너지, F_e는 대기중력파 위에너지 (pseudoenergy) 속으로 $F_e = c\bar{\rho}\overline{u'w'} = \overline{p'w'} + U\bar{\rho}\overline{u'w'}$와 같이 정의된다. 대기중력파 위에너지와 위운동량 속은 각각 ωA와 kA와 같이 정의되며 (Bühler, 2014), 이것의 연직 플럭스는 각각 다음과 같이 정의된다:

$$F_e = c_{gz}\omega A = c\bar{\rho}\overline{u'w'}.$$
$$F_m = c_{gz}kA = \bar{\rho}\overline{u'w'}$$

대기중력파의 플럭스 (위운동량, 위에너지 플럭스)는 모델의 최상단 부근에서 서서히 고도에 따라 감소하도록 하고 모델의 최상단(z_T)에서 각각 0이 되도록 설정되어 있다 [$F_e(z_T) = 0$, $F_m(z_T) = 0$]. 이러한 구속조건은 Shepherd & Shaw (2004)가 논의한 바와 같이 파동-평균류 상호작용에 있어서 평균류의 각운동량 보존을 위함이다. 대기 중력파에 의한 격자 규모 흐름 에너지 보존 방정식을 연직으로 적분하는 경우, 이 적분식에서 격자 규모 흐름의 에너지 보존을 고려하기 위해서는 모수화되는 파동이 생성되는 고로 아래 (즉 source level의 아래)에서 격자 규모 흐름에서 에너지가 추출되어 나왔다고 가정해야 한다. 따라서, 격자 규모 흐름의 총 에너지의 보존이 대기중력파 모수화에 의해서 어긋나지 않기 위해서는 다음과 같은 계산이 이뤄져야 한다.

$$\int_{z_L}^{z_T} \partial_t E_m dz = F_e(z_L).$$

즉, z_L로 표시된 대기중력파의 생성 고도 (혹은 launch level)아래에서 평균류로부터 에너지를 뽑아와야 한다. 유사한 방식으로 대기 컬럼에 대해서 적분된 격자 규모 총 운동량이 보존되기 위해서는 다음의 관계가 만족되어야 한다:

$$\int_{z_L}^{z_T} \bar{\rho} \partial_t U dz = F_m(z_L).$$

격자 규모 흐름의 에너지 보존과 운동량 보존을 위한 위의 두 관계식은 대기중력파가 생성되는 고도 아래의 source layer (두께는 Δz_s)에서 격자 규모 흐름은 다음과 같이 대기중력파에 위에너지와 위운동량 속을 제공해야 한다.

$$\partial_t E_m = -F_e(z_L)/\Delta z_s$$
$$\bar{\rho} \partial_t U = -F_m(z_L)/\Delta z_s$$

위의 두 관계식 중, 격자 규모 운동량 방정식의 양변에 U를 곱하면, 대기중력파 source layer에서 격자 흐름 운동에너지 방정식을 얻을 수 있고, 이 운동에너지 방정식을 격자 흐름 총에너지 방정식에서 빼면, 다음과 같이 총에너지와 운동량 보존을 위한 source layer에서의 바람과 온도의 변화량을 계산할 수 있다.

$$\partial_t U = -(1/\bar{\rho}) F_m(z_L)/\Delta z_s \quad ,$$
$$\partial_t T = -1/(\bar{\rho} c_p)[F_e(z_{L)} - U F_m(z_L)]/\Delta z_s$$

KOPRI 극지연구소

여기서 c_p는 정압 비열이다. Source layer의 두께 Δz_s는 대기중력파가 상층으로 발사되는 바로 아래의 1개의 층으로 가정하였다.

산악에 의한 1차 대기중력파의 경우, source layer는 지면 아래에 위치하게 된다. 따라서, source layer에서의 바람과 온도의 변화는 계산되지 않는다. 실제로 지면에서 관찰하는 위상 속도가 0인 산악파의 경우, 위에너지 속은 0이기 때문에 source layer에서의 에너지 보상은 고려할 필요가 없다. 반면, 비산악에 의한 1차 중력파의 경우에는 source layer에서의 바람과 온도 변화를 위의 식으로 계산할 필요가 있다. 2차 대기중력파의 경우에는 7개 층에서 방출되는 각 파동에 대한 source layer는 각기 다른 위치에 놓이게 되며, 1차 파동과 마찬가지로 1개의 모델 층을 source layer로 가정한다.

마지막으로, SWAD 모델은 내부적으로 성층권 준2년 주기 진동을 생성하고 위해서 열대지역 상부 대류권 및 하부 성층권에 다음과 같은 강제력을 추가하였다.

$$\partial_t U = F_{QBO} \exp[-(\phi/15)^2] \exp[-(z-20)^2/12^2],$$

여기서 F_{QBO}는 QBO 강제력의 최대 크기로서 T42 해상도에서 0.17 m/s/day의 값으로 가정하였다. 이 QBO 강제력은 적도와 고도 20 km에 중심을 두고 있으며, 위도 및 고도 방향으로의 e-folding 두께는 각각 15도와 12 km로 두었다.

본 연구에서는 위에서 기술한 단순화된 역학 전지구 대기 대순환 모델을 이용하여, 2차 중력파의 효과를 파악하였다. 이를 위해 기본적으로 총 5개의 perpetual January와 July 실험을 수행하였다. 총 5개의 실험은 아래의 표로 정리하였다. 모든 실험에서 겨울 극 소용돌이의 세기를 결정하는 성층권 기온 감률을 3 K/km으로 두었고, 겨울 극지역 하부 성층권에서의 복사 평형 온도 증분 (ΔT_r^{PW})은 -20 K으로 하였고, 여름 극지역에서 ΔT_r^{PS}는 +10 K으로 두었다.

구분	설명	1차 대기파동 간헐성인자 ε at 100 km
CTRL	1차 대기중력파 모수화만으로 실행된 30년 perpetual January와 July 실험	0,0625 (산악) 0.125 (비산악)
SGW	1차 대기중력파와 2차 중력파 모수화를 모두 사용한 30년 perpetual January와 July 실험	0,0625 (산악) 0.125 (비산악)
SGW0.5	SGW와 동일하나, 1차 대기중력파 간헐성 인자를 100 km에서 50%로 감소시킨 실험	0,0625 (산악) 0.125 (비산악)
SGW0.1	SGW와 동일하나, 1차 대기중력파 간헐성 인자를 100 km에서 10%로 감소시킨 실험	0,00625 (산악) 0.0125 (비산악)
NoSGW0.1	2차 대기중력파 모수화를 사용하지 않고, 1차 대기중력파 간헐성 인자를 100 km에서 10%로 감소시킨 실험	0,00625 (산악) 0.0125 (비산악)

위의 실험에서 NoSGW0.1 실험은 2차 대기중력파의 효과가 없이 1차 파동의 효과가 미약해질 경우 벌어질 일을 파악하기 위한 민감도 실험이다. 앞서 설명했던 것과는 상이하게 SWAD의 2차 대기중력파에 관한 실험에서 고유 위상 속도가 너무 큰 파동에 의한 비가역적 가열이 과도하게 강해지는 문제가 발견되어, SWAD의 2차 대기중력파 실험인 SGW, SGW0.5, SGW0.1 모두에서 열적인 강제력은 모두 0으로 두었다. 즉 컬럼의 운동량 보존만 일어나도록 하였다. SWAD의 결과의 검증을 위해서 일본 동경대학교와 일본 극지연구소가 공동으로 개발하는 전층대기 자료동화 자료인 JAWARA (Koshin et al., 2020)와 미국 NASA GSFC에서 배포하는 전지구 자료 동화 분석장은

MERRA2 (Gelaro et al., 2017)을 활용하였다. JAWARA 자료는 2005년부터 2024년까지의 20년 자료를 활용하였고, MERRA2의 경우 1980년부터 2024년까지 45년 자료를 사용하여 기후적인 페턴을 비교 검증하였다.

Figure 5는 JAWARA, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual January에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. SWAD CTRL 실험은 대류권과 성층권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 구조와 바람 방향을 보여주는 것으로 보이나, 겨울 반구 중간권계면 부근 (고도 80-100 km)에서 이미 동풍 (westward wind)으로 바람이 역전되어 있는 모습이 보인다. 또한, 여름 반구 극지 성층권 및 중간권에서 동풍 (westward wind)가 JAWARA에 비해 너무 약한 모습이 보인다. 반면, 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW, SGW0.5, SGW0.1 실험 모두에서는 겨울철 극 소용돌이 위에서 동풍으로 역전되는 계통적 오차는 모두 사라졌고, 서풍 (eastward wind)이 모두 열권까지 확장된 것으로 확인되었다. 또한, 여름 반구 성층권-중간권의 동풍이 CTRL에 비해서 2차 중력파를 고려한 경우 훨씬 강해졌다. 하부 열권의 경우 SWAD가 열권에 필요한 물리 과정이 아직은 미흡하고, SWAD에서 열적 조석파가 발생하지 않기 때문에 JAWARA와의 결과와 비교하는 것은 무리가 있다.

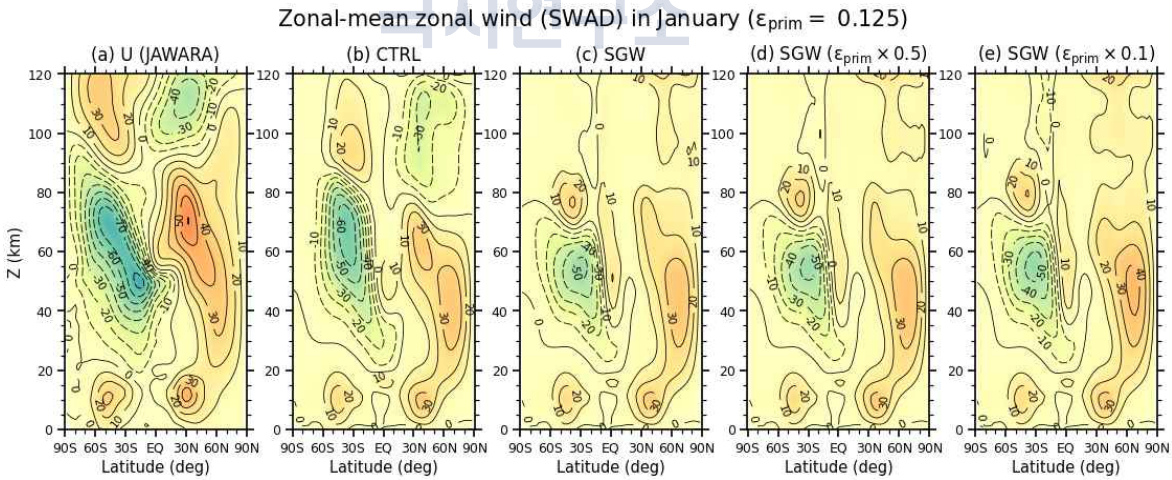

Figure 5: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for January in (a) JAWARA, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

Figure 6은 Fig. 5와 동일하나, 마지막 패널만 NoSGW0.1로 바꾼 그림이다. 1차 모수화만 사용하되 해당 간헐성 인자를 고도 100 km에서 10%로 줄이고 2차 대기중력파를 고려하지 않은 NoSGW0.1의 경우에는 여름 반구 동풍 제트가 과도하거나 겨울 반구 극 소용돌이가 강해지는 문제가 있었다. 겨울 반구의 경우 JAWARA와 비슷하다고 보이는 점도 있으나, 중간권계면 위의 서풍이 여전히 사라지는 문제가 발생하는 등 2차

대기중력파를 고려함으로써 얻을 수 있는 이점이 나타나지는 않았다.

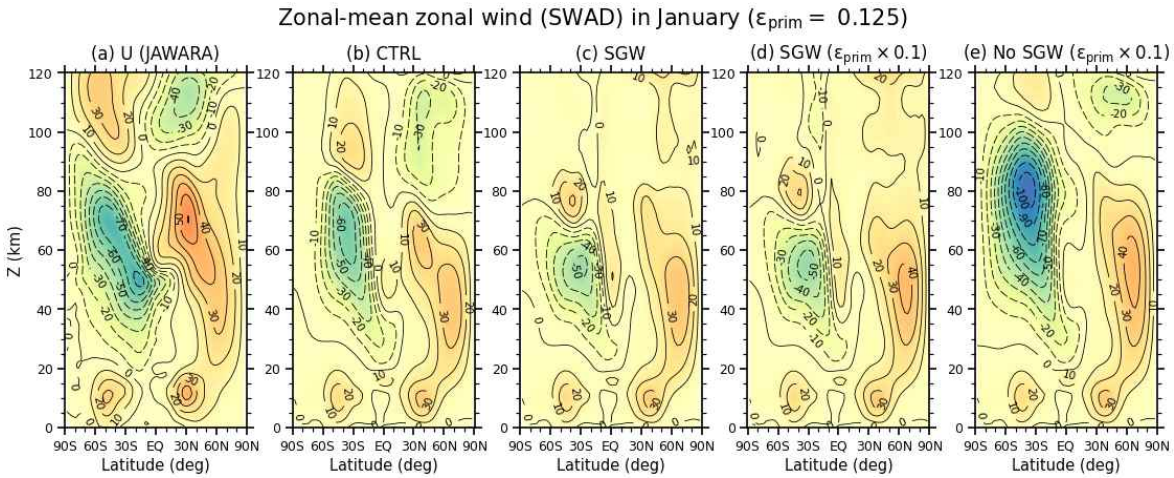

Figure 6: The same as Fig. 5 except for NoSGW0.1 in panel (e)

Figure 7은 JAWARA, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual January에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. CTRL 실험은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 온도 구조를 보여주고 있다. 다만, 중간권계면이나 열권 하부에서는 여름 반구 온도가 고도 80 km 근처에서 너무 낮고, 겨울 반구 극지역의 같은 고도에서 온도가 너무 높은 CTRL의 결과를 확인할 수 있었다. 특히 고도 80 km 부근 겨울 반구 고위도에서는 CTRL이 JAWARA와 비교해서 30 K 가량 더 높게 나타나고 있다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권의 온도는 CTRL이나 JAWARA와 모두 유사하였다. 2차 대기중력파를 고려하는 실험에서 온도의 전반적인 구조는 모두 유사하게 나타났으며, 특히 1차 대기중력파의 간헐성 인자가 100 km에서 10%로 줄어든 경우에는 중간권 상부나 중간권계면 부근에서 온도가 전 위도에 걸쳐 매우 낮게 나타나는 모습을 보여주었다. SGW0.1의 경우, 여름 반구 중간권계면 부근에서 낮은 온도를 보인 JAWARA와 유사한 결과를 보여주기도 한 점은 특이한 점이다.

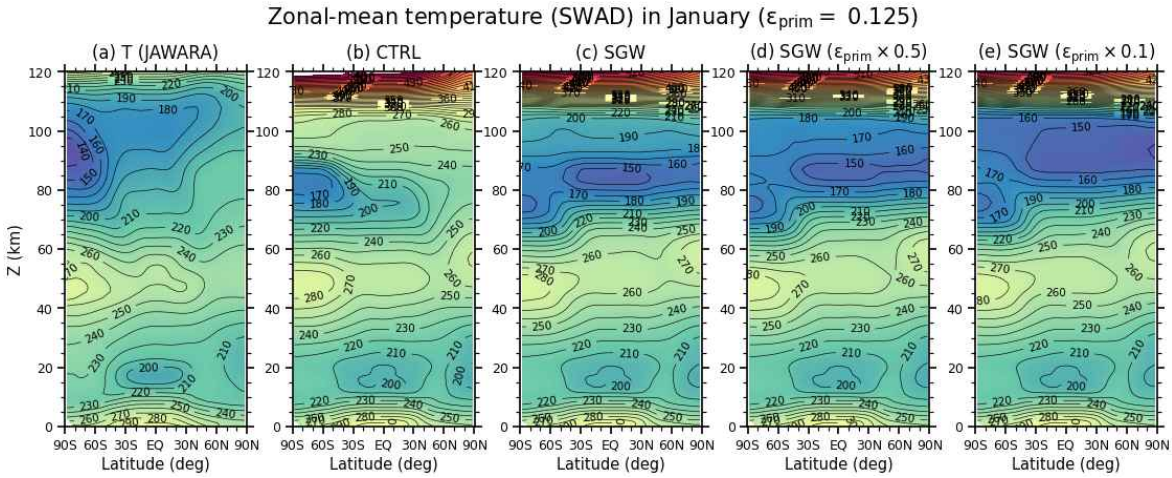

Figure 7: Latitude-height distributions of zonal-mean temperature for January in (a) JAWARA, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 8은 Fig. 7과 동일하나, 마지막 패널만 NoSGW0.1로 바꾼 그림이다. 1차 대기중력파 모수화만 사용하되, 해당 간헐성 인자를 고도 100 km에서 10%로 줄이고 2차 대기중력파를 고려하지 않은 NoSGW0.1의 경우에는 중간권계면 온도 구조가 여름 반구의 경우 JAWARA와 전반적으로 더 비슷해지는 모습을 볼 수 있다. 다만, 겨울 반구 중간권계면 부근 100 km 고도에서 NoSGW0.1은 10-20 K 정도 더 따뜻하게 모의한 것으로 보인다. 다만, JAWARA의 모델에서 고도 100 km 근처의 열적 조석파나 관련 물리 과정이 충분히 현실적인지 의문이 들어, 일단 2차 대기중력파의 효과가 없는 경우가 더 현실적으로 모의할 수 있다고 판단하기는 어려울 것으로 보인다. 중간권계면이나 하부 열권의 모델 결과에 관해서는 WACCM6 경우에 관해 더 상세히 알아볼 예정이다.

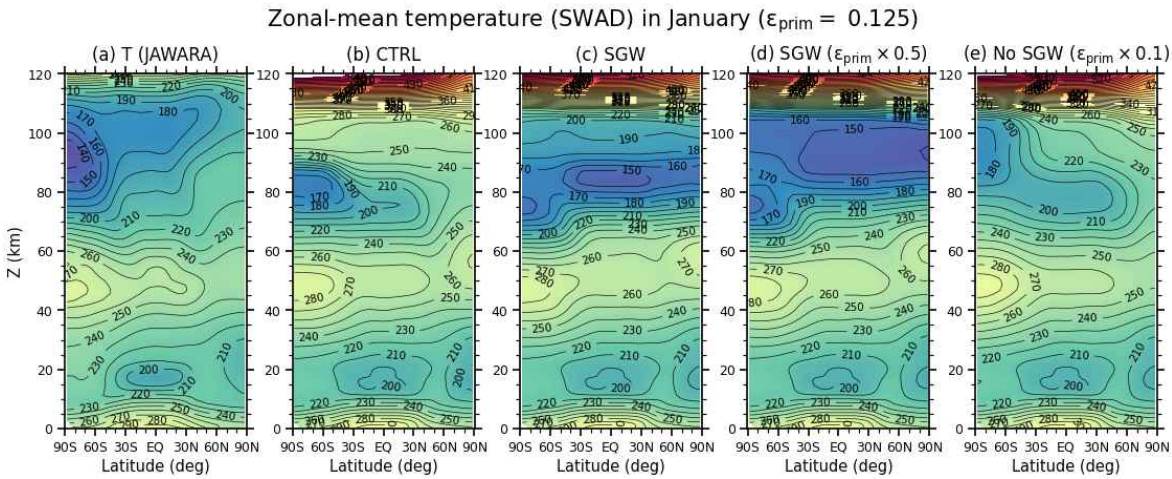

Figure 8: The same as Fig. 7 except for NoSGW0.1 in panel (e)

Figure 9는 MERRA2, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual January에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 보이고 MERRA2와 비교한 그림이다. SWAD CTRL 실험은 겨울 반구 중간권계면 부근 (고도 70-80 km)에서 이미 동풍 (westward wind)으로 바람이 역전되어 있는 모습이 보인다. 또한, 여름 반구 극지 성층권 및 중간권에서 동풍 (westward wind)가 MERRA2에 비해 너무 약한 모습이 보인다. 반면, 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW, SGW0.5, SGW0.1 실험 모두에서는 겨울철 극 소용돌이 위에서 동풍으로 역전되는 계통적 오차는 모두 사라졌고, 서풍 (eastward wind)이 모두 열권까지 확장되어 있는 것으로 확인되었다. 겨울 반구에서 중간권 아열대 서풍 제트가 SGW 실험에서 나타나지 않는 점은 약간 아쉬운 점이다. 또한, 여름 반구 성층권-중간권의 동풍이 CTRL에 비해서 2차 중력파를 고려하였을 때 훨씬 강해졌다.

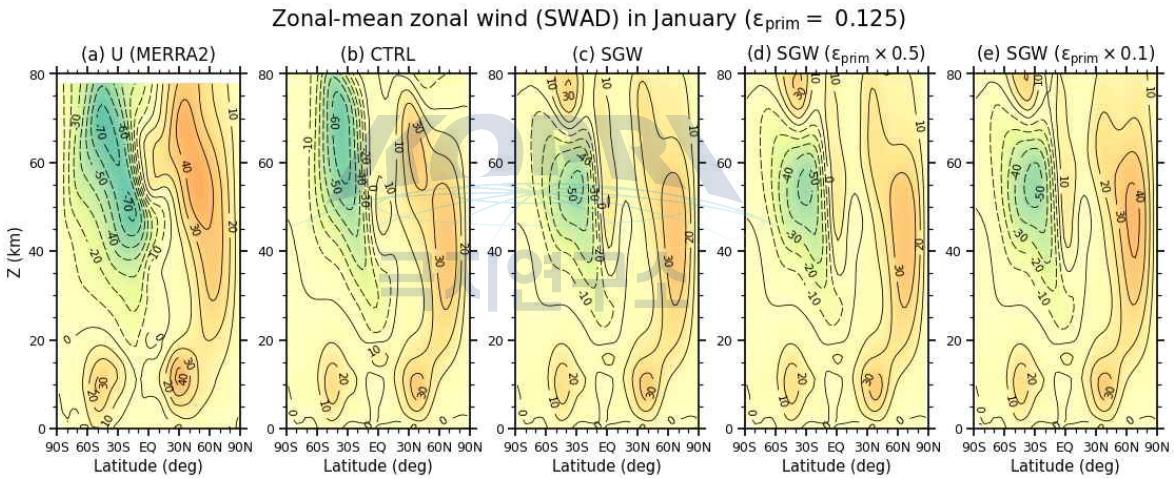

Figure 9: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for January in (a) MERRA2, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

Figure 10은 MERRA2, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual January에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 나타내고 MERRA2와 비교한 그림이다. CTRL 실험은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 MERRA2와 유사한 온도 구조를 보여주고 있다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권 온도는 CTRL이나 MERRA2와 모두 유사하였으나, 중간권 상부에서 온도가 전 위도에 걸쳐 대체로 낮게 나타나는 모습을 보여주었다. SGW0.1의 경우, 겨울 반구 극지역 중간권 상부의 온도가 MERRA2와 유사한 결과를 보여주는 것은 특이한 점으로 보인다.

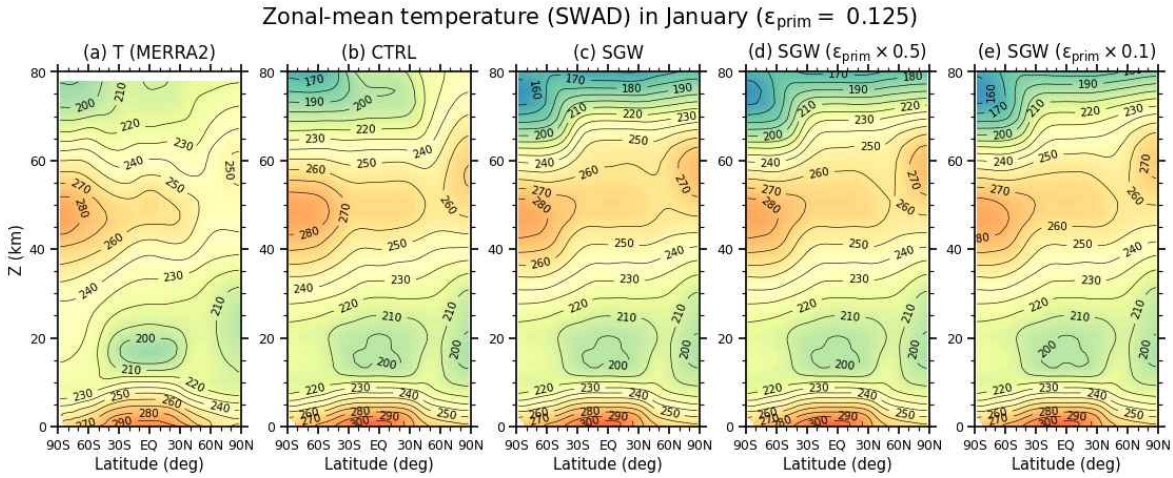

Figure 10: Latitude-height distributions of zonal-mean temperature for January in (a) MERRA2, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 11은 JAWARA, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual July에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 고도 120 km까지 나타낸 그림이다. CTRL 실험은 대류권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 구조와 바람 방향을 보여주는 것으로 보이나, 성층권에서는 남반구 (겨울 반구)에서 제트가 다소 강하거나, 소용돌이의 축이 극쪽으로 치우쳐져 있는 모습을 보였다. January와 유사하게, 여름 반구 극지 성층권 및 중간권에서 동풍 (westward wind)가 JAWARA에 비해 너무 약한 모습이 보였다. 반면, 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW, SGW0.5, SGW0.1 실험 모두에서는 겨울철 극 소용돌이 위에서 동풍으로 역전되는 계통적 오차는 상당히 완화되었고, 여름 반구 성층권-중간권의 동풍이 2차 중력파를 고려할 때 훨씬 강해졌다.

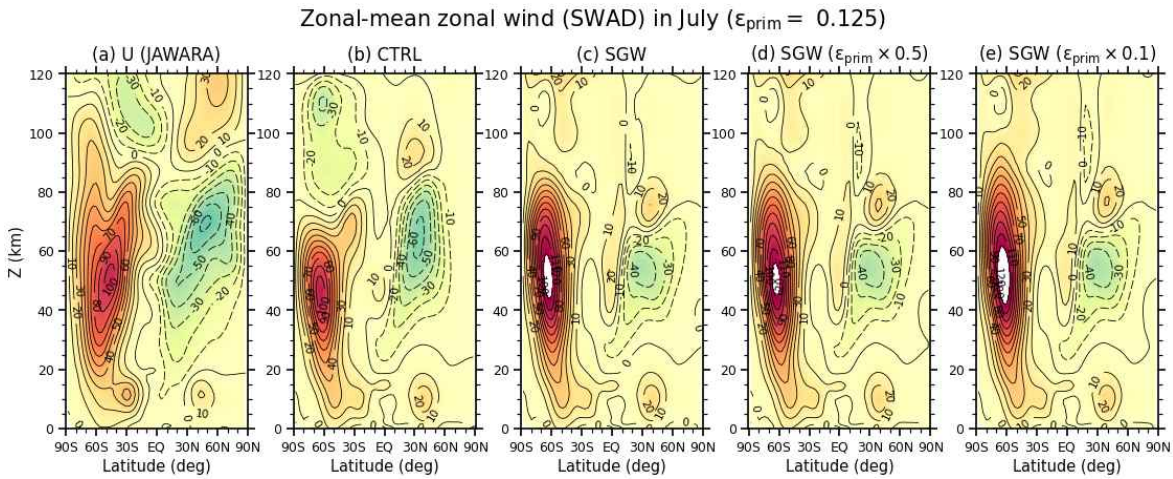

Figure 11: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for July in (a) JAWARA, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

Figure 12는 Fig. 11와 동일하나, 마지막 패널만 NoSGW0.1로 바꾼 그림이다. 1차 모수화만 사용하되 해당 간헐성 인자를 고도 100 km에서 10%로 줄이고 2차 대기중력파를 고려하지 않은 NoSGW0.1의 경우에는 여름 반구 동풍 제트가 과도하고, 여름 반구 중간권계면의 고도고 너무 높고, 겨울 반구 극 소용돌이가 강해지는 문제가 있었다. 겨울 반구(남반구)의 경우 JAWARA와 비슷하다고 보이는 점도 있으나, 중간권계면 위의 서풍이 동풍으로 역전되는 여전히 문제가 발생하는 등 2차 대기중력파를 고려함으로써 얻을 수 있는 이점이 나타나지는 않았다.

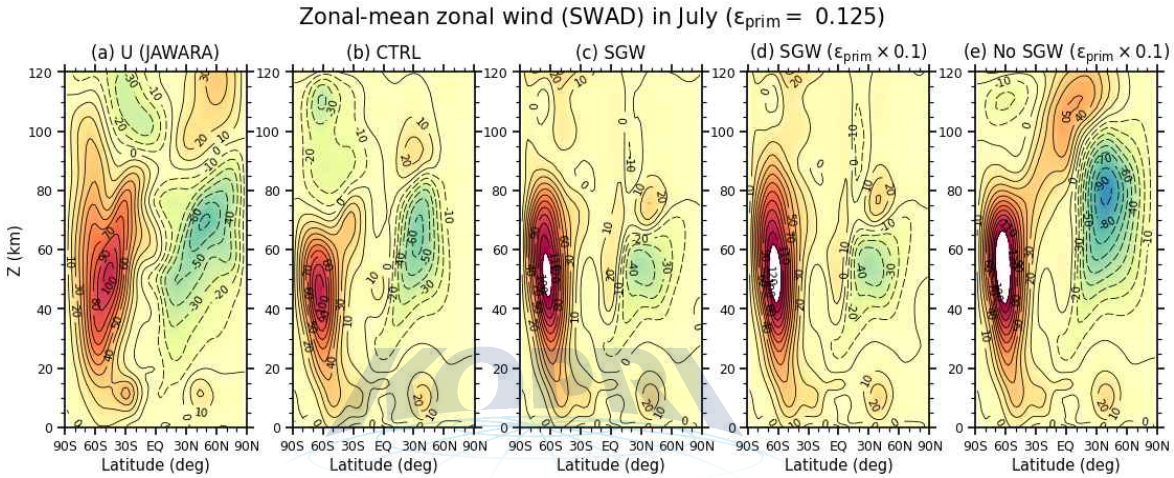

Figure 12: The same as Fig. 11 except for NoSGW0.1 in panel (e)

Figure 13은 JAWARA, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual July에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. CTRL 실험은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 온도 구조를 보여주고 있다. 다만, 중간권계면이나 열권 하부에서는 여름 반구 (북반구) 온도가 고도 80 km 근처에서 다소 낮고, 겨울 반구 (남반구) 극지역의 같은 고도에서 온도가 높은 CTRL의 결과를 확인할 수 있었다. 특히 고도 80 km 부근 겨울 반구 고위도에서는 CTRL이 JAWARA와 비교해서 30 K 가량 더 높게 나타나고 있다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권의 온도는 CTRL이나 JAWARA와 모두 유사하였다. 2차 대기중력파를 고려하는 실험에서 온도의 전반적인 구조는 모두 유사하게 나타났으며, 특히 1차 대기중력파의 간헐성 인자가 100 km에서 10%로 줄어든 경우에는 중간권 상부나 중간권계면 부근에서 온도가 전 위도에 걸쳐 매우 낮게 나타나는 모습을 보여주었다.

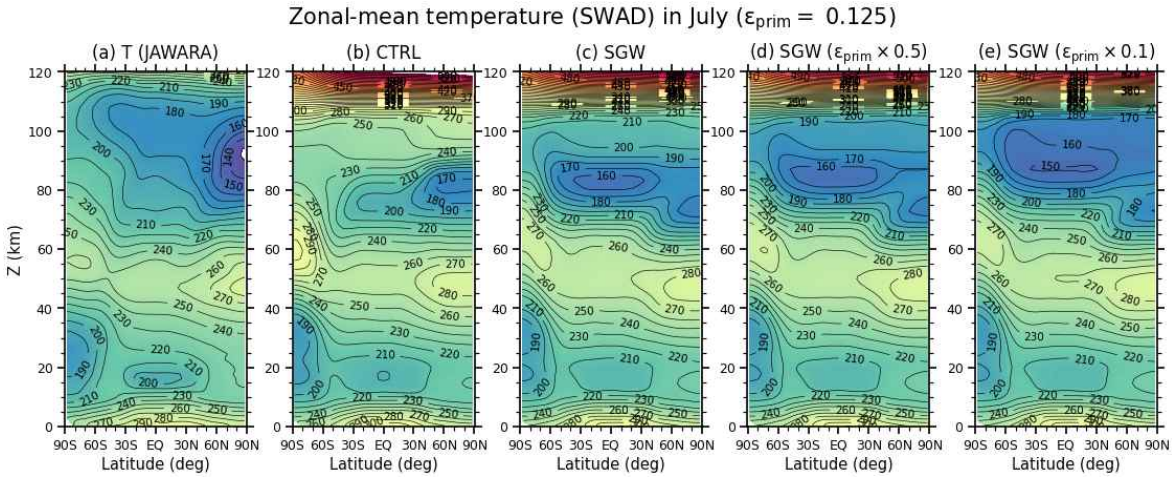

Figure 13: Latitude-height distributions of zonal-mean temperature for July in (a) JAWARA, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 14는 Fig. 13과 동일하나, 마지막 패널만 NoSGW0.1로 바꾼 그림이다. 1차 대기중력파 모수화만 사용하되, 해당 간헐성 인자를 고도 100 km에서 10%로 줄이고 2차 대기중력파를 고려하지 않은 NoSGW0.1의 경우에는 중간권계면 온도 구조가 여름 반구 (북반구)의 경우 JAWARA와 전반적으로 더 비슷해지는 모습을 볼 수 있다. 겨울 반구 (여름 반구) 중간권계면 부근 100 km 고도에서 NoSGW0.1은 10-20 K 정도 더 따뜻하게 모의한 것으로 보인다. 앞서 설명했듯이, JAWARA의 모델에서 고도 100 km 근처의 열적 조석파나 관련 물리 과정이 충분히 현실적인지 의문이 들어, 일단 2차 대기중력파의 효과가 없는 경우가 더 현실적으로 모의할 수 있다고 판단하기는 어려울 것으로 보인다.

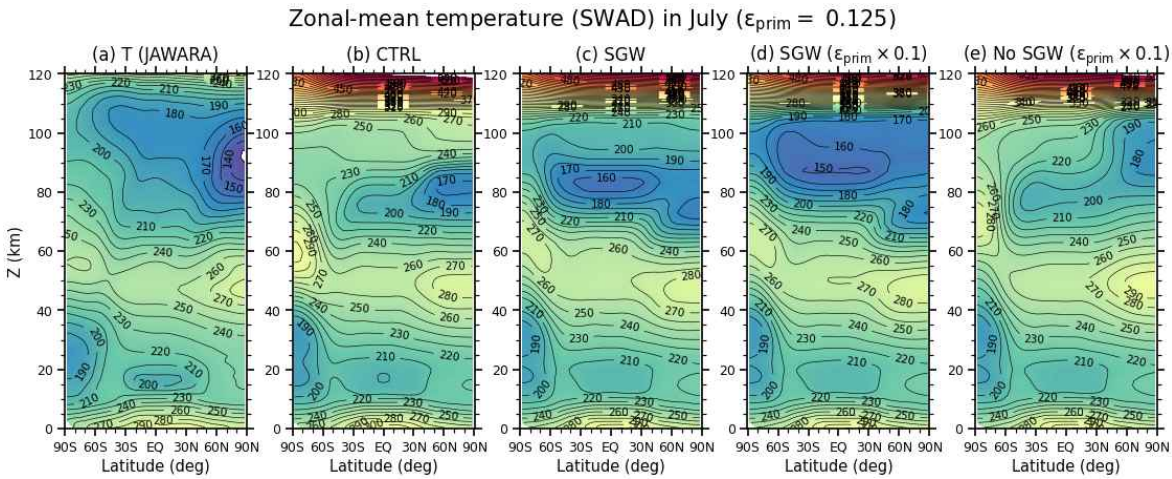

Figure 14: The same as Fig. 13 except for NoSGW0.1 in panel (e)

Figure 15는 MERRA2, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual July에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 보이고 MERRA2와 비교한 그림이다. SWAD CTRL 실험은 겨울 반구 (남반구) 중간권계면 부근 (고도 70-80 km)에서 이미 동풍 (westward wind)으로 바람이 역전되어 있는 모습이 보인다. 또한, 여름 반구 극지 (60N-90N) 성층권 및 중간권에서 동풍 (westward wind)가 MERRA2에 비해 너무 약한 모습이 보인다. 반면, 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW, SGW0.5, SGW0.1 실험 모두에서는 겨울철 극 소용돌이 위에서 동풍으로 역전되는 계통적 오차는 모두 사라졌고, 서풍 (eastward wind)이 모두 열권까지 확장되어 있는 것으로 확인되었다. 다만 극 소용돌이가 강해진 단점이 나타났고, 중간권 아열대 서풍 제트가 SGW 실험에서 나타나지 않는 점은 다소 아쉬운 점이다. 또한, 여름 반구 성층권-중간권의 동풍이 CTRL에 비해서 2차 중력파를 고려하였을 때 강해졌다.

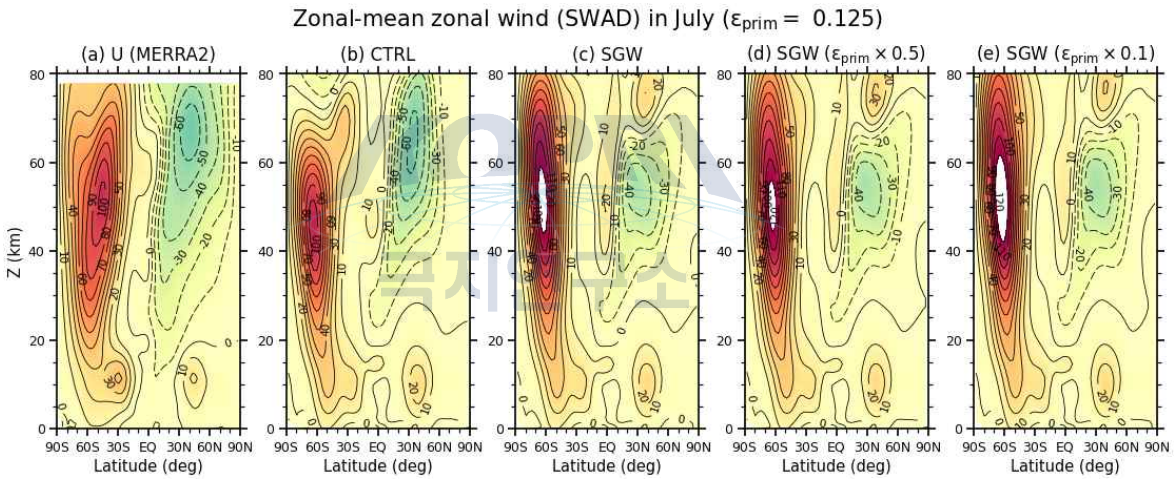

Figure 15: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for July in (a) MERRA2, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

Figure 16은 MERRA2, SWAD CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1의 perpetual July에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 나타내고 MERRA2와 비교한 그림이다. CTRL 실험은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 MERRA2와 유사한 온도 구조를 보여주고 있다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권 온도는 CTRL이나 MERRA2와 모두 유사하였으나, 중간권 상부에서 온도가 전 위도에 걸쳐 대체로 낮게 나타나는 모습을 보여주었다. January에서와 유사하게, SGW0.1의 경우 겨울 반구 극지역 중간권 상부의 온도가 MERRA2와 유사한 결과를 보여주는 것은 특이한 점으로 보인다.

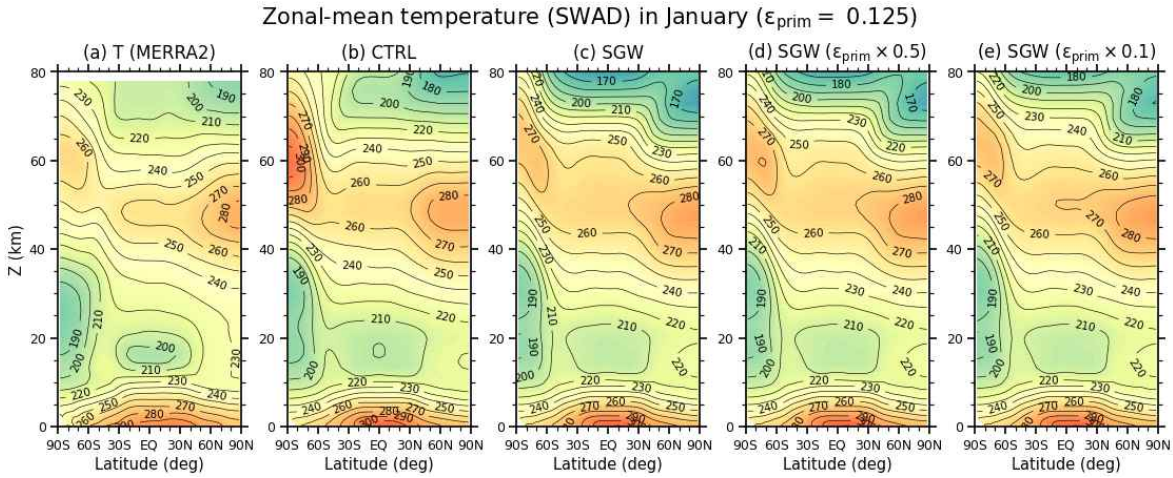

Figure 16: Latitude-height distributions of zonal-mean temperature for July in (a) MERRA2, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 17은 January에 대한 총 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 총 대기중력파 항력이라 함은 산악과 비산악에 의한 항력의 합을 의미한다. SWAD CTRL에서 총 1차 대기중력파 항력은 겨울 반구(북반구)에서 대체로 음의 값을, 여름 반구(남반구)에서는 대체로 양의 값을 보이는 전형적 구조를 보인다. 북반구에서는 1차 산악파에 의한 항력이 상부 대류권에서부터 중간권 하부까지 강하게 나타난다 (Fig. 18 참조). 2차 대기중력파가 포함된 경우, 바람의 구조가 상당히 바뀌기 때문에, 패널 (b)-(d)에서 볼 수 있듯이, 1차 대기중력파의 항력의 구조도 상당히 변화되어 있음을 확인할 수 있다.

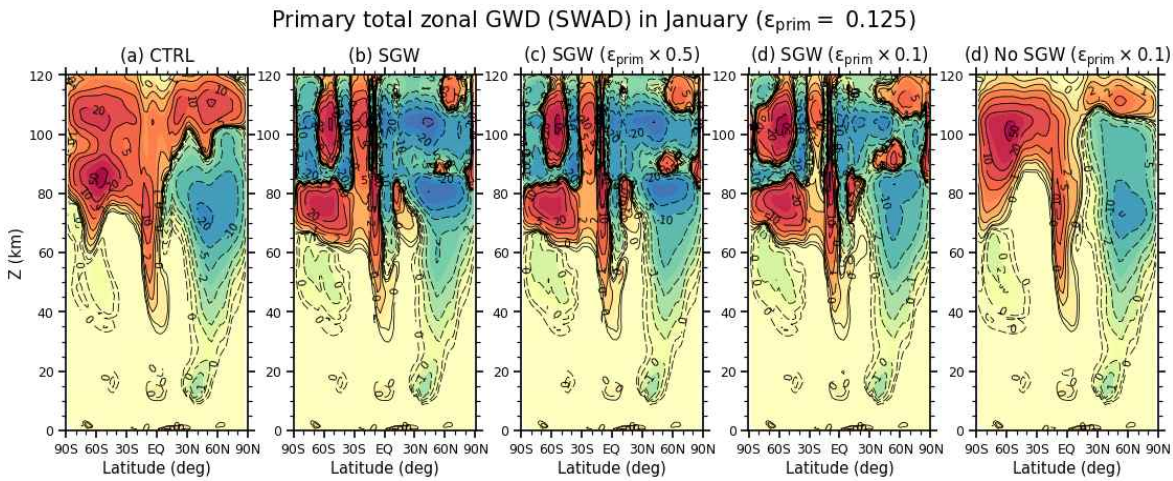

Figure 17: Latitude-height distributions of zonal-mean total (orographic plus non-orographic) zonal primary gravity wave drag for January in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

2차 대기중력파를 고려한 실험에서 1차 항력이 많이 변화된 지역은 역시 중간권 상부와 열권 하부 지역이다. 겨울 반구에서 2차 항력을 고려한 실험에서 1차 항력이 대체로 음의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 음의 항력이 주로 나타났다는 것은 2차 항력을 고려한 실험에서 바람이 대체로 양의 값을 (서풍을) 나타내는 방향으로 변화하였다는 의미로 해석될 수 있다. 2차 대기중력파에 의한 항력이 없고, 1차 간헐성 인자가 10%로 줄어들도록 한 경우 (NoSGW0.1), 1차 대기중력파 항력의 구조는 겨울 반구는 음수, 여름 반구는 양수의 단순한 구조가 더 뚜렷하게 나타났다.

Figure 18은 January에 대한 산악에 의한 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 산악이 많은 북반구에서 주로 산악파에 의한 1차 항력이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 2차 대기중력파 항력을 고려한 실험 (SGW, SGW0.5, SGW0.1)에서 1차 산악 대기중력파 항력이 열권 하부에서까지도 강하게 나타나는 모습을 볼 수 있다. 앞서 설명하였듯이 이는 겨울 반구(북반구) 중간권 상부와 열권 하부의 바람이 동풍에서 서풍(eastward wind)로 바뀌면서 1차 산악파가 전파할 수 있는 상황이 되었기 때문이다. 이 결과는 1차 대기중력파와 2차 대기중력파 항력이 상호작용하면서, 1차 산악파 항력이 더 높은 고도에까지 영향을 끼칠 수 있게 될 수 있다는 점을 시사한다.

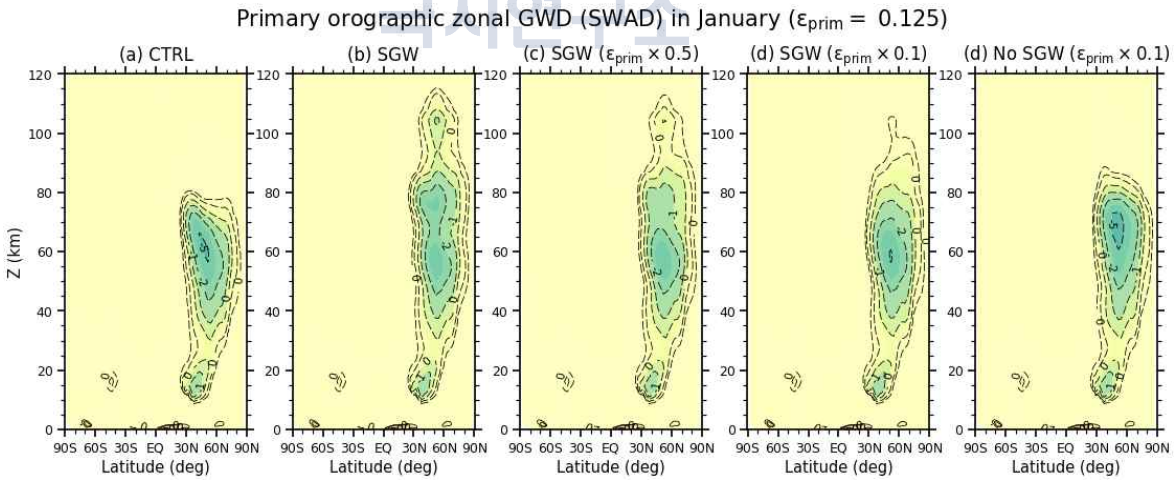

Figure 18: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal primary orographic gravity wave drag for January in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

Figure 19는 January에 대한 총 2차 대기중력파 항력을 나타낸다. 총 2차 대기중력파 항력이라 함은 2차 산악파와 2차 비산악 대기중력파 항력의 합을 의미한다. 전반적으로 2차 대기중력파 항력은 고도 70-80 km에서는 음의 값(westward 가속)을, 그리고

그 위의 고도에서는 양의 값 (eastward 가속)을 보여준다. Figure 20에서 확인할 수 있듯이, 이러한 2차 항력의 크기와 구조는 대체로 2차 비산악 대기중력파 항력이 만들어 내는 것으로 보인다. 2차 산악 대기중력파 항력에 대한 구조는 Fig. 21에 보였다. 2차 산악파 항력의 구조는 비산악의 경우(Fig. 20)처럼 단순하지는 않았지만, 전반적으로 크기가 작아, 총 2차 대기중력파 항력에는 크게 기여하지 않은 것으로 보인다. Figure 17에서 1차 대기중력파 항력이 고도 80 km 위에서 전반적으로 음의 값을 보인 것과 반대로 2차 항력은 대체로 양의 값을 보인 것으로 보아, 1차와 2차 항력이 서로 상쇄하는 경향성을 보이는 것으로 파악된다. 이는 2차 대기중력파 항력이 바람을 서풍(eastward)으로 유도하면서, 1차 항력이 음의 방향을 치우쳐진 결과인 것으로 해석된다.

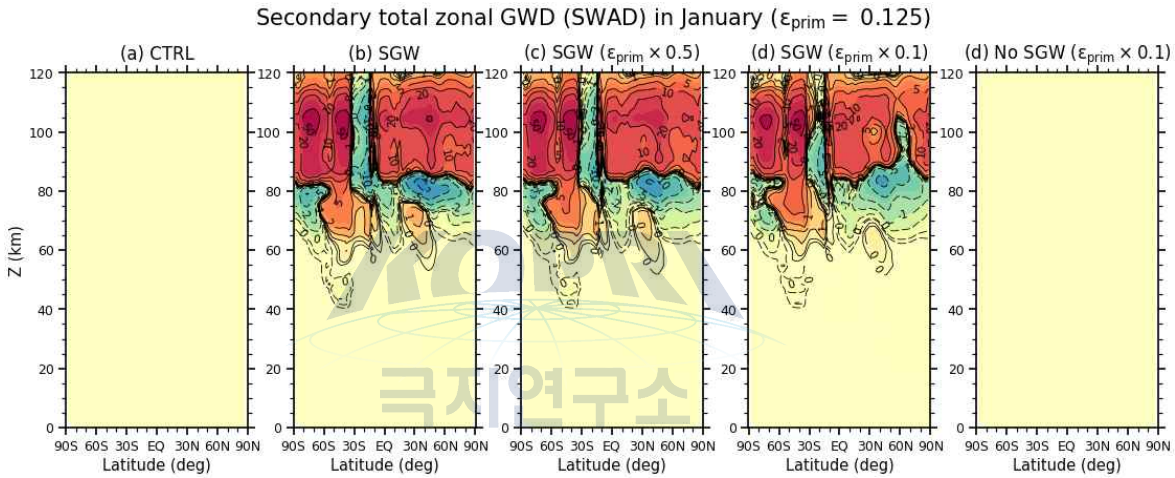

Figure 19: Latitude-height distributions of zonal-mean total zonal secondary gravity wave drag for January in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

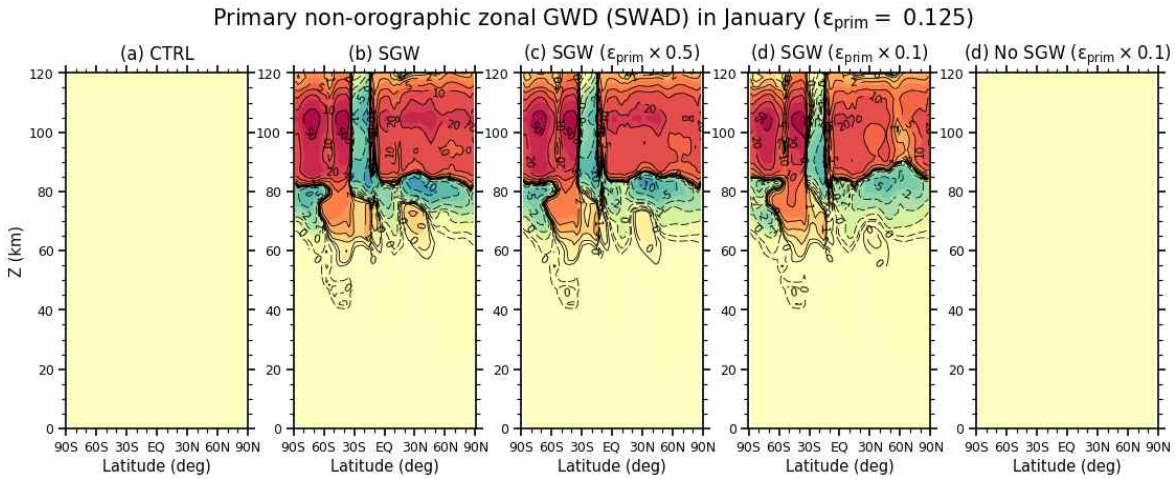

Figure 20: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal secondary non-orographic gravity wave drag for January in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

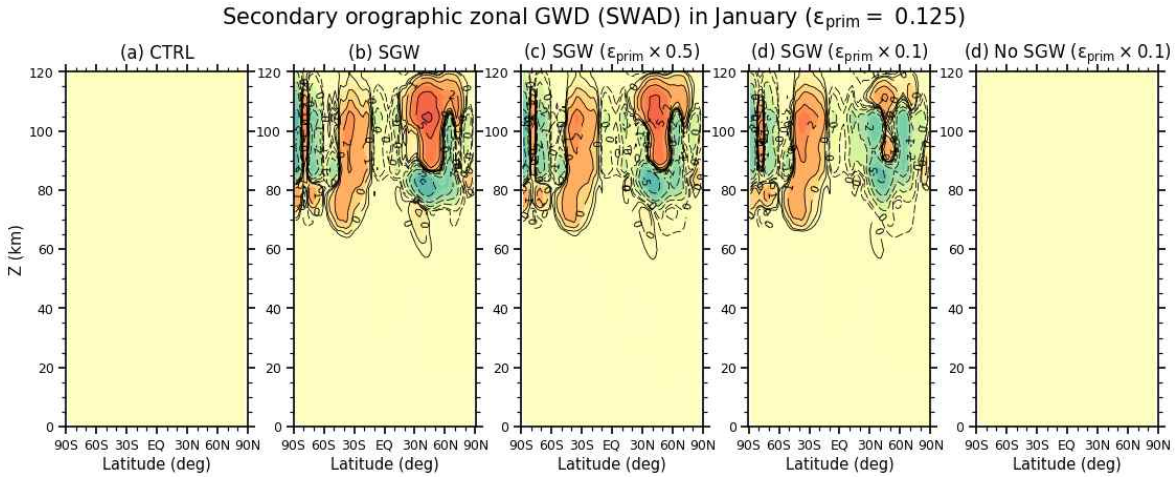

Figure 21: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal secondary orographic gravity wave drag for January in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

Figure 22는 July에 대한 총 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 총 대기중력파 항력이라 함은 산악과 비산악에 의한 항력의 합을 의미한다. SWAD CTRL에서 총 1차 대기중력파 항력은 겨울 반구(남반구)에서 대체로 음의 값을, 여름 반구(북반구)에서는 대체로 양의 값을 보이는 전형적 구조를 보인다. 북반구에서는 1차 산악파에 의한 항력이 상부 대류권에서부터 중간권 하부까지 강하게 나타난다 (Fig. 23 참조). 2차 대기중력파가 포함된 경우, 바람의 구조가 상당히 바뀌기 때문에, 패널 (b)-(d)에서 볼 수 있듯이, 1차 대기중력파의 항력의 구조도 상당히 변화되어 있음을 확인할 수 있다.

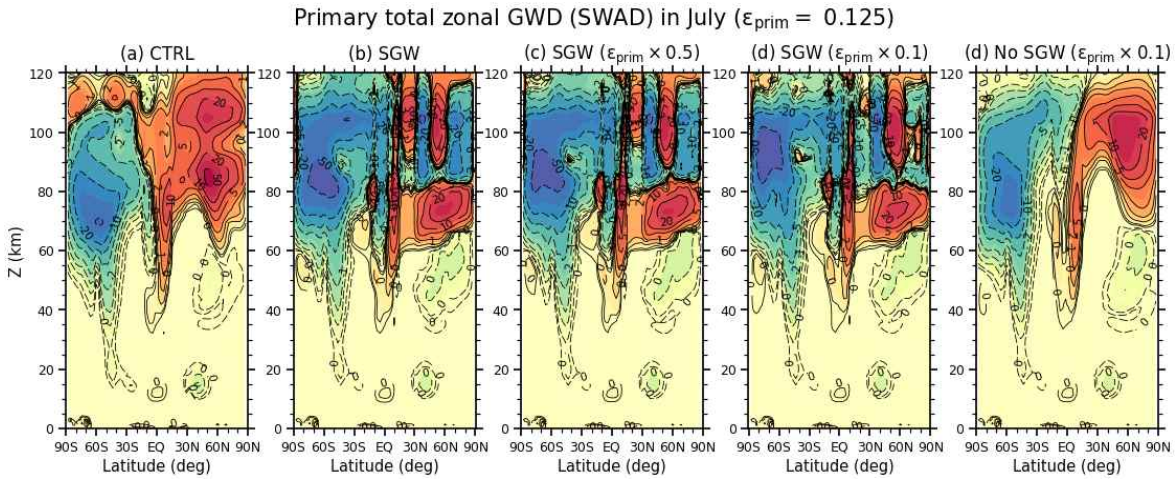

Figure 22: Latitude-height distributions of zonal-mean total (orographic plus non-orographic) zonal primary gravity wave drag for July in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

Figure 23은 July에 대한 산악에 의한 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 남반구에 산악이 적기는 하지만, 안데스와 남극 대륙의 해안선 부근을 중심으로 대류권-성층권-중간권에 걸친 강한 1차 산악파 항력이 나타난다. January의 경우에서와 같이, 2차 대기중력파 항력을 고려한 실험 (SGW, SGW0.5, SGW0.1)에서 1차 산악 대기중력파 항력이 열권 하부에서까지도 강하게 나타나는 모습을 볼 수 있다. 앞서 설명하였듯이 이는 겨울 반구(남반구) 중간권 상부와 열권 하부의 바람이 동풍에서 서풍(eastward wind)로 바뀌면서 1차 산악파가 전파할 수 있는 상황이 되었기 때문이다. 다시, 이 결과는 1차 대기중력파와 2차 대기중력파 항력이 상호작용하면서, 1차 산악파 항력이 더 높은 고도에까지 영향을 끼칠 수 있게 될 수 있다는 점을 시사한다.

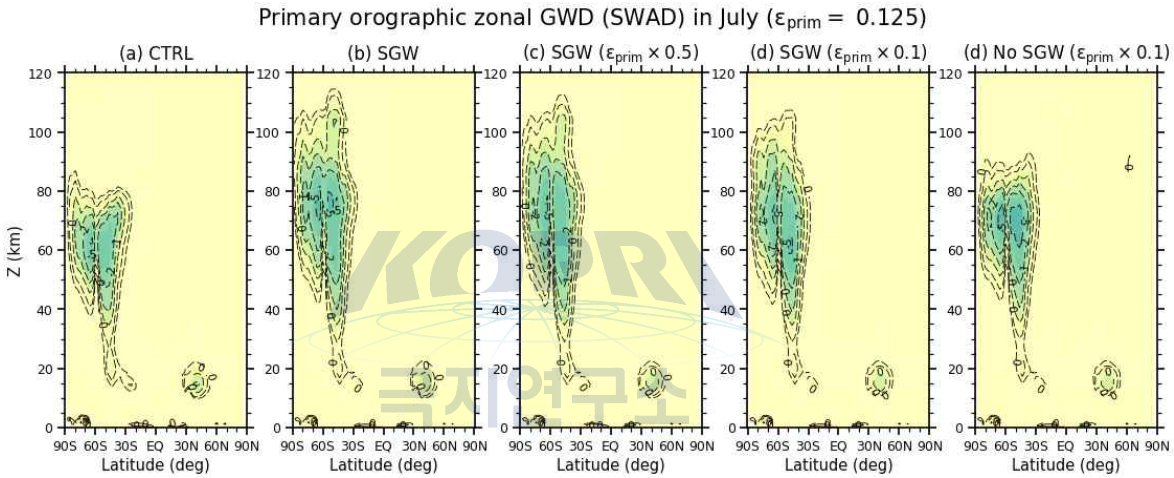

Figure 23: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal primary orographic gravity wave drag for July in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

Figure 24는 July에 대한 총 2차 대기중력파 항력을 나타낸다. 다시, 총 2차 대기중력파 항력이라 함은 1차 산악파와 2차 비산악 대기중력파 항력의 합을 의미한다. 전반적으로 2차 대기중력파 항력은 고도 70-80 km에서는 음의 값(westward 가속)을, 그리고 그 위의 고도에서는 양의 값 (eastwad 가속)을 보여준다. 이러한 구조는 열대지역을 중심으로 좌우가 뒤바뀐 것만 제외하면 January와 매우 유사한 형태이다. 이러한 2차 항력의 크기와 구조는 대체로 2차 비산악 대기중력파 항력이 만들어내는 것으로 보인다 (여기서 보이지는 않음). 2차 산악파 항력의 구조는 비산악의 경우처럼 단순하지는 않았지만, 전반적으로 크기가 작아, 총 2차 대기중력파 항력에는 크게 기여하지 않은 것으로 보인다. Figure 22에서 1차 대기중력파 항력이 고도 80 km 위에서 전반적으로

음의 값을 보인 것과 반대로 2차 항력은 대체로 양의 값을 보인 것으로 보아, 1차와 2차 항력이 서로 상쇄하는 경향성을 보이는 것으로 파악된다. 이는 2차 대기중력파 항력이 바람을 서풍(eastward)으로 유도하면서, 1차 항력이 음의 방향을 치우쳐진 결과인 것으로 해석된다. 이 또한, January의 경우와 동일한 내용이다.

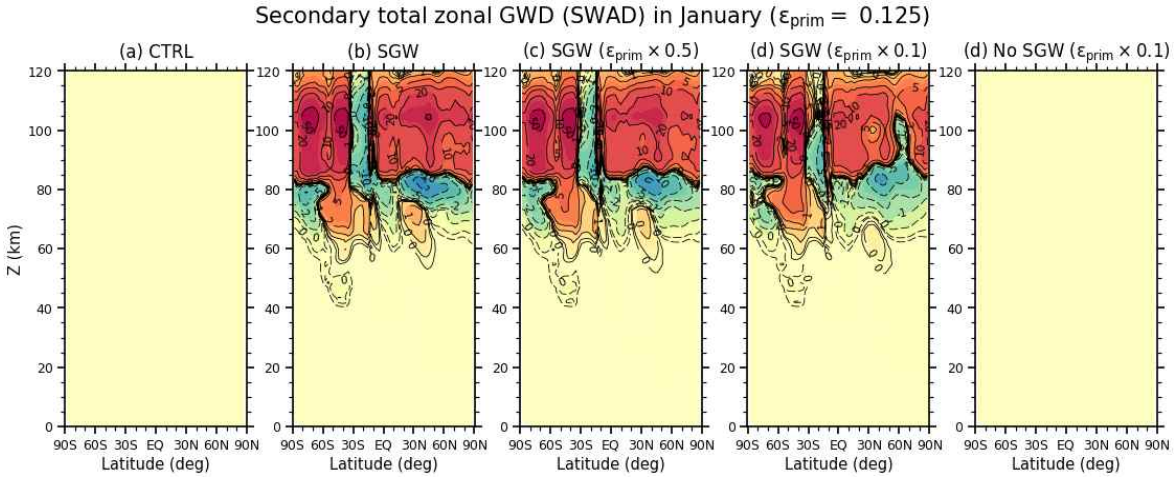

Figure 24: Latitude-height distributions of zonal-mean total zonal secondary gravity wave drag for July in (a) CTRL, (b) SGW, (c) SGW0.5, (d) SGW0.1, and (e) NoSGW0.1. Contour interval is logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

KOPRI 극지연구소

이 절에서는 단순화된 역학적 대기 대순환 모델인 SWAD를 이용한 perpetual January와 July에 대한 일련의 실험 (CTRL, SGW, SGW0.5, SGW0.1, NoSGW0.1)을 통해서 2차 대기중력파 항력의 영향을 살펴보았다. 이 실험들을 통해서, 모델에 장착된 2차 대기중력파 모수화가 전반적으로 겨울 반구 중간권 상부 및 하부 열권의 바람 역전 현상과 같은 계통적 오차를 상당히 완화시키는 중요한 역할을 할 수 있음을 파악할 수 있었다. 이 단순화된 대기 대순환 모델이 열적 조석파나 하부 열권과 관련된 상세한 물리 과정을 포함하고 있지 않아서, JAWARA와 같은 자료동화 결과와 보다 완전한 비교를 하는 것은 가능하지 않았지만 (JAWARA도 완전하다고 보기는 어려움), 2차 대기중력파 모수화가 장착되더라도 대류권-성층권-중간권을 아우르는 저층 및 중층 대기의 전지구 순환은 정상적으로 모의할 수 있는 것을 확인하였다. 따라서 이 이상화된 전지구 모델인 SWAD에서 사용한 2차 대기중력파 모수화와 관련된 파라미터들 (2차 대기중력파 운동량 속의 크기, 고유 위상 속도의 크기, 2차 파동의 수평 파장, 간헐성 인자 등)을 그대로 활용하여, 보다 완전한 물리과정을 표현할 수 있는 NCAR WACCM6에서 그 영향을 다음 절에서 살펴보고자 한다.

제 3 절 단순화된 화학이 장착된 WACCM

이 절에서는 단순화된 역학적 대기 대순환 모델인 SWAD을 통해 개발된 2차 대기중력파 항력 모수화를 미국 NCAR에서 개발한 WACCM6에 장착하고, 단순화된 화학 과정을 갖는 WACCM 버전을 이용하여, 2차 대기중력파의 효과를 보다 현실적인 프레임워크에서 살펴볼 예정이다.

본 연구에서 사용할 모델 WACCM6 (Gettelman et al., 2019)은 미국 NCAR에서 개발한 전지구 기후시스템 모델인 Community Earth System Model에서 대류권부터 열권 하부까지의 전층 대기를 다루는 대기 모델 컴포넌트를 가리킨다. WACCM6는 Community Atmospheric Model version 6 (CAM6)의 전층대기 버전을 볼 수 있다. WACCM6에 장착된 상세한 물리-화학 과정이나, 이 WACCM6로 수행할 수 있는 연구에 대해서는 Gettelman et al. (2019)를 참고할 수 있다. 기본적으로 WACCM은 중층대기 혹은 대류권까지 포함하는 화학 및 에어로솔 과정에 대한 반응식과 물질 수송을 계산할 수 있으나, 본 연구에서는 이러한 화학 과정을 상당히 단순화시켜 모델 수행 시간을 대폭 줄인 specified chemistry 버전을 활용하였다. 이 specified chemistry 버전에 대해서는 Smith et al. (2014)에서 상세한 내용을 확인할 수 있다. 참고로 단순화된 화학이 장착된 WACCM6 실험을 생성하기 위해서 CESM2.2.0으로부터 아래에 표기된 바와 같이 FWsc2000climo라는 component set을 이용하여 실험을 생성하였다. 아래에서 f19_f19_mg17은 대기와 해양에 대한 격자 구조를 표시하는 부분으로 본 연구에서는 대기와 관련해서는 수평적으로 2도 격자를 사용하였다.

```
export SCRATCHDIR="/data2/songi/SCNDGW/scratch"
export INPUTDIR="/data/CESM2/inputdata"
export MACHINENAME="lumos"

cd ~/CESM2/cesm2.2.0/cime/scripts
./create_newcase --case ${SCRATCHDIR}/fw2ctrl --compset FWsc2000climo --res f19_f19_mg17
--machine ${MACHINENAME} --compiler intel --run-unsupported -i ${INPUTDIR}

./xmlchange CAM_CONFIG_OPTS="-phys cam6 -chem waccm_sc_mam4 -nlev 70"
```

해당 compset은 https://docs.cesm.ucar.edu/models/cesm2/config/compsets.html 에서 검색할 수 있으며, 아래와 같이 각 컴포넌트 모델이 설정된다.

Alias	Long name	Defined By	Support Level
FWsc2000climo	2000_CAM60%WCSC_CLM50%SP_CICE%PRES_DOCN%DOM_MOSART_SGLC_SWAV	cam	Scientific / Tested

Scientifically Supported Grids

- f09_f09_mg17

Details

	Value	Description
Initialization Time	2000	1850: Pre-Industrial; 2000 present day: Additional initialization times defined by components.
Atmosphere	CAM60%WCSC	CAM cam6 physics:WACCM specified chemistry:
Land	CLM50%SP	clm5.0:Satellite phenology:
Sea-Ice	CICE%PRES	Sea ICE (cice) model version 5 :prescribed cice
Ocean	DOCN%DOM	DOCN prescribed ocean mode
River runoff	MOSART	MOSART: MOdel for Scale Adaptive River Transport
Land Ice	SGLC	Stub glacier (land ice) component
Wave	SWAV	Stub wave component

본 연구에서는 CTRL, SGW, SGW0.1의 세 개의 실험을 수행하며, AMIP 스타일의 31년 수치 모의를 수행하였다. 모든 실험에서 열대 준 2년 주기 진동은 기후적인 패턴으로 넛징을 통해 구현되었다. 앞서 SWAD 실험과 같이 CTRL은 2차 대기중력파 모수화를 사용하지 않은 규준 실험이고, SGW는 2차 대기중력파 모수화를 사용한 경우, SGW0.1은 2차 대기중력파를 사용하면, 1차 파동의 간헐성 인자를 고도 100 km에서 10%까지 감소시킨 경우를 나타낸다 (간헐성 인자에 관해서는 Fig. 4 참조).

KOPRI 극지연구소

구분	설명
CTRL	1차 대기중력파 모수화만으로 실행된 31년 WACCM6 AMIP 실험
SGW	1차와 2차 대기중력파 모수화를 모두 사용한 31년 WACCM6 AMIP 실험
SGW0.1	SGW와 동일하나, 1차 파동 간헐성 인자를 100 km에서 10%로 줄인 실험

Figure 25는 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. WACCM6 CTRL 실험은 대류권과 성층권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 구조와 바람 방향을 보여준다. 다만, 겨울 반구 (북반구) 중간권계면 부근 (고도 80-100 km)에서 이미 동풍 (westward wind)으로 바람이 역전되어 있는 모습이 CTRL에 나타난다. 또한, 여름 반구 (남반구) 극지 성층권 및 중간권에서 동풍이 CTRL에서는 2개의 국지적 최대값을 갖는 모습이 나타났다. 여름 반구 열권 하부에서의 서풍도 CTRL에서 JAWARA에 비해 강하게 나

타났다. 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW와 SGW0.1 실험 모두에서는 겨울철 극소용돌이 위에서 동풍으로 역전되는 오차는 사라졌고, 서풍 (eastward wind)이 열권까지 확장된 것으로 확인되었다. 여름 반구 열권 하부의 강한 서풍도 2차 대기중력파 실험에서는 상당히 완화되었다. 1차 대기중력파에 대한 간헐성 인자를 줄인 SGW0.1이 모의한 여름 반구의 바람장은 JAWARA왕 가장 비슷한 크기와 형태를 보이는 것으로 보인다. 다만 겨울 반구 (북반구) 중간권 아열대 제트의 위치가 JAWARA나 CTRL과 비교해서 다소 낮은 고도에 형성된 것으로 보인다.

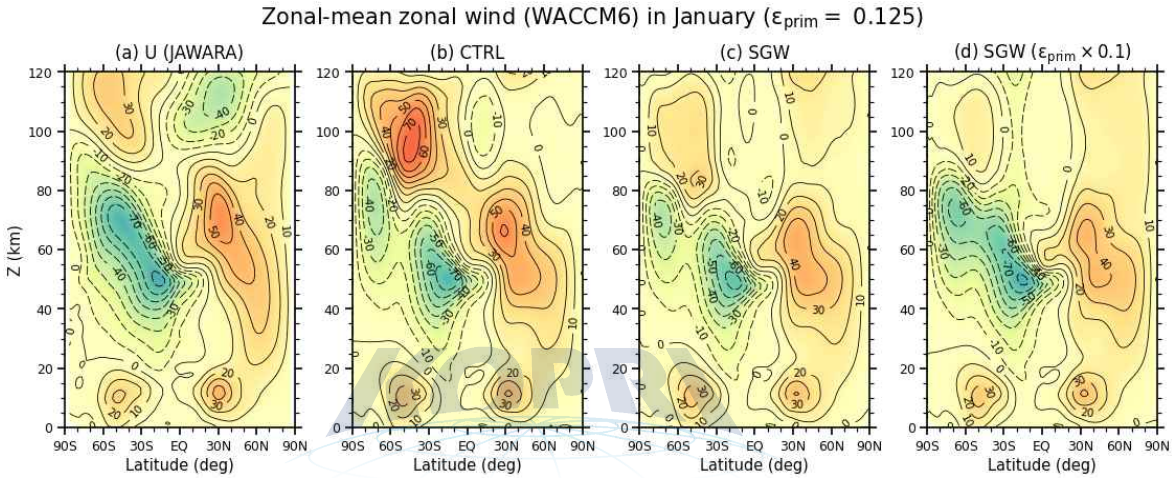

Figure 25: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

Figure 26은 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. CTRL 실험은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 온도 구조를 보여주고 있다. 다만, 중간권계면이나 열권 하부에서는 여름 반구 온도가 고도 80-90 km 근처에서 너무 낮은 것을 확인할 수 있었다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권의 온도는 CTRL이나 JAWARA와 모두 유사하였다. 2차 대기중력파를 고려하는 실험에서 온도의 전반적인 구조는 모두 유사하게 나타났으며, 여름 반구 중간권계면 냉각 pool의 고도가 다소 낮은 고도에 형성된 것으로 보인다. 1차 대기중력파의 간헐성 인자가 100 km에서 10%로 줄어든 SGW0.1의 경우에는 중간권 상부나 중간권계면 부근에서 온도가 전 위도에 걸쳐 다소 높게 나타나는 모습을 보여주었다. 이는 SWAD와는 상반된 결과인데, SWAD의 2차 대기중력파에서 무시했던 비가역적 가열이나 WACCM6의 대기중력파 난류 확산 계수와 연관되어 있을 수 있을 것으로 보인다.

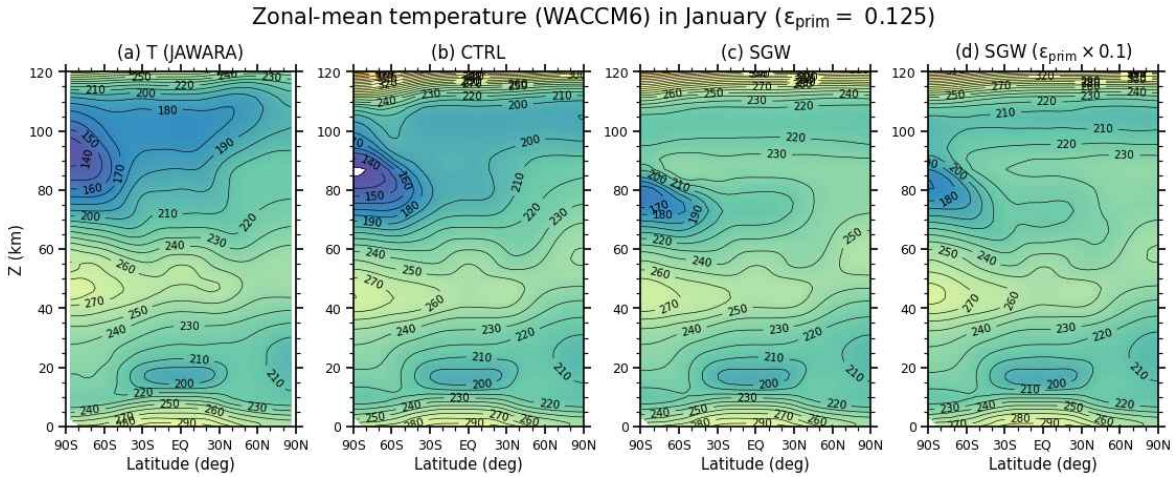

Figure 26: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal temperature for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 27은 MERRA2, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 보이고 MERRA2와 비교한 그림이다. WACCM6 CTRL 실험은 겨울 반구 중간권계면 부근 (고도 70-80 km)에서 동풍 (westward wind)으로 바람이 역전되어 있는 모습이 보인다. 또한, 여름 반구 극지 성층권 및 중간권에서 동풍 (westward wind)가 MERRA2에 비해 다소 약한 모습이 보인다. 반면, 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW와 SGW0.1 실험 모두에서 겨울철 극 소용돌이 위에서 동풍으로 역전되는 오차는 사라졌다. CTRL에서 겨울 반구에서 중간권 아열대 서풍 제트가 다소 과하게 강했는데, SGW나 SGW0.1 실험에서는 JAWARA와 비슷한 세기로 변화하였다. CTRL에서 여름 반구 대류권 제트가 사라지는 고도 (바람이 0이 되는 고도)가 고위도에서 거의 30 km 정도였는데, SGW나 SGW0.1에서는 약 25 km 정도로 낮아진 점도 흥미로운 사실이다. 또한, 여름 반구 성층권-중간권의 동풍이 CTRL에 비해서 2차 중력파를 고려하였을 때 훨씬 강해졌다. 고도 80 km까지 확인했을 때, SGW0.1이 MERRA2와 상당히 비슷한 모습을 보여주는 상당히 인상적이다. 겨울 반구의 제트의 세기가 구조뿐만 아니라, 여름 반구 동풍 제트의 세기와 구조의 측면에서도 SGW0.1 실험이 꽤 괜찮은 결과를 주었다. 즉, 1차 대기중력파 항력의 세기를 중간권에서 감소시켰을 때, 오히려 더 좋은 결과를 주고 있는 모습이다.

Figure 28은 MERRA2, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 나타내고 MERRA2와 비교한 그림이다. CTRL 실험은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 MERRA2와 유사한 온도 구조를 보여주고 있다. 다만, 여름 반구 (남반구) 극지역 고도

80 km 부근의 온도를 과도하게 차게 모의하고 있다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권 온도는 CTRL이나 MERRA2와 모두 유사하였으며, 여름 반구 극지 중간권 상부의 한랭 오차는 상당히 감소했다. 다만, 여름 반구 고위도 하부 성층권이 다소 차게 모의되는 문제는 모든 실험에서 공통적으로 나타났다. SGW0.1의 경우, 겨울 반구 극지역 중간권 온도가 (SGW와 비교해서도 보다 더) 전반적으로 MERRA2와 유사한 결과를 보여주는 것은 특이한 점으로 보인다. SWAD든 WACCM6의 결과를 종합해 보면, 1차 대기중력파가 중간권 상부에서 부터 과도하게 강한 영향을 주는 모습을 확인할 수 있었다. 이러한 과도한 영향이 여름 반구 극지 중간권의 온도 구조에 대한 계통적 편차를 만들어내는 것으로 판단된다. 따라서 1차 파동에 대한 간헐성 인자를 중간권 위에서 줄인 실험이 중간권 위쪽에 대해서는 좋은 결과를 주는 것으로 판단된다.

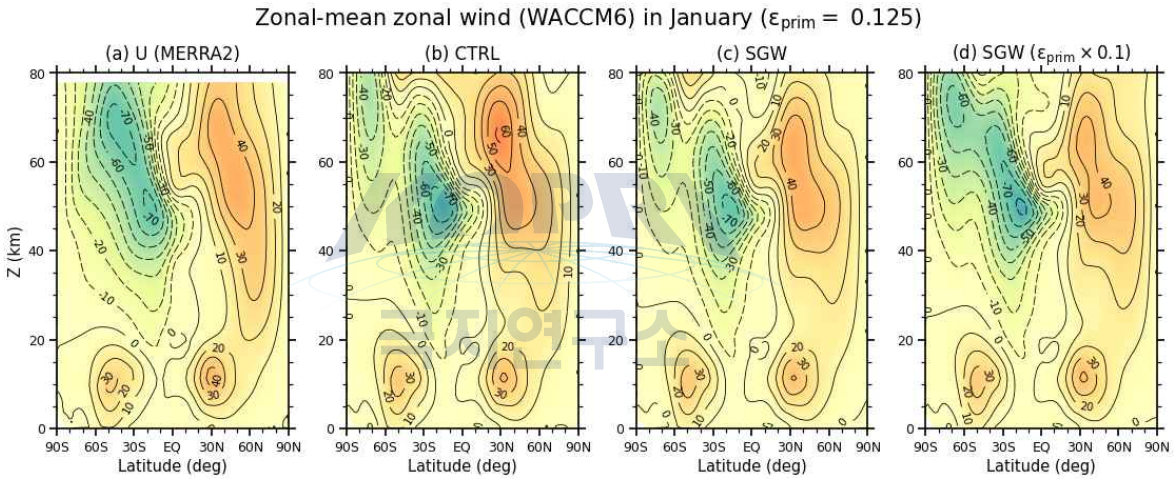

Figure 27: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for January in (a) MERRA2, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

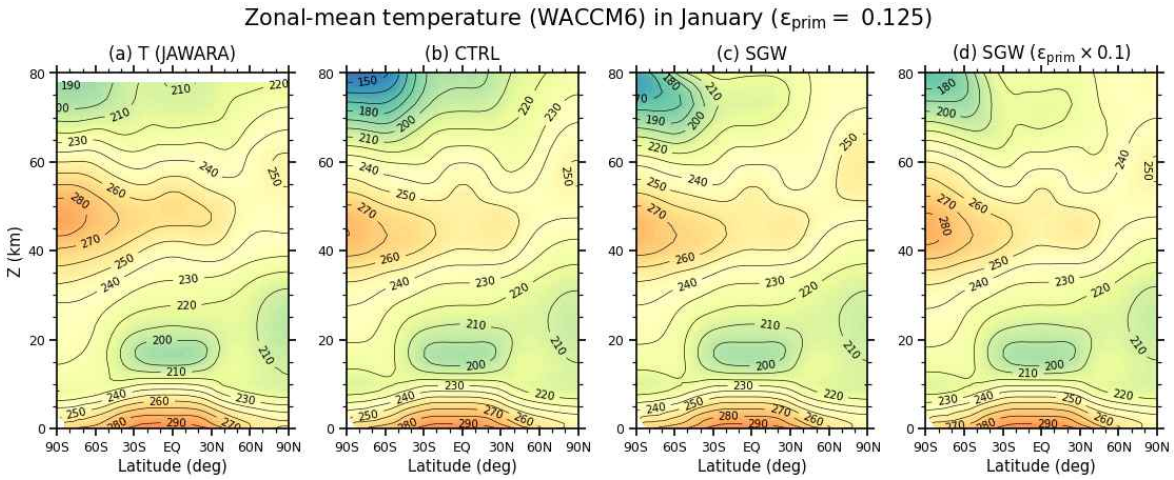

Figure 28: Latitude-height distributions of zonal-mean temperature for January in (a) MERRA2, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 29는 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 나타낸 것이다. CTRL 실험은 대류권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 구조와 바람 방향을 보여주는 것으로 보이나, 성층권에서는 남반구 (겨울 반구)에서 제트가 다소 강하거나, 소용돌이의 축이 극쪽으로 치우쳐져 있는 모습을 보였다. 7월의 경우, 겨울 반구 (남반구) 극 소용돌이가 고도 80 km위에서 명확하게 역전되는 모습을 보여준다. 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW와 SGW0.1 실험에서 겨울철 극 소용돌이 위에서의 동풍 역전 계통적 오차는 상당히 완화되었고, 여름 반구 성층권-중간권의 동풍이 2차 중력파를 고려할 때 훨씬 강해졌다. SGW0.1의 극 소용돌이 위의 서풍이 상당히 강해져 있는 모습이 특이한 점이다.

Figure 30은 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균 7월에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 나타낸 것이다. CTRL 실험은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 JAWARA와 유사한 온도 구조를 보여주고 있지만, 여름 반구 극지역 중간권의 온도를 과도하게 차게 모의하고 있다.. 동시에 겨울 반구 (남반구) 성층권계면이나 하부 중간권의 온도도 과도하게 높게 모의하고 있다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권의 온도는 CTRL이나 JAWARA와 모두 유사하였다. 2차 대기중력파를 고려하는 실험에서 온도의 전반적인 구조는 모두 유사하게 나타났으며, 여름 반구 극지 중간권의 한랭 오차가 상당히 개선된 모습을 확인할 수 있었다. 1차 대기중력파의 간헐성 인자가 100 km에서 10%로 줄어든 SGW0.1의 경우에 해당 한랭 오차는 더 많이 줄어든 것으로 보아, 이러한 한랭 오차는 1차 대기중력파와 깊이 연관되어 있는 것으로 보인다.

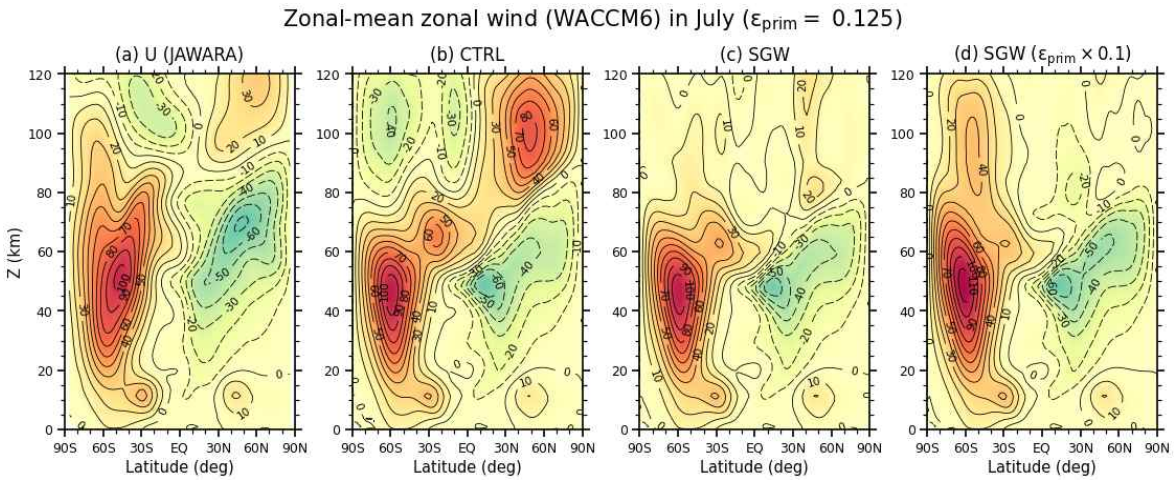

Figure 29: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for July in (a) JAWARA, (b) CTRL, (c) SGW, (d) SGW0.5, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

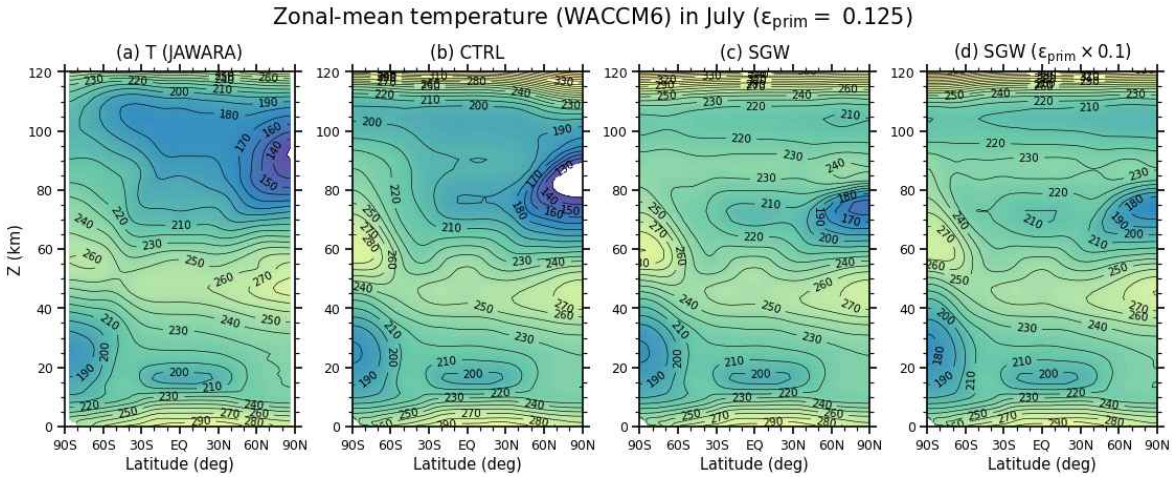

Figure 30: Latitude-height distributions of zonal-mean temperature for July in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (e) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 31은 MERRA2, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균 7월에 대한 동서평균 동서 바람의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 보인 그림이다. WACCM6 CTRL은 겨울 반구 (남반구) 중간권계면 부근 (고도 70-80 km)에서 이미 동풍 (westward wind)으로 바람이 역전되어 있는 모습이 보인다. 반면, 2차 대기중력파 모수화가 포함된 SGW, SGW0.1 실험 모두에서 겨울철 극 소용돌이 위에서 동풍으로 역전되는 계통적 오차는 사라졌다. 다만 극 소용돌이가 성층권에서 강해진 단점이 나타났고, 중간권 아열대 서풍 제트가 SGW0.1에서 나타나지 않는 점은 다소 아쉬운 점이다. 또한, 여름 반구 중간권의 동풍이 2차 중력파를 고려하였을 때 다소 강해졌다.

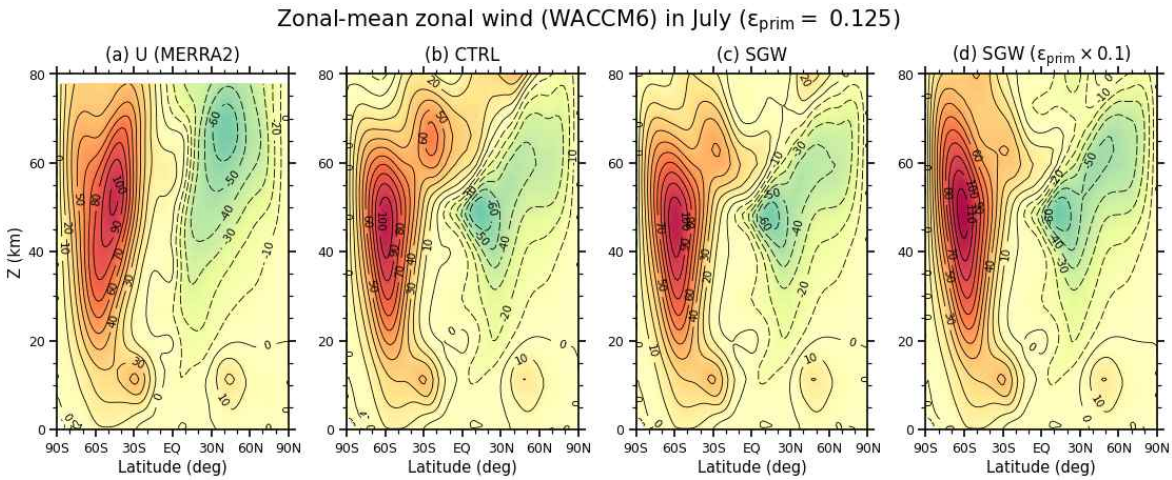

Figure 31: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for July in (a) MERRA2, (b) CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

Figure 32는 MERRA2, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균 7월에 대한 동서평균 온도의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 나타내고 MERRA2와 비교한 그림이다. CTRL은 동서 바람의 경우와 유사하게 대류권과 성층권에서는 대체로 MERRA2와 유사한 온도 구조를 보여주고 있다. 2차 대기중력파를 고려한 경우의 대류권과 성층권 온도는 CTRL이나 MERRA2와 모두 유사하였으나, 중간권 상부에서 온도가 전 위도에 걸쳐 대체로 낮게 나타나는 모습을 보여주었다. 여름 반구 극지 중간권 상부의 한랭 오차는 CTRL에서 심각한데, 이러한 오차는 2차 대기중력파를 고려하는 실험에서는 상당히 완화되었고, 1차 대기중력파를 줄인 SGW0.1에서는 상당히 MERRA2와 접근하는 모습을 보였다. 겨울 반국 극지 중간권의 온도는 다소 높게 나타나는 것도 2차 대기중력파 실험에서 상당히 완화된 모습을 보였다.

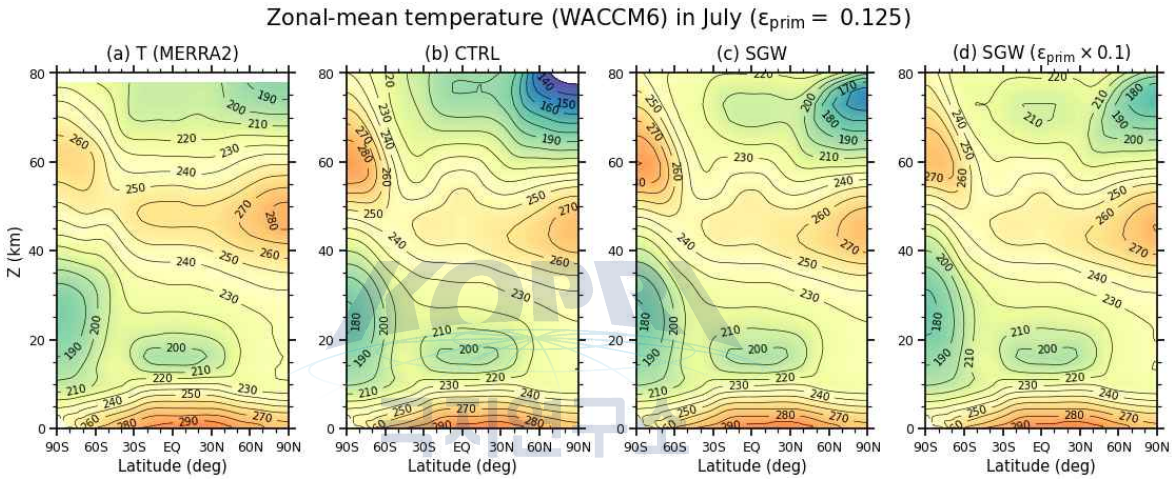

Figure 32: Latitude-height distributions of zonal-mean temperature for July in (a) MERRA2, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 K.

Figure 33은 WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 총 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 총 대기중력파 항력이라 함은 산악, 대류 및 전선 대기중력파에 의한 항력의 합을 의미한다. WACCM6 CTRL에서 총 1차 대기중력파 항력은 중간권계면 아래에서 겨울 반구(북반구)에서 대체로 음의 값을, 여름 반구(남반구)에서는 대체로 양의 값을 보이는 전형적 구조를 보인다. 북반구에서는 1차 산악파에 의한 항력이 상부 대류권에서부터 중간권 하부까지 강하게 나타난다 (Fig. 34 참조). 2차 대기중력파가 포함된 경우, 중간권 상부와 열권 바람의 구조가 상당히 바뀌기 때문에, 패널 (b)-(c)에서 볼 수 있듯이, 1차 대기중력파의 항력의 구조도 상당히 변화되어 있음을 확인할 수 있다.

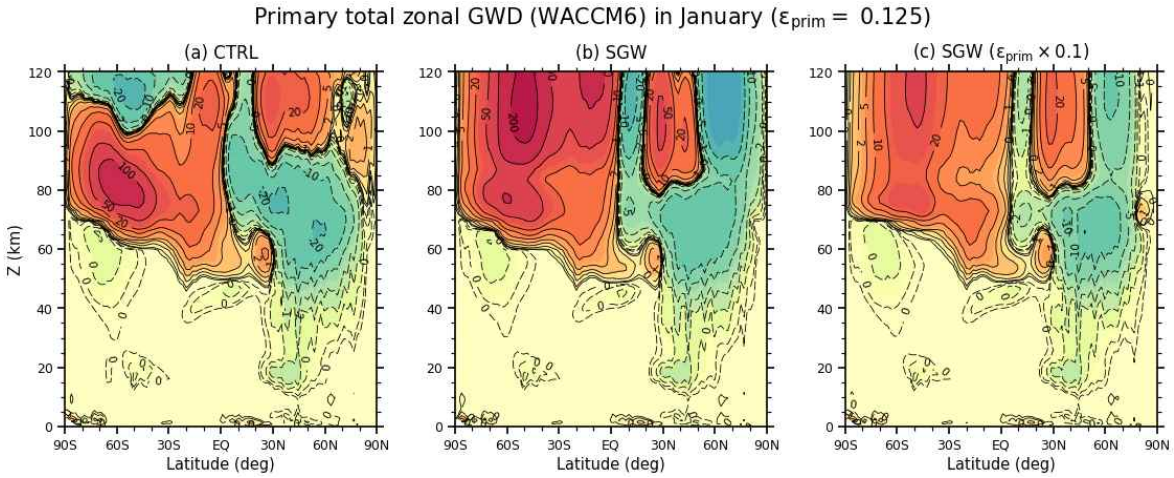

Figure 33: Latitude-height distributions of zonal-mean primary total (orographic, convective, and frontal) zonal gravity wave drag for January in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

2차 대기중력파를 고려한 실험에서 1차 항력이 많이 변화된 지역은 중간권 상부와 열권 하부 지역이다. 겨울 반구에서 2차 항력을 고려한 실험에서 1차 항력이 대체로 음의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 음의 항력이 주로 나타났다는 것은 2차 항력을 고려한 실험에서 바람이 대체로 양의 값을 (서풍을) 나타내는 방향으로 변화하였다는 의미로 해석될 수 있다. 2차 대기중력파를 사용한 경우 (SGW, SGW0.1), CTRL 중간권계면 부근에서 나타나는 항력 부호의 연직 역전이 사라지고 단순히 여름 반구는 양수(동쪽 가속도), 겨울 반구는 음수(서쪽 가속도)와 같은 구조적인 변화가 발생하는 것으로 보인다.

Figure 34는 WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 산악에 의한 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 산악이 많은 북반구에서 주로 산악파에 의한 1차 항력이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 2차 대기중력파 항력을 고려한 SGW 실험에서 1차 산악 대기중력파 항력이 열권 하부에서까지도 강하게 나타나는 모습을 볼 수 있다. 앞서 설명하였듯이 이는 겨울 반구(북반구) 중간권 상부와 열권 하부의 바람이 동풍에서 서풍(eastward wind)로 바뀌면서 1차 산악파가 전파할 수 있는 조건이 충족되었기 때문이다. 이 결과는 1차 대기중력파와 2차 대기중력파 항력이 상호작용하면서, 1차 산악파 항력이 더 높은 고도에까지 영향을 끼칠 수 있게 될 수 있다는 점을 시사한다. 1차 중력파의 간헐성 인자를 10%로 줄인 SGW0.1에서는 1차 산악파 항력이 열권에서는 당연히 줄어드는 모습을 보였다.

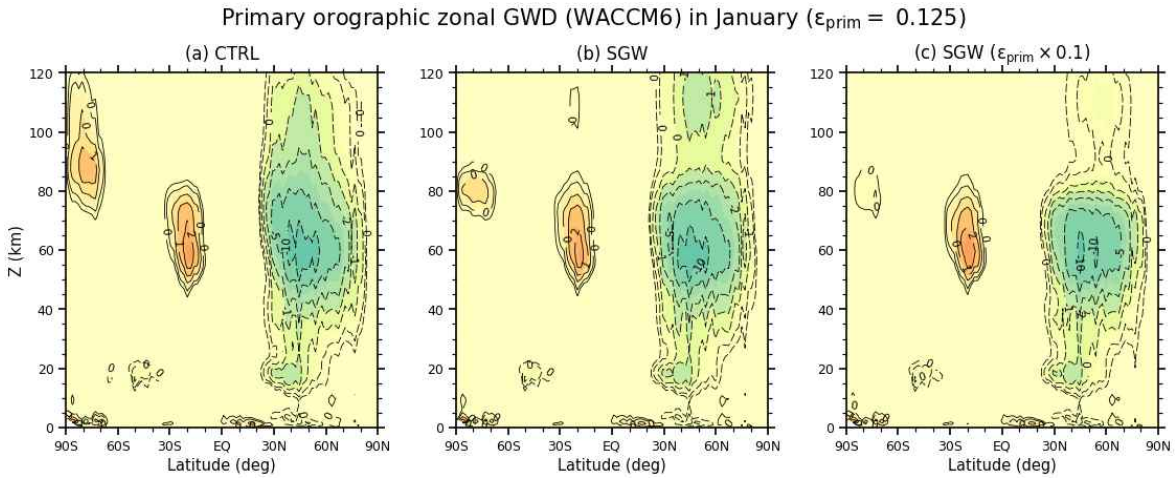

Figure 34: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal primary orographic gravity wave drag for January in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

Figure 35는 WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 총 2차 대기중력파 항력을 나타낸다. 총 2차 대기중력파 항력이라 함은 2차 산악파와 2차 비산악 대기중력파 항력의 합을 의미한다. 전반적으로 2차 대기중력파 항력은 겨울 반구(북반구) 고도 70-80 km에서는 음의 값(westward 가속)을, 그리고 그 위의 고도에서는 양의 값 (eastward 가속)을 보여준다. 여름 반구 (남반구)에서는 대체로 반대의 부호 패턴이 나타난다. Figure 36에서 확인할 수 있듯이, 이러한 2차 항력의 크기와 구조는 (특히 아열대와 중위도에서) 대체로 2차 비산악 전선 대기중력파 항력이 만들어내는 것으로 보인다. 여기서 보이지는 않았지만, 열대 지역에서는 비산악 (대류) 대기중력파가 2차 대기중력파 항력을 만드는데 중요한 역할을 할 것으로 보인다. 2차 산악 대기중력파 항력에 대한 구조는 비산악 전선의 경우 (Fig. 36) 처럼 단순하지는 않았지만, 전반적으로 크기가 작아, 총 2차 대기중력파 항력에는 크게 기여하지 않은 것으로 보인다. Figure 33에서 1차 대기중력파 항력이 고도 80 km 위에서 전반적으로 음의 값을 보인 것과 반대로 2차 항력은 대체로 양의 값을 보인 것으로 보아, 1차와 2차 항력이 서로 상쇄하는 경향성을 보이는 것으로 파악된다. 이러한 상쇄 경향은 SWAD에서도 발견되었던 점이다. 이는 2차 대기중력파 항력이 겨울 중간권계면 위의 바람을 서풍(eastward)으로 유도하면서, 1차 항력이 음의 방향을 치우쳐진 결과인 것으로 해석된다. 여름 반구에서는 1-2차 대기중력파 항력은 반대의 부호 패턴 및 상관성을 보인다.

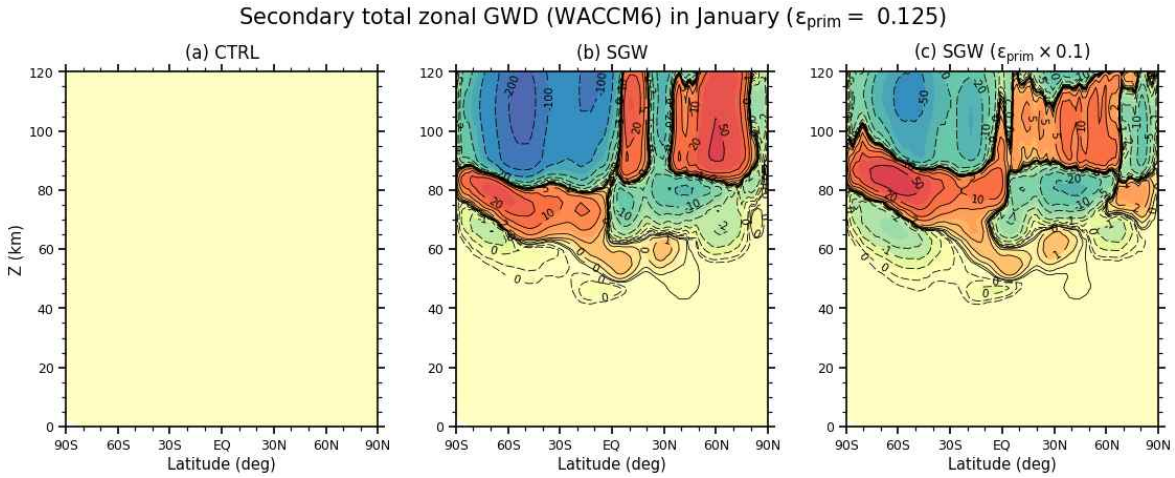

Figure 35: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal secondary total gravity wave drag for January in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

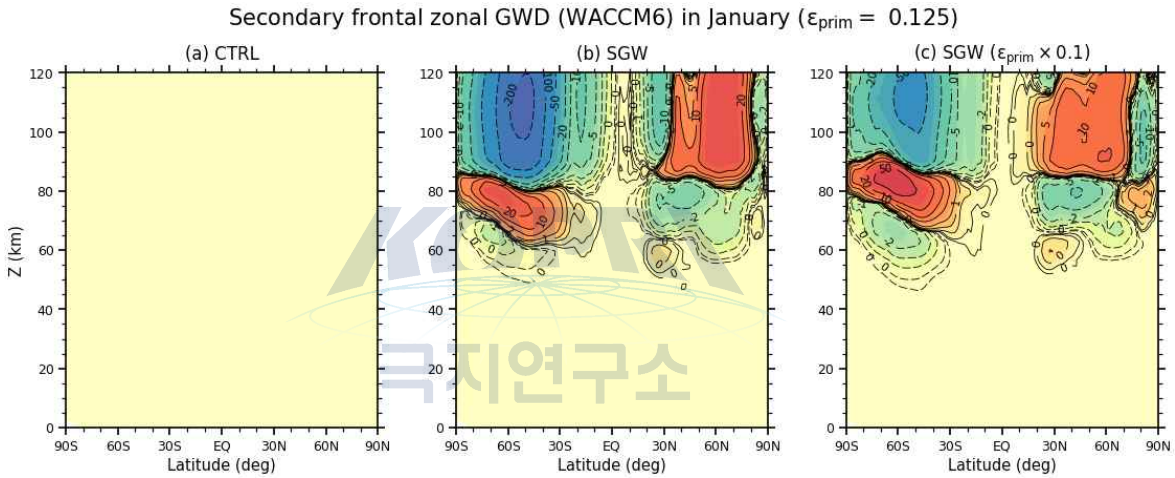

Figure 36: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal secondary frontal gravity wave drag for January in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

Figure 37은 WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 총 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 총 대기중력파 항력은 산악, 대류 및 전선 대기중력파에 의한 항력의 합이다. WACCM6 CTRL에서 총 1차 대기중력파 항력은 중간권계면 아래에서 겨울 반구(남반구)에서 대체로 음의 값을, 여름 반구(북반구)에서는 대체로 양의 값을 보이는 전형적 구조를 보인다. 북반구에서는 1차 산악파에 의한 항력이 상부 대류권에서부터 중간권 하부까지 강하게 나타난다 (Fig. 38 참조). 2차 대기중력파가 포함된 경우, 중간권 상부와 열권 바람의 구조가 상당히 바뀌기 때문에, 패널 (b)-(c)에서 볼 수 있듯이, 1차 대기중력파의 항력의 구조도 상당히 변화되어 있음을 확인할 수 있다.

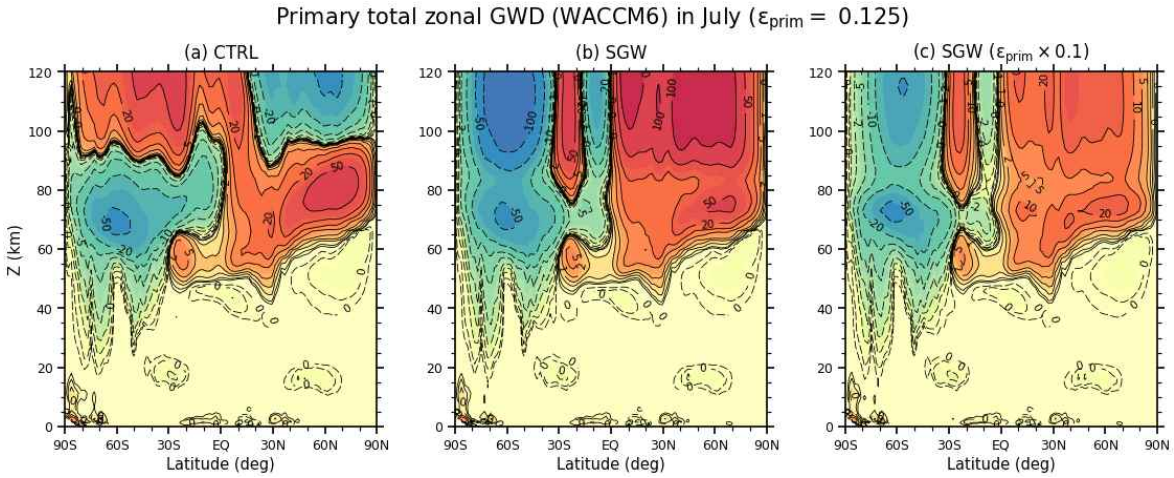

Figure 37: Latitude-height distributions of zonal-mean primary total (orographic, convective, and frontal) zonal gravity wave drag for July in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

2차 대기중력파를 고려한 실험에서 1차 항력이 많이 변화된 지역은 중간권 상부와 열권 하부 지역이다. 7월 겨울 반구(남반구)에서 2차 항력을 고려한 실험에서 1차 항력이 대체로 음의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 음의 항력이 주로 나타났다는 것은 2차 항력을 고려한 실험에서 바람이 대체로 양의 값을 (서풍을) 나타내는 방향으로 변화하였다는 의미로 해석될 수 있다. 2차 대기중력파를 사용한 경우 (SGW, SGW0.1), CTRL 중간권계면 부근에서 나타나는 항력 부호의 연직 역전이 사라지고 단순히 여름 반구는 양수(동쪽 가속도), 겨울 반구는 음수(서쪽 가속도)와 같은 구조적인 변화가 발생하는 것으로 보인다.

Figure 38은 WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 산악에 의한 1차 대기중력파 항력을 나타낸다. 산악이 많은 북반구에서 주로 산악파에 의한 1차 항력이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 2차 대기중력파 항력을 고려한 SGW 실험에서 1차 산악 대기중력파 항력이 열권 하부에서까지도 강하게 나타나는 모습을 볼 수 있다. 앞서 설명하였듯이 이는 7월 겨울 반구(남반구) 중간권 상부와 열권 하부의 바람이 동풍에서 서풍(eastward wind)로 바뀌면서 1차 산악파가 전파할 수 있는 조건이 충족되었기 때문이다. 이 결과는 1차 대기중력파와 2차 대기중력파 항력이 상호작용하면서, 1차 산악파 항력이 더 높은 고도에까지 영향을 끼칠 수 있게 될 수 있다는 점을 시사한다. 1차 중력파의 간헐성 인자를 10%로 줄인 SGW0.1에서는 1차 산악파 항력이 열권에서는 당연히 줄어드는 모습을 보였다.

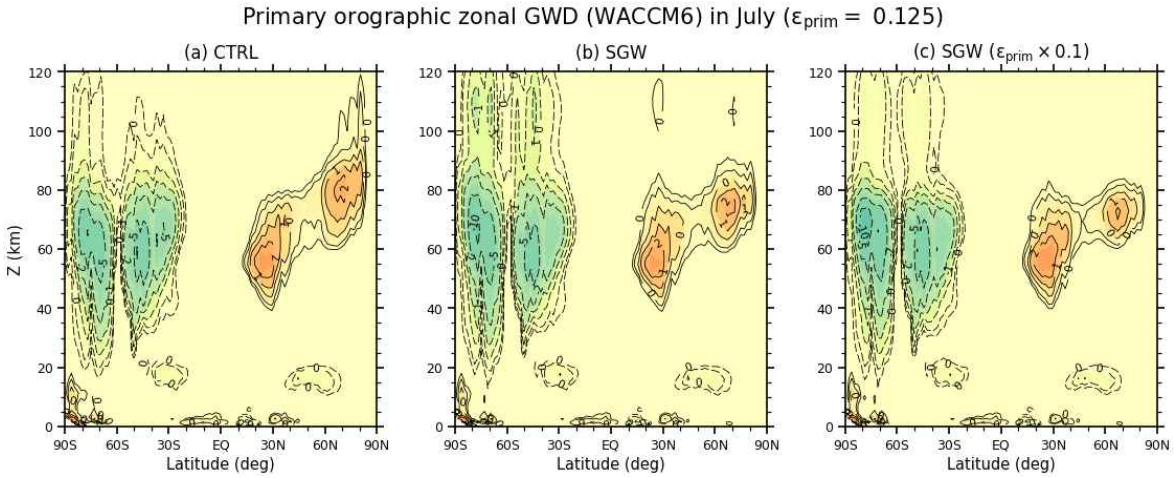

Figure 38: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal primary orographic gravity wave drag for July in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

Figure 39는 WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 총 2차 대기중력파 항력을 나타낸다. 총 2차 대기중력파 항력은 2차 산악파와 2차 비산악 대기중력파 항력의 합을 의미한다. 전반적으로 2차 대기중력파 항력은 7월 겨울 반구 (남반구) 고도 70-80 km에서는 음의 값(westward 가속)을, 그리고 그 위의 고도에서는 양의 값 (eastward 가속)을 보여준다. 여름 반구 (남반구)에서는 대체로 반대의 부호 패턴이 나타난다. Figure 40에서 확인할 수 있듯이, 이러한 2차 항력의 크기와 구조는 (특히 아열대와 중위도에서) 대체로 2차 비산악 전선 대기중력파 항력이 만들어내는 것으로 보인다. 열대 지역에서는 비산악 (대류) 대기중력파가 2차 대기중력파 항력을 만드는데 중요한 역할을 할 것으로 보인다 (여기선 보이지 않음). 2차 산악 대기중력파 항력에 대한 구조는 비산악 전선의 경우 (Fig. 40) 처럼 단순하지는 않았지만, 전반적으로 크기가 작아, 총 2차 대기중력파 항력에는 크게 기여하지 않은 것으로 보인다.

Figure 37에서 1차 대기중력파 항력이 겨울 반구 고도 80 km 위에서 전반적으로 음의 값을 보인 것과 반대로 2차 항력은 대체로 양의 값을 보인 것으로 보아, 1차와 2차 항력이 서로 상쇄하는 경향성을 보이는 것으로 파악된다. 이러한 상쇄 경향은 SWAD에서도 발견되었던 점이다. 1월의 경우와 유사하게, 이러한 모습은 2차 대기중력파 항력이 겨울 중간권계면 위의 바람을 서풍(eastward)으로 유도하면서, 1차 항력이 음의 방향을 치우쳐진 결과인 것으로 해석된다. 여름 반구에서는 1-2차 대기중력파 항력은 반대의 부호 패턴 및 상관성을 보인다.

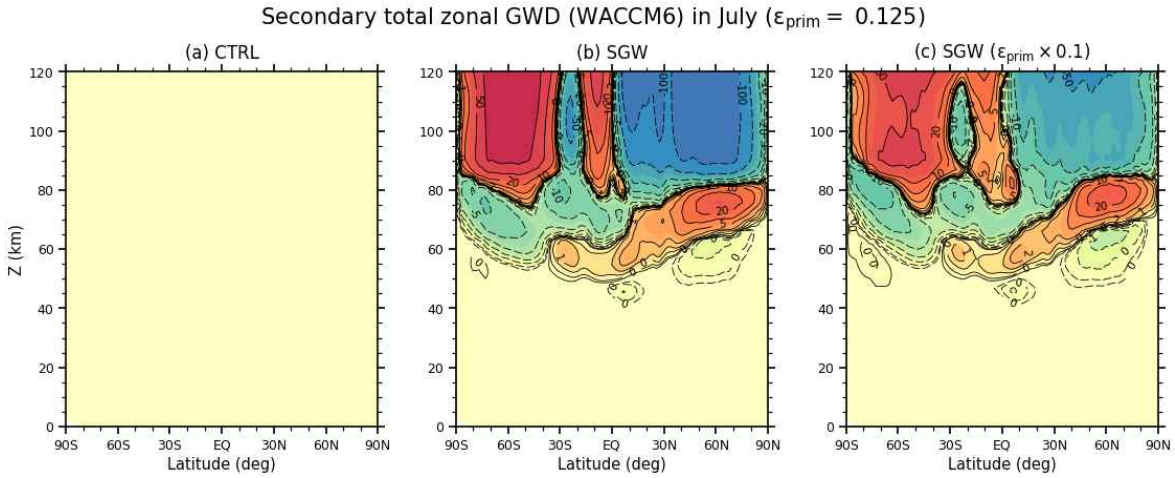

Figure 39: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal secondary total gravity wave drag for July in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

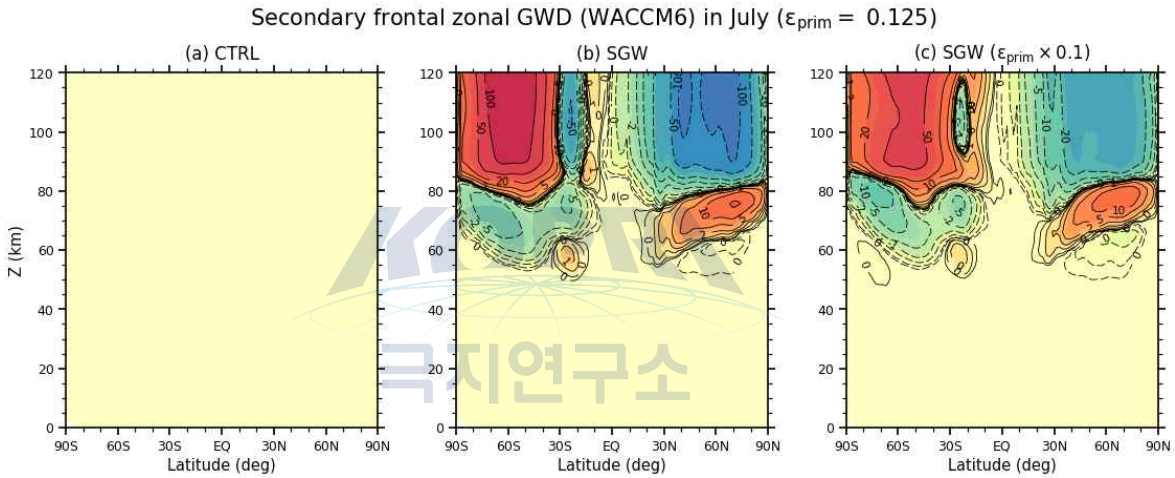

Figure 40: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal secondary frontal gravity wave drag for July in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contour intervals are logarithmic, and negative values are plotted in dashed lines.

2차 대기중력파 모수화를 WACCM6에 장착한 실험은 전반적으로 겨울 반구 극 소용돌이 위의 바람의 동풍 역전을 재역전시켜 CTRL의 계통 오차를 완화/제거하는 모습을 보였으며, 여름 반구 극지 중간권의 강한 한랭 오차도 상당히 줄여주는 것으로 확인되었다. 이제부터는 중간권 및 하부 열권에서 생성되는 물질의 수송 (특히 태양 활동에 의한 양성자나 지자기 폭풍과 연관된 전자가 유도하는 NOx와 같은 화학물질의 수송)에 관여하는 요소들에 2차 대기중력파 모수화가 어떠한 영향을 주는지 확인하고자 한다. 물질 수송에 관여하는 것은 우선 residual 자오면 순환이고, 그 다음은 대기중력파에 의해 유도되는 연직 난류 혼합이므로 그 순서대로 모델 결과를 분석하고자 한다.

Figure 41은 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 잔여 순환 (residual mean meridional circulation) 남북 흐름의 남북-고도 분포를 나

타낸 그림이다. WACCM6 CTRL 실험은 대류권의 해들리 순환이나 중간권의 여름 반구를 향한 pole-to-pole 순환을 잘 보여주고 있다. 중간권의 경우 CTRL은 JAWARA에 비해서 겨울 반구(북반구) 방향 자오면 흐름은 낮은 고도에 형성되어 있다. CTRL의 경우 열권 하부에서 반대 방향의 자오면 순환이 강하게 모의되는 반면, JAWARA에서는 이런 모습이 전혀 나타나지 않고 있어, JAWARA의 하부 열권 과정에 대한 신뢰도에 다소 의문이 생기기도 한다. 2차 대기중력파를 장착한 실험에서는 중간권에서 겨울 극으로 향하는 흐름이 CTRL에 비해 다소 약화된 상태로 좁은 층 (60-90 km)에서 한정되어 있는 것으로 보인다. 또한, 하부 열권에서 여름 극으로 향하는 흐름이 조금 아래쪽으로 하강한 것으로 보인다. 하지만 온도의 구조의 측면에서 2차 대기중력파 실험이 더 개선되었다는 점에서 이러한 모습이 오차를 증폭하는 모습으로 보이지는 않는다.

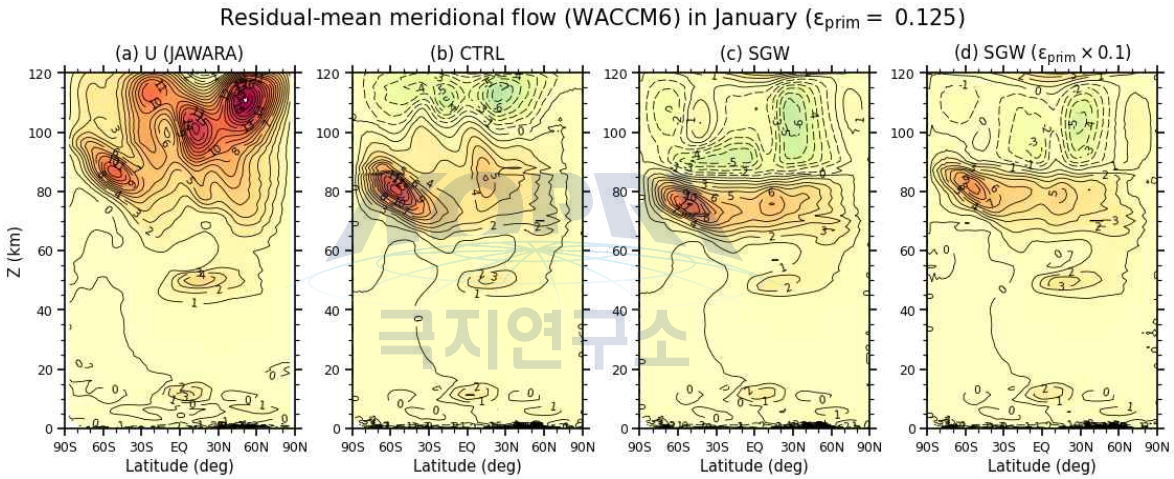

Figure 41: Latitude-height distributions of residual mean meridional flow (m/s) for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

Figure 42는 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 잔여 순환 연직 흐름의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. 대류권 열대지역의 해들리 순환의 상향 지역이 남반구로 치우친 모습은 JAWARA나 WACCM6 모든 실험에서 유사하게 나타나는 것으로 확인된다. 이는 북반구가 겨울 반구인 1월이기 때문에 나타나는 모습이다. 중간권의 경우, JAWARA에서는 연직 흐름이 고도 120 km까지 확장되어 양 극지역에 존재하는데 반해, CTRL 실험에서는 양 극지역의 연직 흐름은 고도 90 km 아래에 한정된 모습이다. 통상적으로 하부 열권에서는 반대 방향의 자오면 질량 순환이 존재한다는 점에서, JAWARA에 비해 CTRL의 모습이 좀 더 현실성이 있어 보인다. CTRL에서의 이러한 양 극지역에서의 연직 흐름 (겨울 반구에서 하향 흐름, 여름 반구에서 상향 흐름)은 2차 대기중력파 모수화를 사용하는 실험에서는 다소 약하다.

JAWARA의 경우 양 극지역의 연직 흐름이 50 km까지도 잘 나타나는데 반해, WACCM6 실험에서는 다소 약한 것으로 보인다.

Figure 41의 남북 순환의 결과와 종합해 볼 때, 2차 대기중력파 실험에서 중간권 자오면 잔여 순환은 다소 약하게 모의되는 것으로 판단하는 것이 합리적으로 보인다. 추가로, 1차 파동의 간헐성 인자를 줄인 SGW0.1에서는 이런 양 극지역에서 나타나는 연직 흐름이 조금 높게 형성되어 있어서, 중간권계면의 높이가 약간 더 높아진 것으로 판단된다. 앞 절의 SWAD 실험에서도 보였듯이, 1차 대기중력파 항력과 2차 대기중력파 항력이 대체로 상쇄하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 상쇄의 맥락에서 자오면 순환의 약화를 이해할 수 있을 것으로 보인다.

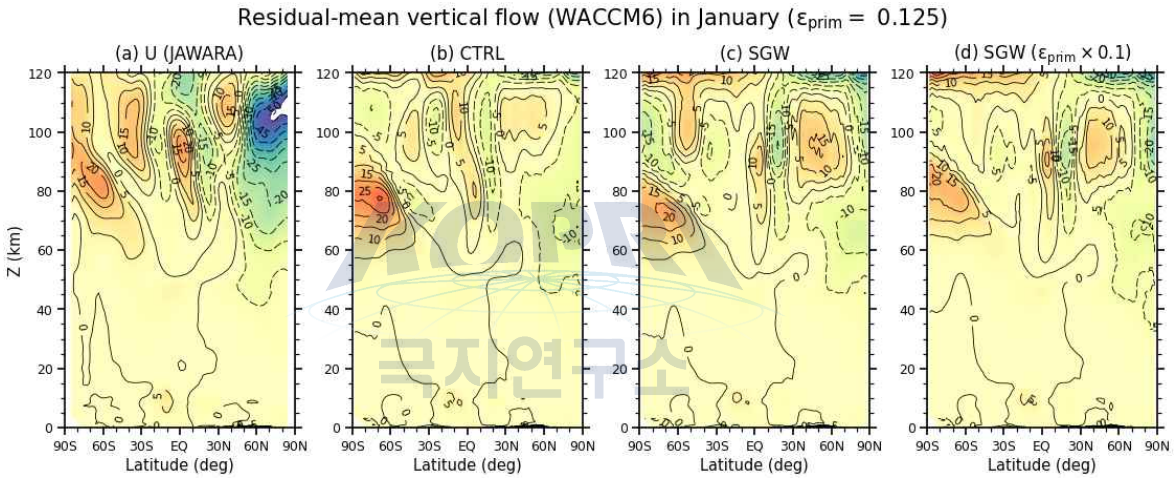

Figure 42: Latitude-height distributions of residual mean vertical flow (mm/s) for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

Figure 43은 MERRA2, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 잔여 순환 남북 흐름의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 나타낸 그림이다. 중간권 및 성층권에서의 잔여 순환의 남북 흐름은 MERRA2와 비교했을 때, 대체로 합리적으로 모의된 것으로 판단된다. CTRL과 SGW에서 남북 흐름이 다소 강하게 모의되는 모습이 나타났지만, 1차 대기중력파의 간헐성 인자를 줄은 SGW0.1에서는 자오면 남북 순환도 약하게 모의되었다. Figure 44의 잔여 순환 연직 흐름의 비교에서도 알 수 있듯이 CTRL에서 양 극지역의 연직 속도가 다소 강하게 모의되는 것을 확인할 수 있었다. 2차 대기중력파를 고려한 SGW와 SGW0.1에서는 연직 흐름이 다소 약하게 모의되었는데, 이런 약화는 MERRA2와 비슷해지는 측면이 있어 긍정적인 측면으로 보인다.

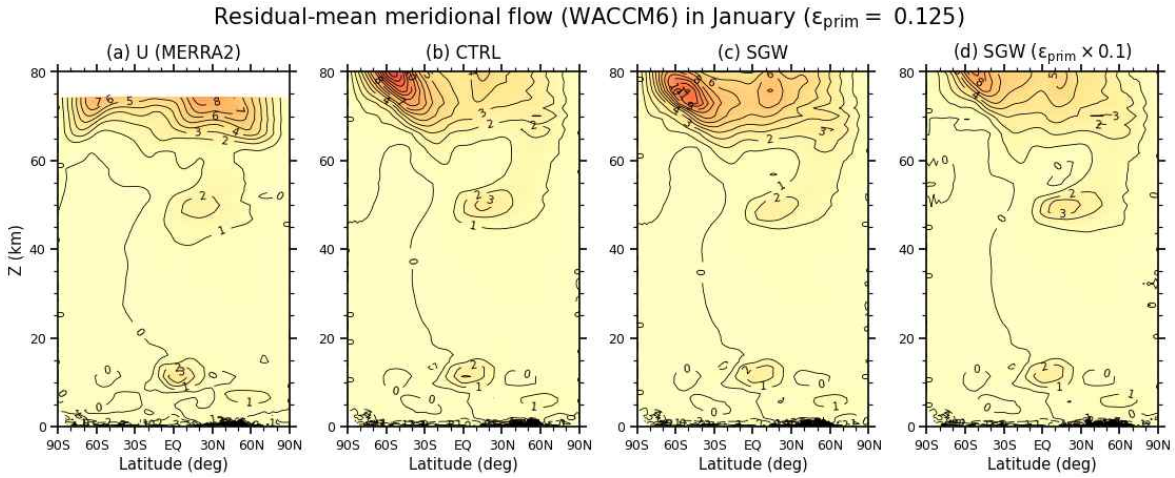

Figure 43: Latitude-height distributions of residual mean meridional flow (m/s) for January in (a) MERRA2, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

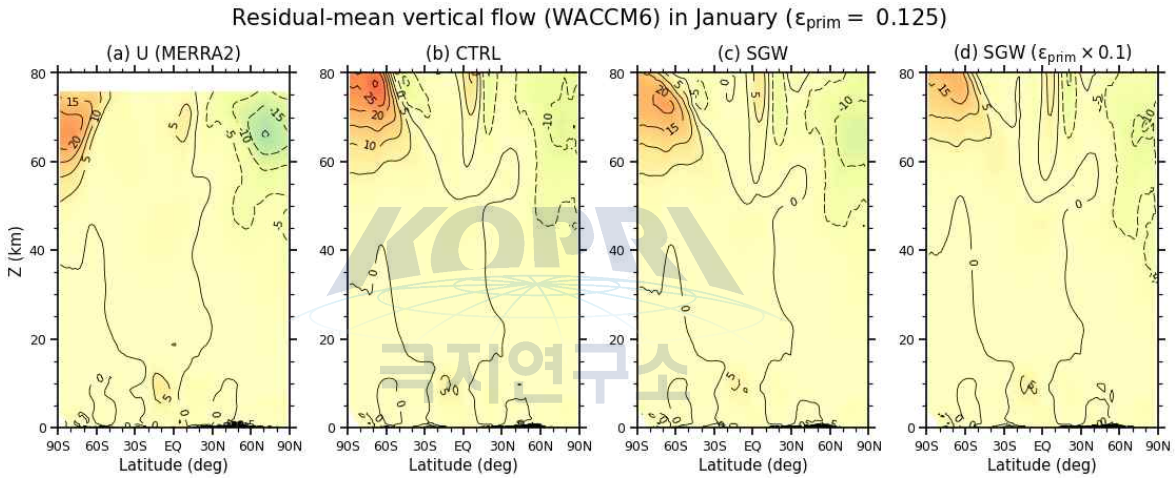

Figure 44: Latitude-height distributions of residual mean vertical flow (mm/s) for January in (a) MERRA2, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

Figure 45는 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 잔여 순환 (residual mean meridional circulation) 남북 흐름의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. 1월의 경우와 마찬가지로 CTRL은 대류권 해들리 순환이나 중간권의 여름 반구를 향한 pole-to-pole 순환을 잘 모의하고 있다. 중간권에서 CTRL은 JAWARA에 비해 겨울 방향 (남반구 방향) 자오면 순환은 낮은 고도에 형성되어 있다. CTRL의 경우 열권 하부에서 반대 방향의 자오면 순환이 강하게 모의되는 반면, JAWARA에서는 이런 모습이 전혀 나타나지 않고 있다 (JAWARA의 하부 열권 순환은 검증이 필요해 보인다). 2차 대기중력파를 장착한 실험들에서는 중간권에서 겨울 극 (남반구)으로 향하는 흐름이 CTRL에 비해 다소 약화된 것으로 보이나, 좁은 층 (60-90 km)에서 한정되어 있는 것으로 보인다. 또한, 하부 열권에서 여름 극으로 향하는 흐름

이 조금 아래쪽으로 하강한 것으로 보인다.

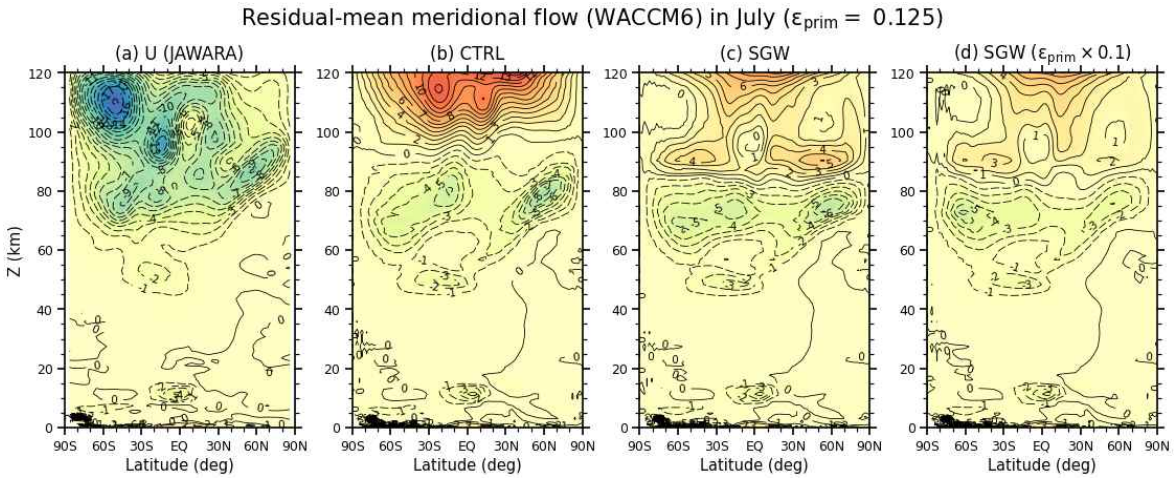

Figure 45: Latitude-height distributions of residual mean meridional flow (m/s) for July in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

Figure 46은 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 잔여 순환 연직 흐름의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. 대류권 열대지역의 해들리 순환의 상향 지역이 북반구로 치우친 모습은 JAWARA나 WACCM6 모든 실험에서 유사하게 나타나는 것으로 확인된다. 이는 남반구가 겨울 반구인 7월이기 때문에 나타나는 모습이다. 중간권의 경우, JAWARA에서는 연직 흐름이 고도 120 km까지 확장되어 양 극지역에 존재하는데 반해, CTRL 실험에서는 양 극지역의 연직 흐름은 고도 90 km 아래와 100 km 위로 확장된 모습이다. 1월과 달리 극지 하부 열권에서도 상당히 강한 연직 흐름이 나타났다는 점이 특징적이다. 다만 JAWARA와는 그 부호가 정반대로 나왔다. CTRL에서의 이러한 양 극지역에서의 연직 흐름 (여름 반구에서 연직 수렴, 겨울 반구에서 연직 발산)은 2차 대기중력파 모수화를 사용하는 실험에서는 다소 약하게 나타났다. Figure 45의 남북 순환의 결과와 종합해 볼 때, 1월에서와 유사하게, 2차 대기중력파 실험에서 중간권 자오면 잔여 순환은 다소 약하게 모의되는 것으로 판단하는 것이 합리적으로 보인다. 추가로, 1차 파동의 간헐성 인자를 줄인 SGW0.1에서는 이런 양 극지역에서 나타나는 연직 흐름이 조금 높게 형성되어 있어서, 중간권계면의 높이가 약간 더 높아진 것으로 판단된다. 앞 절의 SWAD 실험에서도 보였듯이, 1차 대기중력파 항력과 2차 대기중력파 항력이 대체로 상쇄하는 경향을 보이고 있으며, 이러한 상쇄의 맥락에서 자오면 순환의 약화를 이해할 수 있을 것으로 보인다.

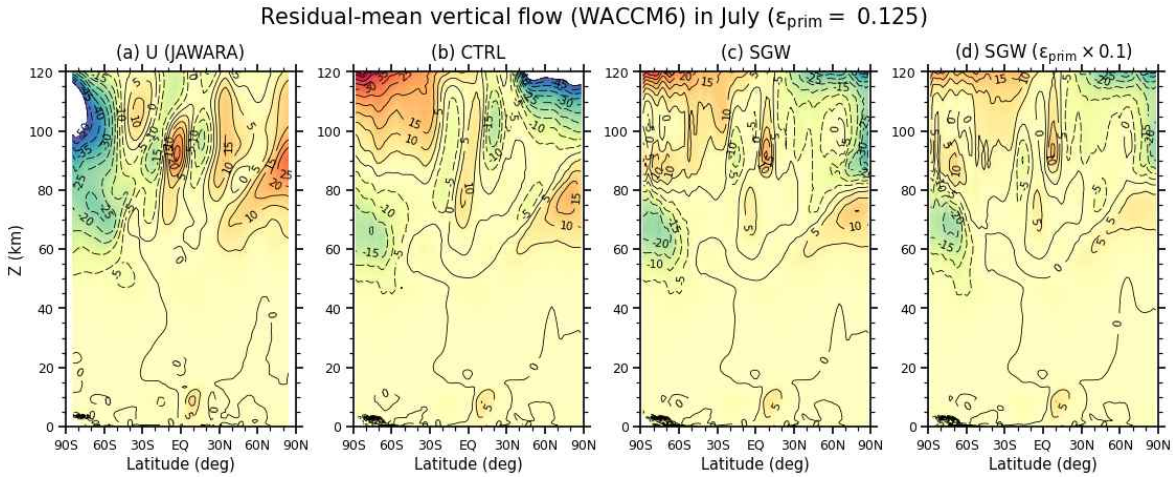

Figure 46: Latitude-height distributions of residual mean vertical flow (mm/s) for July in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

Figure 47은 MERRA2, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 잔여 순환 남북 흐름의 남북-고도 분포를 고도 80 km까지 나타낸 그림이다. 중간권 및 성층권에서의 잔여 순환의 남북 흐름은 MERRA2와 비교했을 때, 모델이 다소 약하긴 하지만 대체로 합리적으로 모의된 것으로 판단된다. 1차 대기중력파의 간헐성 인자를 줄인 SGW0.1에서는 자오면 남북 순환이 더 약하게 모의하였다. Figure 48의 연직 흐름에서도 알 수 있듯이 CTRL에서 양 극지역의 연직 속도가 다소 강한 것을 확인할 수 있었다. 2차 대기중력파를 고려한 SGW와 SGW0.1에서는 연직 흐름이 다소 약하게 모의되었는데, 이런 약화는 MERRA2와 비슷해진다는 면에서 긍정적으로 보인다.

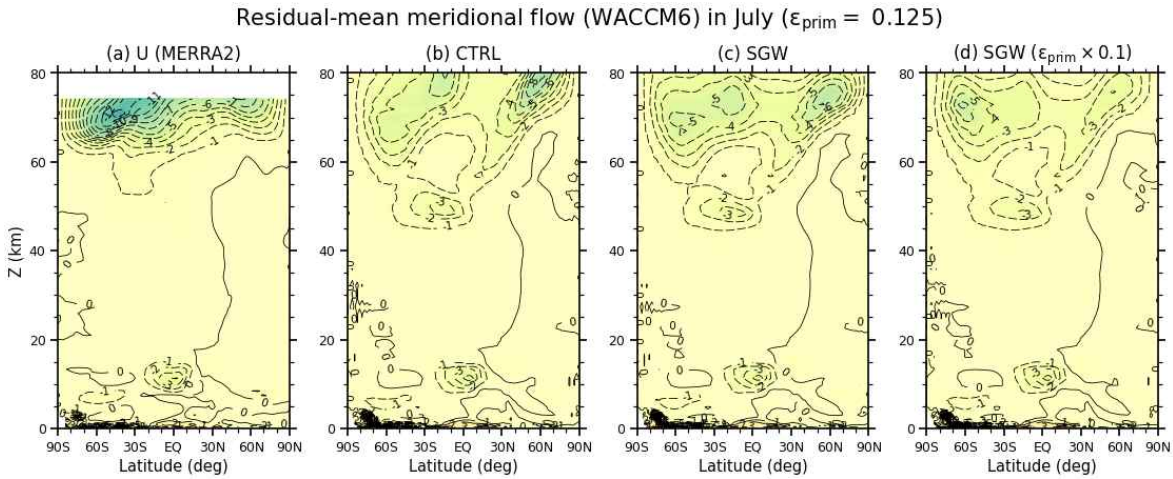

Figure 47: Latitude-height distributions of residual mean meridional flow (m/s) for July in (a) MERRA2, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

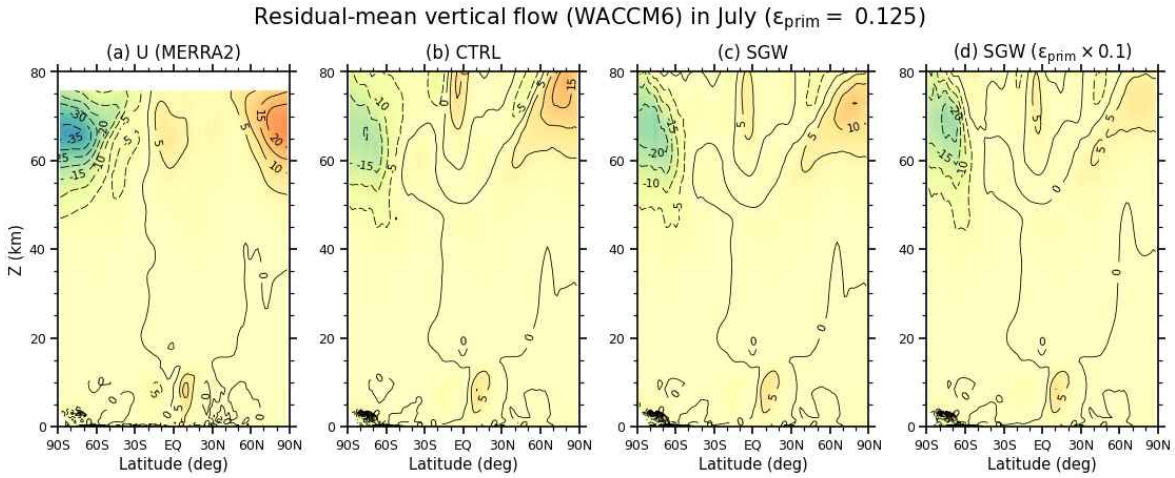

Figure 48: Latitude-height distributions of residual mean vertical flow (mm/s) for July in (a) MERRA2, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

중·고층대기에서 기세상/입자상 물질을 수송하는 기능을 하는 것은 지금까지 살펴 본 잔여 순환 외에도 연직 혼합을 들 수 있다. Figure 49는 대기중력파가 유도하는 총 난류 혼합 계수를 WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대해 보여준다. 분명하게 2차 대기중력파 모수화를 고려하는 경우, 난류 혼합 계수는 고도 100 km 주변에서의 최대 10배까지 증가한다. 1차 대기중력파 간헐성 인자를 줄인 SGW0.1의 경우에는 최대 5-6배 정도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 고도 80 km 아래에서는 난류 혼합이 급격하게 증가하지는 않은 것으로 보이나, 작은 비율이라 할지라도 난류 혼합이 증가하는 경향은 고도 50-60 km에서도 확인된다. 이와 같은 2차 대기중력파의 연직 난류 혼합에의 효과는 7월에 대해서도 동일하게 발견되는 것으로 보아, 다른 계절에서도 유사하게 발견될 것으로 판단된다 (Fig. 49).

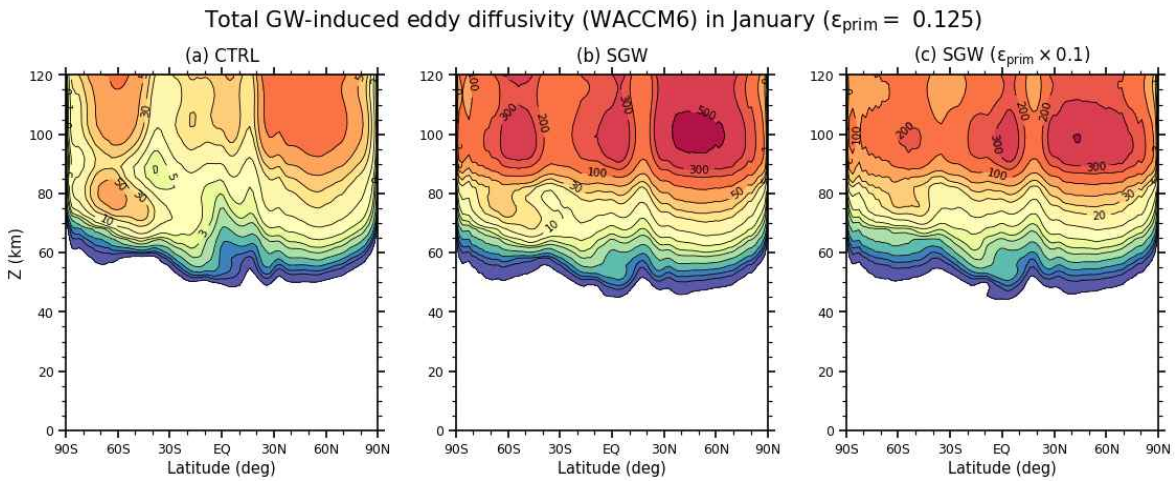

Figure 48: Latitude-height distributions of total gravity-wave induced eddy diffusivity (m^2/s) for January in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

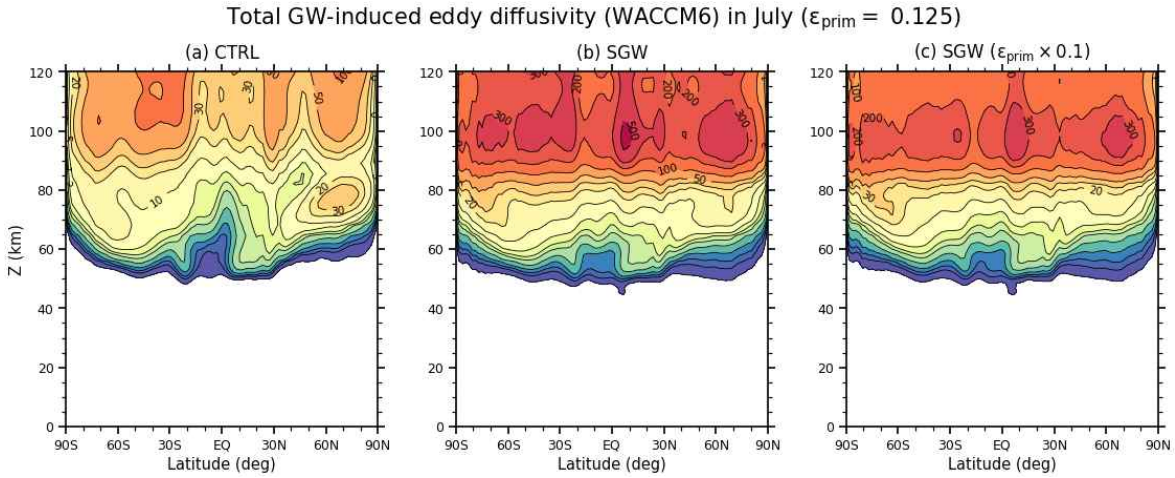

Figure 49: Latitude-height distributions of total gravity-wave induced eddy diffusivity (m^2/s) for July in (a) WACCM6 CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

2차 대기중력파가 장착된 2개의 모델 실험 모두에서 (SGW와 SGW0.1) 자오면 잔여 순환은 중간권에서 다소 약화되는 모습을 보였다. 이렇게 2차 대기중력파 모수화의 영향 혹은 1차 대기중력파의 간헐성 인자를 10%로 줄이는 상황에서도 중층대기 (성층권-중간권)의 분해되는 파동에 의한 역학은 크게 변하지는 않을 것으로 보인다. 실제로 2차 대기중력파 모수화가 WACCM6의 중층대기 역학에 어느 정도의 영향을 주었는지 확인하기 위하여, 변형된 오일러리안 평균 (transformed Eulerian mean) 방정식 계를 이용한 엘리아센-팜 (Eliassen-Palm; EP) 플럭스와 발산항을 조사하였다. 여기서는 EP 플럭스 발산항과 EP 플럭스의 연직 성분을 비교 조사한다.

Figure 50은 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 EP 플럭스 발산 (EP flux divergence; EPFD)의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. JAWARA의 결과에서 겨울 반구 (북반구) 중위도 대류권 상부의 음의 EPFD, 중위도 성층권계면 부근의 음의 EPFD, 그리고 중간권서 연직으로 펼쳐진 음의 EPFD의 구조가 특징적이다. CTRL에서도 이와 같은 EPFD의 구조가 유사하게 나타나는 모습을 확인할 수 있다. 성층권계면 부근 음의 EPFD는 JAWARA에 비해서 좀 약하게 모의되었다. 전반적으로 유사한 구조의 EPFD는 2차 대기중력파 모수화를 장착한 경우에도 얻을 수 있었다. 1차 파동의 간헐성 인자를 10%로 100 km에서 줄인 SGW0.1에서는 겨울 성층권계면 음의 EPFD도 JAWARA의 값과 유사하게 나왔다.

여름 반구 (남반구)의 경우 JAWARA는 대류권계면의 음의 EPFD를 제외하고는 80 km 위에서 약한 음의 EPFD만을 보여주었다. 반면에 CTRL은 80 km에서 양, 그 위

에서 음의 상당히 큰 크기를 갖는 EPFD를 여름 반구 극지역에서 모의하였다. 2차 대기중력파 모수화를 포함하는 SGW에서 여름 반구 고위도의 EPFD 구조는 조금 약해졌으며, 1차 파동에 대한 간헐성 인자를 줄인 SGW0.1에서는 그 EPFD의 크기가 더 감소하여 JAWARA와 유사해지는 모습을 보였다. 앞서 많은 변수 혹은 지표들의 분석에서도 알 수 있듯이 SGW와 SGW0.1이 대체로 합리적인 형태의 바람, 온도 그리고 중층대기 역학의 모습을 보여주었으며, 종종 SGW0.1이 조금 더 재분석 자료에 근접하는 모습을 보여주기도 하였다. 이와 같은 사실은 1차 대기중력파 모수화의 영향이 중간권 상부나 열권에서는 줄어드는 것이 전반적으로 모델의 성능 개선에 도움이 될 수 있다는 암시를 주는 것으로 보인다.

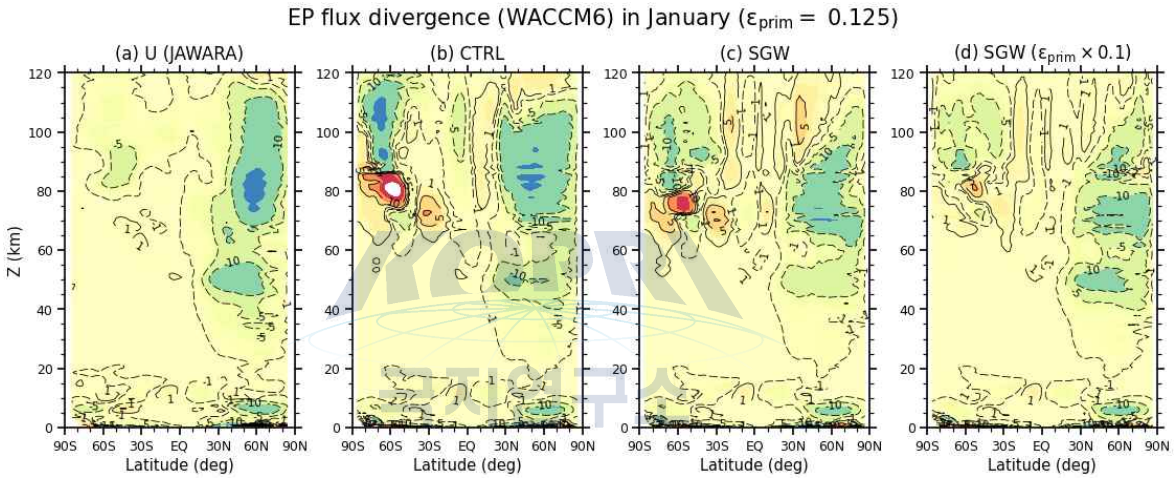

Figure 50: Latitude-height distributions of Eliassen-Palm flux divergence (m/s/day) for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

Figure 51은 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 EP 플럭스 발산 (EPFD)의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. JAWARA의 결과에서 겨울 반구 (남반구) 중위도 대류권계면 부근에서 음의 EPFD, 중위도 중간권과 고의도 중간권계면 부근에서 음의 EPFD를 보여준다. 겨울 반구 극지 80 km에서 중위도 60 km로 내려오는 공간에 양의 EPFD가 존재했다. CTRL의 경우에는 겨울 반구 중위도 성층권계면에서 강한 음의 EPFD가 나타나고 그 위로 중간권에서 음의 EPFD가 나타나는 모습이다. 겨울 반구 60-80 km에 존재하는 양의 EPFD는 JAWARA와 유사한 형태를 보이는 것으로 보인다. CTRL에서 나타난 EPFD의 모습은 SGW와 SGW0.1에서도 거의 유사하게 나타난다. 다만, 1월의 경우와 유사하게 SGW0.1의 경우 EPFD의 크기가 전반적으로 약한 모습을 띄고 있으며, 여름 반구의 경우 SGW0.1의 약한 음의 EPFD가 JAWARA와 가장 비슷한 모습을 띄고 있었다.

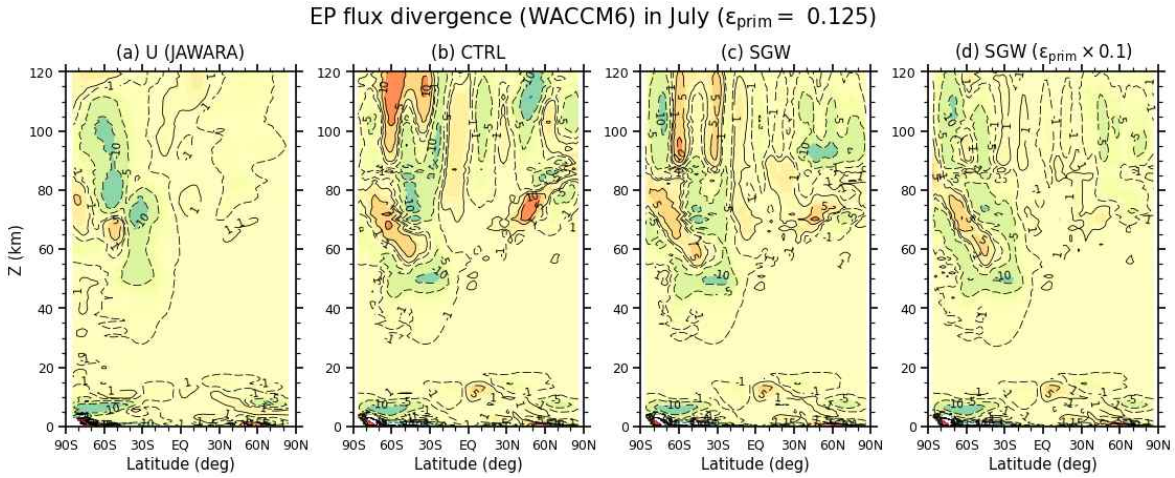

Figure 51: Latitude-height distributions of Eliassen-Palm flux divergence (m/s/day) for July in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

Figure 52는 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 1월에 대한 EP 플럭스 연직 성분 (EPFZ)의 남북-고도 분포를 나타낸 그림이다. JAWARA와 WACCM6 모델 결과와의 큰 차이점 중 하나는 JAWARA에서 겨울 반구 대류권에서 성층권으로 상향 전파하는 EP 플럭스 상향 성분이 모델과 비교해서 상당히 강하다는 점, 열대지역에 존재하는 하향 EP 플럭스가 JAWARA에서는 작고 비교적 좁은 영역에만 존재한다는 점, 그리고 여름 반구 중간권에서 JAWARA는 특별히 강한 EP 플럭스 연직 성분이 없다는 점이다.

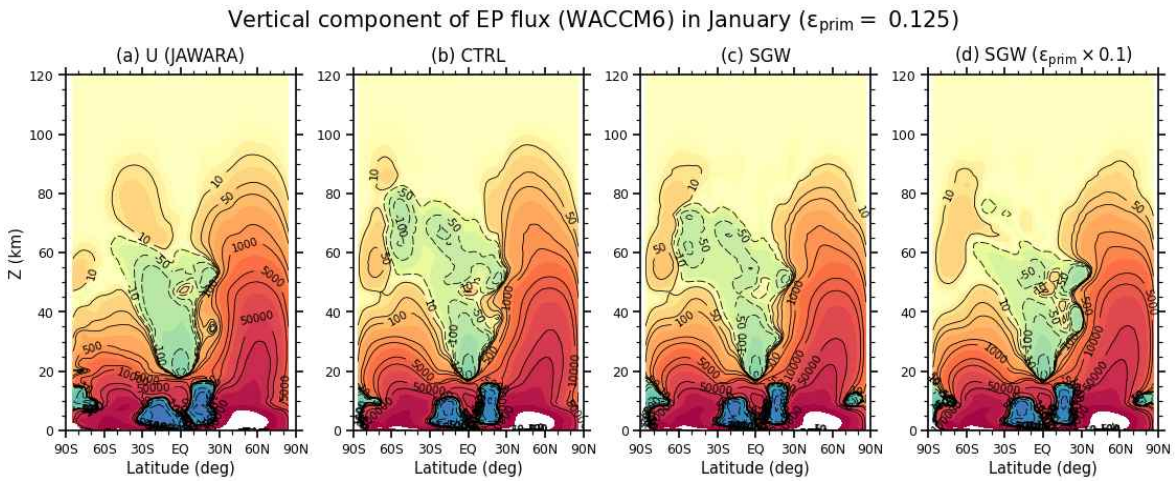

Figure 52: Latitude-height distributions of the vertical component of Eliassen-Palm flux for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

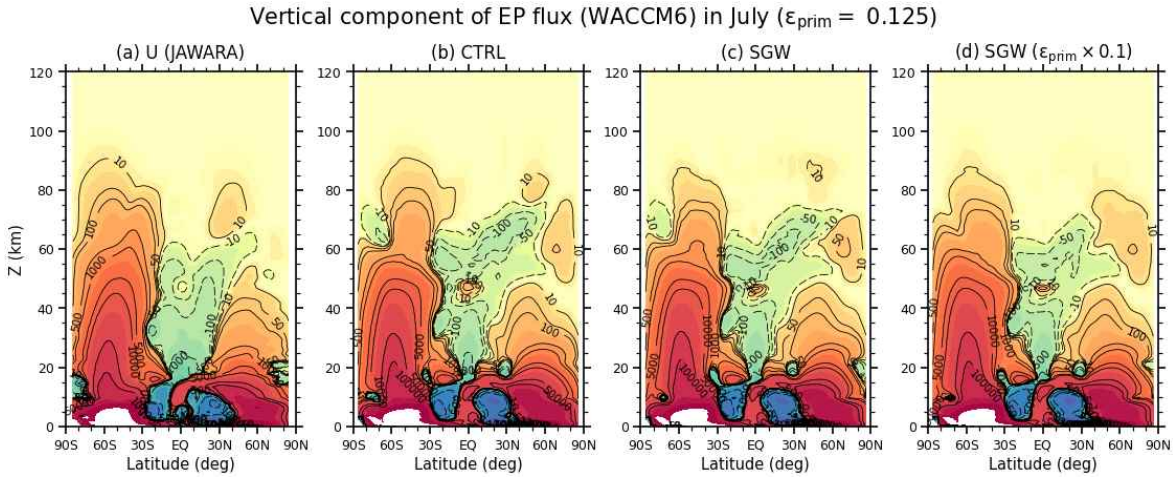

Figure 53: Latitude-height distributions of the vertical component of Eliassen-Palm flux for July in (a) JAWARA, (b) WACCM6 CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines.

Figure 53은 JAWARA, WACCM6 CTRL, SGW, SGW0.1의 30년 평균된 7월에 대한 EPFZ이다. 1월과 달리, 7월은 JAWARA의 겨울 중위도 대류권계면에서의 상향 플럭스가 모델보다 더 작았다. 열대지역의 하향 EP 플럭스가 좁은 지역에 나타난 것은 1월과 유사했다. 1월과 7월의 EPFZ의 관점에서 재분석 자료인 JAWARA와 가장 비슷한 경우는 SGW0.1이었다. 7월 남반구 중간권 고위도에서 CTRL의 경우 나타났던 하향 EPFZ나, 열대지역에 비교적 넓게 존재하는 하향 EPFZ와 같이 오차를 보인 모습은 SGW0.1에서는 나타나지 않았다. TEM 방정식 계로 살펴본 중층대기 역학과 관련해서 대체로 SGW0.1이 가장 재분석에 근접하였다. 즉, 중상부 중간권의 1차 대기중력파 항력을 줄이는 것이 모델 성능 향상에 분명히 기여하고 있다는 것을 알 수 있었다.

제 4 절 중층대기 화학 및 전리권 D층 이온화학이 포함된 WACCM

이 절에서는 2차 대기중력파 항력 모수화를 미국 NCAR에서 개발한 WACCM6에 장착하고, 그 WACCM6를 중층대기 화학과정 및 전리권 D층을 위한 이온화학 과정을 포함하는 화확 모듈을 결합한 WACCM을 이용하여, 2차 대기중력파의 효과가 화학물질, 특히 고에너지 입자에 의한 이온화를 통해 생성된 물질 중 NOx와 같이 비교적 생존 기간이 긴 화학물질, 수송에 주는 영향을 살펴보고자 한다.

본 연구에서 사용할 모델 중층대기 화학 과정이 포함된 WACCM6에 대한 설명은 앞서 언급했던 Gettelman et al., (2019)에 잘 기술되어 있다. 참고로 단순화된 화학이 장착된 WACCM6 실험을 생성하기 위해서 CESM2.2.0으로부터 아래에 표기된 바와 같이 FWmadHIST라는 component set을 이용하여 실험을 생성하였다. 이전의 실험과 같이 수평적으로 2도 격자 (f19_f19_mg17)를 사용하였다.

```
export SCRATCHDIR="/data3/songi/SCNDGWMAD/scratch"
export INPUTDIR="/data/CESM2/inputdata"
export MACHINENAME="lumos"

cd ~/CESM2/cesm2.2.0/cime/scripts
./create_newcase --case ${SCRATCHDIR}/fw2ctrl --compset FWmadHIST --res f19_f19_mg17
--machine ${MACHINENAME} --compiler intel --run-unsupported -i ${INPUTDIR}

./xmlchange CAM_CONFIG_OPTS="-phys cam6 -chem waccm_mad_mam4 -nlev 70"
```

해당 compset은 https://docs.cesm.ucar.edu/models/cesm2/config/compsets.html 에서 검색할 수 있으며, 아래와 같이 각 컴포넌트 모델이 설정된다.

Alias	Long name	Defined By	Support Level
FWmadHIST	HIST_CAM60%WCMD_CLM50%SP_CICE%PRES_DOCN%DOM_MOSART_SGLC_SWAV	cam	Defined

Scientifically Supported Grids

Details

	Value	Description
Initialization Time	HIST	1850: Pre-Industrial; 2000 present day: Additional initialization times defined by components.
Atmosphere	CAM60%WCMD	CAM cam6 physics:WACCM with middle atmosphere chemistry with enhanced D-region ion chemistry:
Land	CLM50%SP	clm5.0:Satellite phenology:
Sea-Ice	CICE%PRES	Sea ICE (cice) model version 5 :prescribed cice
Ocean	DOCN%DOM	DOCN prescribed ocean mode
River runoff	MOSART	MOSART: MOdel for Scale Adaptive River Transport
Land Ice	SGLC	Stub glacier (land ice) component
Wave	SWAV	Stub wave component

단순화된 화학 과정으로 모의했던 앞선 WACCM6에서와 유사하게 CTRL, SGW, SGW0.1의 세 개의 실험을 수행하며, 2000년부터 현재에 대한 15년 historical run을 수행하였다. 앞서 SWAD 실험과 같이 CTRL은 2차 대기중력파 모수화를 사용하지 않은 규준 실험이고, SGW는 1차와 2차 대기중력파 모수화를 그대로 함께 사용한 경우, SGW0.1은 2차 대기중력파를 사용하면서, 1차 파동의 간헐성 인자를 고도 100 km에서 10%까지 감소시킨 경우를 나타낸다 (간헐성 인자 관련해서는 Fig. 4 참조). 앞의 실험과 다르게 2차 대기중력파에 의한 난류 확산의 증가를 계산하지 않는 실험 (SGWx)을 추가로 수행하였다. 이 실험을 통해서 2차 대기중력파에 의한 물질 수송의 변화가 자오면 잔여 순환의 영향이 큰 것인지 연직 난류 확산에 의한 것인지 좀 더 명확히 할 수 있다. 물론 앞선 실험들에서도 이미 언급했듯이 2차 대기중력파로 인한 중층대기 잔여 순환의 변화는 대단하지는 않아서, 물질 수송에 변화가 일어난다면 그것은 연직 난류 확산에 의한 것일 것으로 예상된다.

구분	설명
CTRL	1차 대기중력파 모수화만으로 실행된 15년 WACCM6 historical 실험
SGW	1차와 2차 대기중력파 모수화를 모두 사용한 15년 historical 실험
SGWx	SGW와 동일하나 2차 파동에 의한 난류 확산 계수의 증가를 고려하지 않음.
SGW0.1	SGW와 동일하나, 1차 파동 간헐성 인자를 100 km에서 10%로 줄인 실험

2000년부터 2014년까지 15년 historical run을 하는데 있어, 현재 연구에서 특히 중요한 점은 고에너지 양성자 및 전자 (혹은 galactic cosmic ray; GCR)가 지구 대기에 침투하면서 발생하는 대기 성분 이온화와 이에 따른 산화질소 (NOx) 및 산화수소 (HOx)의 생성과 수송이다. 모델 실험이 소위 “historical”인 만큼, 실제 현실적인 태양 활동과 지구자기장의 변화에 대한 정보가 모델 입력값으로 들어가야만 한다. 현재 WACCM6에서는 태양 활동은 F10.7 (태양 EUV의 활동성의 지표로 사용되는 10.7 cm 파장의 태양 복사), 지구 자기장의 활동성은 Ap 인덱스로 입력되도록 설정되어 있으며, 이에 따른 대기층에 나타날 이온화율은 위도-고도(압력) 분포로 주어져 있다. 이온화율은 양성자, 중간 정도의 에너지 수준을 낮는 전자, 그리고 GCR에 대한 입력값이 필요하다. 우주환경과 관련된 이 모든 변수들은 일 평균 (daily)값으로 제공되어야 한다. 이 입력값들은 CMIP6 모델링에서 우주환경 효과를 고려하기 위한 표준적인 입력값이다.

KOPRI 극지연구소

Figure 54는 2000년부터 2014년말까지 15년간에 걸친 (위에서부터 아래로) Ap 인덱스, F10.7 인덱스, 태양 양성자 이벤트(SPE)에 의한 이온화율, 중간 수준 에너지를 갖는 전자 (medium energy electron; MEE)에 의한 이온화율, 그리고 GCR에 의한 이온화율의 월평균 값에 대한 시계열을 나타낸다. 3개의 이온화율은 모두 고도 78 km, 북반구 68도 위치에서의 값을 나타낸다. 이온화율에 대한 데이터는 기본적으로 동서방향으로 평균이 되어 있어, 동서 방향에 대한 의존성이 없으며, 남북으로도 열대지역을 중심으로 대칭성을 갖게 되어 있어, 남반구 68도에서도 동일한 패턴의 SPE, MEE, GCR에 의한 이온화율을 확인하게 된다. 태양 활동은 2009-2010년에 최소 상태였으며, 태양 활동이 강했던 2002년 경보다 2-3년 뒤에 지구 자기장 활동의 최대 (Ap의 최대)가 나타나는 약간 위상 차이가 존재하는 모습을 보여준다. SPE는 태양 활동이 가장 강했던 (F10.7 기준) 때에 간헐적으로 상당히 강한 이온화율 (10^9)을 보여주고, MEE는 지속적으로 상당히 강한 이온화율 (10^8)을 보여준다. GCR은 크기에 있어서는 상대적으로 SPE와 MEE에 비해서는 작다.

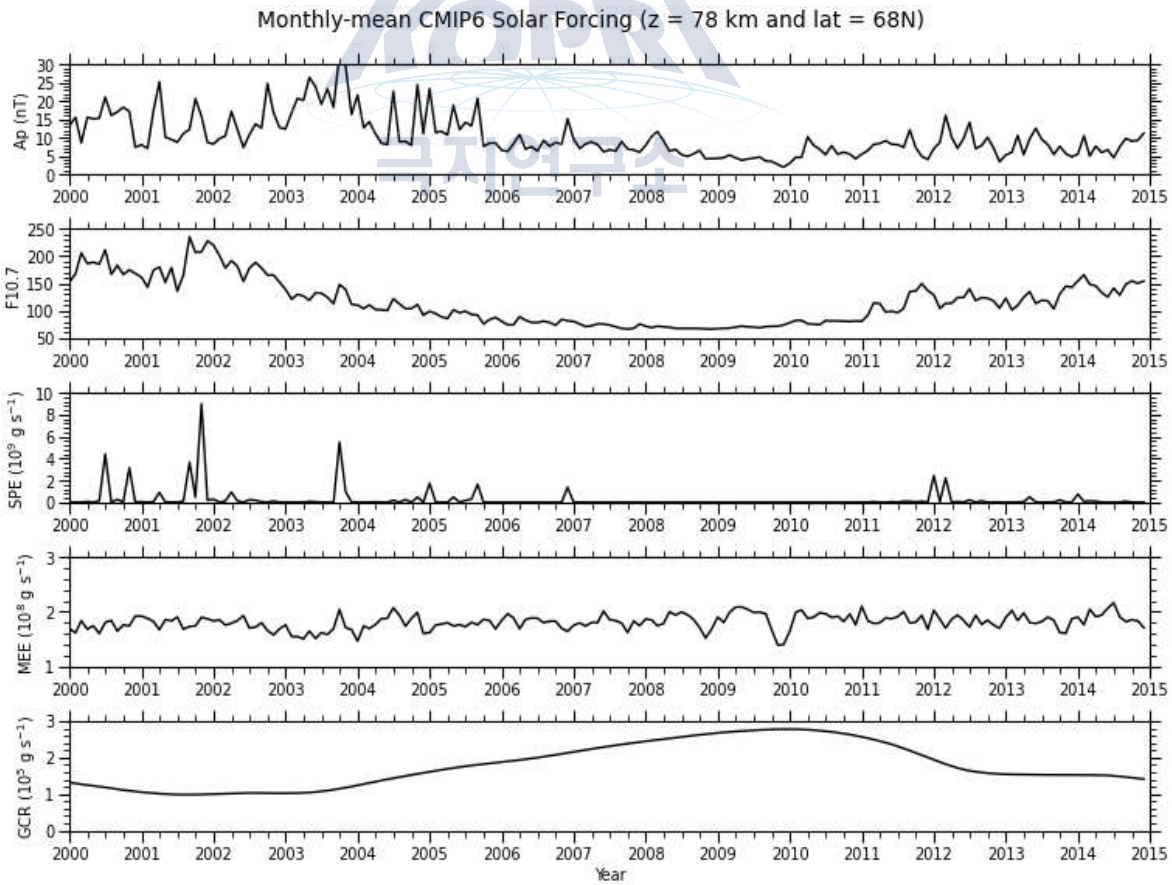

Figure 54: Time series of monthly-mean *Ap*, F10.7, SPE ionization rate (10^9-10^{10} g s^{-1}), MEE ionization rate (10^8 g s^{-1}), and GCR ionization rate (10^5 g s-1) from 2000 to 2014. Ionization rates are values at 78 km in altitude and 68°N.

Figure 55는 2003년 10월 31일 Halloween 지자기 폭풍때의 태양 양성자 (SPE)와 중간 수준 에너지 전자 (MEE), 및 GCR에 의한 이온화율의 남북-고도 분포를 보여준다. 양성자와 전자는 대체로 고위도 기구 자기장을 따라서 지구 대기로 유입되기 때문에 대체로 70도 정도의 고위도 지역에 강한 이온화율이 나타난다. 양성자의 경우는 고도 40-50 km의 성층권까지도 대기를 이온화시킬 수 있는 것으로 보이고, MEE는 대체로 열권 하부 및 중간권 하부의 고층대기에서 대기를 이온화시킨 것으로 확인된다. 매우 강한 지자기 폭풍이어서 MEE에 의한 이온화율이 매우 높다. GCR은 대체로 고위도 지역에 작은 이온화율을 보여주고 있다.

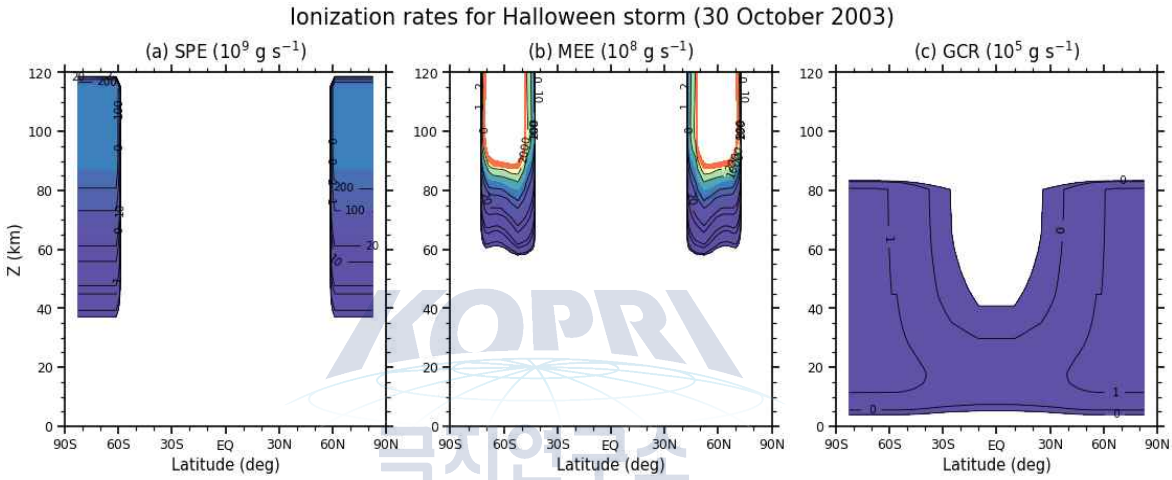

Figure 55: Latitude-height distributions of the ionization rates of (a) solar proton (10^9 g s^{-1}), (b) medium energy electrons (10^8 g s^{-1}), and (c) galactic cosmic rays (10^5 g s^{-1}) on 31 October 2003.

중층대기 화학 과정과 전리권 D층 이온화학을 포함하는 WACCM6에서의 15년 평균된 동서평균 동서 바람이나 온도는 앞 절에서 설명했던 간단화된 화학과정으로 30년 수치모의된 바람과 온도와 크게 차이를 보이지는 않았다 (Figs. 56-57). 단순화된 화학과정을 사용하던 WACCM6와 비교해보면 구조적으로는 거의 차이가 없고, 국지적으로 바람이나 온도의 크기 차이가 약간 나타나는 정도의 차이만을 보이는 것을 확인할 수 있다 (Figs 25와 29 참조). 바람과 온도만이 아니라, 화학물질의 수송을 담당하게 될 요인 중 하나인 중층대기 잔여 순환도 앞 절에서 언급했던 WACCM6의 수치모의와 크게 다르지 않았다. 잔여 남북 및 연직 흐름은 모두 이전의 AMIP 30년 실험과 매우 유사한 구조와 크기를 보여주었다. 유사하게 2차 대기중력파를 고려한 실험에서 잔여 순화의 강도는 다소 약해진 면도 화학과정을 포함한 실험에서 유사하게 나타났다.

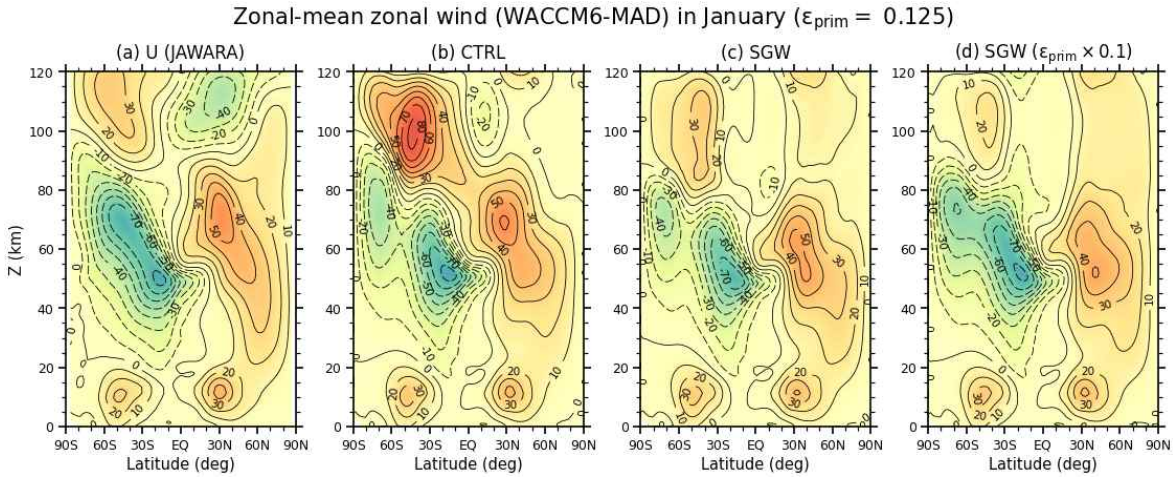

Figure 56: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6-MAD CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

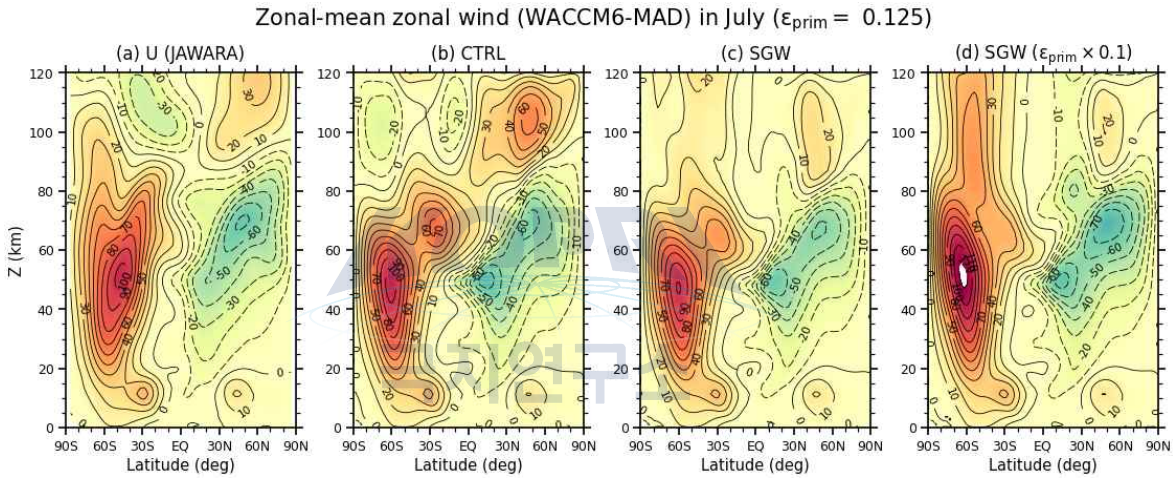

Figure 57: Latitude-height distributions of zonal-mean zonal wind for January in (a) JAWARA, (b) WACCM6-MAD CTRL, (c) SGW, and (d) SGW0.1. Contour interval is 10 m/s.

Figures 58과 59는 중•고층대기 물질 수송에 중요한 역할을 하는 또 다른 요인인 연직 난류 혼합에 대한 15년 평균 1월 및 7월 혼합 계수를 나타낸다. 앞서 30년 AMIP WACCM6 결과에서와 같이, 2차 대기중력파를 고려한 경우 (SGW와 SGW0.1)와 같이 (Figs. 48-49), 중간권계면 및 열권 하부에서 연직 난류 혼합 계수가 거의 5배에서 10배까지 증가한 것을 확인할 수 있었다. Liu (2025)에서 모델이 고해상도화 할 수록, 모델리 유도하는 섭동에 의한 하양 수송이 대폭 증가할 수 있고, 그러한 하향 수송의 증가가 관측과 더 일치하는 결과라는 것을 생각할 때, 2차 대기중력파를 고려했을 때 얻게 될 난류 혼합 계수의 증가는 긍정적인 측면을 갖는 것으로 해석될 수 있다.

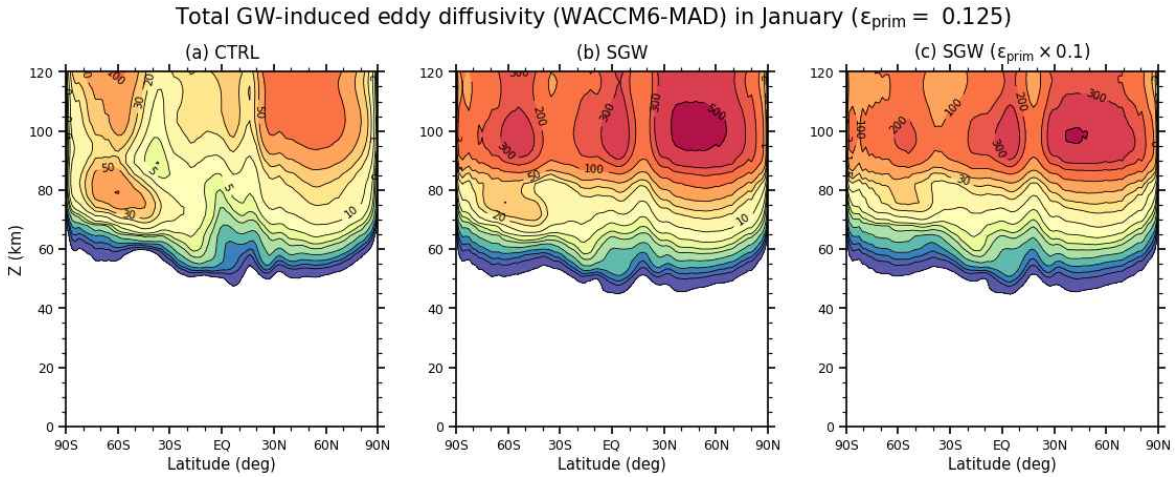

Figure 58: Latitude-height distributions of total gravity-wave induced eddy diffusivity (m^2/s) for January in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

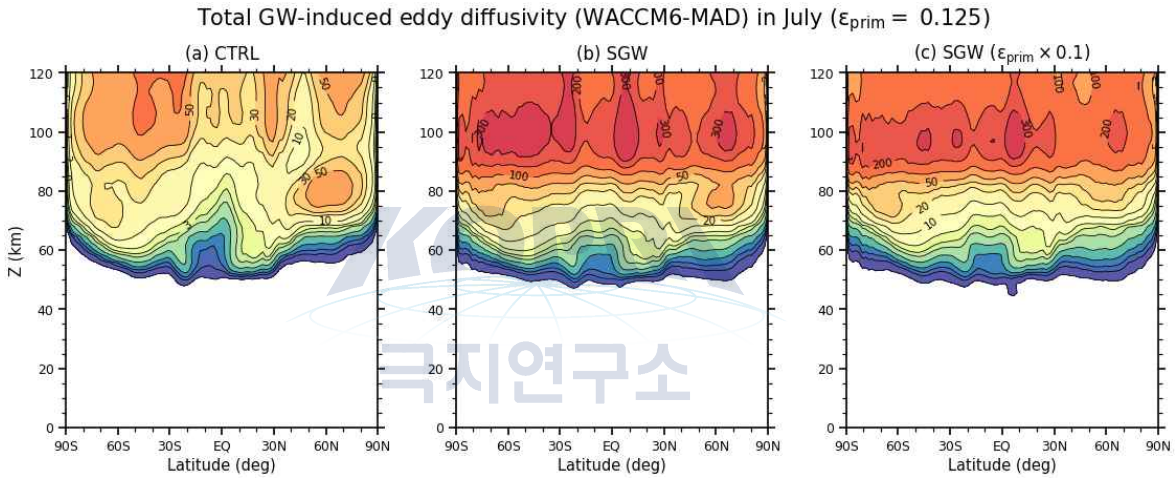

Figure 59: Latitude-height distributions of total gravity-wave induced eddy diffusivity (m^2/s) for January in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic. Negative values are plotted in dashed lines..

2차 대기중력파에 의한 난류 확산 계수의 증가는 FIgs. 58-59에서 볼 수 있듯이 중간권 중상부와 열권 하부에서 강하게 나타난다. 위도 방향으로는 전체 위도에 대해서 강하게 나타나는데 고도 70-80 km 정도를 살펴보면, 경도 60 이상의 고위도 지역에서 낮은 고도까지 난류 혼합 계수가 CTRL에 비해서 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 위도 분포적 특징은 CTRL에서도 발견되는 모습이고, 2차 대기중력파를 고려한 경우 크기에 있어서 더 강화된 모습이다. 참고로 2차 대기중력파는 고려하되, 2차 파동이 난류 혼합에 변화를 일으키지는 않도록 한 SGWx 실험의 경우, 난류 혼합 계수는 CTRL과 유사한 크기를 가졌다 (여기서 보이지는 않음).

Figures 60과 61은 양 반구에서 위도 70도보다 고위도에 대해서 평균된 난류 확산 계수를 15년의 기간의 CTRL, SGW 그리고 SGW0.1에 대한 시간-고도 그림을 보여준다. 반구에 상관없이 난류 확산 계수는 2차 대기중력파를 고려한 SGW와 SGW0.1의 경우 명확하게 증가하였으며, 그 증가한 확산 계수는 고도 60 km나 성층권계면 50 km까지도 내려오는 것을 확인할 수 있다.

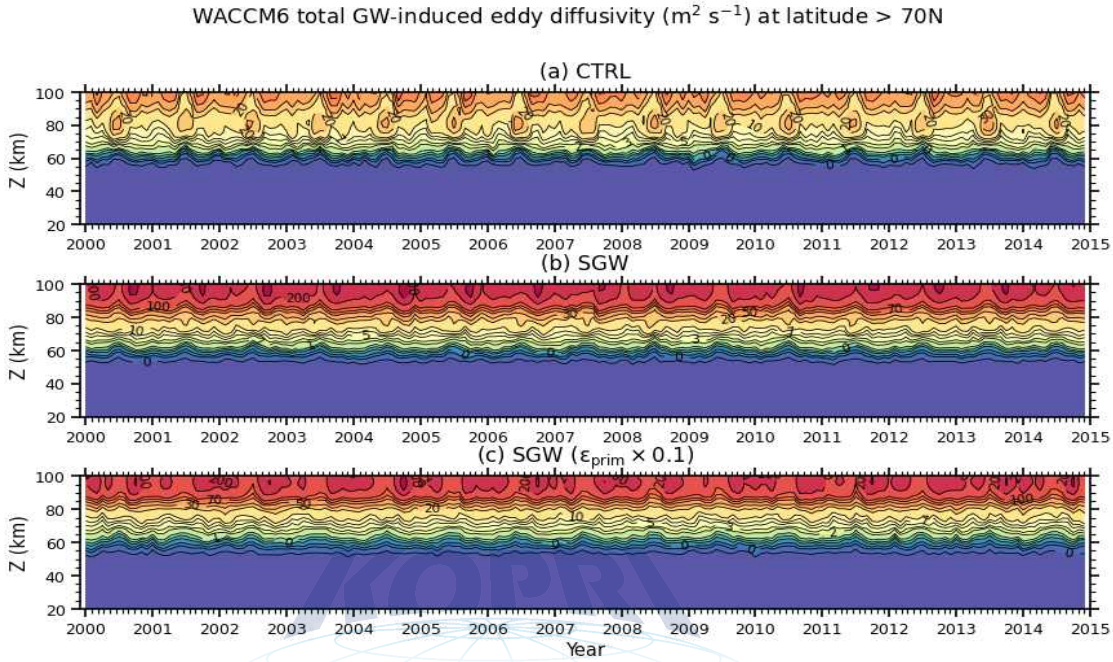

Figure 60: Time-height distributions of total GW induced eddy diffusivity (m^2/s) between 70°N and 90°N in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

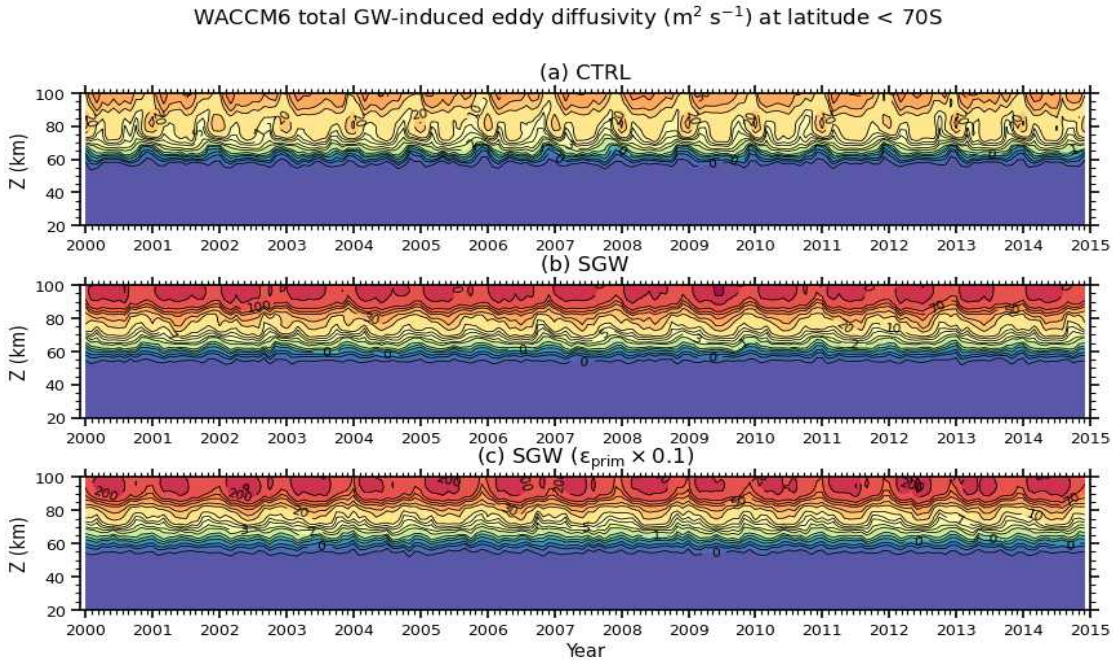

Figure 60: Time-height distributions of total GW induced eddy diffusivity (m^2/s) between 70°S and 90°S in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

Figures 61과 62는 WACCM6-MAD CTRL, SGW 그리고 SGW0.1에 대한 NOx 농도에 대한 15년 평균 1월 및 7월 평균을 각각 나타낸다. 1월과 7월에 상관없이 NOx는 중간권 상부 및 열권 하부에서 최대 값을 보이고 겨울 반구 고위도 극 소용돌이 쪽으로 내려오고 있는 모습을 보인다. CTRL, SGW, SGW0.1을 비교해보면, 겨울 반구 고위도에서 NOx가 SGW에서 CTRL보다 더 많이 내려오고, SGW0.1이 SGW보다 더 많이 하향으로 내려오는 것으로 보인다. 남반구 겨울철의 경우는 이러한 2차 대기중력파 모수화에 의한 차이가 더 많이 드러나는 것으로 보인다. 7월 SGW0.1의 남반구 고위도를 보면 고도 40 km까지 NOx가 강하게 하향 수송된 모습을 확인할 수 있다. 즉, 고층대기 (중간권 상부 및 열권 하부)에서 생성된 NOx는 대기중력파가 유도하는 난류 혼합에 의해 극 소용돌이 안으로 강하게 하향 수송될 수 있음을 확인할 수 있다.

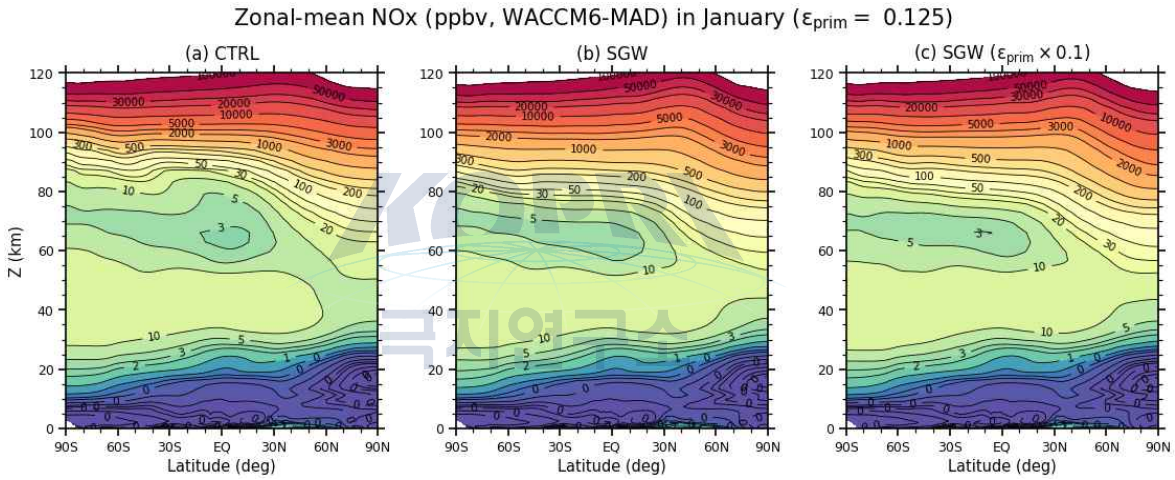

Figure 61: Latitude-height distributions of NOx concentration (ppbv) for January in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic.

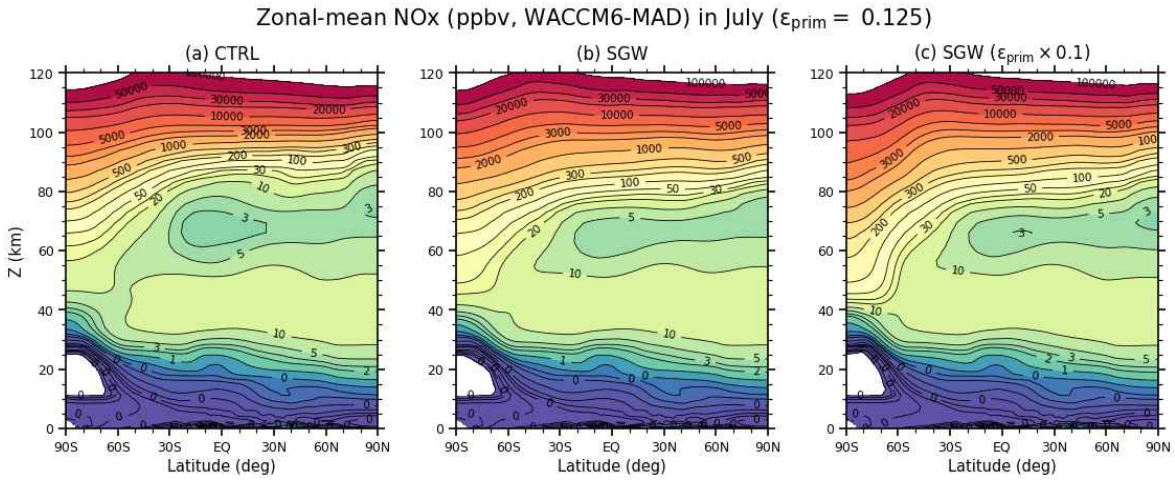

Figure 62: Latitude-height distributions of NOx concentration (ppbv) for July in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic.

Figures 63과 64는 WACCM6-MAD CTRL, SGW 그리고 SGW0.1에 대한 오존 농도에 대한 15년 평균, 동서 평균된 1월 및 7월 평균값을 각각 나타낸다. 오존의 계절적 변화는 CTRL, SGW, SGW0.1에서 대체로 모두 적절히 모의되었다. 2차 대기중력파가 고려된 SGW와 SGW0.1 실험에서는 중간권 상부 및 열권 하부에서 오존이 상당히 감소된 모습을 보였다. 극 소용돌이 관점에서는 1월에 NOx가 북극 소용돌이 쪽으로 하강하기는 했지만 (Fig. 61), 오존의 양이 두드러지게 감소하는 모습이 보이지는 않았다. 다만, 7월의 경우에는 NOx가 남극 소용돌이 쪽으로 하강하면서 (Fig. 62), 오존의 양이 다시 줄어드는 모습을 확인할 수 있었다. 다만, 7월이라도 SGW의 경우에 남극 고위도 오존의 감소는 두드러지지 않았으나, SGW0.1의 경우에는 고도 60 km에서 오존의 감소가 확연하게 드러났다. 이는 SGW0.1의 NOx 수송량과 관련이 있어 보인다.

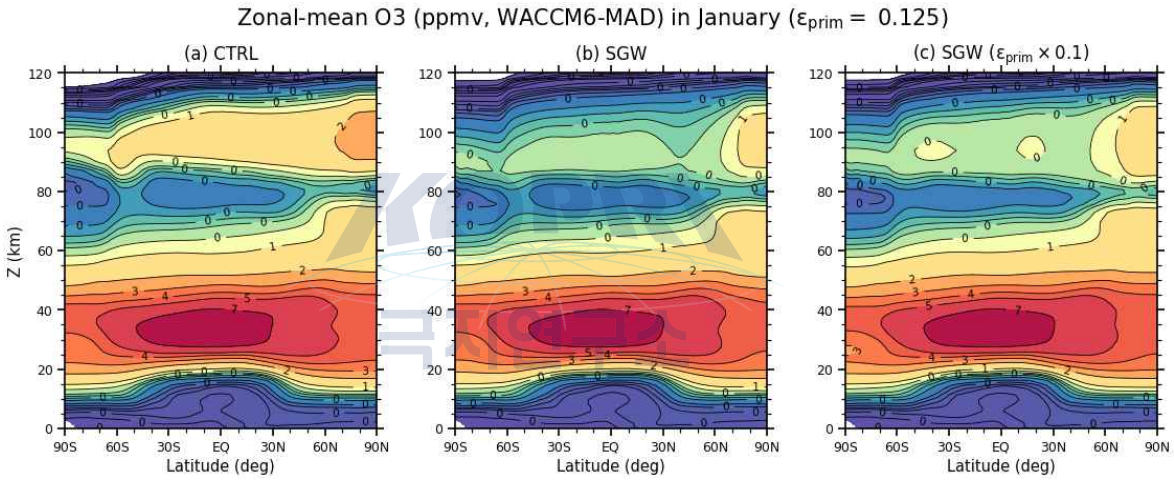

Figure 63: Latitude-height distributions of ozone concentration (ppmv) for January in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic.

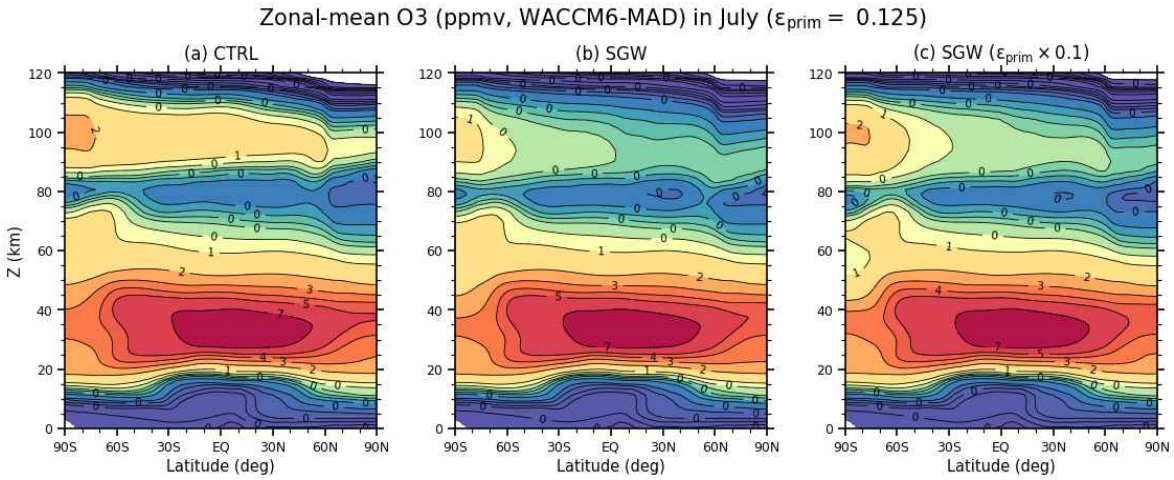

Figure 64: Latitude-height distributions of ozone concentration (ppmv) for January in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1. Contours are logarithmic.

Figures 65와 66은 WACCM6-MAD CTRL, SGW 및 SGW0.1에서 고위도에 대해서 평균된 NOx 농도의 시간-고도 분포를 나타낸다. CTRL, SGW, SGW0.1 모두 동일한 고에너지 입자 이온화율로 모의되었기 때문에 NOx이 생성률은 동일하다. 따라서 세 실험에서 NOx의 분포가 차이를 보이는 것은 수송에 차이가 있기 때문이다. 2차 대기중력파 모수화가 잔여 순환을 크게 변화시키지는 않는다는 점에서, NOx의 하향 수송의 강화는 2차 대기중력파가 유도하는 난류 확산 계수와 연관되어 있다고 보여진다.

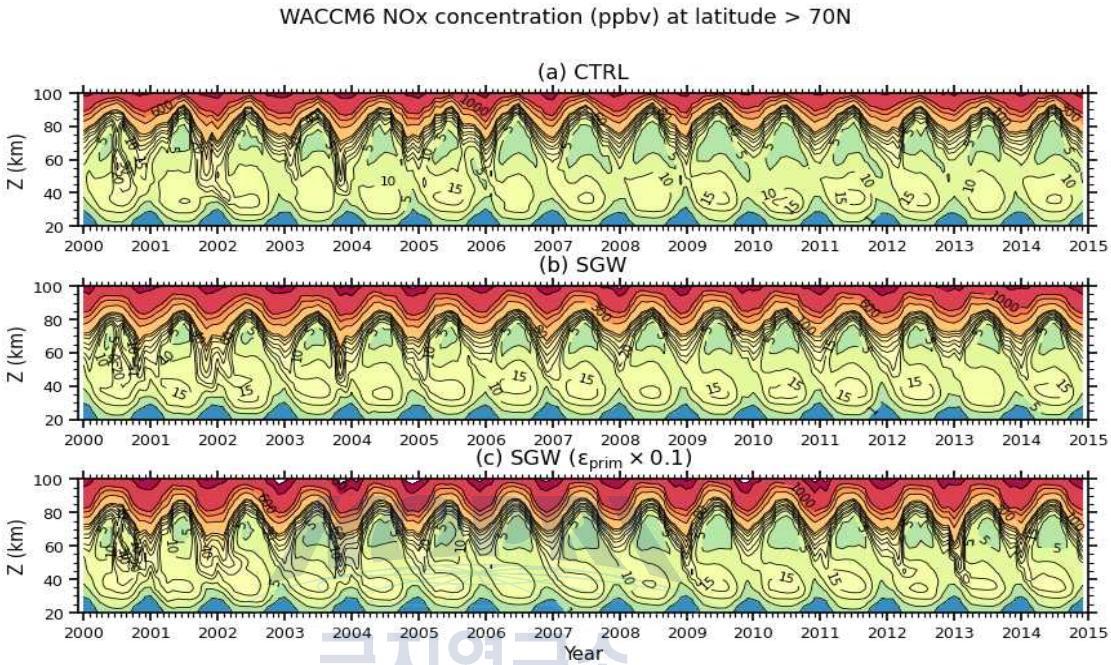

Figure 65: Time-height distributions of NOx concentration (ppbv) between 70°N and 90°N in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

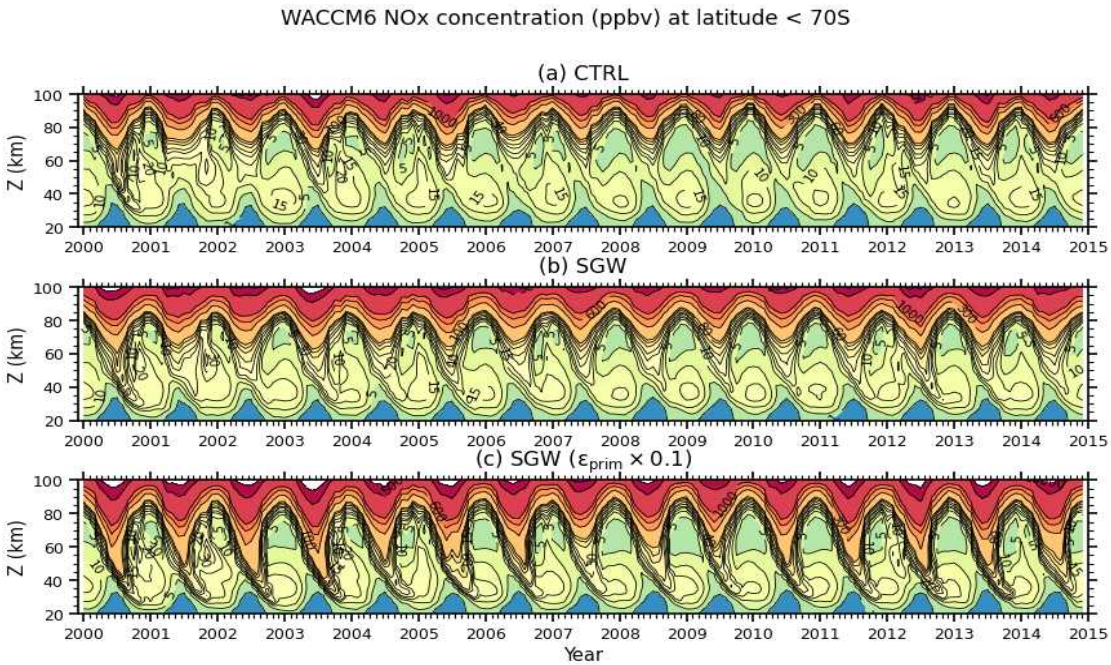

Figure 66: Time-height distributions of NOx concentration (ppbv) between 70°S and 90°S in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

Figure 65에서 보인 NOx의 하향 수송은 여러가지 면에서 논의되어야 할 점이 있다. 우선, 명백한 것은 2차 대기중력파 모수화를 고려한 경우, NOx의 하향 수송이 훨씬 강해진다는 점이다. 북반구 (Fig. 65)에서, CTRL의 경우, 10 ppbv의 농도를 갖는 NOx의 등치선 (노랑과 초록의 경계)은 대체로 고도 60 km 까지만 하향 수송되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 반해, SGW에서는 10 ppbv 등치선이 50 km 아래로까지 내려오는 것을 확인할 수 있다. CTRL와 SGW를 비교해 볼 때, 성층권 혹은 성층권계면 근처까지 NOx가 하향 수송하는 시점은 CTRL의 경우는 15년 중에 7회 정도로 보이고, SGW의 경우에는 15년 중에 10-11회 정도인 것으로 보여, 분명히 NOx의 강항 하향 수송 혹은 침투가 2차 대기중력파 실험에서 확인된다. SGW0.1의 경우를 보면, 전반적으로 NOx의 농도는 SGW와 유사한 구조를 갖기 때문에, CTRL과 비교해서 더 많은 양의 NOx가 하향으로 전파하는 것으로 보인다. 성층권 혹은 성층권계면 근처까지 NOx가 침투하는 사례의 횟수를 세어보면, SGW0.1에서는 대략 11-12번 정도로 파악된다. 총 15년의 기간 중에 11-12회 정도 NOx가 성층권으로 침투했다는 것은 거의 모든 북반구 겨울에 고층대기에서 생성된 NOx가 극 소용돌이 안쪽에서 성층권으로 수송되었다는 것을 의미한다.

남반구의 경우 (Fig. 66), 북반구와 유사하게 2차 대기중력파 모수화를 고려한 경우, NOx의 하향 수송이 훨씬 강해진다는 점이다. 성층권 혹은 성층권계면 근처까지 NOx가 하향 수송하는 시점은 CTRL의 경우는 10회 정도 였고, SGW의 경우는 15회, SGW0.1의 경우도 15회 였다. 2차 대기중력파를 고려한 경우는 1차 대기중력파의 간헐성 인자와 상관없이 NOx는 남반구 겨울마다 강하게 하향으로 NOx를 수송시킨 것으로 보인다. 더욱 흥미로운 것은 2차 대기중력파를 고려하고 1차 중력파의 간헐성 인자를 줄인 SGW0.1 실험에서 NOx의 하향 수송은 중하부 성층권까지 계속 이어진다는 점이다. 간헐성 인자를 변화시키지 않은 SGW에서 NOx가 성층권 중하부까지 깊이 내려오지는 않았는데, SGW0.1에서는 더 깊숙이 하층으로 내려온다는 점은 매우 흥미로운 점이다. Figure 62를 자세히 보면, 고도 100 km 주변의 NOx가 SGW0.1이 SGW보다 대체로 더 높은 것을 알 수 있다. 즉 1차 대기중력파가 약해지면서 극 소용돌이의 키가 켜지고 더 많은 양의 NOx를 고층대기에서 난류 확산을 끌고 들어올 수 있는 것이 아닌가 하는 생각이 들게 한다. SGW0.1에서 더 강한 NOx의 하향 수송이 일어나는 것은 중층대기 역학과 연관 지을 수도 있겠으나, 앞선 결과에서 2차 대기중력파가 중층대기 파동 역학에 심각한 변화를 주지는 않은 것 같아, 파동 역학에서 이유를 찾기는 어려울 것으로 보인다. 이 부분은 후속 연구를 통해서 좀 더 분석할 필요가 있다.

Figures 67과 68은 WACCM6-MAD CTRL, SGW, 및 SGW0.1에서 고위도에 대해서 평균된 온존 농도의 시간-고도 분포를 나타낸다. 물질의 하향 수송은 NOx뿐만 아니라 오존에 대해서도 나타나는 것으로 보인다. 즉, 오존과 오존 파괴 물질은 NOx가 같이 하향 수송하는 상황이다. 북반구 겨울과 비교해서, 남반구 겨울에는 오존의 하향 수송은 더 강하게 나타나는 것으로 보인다. 이는 NOx의 경우와 동일한 모습이다.

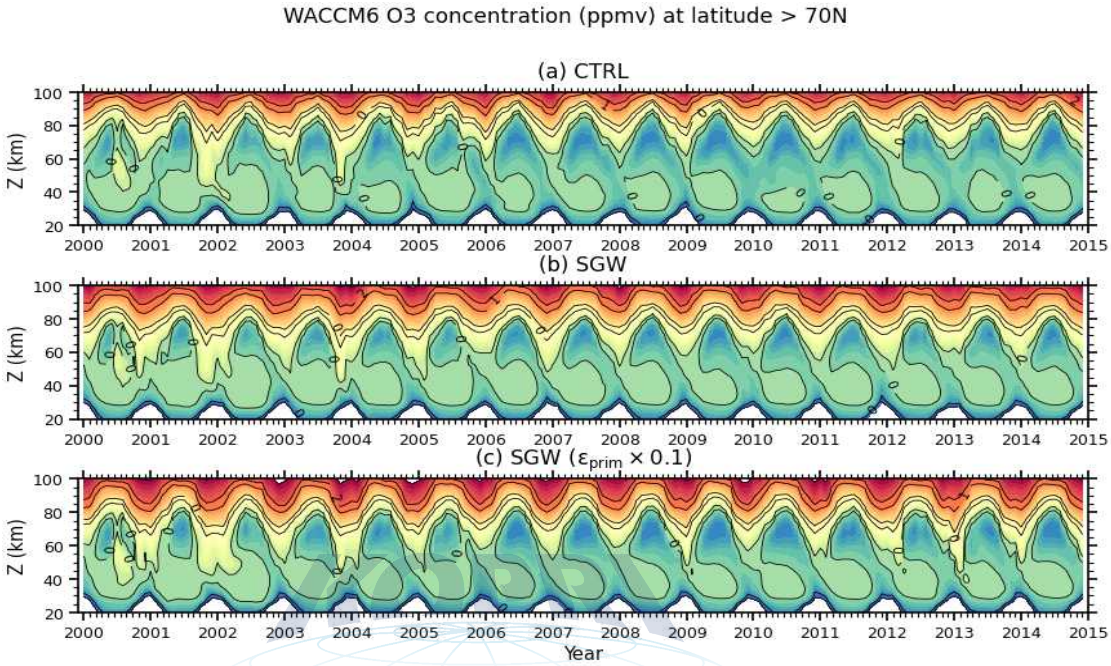

Figure 67: Time-height distributions of NOx concentration (ppbv) between 70°N and 90°N in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

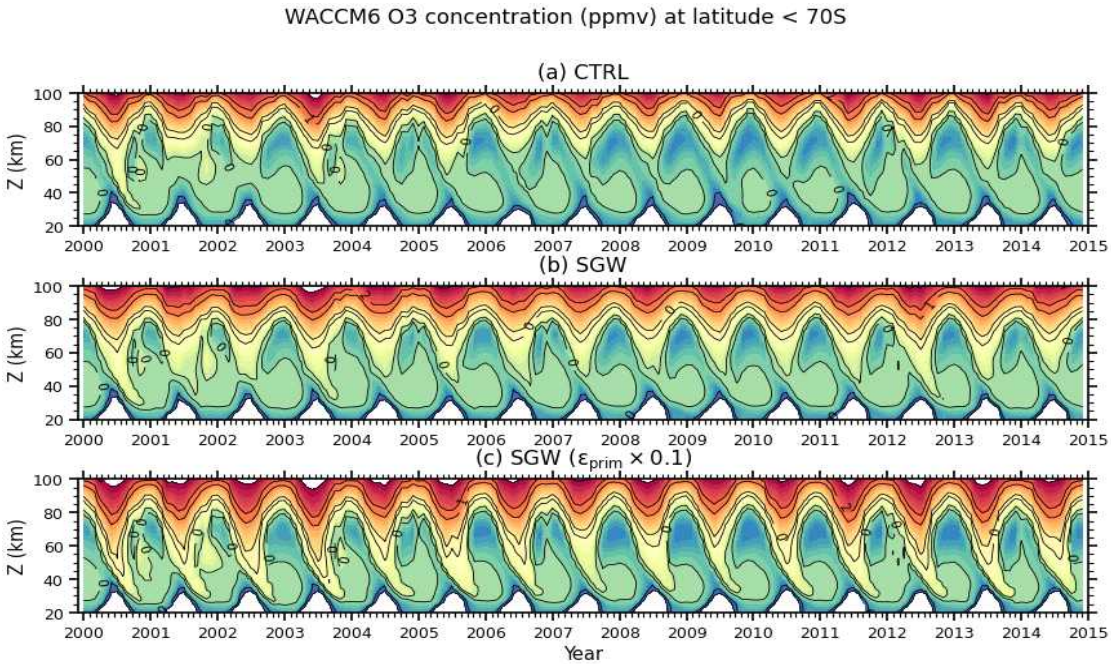

Figure 68: Time-height distributions of NOx concentration (ppbv) between 70°S and 90°S in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

북반구 겨울 고위도 지역과 관련하여, SGW 실험에서 NOx가 강하게 하강한 시점은 2001-2002년, 2003-2004년, 2004-2005년, 2006-2007년, 2011-2012년, 2013-2014년을 들 수 있다. 이 각각의 해에 대한 오존의 분포를 살펴보면, 2006-2007년과 2011-2012년, 2013-2014년의 경우 오존의 하강은 그렇게 뚜렷하지는 않은 모습이다. 즉, 이 경우에는 하강하는 NOx에 의한 오존의 소멸이 발생했을 가능성이 있어 보인다. 하지만, 실제로 NOx에 의한 오존 소멸 항이 있지는 않기 때문에 명확하게 확인하기 쉽지는 않았다. NOx에 의한 오존의 소멸을 확인할 수 있는 더 좋은 방법을 고안할 필요가 있다. 북반구 겨울 고위도에서 SGW0.1 실험에서 NOx가 강하게 하강한 시점은 2001-2002년, 2003-2004년, 2004-2005년, 2006-2007년, 2008-2009년, 2010-2011년, 2011-2012년, 2012-2013년, 2013-2014년으로 훨씬 빈도가 높다. 이 SGW0.1 실험의 경우, 오존의 농도가 40-50 km 고도 아래까지 크게 높게 전파하는 모습은 보이지 않아서, 대체로 NOx로 인한 오존 농도의 감소가 일어나고 있는 것으로 보인다. 특히, 2008-2009년, 2011-2012년, 2012-2013년, 2013-2014년의 경우는 NOx는 성층권까지 잘 전파하는데, 오존은 상대적으로 하향 수송이 낮아 보여, NOx에 의한 오존의 감소가 발생한 가능성이 높아 보인다.

남반구 겨울 고위도 지역과 관련하여, SGW 실험에서 NOx는 거의 모든 겨울마다 중층 성층권까지 하향하는 모습을 보여주었다. SGW0.1에서도 마찬가지의 모습이었다. 이러한 양상과 오존의 시공간 분포 (Fig. 68)를 살펴보면, SGW에서 오존의 하향 수송 패턴은 상당한 변동성이 있어보인다. 즉 특정해에는 NOx와 연관된 오존의 소멸이 존재하는 것으로 보인다. 반면에 SGW0.1에서도 오존의 하향 수송은 NOx의 하향 수송에 비해 약간 일관성이 오히려 더 좋아지는 모습을 보여, (앞에서 언급했듯이) NOx에 의한 오존의 소멸을 확인해 볼 수 있는 더 좋은 방법론의 고안이 필요해 보인다. 그럼에도, 여기서 말할 수 있는 분명한 것은 NOx든 오존이든 2차 대기중력파 모수화에 의해서 중간권 혹은 그 이상의 대기에 존재하는 물질이 성층권까지 더 잘 수송될 수 있다는 점이다.

KOPRI 극지연구소

제 5 절 중층대기 자오면 순환 및 성층권 돌연 승온에의 영향

2차 대기중력파의 영향이 성층권 파동 역학에 주는 영향은 앞서 단순화된 화학을 갖는 WACCM6 실험을 통해 살펴보았다. 분해되는 파동에 의해 만들어지는 EP 플럭스나 EP 플럭스 발산이 2차 대기중력파 실험으로 크게 변화하지는 않은 것으로 보여, 앞 부분에서 2차 대기중력파 모수화가 중층대기 파동 역학에 큰 영향을 주지는 않은 것으로 잠정 결론을 내린 바 있다.

중층대기 파동 역학은 성층권 돌연 승온과 같은 겨울철 변동성에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에, 2차 대기중력파 모수화가 파동 역학에 주는 영향을 보는 것 뿐만 아니라 직접적으로 성층권 동서평균 동서 바람과 온도가 매 겨울마다 어떤 변동성을 보이는지 확인하였다. Figure 69는 단순화된 화학 과정을 장착한 WACCM6의 AMIP 30년 수치 실험에서 10 hPa (고도 약 32 km), 60°N에서의 동서평균 동서 바람을 10월부터 3월까지 북반구 가을-봄에 걸친 6개월에 대한 30년 일별 시계열을 나타낸다. CTRL에서 동서평균 바람이 역전 (0보다 작아지는) 횟수는 25회 정도였다 (여기서 0선에 거의 정확하게 붙어있는 경우는 제외함). SGW의 경우는 23회였고, SGW0.1은 30회 정도였다.

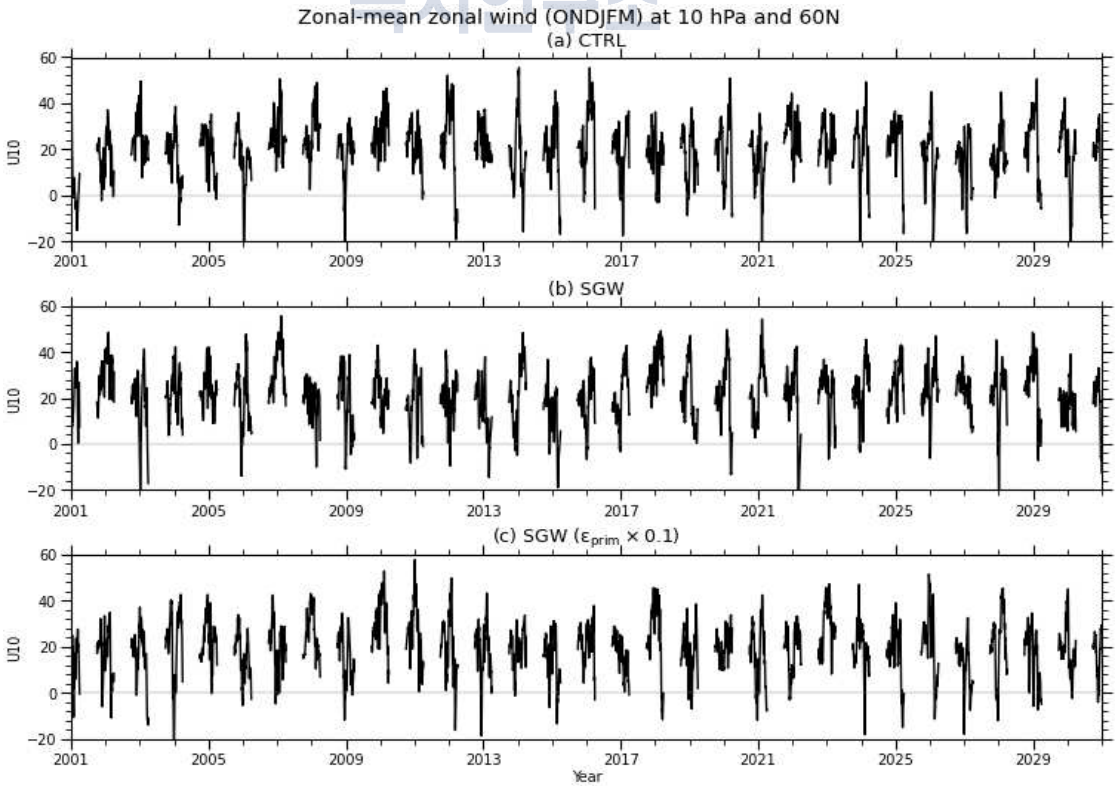

Figure 69: Time series of zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 60°N for NH cold seasons (October-March) in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

SGW의 경우 오히려 바람이 역전되는 횟수가 조금 줄어든 모습을 보인다. 하지만 엄밀하게 통계적인 분석을 한 것은 아니어서, CTRL과 SGW가 북반구 성층권 돌연 승온의 횟수에 있어 명확한 차이가 있다고 말하기는 어려워 보인다. 하지만, SGW0.1의 경우는 바람이 역전되는 사례가 더 많아 보인다. 1차 대기중력파의 간헐성 인자를 줄이는 작업이 왜 하부 성층권의 동서평균 바람의 변동성에 영향을 주는지는 좀 더 많은 연구가 필요한 것으로 보인다. 2차 대기중력파는 1차 중력파와 비교해서 훨씬 강한 고유 진동수 (혹은 고유 위상 속도)를 갖는 것으로 설정되어 있다. 큰 고유 위상 속도를 갖는 2차 파동은 순간적으로 강한 가속 혹은 감속을 모델에 줄 수 있다. 즉 1차 대기중력파에 비해서 모델에 기본적으로 더 큰 충격을 줄 수 있다. 이러한 중간 성층권의 동서평균 바람의 변동성의 변화가 2차 대기중력파 혹은 1차 대기중력파의 감소와 연관이 얼마나 되어 있는지에 대한 문제는 향후 연구해야 할 주제로 판단된다.

Figure 70은 단순화된 화학 과정을 장착한 WACCM6의 AMIP 30년 수치 실험에서 30 hPa (고도 약 25 km), 60°N-90°N 평균된 동서평균 온도를 10월부터 3월까지 가을-봄에 걸친 6개월에 대한 30년 일별 시계열을 나타낸다. 평균 온도가 220 K를 넘는 횟수는 CTRL이 22-23회, SGW는 22회, SGW01은 약 31-32회 정도 였다.

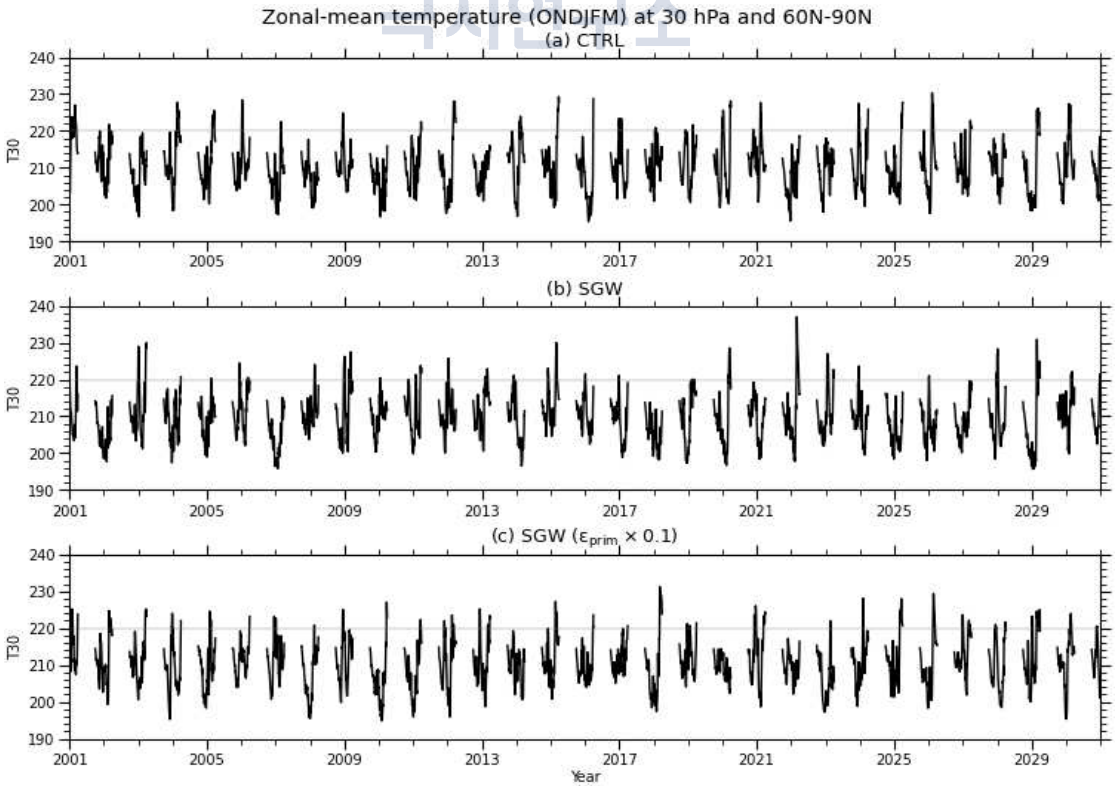

Figure 70: Time series of temperature at 30 hPa averaged over 60°N-90°N for NH cold seasons (October-March) in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

SGW0.1에서 북반구 기준으로 220 K을 넘은 사례가 다른 실험보다 많기는 했지만, 220 K보다 월등히 큰 차이로 온도가 올라간 사례는 오히려 CTRL이나 SGW보다 횟수가 더 적었다는 점은 특이한 점이다. 남반구 겨울에 대해서도 유사한 분석을 수행하였고, 동서평균 동서 바람에 대해서 그 결과를 Figs. 71-72에 나타내었다.

Figure 71은 단순화된 화학 과정을 장착한 WACCM6의 AMIP 30년 수치 실험에서 10 hPa (고도 약 32 km), 60°S에서의 동서평균 동서 바람을 4월부터 9월까지 남반구 가을-봄에 걸친 6개월에 대한 30년 일별 시계열을 나타낸다. 모든 실험에서 cold 시즌에 바람이 역전되는 경우는 없었다. 하지만 60 m/s를 기준으로, final warming을 제외하면, CTRL에서는 3회 (2012, 2014, 2028), SGW는 4회 (2012, 2021, 2028, 2030), SGW0.1은 3회 (2004, 2006, 2016) 정도 발견되었다. 따라서, 남반구의 겨울 극 소용돌이 변동성과 관련해서 급격한 변화를 이끌 정도로 2차 대기중력파가 영향을 주었다고 보기는 어려울 것으로 보인다. 또한 SGW0.1이 특별히 더 강한 혹은 더 빈번한 남반구 극 소용돌이 변동성을 주는지는 현재 자료만으로는 확인하기 어려웠다. 이 자료 및 모델링 결과를 활용하여 향후 좀 더 상세한 연구가 필요할 것으로 보인다. 좀 더 엄밀한 통계적 분석이 요구될 것 같고, 이를 위해서는 30년보다 더 긴 장기 모의가 필요하다.

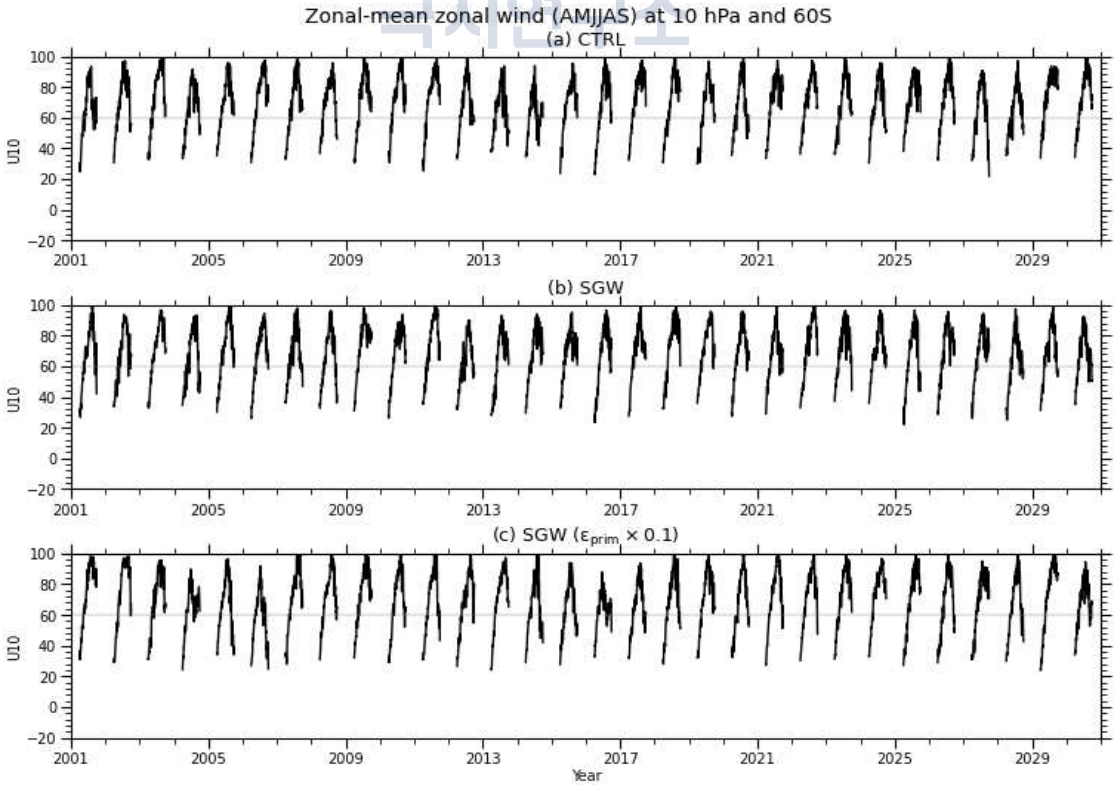

Figure 71: Time series of zonal-mean zonal wind at 10 hPa and 60°S for SH cold seasons (April-September) in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

Figure 72는 단순화된 화학 과정을 장착한 WACCM6의 AMIP 30년 수치 실험에서 30 hPa (고도 약 25 km), 60°N-90°N 평균된 동서평균 온도를 4월부터 9월까지 남반구 가을-봄에 걸친 6개월에 대한 30년 일별 시계열을 나타낸다. Final warming은 제외하고 평균 온도가 205 K를 넘는 횟수는 CTRL이 1회 (2014), SGW는 2회 (2028, 2030), SGW0.1 (2006, 2016)은 2회 정도였다. 온도의 경우는 동서평균 바람 (Fig. 71)보다는 판단하기가 조금 더 수월했고 더 명확하게 판단할 수 있었다. 다만, 30년이라는 시간이 사실상 남반구 극 소용돌이 변동을 위해 충분한 기간은 아닌 것 같아 통계적인 유의미성을 보기는 어려울 것 같다. 그렇다고 할지라도 온도에 있어서는 2차 대기중력파 모수화가 남반구 극 제트의 변동성도 더 많이 만들어 낼 수 있다고 말해주는 것으로 판단된다.

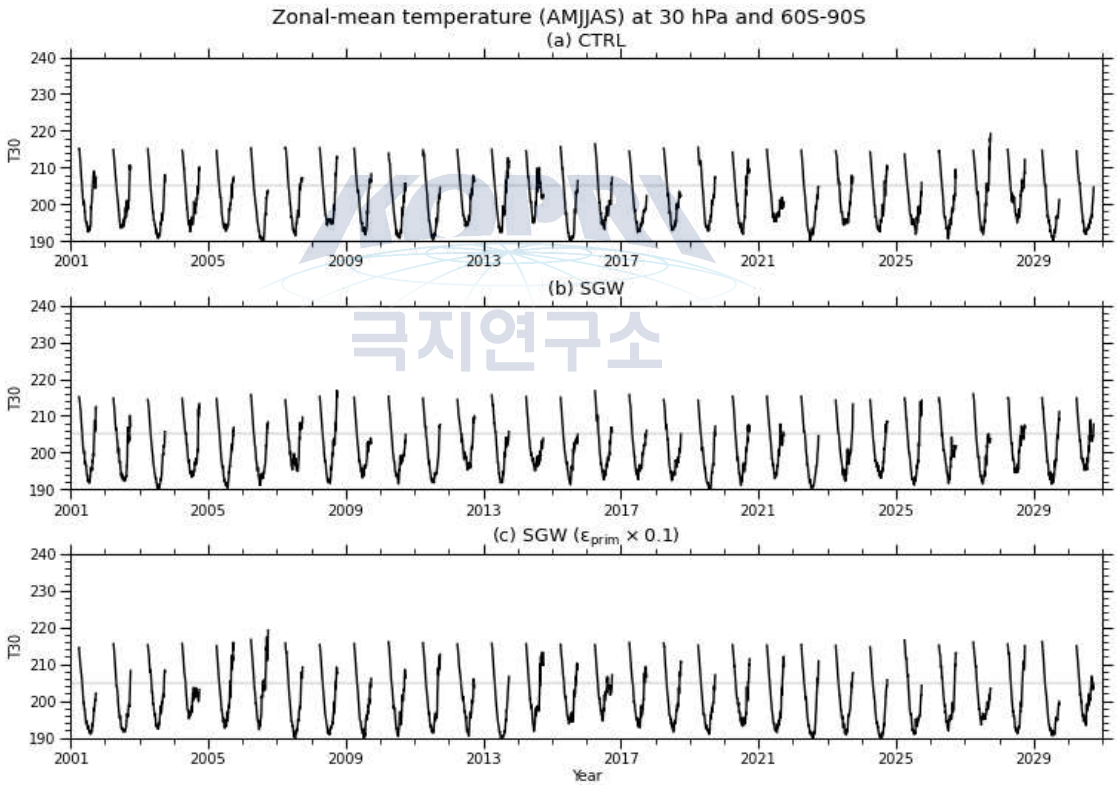

Figure 72: Time series of temperature at 30 hPa averaged over 60°S-90°S for SH cold seasons (April-September) in (a) WACCM6-MAD CTRL, (b) SGW, and (c) SGW0.1.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

2023년 1년 차에 계획한 내용에 따르면 본 과제의 연구개발 목표는 아래 표와 같이 세워져 있었다. 3년의 기간을 거치면서 본 연구는 해마다 수행해야 할 연구 목표를 충실히 달성한 것으로 판단된다. 당초, 본 연구에서는 특정 오로라 사례에 대한 수치 모의를 계획했었으나, 본 연구보고서에는 2000년부터 2014년 전체 기간의 오로라 혹은 태양 양성자 사건 전체에 대한 수치 모의를 수행하였다.

성과목표	세부목표		주요내용
2023년: 2차 중력파 모수화 과정의 정교화	1-1	단순화된 모델에서 2차 중력파 튜닝	- 이상화된 모델에서 기후값을 잘 표현하는 2차 중력파 모수 도출
	1-2	WACCM6에 장착 및 튜닝	- WACCM6 모델에서 기후값을 적절히 표현하는 2차 중력파 모수 도출
2024년: 오로라 화학물 수송에 중력파 역할 이해	1-1	2차 중력파 장착 WACCM6 사례 실험	- WACCM6 오로라 사례 실험 과정 및 결과 제시
	1-2	화학물 수송 효과 이해	- 사례 실험에서 화학물 수송 효과 이해
2025년: 2차 중력파의 성층권에의 영향	1-1	2차 중력파 역학적 효과 분석	- 2차 중력파를 통한 중층대기 역학 변화 이해
	1-2	2차 중력파와 돌연 승온과의 관계 이해	- 2차 중력파의 북극 성층권 돌연 승온에 역할 이해

본 과제는 3년을 거치면서 성과 목표 및 세부 목표의 100% 달성한 것으로 판단된다. 1차년도에 목표와 같이, 이상화된 모델 SWAD를 이용한 기후 모델링을 통해 2차 대기중력파 모수화 (3장 1절 참고)에 사용될 모수들을 도출했고, WACCM6에 2차 대기중력파 모수화를 접합함과 동시에 도출된 모수를 적용하였다 (3장 2절 참고). 2차년도 목표와 같이 2000년부터 2014년까지 오로라 발생과 같은 지자기 폭풍과 같은 사례에 대한 WACCM 기반 기후 모델링 실험을 수행하였고, 화학물 수송 효과를 살펴보았다 (3장 3절 및 4절 참고). 마지막으로 2차 대기중력파 모수화가 중층대기 역학에 주는 영향을 3장 3절과 5절을 통해 알아보았다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 위탁과제를 통해 얻어낸 결과는 좀 더 정리하여, SCI/SCIE 연구 논문으로 작성할 예정이다. 모수화에 대한 설명과 WACCM6 AMIP 실험 결과는 유럽지구과학학회(European Geoscience Union)의 Geoscientific Model Development (GMD) 저널 (2024년 JCR IF = 4.9, 2024년 Scopus Cite Score 7.8)에의 제출을 목표로 하고 있고, 중층대기 화학과 전리권 D층에 대한 논문은 별도로 GMD 혹은 다른 지구 물리 관련 비교적 높은 IF를 갖는 저널에 제출하는 것을 목표로 하고 있다. 후자의 연구 논문과 관련해서는, NOx 및 오존과 2차 대기중력파에 의한 연직 혼합에 대한 문제는 이미 2026년 AOGS에 관련된 내용을 발표하기 위하여 초록을 제출한 상태이다.

Abstract Details (AS43-A025)

< Back to my abstracts

Abstract Status ✖ Withdraw

Status	Active
Abstract Processing Fee	SGD 55.00 Paid (Invoice, Receipt) (change billing details?)
Invited / Contributed	C - Contributed

Special Note on Invited Speaker Presentation
Right now, every abstract submission is listed as "Contributed".
The decision will only be made during detailed session scheduling, after all abstract reviews are completed.

Meeting Registration	Not registered
Presentation Attendance	Not Presented

KOPRI 극지연구소

Abstract Details

Session	AS43 - Middle Atmosphere
Abstract Title	**Impacts of Momentum Forcing and Eddy Diffusion Induced by Secondary Gravity Waves in the Mesospheric Circulations and Transport**
Keywords	Secondary gravity waves;Eddy diffusion;Chemical transport

Abstract Preview

Impacts of Momentum Forcing and Eddy Diffusion Induced by Secondary Gravity Waves in the Mesospheric Circulations and Transport

In-Sun SONG[1#+], Masaru KOGURE[1], Young-Hee RYU[1], Julio BACMEISTER[2]

[1]*Yonsei University, Korea, South,* [2]*National Center for Atmospheric Research, United States*

High-top global circulation models have had difficulties in realistically simulating the structure of zonal wind and temperature in the high-latitude winter upper mesosphere. Gravity-wave (GW) parameterization often induces excessive easterly vertical shear and large poleward temperature gradient in winter polar upper mesosphere. Observational evidences and high-resolution modeling results suggest that those biases may be addressed by secondary GW processes. In this study, we present a simple parameterization for effects of secondary GWs induced by primary GW momentum forcing for use in horizontally low-resolution model. This parameterization is implemented in NCAR Whole Atmosphere Community Climate Model version 6 (WACCM6) with middle atmosphere chemistry and D-region ion chemistry. The secondary GW parameterization alleviates model biases in the upper mesosphere reducing the excessive easterly shear in winter and the pole-to-pole meridional residual circulations. In spite of the weaker poleward and downward mass circulation due to secondary GW processes, the downward transport of chemicals induced by energetic particle precipitation is in fact increased by the enhanced eddy diffusion associated with breaking of secondary GWs with

Presenter Preference

Presentation Mode	Either
Compete for Student Poster	Not Eligible

Author Details

Important: ALL co-authors must be added to the author list below. Unlisted authors will not be included in the Proceedings and Author Index.

Authors	Corresponding	Presenting			
Prof In-Sun Song (Yonsei University, Korea, South), songi@yonsei.ac.kr	✔	✔		▼	✖
Dr Masaru Kogure (Yonsei University, Korea, South), masarukogure@yonsei.ac.kr	Set	Set	▲	▼	✖
Prof Young-Hee Ryu (Yonsei University, Korea, South), yhryu@yonsei.ac.kr	Set	Set	▲	▼	✖
Dr Julio Bacmeister (National Center for Atmospheric Research, United States), juliob@ucar.edu	Set	Set	▲		✖

Add an Author

본 연구보고서에 담긴 연구 결과는 1차 대기중력파 모수화, 2차 대기중력파 모수화, 그 둘의 상호작용이 모델에 어떤 영향을 주는 가에 관한 내용이다. 지금 연구에서는 2차 대기중력파 모수화를 장착하여 그 효과를 본 것이었지만, 2차 중력파 모수화에 대한 필요성이 학술지를 통해서 인정을 받으면, 1차와 2차 대기중력파를 모두 고려하는 통합적인 모수화를 만들어 가장 현실적인 결과를 만들어내기 위해서 1차 대기중력파와 관련된 내용도 수정하거나 튜닝하거나 해야 할 것으로 보인다. 또한, 현재 NCAR WACCM6에서 사용하는 대기중력파 방안에서 계산하는 연직 난류 혼합이 운동량에 대해서는 적용되지 않고, 온도와 기체상/입자상 물질에 대해서만 적용되도록 되어 있어, 이 부분은 개선할 필요가 있다. 또한, 이렇게 대기중력파와 연관된 난류 혼합과 관련되어 개선된 부분을 우리나라 기상청에서 개발하고 있는 국가기후예측모델에도 적용하도록 할 예정이다.

현재 연구보고서에서 조금 부족한 부분이 고에너지 양성자 혹은 전자가 이온화를 통해서 NOx나 HOx를 생성하고 실제로 오존 화학에 어떻게 기여하는지 알아보는 부분이다. Lee et al. (2021)의 연구 결과를 참고하거나 극지연구소에서 연구하는 연구자와 협력하여, 실제 오존 화학에서 NOx와 HOx의 영향에 관한 연구를 보강할 필요가 있다.

KOPRI
극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구를 수행한 3년간 해외로부터 획득한 가장 중요한 과학기술 정보라면, 2025년 2월 미국 NCAR를 방문하여 Community Earth System Model (CESM) atmosphere model, chemistry, earth system prediction, CVC, and whole atmosphere working group meeting (https://www.cesm.ucar.edu/events/working-groups/2025/atmosphere-chem-system-climate) 에서 senior scientist인 Han-Li Liu의 발표를 듣고 관련된 논의를 한 부분이었다. 해당 발표는 이미 2025년 미국 지구물리학회 (American Geophysical Union; AGU)의 Geophysical Research Letters 저널에 출간되어 있다 (Liu, 2025 참조).

Liu (2025) 연구 논문의 내용은 모델이 고해상도(1/4°)화 되면서 저해상도(2°)일때보다 order of magnitude의 차이가 생길 정도로 중간권 및 열권 하부 화학물질의 하향 수송이 증가할 수 있다는 점이다 (아래 Liu (2025)의 Fig. 1 참조).

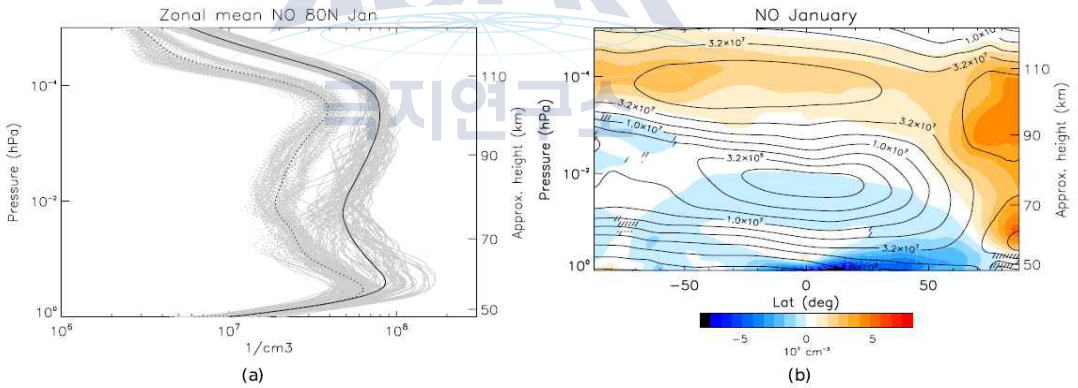

Figure 1. (a) Vertical profiles of zonal mean Nitric oxide (NO) at 80°N from high-resolution (HR) (solid lines) and coarse resolution (CR) (dotted lines) simulations. Black lines are January averages, and gray lines are daily values. (b) Number density of NO from HR simulations (line contours) and difference between HR and CR simulations (contour shades) for January. Non-stippled regions indicate differences that are significant over 95% confidence level according to Student's T-test.

WACCM과 같은 모델에서는 격자 규모로 분해되는 흐름에서는 다음과 같은 항으로 연직 물질 수송이 결정된다 (Andrews et al., 1987):

$$F_z^{(1)} = \bar{\rho}\bar{w}^*\bar{\chi} + \bar{\rho}\left(\overline{w'\chi'} + \overline{v'\theta'\frac{\partial\bar{\chi}}{\partial y}\Big/\frac{\partial\bar{\theta}}{\partial z}}\right),$$

이 항에 더해서 모수화된 대기중력파에 의한 연직 물질 수송은 다음과 같이 결정된다.

$$F_z^{(2)} = -\bar{\rho} K_{zz} \frac{\partial \bar{\chi}}{\partial z}.$$

즉, 총 연직 수송은 위의 두 항을 더해서만 결정될 수 있다. 위의 식에서 $\bar{\chi}$는 NOx와 같은 미량 기체 물질 농도 (즉, 질량 혼합비 = $m_{trace\ gas}/m_{dry\ air}$)를 나타내고, $\overline{w}^*$는 잔여 순환 연직 속도, w'는 연직 속도 섭동, χ'는 특정 물질 농도의 섭동, v'은 남북 바람 섭동, θ'은 온위 섭동, $\bar{\theta}$는 격자 규모 온위이며, K_{zz}는 아격자 현상으로 인한 난류 혼합 계수를 의미한다. 참고로, 미량 기체가 없이 전체 공기만 존재한다면, χ = 1로 둘 수 있다. 따라서, 이 경우, χ' = 0이 되고, $\bar{\chi}$ = 1이기 때문에, $F_z^{(1)} = \bar{\rho}\overline{w}^*$로 환원된다 (즉, 잔여 순환에 의한 연직 질량 이류로 환원된다).

모수화에 의한 연직 수송은 두 번째 식 $F_z^{(2)}$로 표현되며, 현재 2차 대기중력파 모수화가 강한 하향 물질 수송을 일으킬 수 있음은 두 번째 식에 있는 난류 혼합 계수 K_{zz}가 2차 대기중력파로 인해 증가했음을 의미한다. 하지만, Liu (2025)에 따르면, 고해상도 모델 (물론 모수화가 없는 상황이어서 $F_z^{(2)}$ = 0이지만)은 첫 번째 항 $F_z^{(1)}$이 상당히 중요할 수 있음을 보인 것이어서, 저해상도 모델에서는 K_{zz}로 표현할 수 밖에 없는 연직 수송과 첫번째 식으로 고해상도에서 표현될 연직 수송이 얼마나 일관성을 갖도록 유사할 것인지에 대한 연구를 할 필요가 있어 보인다.

제 7 장 참고문헌

Andrews, D. G., Holton, J. R., & Leovy, C. B. (1987). *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press.

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., Bossert, K., Harvey, V. L., Zulicke, C., and 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: Atmospheres*, *127*(2), e2021JD035. https://doi.org/10.1029/2021JD035018

Beres, J. H., Alexander, M. J., & Holton, J. R. (2004). A method of specifying the gravity wave spectrum above convection based on latent heating properties and background wind. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *61*(3), 324-337. https://doi.org/10.1175/1520-0469(2004)061<0324:AMOSTG>2.0.CO;2

Brasseur, G. P., & Solomon, S. C. (2003). Dynamics and transport. In *Aeronomy of the middle atmosphere—Chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere* (1987, chap. 3, pp. 51 - 149). Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

Brasseur, G. P., & Solomon, S. C. (2005), Aeronomy of the middle atmosphere: Chemistry and physics of the stratosphere, in Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol. 32, 3rd ed., *Dynamics and transport*, chap. 3, pp. 51-149, Springer, Netherlands.

Bühler, O. (2014). *Waves and mean flows*. 2nd ed., Cambridge University Press.

Campbell, L. J. & Shepherd, T. G. (2005). Constraints on wave drag parameterization schemes for simulating the quasi-biennial oscillation. Part I: Gravity wave forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *62*(12), 4178-4195. https://doi.org/10.1175/JAS3616.1

Carmichael, R. (2022). The 1976 US standard atmosphere. https://pdas.com/programs/atmos.f90

Charron, M., & Manzini, E. (2002). Gravity waves from fronts: Parameterization and

middle atmospehre response in a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *59*(5), 923-941. https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0923:GWFFPA>2.0.CO;2

Ern, M., Preusse, P., & Riese, M. (2022). Intermittency of gravity wave potential energies and absolute momentum fluxes derived from infrared limb sounding satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*(22), 15093-15133. https://doi.org/10.5194/acp-22-15093-2022

Fang, T.-W., Kubaryk, A., Goldstein, D., Li, Z., Fuller-Rowell, T., Millward, G., et al. (2022). Space weather environment during the SpaceX Starlinke satellite loss in February 2022. *Space Weather*, *20*(11), e2022SW003193. https://doi.org/10.1029/2022SW003193

Fang, X., Randall, C. E., Lummerzheim, D., Solomon, S. C., Mills, M. J., Marsh, D. R., et al. (2008). Electron impact ionization: A new parameterization for 100 eV to 1 MeV electrons. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *113*(A9), A09311. https://doi.org/10.1029/2008JA013384

Funke, B., Baumgaertner, A., Calisto, M., Egorova, T., Jackman, C. H., Kieser, J., et al. (2011). Composition changes after the "Halloween" solar proton event: The High Energy Particle Precipitation in the Atmosphere (HEPPA) model versus MIPAS data intercomparison study. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *11*(17), 9089 - 9139. https://doi.org/10.5194/acp-11-9089-2011

Fritts, D. C. & Alexander, M. J. (2003). Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, *41*(1), 1003. https://doi.org/10.1029/2001RG000106

Fytterer, T., Mlynczak, M. G., Nieder, H., Pérot, K., Sinnhuber, M., Stiller, G., & Urban, J. (2015). Energetic particle induced intra-seasonal variability of ozone inside the Antarctic polar vortex observed in satellite data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(6), 3327 - 3338. https://doi.org/10.5194/acp-15-3327-2015

Gelaro, R., McCarty, W., Suarez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, 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

Gettelman, A., Mills, M. J., Kinnison, D. E., Garcia, R. R., Smith, A. K., Marsh, D.

R., et al. (2019). The whole atmosphere community climate model version 6 (WACCM6). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(23), 12380-12403. https://doi.org/10.1029/2019JD030943

Held, I. M. & Suárez, M. J. (1994). A proposal for the intercomparison of the dynamical cores of atmospheric general circulation models. *Bulletin of the AmericanMeteorological Society*, *75*(10), 1825-1830. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1994)075<1825:APFTIO>2.0.CO;2

Holt, L. A., Randall, C. E., Peck, E. D., Marsh, D. R., Smith, A. K., & Harvey, V. L. (2013). The influence of major sudden stratospheric warming and elevated stratopause events on the effects of energetic particle precipitation in WACCM, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(20), 11,636-11,646. https://doi.org/10.1002/2013JD020294

Holton, J. R. (1982). The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere, *Journal of the Atmospheric Sciences*, *39*(4), 791-799. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<0791:TROGWI>2.0.CO;2

Horne, R. B., Lam, M. M., & Green, J. C. (2009). Energetic electron precipitation from the outer radiation belt during geomagnetic storms. *Geophysical Research Letters*, *36*(19), L19104. https://doi.org/10.1029/2009GL040236

Jackman, C. H., Deland, M. T., Labow, G. J., Fleming, E. L., Weisenstein, D. K., Ko, M. K. W., et al. (2005). Neutral atmospheric influences of the solar proton events in October - November 2003. *Journal of Geophysical Research*, *110*, A09S27. https://doi.org/10.1029/2004JA010888

Jackman, C., Marsh, D., Vitt, F., Garcia, R., Fleming, E., Labow, G., et al. (2008). Short-and medium-term atmospheric constituent effects of very large solar proton events. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *8*(3), 765 - 785. https://doi.org/10.5194/acp-8-765-2008

Jackman, C. H., McPeters, R. D., Labow, G. J., Fleming, E. L., Praderas, C. J., & Russell, J. M. (2001). Northern Hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 solar proton event. *Geophysical Research Letters*, *28*(15), 2883-2886. https://doi.org/10.1029/2001GL013221

John, S. R., & Kumar, K. K. (2012). TIMED/SABER observations of global gravity wave climatology and their interannual variability from stratosphere to mesosphere lower thermosphere. *Climate Dynamics*, *39*(6), 1489-1505.

https://doi.org/10.1007/s00382-012-1329-9

Kam, H., Song, I.-S., Kim, J.-H., Kim, Y. H., Song, B.-G., Nakamura, T., Tomikawa, Y., 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*(24), e2021JD035. https://doi.org/10.1029/2021JD035842

Kogure, M., Yue, J., Nakamura, T., Hoffmann, L., Vadas, S. L., Tomikawa, Y. et al. (2020). First direct observational evidence for secondary gravity waves generated by mountain waves over the Andes. *Geophysical Research Letters*, *47*(17), e2020GL088. https://doi.org/10.1029/2020GL088845

Koshin, D., Sato, K., Miyazaki, K., & Watanabe, S. (2020). An ensemble Kalman filter data assimilation system for the whole neutral atmosphere. *Geoscientific Model Development*, *13*(7), 3145-3177. https://doi.org/10.5194/gmd-13-3145-2020

Kóvacs, T., Plane, J. M. C., Feng, M., Nagy, T., Chipperfield, M. P., Verronen, P. T., et al. (2016). D-region ion-neutral coupled chemistry (Sodankylä Ion Chemistry, SIC) within the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM 4) - WACCM-SIC and WACCM-rSIC. *Geoscientific Model Development*, *9*(9), 3123-3136. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3123-2016

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

Lee, J.-H., Jee, G., Kwak, Y.-S., Hwang, H. Seppälä, A., Song, I.-S., et al. (2021). Polar middle atmospheric responses to medium energy electron (MEE) precipitation using numerical model simulations. *Atmosphere*, *12*(2), 133. https://doi.org/10.3390/atmos12020133

Liu, H.-L. (2025). Transport of nitric oxide in the winter mesosphere and lower thermosphere. *Geophysical Research Letters*, *52*(3), e2024GL113027. https://doi.org/10.1029/2024GL113027

Liu, X., Xu, J., Yue, J., & Kogure, M. (2022). Persistent layers of enhanced gravity wave dissipation in the upper mesosphere revealed from SABER observations. *Geophysical Research Letters*, *49*(5), e2021GL097038. https://doi.org/10.1029/2021GL097038

Liu, X., Xu, J., Yue, J., Vadas, S. L., & Becker, E. (2019). Orographic primary and

KOPRI 극지연구소

secondary gravity waves in the middle atmosphere from 16-Year SABER observations. *Geophysical Research Letters*, *46*(8), 4512-4522. https://doi.org/10.1029/2019GL082256

Martineau, P., Chen, G., Son, S.-W., & Kim, J. (2018). Lower-stratospheric control of the frequency of sudden stratospheric warming events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*(6), 3051-3070. https://doi.org/10.1002/2017JD027648

Marsh, D. R., Mills, M. J., Kinnison, D. E., Lamarque, J.-F., Calvo, N., & Polvani, L. M. (2013). Climate change from 1850 to 2005 simulated in CESM1 (WACCM). *Journal of Climate*, *26*(19), 7372-7391. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00558.1

McCormack, J. P., Hoppel, K., Kuhl, D., deWit, R., Stober, G., Espy, P. et al. (2017). Comparison of mesospheric winds from a high-altitude meteorological analysis system and meteor radar observations during the boreal winters of 2009-2010 and 2012-2013, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *154*, 132-166. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.12.007

McFarlane, N. A. (1987). The effect of orographically excited gravity wave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *44*(14), 1775-1800. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<1775:TEOOEG>2.0.CO;2

Medvedev, A. S., & Klaassen, G. P. (2003). Thermal effects of saturating gravity waves in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *108*(D2), 4040. https://doi.org/10.1029/2002JD002504

Meraner, K., & Schmidt, H. (2016). Transport of nitrogen oxides through the winter mesopause in HAMMONIA. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *121*(6), 2556-2570. https://doi.org/10.1002/2015JD024136

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, *Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation*, *28*, NASA/TM-2012-104606-VOL-28. ftp://gmaoftp.gsfc.nasa.gov/pub/data/kovach/S2S_OceanAnalysis

Orsolini, Y. J., Limpasuvan, V., Pérot, K., Espy, P., Hibbins, R., Lossow, S., et al. (2017). Modelling the descent of nitric oxide during the elevated stratopause event of January 2013. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *155*, 50-61. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.01.006

KOPRI 극지연구소

Park, J., Luhr, H., Lee, C., Kim, Y. H., Jee, G., & Kim, J.-H. (2014). A climatology of medium-scale gravity wave activity in the midlatitude/low-latitude daytime upper thermosphere as observed by CHAMP. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *119*(3), 2187-2196. https://doi.org/10.1002/2013JA019705

Pedatella, N. M., Raeder, K., Anderson, J. L., & Liu, H.-L. (2014). Ensemble data assimilation in the Whole Atmosphere Community Climate Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(16), 9793-9809. https://doi.org/10.1002/2014JD021776

Polvani, L. M. & Kushner, P. J. (2002). Tropospheric response to stratospheric perturbations in a relatively simple general circulation model. *Geophysical Research Letters*, *29*(7), 18 - 1 - 18 - 4. https://doi.org/10.1029/2001GL014284

Randall, C. E., V. L. Harvey, C. S. Singleton, S. M. Bailey, P. F. Bernath, M. V. Codrescu, H. Nakajima, and J. M. Russell III (2007), Energetic particle precipitation effects on the Southern Hemisphere stratosphere in 1992-2005, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*(D8), D08308. https://doi.org/10.1029/2006JD007696

Scinocca, J. F., & McFarlane, N. A. (2000). The parameterization of drag induced by stratified flow over anisotropic orography. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *126*(568), 2353-2393. https://doi.org/10.1002/qj.49712656802

Smith, K. L., Neely, R. R., Marsh, D. R., & Polvani, L. M. (2014). The Specified ChemistryWhole Atmosphere Community Climate Model (SC-WACCM). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *6*(3), 883-901. https://doi.org/10.1002/2014MS000346

Smith-Johnsen, C., Nesse Tyssøy, H., Hendrickx, K., Orsolini, Y., Kishore Kumar, G., Ødegaard, L.-K. G., et al. (2017). Direct and indirect electron precipitation effect on nitric oxide in the polar middle atmosphere using a full-range energy spectrum. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *122*(8), 8679-8693. https://doi.org/10.1002/2017JA024364

Song, I.-S. (2023). A modeling system for whole atmosphere dynamics researches, in proceedings of 60th Korean Meteorological Society 2023 Spring Conference, Korea Meteorological Society, Busan, South Korea.

Song, I.-S. & Chun, H.-Y. (2008). A Lagrangian spectral parameterization of gravity wave drag induced by cumulus convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*,

65(4), 1204-1224. https://doi.org/10.1175/2007JAS2369.1

Song, I.-S., Lee, C., Chun, H.-Y., Kim, J.-H., Jee, G., Song, B.-G., et al. (2020). Propagation of gravity waves and its effects on pseudomomentum flux in a sudden stratospheric warming event. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *20*(12), 7617-7644. https://doi.org/10.5194/acp-20-7617-2020

Swadley, S. D., Poe, G. A., Bell, W., Hong, Y., Kunkee, D. B., McDermid, I. S. et al. (2008). Analysis and characterization of the SSMIS upper atmosphere sounding channel measurements, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *46*(4), 962-983. https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.916980

Sinnhuber, M., Arras, C., Bender, S., Funke, B., Liu, H.-L., Marsh, D. R., et al. (2025). Thermospheric nitric oxide is modulated by the ratio of atomic to molecular oxygen and thermospheric dynamics during solar minimum. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *25*(21), 14719-14734. https://doi.org/10.5194/acp-25-14719-2025

Sinnhuber, M., Nieder, H., & Wieters, N. (2012). Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere. *Surveys in Geophysics*, *33*(6), 1281 - 1334. https://doi.org/10.1007/s10712-012-9201-3

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., Fritts, D. C., & Alexander, M. J. (2003). Mechanism for the generation of secondary waves in wave breaking regions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *60*(1), 194-214. https://doi.org/10.1175/1520-0469(2003)060<0194:MFTGOS>2.0.CO;2

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

KOPRI 극지연구소

Vadas, S. L., Becker, E., Bossert, K., Baumgarten, G., Hoffmann, L., & Harvey, V. L. (2023). Secondary gravity waves from the stratospheric polar vortex over ALOMAR observatory on 12–14 January 2016: Observations and modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *128*(2), e2022JD036. https://doi.org/10.1029/2022JD036985

Verronen, P. T., Seppälä, A., Kyrölä, E., Tamminen, J., Pickett, H. M., & Turunen, E. (2006). Production of odd hydrogen in the mesosphere during the January 2005 solar proton event. *Geophysical Research Letters*, *33*, L24811. https://doi.org/10.1029/2006GL028115

Verronen, P. T., Andersson, M. E., Marsh, D. R., Kóvacs, T., & Plane, J. M. C. (2016). WACCM-D: Whole Atmosphere Community Climate Model with D-region ion chemistry. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, *8*(2), 954-975. https://doi.org/10.1002/2015MS000592

Vitt, F. M., & Jackmann, C. H. (1996). A comparison of sources of odd nitrogen production from 1974 through 1993 in the Earth's middle atmosphere as calculated using a two-dimensional model. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, *101*(D3), 6729-6739. https://doi.org/10.1029/95JD03386

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.