전구 경압파동 이상실험에서 연직혼합이 중력파 발생 및 발달에 미치는 영향 연구

연세대학교 대학원
대 기 과 학 과
박 인 표

전구 경압파동 이상실험에서 연직혼합이 중력파 발생 및 발달에 미치는 영향 연구

지도교수 박 상 훈

이 논문을 석사 학위논문으로 제출함

2021년 12월 29일

연세대학교 대학원

대 기 과 학 과

박 인 표

박인표의 석사 학위논문을 인준함

심사위원 박 상 훈 인

심사위원 전 혜 영 인

심사위원 송 인 선 인

연세대학교 대학원

2021년 12월 29일

감사의 글

2012년의 저에게 제가 이과대학 석사가 된다고 하면, 크게 놀라지 않았을 겁니다. 그때, 혹은 그 전부터 그러한 길을 걷고 있었고, 어린 저에게 제가 살아가는 도중에 석사를 하고, 연구를 하는 것은 장래희망이 아니라 자연스러운 인생의 미래 중간 과정 중 하나였습니다.

그러나 오늘, 2021년 막바지에 서서 저에게 제가 이과대학 석사가 되는 것은 마음 한 켠의 움직임이 있는 일입니다. 어렸을 때 석사라는 단어는 사전적인 정의로 다가왔고, 지금 저에게 석사라는 단어는 제 지금까지의 대학원 생활로 다가오기 때문일 것입니다.

그렇게 석사라는 단어를 곱씹으면서, 무엇보다 박상훈 교수님께 감사드립니다. 이것저것 많은 것들이 얽혀 있는 대학원 생활을 하면서도 제가 어떤 다른 것이 아니라 '연구'를 할 수 있도록 들이신 많은 고민과 노력에 감사의 뜻을 전하고 싶습니다. 석사 학위 심사위원을 맡아 주시면서 단순한 심사를 넘어서서 제 연구에 대해 진심으로 고민하고 조언해주셨던 전혜영 교수님과 송인선 교수님게도 감사하다는 말을 남기고 싶습니다.

제가 같은 분야에서 연구의 길을 걷는 다는 연관으로도 많은 도움을 주신 분들께도 깊은 감사를 드립니다. 연구에 많은 자문을 해주셨던 김영하 박사님과 신혜윰 박사님께 감사드립니다. 극지연구소 연수생 생활을 하면서 만난 모든 분들에게도 감사하다는 말을 드리고 싶습니다. 다양하게 많은 도움을 주셨던 덕분에 행복한 연수생 생활을 할 수 있었습니다.

대기모형 연구실 구성원들에게도 깊은 감사를 표합니다. 덕분에 연구실을 다니는 것이 즐거웠고, 재밌었습니다. 좋은 분위기를 만들어주고 의지가 되었던 준성이형, 민재형, 세현이, 혜진누나, 우주선배, 재엽이형에게 고마움을 전합니다.

석사라는 단어를 돌아봤을 때, 많은 고마움과 행복, 기쁨이 담겨 있다는 것이 흔한 일이 아니라는 것을 압니다. 그렇게 흔치 않은 일을 만들어주신 모든 분들께 다시 한 번 감사드립니다. 다른 사람들이 이 글처럼 되돌아보는 시간을 가질 때, 반대로 그 시간에 제가 있을 수 있었으면 좋겠습니다. 그럴 수 있도록 받은 만큼 나누며 살겠습니다. 감사합니다.

2021년 12월 29일

박인표 올림.

차　　례

차　　례 i

그림 차례 iii

표 차례 iv

국문 요약 v

제 1 장. 서론 ..... - 1 -

1.1 연구 배경 ..... - 1 -

제 2 장. 연구 방법 ..... - 5 -

2.1 실험 설계 ..... - 5 -

2.1.1 JW06 이상 실험 ..... - 5 -

2.1.2 모델 환경설정 ..... - 9 -

2. 2 중력파 분석 방법 ..... - 12 -

제 3 장. 연구 결과 ..... - 14 -

3.1 경압파동 분석 및 분석 시간설정 - 14 -

3.2 중력파의 개형과 분석 공간 설정 - 18 -

3.3 중력파 분석 - 22 -

3.3.2 파수공간에서의 분석 - 22 -

3.3.3 위상속도공간에서의 분석 - 26 -

3.4 음의 동서방향 위상속도 중력파 - 29 -

3.4.1 연직해상도에 따른 중력파 양상 - 29 -

3.4.2 음의 동서방향 위상속도 중력파의 생성과 발달 - 34 -

3.4.3 음의 동서방향 위상속도 중력파의 연직전파 - 41 -

3.5 국지혼합과 중력파의 연직운동량속 - 43 -

제 4 장. 요약 및 결론 - 45 -

참고 문헌 - 47 -

ABSTRACT - 50 -

그림 차례

Figure 1. Background windspeed at 8km(black line: contours at every 5m/s) and potential temperature at 1km(green line: contours at every 10K) in a) dry50, b) dry75, c) moist50, d) local50, e) local75, f) moist75 g) full50 h) full75 at 144h ..... - 15 -

Figure 2. Same as Figure 1, but in all experiment at each selected time .. - 17 -

Figure 3. Vertical velocity w at 12km altitude (color fill: m/s) in a) dry50, b) dry75, c) moist50, d) local50, e) local75, f) moist75 g) full50 h) full75 at analysis time for each simulation ..... - 20 -

Figure 4. Same as Figure 3, but in a) dry50 132h, b) dry50 138h, and c) dry50 144h ..... - 21 -

Figure 5. Same as Figure 3, but with analysis domain ..... - 21 -

Figure 6. $(k*, l*)$ space distribution of $w'w'$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 12km altitude in all experiment, which is 24h average with each center time..... - 24 -

Figure 7. (CHP_x, CHP_y) space distribution of $w'w'$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 12km altitude in all experiments, which use 48h data centered each time.. - 27 -

Figure 8. Same as Figure 5, but in a) dry50, b) local50, c) dry_d300, d) local_d300, green line in c), d) indicate the axes along which the vertical cross sections are shown in Figure 13. ..... - 31 -

Figure 9 Same as Figure 7, but in a) dry50, b) local50, c) dry_d300, d) local_d300..... - 32 -

Figure 10. Vertical wavelength distribution of $w'w'$ at 12km altitude in a)

dry_d300 and dry50 for negative x-direction ..... - 33 -

Figure 11. (CHP_x, CHP_y) space distribution of $w'w'$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 3km to 12km altitude in dry_d300 and local_d300, which use 48h data centered each time..... - 35 -

Figure 12. (CHP_x, CHP_y) space distribution of $w'w'$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 12km altitude in dry_d300 and local_d300, which use 12h data for each time..... - 36 -

Figure 13. Vertical velocity (color fill: m/s) at 55.1 °N in dry_d300 from day5.5 to day6.75..... - 39 -

Figure 14 Same as Figure 13, but in local_d300 from day6 to day7..... - 40 -

Figure 15. a) Same as Figure 7, b) same as Figure 10, c) same as Figure 13, but in simulation which local mixing after day5..... - 42 -

Figure 16. Same as Figure 7, but distribution of $\rho u'w'$ (color fill: $Pa(ms^{-1})^{-2}$) in dry_d300, local_d300, dry_d300 negative flux, dry_d300 positive flux, local_d300 negative flux, local_d300 positive flux..... - 44 -

표 차례

Table 1. experiment list..... - 10 -

Table 2. additional experiment list..... - 11 -

국문 요약

전구 경압파동 이상실험에서 연직혼합이 중력파 발생 및 발달에 미치는 영향 연구

행성경계층 모수화는 모델 연직층 간의 혼합을 모수화 하며, 행성경계층아래의 난류 등에 의한 비국지혼합과 역학적 혼합 등에 의한 국지혼합을 포함한다. 본 연구에서는 크게 주목받지 못하던 국지혼합에 대한 연구를 진행하였다. 그 방법으로 경압파동 이상실험을 선택하였다.

경압파동 이상실험은 전구대기의 중요한 특징 중 하나인 경압파동을 재현하는 실험으로, 경압파동과 그와 연관되어 일어나는 여러 대기 현상들에 대한 기반 연구의 도구로 자주 사용된다. Kim et al. (2016)과 Wei et al. (2016) 등과 같이 경압파동 이상실험을 통해 경압파동에서 생겨나는 중력파에 대한 연구들이 진행되었으며, Menchaca and Durran (2019)에서는 행성경계층 모수화에 따라 중력파 형성이 달라짐을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 수치모형에서 연직혼합이 경압파동의 발달에 따라 생기는 중력파의 발생과 발달에 어떤 영향을 미치는지에 대해 연구하였다. 그

방법으로 행성경계층 모수화의 국지혼합과 미세물리구름과정 모수화, 수증기의 초기 분포를 변인으로 두어 정상상태의 균형이 맞춰진 전구 경압파동 이상실험을 수행하였다. 수치모형은 전구 Weather Research and Forecasting Model version 3.9.1.1을 사용하였다.

국지혼합은 경압파동에 따라 형성되는 전체적인 중력파의 강도와 한랭전선에서 생성되는 중력파의 형태에 큰 영향을 미쳤다. 본 연구에서는 국지혼합이 중력파에 미치는 영향이 무시할 수 없는 중요한 영향이라는 것을 확인할 수 있었으며, 국지혼합이 경압파동 이상실험과 다른 종류의 실험들에서 더 중요하게 여겨져야 한다고 제시하였다.

핵심되는 말: 전구 경압파동 이상실험, 연직혼합, 국지혼합, 제트/전선 중력파

제1장. 서론

1.1 연구 배경

행성경계층 모수화는 수치모델에서 모델 연직층 간의 혼합을 모수화한다. 행성경계층 밑의 난류활동에 의한 연직혼합을 모수화 하기 때문에, 난류를 묘사하지 못하는 다양한 규모의 수치모델에서 행성경계층 모수화는 중요한 역할을 담당한다. 그 중 널리 사용되는 Yonsei University(YSU) boundary layer scheme (Hong et al. 2006)을 포함한 많은 행성경계층 모수화는 행성경계층 밑의 난류활동에 의한 비국지혼합을 모수화할 뿐만 아니라 역학적 혼합 등을 구현하기 위한 국지혼합을 전층에서 함께 모수화하여 모델 연직층 간의 혼합을 모수화한다.

최근, Menchaca and Durran (2019) 에서는 YSU boundary layer scheme을 변형하여 행성경계층을 고정한 상태로 경압파동 이상실험을 진행하였다. YSU boundary layer scheme을 통하여 지표응력이 운동에너지 스펙트럼의 기울기에 미치는 영향을 연구하였으며, 지표응력에 따라 발생시키는 중력파가 달라지며 모델의 운동에너지 스펙트럼 기울기 모의성능을 향상시켰다고 말했다.

그러나, Menchaca and Durran (2019) 에서 사용한 YSU boundary layer scheme는 비국지혼합 뿐만 아니라 국지혼합 또한 포함하는 모수화이다.

전층에 작용하는 국지혼합 모수화는 행성경계층 밑의 연직층에만 작용하지만, 그 값이 비교적 큰 비국지혼합 모수화에 비해 크게 중요하게 생각되어오지 않았다. Menchaca and Durran (2019) 에서도 YSU boundary layer scheme의 영향을 지표응력의 개념으로만 해석하였다.

본 연구에서는 국지 혼합은 비국지혼합에 비해 작은 값이지만 전 층의 혼합을 담당하는 만큼 영향을 끼칠 수 있는 값이라고 판단했고, 비국지혼합과 별개로 국지혼합이 끼치는 영향에 대한 연구가 필요하다고 판단했다. 따라서 본 연구에서는 국지 혼합이 경압파동에서 발생하는 중력파에 어떻게 영향을 끼치는지에 대해 분석할 것이다.

그 방법으로 전구 경압파동 이상실험을 선택하였다. 전구 경압파동 이상실험은 중위도 제트와 연관되는 경압파동을 재현하는 실험이다. 중위도 제트와 연관되는 경압파동은 다양한 대기의 요소들과 상호작용하는 전구 대기의 중요한 현상이지만, 실제 대기의 요소들을 통제하여 경압파동 자체에 대한 연구를 진행하는 것은 어려운 일이다. 경압파동 이상실험은 실제대기와 유사한 경압파동을 재현하면서도, 이러한 어려움을 겪지 않을 수 있도록 도와준다. 최근 경압파동 이상실험을 통하여 경압파동과 그에 따라 생성되는 중력파에 대한 연구가 경압파동 이상실험을 통하여 진행되고 있다.

Kim et al. (2016) 에서는 비단열과정을 포함하지 않는 경압파동 이상실험을 통해서 제트/전선계에서 생성되고 전파되는 중력파에 대한 연구가

이뤄졌다. 이상실험에서 발생하는 중력파들이 제트/전선계에서 생성되는 중력파라는 것을 다양한 분석을 통하여 보여내, 경압파동 이상실험에서 제트/전선계가 어떤 중력파를 발생시키는지를 제시하였다.

Wei et al. (2016) 에서는 초기값의 상대습도 분포를 조정하여 대류불안정도에 따라 제트-전선계에서 중력파의 생성과 전파가 어떻게 달라지는지에 대한 연구를 진행하였으며, 연구의 결과로 수증기 분포에 따라 어떤 중력파들이 생성되고 전파하는지를 제시하였다. Wei et al. (2016) 에 따르면, 수증기가 충분히 존재하지 않아 대류 중력파가 제트/전선 중력파보다 지배적이지 못할 때도, 수증기의 비단열과정이 제트/전선 중력파를 강화하고 변형시키는 것이 나타나며, 수증기 분포가 충분할 때에도 대류 중력파가 강해지며 제트/전선 중력파를 강화한다는 결론을 이야기한다.

그러나 앞서 살펴본 Wei et al.(2016) 에서는 초기조건에서 수증기를 고려하여 이상실험 초기조건의 균형을 충분히 맞추지 않은 채로 실험이 진행되었다. 균형이 맞춰진 초기 경압파동에서 같은 제트를 사용하며 수증기를 변화시켜 실험을 진행한 연구이다.

이상실험의 경우, 진행한 실험이 충분한 의미를 가지고 있다는 것을 보여야 하는데, 이론적으로 균형이 맞춰진 초기값을 사용하는 이상실험들은 자명하지 않은 해를 제공한다는 기초 위에서 이야기를 진행한다. 균형이 맞춰지지 않은 초기값에서는 그 균형을 맞추기 위한 비물리적인 섭동이

존재하여 결론을 오염시킬 수 있다.

따라서, Wei et al. (2016) 의 실험은 수증기를 포함하여 균형을 맞춘 초기조건에서 다시 검증되어야 할 필요가 있다. 이때, 앞서 살펴본 Kim et al. (2016)의 실험에서는 모든 모수화를 사용하지 않아 수증기의 비단열과정이 포함되는 실험이었으나, 사용한 초기조건은 수증기를 포함한 식을 반복시켜 균형을 맞춘 초기조건을 계산하는 Park et al. 2013의 초기값을 사용하였다. 따라서, 본 연구는 수증기를 포함하여 균형을 맞춘 Park et al. (2013) 의 초기조건으로 비단열과정을 포함하는 실험을 진행하였고, 수증기의 대류과정을 포함하였을 때, 국지혼합이 어떤 영향을 미치는지에 대해서도 분석할 수 있었다.

본 연구에서는 행성경계층 모수화에서 전층에 작용하는 국소 연직혼합만을 적용하게 수정하여 전층에 적용되는 국지혼합만을 사용하는 모수화를 진행하였다. 국지혼합의 유무가 건조한 경압파동 이상실험과 습윤한 경압파동 이상실험에서 중력파를 어떻게 다르게 발생시키고 발달시키는지에 대해 살펴볼 것이다.

제2장. 연구 방법

2.1 실험 설계

2.1.1 JW06 이상 실험

본 연구의 경압파동 이상실험은 Jablonowski and Williamson (2006) (JW06)의 이상실험을 기본으로 한다. JW06은 정상 상태의 균형이 맞춰진 초기조건을 바탕으로, 섭동을 주었을 때 경압파동이 유도되는 이상실험으로, 초기조건을 구성하는 핵심 식들은 다음과 같다.

$$u\left(\lambda, \varphi . \eta\right) = u_0 \cos^{3/2} \eta_v \sin^2(2\varphi) \tag{1}$$

$$< T(\eta) >= T_0 \eta^{R_d \Gamma / g}, \qquad for \;\; \eta_s \geq \eta \geq \eta_t \tag{2}$$

$$< T(\eta) >= T_0 \eta^{R_d \Gamma / g} + \Delta T(\eta_t - \eta)^5, \qquad for \;\; \eta_t > \eta \tag{3}$$

$$\begin{aligned} T\left(\lambda, \varphi . \eta\right) =& < T(\eta) > + \frac{3}{4} \frac{\eta \pi u_0}{R_d} sin\eta_v cos^{\frac{1}{2}} \eta_v \\ & \times [\left\{-2sin^6 \varphi \left(cos^2 \varphi + \frac{1}{3}\right) + \frac{10}{63}\right\} 2u_0 cos^{\frac{3}{2}} \eta_v \\ & + \{\frac{8}{5} cos^3 \varphi \left(sin^2 \varphi + \frac{2}{3}\right) - \frac{\pi}{4}\} a\Omega] \end{aligned} \tag{4}$$

$$< \Phi(\eta) >= \frac{T_0 g}{\eta} (1 - \eta^{\frac{R_d \Gamma}{g}}), \qquad for \;\; \eta_s \geq \eta \geq \eta_t \tag{5}$$

$$< \Phi(\eta) \geq \frac{T_0 g}{\eta}\left(1-\eta^{\frac{R_d \Gamma}{g}}\right) - R_d \Delta T\{(\ln\left(\frac{\eta}{\eta_t}\right) + \frac{137}{60}\eta_t^5 - 4\eta_4^4 + 5\eta_t^3\eta^2$$
$$-\frac{10}{3}\eta_t^2\eta^3 + \frac{5}{4}\eta_t\eta^4 - \frac{1}{5}\eta^5\}, \qquad for\ \eta_t > \eta \tag{6}$$

$$u'\left(\lambda, \varphi. \eta\right) = u_p \exp\{-\left(\frac{r}{R}\right)^2\} \tag{7}$$

$\eta_v = \frac{(\eta-\eta_0)\pi}{2}$, $\eta_t = tropopause\ level, \eta_s = surface\ level$

$R=a/10$

$r = a \arccos\{sin\varphi_c sin\varphi + cos\varphi_c cos\varphi \cos(\lambda - \lambda_c)\}$

앞서 언급한 Park et al. (2013) 에서는 JW06을 기반으로 수증기를 포함하여 균형을 맞추도록 식을 수치적으로 반복하여 풀어 초기조건을 구하였다. 본 연구에서는 이중에서 가장 불안정한 정상상태인 파수 9의 초기조건을 사용하였다. 밑의 식은 JW06과 비교하여 수증기를 추가하였을 때 달라지는 식들이며, JW06과 밑의 식들을 수치적으로 풀어 초기값을 생성한다.

$$T\left(\lambda, \varphi. \eta\right) =< T(\eta) > + \frac{3}{4}\frac{\eta\pi u_0}{R_d} sin\eta_v cos^{\frac{1}{2}}\eta_v$$
$$\times [\left\{-2sin^6\varphi\left(cos^2\varphi + \frac{1}{3}\right) + \frac{10}{63}\right\} 2u_0 cos^{\frac{3}{2}}\eta_v \tag{8}$$
$$+\{\frac{8}{5}cos^3\varphi\left(sin^2\varphi + \frac{2}{3}\right) - \frac{\pi}{4}\}a\Omega](\frac{1}{p_s - p_t})(\frac{1}{1+1.61q_v})$$

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} = (1+q_v)\frac{\partial p_d}{\partial \eta} \tag{9}$$

$$\alpha_d = \frac{R_d}{p_0}\theta(1+1.61q_v)\left(\frac{p}{p_0}\right)^{-c_v/c_p} \tag{10}$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \eta} = -\alpha_d \frac{\partial p_d}{\partial \eta} \tag{11}$$

α_d: $specific\ volume\ of\ dry\ air$

본 연구에서는 다른 수증기 분포를 주기 위하여 2가지 초기조건을 사용하였는데, 첫번째 초기조건은 최대 상대습도가 50%로, 최대 비습 18.96g, 제트 중심에서 나타나는 동서방향 최고 바람 속력은 36.21m/s를 가지며, 두번째 초기조건은 최대 상대습도가 75%로, 최대 비습 28.09g, 동서방향 최고 바람 속력은 36.66m/s를 가진다.

수증기 분포의 차이만을 갖는 두 초기조건을 구성하는 것이 목표이나 해당 실험의 초기조건은 정상상태의 균형을 맞추는 것이 필요하기 때문에, 수증기 분포만 변화하면서 정확히 같은 제트를 가지는 두 가지 초기조건을 만들 수 없다. 수증기 분포 차이가 두 초기조건의 차이에 가장 지배적인 차이가 되도록 두 초기조건을 구성하였으나, 동서 방향 최고 속력의 차이로 볼 수 있듯 균형을 맞추는 과정에서 조금의 차이가 있다. 따라서, 두 초기조건을 통해 발생되는 경압파동을 같은 초기조건에서 만들어진 것처럼 분석할 수는 없다. 후에 보여질 결과에서는 수증기의 비단열과정을 포함하지 않는

실험간의 결과에서도 경압파동의 발달과 위상, 강도가 조금씩 다를 것을 확인할 수 있는데, 이는 두 초기조건이 수증기 분포와 균형을 맞추며 제트가 완전히 일치하지 않기 때문이다. 따라서, 후의 분석도 앞서 언급한 점들을 주의하면서, 두 실험간의 제트 차이 때문에 일어나는 오해석이 없도록 같은 초기조건에서 변인에 반응하는 정도를 중심으로 분석을 진행하였다.

2.1.2 모델 환경설정

본연구에서는 NCAR(national Center for Atmospheric Research) 에서 제공하는 Advanced Research Weather Research and Forecasting Model (ARW-WRF; Shamarock et al. 2005) version 3.9.1.1을 사용했다. 해당 모형은 완전압축성 비정계수식(fully compressible non-hydrostatic equation)를 사용하며, Arakawa-C 수평격자체계를 사용한다.

실험의 수평격자는 약 10km(3889×1945)의 수평격자를 가지고 있는 전구격자를 사용하였다. 연직격자로는 10hpa까지 50개층을 사용하였다. 적분시간은 총 9일까지 수행하였으며, 중력파 분석을 수행하기 위하여 4일차부터 5분간격으로 데이터를 저장하였다.

실험에서는 서로 다른 4가지 모수화 환경을 사용하였다. 가장 먼저, 모든 모수화를 사용하지 않은 실험을 dry 실험이라고 명했다. 또, 행성경계층 모수화로 the Yonsei University(YSU) scheme(Hong, Noh, and Dudhia 2006a)을 변형시켜서 국지혼합만을 적용하게 한 모수화만을 적용한 실험을 local 실험이라고 하였으며, 미세물리구름과정 모수화로 WRF Single-Moment 5-class scheme을, 적운 모수화로 Tiedtke scheme을 local 실험에서 추가로 사용한 것을 full 실험이라고 하였다. 마지막으로 행성경계층 모수화를

사용하지 않고, 미세물리구름과정 모수화와 적운 모수화만을 사용한 실험을 moist 실험이라고 하였다. 이 4가지 물리모수화 환경으로 2가지 초기조건을 모두 수행하였는데, 총 8가지의 실험을 수행하였고, 최대 상대습도의 이름을 따서, 각각 dry50, dry75, local50,local75, full50, full75, moist50, moist75 실험이라고 하였다. 이를 표로 정리해 밑에 첨부하였다.

Table 1. Experiment list

	dry 50/75	local 50/75	full 50/75	moist 50/75
local mixing	×	O	O	×
microphysics	×	×	WSM5	WSM5
cumulus physics	×	×	Tiedtke	Tiedtke
nonlocal mixing	×	×	×	×

또, dry 실험과 local 실험을 기본으로 하여 세 가지 추가 실험을 진행하였다. 초기조건은 dry50과 같은 초기조건을 사용하였다. 추가 실험은 10hpa까지 94개층을 사용하였고, 기존 실험은 대다수가 약 560m의 연직격자 길이를 가지고 있는 실험이었으나, 추가실험에서는 약 300m의 연직격자 길이를 대다수로 갖는 연직격자에서 진행하였다. 이를 dry_d300, local_d300라고 하였으며, dry_d300와 같은 조건으로 5일 동안 적분한 후, 국지 혼합을 사용한 실험을 추가로 진행하였다. 이 또한 정리해 표로 나타냈다.

Table 2. Additional experiment list

	dry_d300	local_d300	local mixing after day5	
			~day5	day5~6
local mixing	×	0	×	0
nonlocal mixing	×	×	×	×

2.2 중력파 분석 방법

전구 격자를 사용한 실험에서 중력파를 분석하기위해서 실험마다 설정한 지역내에서 Fast Fourier transform(FFT)를 사용하였다. 모든 실험에서 비슷한 경압파동의 진행상태에서 분석하기 위하여 Kim et al. 2016에서 배경장과 섭동을 분류한 방법을 사용하였다. 배경장은 각 격자점에서 주위 300km에서 이동평균법을 이용하여 계산하였고, 계산된 배경장을 기준으로 실험들 간의 경압파동 진행상태를 비교하였다.

FFT 중력파 분석에서는 Wei et al. (2016)의 방법을 이용하였다. (x, y, z, t)차원의 모형 결과에서 특정 연직층과 시간대를 고정한 (x, y)차원의 자료를 Wei et al. (2016)의 A1 식을 이용하여 연직속도 w의 분산을 계산하였다. 또, A10 식을 사용하여 중력파에 의도된 동서바람속도 u와 연직속도 w 섭동을 계산하여 그 분산을 계산하였다. 이 과정에서 계산되는 w의 분산은 중력파의 간헐성을 고려하여 5분 간격의 자료를 하루 평균을 해서 사용하였다.

$$\overline{w'(x,y)w'(x,y)}(k^*,l^*) = Re(F2[w(x,y)]Conj\{F2[w(x,y)]\}) \quad (12)$$

$$u'_{GW}(x,y) = Re\left[B2\left(Filter_{XY_{(50km,600km)}\{F2[u(x,y)]\}}\right)\right] \quad (13)$$

또, (x, y, z, t)차원의 모형 결과에서 특정 연직층만을 고정한 (x, y, t)차원의 자료를 Wei et al. (2016)의 다음과 같은 식들을 이용하여 지면 기반 수평 중력파 위상속도 (C_{HP_x}, C_{HP_y}) 차원의 연직 운동량속과 w분산을 계산하였다.

$$\rho_0 \overline{u'(x,y,t)w'(x,y,t)}\left(C_{HP_x}, C_{HP_y}\right) = AVG_XYT[\rho(x,y,t)] \times \sum_{C7\ and\ C8} \overline{u'(x,y,t)w'(x,y,t)}(k^*, l^*, w^*) \quad (14)$$

제3장. 연구 결과

3.1 경압파동 분석 및 분석 시간설정

가장 먼저, 각 경압파동 이상실험들에서 나타나는 경압파동의 양상을 살펴보았다. **Figure 1**은 각 실험의 배경장을 모델 적분 시간 144시간 후의 경압파동을 나타냈다. 가장 먼저, 초기조건에서 의도한대로 모든 실험에서 파수 9를 의미하는 경도 40도의 크기를 가지며 진행되는 경압파동이 발달하는 것을 살펴볼 수 있다.

dry실험과 local실험의 비교를 통하여서 국지혼합이 경압파동의 발달과 전파를 모두 늦추는 것을 확인할 수 있으며, 반대로 dry와 moist 실험들 간의 비교로 수증기의 대류가 경압파동의 발달과 전파를 빠르게 하는 것을 확인할 수 있다. 특히, dry50과 moist50의 발달속도와 전파속도 차이에 비해 dry75와 moist75의 차이가 더 큰 것을 확인할 수 있었으며, 이는 moist75가 moist50에 비해 더 많은 수증기를 가지고 있어 더 빠른 시간대에서 더 강한 수증기 대류활동을 보였을 것으로 해석됐다. Full실험은 dry 실험에서 국지혼합과 수증기대류의 영향을 모두 받는 것을 확인할 수 있었고, 모든 실험에서 baroclinic wave의 발달과 전파속도가 각각 다른 것을 확인하였다.

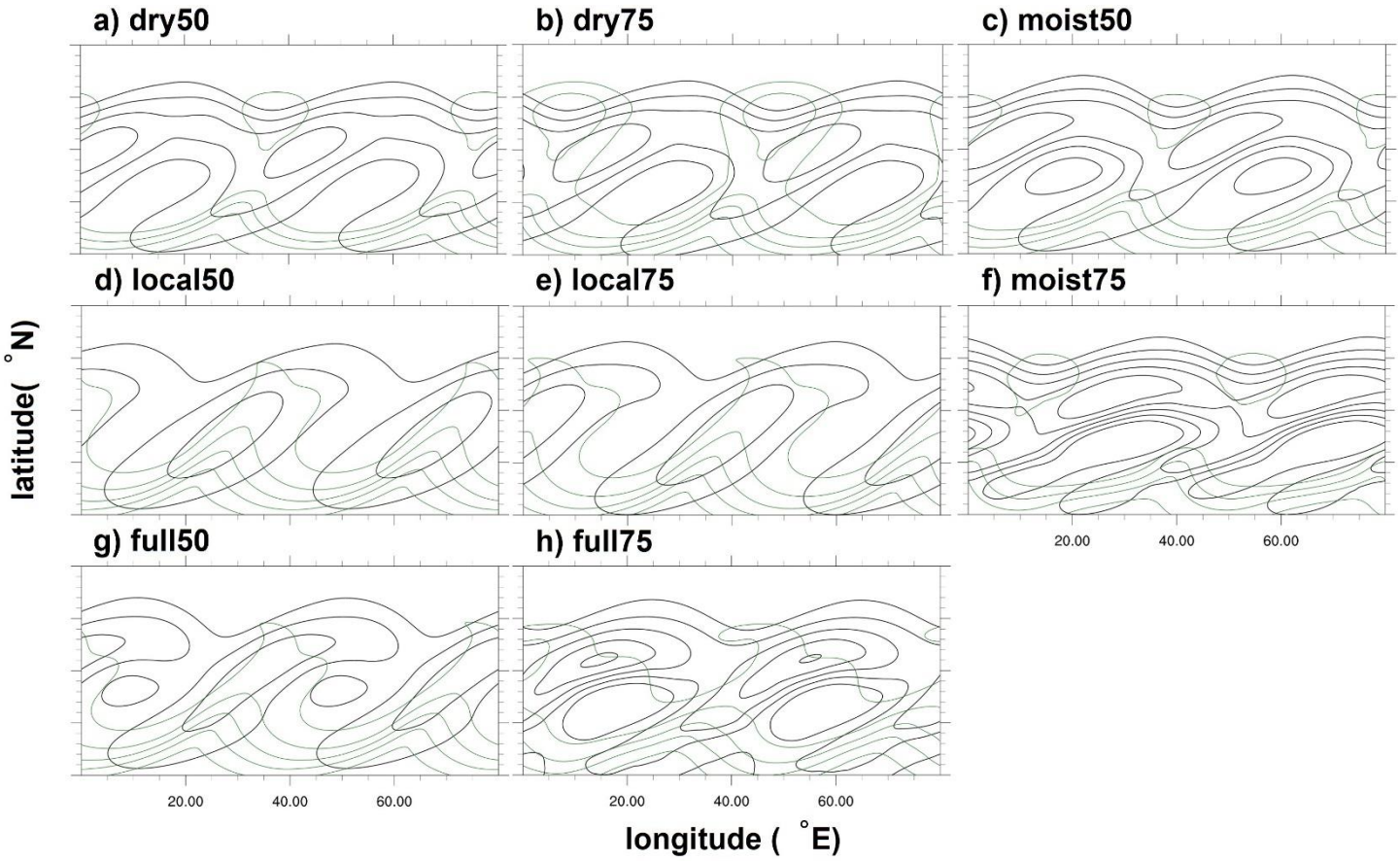

Figure 1. Background windspeed at 8km(black line: contours at every 5m/s) and potential temperature at 1km(green line: contours at every 10K) in a) dry50, b) dry75, c) moist50, d) local50, e) local75, f) moist75 g) full50 h) full75 at 144h

특히, 수증기 대류가 영향을 미치는 실험에서는 경압파동이 발달하면서 수증기 대류가 일어나는 강도가 달라졌기 때문에, 같은 실험내에서도 경압파동 발달속도와 전파속도가 달라졌다. 따라서, 경압파동실험에서 생성되는 중력파를 각 실험들 간에 공정하게 분석하기 위하여 경압파동의 위상이 비슷한 시간과 공간 영역을 설정할 필요가 있었다. Figure 2는 실험의 배경장을 기준으로 비슷한 위상을 가지고 있는 시간대와 중심 경도를 각 실험에서 설정한 결과이다.

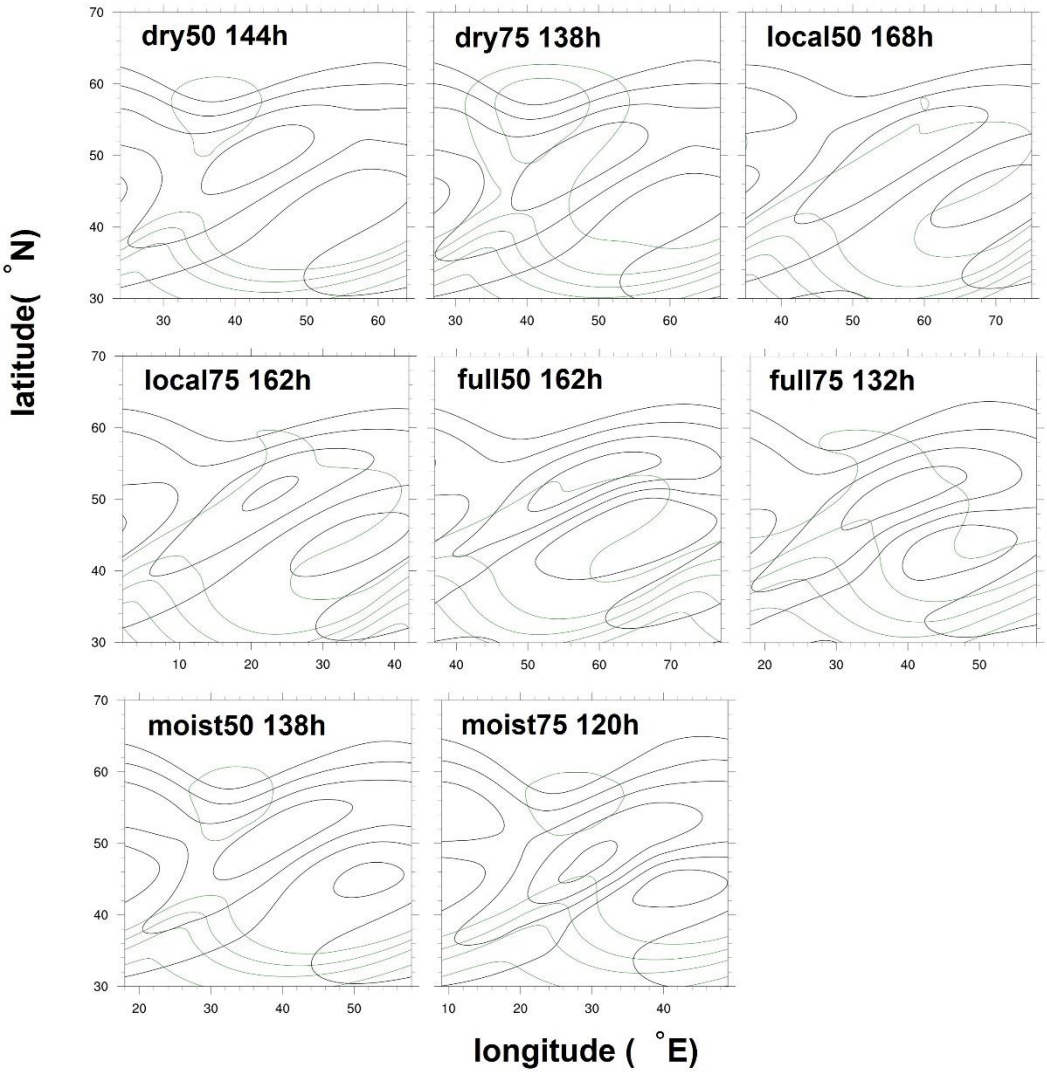

Figure 2. Same as **Figure 1,** but in all experiment at each selected time

3.2 중력파의 개형과 분석 공간 설정

중력파의 개형을 살펴보기 위하여 앞서 Figure 2에서 결정된 각 실험의 분석 시간의 12km 상공 연직 바람 속도장을 Figure 3에 나타냈다.

dry50실험의 적분시간 120시간의 그림을 보면, 3가지 구역으로 나뉘어지는 파동형태를 볼 수 있다. 동경 15도부터 25도, 북위 50도부터 65도 사이의 음의 연직바람속도가 지배적인 구역에서의 파동형태와 동경 25도부터 35도, 북위 50도에서 65도사이의 파동형태가 인접하여 나타나는 것을 볼 수 있고, 북위 50도를 중심으로 하여 양의 연직바람속도가 지배적인 구역의 파동형태를 살펴볼 수 있다. 주목할 만한 특징으로는, 각 구역에서의 파동형태가 비교적 비슷한 파장을 가지고, 일관된 방향으로 진행한다는 것이다. 이는, Kim et al. 2016의 Fig 2.에서 보여지는 결과와 비슷한 모습이다. 이 결과를 moist50과 비교하였을 때, 같은 적분시간 120시간에서 dry50의 세가지 파동형태가 나타나는 지역과 비슷한 지역에서 모두 파동형태를 가지고 있다. 여기서, 양의 연직바람속도를 가지는 구역에서는 dry50의 파동형태를 찾기 힘들며, 다양한 파장의 파동형태를 찾을 수 있다. Wei et al. (2016)에서는 습윤한 경압파동 이상실험에서 발생하는 중력파가 제트-전선 중력파의 변형 및 증폭, 대류중력파의 두 종류가 있다고 지적하는데, 이를 바탕으로 moist50에서

보이는 파동형태를 추측할 수 있다. 수증기의 대류로 인해 일어나는 차이는 dry75와 moist75 실험에서도 더 극명하게 확인할 수 있었다.

그러나 moist와 dry실험들의 차이에서 수평 구조가 크게 다르지 않았던 것과 다르게, 국지혼합 모수화를 사용한 local과 full 실험에서는 수평구조가 비교적 더 큰 차이를 보이고 있으며, 더 다양한 방향과 파장의 파동형태를 갖는 것을 확인할 수 있다. 즉, 수증기의 영향과 비교하여도 국지혼합 모수화가 무시할 수 없는 개형 차이를 야기하였다고 할 수 있다.

Figure 4에 등장하는 dry50의 실험의 12km 상공 연직바람속도장을 여러 시간대에서 살펴보면, 2차 저기압이 북위 40도에서 나타나는 것을 확인할 수 있다. 각 실험에서 2차 저기압이 생성하는 중력파 연구가 의미 없는 것은 아니나, 기존 경압파동과 발달속도와 진행속도가 다른 2차 저기압을 각 실험에서 공정하게 비교하기 어렵다고 생각하여, 이를 제외한 중력파들을 분석하고자 했다. 따라서, Figure 5와 같이 위도로는 북위 50도부터 70도까지, 경도로는 Figure 2에서 결정하였던 중심위도에서 경압파동 한 파장의 길이와 같은 양 옆 20도까지를 앞으로의 분석 공간으로 설정하였다.

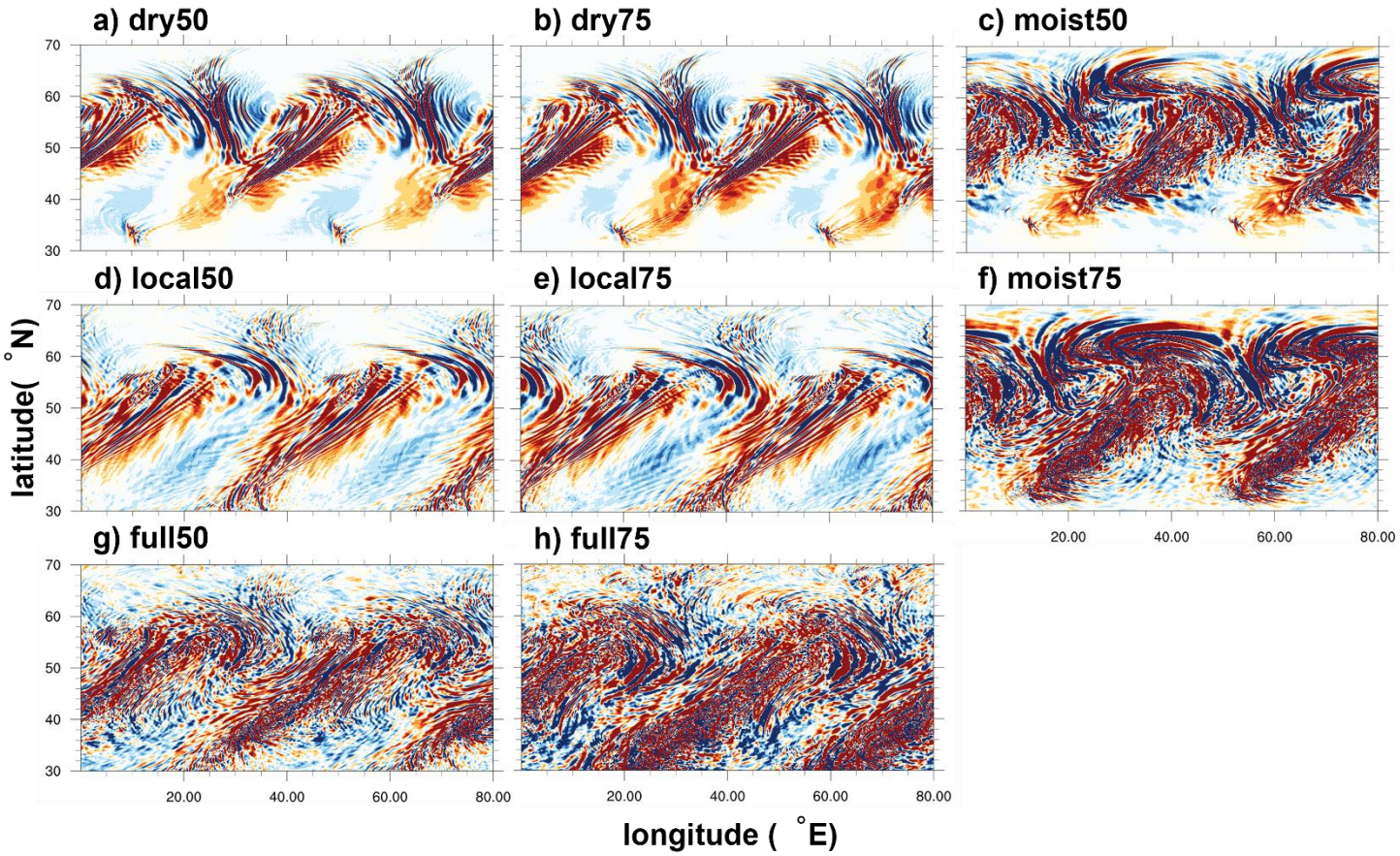

Figure 3. Vertical velocity w at 12km altitude (color fill: m/s) in a) dry50, b) dry75, c) moist50, d) local50, e) local75, f) moist75 g) full50 h) full75 at analysis time for each simulation

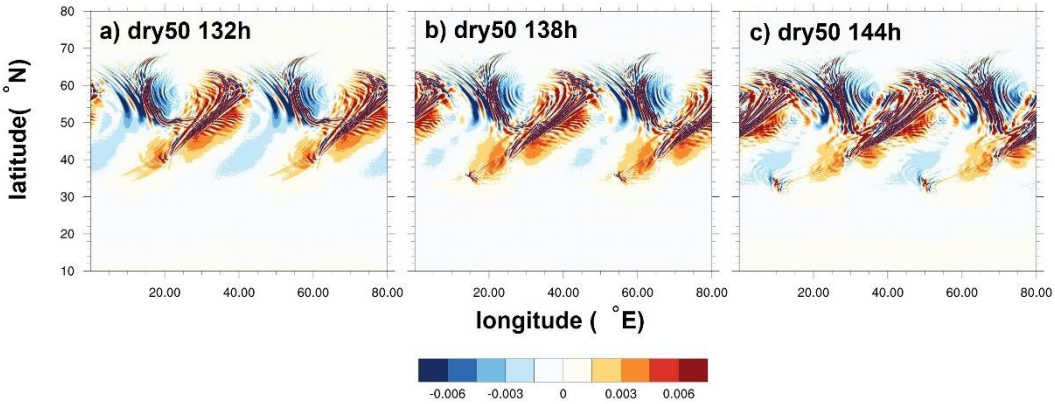

Figure 4. Same as **Figure 3**, but in a) dry50 132h, b) dry50 138h, and c) dry50 144h

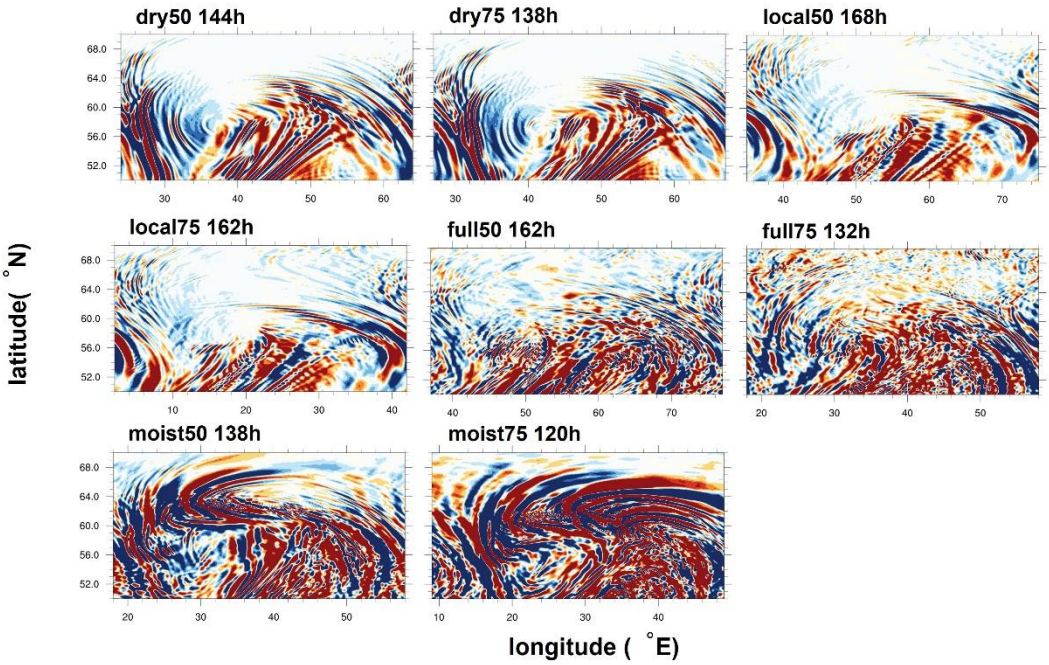

Figure 5. Same as **Figure 3,** but with analysis domain

3.3 중력파 분석

3.3.2 파수공간에서의 분석

Figure 2에서 설정한 각 실험의 시간을 중심으로 만 하루의 12km 상공 연직바람속도의 분산을 (k^*, l^*)공간에서 구한 후, 평균을 하여 Figure 6에 나타내었다. 가장 먼저, dry50과 dry75의 실험에서는 두 방향으로 강한 연직바람속도 분산값을 보인다. k^* 축방향과 비슷한 방향으로 한 방향, l^*이 음수인 방향으로 한 뱡향으로 강한 값을 보이고 있다. 3.2절에서 dry 실험들의 12km 연직바람속도장은 특정 방향의 비교적 일관된 파장의 파동형태를 특징으로 가지고 있었는데, 이러한 특징이 잘 나타나는 결과라고 할 수 있다. local50과 local75의 경우. l^*가 음수인 방향으로 dry 50과 dry 75에서 강했던 방향으로 치우쳐져있기는 하지만, 더 넓은 방향으로 고른 연직바람속도의 분산값을 보인다. 역시 3.2절에서 볼 수 있었던 다양한 파장과 방향을 가지는 파동형태를 보였던 것을 이야기하는 결과라고 할 수 있다. moist50과 moist75를 살펴보았을 때는, 전반적으로 훨씬 강한 연직바람속도의 분산값을 가지고 있으며, 등방성을 가진다고 할 수는 없으나, dry50과 dry75처럼 특정방향으로 뚜렷하게 강한 값을 보이지 않고, 다양한 방향의 값을 보이고 있다. 이는, Wei et al. (2016)실험에서도 언급하였고,

3.2절에서 확인했듯이 대류중력파가 다양한 파장을 가지고 다양한 방향으로 전파되기 때문으로 추측된다.

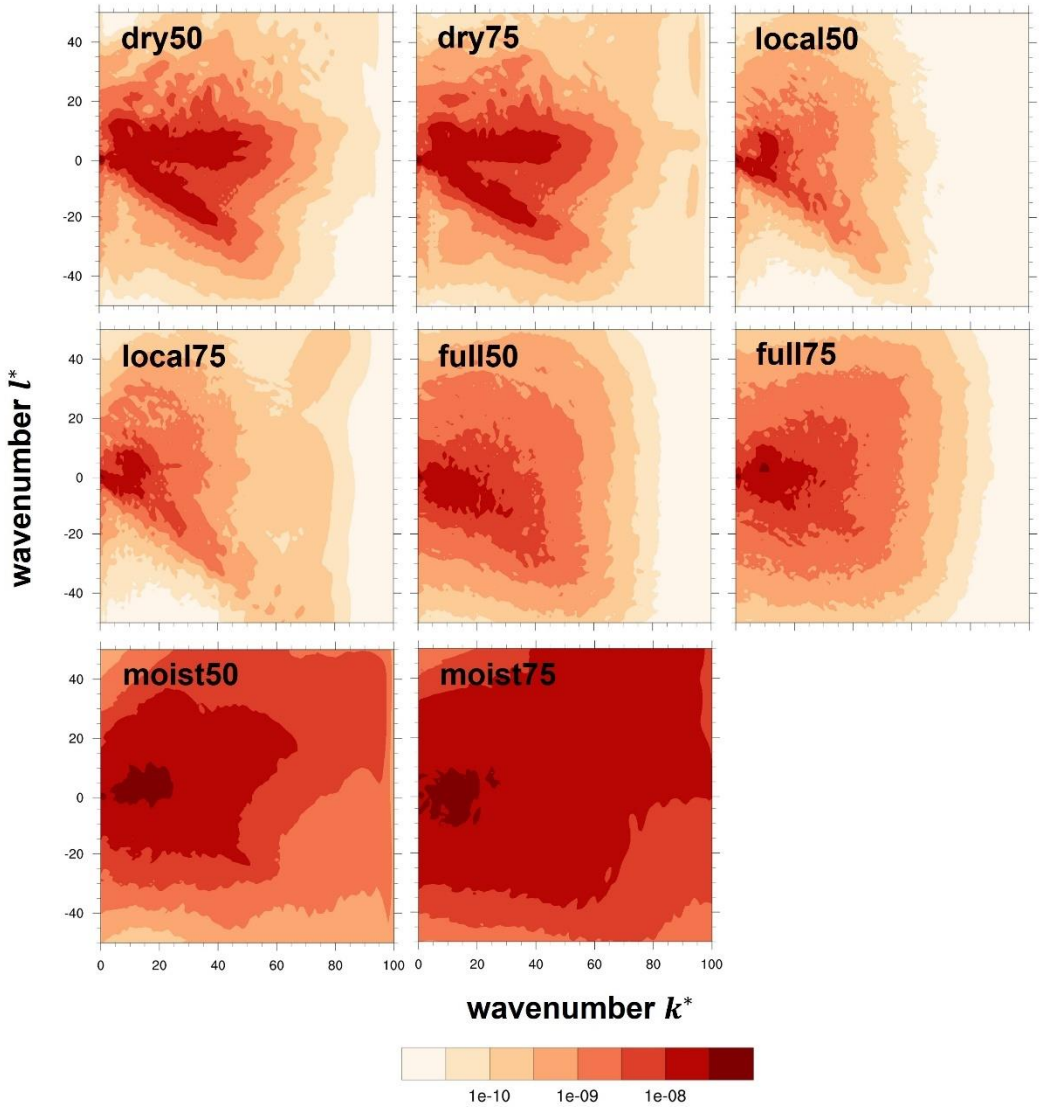

Figure 6. $(\boldsymbol{k}^*, \boldsymbol{l}^*)$ space distribution of $\overline{\boldsymbol{w}'\boldsymbol{w}'}$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 12km altitude in all experiment, which is 24h average with each center time

moist50과 moist75와 같이 미세물리구름과정 모수화와 적운모수화를 포함하는 full50과 full75 또한 dry50과 dry75에 비해 특정방향으로 뚜렷한 강세를 가지지 않고, 전방향으로 고른 값을 보이고 있다. 특히, full75는 모든 실험중에서 제일 고르게 모든 방향에서 연직바람속도의 분산을 보여준다. 이는full75는 full50에 비해 특정방향성을 가진 제트-전선 중력파에 비해 다양한 방향성을 가지고 있는 대류중력파가 더 지배적인 실험이며, 더 고른 방향으로 값을 보이게 했던 국지 혼합이 대류중력파와 제트-전선중력파에 모두 적용되면서 moist75보다 더 고른 값을 보이는 것으로 보인다.

12km 상공의 연직 바람속도 분산값은 12km까지 올라오는 중력파의 양으로 해석할 수 있다. 건조한 환경에서의 제트/전선 중력파가 특정한 방향으로 전파하는 것과 대류중력파가 더 다양한 방향으로 전파하는 것, 국지혼합이 대류중력파와 제트/전선중력파 모두 더 다양한 방향으로 전파하게 하는 효과를 가지고 있다는 결과를 얻을 수 있었다.

3.3.3 위상속도공간에서의 분석

위상속도공간에서 중력파의 양을 살펴보기 위하여 연직바람속도 분산을 Figure 7에 구했다.

Figure 7의 연직바람속도 분산을 보았을 때, dry50과 dry75에서는 양의 동서방향 위상속도 구역의 0m/s에서 동쪽 20m/s까지를 지름으로 갖는 원의 구역에서 비규칙적인 큰 값들을 보이고, 음의 동서방향 위상속도 구역에서도 적지 않은 값을 보인다. dry50 실험에서 약 16.5m/s의 양의 경압파동 위상속도를 값을 보였고, 해당 원의 형태가 경압파동과 연관되어 생성되는 중력파로 해석가능했다. 그러나, 음의 동서 방향 위상속도에서는 경압파동과 별개로 뚜렷한 음의 동서방향을 가지는 형태가 두드러졌다. Figure 3에서 음의 위상속도를 보이는 것을 확인한 2차 저기압의 영향을 의심했으나, Figure 10을 살펴볼 때, 분석하는 영역이 2차 저기압의 영향을 받는다고 보기 힘들었으며, 비슷한 초기조건을 사용한 Kim et al. (2016)의 Fig 4.를 보았을 때도 해당 공간에 2차 저기압에서 생성되는 중력파가 영향을 주기는 힘들어보였다. 따라서, dry50에서 경압파동의 속도기준으로도, 지상 기준으로도 큰 음의 동서방향 위상속도값을 갖는 중력파가 형성되고 있다는 것을 알 수 있었다.

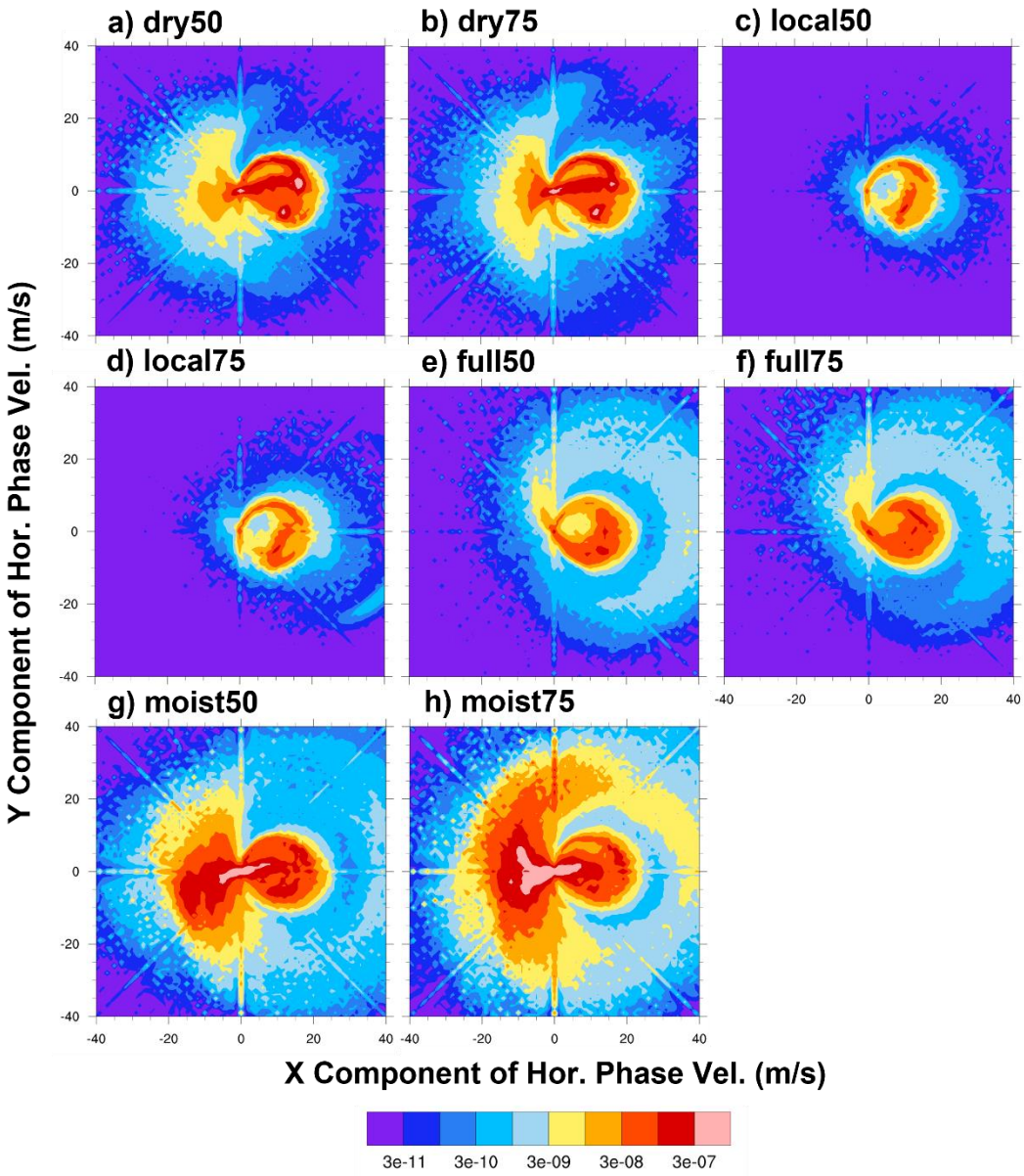

Figure 7. (C_{HP_x}, C_{HP_y}) space distribution of $\overline{w'w'}$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 12km altitude in all experiments, which use 48h data centered each time

moist50과 moist75의 실험에서는 dry50과 dry75에서 볼 수 있었던 원 형태의 강한 값과 함께 강도는 약하지만, 위상속도 공간에서 더 넓은 원을 갖는 중력파를 살펴볼 수 있었다. 이는 수증기 대류에 의해 생성되는 중력파로 보였으며, full 실험에도 공통적으로 나타났다. 또, mosit50과 moist75에서도 음의 동서방향 위상속도를 갖는 중력파가 경압파동 위상속도를 중심으로 한 원 형태와 뚜렷하게 구분되어 나타났다.

local과 full 실험에서는 수증기 대류에 의한 차이에 비해서도 인상적인 결과를 확인할 수 있었는데, 수증기 대류에 관한 모수화가 포함되어있는지 여부와 상관없이 local과 full 실험 모두에서 경압파동 위상속도를 중심으로한 원형태의 중력파만 강하게 나타났다.

즉, 국지혼합 모수화를 적용하지 않은 실험에서는 음의 동서방향 위상속도를 갖는 중력파가 강하게 등장하였고, 국지혼합 모수화를 적용한 실험에서는 이러한 중력파가 등장하지 않았다. 해당 차이가 국지혼합이 중력파에 미치는 핵심적인 영향이라고 생각했고, 이를 집중하여 다음 3.4절에서 분석하였다. 수증기의 대류과정이 모수화되는 mosit와 full에서도 이러한 차이가 비슷하게 나타났으나, dry와 local실험에 집중하여 해당 차이를 분석하였다.

3.4 음의 동서방향 위상속도 중력파

3.4.1 연직해상도에 따른 중력파 양상

먼저, 음의 동서방향 위상속도 중력파가 모델의 잘못된 설정에서 인위적으로 발생하는 비물리적인 파장인지에 대하여 살펴보았다. Iga et al. (2007)에서는 수평해상도에 비해 낮은 연직해상도를 가질 때, 비물리적인 연직 파동이 발생하는 것을 보인바 있으며, 앞서 2.1절에서 설명한 연직 94층의 추가실험 세 가지를 진행하였다.

먼저, dry_d300, local_d300의 결과를 dry50과 local50에서 비교하였다. Figure 8에서는 Figure 6와 같이 12㎞ 상공의 연직속도를 3절에서 결정한 분석시간과 분석공간에서 나타내었다. dry50과 dry_d300, local50과 local_d300에서는 그 강도나 세부적인 형태에서는 차이가 있었으나, 전체적인 개형이나 경압파동의 양상은 차이를 보이지 않았다.

Figure 9에서는 Figure 7과 같이 위상속도공간에서 연직바람속도를 나타냈다. 역시 강도의 차이는 살펴볼 수 있었으나, 큰 개형의 차이를 보이지도 않았으며, 특히 dry_d300에서는 dry50과 같이 음의 동서방향 위상속도 중력파를 살펴볼 수 있었다.

해당 음의 동서방향 위상속도 중력파가 dry_d300과 dry50에서 연직적으로도

같은 모습을 가지고 있는지 확인하기 위하여 파동의 연직적인 특성을 Figure 10에서 살펴보았다. 다음과 같은 관성중력파 분산관계식을 통하여 연직 파장에 따른 연직 속도 분산을 살펴보았다.

$$m^2 = k^2\left(\frac{N^2 - \widehat{\omega}^2}{\widehat{\omega}^2 - f^2}\right) \tag{15}$$

먼저, 음의 동서방향 위상속도를 가지는 중력파들을 분석하였을 때도, dry50과 dry_d300의 큰 차이를 볼 수 없었다.

또, dry_d300과 local_d300에서 음의 동서방향 위상속도 중력파와 양의 위상속도 중력파를 동시에 살펴보았다. dry_d300의 음의 동서방향 위상속도 중력파는 양의 동서방향 위상속도 중력파에 비해 더 짧은 파장분포를 보였으나, 그 전체적인 양으로 보았을 때, 모델에서 묘사하지 못할 비물리적인 짧은 파장의 중력파가 아니라는 것을 확인할 수 있었다. local_d300의 경우 양의 동서방향 위상속도 중력파는 dry_d300에 비해 작은 강도를 보였으나 그 개형이 비슷했고, 음의 동서방향 위상속도 중력파는 그 값이 너무 작아 쉽게 분석하기 어려웠다.

결론적으로, dry50과 dry_d300에서 나타나는 음의 동서방향 위상속도 중력파는 비물리적인 중력파라고 볼 수 없었고, dry_d300과 local_d300의 비교를 통하여 어떤 중력파이고, 어떤 이유로 두 실험에서 차이를 보이는지 분석하였다.

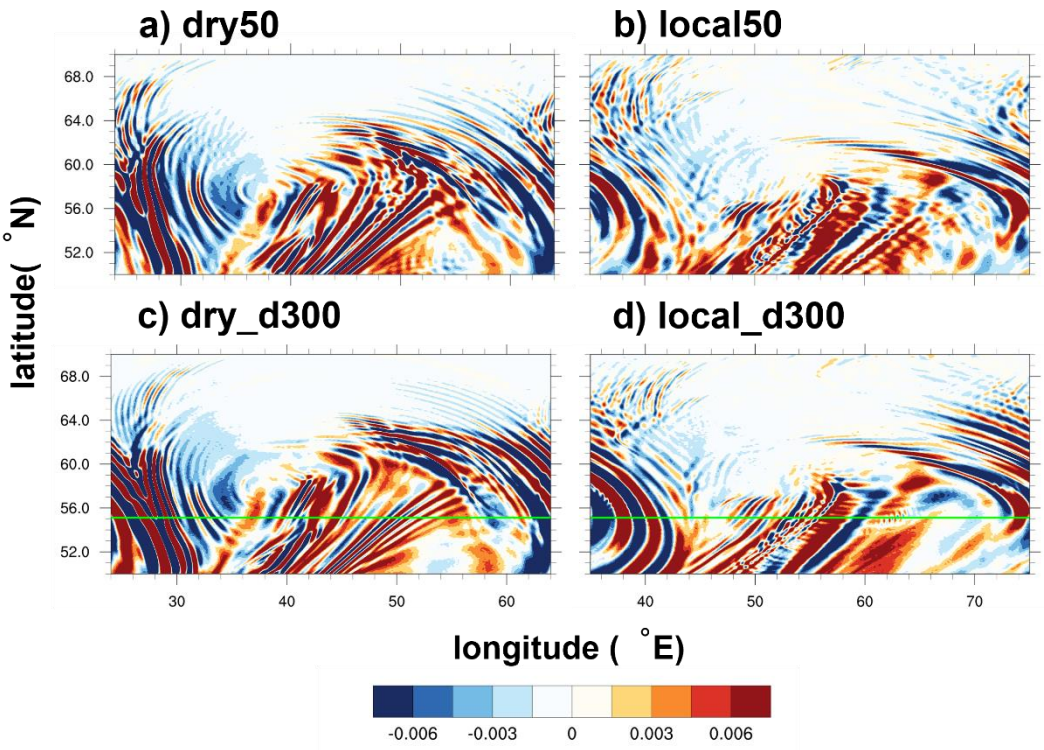

Figure 8. Same as **Figure 5,** but in a) dry50, b) local50, c) dry_d300, d) local_d300, green line in c), d) indicate the axes along which the vertical cross sections are shown in **Figure 13.**

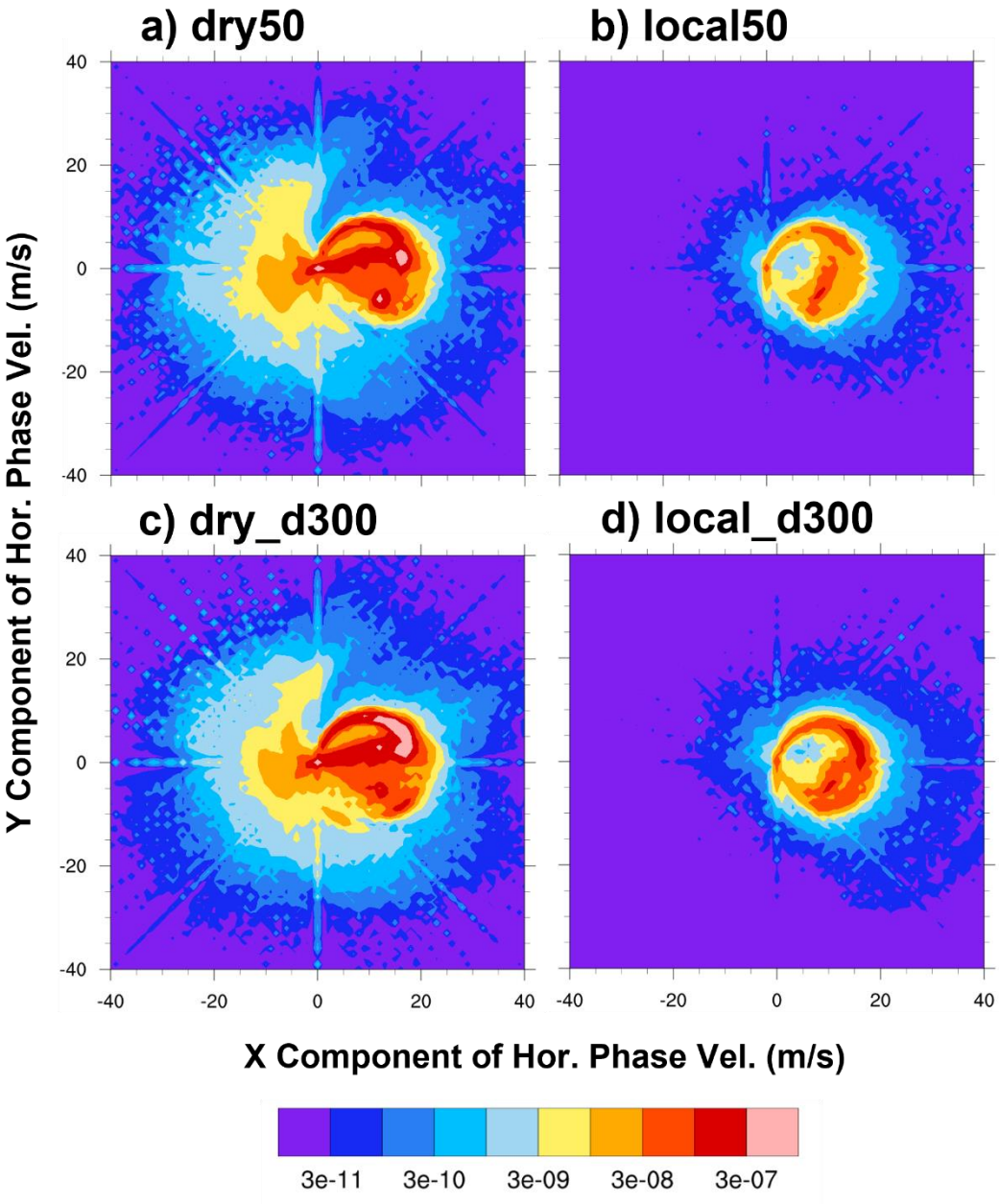

Figure 9 Same as **Figure 7,** but in a) dry50, b) local50, c) dry_d300, d) local_d300

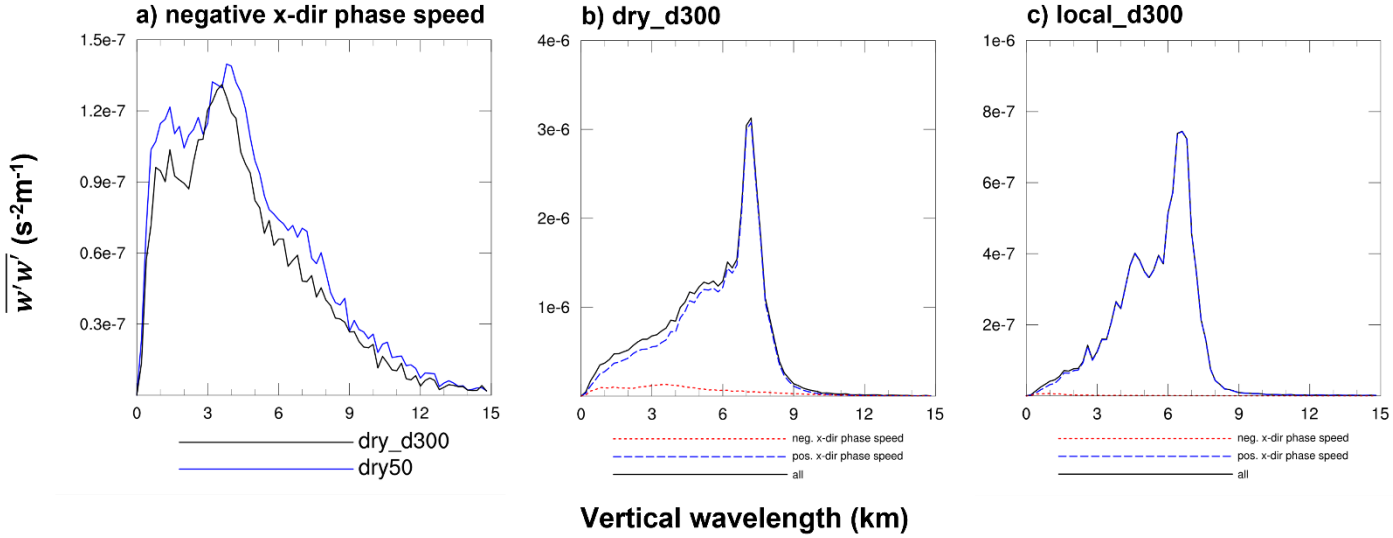

Figure 10. Vertical wavelength distribution of $\overline{w'w'}$ at 12km altitude in a) dry_d300 and dry50 for negative x-direction phase speed gravity waves, b) dry_d300, c) local_d300 which use 48h data centered each time

3.4.2 음의 동서방향 위상속도 중력파의 생성과 발달

국지 혼합 모수화를 적용하지 않았을 때 dry_d300에서 나타나는 음의 동서방향 위상속도 중력파가 어떤 연직 위치에서 어느 시간대에 발생하는지 분석하기 위하여 위상속도 공간에서 연직바람속도 분산을 다양하게 살펴봤다. Figure 11에서는 다양한 고도에서 연직바람속도 분산을 나타냈다. local_d300에서는 모든 고도에서 음의 동서방향 위상속도 중력파가 거의 나타나지 않았다. dry_d300에서는 양의 동서방향 위상속도 중력파는 고도에 따라 강도는 차이가 났지만 그 개형이 변화하지는 않았는데, 음의 동서방향 위상속도 중력파가 강도도 강해지며 위상속도 절대값도 커지는 것을 볼 수 있었다. 즉, 고도가 높아지며 음의 위상속도가 빨라지는 형태임을 짐작할 수 있었다.

음의 동서방향 위상속도 중력파가 어느 시간대에 어떤 특징을 갖는지 확인하기 위하여 12시간마다의 연직 바람속도 분산을 Figure 12에 나타냈다. 중력파 분석을 하기에 12시간이 충분한 시간이라고 확신하기에는 짧았기 때문에 강한 확신을 하지는 못했으나, dry_d300에서 음의 동서방향 위상속도 중력파가 분석시간 5.5일에서 6일 사이에 발달을 시작하여 시간이 지날수록 크게 발달한다는 것을 볼 수 있었다.

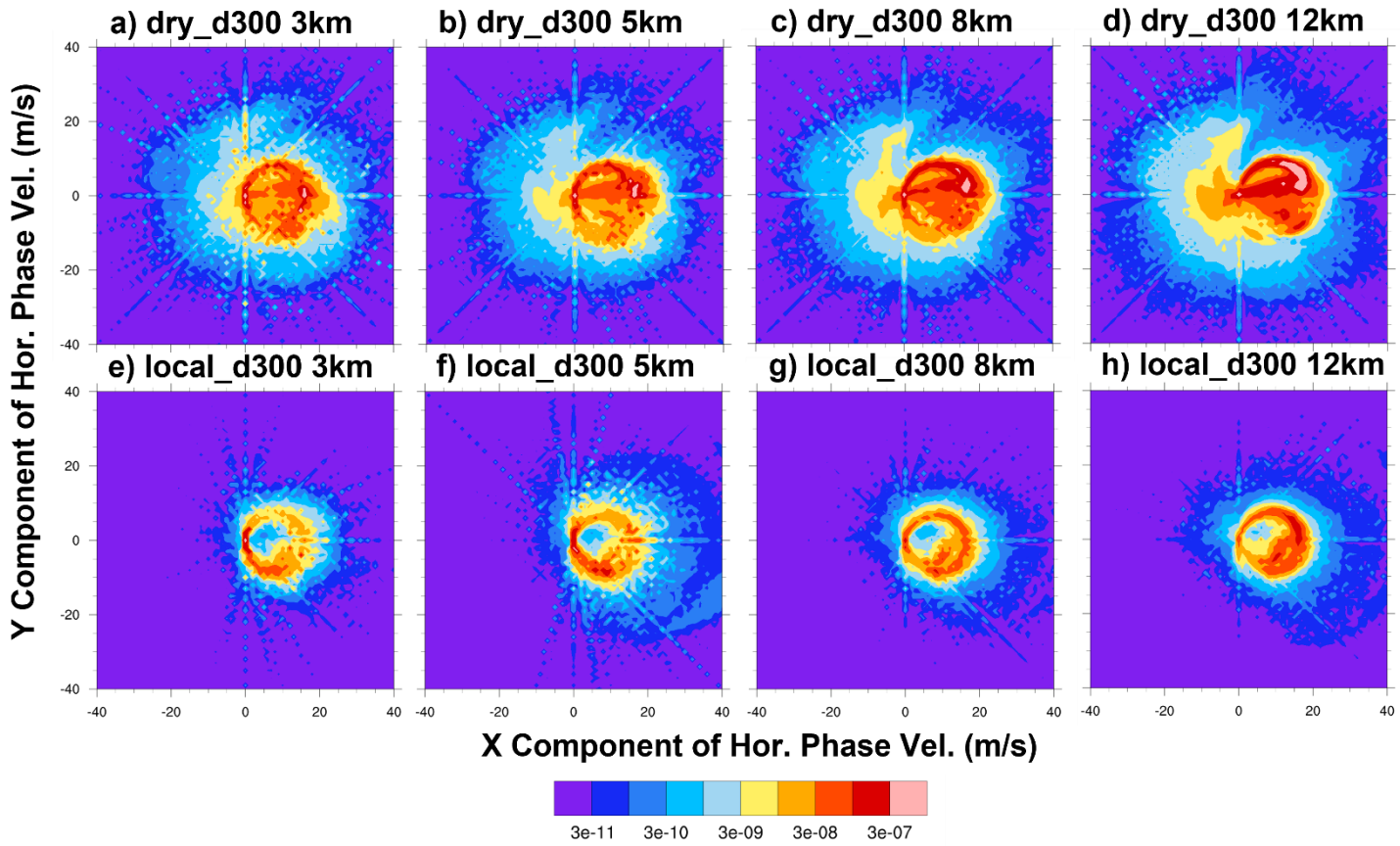

Figure 11. (C_{HP_x}, C_{HP_y}) space distribution of $\overline{w'w'}$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 3km to 12km altitude in dry_d300 and local_d300, which use 48h data centered each time

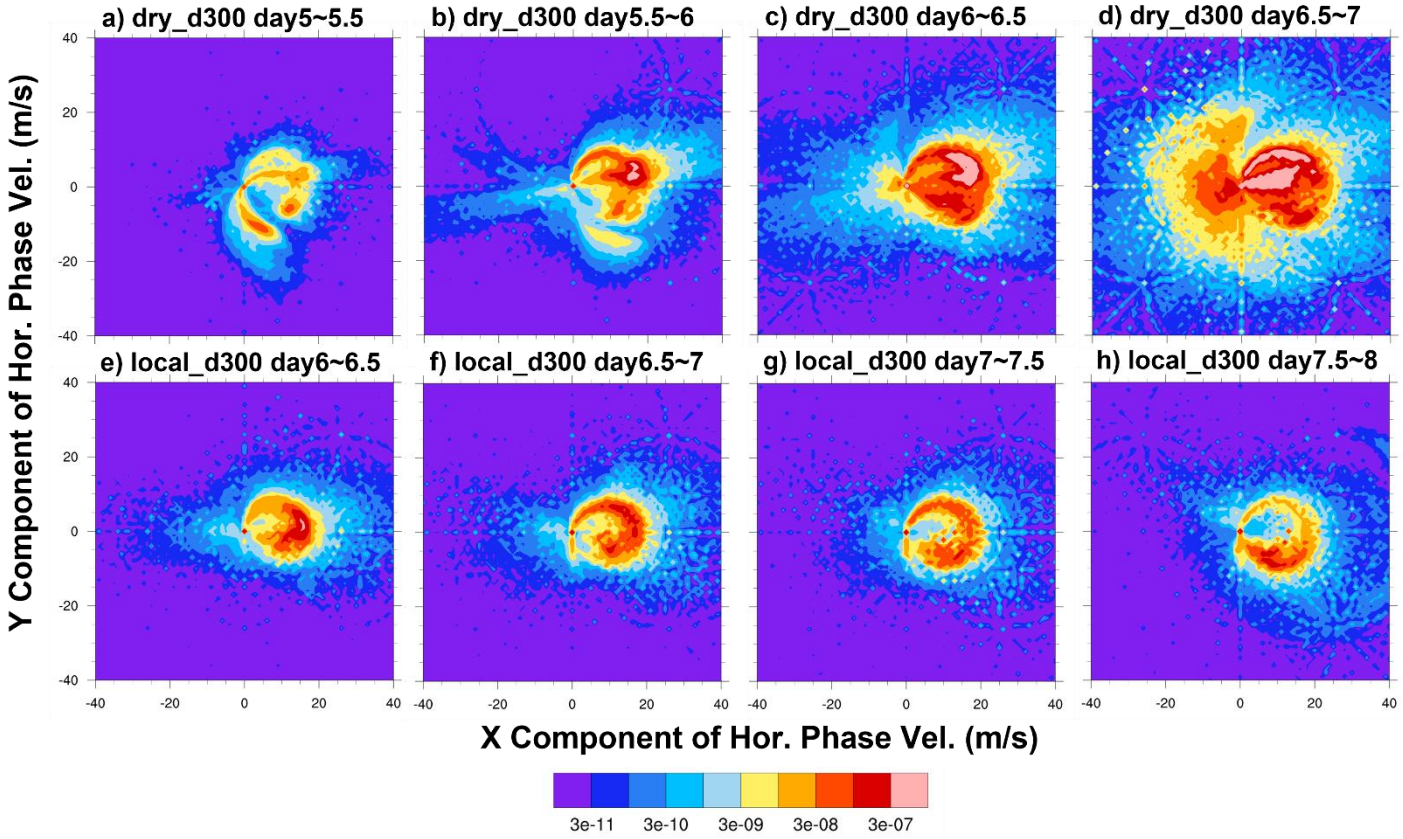

Figure 12. (C_{HP_x}, C_{HP_y}) space distribution of $\overline{w'w'}$ (color fill: $m^{-1}s^{-2}$) at 12km altitude in dry_d300 and local_d300, which use 12h data for each time

음의 동서방향 위상속도 중력파가 어느 시간대에 어떤 특징을 갖는지 확인하기 위하여 12시간마다의 연직 바람속도 분산을 Figure 12에 나타냈다. 중력파 분석을 하기에 12시간이 충분한 시간이라고 확신하기에는 짧았기 때문에 강한 확신을 하지는 못했으나, dry_d300에서 음의 동서방향 위상속도 중력파가 분석시간 5.5일에서 6일 사이에 발달을 시작하여 시간이 지날수록 크게 발달한다는 것을 볼 수 있었다.

위의 분석들을 토대로, Figure 8의 녹색 선을 따라 연직바람속도를 살펴았다. Figure 13에서는 dry_d300의 값을 적분시간 5.5일부터 6.75일까지 나타냈다. 5.75일에서 경도 35도, 6일에서 경도 45도의 하부에 위치하는 한랭전선에서 중력파가 발달하기 시작하는 것을 살펴볼 수 있었는데, 시간이 지나면서 강한 음의 동서방향 위상속도를 가지는 모습을 볼 수 있었다. 특히, 높은 고도로 갈수록 더 빠른 음의 동서방향 위상속도를 가졌다. 이는 위상속도공간에서 먼저 확인하였던 음의 동서방향 위상속도 중력파의 특징들을 모두 띄고 있다. 즉, 한랭전선에서 발생하는 중력파가 연직혼합을 사용하지 않은 실험들에서 보이는 음의 동서방향 위상속도 중력파로 나타났다고 결론 내렸다.

Figure 14에는 local_d300의 연직바람속도를 나타냈다. dry_d300처럼 6일 경도 75도, 6.5일의 경도 45도, 7일의 경도 55도의 하부에 한랭전선이 위치했고, 중력파가 발생하는 것은 확인할 수 있었다. 그러나 경압파동과 같이 움직이며 dry_d300과는 완전히 다른 움직임을 보였고, 지상을 기준으로

음의 위상속도를 가지지 않는 모습을 보였다.

연직혼합을 사용한 실험과 그렇지 않은 실험에서 한랭전선이 생성하는 중력파가 확연하게 달랐다. 연직혼합을 사용한 실험에서는 한랭전선에서 발생하는 중력파도 경압파동의 위상속도와 비슷한 위상속도를 가지고 진행하였는데, 연직혼합을 사용하지 않은 실험에서 뚜렷하게 음의 위상속도를 가지는 중력파가 나타났다. 이러한 차이가 연직혼합에 따라 전파환경이 차이가 나서 발생하였는지, 중력파를 생성하는 한랭전선이 달라졌는지에 대해 알아보기 위하여 5일까지 연직혼합을 사용하지 않고 수행한 실험에서 5일 이후에 연직혼합 모수화를 추가한 실험을 진행하였다.

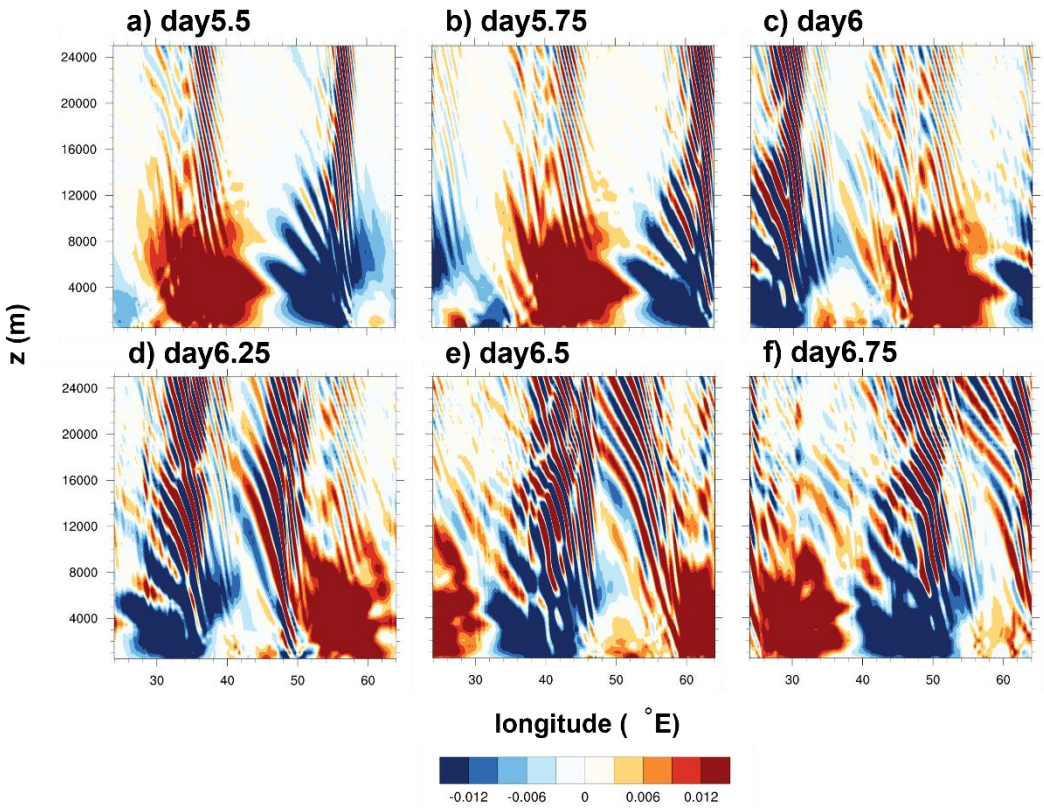

Figure 13. Vertical velocity (color fill: m/s) at 55.1 °N in dry_d300 from day5.5 to day6.75

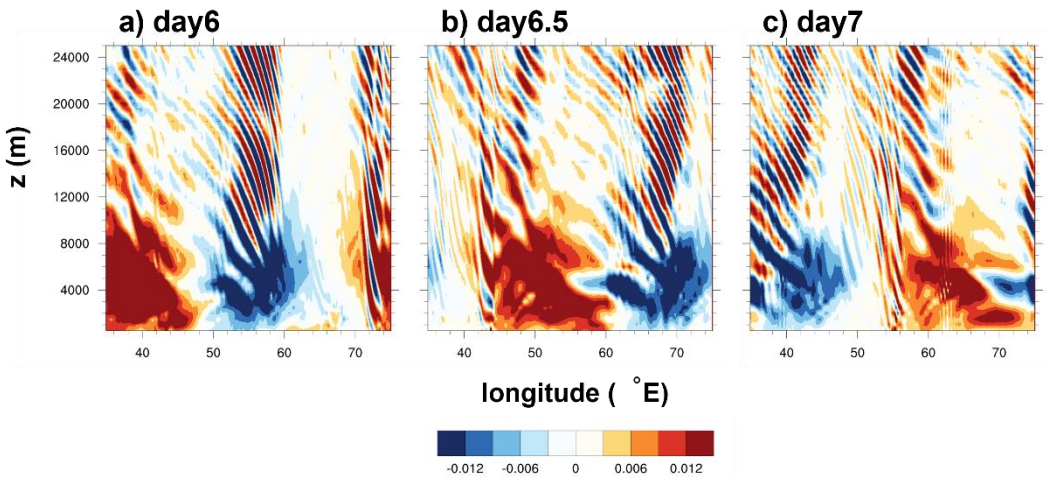

Figure 14 Same as **Figure 13**, but in local_d300 from day6 to day7

3.4.3 음의 동서방향 위상속도 중력파의 연직전파

Figure 15에 5일 이후 국지혼합을 사용한 실험에 대한 개략적인 결과를 나타냈다. 우선, 전체적으로 음의 동서방향 위상속도 를 가지는 중력파가 국지혼합 모수화를 사용한 환경에서도 연직으로 전파하는 것을 확인할 수 있었다.

Figure 15 a)에서 직접적으로 확인할 수 있었고, Figure 15 c)에서도 한랭전선에서 음의 동서방향 위상속도를 가지는 중력파가 형성되는 것을 볼 수 있다. Figure 15. b)에서 보이는 연직 파장에 따른 연직바람속도 분산은 불연속적인 분포를 보였지만, 짧은 파장 중심으로 분포되어있던 dry_d300의 분포와 비슷한 점을 보였다.

불연속적인 모수화를 사용했기 때문에 물리적인 해석을 하기에 조심스러운 실험이었지만, 국지혼합 모수화를 사용하더라도 음의 동서방향 위상속도 중력파가 발생했다는 것을 이야기하기에는 충분한 결과였다. 따라서, 한랭전선에서 발생하는 중력파가 전파환경에 따라 음의 동서방향 위상속도를 가지는지가 결정된다고 할 수 없었다. 즉, 연직혼합에 따라 전파환경이 차이가 나는 것이 아니라 중력파를 생성하는 한랭전선이 차이가 생겨서 음의 동서방향 위상속도를 가지는 중력파가 발생했다고 결론내릴 수 있었다.

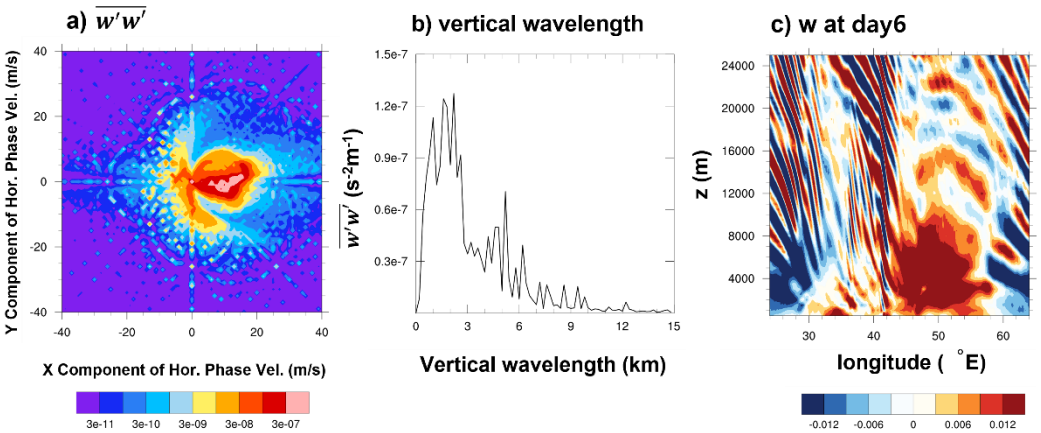

Figure 15. a) Same as **Figure 7**, b) same as **Figure 10**, c) same as **Figure 13,** but in simulation which local mixing after day5

3.5 국지혼합과 중력파의 연직운동량속

국지혼합 모수화에 따라 중력파가 다른 형태로 발생한다는 것을 앞선 3.4절까지 분석하였다. 그러나 형태뿐만 아니라 강도 또한 차이를 보였고, 이 차이가 의미를 더 가질 수 있는 운동량속을 Figure 16으로 나타냈다.

그 결과, 양의 운동량속은 그 형태가 달랐으나 값은 크게 차이나지 않았고, 음의 운동량속은 두 배보다 큰 차이를 보였다. 즉, 국지혼합 모수화에 의해 중층 대기에 도달하는 운동속이 정량적으로 크게 변한다는 것을 의미한다.

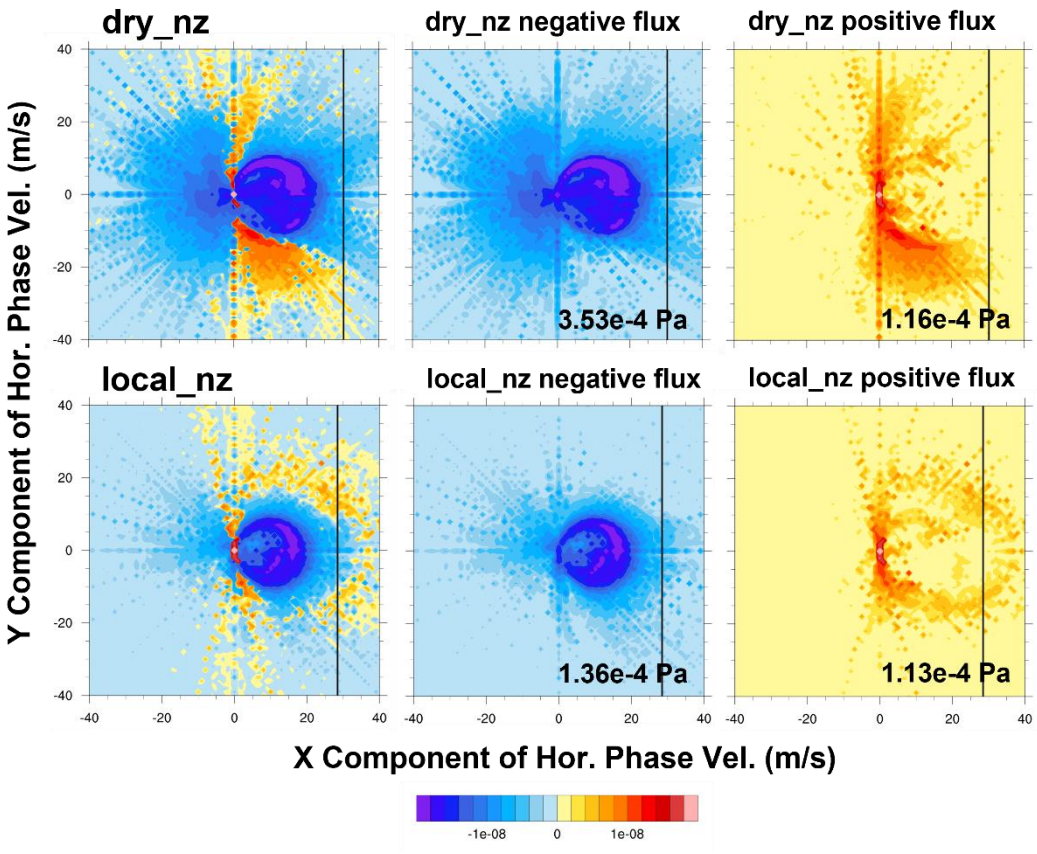

Figure 16. Same as **Figure 7**, but distribution of $\rho\overline{u'w'}$ (color fill: Pa(ms^{-1})$^{-2}$) in dry_d300, local_d300, dry_d300 negative flux, dry_d300 positive flux, local_d300 negative flux, local_d300 positive flux

제4장. 요약 및 결론

본 연구에서는 수증기를 포함하여 균형을 맞추는 정상상태 경압파동 이상실험을 미세 물리 모수화 과정과 적운 모수화 과정, 국지 혼합 모수화를 포함하여 수행하였다. 균형이 맞춰진 정상상태의 이상실험은 그렇지 않은 실험과 달리 균형이 맞춰지지 않은 섭동으로 인하여 생기는 비물리적인 신호가 결과를 오염하는 문제가 발생하지 않는다. 따라서, 정상상태로 균형이 맞춰져 있는 본 연구의 초기조건은 본 연구의 실험결과가 그렇지 않은 실험 결과에 비해 더 신뢰성 있는 결과를 제시할 수 있게 해준다.

실험 결과, 국지혼합이 경압파동에서 발생하는 중력파에 어떠한 영향을 줄 수 있는지 분석할 수 있었다. 국지혼합 모수화를 적용하지 않은 실험에서는 한랭전선에서 음의 동서방향 위상속도를 가지는 중력파를 생성하였고, 국지혼합 모수화를 적용한 실험에서는 한랭전선에서 경압파동의 속도와 비슷하여 경압파동과 같이 움직이는 중력파를 생성하였다. 이러한 차이는 수증기의 대류활동을 모수화하는 실험에서도 확인할 수 있었다.

이러한 국지혼합은 비국지혼합과 다르게 모델의 모든 연직층에서 작용한다. 따라서, 행성경계층보다 높은 고도에서 생성되는 전선과 전선에서 생성되는 중력파에도 영향을 미친다. 중력파를 형성하는 전선은 지상뿐만 아니라

다양한 고도에서 존재하기 때문에 국지혼합이 미치는 영향을 따로 연구한 본 연구가 더 큰 의미를 갖는다.

또, 국지혼합에 따라 두배보다 큰 음의 연직 운동량속 차이를 보였다. 이를 통하여, 국지혼합이 높은 고도에 도달하는 운동량속에 큰 영향을 미치고 있고, 높은 고도의 모델 성능에 국지혼합의 정확한 모수화도 중요한 요소라고 제시할 수 있다.

결론적으로, 본연구에서 국지혼합은 전구 경압파동 이상실험에서 중력파의 생성과 강도에 결정적인 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이는 국지혼합이 포함된 행성경계층 모수화를 사용하고 있는 다양한 수치모델에서 국지혼합이 중력파에 큰 영향을 미치고 있다는 것을 시사해주며, 국지혼합에 대한 중요성을 재고하고, 본연구를 포함한 다양한 연구가 이루어져야한다.

참고 문헌

Hong, Song You, Yign Noh, and Jimy Dudhia. 2006a. "A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes." *Monthly Weather Review* 134 (9): 2318–41. https://doi.org/10.1175/MWR3199.1.

———. 2006b. "A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes." *Monthly Weather Review* 134 (9): 2318–41. https://doi.org/10.1175/MWR3199.1.

Jablonowski, Christiane, and David L. Williamson. 2006. "A Baroclinic Instability Test Case for Atmospheric Model Dynamical Cores." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 132 (621 C): 2943–75. https://doi.org/10.1256/qj.06.12.

Iga, S. I., Tomita, H., Satoh, M., & Goto, K. (2007). Mountain-wave-like spurious waves associated with simulated cold fronts due to inconsistencies between horizontal and vertical resolutions. *Monthly Weather Review*, *135*(7), 2629–2641. https://doi.org/10.1175/MWR3423.1

Kim, Young Ha, Hye Yeong Chun, Sang Hun Park, In Sun Song, and Hyun Joo Choi. 2016. "Characteristics of Gravity Waves Generated in the Jet-Front System in a Baroclinic Instability Simulation." *Atmospheric Chemistry and Physics* 16 (8):

4799–4815. https://doi.org/10.5194/acp-16-4799-2016.

Menchaca, Maximo Q., and Dale R. Durran. 2019. "The Influence of Gravity Waves on the Slope of the Kinetic Energy Spectrum in Simulations of Idealized Midlatitude Cyclones." *Journal of the Atmospheric Sciences* 76 (7): 2103–22. https://doi.org/10.1175/JAS-D-18-0329.1.

Park, Sang Hun, Joseph B. Klemp, and William C. Skamarock. 2014. "A Comparison of Mesh Refinement in the Global MPAS-A and WRF Models Using an Idealized Normal-Mode Baroclinic Wave Simulation." *Monthly Weather Review* 142 (10): 3614–34. https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00004.1.

Park, Sang Hun, William C. Skamarock, Joseph B. Klemp, Laura D. Fowler, and Michael G. Duda. 2013. "Evaluation of Global Atmospheric Solvers Using Extensions of the Jablonowski and Williamson Baroclinic Wave Test Case." *Monthly Weather Review* 141 (9): 3116–29. https://doi.org/10.1175/MWR-D-12-00096.1.

Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang, and J. G. Powers, 2005: A description of the advanced research WRF version2, NCAR Tech. Note TN-468 STR, 88 pp., Natl. Center for Atmos. Res., Boulder, Colo.

Troen, I. B., and L. Mahrt. 1986. "A Simple Model of the Atmospheric Boundary Layer;

Sensitivity to Surface Evaporation." *Boundary-Layer Meteorology* 37 (1–2): 129–48. https://doi.org/10.1007/BF00122760.

Vaisey, G. 1947. "Vertical Transport of Heat by Turbulence in the Atmosphere." *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 189 (1019): 543–61. https://doi.org/10.1098/rspa.1947.0057.

Wei, Junhong, and Fuqing Zhang. 2014. "Mesoscale Gravity Waves in Moist Baroclinic Jet-Front Systems." *Journal of the Atmospheric Sciences* 71 (3): 929–52. https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0171.1.

Wei, Junhong, Fuqing Zhang, and Jadwiga H. Richter. 2016. "An Analysis of Gravity Wave Spectral Characteristics in Moist Baroclinic Jet-Front Systems." *Journal of the Atmospheric Sciences* 73 (8): 3133–55. https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0316.1.

ABSTRACT

Effect of vertical mixing on gravity wave generation and development in idealized normal-mode baroclinic wave simulation

Inpyo Park

Dept. of Earth System Sciences-Astronomy-Atmospheric Sciences

The Graduate School

Yonsei University

The planetary boundary layer parameterization parameterizes the mixing between the model vertical layers, and includes non-local mixing due to turbulence under the planetary boundary layer and local mixing due to dynamic mixing. This study investigates local mixing, which had not received much attention than nonlocal mixing with the idealized baroclinic wave simulation.

The idealized baroclinic wave experiment is an experiment to reproduce the baroclinic waves, which are one of the important

characteristics of the global atmosphere. Kim et al. (2016) and Wei et al. (2016) investigated gravitational waves generated from baroclinic waves in idealized baroclinic wave simulation, and Menchaca and Durran (2019) suggested that gravitational waves vary according to planetary boundary layer parameterization.

In present study, the effect of vertical mixing on the generation and development of gravitational waves in idealized baroclinic wave simulation. As a method, the idealized global baroclinic wave simulation with balanced steady state is performed in global Weather Research and Forecasting Model version 3.9.1.1.

Local mixing had a considerable effect on the strength of the overall gravitational waves and the structure of the gravitational wave generation from the cold front. In this study, it was confirmed that the effect of local mixing on gravitational waves is an important influence that cannot be ignored, and it is suggested that local mixing should be considered more important in the idealized baroclinic wave experiment and other types of experiments.

Keyword : Baroclinic wave simulation, Vertical mixing, Local mixing, Jet-front gravity waves