이상 실험을 이용한 역학 코어에 따른 성층권 돌연 승온 모의 비교

연세대학교 대학원
지구천문대기학부(대기과학과)
박 준 성

이상 실험을 이용한 역학 코어에 따른 성층권 돌연 승온 모의 비교

지도교수 박 상 훈

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2020년 12월 28일

연세대학교 대학원

지구천문대기학부(대기과학)

박 준 성

감사의 글

석사 학위 논문을 마무리하면서 주변 사람들이 왜 감사의 글이 가장 쓰기 어렵다고 하는지 깨닫게 됩니다. 먼저 박상훈 교수님, 항상 열정적인 지도와 지원에 감사드립니다. 석사 학위 심사위원이시기 이전에 평소에도 학생들을 위해 적극적으로 손 내밀어주시는 전혜영 교수님, 송하준 교수님 두 분께도 감사의 뜻을 전하고 싶습니다. 약 1년 간의 짧은 연수생 신분이었지만 많은 가르침을 주신 극지연구소 직원 분들도 잊지 않고 있습니다. 극지연구소에서 있었던 시간이 저에게는 매우 즐겁고 유익한 경험이었습니다. 그리고 대기모형 연구실 구성원들에게도 고맙다는 말 전합니다. 좋은 동료와, 친구들과 함께할 수 있다는 것이 얼마나 소중하고 귀한 일이라는 것을 알기에 지금이나마 솔직한 마음을 적습니다. 학부 때는 그저 웃고 장난치던 친구였지만 이제는 한 명의 사회인이 된 이경태. 항상 새로운 관점과 에너지를 불어넣어주는 전지혁, 김윤수, 그리고 친구들 모두 고맙습니다.

졸업 논문이 아니더라도 항상 감사하는 마음인 분들이 있습니다. 부모님, 두 분은 '나'라는 존재의 시작이십니다. 지금의 제가 있기까지 부모님이라는 의미가 얼마나 큰 무게를 차지하는지 알고 있습니다. 티격태격하는 동생에게도 겉으로는 드러내지 못하지만 고맙다는 말 하고 싶습니다. 함께하는 많은 가족들이 있지만 특히 홍종옥 여사님, 제가 할 수 있는 모든 좋은 말들을 다 동원하여도 받았던 사랑을, 드리고 싶은 마음을 표현하지 못할 겁니다. 마지막으로 지금 제 옆을 지켜주는 유주에게 고마움을 전합니다. 절 이끌어주신 모든 분들에게 좋은 일만 가득하길 바랍니다. 감사합니다.

2020년 12월 22일

박준성 올림.

차 례

차 례 i

그림 차례 iii

표 차례 vi

국문 요약 vii

제 1 장. 서론 ..... - 9 -

1.1 연구 배경 ..... - 9 -

1.2 연구 동기 ..... - 13 -

제 2 장. 연구 방법 ..... - 19 -

2.1 실험 설계 ..... - 19 -

2.1.1 GP09 이상 실험 ..... - 19 -

2.1.2 Community Atmospheric Model version 5 와 역학 코어 ..... - 24 -

2.1.3 Polar filter ..... - 28 -

2.2 SSW 분류 및 분석 - 30 -

제 3 장. 연구 결과 - 35 -

3.1 지형 강제력 효과와 실험 설계의 타당성 - 35 -

3.2 SSW 발생 모의 과정 - 42 -

3.2.1 Major event - 42 -

3.2.2 Pure Minor event - 53 -

3.3 FV 는 왜 SSW 를 생성하지 못하는가? - 57 -

3.4 Polar filter 민감도 실험 - 61 -

제 4 장. 요약 및 결론 - 66 -

참고 문헌 - 68 -

ABSTRACT - 70 -

그림 차례

Figure 1. (top) The 10 hPa, 65°-90°N observed zonal-mean temperatures and (bottom) zonal mean wind at 60°N for 2018-2019. 2018/2019 data is seen as the red line. The yellow line and gray shadings show the average conditions and percentiles of 1979-2019 as climatology data, respectively. Solid line is max or min for same climatology data. Baldwin et al. (2019). ..... - 10 -

Figure 2. Latitude-pressure cross section of the time-invariant Held-Suarez-Williamson(HSW) equilibrium temperature. Yao & Jablonowski (2016). ..... - 15 -

Figure 3. The 10800-day time series of the zonal mean zonal wind at 60°-61°N, 9.3 hPa for each dynamical cores. Shading is spin-up period. Easterly zonal mean wind indicates occurrence of SSW major event. Yao & Jablonowski (2016) ..... - 16 -

Figure 4. Radiative equilibrium temperature of experiment no. 9 in GP09. ..... - 22 -

Figure 5. Surface geopotential of experiment no. 9 in GP09. ..... - 23 -

Figure 6. Vertical profile of mid-level layer in simulation. X-axis means space of each layers. Y-axis is height of layers. CAM5 default(Red), Modified profile which is used in this paper(Blue). ..... - 27 -

Figure 7. Example of SSW classification. (top) zonal mean zonal wind at 10 hPa, 60°N, (bottom) Subtraction of zonal mean temperature at 10 hPa, 60°N and at 10hPa, 90°N. Data is from EXP 6. Grey shading is Minor event, coral shading is major event. Numbers in circles

indicate : ① Pre-stage of Minor, ② MAM ③ PM. ..... - 33 -

Figure 8. Same as Figure 7 but yellow region indicates PM..... - 34 -

Figure 9. Time series of zonal mean zonal wind at 10 hPa, 60°N for NOTOPO. (a) EUL, (b) FV, (c) SE. ..... - 36 -

Figure 10. Time series of zonal mean temperature difference between 60°N, and North Pole at 10 hPa for NOTOPO. (a) EUL, (b) FV, (c) SE... - 37 -

Figure 11. Same as Figure 9, but for TOPO. ..... - 38 -

Figure 12. Same as Figure 10, but for TOPO. ..... - 39 -

Figure 13. Pressure-latitude cross section of the 4000 days mean zonal mean zonal wind in (top) EUL, (middle) FV, (bottom) SE. Left/Right columns are NOTOPO/TOPO result. ..... - 40 -

Figure 14. EP flux and divergence($ms^{-1}day^{-1}$) of Major SSW stages (a) Climatology, (b) Pre-stage of MAM, (c) MAM, (d) Major in EUL dynamical core. ..... - 43 -

Figure 15 Same as Figure 14, but for SE. ..... - 44 -

Figure 16. Wave decomposed EP flux & divergence($ms^{-1}day^{-1}$) of climatology and Pre-stage of MAM in EUL. ..... - 47 -

Figure 17. Same as Figure 16, but for Pre-stage of MAM..... - 47 -

Figure 18. Same as Figure 16, but for MAM and Major. ..... - 48 -

Figure 19. Same as Figure 16, but for Major stage..... - 48 -

Figure 20. Probability of ZWN-2 negative refractive index ($\eta_2^2 < 0$) during (a) Climatology, (b) MAM, (c) Major stage. Red lines are time-mean

zero wind lines of each stage. ..... - 50 -

Figure 21 (a) PV meridional gradient of Climatology. (b), (c) is second, third term of (a), respectively. ..... - 51 -

Figure 22 Same as Figure 21, but for Major stage. ..... - 51 -

Figure 23. Same as Figure 16, but for Pre-stage of PM. ..... - 54 -

Figure 24. Same as Figure 16, but for Ongoing stage ..... - 54 -

Figure 25 EP flux & divergence($ms^{-1}day^{-1}$) of subtraction from Ongoing to MAM. Black boxes show the range ($\phi = 56{,}64°N, p = 7.5{,}12.5\ hPa$) ... - 55 -

Figure 26 Time-mean wave decomposed EP flux difference of FV and EUL (FV-EUL) during Ongoing stage. From left to right figures show total, ZWN 1, ZWN 2, ZWN 3, respectively. ..... - 58 -

Figure 27 Same as Figure 26, but for Ongoing stage. ..... - 58 -

Figure 28. Probability of ZWN-2 negative refractive index ($\eta_2^2 < 0$) during Ongoing stage in FV. ..... - 60 -

Figure 29. Time series of zonal mean zonal wind at 10 hPa, 60°N for experiment 5, 7, 8. Critical latitude of each figures are (a) 40°N, (b) 60°N, (c) 70°N. ..... - 62 -

Figure 30. Time series of zonal mean temperature difference between 60°N, and North Pole at 10 hPa for experiment 5, 7, 8. Critical latitude of each figures are (a) 40°N, (b) 60°N, (c) 70°N. ..... - 63 -

Figure 31 EP flux & divergence($ms^{-1}day^{-1}$) of Major stage in EXP 8. - 65 -

표 차례

Table 1 Horizontal resolution and time interval of integration.....- 26 -

Table 2 Experiment list 1 .....- 26 -

Table 3 Experiment list 2 .....- 29 -

Table 4 Number of SSW occurrence days and events .....- 41 -

Table 5 EP flux divergence($ms^{-1}day^{-1}$) mean of black domains in Figure 25...- 56 -

Table 6. Mean vertical EP flux (Fp) in 10 ~ 100 hPa, 40 ~ 60˚N domain. 10^5Pa m^2/s^2 .....- 60 -

Table 7 Number of SSW occurrence days and events in EXP 5, 7, 8.....- 61 -

국문 요약

이상 실험을 이용한 역학 코어에 따른 성층권 돌연 승온 모의 비교

성층권 돌연 승온(Sudden Stratospheric Warming; SSW)은 겨울 반구의 극 성층권에서 발생하는 이상 고온 현상으로 대류권에서부터 연직 전파하는 행성파에 의해 발생하며 역으로 대류권 기상 현상에 영향을 주기도 한다. 따라서 SSW는 성층권 변동성과 성층권-대류권 상호작용을 보여주는 지표로 판단할 수 있으며 중장기 수치 모형에서 정확한 모의 과정을 필요로 한다. 하지만 수치 모형들 간의 역학적, 물리적, 수치해석적 차이가 존재하므로, 동일한 강제력에 대한 대류권-성층권 연계 과정의 모의, 여기서는 SSW의 모의에 있어 서로 다른 결과를 도출한다.

본 연구에서는 역학 코어들의 성층권 돌연 승온 모의 성능을 명확히 비교하기 위해 역학 과정을 제외한 기타 과정들을 간단한 온도 및 마찰 강제력으로 모수화한 Polvani and Kushner (2002)의 실험 조건과 Gerber and Polvani (2009)에서 제시된 지형을 포함한 이상 실험을 적용하였다. 수치 실험을 위해 전구 모델인 Community Earth System Model, version 2 (CESM2)에 내장된 3개

의 역학 코어, Finite-Volume (FV), Spectral-Element (SE), Eulerian spectral-transform (EUL)를 사용하여 실험 및 비교를 진행하였다.

EUL, SE는 비교적 비슷한 Major, Minor SSW 발생 횟수를 보였다. FV에서는 Major SSW를 모의하지 못했을 뿐만 아니라 minor SSW의 발생 횟수도 타 역학 코어에 비해 현저히 적었다. Polar filter의 적용 위도에 따라 FV의 모의 성능이 개선되는 효과를 보였으나 극에서 발생하는 비합리적인 현상들을 발견, 추가적인 연구에 대한 필요성을 제시하였다.

핵심되는 말 : 역학 코어, 이상 실험, 성층권 돌연 승온, 수치 모형

제1장. 서론

1.1 연구 배경

겨울 반구 성층권 대기는 복사 냉각에 의해 형성된 극 소용돌이를 포함하고 있다. 극 소용돌이는 중·고위도 사이에는 온도풍 관계에 의해 발생한 강한 편서풍 띠로 구분되며 이로 인한 북극의 온도는 10 hPa에서 약 -55 ~ -65℃이다. 하지만 지속적인 관측을 통해 겨울철, 극 지역 상공 성층권 기온이 기존보다 급격히 상승하는 현상이 발견되었다. 추후 이어진 관측들에서 대략적으로 2년 정도주기를 갖고 10 km ~ 50 km 상공 기온이 약 30℃의 온도 상승을 수일 간 유지되는 것을 보였다. 해당 현상은 극 소용돌이도가 해제되며 성층권 편서풍이 반전되는 과정을 포함하여 진행된다. Figure 1은 2018/2019년 겨울에 발생한 사례의 10 hPa, 60°N 의 동서 방향 바람의 경도별 평균과 동일 고도, 65° ~ 90°N의 평균 온도이다. 1979 ~ 2019년 사이의 자료와 비교하여 급격한 온도 상승을 비롯한 풍향 전환을 확인할 수 있다.

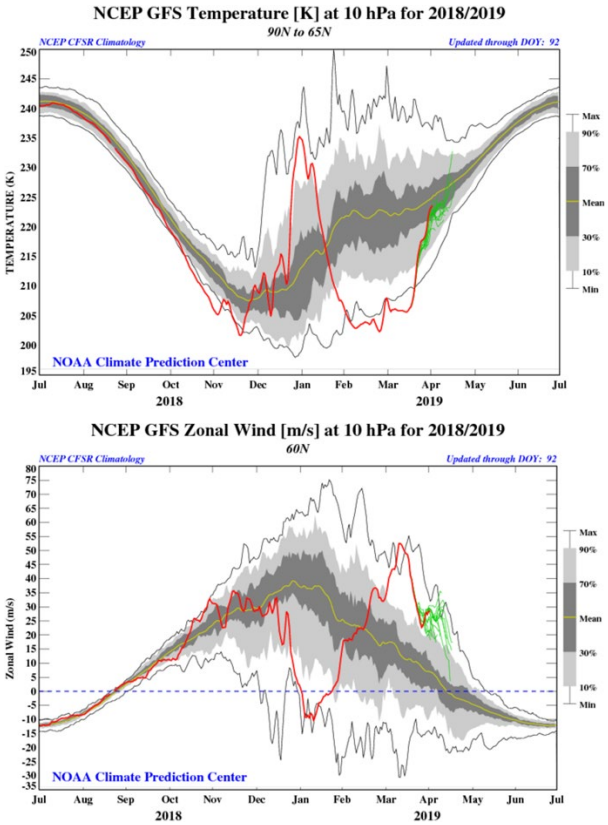

Figure 1. (top) The 10 hPa, 65°-90°N observed zonal-mean temperatures and (bottom) zonal mean wind at 60°N for 2018-2019. 2018/2019 data is seen as the red line. The yellow line and gray shadings show the average conditions and percentiles of 1979-2019 as climatology data, respectively. Solid line is max or min for same climatology data. Baldwin et al. (2019).

SSW의 발생 매커니즘에 대한 연구 또한 활발히 이루어졌다. Matsuno (1971)에서는 단열, 지균을 가정한 잠재 와도 방정식을 기반으로 하는 모델을 이용하여 대류권에서 발생하는 파수 1, 2인 행성파가 SSW 발생에 주요한 역할을 한다는 것을 밝혔다. Holton (1976)에서는 Matsuno (1971)을 바탕으로 원시 방정식을 이용한 실험을 진행하였고 파수 1, 2가 서로 다른 역학적 과정을 거쳐 SSW 발생에 영향을 줌을 밝혔다.

Jucker and Reichler (2018)에서는 100 hPa에서 연직 전파하는 EP flux와 30 hPa의 위도 방향 잠재 와도 경도를 사전 지표로 SSW 발생의 연관성을 밝히기도 하였으며 Mcintyre (1982)에서는 대류권에서 발생하는 블로킹 현상과의 순차적 연관성이 있음을 보였다.

역으로 성층권 변동성이 대류권에 작용하는 현상들에 대한 연구도 진행되었다. Jung and Barkmeijer (2005) 에서는 ECMWF를 이용하여 겨울철 극 소용돌이를 강화 혹은 약화시켰을 때 대류권에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 해당 실험 결과 대류권 순환에 변화를 주며 태풍 경로에 영향을 주는 것으로 확인되었다.

Holton and Tan (1980)에서는 처음으로 Quasi-Biennial Oscillation (이하, QBO) 위상과 극 소용돌이 강도와의 연관성을 나타내는 Holton-Tan 효과를 제시하였다. Holton-tan effect에 따르면 QBO easterly phase (이하, eQBO)에서 극 소용돌이가 약해지며 반대인 QBO westerly phase (이하, wQBO) 에서

강해지는 경향성을 보인다. 추가적인 연구가 진행됨에 따라 Lu et al. (2008)에서는 Holton-Tan 효과에 의해 wQBO보다 eQBO에서 SSW가 빈번하게 발생함을 보였다. 이는 SSW가 단순히 행성파 규모의 파장과 평균류 사이의 상호작용 뿐만 아니라 나아가 중력파의 영향력에 대한 고찰의 필요성을 시사한다.

1.2 연구 동기

SSW와 관련한 역학적, 현상학적 연구들 뿐만 아니라 모델을 통해 구현하는 것 또한 도전적인 과제이다. 앞서 언급한 내용들은 SSW가 (1) 성층권 변동성과 (2) 성층권-대류권 상호작용의 지표임을 알려준다. 따라서 중장기 수치 모형에서 SSW를 모의하기 위해서는 (1), (2)를 모두 포함하는 정확한 역학 과정을 구현해야한다. 하지만 수치 모형들 사이의 역학적, 수치해석적 차이가 존재하므로, 동일한 강제력에 대해 SSW와 같은 현상들의 모의는 서로 다른 결과를 도출한다.

순수한 역학 과정을 보는 방법의 하나로 물리 과정을 단순화한 건조 이상 실험이 있다. 대표적으로 Held & Suarez (1994; 이하 HS94), Williamson et al. (1998), Polvani and Kushner (2002; 이하, PK02), Gerber and Polvani (2009; 이하, GP09)등이 그 예시이다. Yao and Jablonowski (2016; 이하, YJ16)는 PK02를 이용하여 수치 모형 내에서 구현되는 성층권 변동성 및 성층권-대류권 상호작용에 대하여 분석하였다. 겨울 반구의 성층권 극 소용돌이를 구현한 이상 실험으로 물리적 과정을 간단한 복사 평형 온도에 의한 강제력으로 대체하여 역학 코어의 역할과 영향을 집중적으로 분석하였다. GP09는 여기에

단순화한 지형을 생성하여 지면으로부터 행성파 강제력을 유도하였다. 실험 결과 지형의 높이, 형태에 따라 성층권 변동성에 변화가 있음을 확인하였고 SSW가 발생하는 최적의 조건을 제시하였다. 또한 성층권 변동성이 대류권 변동성의 시간 규모에 영향을 미치며 대류권에서 북극 진동 지수에 영향을 미치는 것을 보였다. 하지만, GP09는 Geophysical Fluid Dynamics Laboratory(이하, GFDL)의 spectral dynamical core에 대한 실험만을 진행하였으며 역학 코어에 따른 차이는 고려하고 있지 않다.

Williamson et al. (1998)에서는 지형이 없는 조건에서, Held & Suarez (1994)에서 제시한 남·북반구 대칭인 복사 평형 온도를(Figure 2) 강제력으로 실험하였다. 해당 연구는 4개의 역학 코어들 Spectral element (SE), Finite volume (FV), Eulerian spectral transformed model (EUL), semi-Lagrangian (SLD)로부터 도출된 결과들을 비교하였다. Figure 3은 각 역학 코어에서 나온 결과로부터 계산된 60°-61°N, 9.3 hPa 지점의 동서 방향 바람의 동서 평균을 보여준다. 바람이 동풍으로 바뀐 경우 SSW가 발생한 것으로 보는데 결과적으로 SLD에서만 SSW가 발생함을 확인할 수 있다.

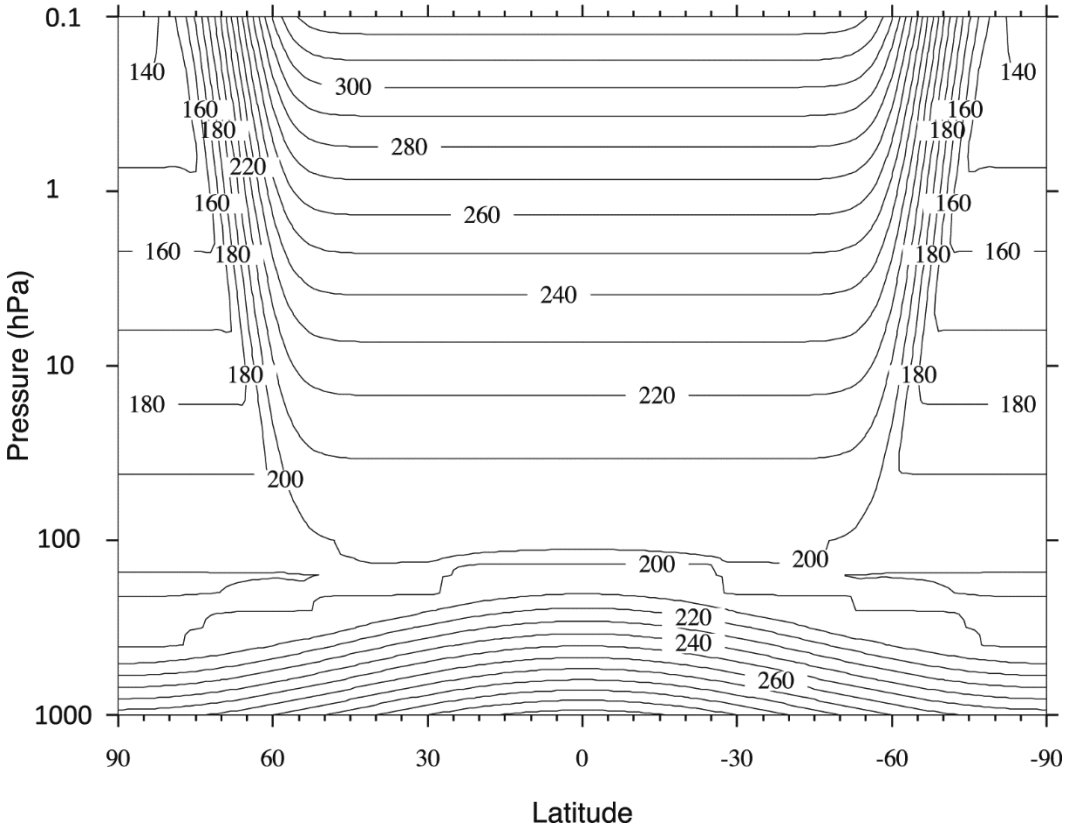

Figure 2. Latitude-pressure cross section of the time-invariant Held-Suarez-Williamson(HSW) equilibrium temperature. Yao & Jablonowski (2016).

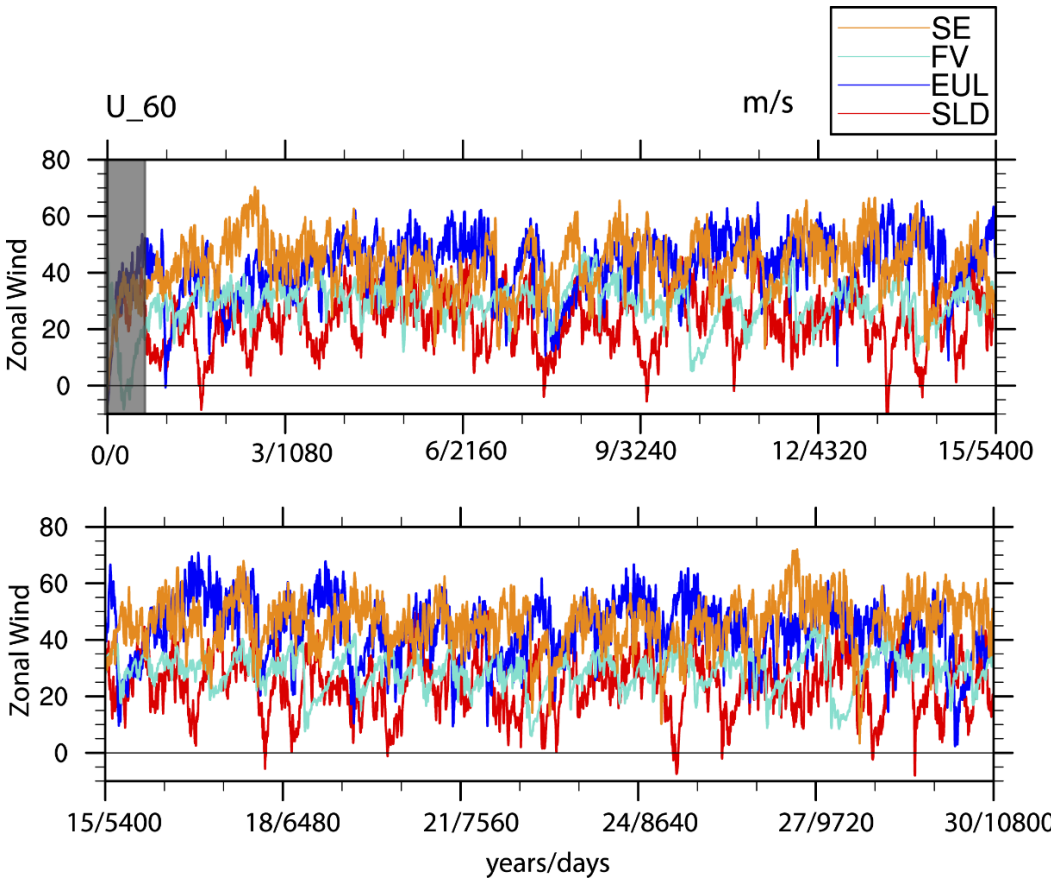

Figure 3. The 10800-day time series of the zonal mean zonal wind at 60°-61°N, 9.3 hPa for each dynamical cores. Shading is spin-up period. Easterly zonal mean wind indicates occurrence of SSW major event. Yao & Jablonowski (2016)

YJ16은 SSW를 모의하는데 있어 역학 코어에 따른 차이가 존재함을 보여줬지만 실험에 대한 두 가지 의문점을 갖게 한다. 첫째로 HSW 복사 평형 온도의 대칭성이다. SSW가 발생하는 겨울에는 분명한 기온의 비대칭성이 존재한다. HSW 복사 평형 온도의 대칭적 구조로부터 기인하여 YJ16의 실험에는 성층권 극 소용돌이가 부재하며, 이는 SSW 모의에 있어 불충분한 배경으로 사료된다. 둘째로 행성파를 만드는 요인이 없다. YJ16는 지형이 없으며 균질한 지면 마찰만이 존재한다. 앞선 선행 연구들이 SSW 발생에 있어서 행성파의 중요성을 보인 것과는 반대된다. 종관 규모 파동으로부터 생성되는 행성파 또한 확인되었으나 이를 모델 내 행성파 발생의 주된 요인으로 보기 어려우며 SLD의 시간 및 동서 방향 평균 온도장과 동서 방향 바람장 모의가 다른 역학 코어들과는 큰 차이를 보인다는 점 자체에 대한 의구심도 생긴다.

본 연구에서는 SSW를 모의하는데 있어 동일한 강제력에 대한, 여기서는 지형에 의한, 역학 코어의 반응을 비교 분석하고자 한다. YJ16과 목적은 유사하다. 단, 실험 설계 과정에서 SSW 모의에 보다 적합하다고 판단되는 GP09을 적용하였으며 이를 통해 제시된 두 가지 의문점에 - 복사 평형 온도의 대칭성과 행성파 발생 요인의 부재 - 대한 의구심을 제외하였다. 2장에서는 실험 및

분석 방법을 제시하고 3장은 결과에 대한 분석을 담고 있다. 분석에 있어서는 각 역학 코어에서 지형적 강제력이 주는 영향을 보이고 모형 내에서 역학 코어마다 보이는 SSW 모의 과정을 중점적으로 살펴볼 것이다. 추가적으로 FV의 polar filer에 적용되는 실험을 설명하고 4장에서 결론과 함께 마무리된다.

제2장. 연구 방법

2.1 실험 설계

2.1.1 GP09 이상 실험

본 연구의 모형 실험의 내부적 설계는 GP09를 기반으로 한다. GP09에서 적용한 PK02 복사 평형 온도는 HS94를 북반구 겨울철 환경에서 성층권까지 확장한 구조이다. PK02 복사 평형 강제력을 구성하는 주요식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \cdots - k_T(\phi, \sigma)\left[T - T_{eq}(\phi, p)\right] \tag{1}$$

$$T_{eq}(\phi, p) = \begin{cases} T_{eq}^{trop}(\phi, p) \\ T_{eq}^{strat}(\phi, p) \end{cases} \tag{2}$$

$$T_{eq}^{trop} = max\left\{200, [315 - \delta T]\left(\frac{p}{p_o}\right)^{\kappa}\right\} \tag{3}$$

$$\delta T = (\Delta T)_y \sin^2\phi - \epsilon \sin(\phi) - (\Delta\theta)_z \log\left(\frac{p}{p_0}\right)\cos^2\phi \tag{4}$$

$$T_{eq}^{strat} = [1 - W(\phi)]T_{US}(p) + W(\phi)T_{PV}(p) \tag{5}$$

$$T_{PV}(p) = T_{US}(p_T)\left(\frac{p}{p_T}\right)^{\frac{R\gamma}{g}} \tag{6}$$

T_{eq} : 복사 평형 온도

T_{US} : 미국 표준 대기

γ : 성층권 단열 감률 (K/km) (0,1,2,...)

위 식에서 주요한 부분은 성층권 단열 감률(γ)이다. γ는 북반구 성층권 극 소용돌이도의 강도를 결정하는 항이다. γ가 클수록(작을수록) 극 소용돌이가 강화(약화)되며 성층권 제트가 강화(약화)된다.

이상 지형 또한 실험의 중요 조건이다. 실제 지형과 다른 단순한 이상 지형을 이용하여 서로 다른 파수의 행성파를 생성, 강화하여 그 효과를 보는데 목적이 있다. 식은 아래와 같다.

$$\Phi(\lambda,\phi) = \begin{cases} gh_0 \sin^2\left(\frac{\phi-\phi_0}{\phi_1-\phi_0}\pi\right)\cos(m\lambda) & \phi_0 < \phi < \phi_1 \\ 0 & \end{cases} \tag{7}$$

$\phi_0 = 25°$ $\phi_1 = 65°$ $(\lambda,\phi) = (lonigutde, latitude)$

h_0 : 최대 고도 (m)

m : 지형의 동서 방향 파수

g : 중력 가속도 (m/s^2)

GP09에서는 γ, h_0, m 값에 따른 SSW 발생 빈도를 보였는데 GP 09의 9번 실험 조건인 $\gamma = 4$, $h_0 = 3000$, $m = 2$ 일 때 가장 합리적인 결과를 보였다 (Gerber and Polvani 2009). Figure 4, Figure 5는 각각 9번 실험의 복사 평형 온도와 지형의 지오포텐셜을 나타낸 그림이며 본 연구에서는 해당 조건과 동일한 이상 실험 구현하였다.

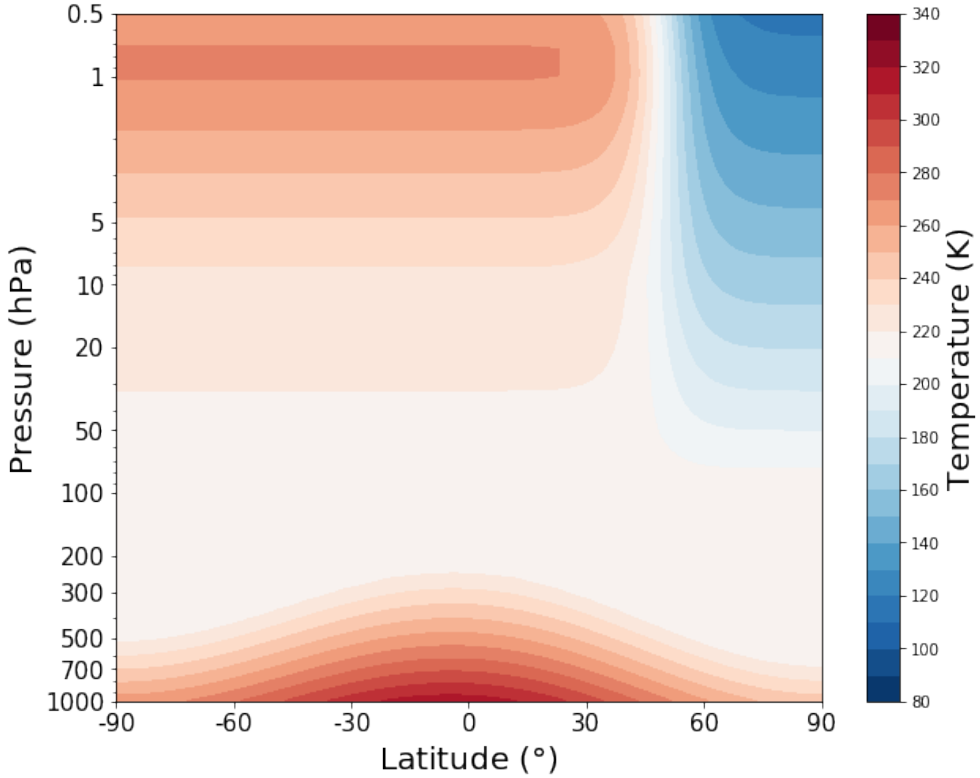

Figure 4. Radiative equilibrium temperature of experiment no. 9 in GP09.

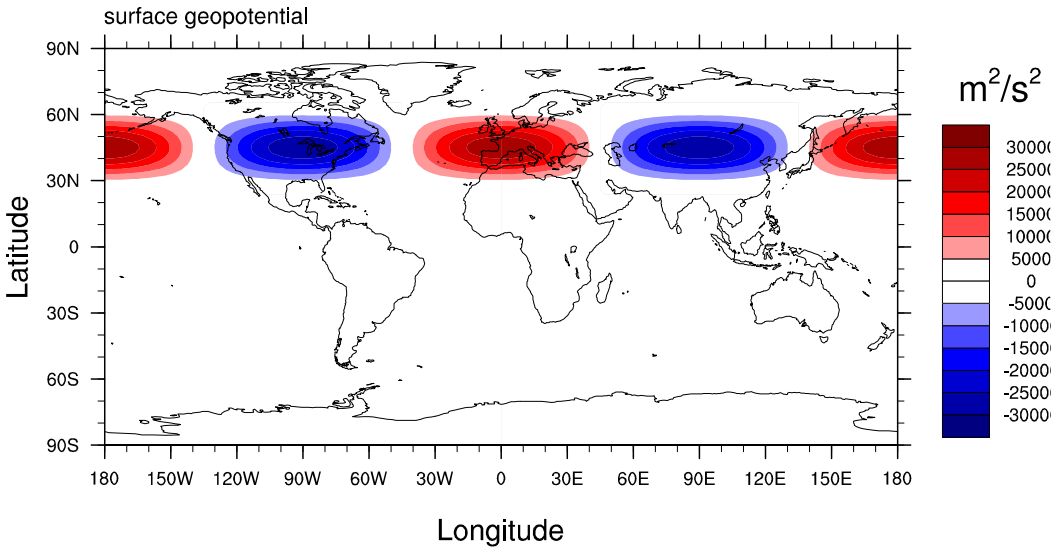

Figure 5. Surface geopotential of experiment no. 9 in GP09.

2.1.2 Community Atmospheric Model version 5와 역학 코어

Community Atmospheric Model version 5 (CAM5)는 National Center of Atmospheric Research (NCAR)에서 개발한 General Circulation Model(GCM)로 Community Earth System Model, version 1.2 (CESM1.2)에 내장되어 있다. 습윤 원시 방정식을 대기 운동 지배 방정식으로 택하였으며 총 4개의 역학 코어를 선택적으로 이용할 수 있다. 본 실험에서는 그 중 3개의 역학 코어, EUL, FV, SE를 사용하였다. 간략히 설명을 하자면 EUL는 미분을 푸리에 변환을 통해 파동 공간에서 진행한 후 구면 조화 함수를 기저로 하는 함수로 바꿔 계산을 진행하는 방식으로 위경도 격자를 사용한다. FV는 미분 방정식을 푸는 과정 중 발산항을 발산 정리를 이용하여 표면 적분 형태로 바꿔 해결하는 방식이며 EUL와 같이 위경도 격자를 사용한다. SE는 EUL와 같이 파동 공간에서 미분을 진행하는데 파동 공간으로 옮긴 식을 Galrekin 방법을 기본으로 한 유한 요소법을 사용하여 해를 구한다.

CAM5를 이용하여 제시된 GP09의 9번 실험에 대해 5000일 동안의 수치 실험을 진행하였으며 초기장부터 1000일 간의 결과는 spin-up으로 판단, 이후의 4000일에 대해 분석하였다. 각 역학 코어에서 사용한 수평 해상도는 약 2°×2°이며 자세한 내용은 Table 1에 서술하였다.

연직으로는 55개의 층을 설정하였으며 모델 상한은 약 0.15 hPa ~ 65km

이다 (Figure 6). 기존 CAM5의 기본으로 사용되는 30층 연직 격자 구조를 유지한 채로 모형의 최고 고도를 확장하였다. 따라서 약 5 ~ 50km 구간의 층간 간격은 약 1200m로 기존 설정과 동일하게 고정하였다. 0.5 hPa 부터 모델 상한까지 약 10 km 구간에는 Rayleigh 마찰이 적용되는 완충층(sponge layer)이 존재한다. 실험은 총 8개의 조건에 대해 진행되며 아래 Table 2는 이 중 첫번째 실험 그룹을 나타낸 표이다. 편의상 실험 1 ~ 3, 4 ~ 6 두 그룹을 각각 NOTOPO, TOPO로 명하였으며 앞으로 실험들을 지칭하는데 있어 지정된 번호(예 : EXP 2)를 사용하겠다.

NOTOPO에서 겨울철 극 소용돌이의 SSW에 미치는 영향 및 YJ16과의 비교를 주로 내용이 구성되어 있으며, 이후 NOTOPO, TOPO를 비교하여 지형 강제력의 SSW 발생에 대한 영향을 확인하고 해당 강제력에 대한 반응 결과를 역학 코어 간 비교하는데 목적을 두었다.

Table 1 Horizontal resolution and time interval of integration

Dycore	Resolution		Δt_{dyn} (s)
EUL	T42	~ 2°	600
FV	f19	1.9° ×2.5°	1800
SE	ne16	~ 2°	1800

Table 2 Experiment list 1

No.	Dycore	Topography	Remark
1	EUL	×	NOTOPO
2	FV		
3	SE		
4	EUL	○	TOPO
5	FV		
6	SE		

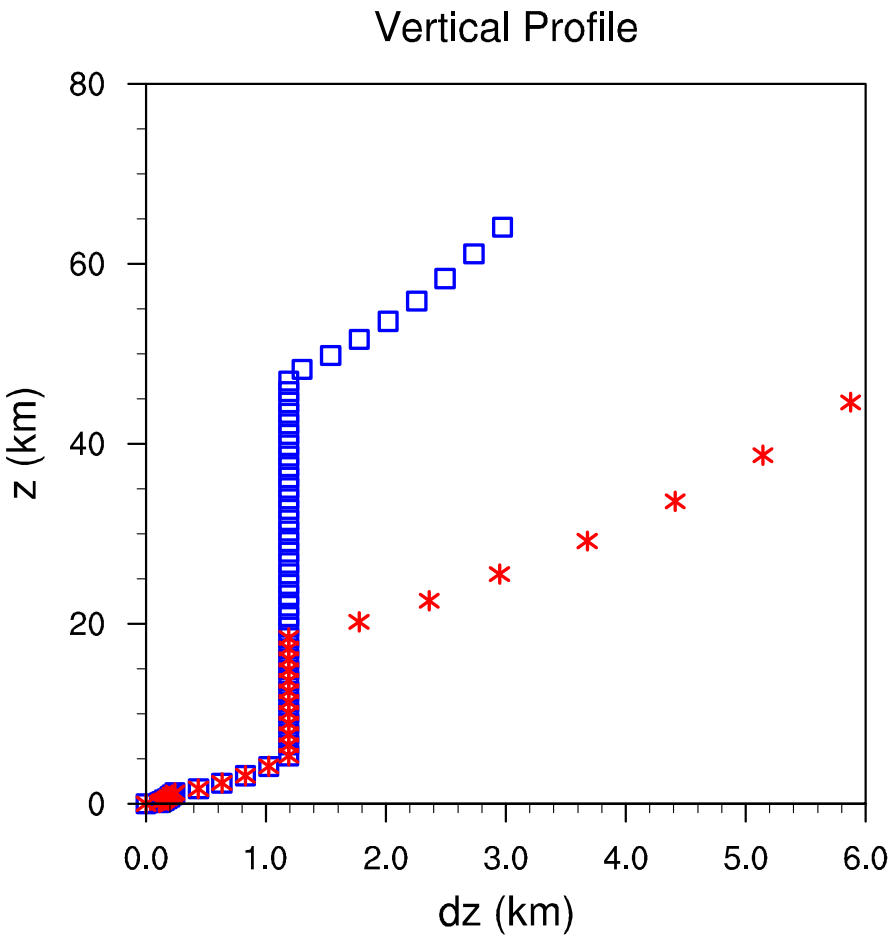

Figure 6. Vertical profile of mid-level layer in simulation. X-axis means space of each layers. Y-axis is height of layers. CAM5 default(Red), Modified profile which is used in this paper(Blue).

2.1.3 Polar filter

FV는 유한 차분법을 위경도 격자에 대해 적용한다. 위경도 격자는 동일 경도차일지라도 극으로 향할수록 실제 거리는 줄어들어 차분 과정에 있어 polar problem을 야기한다. 이를 해결하기 위한 방안으로 특정 위도 이상 지역의 진단 변수들을 파수에 따라 감쇄한다. 이를 "Polar filter"라 부르며 식은 다음과 같다.

$$\psi_{i,j} = \Sigma\, \hat{\psi}_{i,j} exp(-im\lambda_i) \tag{8}$$

$$\bar{\psi}_{i,j} = \Sigma \xi_{m,j} \hat{\psi}_{i,j} exp(-im\lambda_i) \tag{9}$$

$$\xi_{m,j} = \left[1, \left(\frac{\cos(\phi_j)}{\cos(\phi_{crit})} \frac{1}{\sin\left(m\frac{\pi}{IM}\right)}\right)^n\right] \tag{10}$$

$\psi_{i,j}$	: Diagnostic variable	λ_i	: Longitude
$\xi_{m,j}$	: Damping coefficient	ϕ_j	: Latitude
IM	: Number of longitudinal grid	ϕ_{crit}	: Critical latitude

Polar filter는 pole problem을 해결하고 모델을 안정시키는 장점이 있으나 진단 변수에 대한 인위적 감쇄로 인해 병렬화에 어려움이 있으며 대기의 자연적인 파동을 저해한다는 단점도 존재한다.

Table 3 Experiment list 2

No.	Dycore	Topography	Remark
7	FV	○	$\phi_{crit} = 60°$
8			$\phi_{crit} = 70°$

Table 3은 FV에서 SSW 모의에 있어 고려해볼 사항인 Polar filter의 적용 범위를 변화시킨 실험으로 40°N에 머무르던 기존의 critical latitude를 60°N, 70°N로 변경하였을 때를 비교 분석하였다.

2.2 SSW 분류 및 분석

SSW 현상을 선정하고 분류하는데 있어서는 Butler et al. (2017)에 서술된 방법을 이용하였다. 크게 SSW의 발생을 major, minor, final 세 가지로 나눴다. 이 중 final은 겨울에 발생한 SSW가 가을까지 이어지는 것으로 추가적인 설명은 제외하겠다.

Major SSW는 Charlton and Polvani (2007)과 동일하다. 10 hPa, 60°N 동서 방향 평균 동서풍이 0보다 작을 때, 즉, 동풍일 때를 Major 발생으로 본다. Minor는 10 hPa, 60°N 동서 방향 평균 온도가 10hPa, 90°N 온도보다 낮은 경우이다. 만약 20일 이내에 동일한 조건을 만족할 시 개별 사례가 아닌 하나의 사례로 판별하였다. 각 사례의 시작일로부터 20일 전 동안의 기간을 Pre-stage로 분류하였으며 그 외 모든 날을 기후값(climatology)으로 분류하였다.

연구를 진행하는 중 실험의 모든 Major가 Minor의 진행 과정에 나타나는 것을 확인하였고 이에 따라 네 가지 분류를 추가하였다. Major에 앞서 발생하는 3일 동안을 MAM이라 명명하였다. Major를 포함하지 않는 Minor를 “Pure Minor”(PM)로 지칭하였다. Figure 7은 EXP 6 결과의 일부로 해당 분류를 나눈 예시이다. 단, 여기서 주의해야할 점은 본 실험의 특성상 계절적 변화가 없기 때문에 복수의 Major, 혹은 Minor 사례가 연달아 발생할 수 있다. Figure 8은

그 예시로 한 번의 Minor가 시작, 종결하였으며 이후 다시 새로운 Major를 포함하는 Minor가 발생한 경우이다. 본 연구에서는 Major의 시작 이전에 Minor를 결정짓는 두 위도의 온도 차이가 0이 되는 지점까지, Major를 포함하는 Minor로 결정하였다. 세번째 분류는 Ongoing 단계로 PM의 각 사례의 시작부터 10 hPa, 60°N와 10 hPa, 90°N의 평균 온도 차가 가장 큰 음의 차이를 보일 때까지의 기간을 지칭한다. Climatology는 앞서 제시한 Major, Minor, Pre-stage를 모두 제외한 기간을 의미한다. 마지막으로 Recovery는 본 연구에서는 다루지는 않지만 SSW 이후 climatology로 돌아가는 단계를 이르겠다.

결과를 해석하는데 있어서 파동의 전파를 볼 필요성이 있었으며 그 지표로 EP flux & divergence를 사용하기로 하였다. EP flux의 계산과 축척 처리는 Edmon et al. (1980)을 따랐다. 아래는 주요 식이다.

$$(\mathrm{r}_0\cos\varphi)^{-1}\nabla\cdot F = (\mathrm{r}_0\cos\varphi)^{-1}\left(\frac{1}{r_0\cos\varphi}\frac{\partial\left(F_\varphi\cos\varphi\right)}{\partial\varphi}+\frac{\partial F_p}{\partial p}\right) \quad (11)$$

$$F_\phi = -r_0\cos\varphi\overline{v'u'} \quad (12)$$

$$F_p = fr_0\cos\varphi\overline{v'\theta'}/\bar{\theta}_p \quad (13)$$

또한 파동의 연직 전파 환경을 알기 위해 Andrews et al. (1987)에서 제시한 굴절 계수(이하, η^2)와 계산 과정에 포함된 잠재 소용돌이도(이하, PV)의 경도 방향 변화율을 구하였다. 식은 각각 (14), (15)에 해당한다.

$$\eta_k^2 = \frac{\bar{q}_\varphi}{\bar{u}} - \left(\frac{k}{a\cos\varphi}\right)^2 - \left(\frac{f}{2NH}\right)^2 \tag{14}$$

$$\frac{1}{a}\frac{d\bar{q}}{d\varphi} = \frac{2\Omega}{a}\cos\varphi - \frac{1}{a^2}\left[\frac{(\bar{u}\cos\varphi)_\varphi}{\cos\varphi}\right]_\varphi - \frac{f^2}{\rho_0}\left(\rho_0\frac{\bar{u}_z}{N^2}\right)_z \tag{15}$$

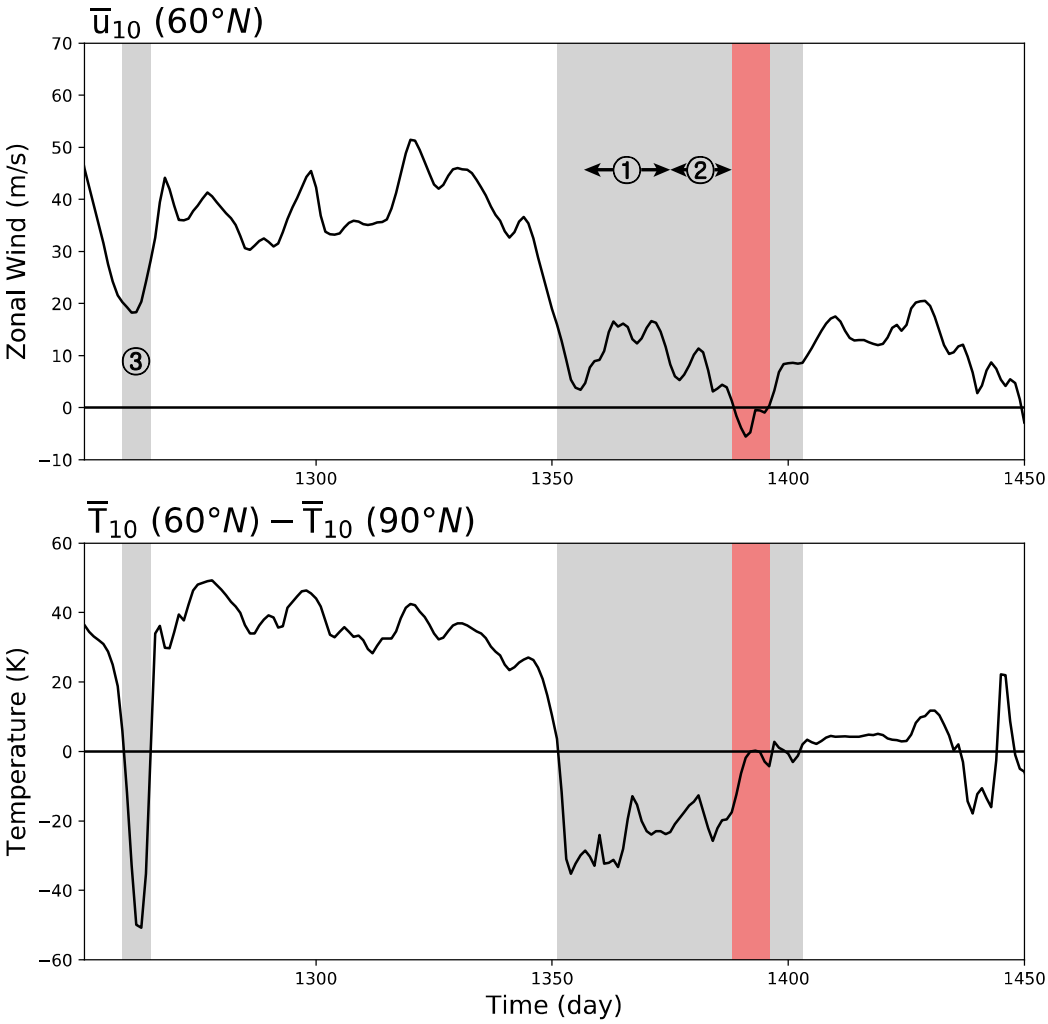

Figure 7. Example of SSW classification. (top) zonal mean zonal wind at 10 hPa, 60°N, (bottom) Subtraction of zonal mean temperature at 10 hPa, 60°N and at 10hPa, 90°N. Data is from EXP 6. Grey shading is Minor event, coral shading is major event. Numbers in circles indicate : ① Pre-stage of Minor, ② MAM ③ PM.

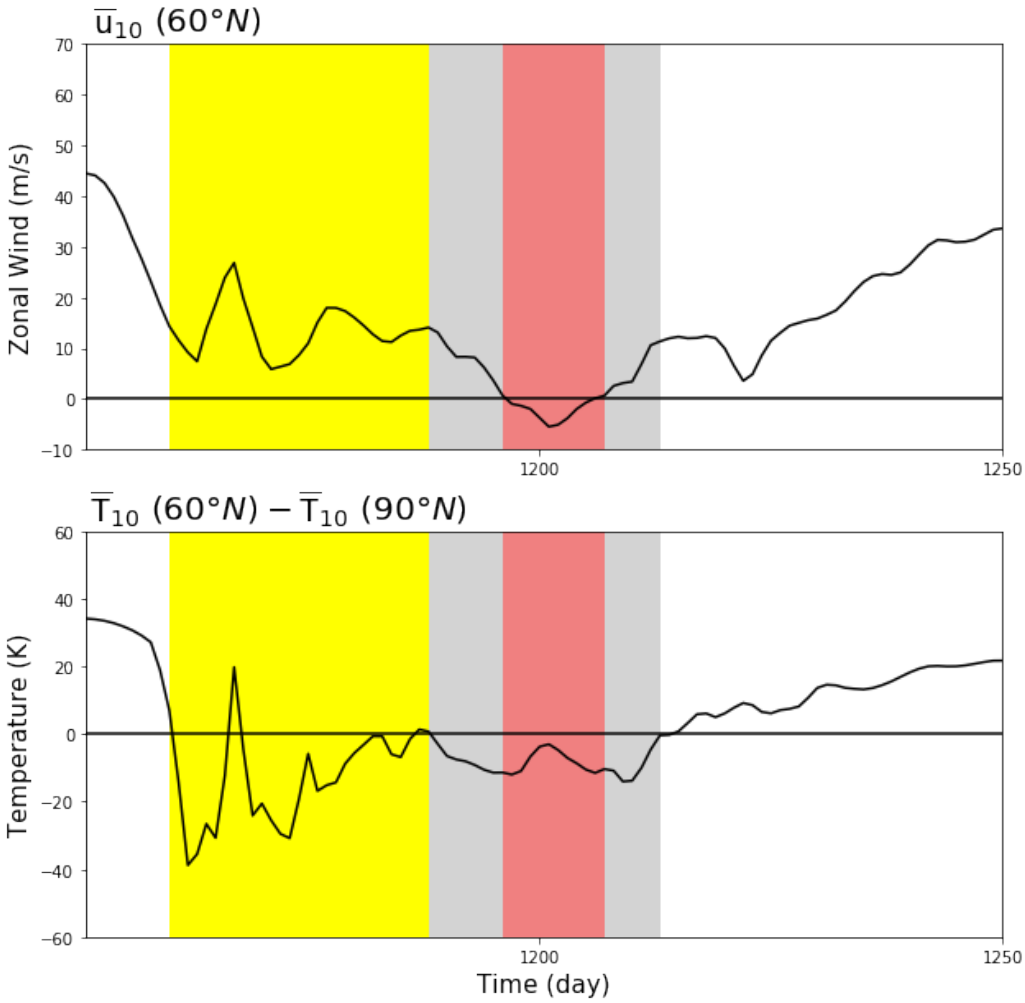

Figure 8. Same as **Figure 7** but yellow region indicates PM.

제3장. 연구 결과

3.1 지형 강제력 효과와 실험 설계의 타당성

본 연구의 타당성을 위해서는 우선적으로 지형 강제력에 대한 검증이 필요하다. 만약 지형이 없는 환경에서 SSW 발생 모의는 세 역학 코어에 내장된 역학적 과정들이 외부적인 강제력 없이 자체적으로 행성파의 이상 변화를 야기한다는 의미이며 실험 설계에 관한 재고가 필요한 사항이다.

Figure 9 ~ Figure 12 는 각각 NOTOPO, TOPO의 결과로 SSW 분류에 필요한 두 개의 항에 대한 시계열 그래프이다. NOTOPO에서는 모든 역학 코어에서 SSW가 발생하지 않았다. YJ16과 동일한 결과이다. 하지만 각각의 시계열을 비교해보면 NOTOPO 모의는 YJ16에 비해 강한 편서풍과 큰 온도 차, 그리고 약한 변동성을 가진다. 본 연구에서 적용한 복사 평형 온도가 만들어내는 강한 극소용돌이의 존재와 부합한다. Figure 13는 모든 분석 기간의 동서 방향 평균 동서풍을 평균한 결과로 역학 코어에 따른 차이는 있지만 성층권 제트와 10 hPa, 60°N의 풍속 증가를 보여준다. 성층권 극지역 제트의 존재는 행성파 전파와 연관된다. Charney and Drazin (1961)에서 밝힌 강한 성층권 제트가 강화되면서 풍속이 증가하여 로스비 임계 속도(Rossby critical value)보다 커지고 이로 인해 행성파의 성층권 전파가 저해된다는 결과를 통해 설명 가능하

다.

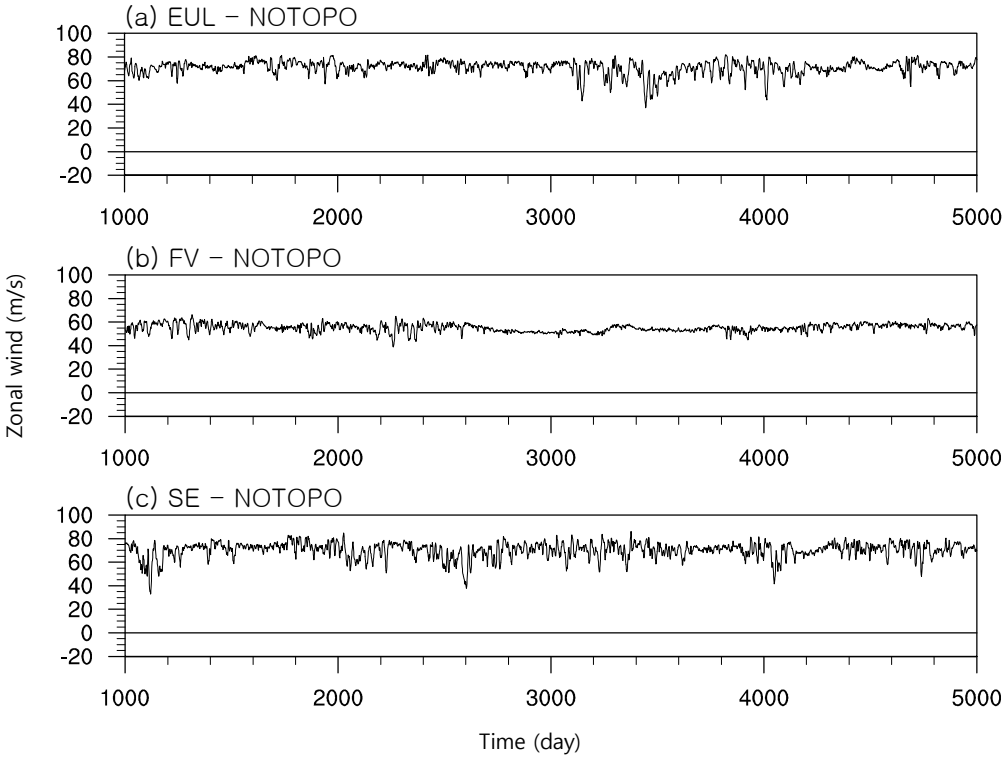

Figure 9. Time series of zonal mean zonal wind at 10 hPa, 60°N for NOTOPO. (a) EUL, (b) FV, (c) SE.

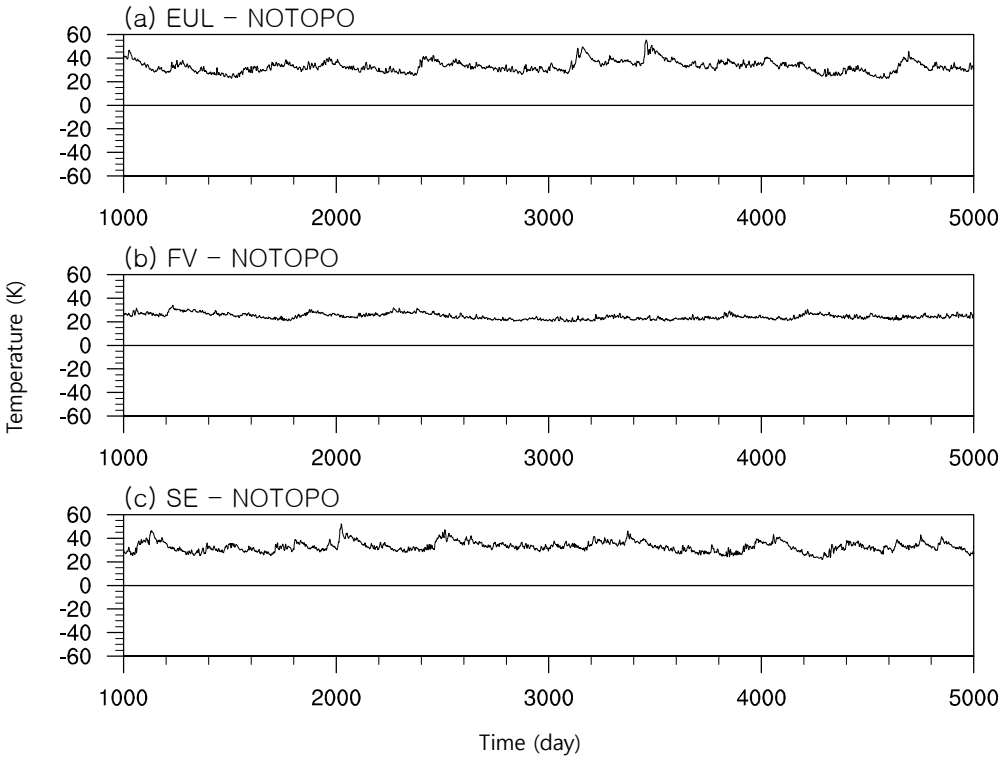

Figure 10. Time series of zonal mean temperature difference between 60°N, and North Pole at 10 hPa for NOTOPO. (a) EUL, (b) FV, (c) SE.

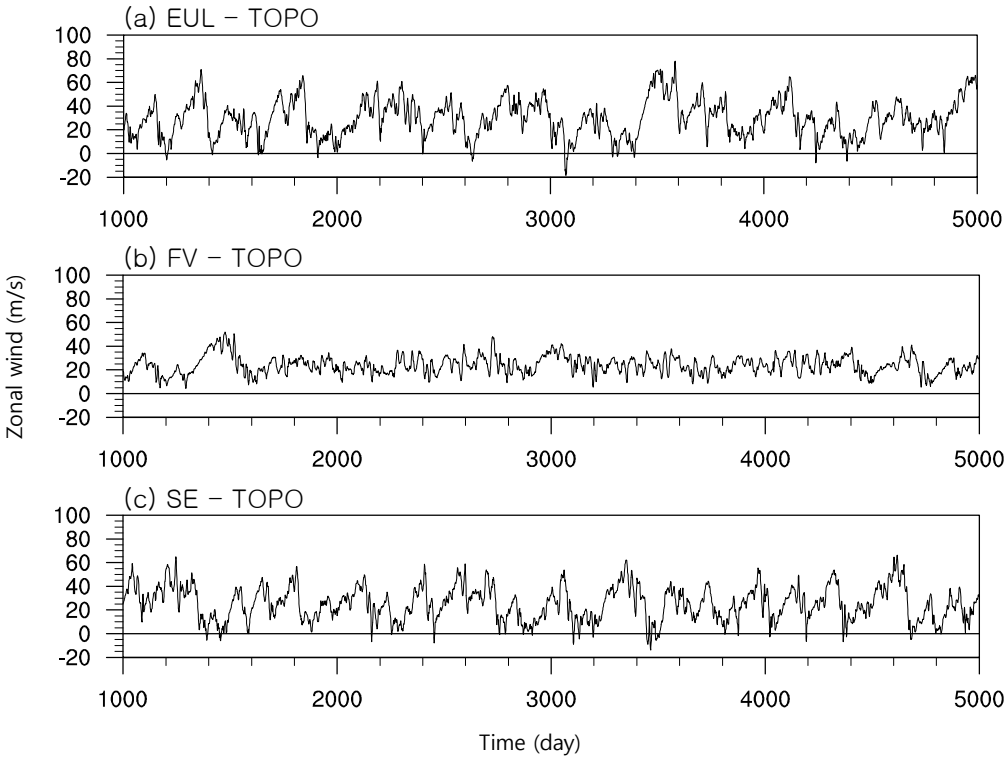

Figure 11. Same as **Figure 9**, but for TOPO.

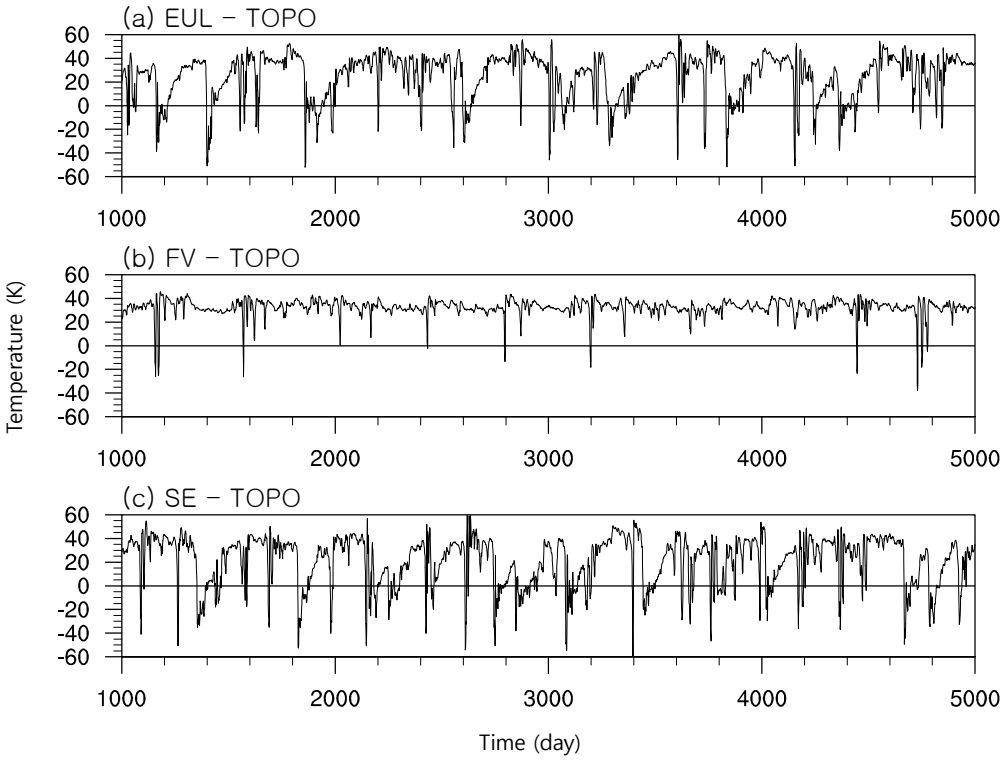

Figure 12. Same as **Figure 10**, but for TOPO.

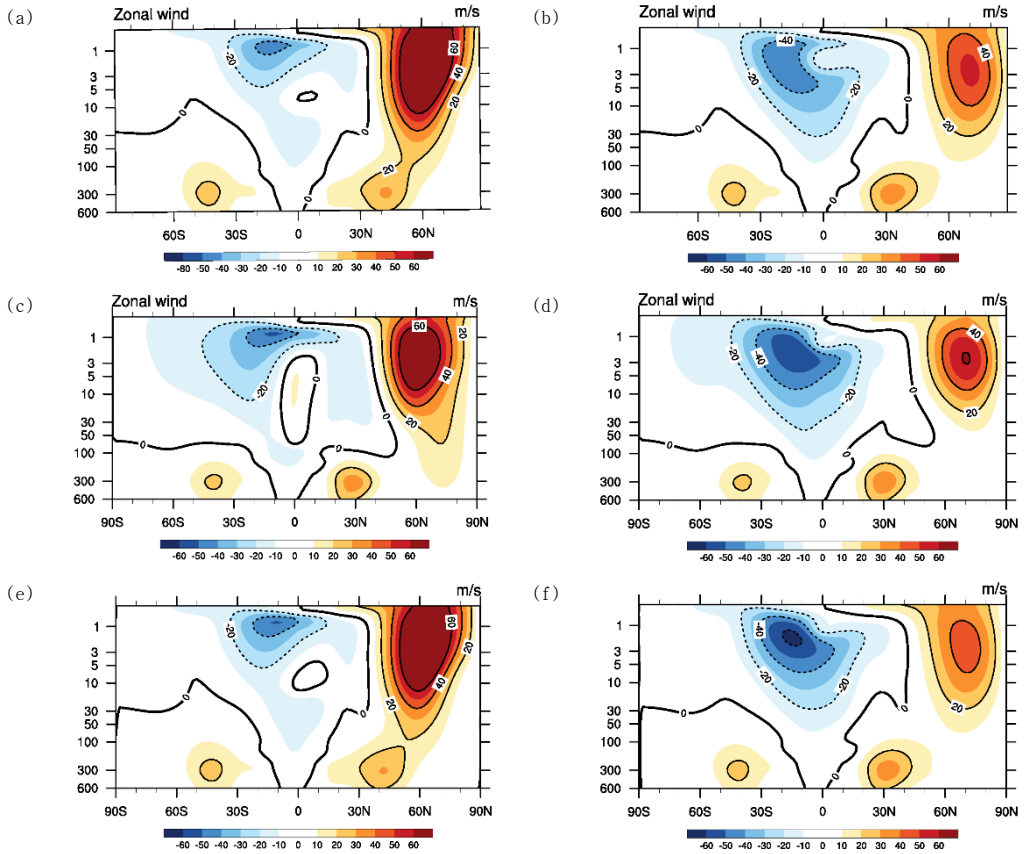

Figure 13. Pressure-latitude cross section of the 4000 days mean zonal mean zonal wind in (top) EUL, (middle) FV, (bottom) SE. Left/Right columns are NOTOPO/TOPO result.

TOPO 실험과 NOTOPO 실험을 비교하면 SSW 모의에 있어 지형 강제력의 필요성을 재확인할 수 있다. Figure 11, Figure 12에서 TOPO에서 발생한 명확한 SSW 신호가 보인다. TOPO 실험 결과, 모든 역학 코어에서 다수의 minor SSW가 비정기적으로 발생했다. Major SSW는 FV를 제외한 두 역학 코어(EUL, SE)에서만 발생했다. Major, Minor가 발생한 총 일수와 각 사례의 횟수를 조사한 결과는 Table 4에 정리되어 있다.

Table 4 Number of SSW occurrence days and events

Days/Events	EUL	FV	SE
Major	78/10	×	132/19
Minor	735/29	71/8	1014/33

동일 기간에 대한 동서풍 동서평균장을 보면 지형 강제력에 의해 약화된 성층권 제트가 있다(Figure 13). 성층권 제트 약화는 풍속이 로스비 임계 속도보다 작아져 행성파가 성층권으로 전파할 조건을 갖췄을 가능성을 시사한다. 결론적으로 실험 4 ~ 6은 극 소용돌이가 성층권 변동성을 YJ16의 실험보다 줄였으나 지형 강제력을 통해 행성파원과 전파 환경을 제공함으로써 SSW가 발생하는 이론적 환경을 구현하였으며 이는 본 실험 설계의 타당성을 증명한다.

3.2 SSW 발생 모의 과정

실험 내에서 SSW 발생 과정이 어떻게 구현되었는지를 분석하기에 앞서 두 가지 중요점을 짚고 넘어가고자 한다. 첫째로 발생 과정을 분석하는 이유는 SSW의 발생 매커니즘에 대한 역학적 이론을 제시하거나 확인하고자 함이 아니다. 단지 수치 모형에서 본 연구의 실험 조건들이 주어졌을 때 이에 대한 모형의 반응을 확인하는데 목적이 있다. 다음으로 Major와 Minor를 나눠 분석하는 이유는 각 현상의 발생 과정을 살펴봄으로써 FV에서 Major를 구현하지 못하는 이유와 연관하여 역학 코어에 따른 영향력의 실마리를 찾고자 한다.

아래의 분석은 SSW가 발생한 TOPO 실험의 결과만을 이용하였다. 따라서 EXP 4 ~ 6에 해당하는 역학 코어 EUL, FV, SE를 각각의 실험명으로 대체하여 부르겠다.

3.2.1 Major event

Major와 Minor를 구분한 결과 EUL, SE 모든 실험에서 Major가 Minor의 기간 중에 포함되어 있었다. 결론적으로 Major가 발생하기 이전의 단계는 Climatology, Pre-stage of MAM, MAM, Major 총 4개로 나눌 수 있다. 각 단계의 EP flux, divergence를 나타내면 Figure 14와 같다.

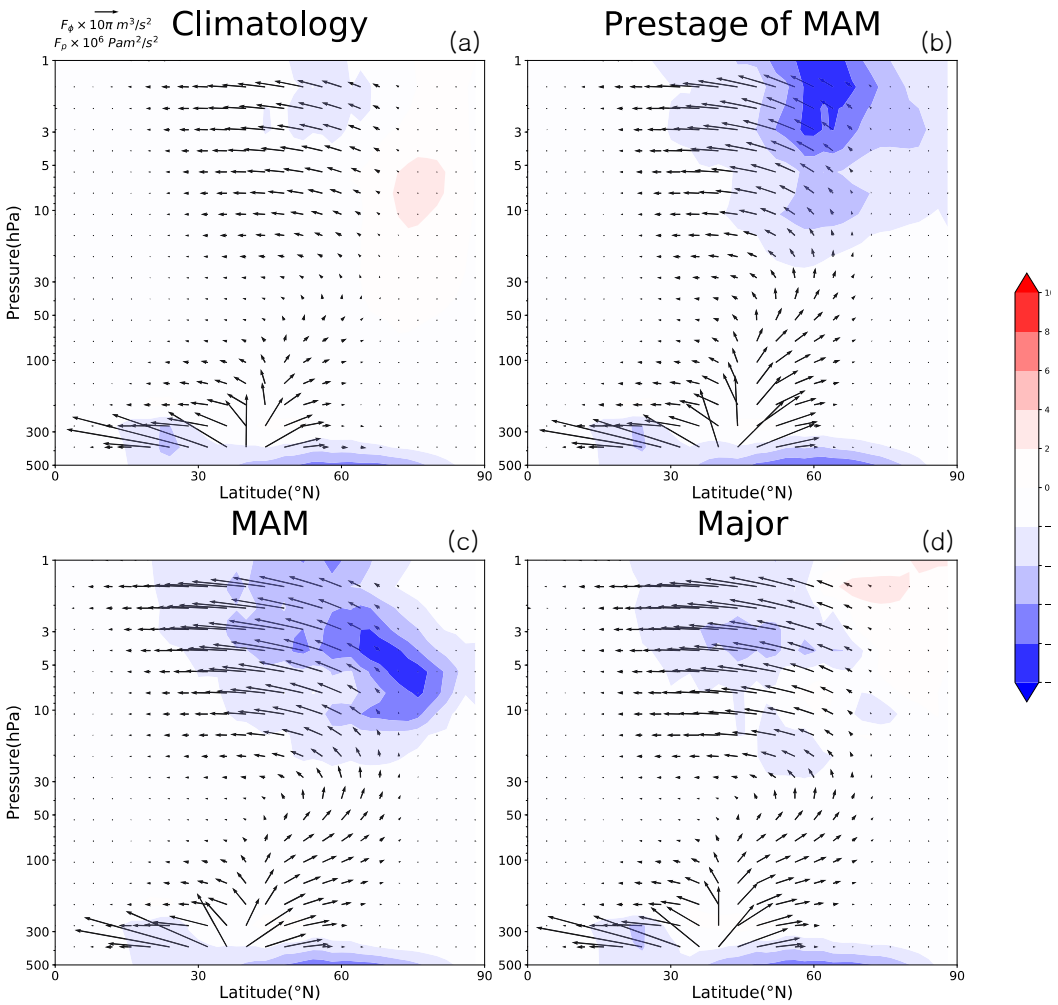

Figure 14. EP flux and divergence($\boldsymbol{ms^{-1}day^{-1}}$) of Major SSW stages (a) Climatology, (b) Pre-stage of MAM, (c) MAM, (d) Major in EUL dynamical core.

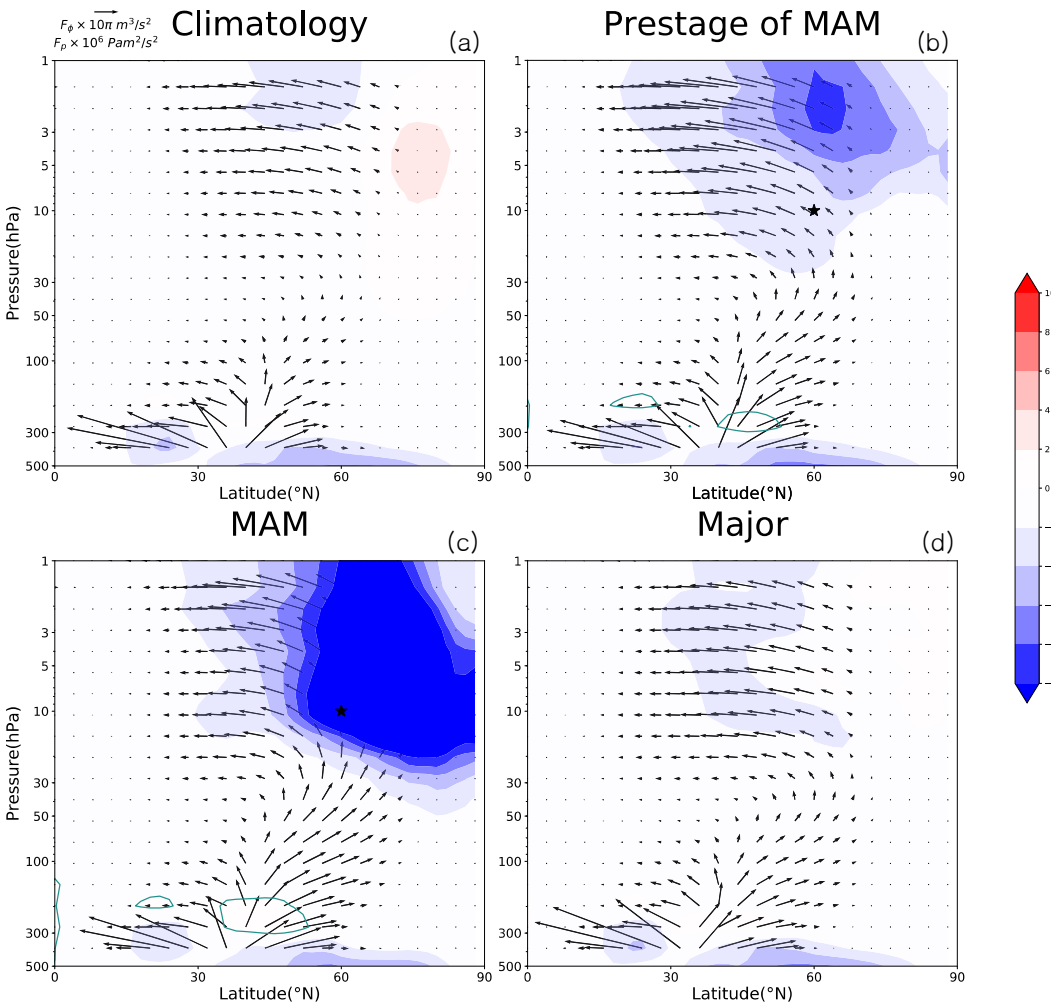

Figure 15 Same as Figure 14, but for SE.

Figure 14, Figure 15 에서 보였듯 EUL, SE의 전반적인 EP flux 형태가 유사하다. 추가적인 분석에 있어서도 두 역학 코어가 같은 경향성을 보였으므로 본 연구에서는 EUL 결과를 중심으로 해석하겠다. Figure 14(b), pre-stage of MAM 에서 500 hPa, 중위도에서 상층, 극지역을 향하는 flux 가 상층의 EP flux convergence를 만든다. 이후 MAM 단계에서 상층 극지역으로부터 적도를 향하는 반시계 방향 EP flux가 강화된다. 이 과정에서 EP flux convergence가 하강하며 10 hPa 부근까지 확장한다. EP flux convergence 에 의해 성층권 제트가 약화되며 극 소용돌이를 약화시켜 행성파의 전파 가능성을 높여주며 이는 SSW 발생의 가능성을 열어준다.

각 단계를 파수 1, 2, 3이상인 성분별로 나누어 EP flux를 나타내면, Figure 16 ~ Figure 19와 같은 형태를 보인다. 우선 동서 파수 2에 의해 생성된 EP flux를 보면 Pre-stage of MAM 단계에서 대류권으로부터 고위도를 향하여 상층 전파가 강해진다. 동시에 EP flux convergence가 상층부터 발생한다. 이후 10 hPa 이상 지역의 반시계 방향 EP flux가 강해지며 convergence가 하강하였다. 이러한 패턴은 동서 파수 2인 파동이 Major SSW 발생 과정을 결정하는데 주요함을 보인다. 파수가 1인 경우 MAM 단계부터 고위도 성층권 상부에서 EP flux divergence(이하, (+)EPD)를 형성하며 이는 Major에서 더 커져 파수 2에 의해 형성되는 EP flux convergence(이하, (-)EPD)와 상쇄된다. 파수 3이상인 파동들의 합은 파수 1의 형태와 유사하지만 상대적으로 작은

(+)EPD를 생성한다. 정리하면 파수 2인 파동들이 Major 발생의 주요 역할을 하며 그 외 파동들이 파수 2인 파동의 역할을 상쇄하면서 Major 이후 Recovery 단계로 진입한다.

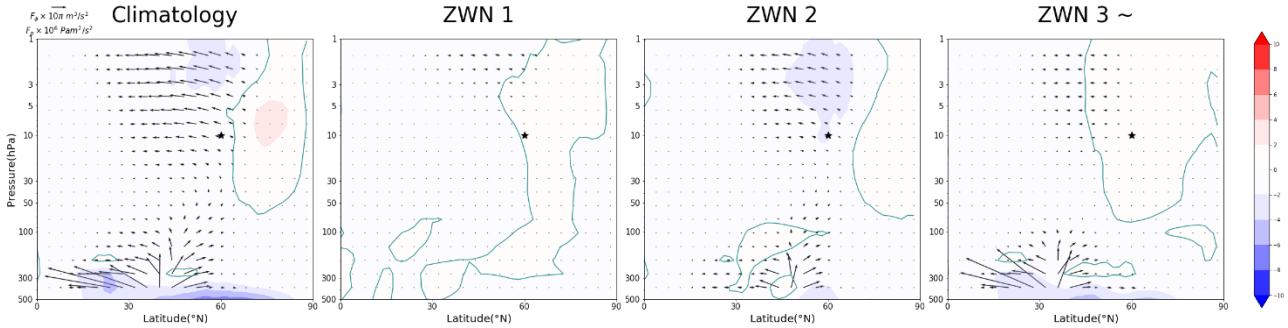

Figure 16. Wave decomposed EP flux & divergence($\boldsymbol{ms^{-1}day^{-1}}$) of climatology and Pre-stage of MAM in EUL.

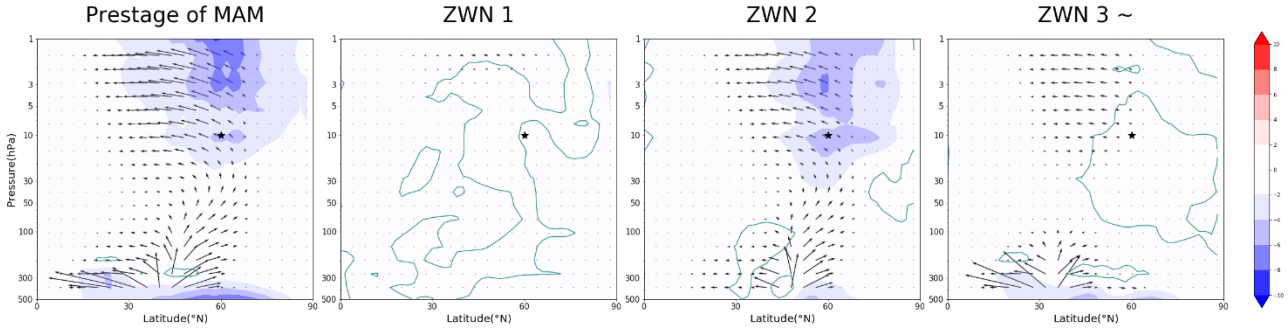

Figure 17. Same as **Figure 16**, but for Pre-stage of MAM

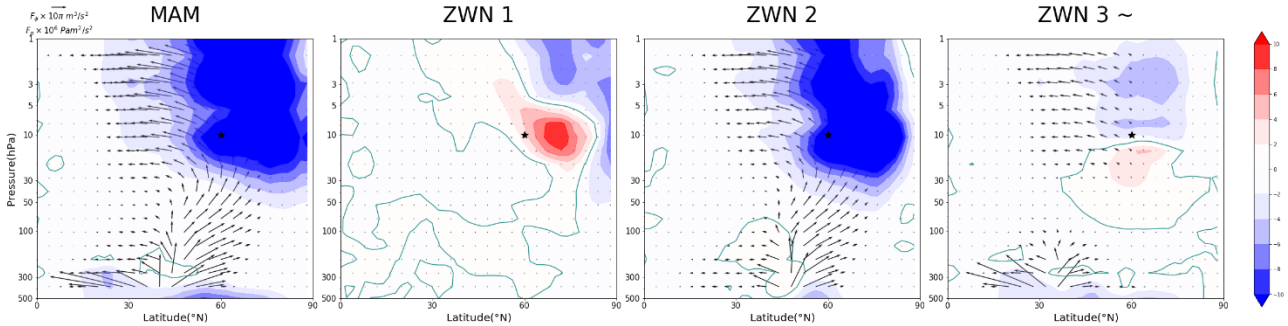

Figure 18. Same as **Figure 16**, but for MAM and Major.

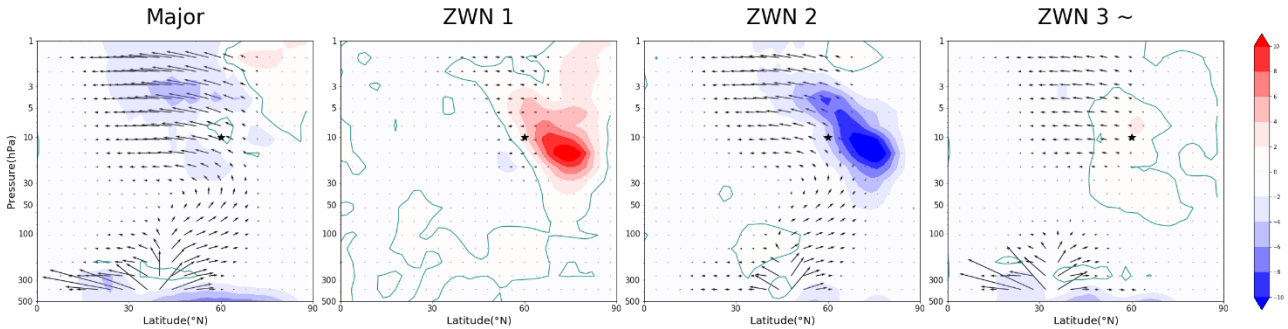

Figure 19. Same as **Figure 16**, but for Major stage.

앞선 Major 과정을 설명하는데 있어서 크게 두 가지 요인에 대한 근거가 필요하다. 먼저 30 hPa 이상 고도에서 발생하는 (-)EPD 이다. 해당 영역의 강한 (-)EPD는 하층에서부터 전파된 EP flux보다 상층으로 전파되는 양이 적음을 의미한다. Figure 20는 각 EUL의 각 단계 별로 η_2^2를 가질 확률을 나타낸 그래프이다. 영역이 밝을수록 파수 2인 파동이 연직 전파할 수 있다. Climatology 이후 단계가 진행됨에 따라 상층으로의 전파가 어려워지는 것을 알 수 있다. 특히 $\bar{U} = 0$ 선을 따라 대략적인 전파의 경계를 보인다. 하층으로부터 전파된 EP flux의 연직 전파의 제한을 설명해주며 이로 인해 특정 고도에 갇혀 강한 (-)EPD를 보이게 된다.

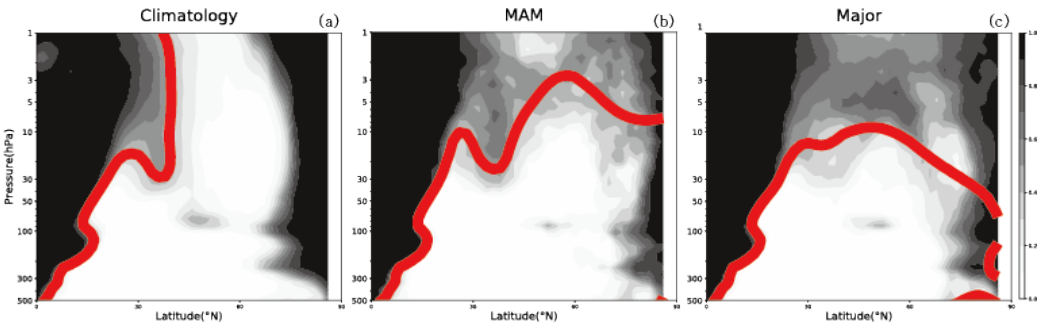

Figure 20. Probability of ZWN-2 negative refractive index ($\boldsymbol{\eta_2^2} < \mathbf{0}$) during (a) Climatology, (b) MAM, (c) Major stage. Red lines are time-mean zero wind lines of each stage.

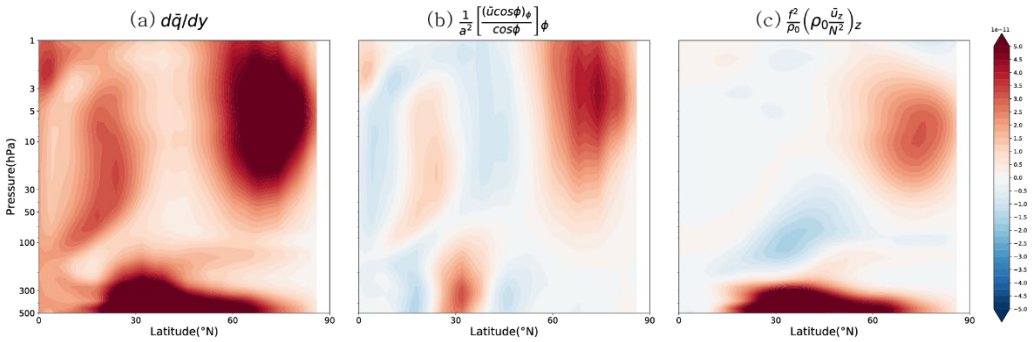

Figure 21 (a) PV meridional gradient of Climatology. (b), (c) is second, third term of (a), respectively.

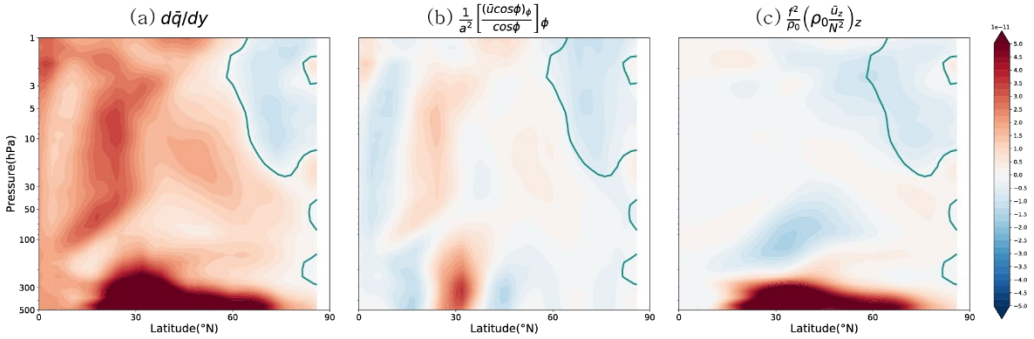

Figure 22 Same as **Figure 21**, but for Major stage.

두번째는 Major 의 발달 단계와 동시에 강화되는 10 hPa, 60°N 이상 위도에 위치한 파수 1인 (+)EPD 이다. 지형 강제력이 명확히 파수 2인 EP flux 를 보이기에 파수 1인 (+)EPD 의 존재는 낯설다. Figure 21, Figure 22 는 각각 Climatology 와 Major 단계에서 잠재 소용돌이도(Potential vorticity; 이하, PV)의 위도 방향 변화율과 두번째, 세번째 항에 해당한다. Climatology 에서는 위도 60 도 이상 지역에서 (b), (c) 모두 양의 값을 가지며 북반구 전체에서 양의 값을 갖는다. 반면 Major 단계에서는 북위 60 도 이상 고위도, 약 20 hPa 이상 고도에서 음의 PV 변화율을 확인할 수 있다. 해당 지역은 Figure 18 의 파수 1인 EP flux 그래프에서 강한 (+)EPD 의 위치와 유사하다. 이는 언급한 (+)EPD 가 모델 내의 경압 불안정에 의해 발생하였음을 보인다.

3.2.2 Pure Minor event

Minor 발생 단계는 Climatology, Pre-stage of PM, Ongoing 3가지이다. Figure 23, Figure 24는 EUL에서 발생한 Pre-stage of PM, Ongoing 두 단계의 EP flux & divergence이다. Pre-stage 단계의 경우 앞선 MAM 단계의 Pre-stage와 유사한 형태를 보인다. 반면 Ongoing의 경우 비교 대상인 MAM 단계에서 형성된 고위도 10hPa 부근의 동서 파수 1인 (+)EPD와 비슷한 위치에 보다 큰 값을 보인다. 이는 Major 단계의 크기와 비슷한 정도이다. 이로 인해 Ongoing 단계에서 이미 파수 1(2)의 EP flux divergence(convergence)가 서로 상쇄하여 Major와 다르게 10 hPa 아래로 강한 convergence가 발달하지 못한다.

Pure Minor의 발생 단계를 근거로 Major로 발생하는 Minor와 발생하지 못하는 Minor를 결정하는 주요 파수가 1이라고 결론 짓기 쉽다. 하지만 Ongoing, MAM 단계의 차이를 나타낸 Figure 25은 보다 정확한 해석을 제공한다. Ongoing 단계가 MAM에 비해 상층의 적도를 향한 반시계 방향 흐름이 더 강하며 대류권으로부터 연직 전파하는 흐름은 더 약하다. 상층의 적도 방향 flux는 파수 2 이상인 파동들이 주를 이루며 대류권 연직 전파 파동은 파수 2인 파동이 이끈다.

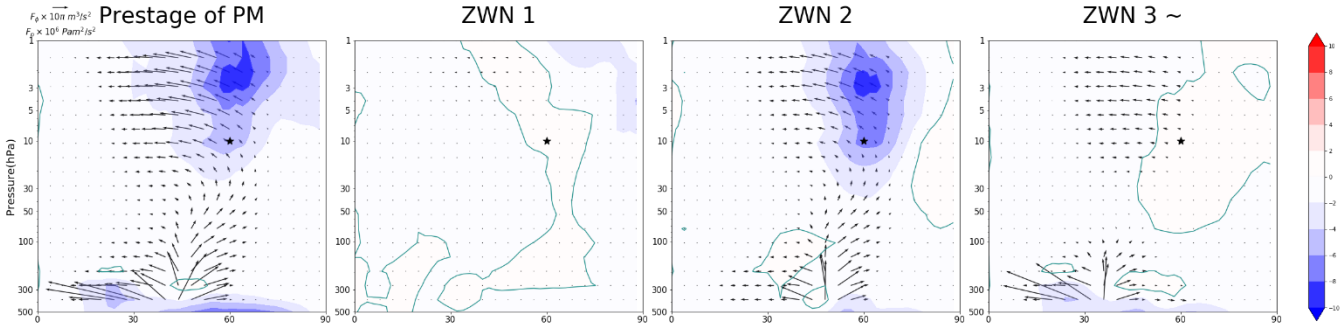

Figure 23. Same as **Figure 16**, but for Pre-stage of PM.

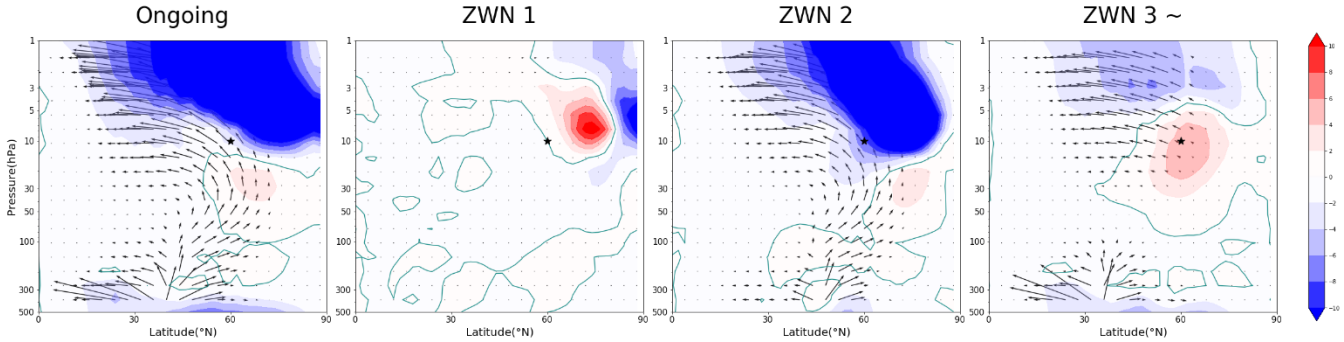

Figure 24. Same as **Figure 16**, but for Ongoing stage

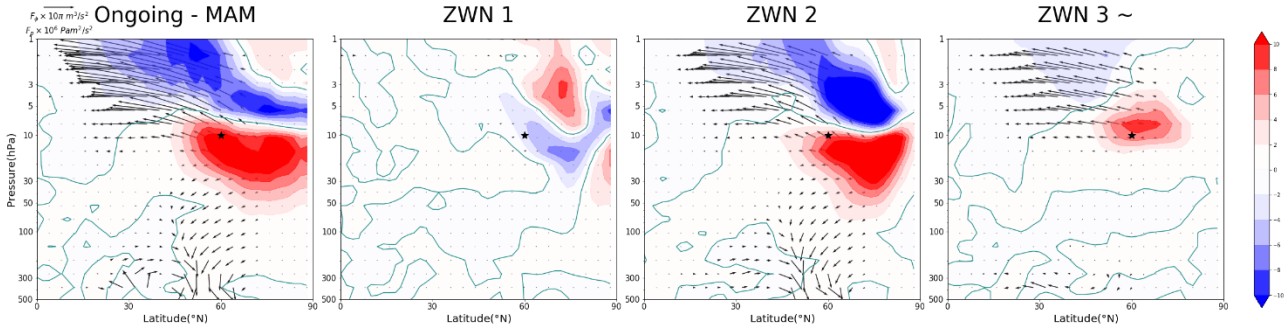

Figure 25 EP flux & divergence($\boldsymbol{ms^{-1}day^{-1}}$) of subtraction from Ongoing to MAM. Black boxes show the range ($\boldsymbol{\phi = [56, 64]°N, p = [7.5, 12.5]\ hPa}$).

두 단계의 차이는 약 5 ~ 30 Pa, 30도 이상 위도 구간에서 명확한 EP flux divergence를 보인다. SSW를 판단하는 기준인 10 hPa, 60°N (★) 부근을 보면 60°N보다 고위도, 상층 지역의 발산은 파수 1 인 파동에 의해 결정된다. 그 외 10 hPa 부근부터 30 hPa 사이에 위치한 divergence는 파수 2 인 파동에 의해 형성된다. 파동 3의 경우 고위도, 30 hPa 이상 영역에서 divergence를 형성한다. 수치적으로 파동별 10 hPa, 60°N (★) 부근 divergence 형성의 기여도를 확인하기 위해 특정 영역 내 divergence의 평균을 구하였다. 그 결과 Table 5와 같은 차이를 보였다. 파수 2인 파동과 3 이상인 파동들이 만든 divergence가 비슷한 크기로 기여하였으며 파수 1인 파동에 의한 EP flux convergence만이 총 합의 결과와 반대되는 강제력을 보였다.

Table 5 EP flux divergence($\boldsymbol{ms^{-1}day^{-1}}$) mean of black domains in **Figure 25**.

Total	ZWN 1	ZWN 2	ZWN 3
8.80	-3.38	5.81	6.37

3.3 FV는 왜 SSW를 생성하지 못하는가?

Major, Minor 과정의 분석 결과는 끝내 FV에서의 상대적인 SSW 과소 모의에 - Major의 경우 모의 자체를 하지 못한 - 대한 질문을 던진다. Minor 발생 횟수에서도 큰 차이를 보인다. Figure 26, Figure 27는 Climatology, Ongoing 단계에서 FV, EUL의 차이를 전체 및 파수별 EP flux로 나타낸 그래프이다. Figure 26로부터 SSW 활동이 없는 기간에서 FV가 상대적으로 wave activity가 작음을 보여준다. 파수별로 뚜렷한 차이가 없으며 전반적인 flux 약화를 보인다. Ongoing 단계에서는 명확하게 앞서 SSW 발생의 주요 기작으로 본 파수 2인 1) 하층으로부터 상승하는 EP flux, 2) 30 hPa 이상의 적도 방향 순환 모두가 약화되었음을 보인다. 또한 상층에서 파수 3 이상인 파동들에 의해 형성되는 EP flux도 큰 차이를 보인다.

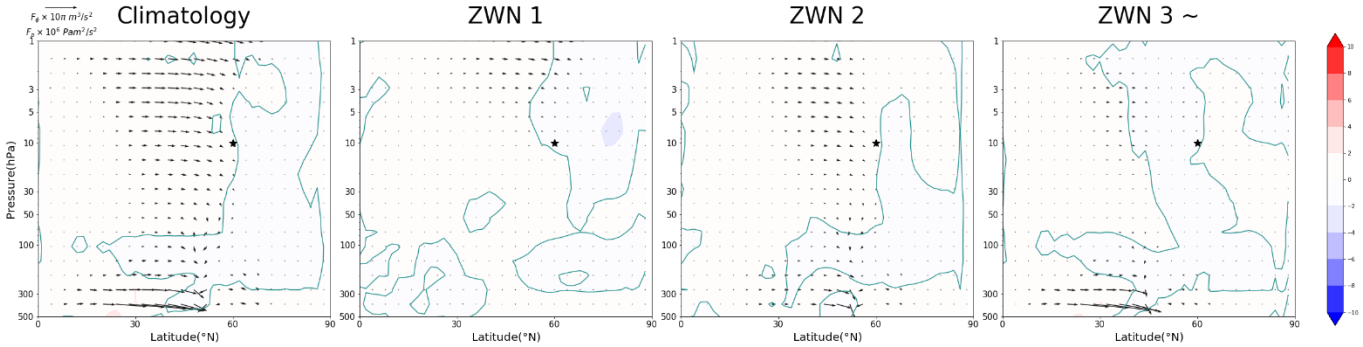

Figure 26 Time-mean wave decomposed EP flux difference of FV and EUL (FV-EUL) during Ongoing stage. From left to right figures show total, ZWN 1, ZWN 2, ZWN 3, respectively.

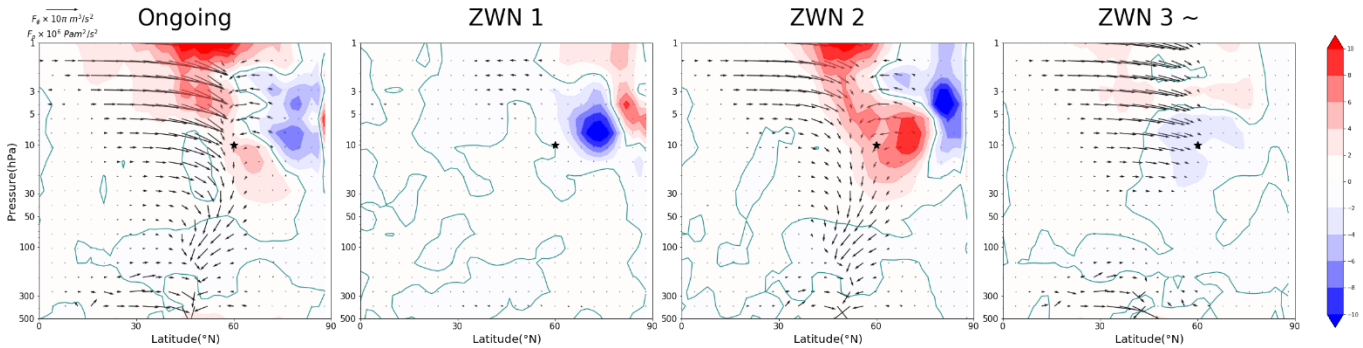

Figure 27 Same as **Figure 26**, but for Ongoing stage.

Figure 28는 FV에서 Ongoing 단계의 기간 동안 η_2^2이 음수가 될 확률을 시각화한 자료이다. 30 ~ 60°N 사이 위도 상공에 위치한 $\bar{U} = 0$ 선이 EUL, SE와 비교하여 낮은 고도에 위치하며 이로 인해 행성파가 전파할 수 있는 경로가 다른 역학 코어와 비교하여 상대적으로 제한적임을 알 수 있다. 동일 단계의 하층으로부터 연직 전파하는 EP flux의 크기를 비교하기 위해 10 ~ 100 hPa, 40 ~ 60°N 지역의 EP flux 연직 성분(F_p)을 평균했다(Table 6). FV에서 하층으로부터 상층으로 연직 전파가 가장 약한 것을 알 수 있다. 타 역학 코어에 비해 절반 가량의 크기다.

위 결과들로부터 FV가 만들어내는 평균류에 의한 행성파의 연직 전파, 그리고 전반적으로 약한 wave activity가 SSW 모의에 차이를 만드는 주요 역학 과정임을 알 수 있다. Wave activity의 경우 FV에만 포함된 polar filter의 인위적인 감쇄 효과에 의한 것임을 추측할 수 있다. 평균류 형성 또한 HS94 실험을 이용하여 SE, FV 역학 코어를 비교한 Jun et al. (2018)에서 polar filter에 의한 가능성을 제시하였다. 따라서 이어지는 내용에서는 polar filter의 적용 범위에 따른 민감도 실험을 다루겠다.

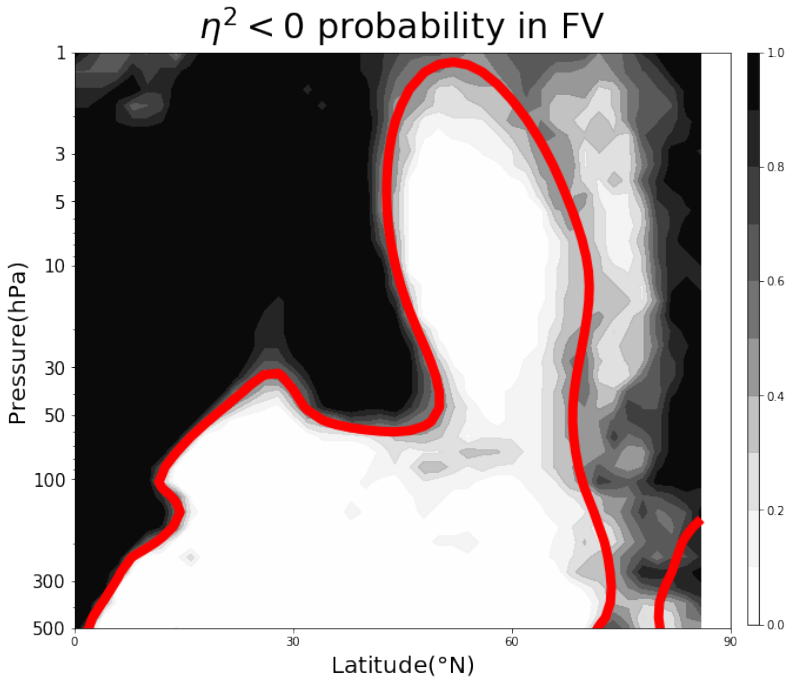

Figure 28. Probability of ZWN-2 negative refractive index ($\eta_2^2 < 0$) during Ongoing stage in FV.

Table 6. Mean vertical EP flux ($\boldsymbol{F_p}$) in 10 ~ 100 hPa, 40 ~ 60˚N domain. Unit is $\mathbf{10^5}$ Pa $\boldsymbol{m^2/s^2}$

EUL	FV	SE
-55.7	-23.1	-51.0

3.4 Polar filter 민감도 실험

EXP 5, 7, 8에서 SSW 모의를 확인하기 위해 Figure 9, Figure 10와 같이 두 변수에 대한 그래프를 그렸다(Figure 29, Figure 30). Critical latitude를 올린 경우 Minor 사례가 더 많이 발생하였으며 70°N 까지 제한한 경우 Major 사례가 발생하였다. 발생 빈도와 총 기간은 아래 와 같다.

Table 7 Number of SSW occurrence days and events in EXP 5, 7, 8

Days/Events	40°N	60°N	70°N
Major			80/15
Minor	71/8	223/22	537/15

70°N critical latitude에서 SSW 모의가 진행되었다는 사실은 고무적이다. 하지만 Figure 29(c), Figure 30(c) 시계열은 약간의 주기성을 보인다. 이는 SSW의 비정기적인 특징에 부합하지 않는다.

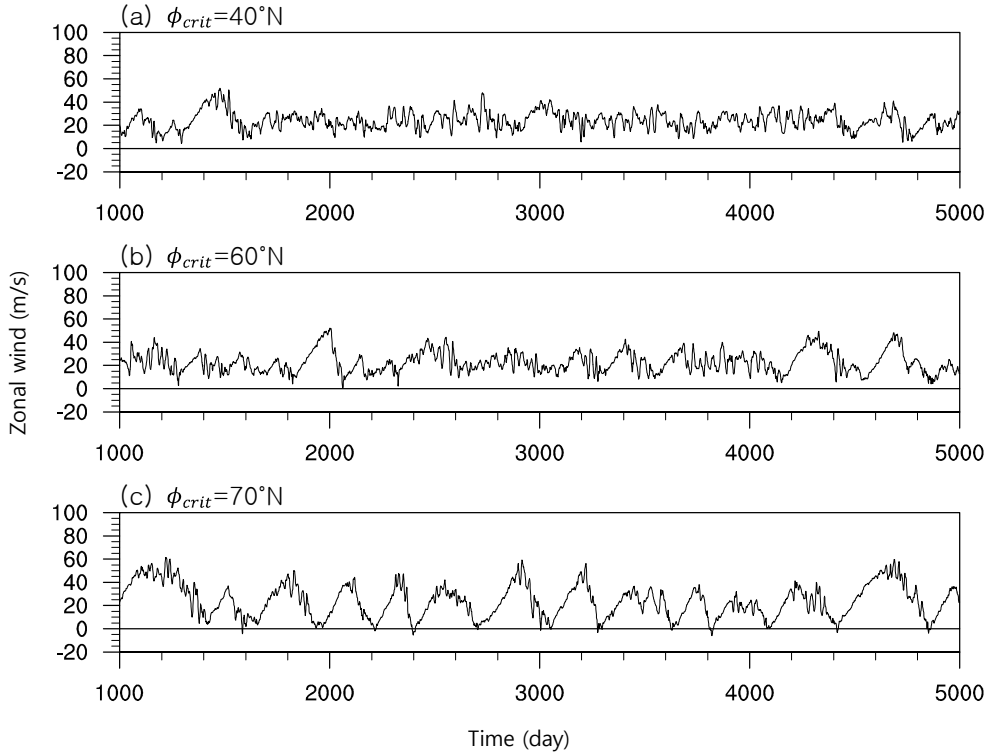

Figure 29. Time series of zonal mean zonal wind at 10 hPa, 60°N for experiment 5, 7, 8. Critical latitude of each figures are (a) 40°N, (b) 60°N, (c) 70°N.

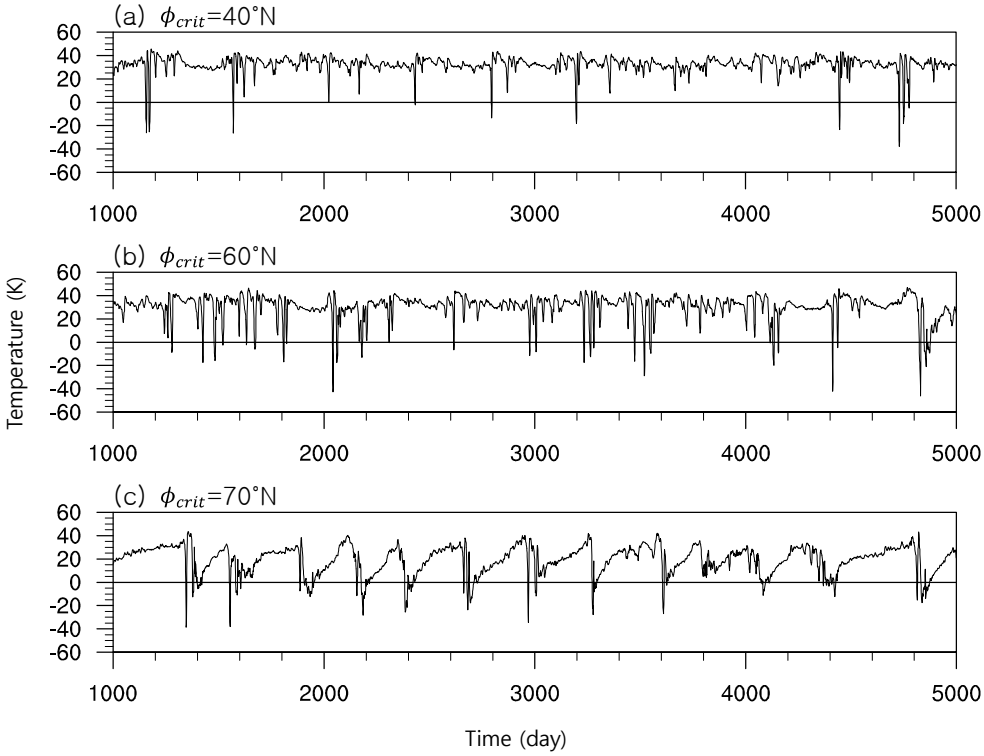

Figure 30. Time series of zonal mean temperature difference between 60°N, and North Pole at 10 hPa for experiment 5, 7, 8. Critical latitude of each figures are (a) 40°N, (b) 60°N, (c) 70°N.

Figure 31은 EXP 8에서 발생한 Major 사례의 EP flux, divergence의 평균을 보여준다. Figure 14(d), Figure 15(d)와 달리 Figure 31에서는 상층의 divergence가 존재하지 않으며 70°N 이상 고위도 지역 상공에서 비합리적인 EPD 패턴이 위치한다. Critical latitude를 극으로 옮길 수록 모델이 불안정해지며 고위도 지역에 높은 파수의 파동들이 비선형적인 추가 효과를 일으킬 수 있다. 실험 8은 SSW 모의에 있어서 polar filter를 이용한 개선의 가능성을 보였지만 동시에 polar filter의 제한점을 보여주었다.

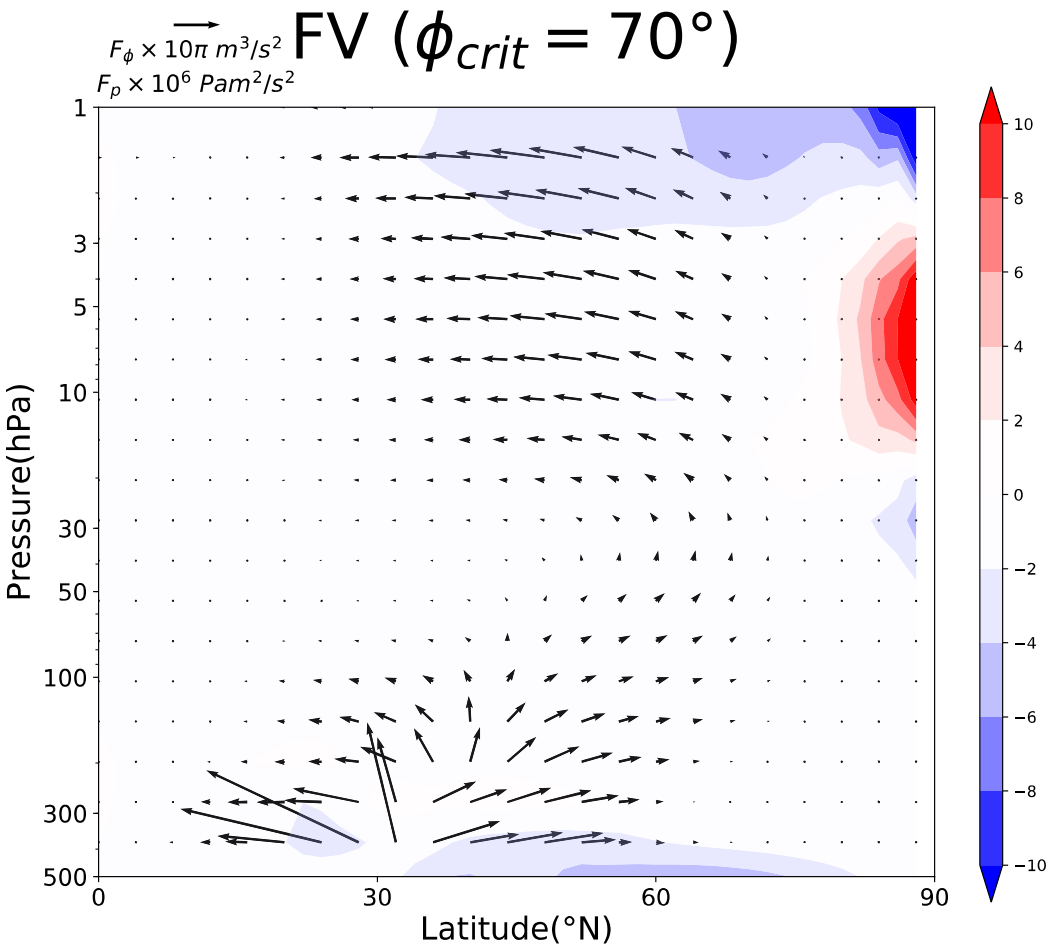

Figure 31 EP flux & divergence($\boldsymbol{ms^{-1}day^{-1}}$) of Major stage in EXP 8.

제4장. 요약 및 결론

본 논문은 Yao and Jablonowski (2016)에서 진행한 역학 코어 간 비교의 취지에 공감하는 동시에 해당 연구의 실험 설계에 대해 의구심을 품고 시작하였다. 성층권 변동성을 나타내는 현상인 SSW를 모의하는데 있어, Gerber and Polvani (2009) 실험을 바탕으로, 겨울철 극 소용돌이와 행성파를 생성할 강제력의 필요성을 확인하였다.

극 소용돌이, 지형 강제력을 포함한 실험들에서 SSW가 모의되었으나 발생 횟수에 차이가 있었으며 FV에서는 Major 사례를 구현하지 못했다. 이에 따라 Major, Minor를 모두 구현한 EUL 결과를 중심으로 Major, PM 각각의 모델 내 구현 과정을 단계 별로 구성하여 비교하였다. 그 결과 SSW 발생에 있어 지형으로부터 발생한 EP flux의 상층으로의 연직 전파와 10 hPa 보다 높은 고도의 적도 방향 flux가 중요한 역할을 함을 확인하였다. 특히, 주어진 지형의 동서 방향 파수와 동일한 파수 2인 파동이 SSW 현상을 이끄는 역할을 하였다.

Major와 Minor를 가르는 차이는 앞서 SSW 발생을 조절하는 flux와 연관되었다. MAM이 Ongoing 단계보다 10 hPa 이상 고도의 적도 방향 flux가 약하였으며 대류권으로부터의 연직 전파는 더 강하였다. 이러한 흐름을 만드는 주요한 파수는 2였으며, 파수 3 이상인 파동들의 합도 10 hPa 이상 고도 flux에

기여하였다.

SSW 모의 과정 분석을 기반으로 FV에서 Major 사례를 모의하지 못하고 Minor 발생 횟수가 현저히 작은 이유로 Polar filter를 제시하였으며 polar filter의 적용 위도를 조절해보았다. 그 결과 70°N 이상 지역으로 한정 지은 실험에서 Major 사례를 확인할 수 있었으나 극지역 EP flux의 요란을 보이며 polar filter를 제한하는데 있어 문제점에 대해 고찰해볼 필요성을 확인하였다.

참고 문헌

Andrews, David G., James R. Holton, and Conway B. Leovy. 1987. *Middle Atmosphere Dynamics*. Academic Press.

Charlton, Andrew J, and Lorenzo M Polvani. 2007. "A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Benchmarks."

Charney, J G, and P G Drazin. 1961. "Propagation of Planetary Scale Waves from the Lower Atmosphere to the Upper Atmosphere." *J Geophys Res* 66: 83–109.

Edmon Jr, H J, B J Hoskins, and M E McIntyre. 1980. "Eliassen-Palm Cross Sections for the Troposphere." *Journal of the Atmospheric Sciences* 37 (12): 2600–2616.

Gerber, Edwin P., and Lorenzo M. Polvani. 2009. "Stratosphere-Troposphere Coupling in a Relatively Simple AGCM: The Importance of Stratospheric Variability." *Journal of Climate* 22 (8): 1920–33. https://doi.org/10.1175/2008JCLI2548.1.

Held, Isaac M, and Max J Suarez. n.d. "A Proposal for the and ™ Intercomparison of the Dynamical Cores of Atmospheric General Circulation Models."

Holton, James R. 1976. "A Semi-Spectral Numerical Model for Wave-Mean Flow Interactions in the Stratosphere: Application to Sudden Stratospheric Warmings." *Journal of the Atmospheric Sciences* 33 (8): 1639–49.

Holton, James R., and Hsiu-Chi Tan. 1980. "The Influence of the Equatorial Quasi-Biennial Oscillation on the Global Circulation at 50mb." *Journal of the Atmospheric Sciences*. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037.

Jucker, M., and T. Reichler. 2018. "Dynamical Precursors for Statistical Prediction of Stratospheric Sudden Warming Events." *Geophysical Research Letters* 45 (23): 13,124-13,132. https://doi.org/10.1029/2018GL080691.

Jun, Sang Yoon, Suk Jin Choi, and Baek Min Kim. 2018. "Dynamical Core in Atmospheric Model Does Matter in the Simulation of Arctic Climate." *Geophysical Research Letters* 45 (6): 2805–14. https://doi.org/10.1002/2018GL077478.

Jung, T, and J Barkmeijer. 2005. "Sensitivity of the Tropospheric Circulation to Changes in the Strength of the Stratospheric Polar Vortex." http://www.ecmwf.int/publications/.

Lu, Hua, Mark P. Baldwin, Lesley J. Gray, and Martin J. Jarvis. 2008. "Decadal-Scale Changes in the Effect of the QBO on the Northern Stratospheric Polar Vortex." *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 113 (10). https://doi.org/10.1029/2007JD009647.

Matsuno, Taroh. 1971. "A Dynamical Model of the Stratospheric Sudden Warming." *Journal of the Atmospheric Sciences* 28 (8): 1479–94.

Mcintyre, Michael E. 1982. "How Well Do We Understand the Dynamics of Stratospheric Warmings ?" Vol. 37.

Polvani, Lorenzo M., and Paul J. Kushner. 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.

Williamson, David L, Jerry G Olson, and Byron A Boville. 1998. "A Comparison of Semi-Lagrangian and Eulerian Tropical Climate Simulations." http://www-pcmdi.llnl.gov/phillips/.

Yao, Weiye, and Christiane Jablonowski. 2016. "The Impact of GCM Dynamical Cores on Idealized Sudden Stratospheric Warmings and Their QBO Interactions." *Journal of the Atmospheric Sciences* 73 (9): 3397–3421. https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0242.1.

ABSTRACT

Comparison of Idealized Sudden Stratospheric Warming Simulations in accordance with Dynamical Cores

Joon sung Park

Dept. of Earth System Sciences-Astronomy-Atmospheric Sciences

The Graduate School

Yonsei University

Sudden stratospheric warming(SSW) is the irregular, rapid temperature rise event in the polar stratosphere of the winter hemisphere. It is mainly generated by the planetary waves propagating from troposphere, and inversely affects tropospheric weather regimes. SSW can be judged as an indicator of variability and stratosphere-troposphere interaction, hence exact dynamical processes in models are necessary for the realistic SSW simulations. However, due to dynamical, physical, numerical differences simulations still produce different results for the SSW simulations.

In this study, main target is the comparison of SSW simulation

performances of each dynamical cores. Polvani and Kushner (2002) experimental setup ,which alters physics, radiation and other processes as simple temperature relaxation and friction, is applied with topography in Gerber and Polvani (2009). Three dynamical cores – Finite Volume (FV), Spectral Element(SE), Eulerian (EUL) spectral transformed models - of Community Atmosphere Model, version 5 (CAM5), are used.

EUL, SE show similar number of major, minor SSW occurrences. Not only FV can't produce major SSW, but also minor SSW less than the others. Change of the polar filter critical latitude improves SSW simulation performances of FV, but unreasonable patterns of EP flux occur in polar region, too. It suggests necessity of additional studies and caution in using polar filter for SSW simulations.

Keyword : Sudden Stratospheric Warming(SSW), Community Atmosphere Model(CAM), Finite Volume(FV), Spectral Element(SE), Eulerian(EUL), Idealized simulation