TSPE16090-029-5

극지 중간권 상부의 대기 중력파 원천과 전파 메커니즘 규명

KOPRI
극지연구소

연세대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 4-D 대기 관측망 구축 및 고층대기와 기후변화의 상호관계 규명 (부제: 극지 고층대기와 우주환경 변화 연구)” 과제의 위탁연구 “극지 중간권 상부의 대기 중력파 원천과 전파 메커니즘 규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

KOPRI
극지연구소

2017. 01. 25

(본과제) 총괄연구책임자 : 지 건 화

위탁연구기관명 : 연세대학교 산학협력단

위탁연구책임자 : 전 혜 영

위탁참여연구원 : 송 병 권

“ : 유 지 희

보고서 초록

위탁연구과제명	극지 중간권 상부의 대기 중력파 원천과 전파 메커니즘 규명				
위탁연구책임자	전 혜 영	해당단계 참여연구원수	2 명	해당단계 연구비	50,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	연세대학교 산학협력단 지구천문대기학부 (대기과학)		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		

요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)	보고서 면수	62

- 2008년부터 2015년까지 세종기지에 설치된 전천 카메라를 통해 관측된 OH, OI 대기광 이미지를 통하여 추정한 중간권 상부의 중력파는 수평 파장이 10－50 km이고, 주기가 5－45 분이며, 10－90 m s^{-1}에 해당하는 넓은 위상속도 스펙트럼을 가졌다.

- 관측된 중간권 중력파의 파동 특성값을 3차원 레이 추적 모형인 GROGRAT에 대입하여 backward integration을 수행하였다. 레이 추적이 종료된 고도를 기준으로 하여 대류권 (< 15 km)과 성층권 (15－60 km), 중간권 (> 60 km) 종료 사례로 구분지었을 때, 각각 30%, 12.5%, 57.5%의 레이가 대류권, 성층권, 중간권에서 종료되었다.

- 대류권 종료 사례와 성층권 종료사례는 대부분 동쪽 전파하는 경향을 보였다. 총 24개의 대류권 종료 사례에서 10개 사례는 대류와 전선 시스템과 연관되어있었으며, 총 10개의 성층권 종료사례 중에서 4개 사례는 성층권의 강한 제트류가 가능한 원천을 분석되었다. 중간권 종료사례의 대부분은 음의 m^2 조건으로 인하여 레이 추적이 종료되었는데, 이는 중간권에서 파동이 깨지고 발생하는 2차 중력파와 같은 중간권 in-situ 원천을 고려해야함을 시사한다.

- 고해상도 ECMWF 분석장과 S3D 방법을 이용하여 2009년 1월 성층권 돌연승온 발생 전·후 성층권 중력파 변동성을 분석하였다. 성층권의 온도 섭동과 중력파 운동량속은 극와동의 가장자리에서 강하게 나타남을 확인하였다.

- GROGRAT을 통하여 성층권 돌연승온 발생 전·후의 25 km 고도의 파동 원천을 분석하였다. 그 결과 시기 마다 주요 원천에 차이가 존재하지만, 중국 대륙의 산맥과 로키 산맥이 주요한 산악 원천이었으며, 대류권의 대류와 전선 시스템, 그리고 대류권 제트류 또한 주요한 파동 원천이 될 수 있음을 확인하였다.

색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	대기 중력파, 중간권 상부, 파동 원천, 세종기지, 전천 카메라, 성층권 돌연승온
	영 어	atmospheric gravity waves, upper mesosphere, wave sources, King Sejong Station (KSS), all-sky camera, stratospheric sudden warming (SSW)

요 약 문

Ⅰ. 제 목

극지 중간권 상부의 대기 중력파 원천과 전파 메커니즘 규명

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구의 목표는 남극 세종기지 중간권 상부에서 전천 카메라를 통해 관측된 중력파의 원천을 파악하고 전파 과정을 이해하는 것이다. 또다른 목표는 성층권 돌연승온 발생 전·후 성층권 중력파의 특성을 파악하고 파동 원천을 분석하는 것이다. 중층대기 대기 순환의 주요 역학 강제력은 중력파 항력으로, 극 지역 기후변화 메커니즘 이해를 위해서는 중력파 변동성 파악이 필수적이며, 이를 위해서 파동 원천 및 전파 과정 이해를 통한 하층대기-중간대기의 연계성을 파악하는 것이 중요하다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

A. 세종기지 전천카메라에서 관측한 중력파 특성 분석
B. 3차원 레이 추적 모형을 이용한 중간권 중력파 원천 파악
C. 고해상도 분석자료를 이용한 파동 특성값 및 중력파 운동량속 계산
D. 성층권 돌연승온 발생 전·후 성층권 중력파 원천 파악

Ⅳ. 연구개발결과

세종기지 유성레이다에서 관측된 중간권 중력파의 특성을 분석한 논문이 현재 SCI 저널인 *Journal of Geophysical Research*에 제출되어 리뷰 중에 있으며, 성층권 돌연승온에 미치는 파동 강제력을 분석한 논문이 현재 *Atmospheric Chemistry and*

*Physics*에 제출되어 리뷰 중에 있다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 결과는 제트/전선 중력파 모수화 개발의 기반이 될 것이며, 이를 통해 보다 현실적인 기후모델 개발에 기여할 것이다. 또한 성층권 돌연승온에 기여하는 중력파의 효과에 대한 연구에 응용될 것이다.

KOPRI
극지연구소

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Sources and propagations of atmospheric gravity waves in the polar upper mesosphere

II. Purpose and Necessity of R&D

KOPRI 극지연구소

The purpose of this study is to identify sources of the gravity waves in the upper mesosphere observed by the all-sky camera in the King Sejong Station (KSS) and to understand propagation process of the gravity waves. Another purpose is to investigate characteristics of gravity waves in the stratospehre and to identify sources of the gravity waves during the evolution of stratospheric sudden warming. Gravity wave drag is main dynamic forcing that induces the large-circulation in the mesosphere. In order to understand the mechanisms of climate change in the polar regions, identifying the variabilities in the gravity waves are required. Furthermore, It is important to understand the dynamic connection between the lower and middle atmosphere through understanding in gravity wave sources and propagation process.

III. Contents and Extent of R&D

A. Characteristics of the gravity waves observed by an all-sky camera at KSS

B. Investigating sources of the observed gravity waves using a 3-dimensional ray tracing model

C. Calculation of wave characteristics and gravity wave momentum flux using a high resolution analysis

D. Investigating sources of the gravity waves in the stratosphere during the evolution of stratospheric sudden warming

Ⅳ. R&D Results

Paper about characteristic of gravity waves observed by meteor radar at KSS under review in *Journal of Geophysical Research*, and paper about contributions of wave forcing on stratospheric sudden warming under review in *Atmospheric Chemistry and Physics*.

Ⅴ. Application Plans of R&D Results

The results of this study will be the basis of the jet/front gravity waves parameterization, and it will contribute to develop a more realistic climate model. These findings will also be applied to research on the effects of gravity waves during the evolution of statospheric sudden warming.

KOPRI 극지연구소

목 차

제 1 장 서론 ····· 11

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 12

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 13

제 1 절 세종기지 전천 카메라를 이용한 중간권 상부 중력파 관측 및 파동 원천 파악 ·· 13

1. 전천 카메라를 이용한 중간권 상부 중력파 관측 ····· 13

1.1 전천 카메라를 통한 대기광 관측 자료 ····· 13

1.2 관측된 세종기지 중간권 상부 중력파 특성 ····· 14

2. 관측된 중력파 특성값을 이용한 파동 원천 파악 ····· 15

2.1 3차원 레이 추적 모형 ····· 15

2.2 파동 원천과 관련된 지수 ····· 16

2.3 세종기지 중간권 상부 중력파 원천 분석 ····· 19

2.3.1 대류권 종료 사례 ····· 19

2.3.2 성층권 종료 사례 ····· 23

2.3.3 중간권 종료 사례 ····· 26

제 2 절 성층권 돌연승온 발생 전·후 중력파 변동성 파악 및 파동 원천 이해 ····· 27

1. S3D 방법을 이용한 중력파 분석 ····· 27

1.1 S3D 방법 ····· 27

1.2 고해상도 ECMWF 분석 자료 ····· 28

1.3 온도 섭동을 통한 중력파 운동량속 계산 ····· 28

2. 2009년 1월 성층권 돌연승온 발생 전·후 중력파 변동성 파악 ····· 29

3. 레이 추적 모형을 이용한 성층권 돌연승온 발생 전·후 파동 원천 이해 ····· 32

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 42

제 5 장 연구개발결과의 활용계획 ····· 44

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ····· 45

KOPRI 극지연구소

제 7 장 참고문헌 ····· 46

부록 ····· 50

KOPRI
극지연구소

Table Caption

Table 1. Characteristics of the all-sky camera used in this study. ····· 14
Table 2. Total number of wave events observed by the OH (OI) all-sky airglow imager. ····· 14
Table 3. Characteristics of the GPCP daily precipitation data used in this study. ····· 16
Table 4. Characteristics of the ERA-Interim reanalysis data set used in this study. Here, u, v, ω, T, h are the zonal, meridional,, vertical velocity in isobaric coordinates, temperature, and geopotential height, respectively. ··· 18
Table 5. Characteristics of the high-resolution ECMWF analysis data set used in this study. Here, u, v, and T are the zonal, meridional velocity and temperature, respectively. ····· 28
Table 6. Location of maximum |GWMF| during the evolution of January 2009 SSW. ····· 32

KOPRI
극지연구소

Figure Caption

Figure 1. Histograms of the (a)horizontal wavelength, (b)period, and phase speed observed by OH (upper) and OI (lower) airglow at King Sejong Station (KSS). ····· 15
Figure 2. Ray back-trajectories of the cases for which the calculations are terminated in the troposphere. ····· 20
Figure 3. The same as in Fig. 2, except for GPCP daily precipitation (shading). The blue circle denotes a 3° radius from the ray termination position. ··· 21
Figure 4. The same as in Fig. 2, except for FF at 600 hPa (shading). The blue circle denotes a 3° radius from the ray termination position. ····· 22
Figure 5. Ray back-trajectories of the cases for which the calculations are terminated in the stratosphere. ····· 24
Figure 6. The same as in Fig. 5, except for RNBE (shading) and horizontal wind (red line) at 2 hPa. The blue circle denotes a 3° radius from the

ray termination position. ····· 25
Figure 7. Polar-stereo projection maps of (a) horizontal wind, (b) temperature, (c) temperature perturbation, and (d) |GWMF| at 25 km during January 2009 SSW case. ····· 31
Figure 8. (a) Polar-stereo projection map of |GWMF| (shading) and horizontal wind (black line) at 25 km for 00UTC 12 January 2009. (b)—(d) Ray back-trajectories of the waves on specific regions launched at 25 km. ··· 33
Figure 9. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 15 January 2009. ····· 34
Figure 10. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 18 January 2009. ····· 34
Figure 11. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 21 January 2009. ····· 35
Figure 12. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 24 January 2009. ····· 35
Figure 13. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 27 January 2009. ····· 36
Figure 14. Polar-stereo projection maps of (a) orography, (b) GPCP daily precipitation, (c) FF at 600 hPa, and (d) RNBE at 350 hPa (shading) and horizontal wind at 200 hPa (red contour) for 00UTC 12 January 2009. ··· 38
Figure 15. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 15 January 2009. ····· 39
Figure 16. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 18 January 2009. ····· 39
Figure 17. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 21 January 2009. ····· 40
Figure 18. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 24 January 2009. ····· 40
Figure 19. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 27 January 2009. ····· 41

극지연구소

제 1 장 서론

대기 중력파는 연직으로 전파하는 동안 파동의 소산과정을 통해서 하층의 운동량과 에너지를 상층으로 수송함으로써 대규모 순환과 온도 구조를 변화시킬 수 있다. 이러한 중력파 강제력은 밀도가 작아질수록 그 크기가 커지기 때문에 중간권 대규모 순환에 지배적인 역할을 한다.

현재 사용되고 있는 약 100 km의 수평 해상도를 갖는 기후 모형들은 대기 중력파를 명시적으로 분해할 수 없기 때문에 중력파를 모수화하여 사용한다. 현재의 기후 모형들에서 사용하는 중력파 모수화 방법은 산악 중력파와 비산악 원천에 의한 중력파로 나눈 뒤, 비산악 중력파의 경우 특정한 원천을 고려하지 않은 채 모든 격자에서 임의의 값을 처방하는 것이다. 이렇게 파동 원천을 구분하지 않은 중력파 모수화 방법은 현재 기후 모형들의 불확실성을 만드는 중요한 요인임이 최근 연구에서 제시된 바 있다 (Geller et al. 2013).

최근 인공위성 관측 자료나 고해상도 수치 모델링을 연구를 통하여 겨울철 성층권의 중력파 운동량속은 남극반도에서 최댓값이 존재한다는 사실이 밝혀졌다 (Jia et al. 2014; Preusse et al. 2014). 남극 반도 지역에서의 중력파 원천 및 전파 과정에 대한 이해도를 높일 수 있다면, 급격한 기후변화가 이루어지고 있는 극지역 대기를 보다 자세히 이해할 수 있을 것이다. 남극 세종 과학기지에서는 2008년부터 최근까지 전천 카메라를 통하여 대기광을 관측함으로써 중간권 상부의 중력파 활동을 분석해 오고 있다. 본 연구를 통하여 세종기지에서 관측된 중력파 특성을 분석하고, 3차원 레이 추적 모형을 통해 가능한 파동 원천에 대해 이해할 것이다.

한편, 단기간 동안 극지역 성층권의 급격한 온도 상승과 극와동 붕괴를 유발하는 성층권 돌연승온 현상이 일어나는 동안에 극지역 성층권의 중력파 변동성을 파악하고 이러한 중력파의 원천을 분석함으로써, 중력파를 통한 극지역 중층대기와 하층대기 사이의 연계 과정을 이해할 것이다. 이를 통해 얻는 결과들은 성층권 돌연승온에 미치는 중력파의 역할에 대한 이해도를 넓혀줄 것이다.

KOPRI 극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

전천 카메라를 통해 대기광을 관측함으로써 중간권 상부 중력파를 분석하는 연구는 다양한 관측 지점에서 활발하게 수행되고 있다 (Wrasse et al., 2006; Suzuki et al., 2007; Shiokawa et al., 2007). 한편 중간권 중력파의 원천을 파악하는 연구는 주로 전천 카메라 혹은 고해상도 GCM을 이용하여 추정해낸 파동 특성값을 레이 추적 모형에 대입하여 backward 적분을 수행함으로써 하층 대기의 가능한 원천을 파악하는 방식으로 수행되어져 왔다. 세종기지가 위치한 남극반도는 성층권의 중력파 운동량속이 지구상에서 가장 강한 지역으로, 이 지역에서의 중력파 원천을 파악하는 것은 필수적이다. 세종기지에 설치된 전천 카메라를 이용하여 관측한 중간권 상부 중력파의 원천을 파악하는 연구는 아직 제대로 수행된 바 없다.

한편 성층권 돌연승온 동안의 중력파 변동성에 관한 연구는 최근 LIDAR나 위성을 통한 중력파 활동 관측이 용이해짐에 따라 활발히 수행되고 있다. Duck et al. (1998)과 Duck et al. (2001)은 레일리 LIDAR를 이용하여 잠재에너지 밀도의 섭동을 통해 중력파 효과를 분석하였으며, 돌연승온이 발생하는 동안에 극와동의 가장자리에서는 중력파 활동이 강화됨을 확인하였다. Wang and Alexander (2009)은 위성 관측 자료인 CHAMP/GPS 자료를 이용하여 동서평균 온도의 섭동으로부터 중력파를 검출해내는 방법을 통해 돌연승온 발생시에 극와동의 가장자리에서 중력파 활동이 강화된다는 사실을 밝혀내었다. 그러나 레이 추적 모형을 이용하여 돌연승온 전·후에 성층권 중력파의 원천이 어떻게 변화하는지 분석한 연구는 아직 수행된 바 없다.

KOPRI 극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 세종기지 전천 카메라를 이용한 중간권 상부 중력파 관측 및 파동 원천 파악

2008년 남극 세종과학기지(62.22°S, 58.78°W)에 설치되어 현재까지 운용 중인 전천 카메라 (all sky camera, ASC)를 이용하면 중간권에 존재하는 대기광 (airglow)을 통해 드러나는 중력파 구조를 파악할 수 있다. 본 절에서는 세종기지 전천 카메라를 통해 관측된 남극 반도 중간권 상부의 중력파 특성을 분석하였다.

1. 전천 카메라를 이용한 중간권 상부 중력파 관측

1.1 전천 카메라를 통한 대기광 관측 자료

대기광 (airglow)은 중간권과 열권에 존재하는 지속적인 광화학 발광 현상으로써, 발광 기체의 밀도와 온도에 의해 강도가 결정되기 때문에, 중력파에 의한 연직 섭동이 존재할 경우 밀도 변화에 따른 파동 구조가 대기광을 통해 나타난다. 이러한 대기광에 의한 파동 구조는 전천 카메라를 통하여 관측될 수 있으며, 연속적인 관측 이미지를 이용한 2-D FFT를 통해 관측된 파동의 수평 파장과 위상속도, 주기 및 전파 방향을 추정할 수 있다 (Chung 2005).

Table 1은 충남대학교 우주과학실험실로부터 제공받아 본 연구에서 사용한 세종기지 전천 카메라 대기광 관측 자료에 대한 설명이다. 2008년 3월부터 2015년 10월까지 약 8년간 OH Meinel bands와 OI 557.7 nm를 이용하여 각각 약 87 km와 96 km 고도에 존재하는 중력파를 관측하였다. 본 보고서에서는 앞으로 두 대기광 성분을 각각 OH와 OI로 명명할 것이다.

Table 2는 전체 전천 카메라 대기광 관측 기간 동안 각 달에 중력파가 관측된 횟수를 나타낸 표이다. 여기서 OI를 통해 관측된 중력파 사례의 갯수는 괄호안에 표기하였다. 태양이 지지 않는 남극의 여름철 (11월—2월) 기간 동안에는 대기광 관측을 수행하지 않았다. 전체 기간동안 총 188개 (173개)의 중력파 사례가 OH (OI)를 통하여 관측되었다.

Table 1. Characteristics of the all-sky camera used in this study.

All-sky camera at KSS		
Period		Mar. 2008–Oct. 2015
Constituent of airglow	OH Meinel	Altitude: ~ 87 km
	OI 557.7 nm	~ 96 km
	OI 630.0 nm	~ 250 km

Table 2. Total number of wave events observed by the OH (OI) all-sky airglow imager.

Year \ Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
2008	-	-	-	-	-	4 (1)	4 (2)	8 (3)	-	0 (1)	-	-	16 (7)
2009	-	-	2 (4)	2 (3)	-	-	-	-	-	-	-	-	4 (7)
2010	-	-	-	2 (2)	6 (5)	2 (0)	2 (0)	4 (1)	1 (2)	1 (0)	-	-	18 (10)
2011	-	-	0 (1)	5 (5)	8 (9)	7 (4)	4 (4)	10 (7)	2 (1)	-	-	-	36 (31)
2012	-	-	6 (8)	7 (7)	5 (6)	5 (5)	5 (7)	1 (3)	2 (2)	-	-	-	31 (38)
2013	-	-	4 (5)	3 (4)	2 (4)	8 (7)	8 (6)	2 (3)	4 (5)	1 (1)	-	-	32 (35)
2014	-	-	0 (1)	5 (4)	7 (3)	15 (10)	3 (5)	5 (6)	2 (4)	1 (1)	-	-	38 (34)
2015	-	-	1 (0)	0 (4)	3 (1)	1 (1)	1 (0)	0 (4)	5 (1)	2 (0)	-	-	13 (11)
Total	-	-	13 (19)	24 (29)	31 (28)	42 (28)	27 (24)	30 (27)	16 (15)	5 (3)	-	-	188 (173)

KOPRI 극지연구소

1.2 관측된 세종기지 중간권 상부 중력파 특성

Figure 1은 2008년 3월부터 2015년 10월까지 OH와 OI를 통해 관측된 중간권 상부 중력파의 수평 파장과 주기, 위상속도의 히스토그램이다. 각 변수의 전체 기간 평균값은 각 히스토그램의 우측 상단에 표기하였다. OH로 관측된 약 87 km 고도의 중력파의 수평 파장은 10—50 km에 해당하는 짧은 파장을 가지며, 평균 수평 파장은 23.3 km이다. 관측된 주기는 5분에서 60분 이내이며, 평균적으로 15분의 주기를 보였다. 위상속도는 10 m s^{-1}에서 90 m s^{-1} 사이의 넓은 스펙트럼을 지니며, 평균적으로 32.1 m s^{-1}의 위상속도를 보였다. OI를 통해 관측된 약 96 km 고도의 중력파 특성값은 OH와 유사하였으며, 평균 수평파장, 주기, 위상속도는 각각 27.5 km, 15.4분, 33.2 m s^{-1}로 나타났다.

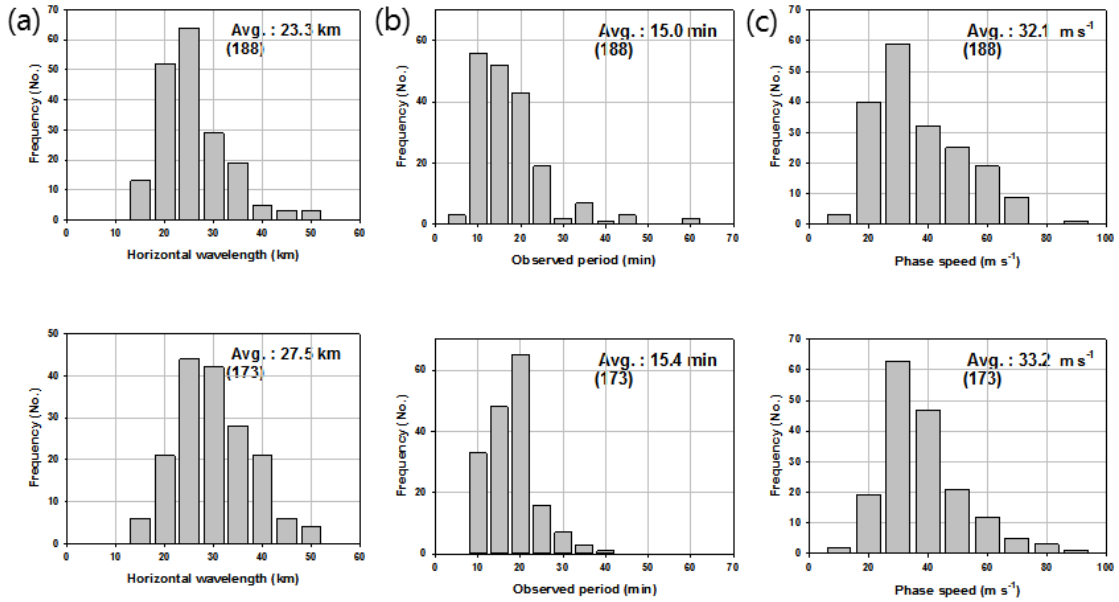


Figure 1. Histograms of the (a)horizontal wavelength, (b)period, and phase speed observed by OH (upper) and OI (lower) airglow at King Sejong Station (KSS).

2. 관측된 중력파 특성값을 이용한 파동 원천 파악

2.1 3차원 레이 추적 모형

관측된 중력파의 원천을 파악하기 위하여, 3차원 레이 추적 모형인 Gravity Wave Regional or Global Ray Tracer (GROGRAT) (Eckermann and Marks 1997)을 이용하여 backward integration을 수행하였다. 레이 추적은 식 (1)의 중력파 분산관계식을 통해 계산되는 식 (2)와 (3)의 레이 추적 방정식 (Lighthill 1978)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\hat{\omega}^2 = \frac{(k^2+l^2)N^2+f^2(m^2+\frac{1}{4H^2})}{k^2+l^2+m^2+\frac{1}{4H^2}} \quad (1)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = \overline{u}_i + \frac{\partial\hat{\omega}}{\partial k_i} \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

$$\frac{dk_i}{dt} = \sum_{j=1}^{3}(-k_j\frac{\partial\overline{u}_j}{\partial x_i}) - \frac{\partial\hat{\omega}}{\partial x_i} \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

여기서 $\hat{\omega}$은 고유 진동수, k는 동서 파수, l은 남북 파수, m은 연직 파수, N은 부력 진동수, f는 코리올리 진동수, H는 scale height (= 7 km)이며, 식 (2)와 (3)의 index i는 각각 동서 (i=1), 남북 (i=2), 연직 (i=3) 방향 성분을 의미한다.

레이 추적 모형을 통하여 레이 추적 방정식을 풀어 나가기 위해서는 관측된 파동 특성값 뿐만 아니라 배경 대기 정보가 필요하다. 본 연구에서는 Song et al. (2015)에서 제시한 재분석장과 empirical 모형 자료를 결합한 자료인 Ground to Space (G2S) 자료를 이용하였다. G2S 자료는 지상부터 1 hPa까지 ERA-Interim (Dee et al. 2011), 400 hPa부터 0.1 hPa까지 MERRA (Rienecker et al. 2011), 그리고 1 hPa부터 10-9 hPa까지 HWM14 (Drob et al. 2015)와 NRLMSISE-00 (Picone et al. 2002)모형의 바람과 온도 자료를 연직으로 cubic-spline basis function을 이용하여 결합한 자료이다.

GROGRAT 모형의 레이 추적 종료 조건은 (1) $m^2 < 0$ 이 되어 연직 상향 전파가 불가능할 때, (2) 고유 진동수가 0보다 작거나 0에 매우 가까울 때, (3) WKB 가정이 이뤄지지 않을 때, (4) 레이가 정해진 도메인 경계를 넘어갈 때이다.

KOPRI 극지연구소

2.2 파동 원천과 관련된 지수

파동의 원천을 분석하기 위해서 몇가지 지수들을 계산하여 레이 추적이 종료되는 지점에서 지수들의 분포를 조사하였다. 첫번째로 대류에 의한 중력파를 파악하기 위하여, Global Precipitation Climatology Project (GPCP) 일강수 자료 (Huffman 2001)를 이용하였다. GPCP 일강수 자료에 대한 설명은 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Characteristics of the GPCP daily precipitation data used in this study.

GPCP daily precipitation		
Period used in the study		Mar. 2008−Oct. 2015
Resolution	Temporal	daily
	Horizontal	1.0° x 1.0°

강한 대류에 의한 중력파 발생을 고려하기 위하여, Dai (2006)의 기준을 따라 10 mm day^{-1}의 강수가 레이 추적이 종료된 지점 근처에 있을 경우, 대류가 중간권에서 관측된 중력파의 원천이라고 추정하였다.

두번째 지수로는 전선과 연관된 중력파 진단 지수로써 현재 WACCM4에서 사용되는 전선 발달 함수 (Frontogenesis Function, FF)를 계산하였다. FF는 식 (4)와 같이 정의된다 (Charron and Manzini 2002; Richter et al. 2010).

$$FF \equiv -\left(\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial\theta}{\partial\lambda}\right)^2\left(\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial u}{\partial\lambda}-\frac{\tan\phi}{a}v\right)-\left(\frac{1}{a}\frac{\partial\theta}{\partial\phi}\right)^2\frac{1}{a}\frac{\partial v}{\partial\phi} \\ -\frac{1}{a^2\cos\phi}\frac{\partial\theta}{\partial\lambda}\frac{\partial\theta}{\partial\phi}\left(\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial v}{\partial\lambda}+\frac{1}{a}\frac{\partial u}{\partial\phi}+\frac{\tan\phi}{a}u\right) \quad (4)$$

여기서, ϕ는 위도, λ는 경도, a는 평균 지구 반지름, u, v는 동서 바람과 남북바람, θ는 온위이다. FF의 진단 고도는 선행연구를 따라서 600 hPa로 결정하였으며 (Charron and Manzini 2002; Richter et al. 2010), 중력파 진단에 사용된 FF의 임계치는 (Richter et al. 2010)에서 제시한 0.045 K^2 $(100\ km)^{-2}$ h^{-1}를 이용하였다.

세번째 지수로는 제트류와 연관된 중력파 진단지수로 사용되는 발산 방정식의 잔여항 (Residual of nonlinear balance equation, RNBE)을 계산하였다 (Moore and Abeling 1988; Zhang et al. 2001). RNBE는 FF와 더불어 중요한 제트/전선 중력파 진단지수로써 평가되고 있으며 (McCann and Whistler 2001), 중력파 연구 (Zhang 2004; Ki and Chun 2011) 뿐만 아니라 항공 난류 예측 연구 (Sharman et al. 2006; Kim et al. 2011)에서 활용된 바 있다. RNBE의 진단고도는 대류권 제트류를 살펴볼 때는 Zhang (2004)에서 제시한 350 hPa를 이용하였으며, 성층권 제트류의 효과를 분석할 때는 2 hPa을 진단고도로 설정하였다. RNBE의 임계치는 대류권에서는 5 x 10^{-10} s^{-2}를, 성층권에서는 10^{-8} s^{-2}를 이용하였다. Chun (2013)에서 유도한 구좌표계에서의 RNBE는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$RNBE = 2J(u,v)+f\zeta-\nabla^2\Phi-\beta u+X-D^2-\frac{\partial\vec{V}}{\partial P}\circ\vec{\nabla}\omega \quad (5)$$

$$2J(u,v) = \frac{2}{a^2\cos\phi}\left(\frac{\partial u}{\partial\lambda}\frac{\partial v}{\partial\phi}-\frac{\partial v}{\partial\lambda}\frac{\partial u}{\partial\phi}\right) \quad (6)$$

$$f\zeta = 2\Omega\sin\phi\left(\frac{1}{a\cos\phi}\frac{\partial v}{\partial\lambda} - \frac{1}{a}\frac{\partial u}{\partial\phi} + \frac{u\tan\phi}{a}\right) \quad (7)$$

$$\nabla^2\Phi = \frac{1}{a^2\cos^2\phi}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\lambda^2} + \frac{1}{a^2}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\phi^2} - \frac{\tan\phi}{a^2}\frac{\partial\Phi}{\partial\phi} \quad (8)$$

$$\beta u = \frac{2\Omega u\cos\phi}{a} \quad (9)$$

$$X = \frac{(u^2+v^2)\tan^2\phi}{a^2} - \frac{(u^2+v^2)}{a^2\cos^2\phi} - \frac{2\tan\phi}{a^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial\phi} + v\frac{\partial v}{\partial\phi}\right) \quad (10)$$

$$D^2 = (\overrightarrow{\nabla}\circ\overrightarrow{V})^2 = \left(\frac{\partial u}{a\cos\phi\partial\lambda} + \frac{\partial(v\cos\phi)}{a\cos\phi\partial\phi}\right)^2 \quad (11)$$

$$\frac{\partial\overrightarrow{V}}{\partial P}\circ\overrightarrow{\nabla}\omega = \frac{\partial u}{\partial P}\frac{\partial\omega}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial P}\frac{\partial\omega}{\partial y} \quad (12)$$

FF와 RNBE의 계산에는 ERA-Interim 재분석장을 이용하였으며, ERA-Interim 재분석장에 대한 설명은 Table 4에 정리하였다. 전천 카메라 관측이 수행된 2008년 3월부터 2015년 10월까지 6시간 간격 자료를 사용하였으며, 수평해상도는 1.5° x 1.5° 이고 연직으로 1 hPa까지 총 37개 층을 갖는다. 사용한 변수는 수평 (u, v), 연직 (ω) 바람 속도와 온도 (T), 지위고도 (h)이다.

Table 4. Characteristics of the ERA-Interim reanalysis data set used in this study. Here, u, v, ω, T, h are the zonal, meridional,, vertical velocity in isobaric coordinates, temperature, and geopotential height, respectively.

ERA-Interim reanalysis		
Variables used in this study		u, v, ω, T, h
Period		2008.03.01.–2015.10.31
Resolution	Temporal	6 hours
	Horizontal	1.5° × 1.5°
	Vertical (Model top)	37 levels (1 hPa)

FF와 RNBE는 본 과제의 1차년도 연구에서 유성 레이다로 관측된 중간권 상부 중력파의 원천 분석에도 활용된 바 있다.

2.3 세종기지 중간권 상부 중력파 원천 분석

GROGRAT을 이용하여 중력파가 관측된 각 사례의 파동 원천을 파악하기에 앞서서, 관측된 대기광 이미지로부터 추정한 파동 특성값들의 불확실성을 고려하기 위하여, 동서, 남북 수평파수 k, l과 고유 진동수 $\hat{\omega}$에 각각 ±5%와 ±10%의 편차를 추가하여 총 125쌍의 파동 특성값 그룹을 구성하였다. 각 그룹의 파동 특성값들을 이용하여 125번의 레이 추적을 수행하였을 때, 70% 이상의 레이가 편차를 포함하지 않은 기준 레이의 추적 종료 지점으로부터 특정 범위 (수평으로 3° 이내, 연직으로 ±2 km 이내)에 수렴할 경우만을 본 분석에 사용하였다. OH와 OI로 관측된 총 361개의 중력파 사례 중에서 수렴 조건을 만족한 사례는 총 266개이며, 레이 추적 시작 지점에서 evanescent wave로 나타난 사례들을 제거하고 총 80개의 사례에 대해서 원천 분석을 수행하였다. 파동 원천 분석은 레이 추적 고도를 기준으로 (1) 대류권 (< 15km) 종료 사례, (2) 성층권 (15—60 km) 종료 사례, 그리고 (3) 중간권 (> 60 km) 종료 사례로 구분지었다. 각각 24개, 10개, 46개의 사례가 대류권, 성층권, 그리고 중간권 종료 사례로 구분지어졌다.

KOPRI 극지연구소

2.3.1 대류권 종료 사례

총 24개의 대류권 종료 사례에 대하여 레이 추적을 하는 동안 연직 파장, 수평 파장, 고유 진동수, 연직 군속도, 수평 군속도의 연직 프로파일은 부록에 모두 나타내었다.

Figure 2는 총 24개의 대류권 종료 사례의 레이 추적 경로를 나타낸 그림이다. 대부분의 레이는 동쪽으로 전파하였으며 대류권에서 중간권으로 전파되면서, 수평으로 5° 이내의 거리를 이동하였다. 레이 추적이 종료된 지점은 대부분 남극 반도 서쪽의 드레이크 해협으로 산악 원천은 고려하지 않았다.

Figure 3은 대류권 종료 사례에 대해 대류 원천을 파악하기 위하여 각 사례가 발생한 날의 GPCP 일강수량을 나타낸 그림이다. 레이 추적 경로는 앞서 Figure 2와 동일하며, 레이 추적 종료 지점으로부터 수평으로 반경 3°의 파란색 원을 표기하였고 이 원 안에 10 mm day^{-1} 이상의 강수가 내린 경우 대류가 중요한 파동 원천이라고 분석하였다. 그 결과 그림에서 붉은색 별표로 표기한 총 7개 사례에서 대류가 관측된 중력파의 원천으로 분석되었다.

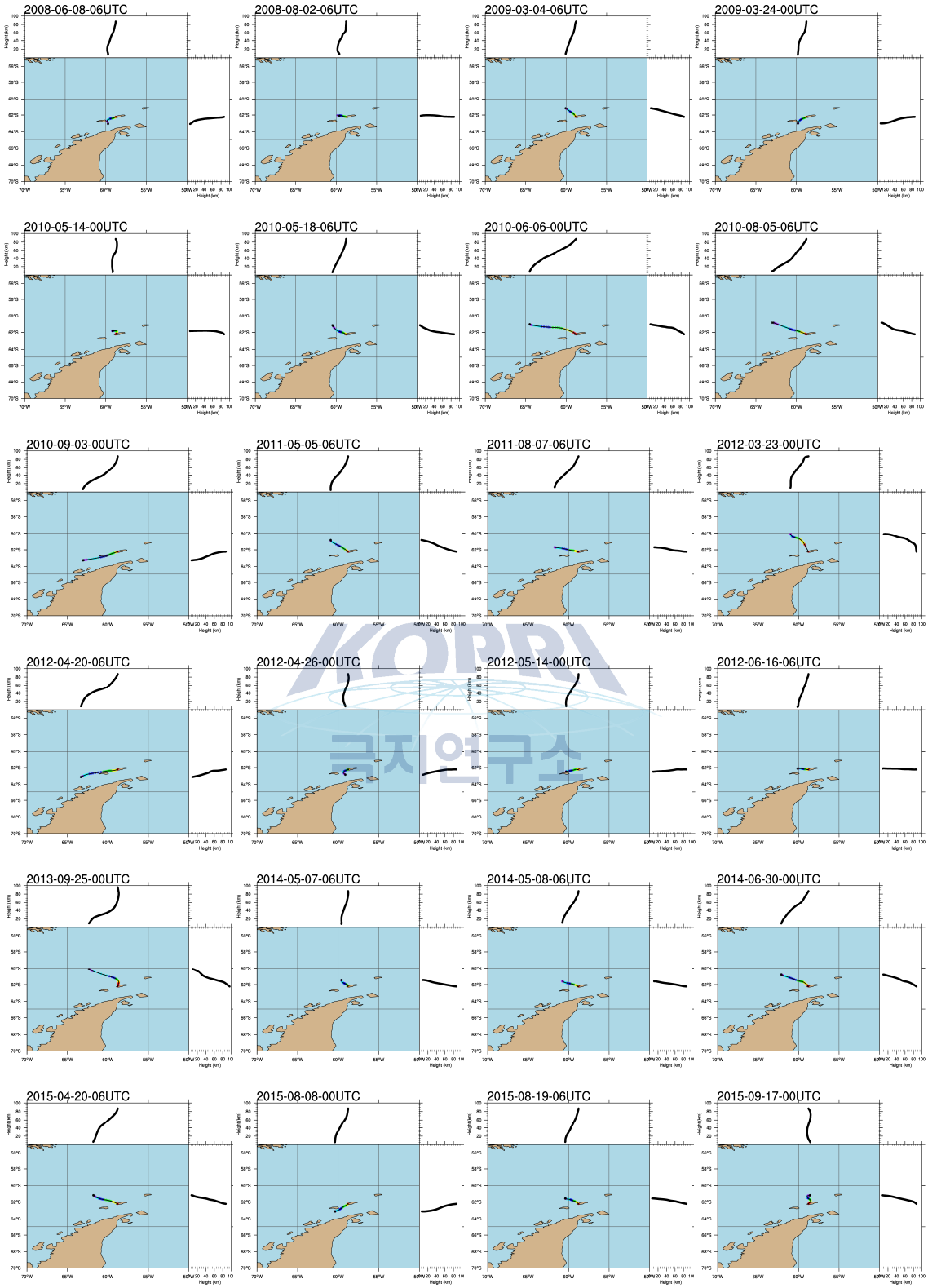


Figure 2. Ray back-trajectories of the cases for which the calculations are terminated in the troposphere.

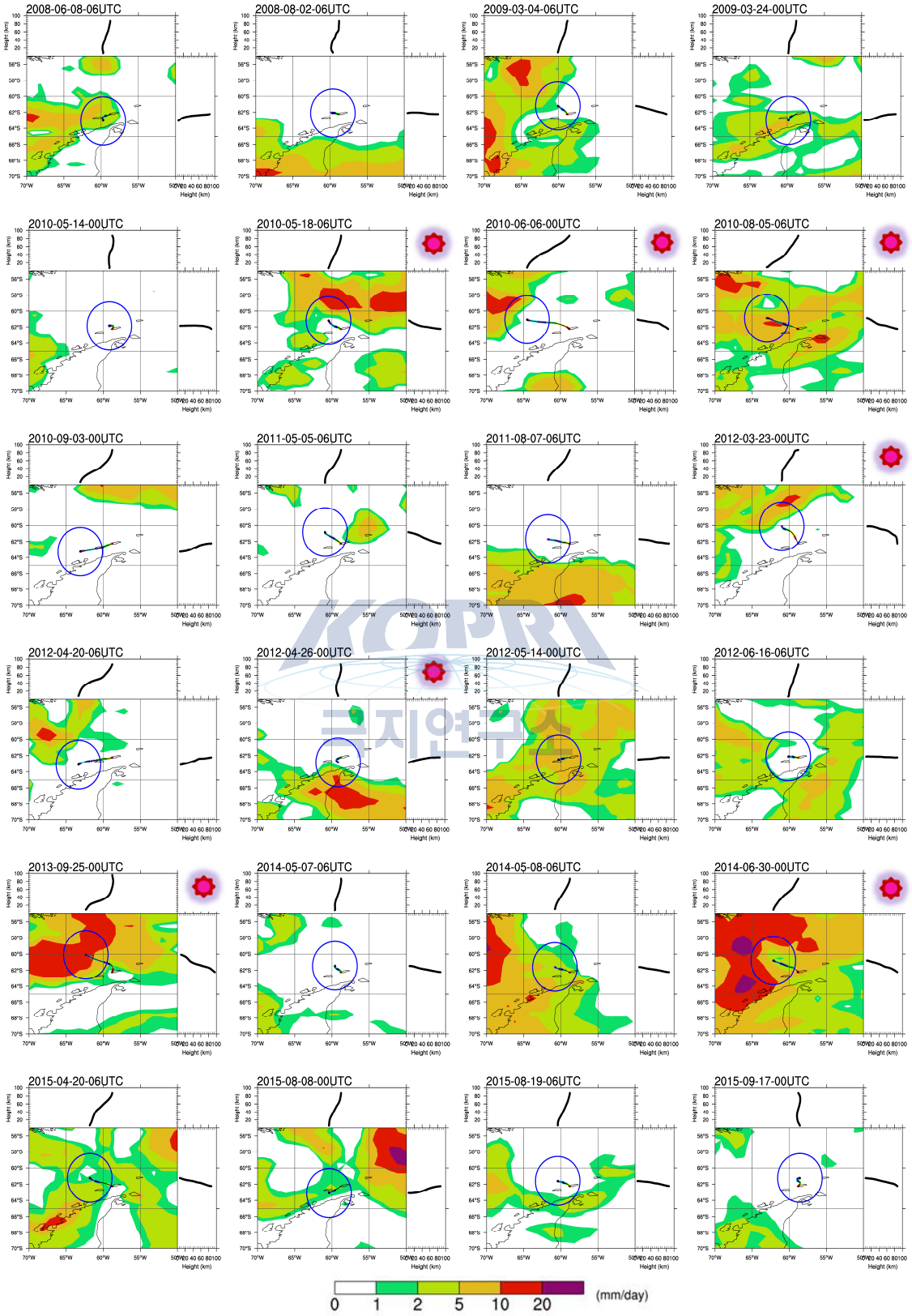


Figure 3. The same as in Fig. 2, except for GPCP daily precipitation (shading). The blue circle denotes a 3° radius from the ray termination position.

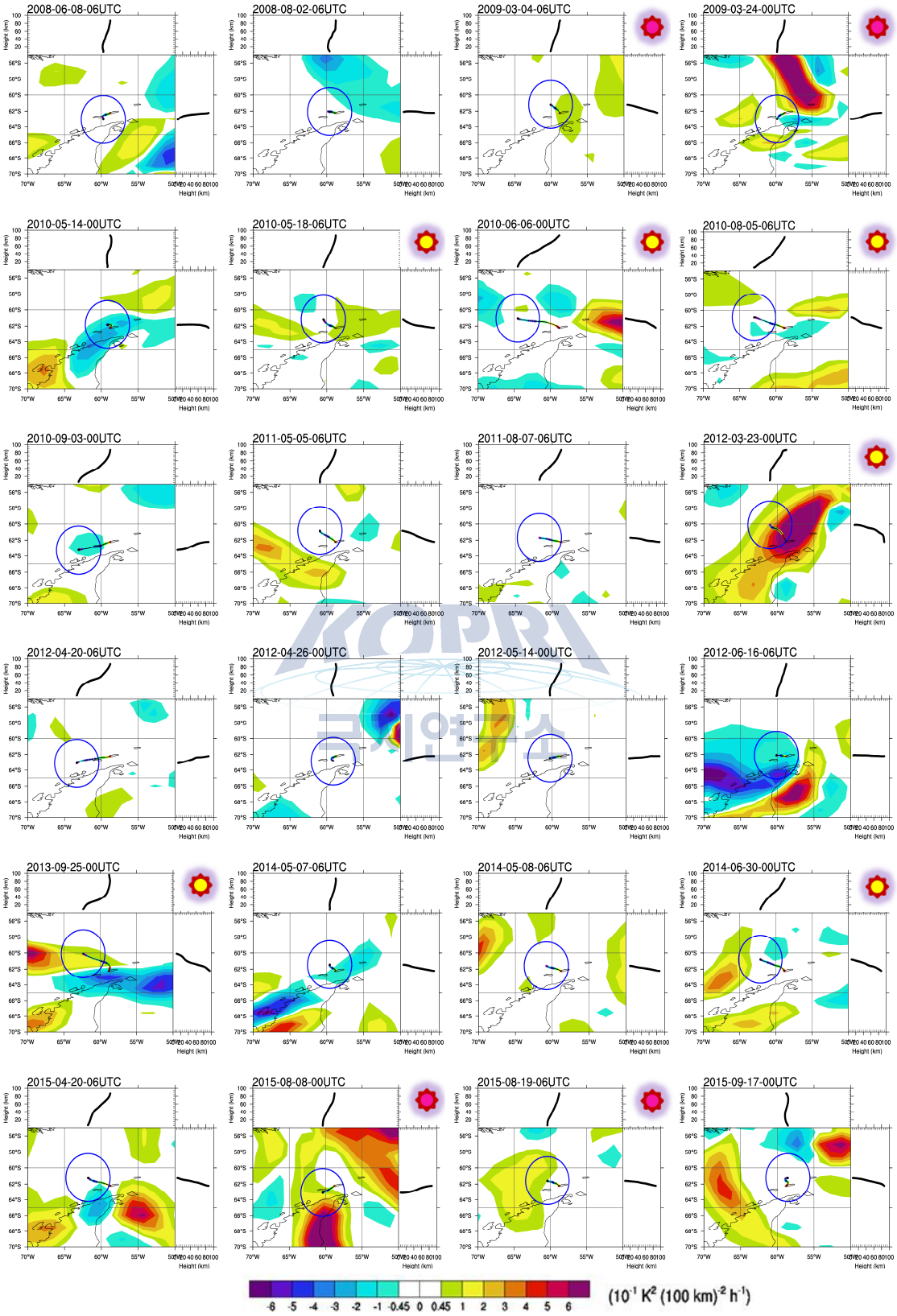


Figure 4. The same as in Fig. 2, except for FF at 600 hPa (shading). The blue circle denotes a 3° radius from the ray termination position.

Figure 4는 대류권 종료 사례에 대해 전선 원천을 파악하기 위하여 600 hPa에서의 FF를 계산하여 나타낸 그림이다. 레이 추적 종료 지점에서 반경 3° 이내에 0.045 K^2 $(100\ km)^{-2}$ h^{-1} 이상의 FF가 존재한 사례는 총 10개로 붉은 별표로 표기하였으며, 그 중에서 6개 사례는 주변에 강한 대류가 동시에 존재했던 사례로 (노란색 별표로 표기) 분석되었다.

한편, 대류권 종료 사례에 대해 제트류 원천을 파악하기 위하여 350 hPa에서의 RNBE를 계산하고, 200 hPa에서의 제트류 크기를 계산하여 제트류 원천을 분석하였으나, 레이 추적 종료 지점에서 강한 RNBE와 바람이 존재한 사례는 없었다 (not shown).

2.3.2 성층권 종료 사례

다음으로는 총 10개의 성층권 종료 사례에 대하여 원천 분석을 수행하였다. 성층권의 경우 주요 중력파 원천인 산악, 대류, 전선은 존재하지 않으나 성층권 극제트가 존재하기 때문에, 이것이 가능한 중력파 원천이 될 수 있다. 성층권 제트류에 의한 원천 파악을 위하여 2 hPa에서의 RNBE를 계산하여 레이 추적 종료 지점과 비교하였다.

Figure 5는 총 10개의 성층권 종료 사례의 레이 추적 경로를 나타낸 그림이다. 대류권 종료 사례와 유사하게 대부분의 레이는 동쪽으로 전파하였으며, 대류권 종료 사례에 비해 상대적으로 더 긴 수평거리를 이동한 사례가 많았다.

Figure 6은 성층권 종료 사례에 대해 2 hPa에서의 RNBE를 나타낸 그림이다. 붉은색 실선은 50 m s^{-1} 이상의 수평 바람 ($\sqrt{u^2+v^2}$)을 10 m s^{-1} 간격으로 나타낸 것이다. 레이 추적 종료 지점 근처에 10^{-8} s^{-2} 이상의 강한 RNBE와 50 m s^{-1} 이상의 강한 바람이 존재했던 사례는 모두 4개로, 이를 통해 남극 반도 주변 성층권에 존재하는 제트류가 중간권 상부에서 관측된 중력파의 원천이 될 수 있음을 알 수 있다.

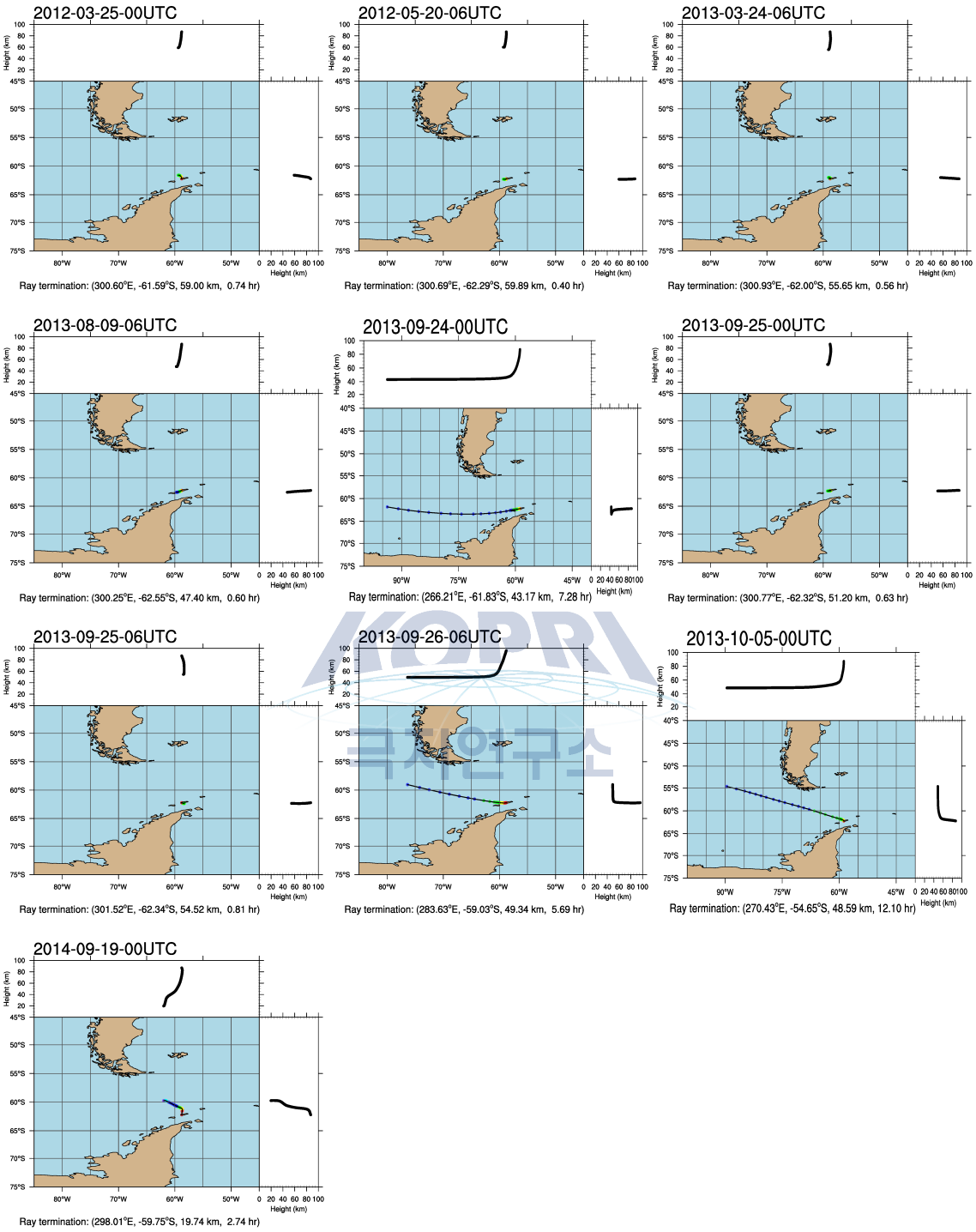


Figure 5. Ray back-trajectories of the cases for which the calculations are terminated in the stratosphere.

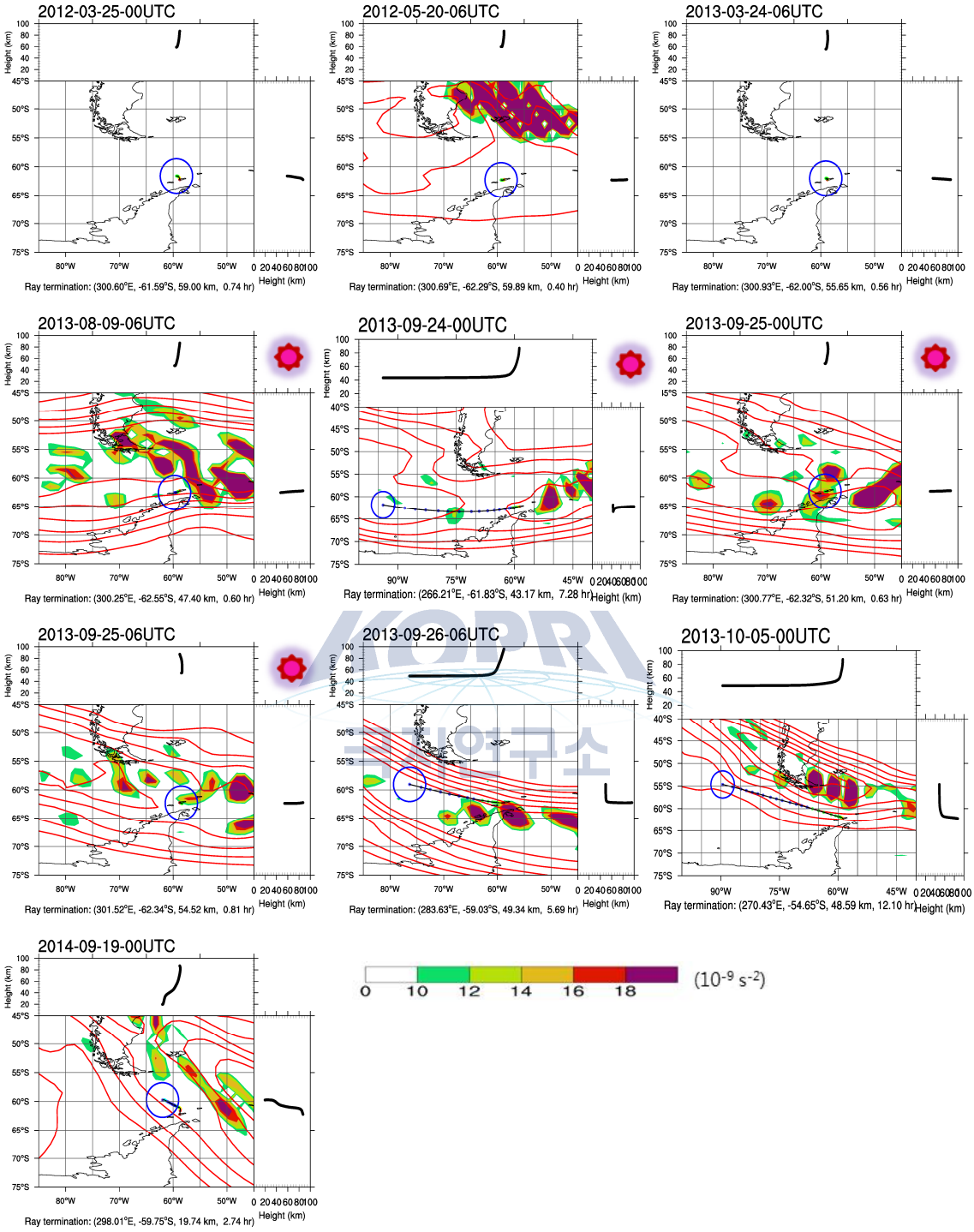


Figure 6. The same as in Fig. 5, except for RNBE (shading) and horizontal wind (red line) at 2 hPa. The blue circle denotes a 3° radius from the ray termination position.

2.3.3 중간권 종료 사례

총 46개의 중간권 종료 사례에서 대부분을 차지하는 39개의 사례는 $m^2 < 0$인 조건에 의하여 레이 추적이 종료되었다. 이는 중간권에서 파동의 연직 상향 전파가 아닌 하향 전파가 존재함을 의미하는 것으로, 대류권과 성층권에 존재하는 파동 원천으로 부터 발생하여 중간권으로 전파된 파동 뿐만아니라 중간권의 in-situ 메커니즘이 관측된 중간권 상부 중력파의 가능한 원천이 될 수 있음을 보여주는 결과이다. 이러한 중간권의 in-situ 메커니즘으로는 연직 전파한 파동이 중간권에서 깨지면서 발생할 수 있는 2차 중력파 효과 (Chun and Kim 2008; Kim and Chun 2009)가 있다.

KOPRI
극지연구소

제 2 절 성층권 돌연승온 발생 전·후 중력파 변동성 파악 및 파동 원천 이해

2009년 1월에 발생한 성층권 돌연승온 사례는 지금까지 발생한 돌연승온 중에서 가장 강하고 급격한 온도 상승을 유발한 것으로 알려져있다 (Manney et al. 2009; Harada et al. 2010). 본 절에서는 고해상도 분석장과 레이 추적 모형을 이용하여 2009년 1월 성층권 돌연승온 발생 전·후의 중력파 변동성과 파동 원천을 분석하였다.

1. S3D 방법을 이용한 중력파 분석

1.1 S3D 방법

Lehmann et al. (2012)에서 제시한 S3D (the finite-volume 3-D sinusoidal fits) 방법은 고해상도 자료를 이용하여 특정 부피의 3차원 큐브 내에 지배적으로 존재하는 파동 신호를 찾아내는 기법으로써, 이를통해 각 큐브에서의 파동 벡터와 크기를 계산할 수 있다. S3D 방법은 식 (13)과 같이 각 큐브내에서 특정 변수를 여러 개의 파동 성분으로 분해할 때, 각 성분에 의한 편차 제곱이 최소화 되도록 fitting하는 방식을 이용한다. 본 연구에서는 온도 자료를 이용하여 각 3차원 큐브 내에서 온도 섭동을 유도하는 지배적인 파동 특성값을 추정하였다.

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\zeta_i - f(x_i, y_i, z_i))^2}{\sigma_i^2} \tag{13}$$

$$f(x_i, y_i, z_i) = \sum_i A_j \sin(k_j x_i + l_j y_i + m_j z_i) + B_j \cos(k_j x_i + l_j y_i + m_j z_i) \tag{14}$$

여기서, (k_j, l_j, m_j)는 j번째 파동 성분의 파동 벡터이며, A_j와 B_j는 각 성분의 크기이다. ζ_i는 분석에 사용하는 변수로써 본 연구에서는 온도 섭동이 사용된다.

1.2 고해상도 ECMWF 분석 자료

S3D 방법을 적용하기 위하여 사용한 자료는 0.25° x 0.25°의 수평해상도를 갖는 고해상도 ECMWF 분석 자료로써, 자료에 대한 설명은 Table 5에 정리하였다. 3SD 방법에 사용된 3차원 큐브는 동서, 남북, 연직으로 각각 9개, 9개, 21개의 격자를 사용하여 2° x 2° x 10 km의 부피를 갖는다.

Table 5. Characteristics of the high-resolution ECMWF analysis data set used in this study. Here, u, v, and T are the zonal, meridional velocity and temperature, respectively.

High-resolution ECMWF analysis		
Variables used in this study		u, v, T
Period		1 Jan. 2009—31 Jan. 2009
Resolution	Temporal	6 hours
	Horizontal	0.25° × 0.25°
	Vertical (Model top)	0.5 km (80 km)

KOPRI 극지연구소

S3D 방법을 통하여 중력파 특성값을 얻어내기 위하여, 고해상도 분석자료에 명시적으로 분해되는 동서파수 1부터 12에 해당하는 행성파 성분은 제거한 뒤 분석에 사용하였다.

1.3 온도 섭동을 통한 중력파 운동량속 계산

Ern et al. (2004)에서 제시한 방법을 따르면 식 (15)와 같이 온도 섭동 값으로부터 동서, 남북 방향의 중력파 운동량속을 추정할 수 있다.

$$(F_{px}, F_{py}) = \frac{1}{2}\rho\frac{(k,l)}{m}\left(\frac{g}{N}\right)^2\left(\frac{\hat{T}}{\overline{T}}\right)^2 \quad (15)$$

여기서, ρ는 밀도, $\hat{T}$는 온도 섭동의 크기, $\overline{T}$는 배경대기 온도이다. S3D 방법을 통하여 전구를 일정 부피의 큐브로 나누고, 각 큐브에서 온도 섭동 값을 만드는 가장 지배적인 파동 성분을 구분해 낼 수 있기 때문에, 위 식을 이용하여 각 큐브에서

지배적인 중력파 성분에 의한 중력파 운동량속을 계산할 수 있다. 한편 동서 방향과 남북 방향 중력파 운동량속을 모두 고려한 절댓값 중력파 운동량속은 아래 식 (16)처럼 계산한다.

$$|GWMF| = \sqrt{F_{px}^2 + F_{py}^2} \tag{16}$$

2. 2009년 1월 성층권 돌연승온 발생 전·후 중력파 변동성 파악

Figure 7은 2009년 1월 12일 00UTC부터 27일 00UTC까지 3일 간격으로 나타낸 25 km 고도의 (a) 수평 바람, (b) 온도, (c) 온도 섭동, 그리고 (d) |GWMF|의 분포를 나타낸 것이다. 이 때, Charlton and Polvani (2007)에서 제시한 돌연승온 사례 선별 기준에 따라 2009년 1월 24일을 돌연승온이 발생한 central date (Lag = 0)로 정하였으며, 앞으로 central date를 기준으로 N일 전(후)을 Lag = -N(+N)으로 표기하겠다.

먼저 성층권 극제트의 변화를 살펴보면, Lag = -12인 1월 12일에는 북극 지역을 중심으로 둘러싸는 타원형의 구조가 나타나지만, 점차 타원 구조가 찌그러지면서 Lag = -3에서는 수평으로 길게 늘어난 형태가 보이고, Lag = 0에서는 타원의 가운데 부분이 수축하면서, Lag = +3에서는 하나였던 극와동이 두개로 쪼개지는 vortex split 돌연승온의 전형적인 구조가 나타난다 (Charlton and Polvani 2007). 극지역 주변을 도는 극제트가 북극의 차가운 공기를 가두는 역할을 하기 때문에, 극지역 성층권의 온도는 극제트의 구조와 유사한 형태를 보인다. 따라서 Lag = -12에서 극지역에 중심을 두고있던 차가운 공기는 돌연승온이 진행되어감에 따라 두 지역으로 이동하게 되고 북극 중심에는 높은 온도가 나타난다.

온도 섭동값은 성층권 제트류의 가장자리에서 극값을 보였다. 특히 본격적인 극와동 분리가 일어나는 Lag = -3에서 극와동의 가장자리에 강한 온도 섭동이 나타났다. 이는 위성 관측 자료와 중규모 수치모형을 이용하여 성층권 돌연승온 발생 전 극와동 가장자리에서 중력파 활동이 강화된다는 것을 보인 선행연구의 결과와 일치한다 (Duck et al. 1998; 2001; Wang and Alexander 2009).

중력파 운동량속은 온도 섭동값을 기반으로 계산하였기 때문에, 돌연승온 기간 동

안 |GWMF|의 변화는 온도 섭동의 변화와 유사한 구조를 보인다. 따라서 극와동 가장자리에서 강한 |GWMF|가 나타나며, 극와동이 두개로 쪼개지면서, |GWMF|의 극값이 나타나는 지역도 쪼개진 극와동이 존재하는 중국 대륙과 캐나다 지역으로 이동한다.

KOPRI
극지연구소

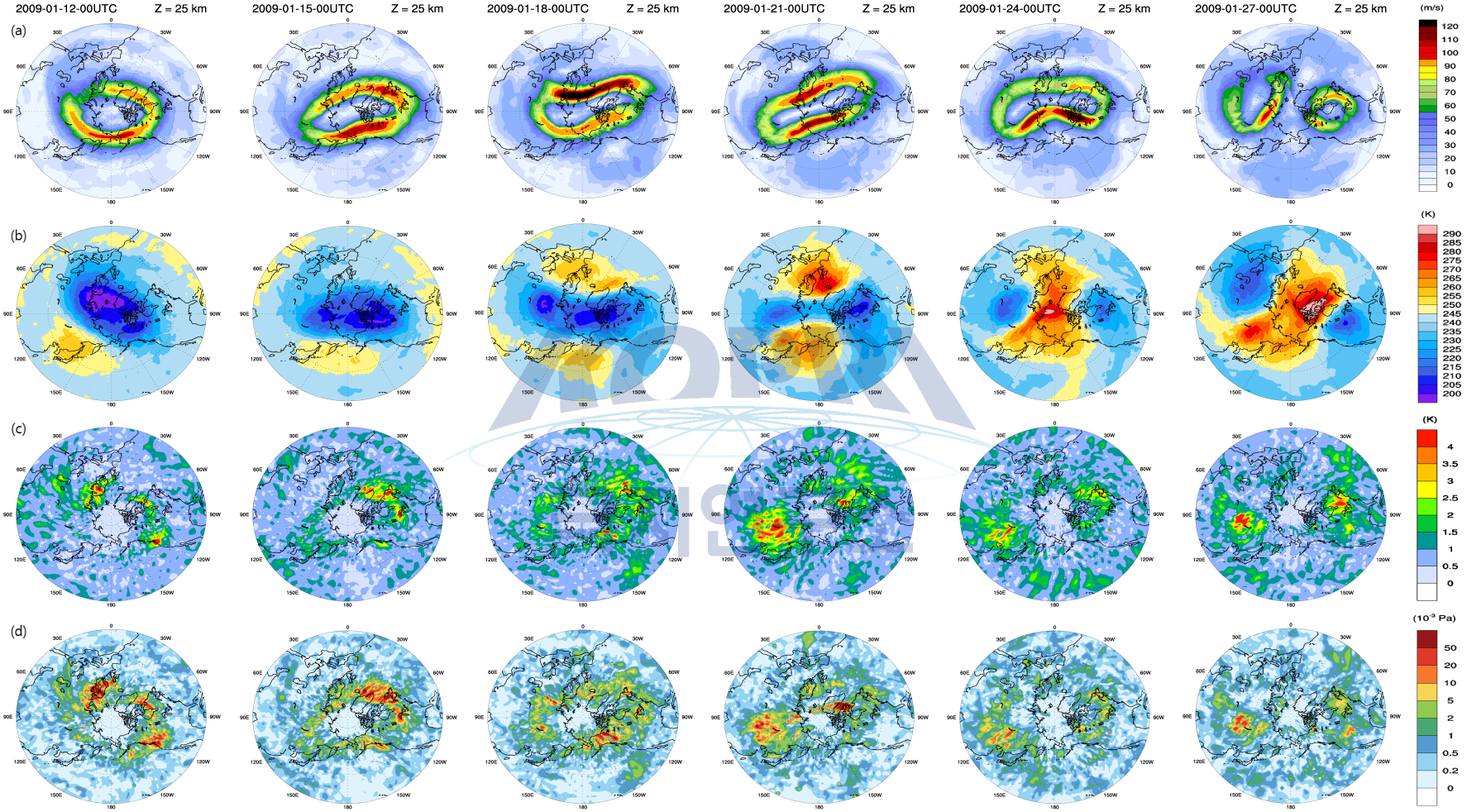


Figure 7. Polar-stereo projection maps of (a) horizontal wind, (b) temperature, (c) temperature perturbation, and (d) |GWMF| at 25 km during January 2009 SSW case.

3. 레이 추적 모형을 이용한 성층권 돌연승온 발생 전·후 파동 원천 이해

S3D 방법을 통해서 얻어낸 파동 특성값들을 GROGRAT에 대입하여 성층권의 파동 원천을 파악하였다. 파동 원천 파악은 |GWMF|가 극값을 보이는 특정 지역들을 결정하여 그 지역들에 대해서만 backward tracing을 수행하였다. Table 6는 Lag = -12부터 Lag = +3까지 |GWMF|의 극값이 나타난 한 곳 혹은 두 곳의 지역을 나타낸 표이다.

Table 6. Location of maximum |GWMF| during the evolution of January 2009 SSW.

Time (Lag)	Location	
	Region 1	Region 2
2009-01-12-00UTC (Lag = -12)	15°E-35°E & 60°N-70°N	110°W-130°W & 45°N-55°N
2009-01-15-00UTC (Lag = -9)	50°W-70°W & 45°N-60°N	-
2009-01-18-00UTC (Lag = -6)	120°W-150°E & 62°N-72°N	-
2009-01-21-00UTC (Lag = -3)	95°E-105°E & 38°N-48°N	55°W-75°W & 62°N-72°N
2009-01-24-00UTC (Lag = 0)	105°E-115°E & 45°N-55°N	50°W-65°W & 47°N-57°N
2009-01-27-00UTC (Lag = +3)	87°E-102°E & 45°N-55°N	100°W-110°W & 38°N-45°N

KOPRI 극지연구소

Figure 8(a)는 Lag = -12일 때, 25 km 고도의 |GWMF|와 20 m s^{-1} 간격의 검은 실선으로 나타낸 수평 바람 분포를 나타낸 것이다. Table 6에 표기한 |GWMF|의 극값이 나타나는 지역은 파란색 실선으로 표기하였다. Figure 8(b)는 두 극값 지역에서 내린 레이 추적 경로를 나타낸 것이며, Figure 8(c)와 8(d)는 두 극값 지역에서의 레이 추적 경로를 위-경도 단면도에 나타낸 것이다. Region 1과 2에서 추적한 레이들은 대부분 대류권에서 추적이 종료되었다. Region 1에서 추적한 레이는 대부분 동쪽 전파하였으며 동서 방향으로 30° 이상의 거리를 전파한 경우가 많았다. 한편 Region 2에서 추적한 레이는 Region 1의 레이 추적 결과와 비교했을 때, 상대적으로 짧은 거리의 수평 방향 전파가 있었다.

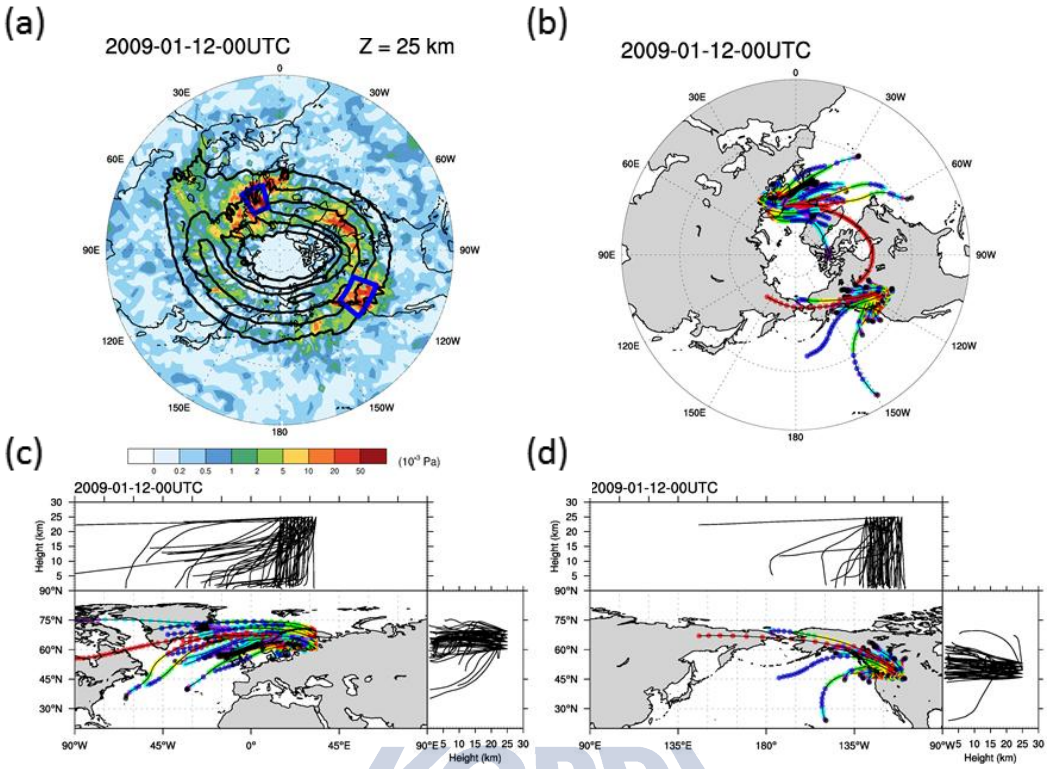


Figure 8. (a) Polar-stereo projection map of |GWMF| (shading) and horizontal wind (black line) at 25 km for 00UTC 12 January 2009. (b)—(d) Ray back-trajectories of the waves on specific regions launched at 25 km.

KOPRI 극지연구소

Figure 9는 Figure 8과 동일하지만, Lag = -9일 때의 결과를 나타낸 것이다. 레이 추적 경로를 살펴보면, 대부분의 레이는 대류권에서 종료되었으며, 대부분 동쪽으로 전파하였고, 극향 전파하는 경향을 보였다.

Figure 10은 Lag = -6의 결과로, 캐나다 지역에 존재하는 Region 1에서 추적한 레이들은 대부분 대류권에서 종료되었으며, 약한 동쪽 전파와 극향 전파 경향이 두드러지게 나타났다.

Figure 11은 Lag = -3의 결과이며, 이 때는 북극을 중심으로 존재하던 하나의 극와동이 두 개로 나뉘어지기 시작하는 시기로, Figure 11(a)에서 |GWMF|의 극값이 나타나는 지역도 중국 대륙과 캐나다 북부 지역으로 나뉘는 모습을 확인할 수 있다. Region 1과 2 모두 대류권에서 종료된 레이가 대부분을 차지하였으며, Region 1의 경우 수평 전파 방향이 일관되지 않고 보다 복잡하게 나타났는데, 이는 극와동이

나눠지기 시작하면서 더이상 지배적인 서풍이 성층권에 나타나지 않기 때문이다.

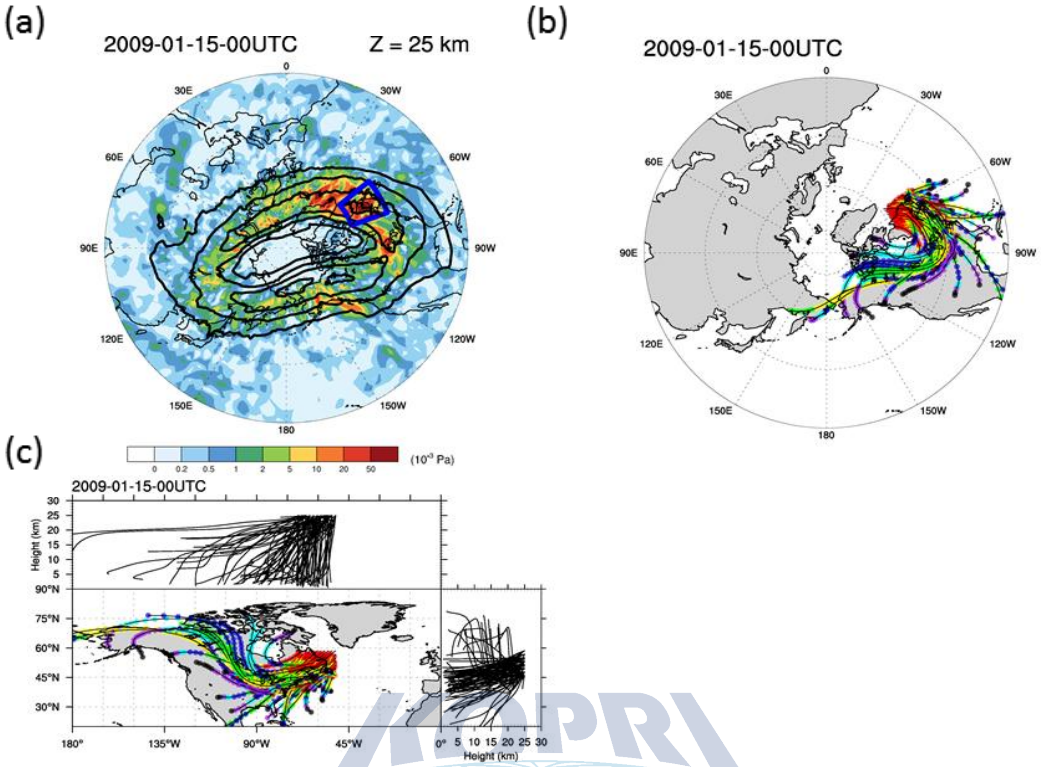


Figure 9. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 15 January 2009.

KOPRI
극지연구소

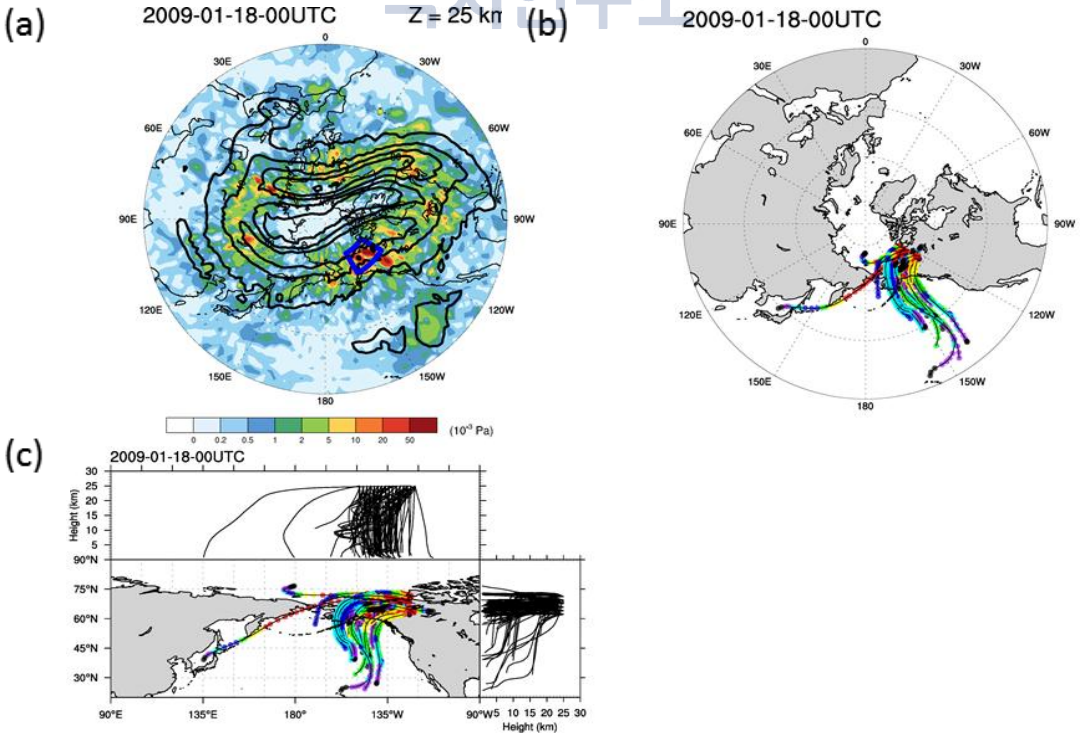


Figure 10. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 18 January 2009.

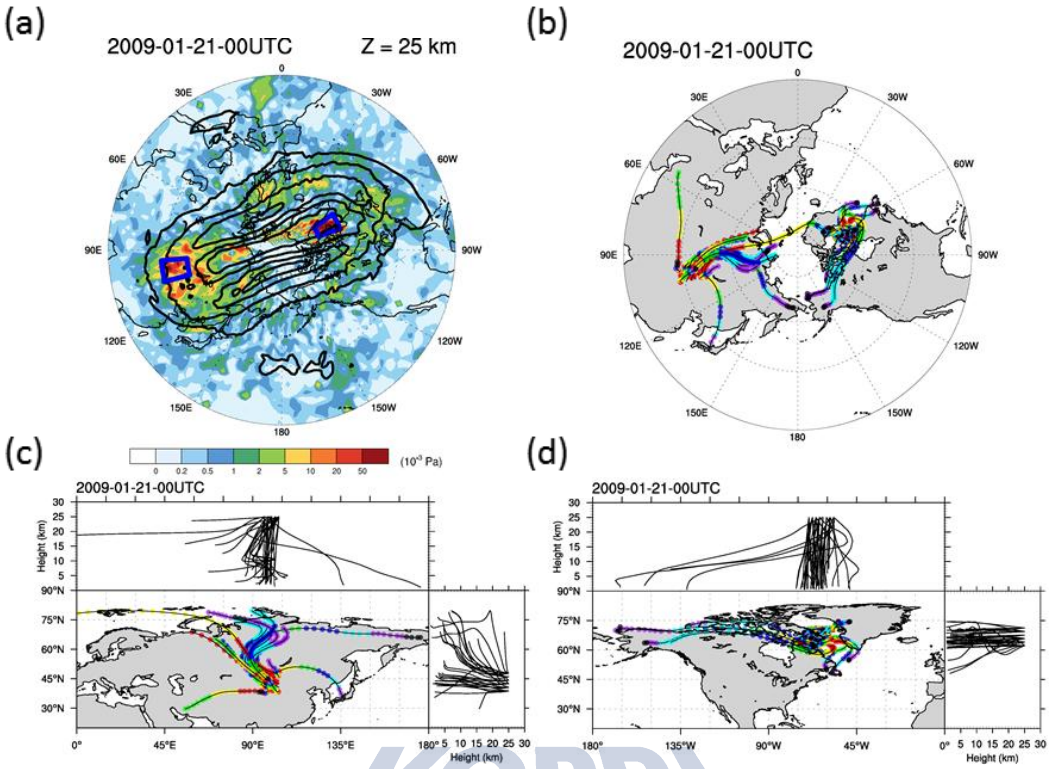


Figure 11. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 21 January 2009.

KOPRI
극지연구소

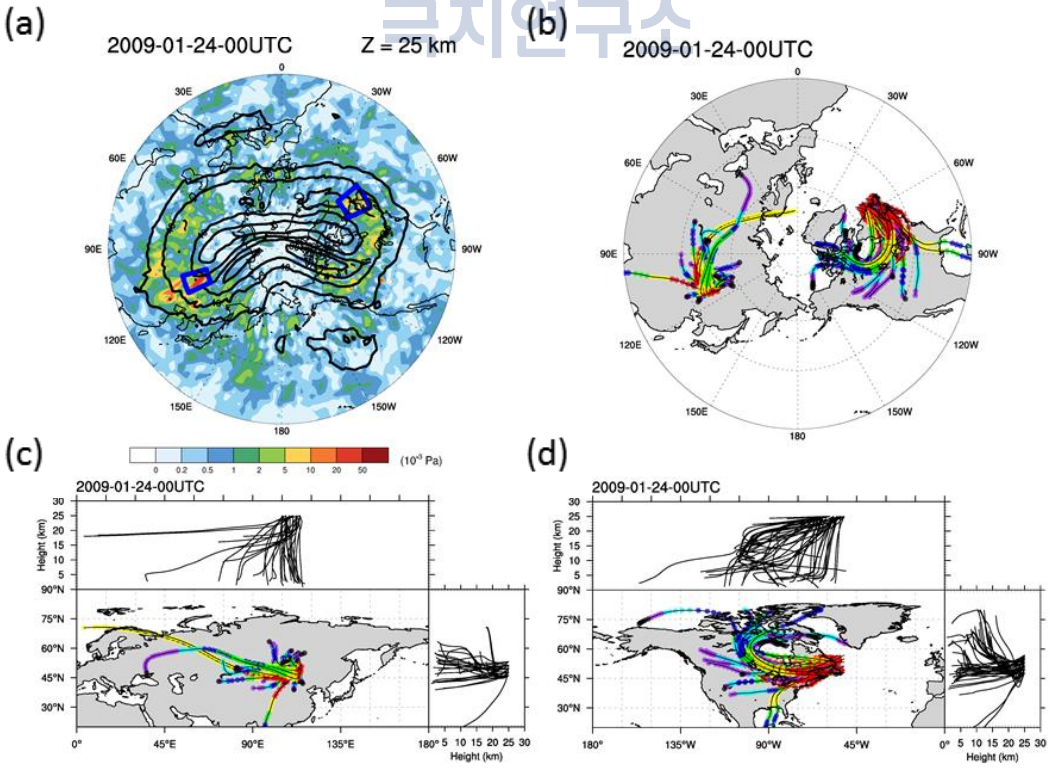


Figure 12. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 24 January 2009.

Figure 12는 Lag = 0의 결과이다. 앞선 날짜들과 마찬가지로 대부분의 레이는 대류권에서 종료되었는데, 캐나다 북동부에 위치한 Region 2의 레이 추적 경로는, 캐나다 지역에 존재하게 된 제트류를 따라 반시계 방향으로 나타나는 구조를 확인할 수 있다.

Figure 13은 성층권 돌연승온 발생 이후인 Lag = +3의 결과로써, 완전히 분리된 두 개의 성층권 제트류 가장자리에 |GWMF|의 극값이 나타남을 Figure 13(a)를 통해 확인할 수 있다. 두 지역에서 내린 레이는 대부분 대류권까지 도달하였으며, 수평 전파가 많지 않은 Region 1의 결과와 비교하여, Region 2의 레이는 뚜렷한 동향 전파와 남향 전파가 나타났다.

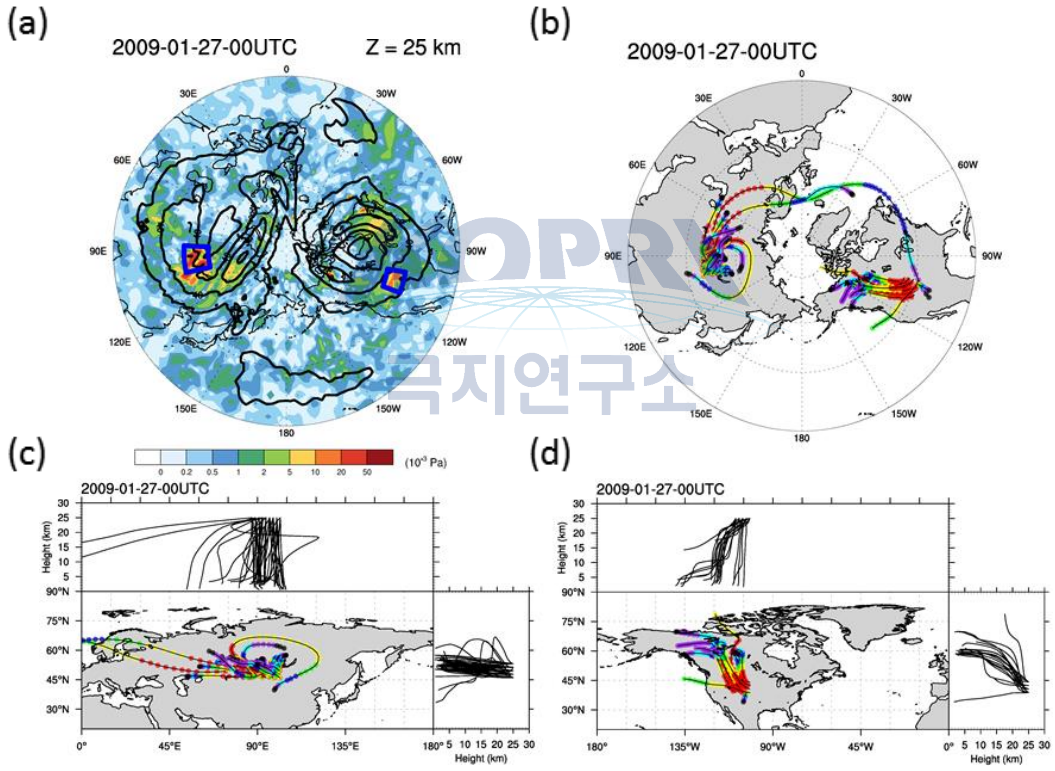


Figure 13. The same as in Fig. 8, except for 00UTC 27 January 2009.

위 결과들을 통하여 성층권 돌연승온 발생시에 성층권 |GWMF|의 극값이 나타나는 지역에서 추적한 레이들은 대부분 대류권에서 종료됨을 알 수 있었다. 앞으로는 각 날짜마다 대류권에서 종료된 레이들만을 대상으로 파동 원천과 관련된 지수들과 비교함으로써, 대류권의 어떤 파동 원천에 의하여 파동이 발생하였는지 파악할 것이다. 사용한 지수는 앞서 1절에서 사용한 바 있는 GPCP 일강수 자료와 600 hPa의

FF, 350 hPa의 RNBE에 더해서, 산악 원천을 고려하기 위하여 ERA-interim의 invariant 지오포텐셜 자료부터 계산해낸 고도 자료를 이용하였다.

Figure 14는 Lag = -12일 때, 대류권에 도달한 각 레이의 추적 종료 지점을 갈색 점으로 표기하고, 수평으로 반경 3°의 파란색 원을 표시한 것이다. Figure 14(a)는 500 m 이상의 산악 지형을 나타낸 것으로, 상당량의 레이가 로키 산맥 부근에서 발생했음을 알 수 있다. Figure 14(b)는 GPCP 일강수 자료를 나타낸 것으로, 북유럽 부근에서 추적 종료된 레이들은 강한 대류에 의해 발생했음을 유추할 수 있다. 한편 Figure 14(c)는 600 hPa의 FF를 나타낸 것으로, 레이 추적 종료지점에서 강한 FF가 나타나지 않았으므로, Lag = -12에서는 대류권의 전선 원천과는 유의미한 연관성을 찾을 수 없었다. Figure 14(d)는 350 hPa의 RNBE를 200 hPa 제트류와 함께 나타낸 그림이다. 레이 종료 지점 부근에서 강한 RNBE가 나타나지 않았으므로, 이 시기에 대류권 제트류는 주요한 파동 원천이 아님을 알 수 있다.

Figure 15는 Lag = -9일 때의 결과로써, 몇 개의 레이는 로키 산악 부근에서 발생하였으며, 많은 비율의 레이가 캐나다 북동쪽에 존재했던 대류와 전선 시스템에 의해 발생하였음을 알 수 있다. 뿐만아니라 대류권 제트류도 이 지역에서 가능한 중력파 원천이 될 수 있음을 Figure 15(d)를 통하여 확인할 수 있다.

Figure 16은 Lag = -6에서의 결과이며, 경도 150°W 선을 따라 길게 존재하는 대류가 성층권 중력파의 주요 원천으로 분석된다. 또한 알레스카 지역의 산맥 또한 가능한 원천임을 알 수 있다.

Figure 17은 Lag = -3의 결과로써, 두개로 나눠지기 시작한 극와동을 따라서 |GWMF|의 극값이 나타나는 지역도 두 곳으로 두렷하게 쪼개진 시기이다. 이 때, 대류권에서 종료된 레이는 티벳 고원 북쪽과 그린란드 부근의 산악 지형에서 발생하였음을 Figure 17(a)를 통해 확인할 수 있다. 한편 중국 대륙에서 추적 종료된 레이들은 강한 대류권 제트류도 가능한 파동 원천으로 고려해야함을 Figure 17(d)를 통해 파악할 수 있다.

Figure 18은 Lag = 0의 결과로, 지배적인 파동 원천이 뚜렷하게 구분되지 않고, 중국 대륙의 산맥과 로키 산맥으로 대표되는 산악 원천, 캐나다 북동쪽의 대류 및 전선 원천, 중국 대륙과 캐나다 지역의 대류권 제트류 원천을 모두 고려해야한다.

KOPRI 극지연구소

Figure 19는 극와동이 완전히 두개로 분리된 Lag = +3의 결과로, 이 시기에는 중국 대륙과 로키 산맥의 산악 원천이 중요한 원천으로 분석되며, 곳곳에 분포한 대류가 또 다른 가능한 원천이 될 수 있다.

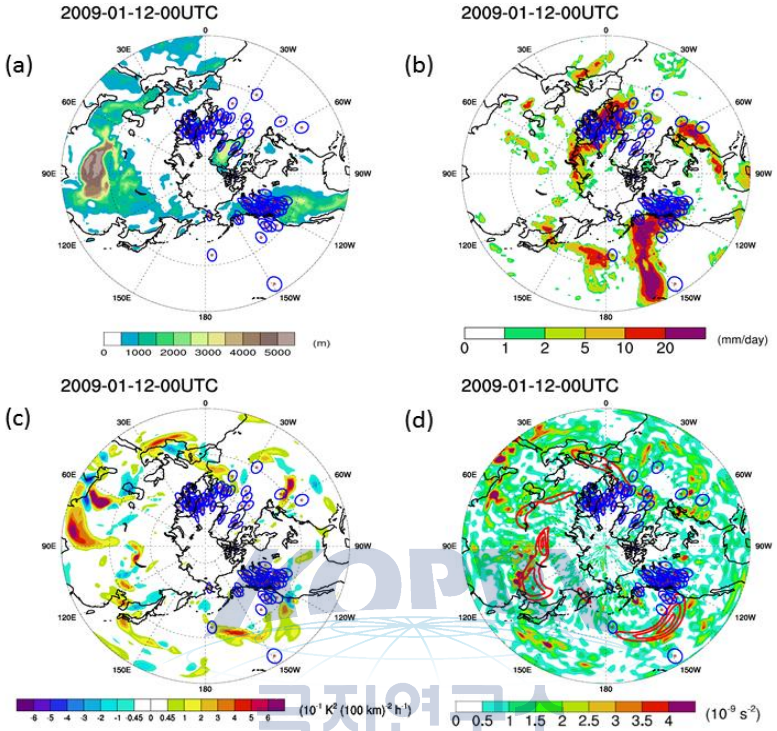


Figure 14. Polar-stereo projection maps of (a) orography, (b) GPCP daily precipitation, (c) FF at 600 hPa, and (d) RNBE at 350 hPa (shading) and horizontal wind at 200 hPa (red contour) for 00UTC 12 January 2009.

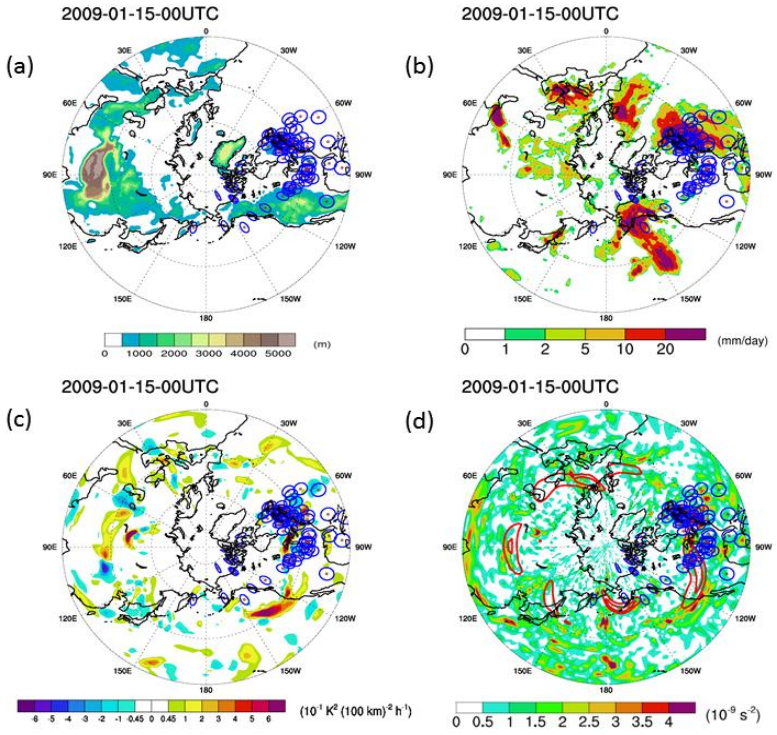


Figure 15. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 15 January 2009.

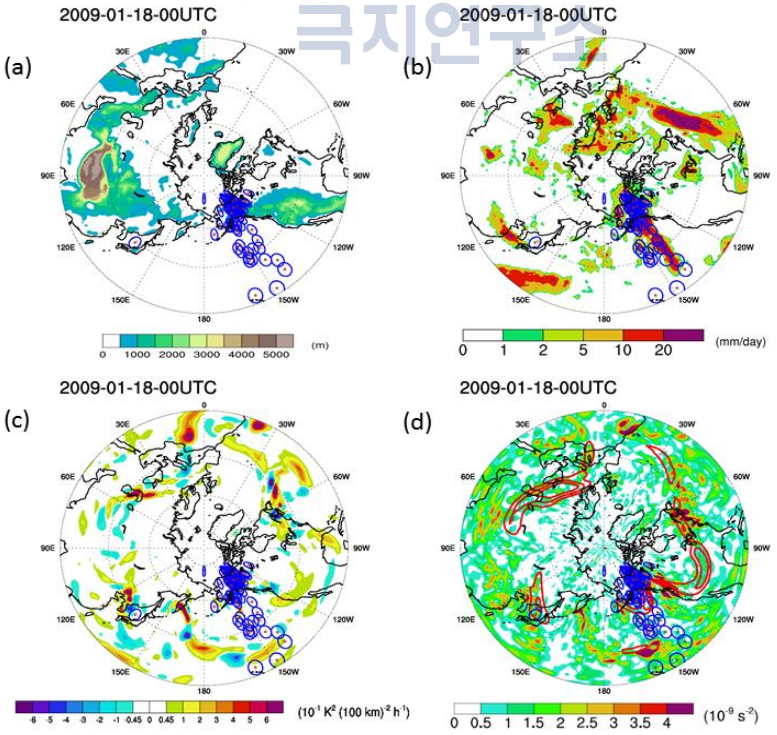


Figure 16. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 18 January 2009.

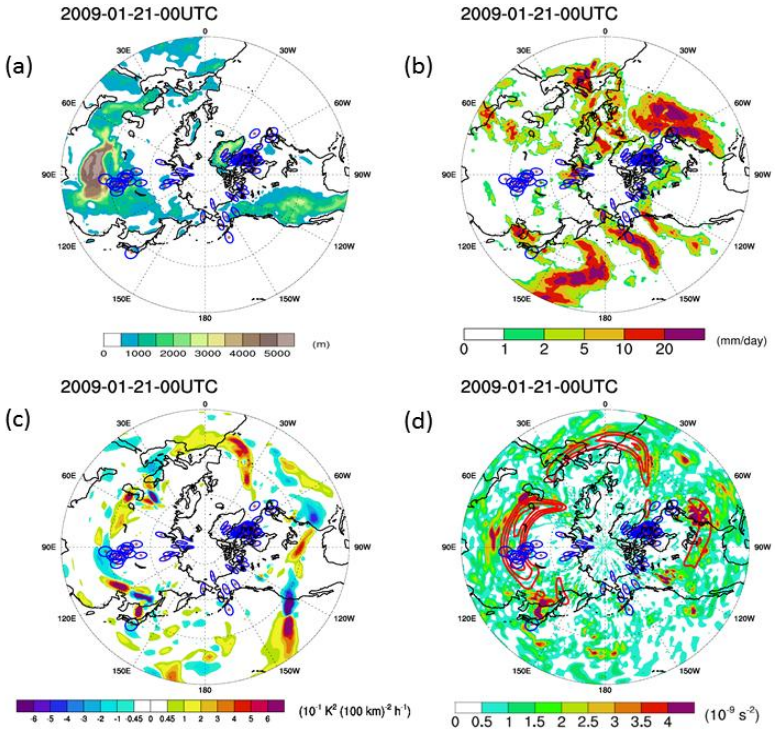


Figure 17. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 21 January 2009.

KOPRI 극지연구소

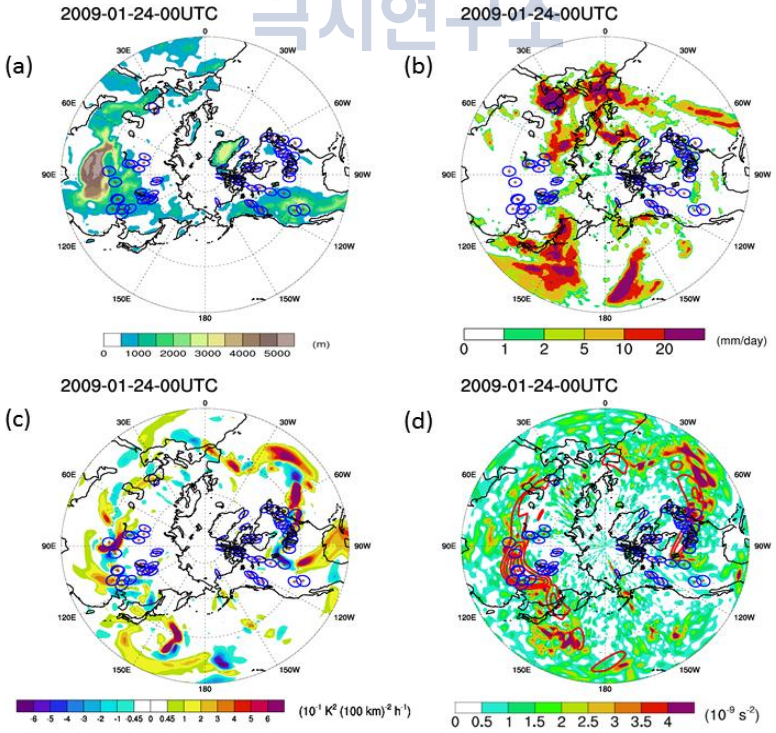


Figure 18. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 24 January 2009.

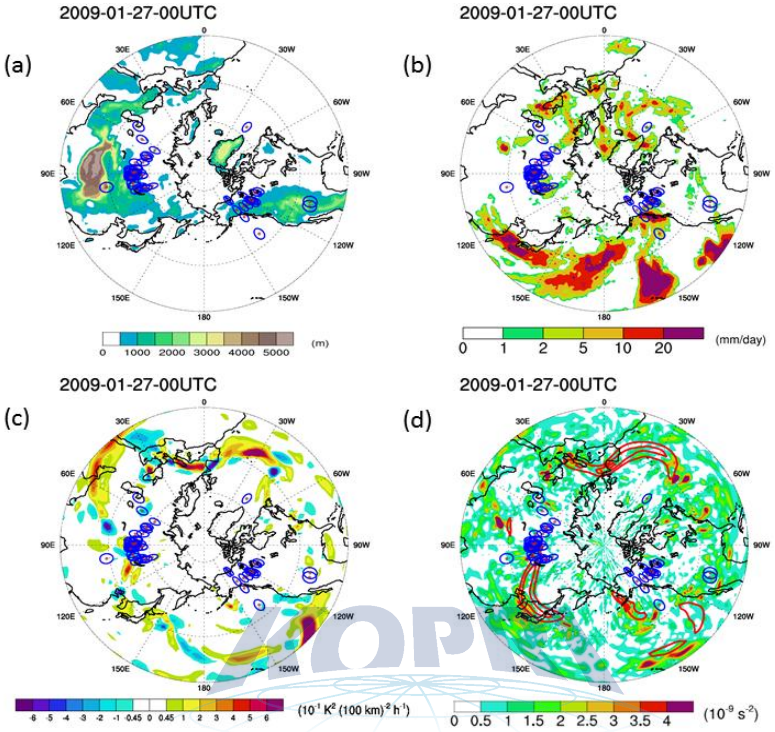


Figure 19. The same as in Fig. 14, except for 00UTC 27 January 2009.

KOPRI 극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

연구 목표별 달성도는 아래의 표에서 정리하였다.

세부연구목표	수행내용	연구기간 2016년 1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	진도율 (%)
대류권-중간대기 역학적 연계 파악	ray-tracing 모형을 이용하여 관측된 중력파 원천 파악 및 전파 이해													100%
	성층권 돌연승온 발생 전후 중력파 변동성 및 파동 원천과 전파 변화 이해													100%
	대기 중력파와 관련된 남반구 고위도의 대류권-성층권-중간권 역학 연계 파악													100%

당초계획 실 적

KOPRI 극지연구소

본 과제를 수행하면서 달성한 2016년도 연구 업적은 다음과 같다.

(1) 학술지 논문

1. Song, I.-S., C. Lee, J.-H. Kim, G. Jee, Y.-H. Kim, H.-J. Choi, H.-Y. Chun, and Y. Kim: Meteor radar observations of vertically propagating low-frequency intertia-gravity waves near the Southern polar mesopause region. *J. Geophys. Res.*, in review

2. Song, B.-G. and H.-Y. Chun: Residual Mean Circulation and Temperature Changes during the Evolution of Stratospheric Sudden Warming Revealed in MERRA, Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2016-729, in review

(2) 학술대회 발표

1. Chun, H.-Y., Y.-H. Kim, B.-G. Song, P. Preusse, and M. Ern, 2016: Gravity Waves Associated with Jet/Front System. *2016 SPARC Gravity Wave Symposium*, Pennsylvania, USA (2016. 5. 16-20)

2. Song, B.-G., H.-Y. Chun, Y.-H. Kim, C. Lee, I.-S. Song, 2016: Gravity

Waves in the Upper Mesosphere at King Sejong Station, Antarctica (62.22°S, 58.78°W) and Their Correlation with the Jet Stream. *2016 SPARC Gravity Wave Symposium*, Pennsylvania, USA (2016. 5. 16-20)

3. Song, B.-G., H.-Y. Chun, Y. H. Kim, H. Kam, C. Lee, I.-S. Song, and P. Preusse, 2016: Sources of Gravity Waves in the Upper Mesosphere at King Sejong Station, Antarctica (62.22°S, 58.78°W). *International Symposium on the Whole Atmosphere (ISWA)*, Tokyo, Japan, (2016. 9. 14-16)
4. Chun, H.-Y., M.-J. Kang, Y.-H. Kim, 2016: Convective gravity waves and their interaction with QBO. *International Symposium on the Whole Atmosphere (ISWA)*, Tokyo, Japan, (2016. 9. 14-16)
5. Yoo, J.-H., H.-Y. Chun, and T.-J. Choi, 2016: Analysis of the autosonde data observed at Jang Bogo Station (JBS), Antarctica (74.374°S, 164.137°E), *2016 KWSE/SPNN International Young Woman Scientists Camp*. Daejeon, Korea, (2016. 10. 22-23)
6. Song, B.-G., H.-Y. Chun, Y. H. Kim, I.-S. Song, P. Preusse, and H. Kam, 2016: Sources of gravity waves in the upper mesosphere observed by an all-sky airglow imager at King Sejong Station, Antarctica, 2016년도 가을 학술대회 (대기역학분과), 한국기상학회, 236-238. (2016. 10. 31 - 11. 2)

KOPRI 극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서는 세종기지에 설치된 전천 카메라 관측 자료만을 이용하여 파동 원천을 분석하였지만, 남극에 위치한 다른 과학 기지들의 자료를 이용하여 동일한 분석을 수행하면, 남극 각 지역에서의 중간권 중력파 원천의 차이를 분석할 수 있을 것이다. 한편, 유성 레이다를 통해 관측된 중간권 바람 자료로부터 도출해낸 장파 중력파 (Song et al. 2016)의 특성값을 이용하여 레이 추적을 수행하면, 세종기지 중간권 상부에서 관측된 장파 및 단파의 파동 원천 차이를 파악할 수 있을 것이며, 이를 통해 남극 반도 중간권 상부 중력파에 대한 지식을 넓힐 수 있을 것이다.

또한 극지역 중층대기의 순환과 온도를 급격하게 변화시키는 성층권 돌연승온이 발생하는 동안 중력파의 변동성을 파악하고, 파동 원천을 분석하는 연구는 본 연구에서 사용한 특정 사례 뿐만아니라 여러 돌연승온 사례 분석에 활용될 수 있으며, 드물게 발생하는 남반구의 돌연승온 사례 분석에도 응용할 수 있다.

본 연구를 통하여 도출된 결과는 현재 기후모델에 사용되는 중력파 모수화에서 가장 난제로 알려진 제트/전선 중력파 모수화 개발의 기반이 될 것이며, 궁극적으로 중력파 모수화를 통하여 보다 현실적인 기후모델 개발에 기여할 수 있을 것이다. 또한 성층권 돌연승온 과정에서 중력파가 기여하는 역할에 대한 이해도를 높임으로써 궁극적으로는 성층권 돌연승온 예보 능력의 향상을 이룰 수 있을 것이다.

KOPRI 극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서 사용한 레이 추적 모형인 Gravity Wave Regional or Global Ray Tracer (GORGRAT)과 고해상도 ECMWF 분석 자료는 독일 Julich 연구소 산하 Institute of Energy and Climate Research의 IEK-7:stratosphere 그룹으로부터 제공받았다.

KOPRI
극지연구소

제 7 장 참고문헌

Charlton, A. J., and Polvani, L. M., 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. *J. Clim.*, **20**(3), 449-469.

Charron, M., and E. Manzini, 2002: Gravity waves from fronts: parameterization and middle atmosphere response in a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **59**, 923-941.

Chun, H.-Y., and Y.-H. Kim, 2008: Secondary waves generated by breaking of convective gravity waves in the mesosphere and their influence in the wave momentum flux, *J. Geophys. Res.*, **113**, D23107, doi:10.1029/2008JD009792.

Dai, A., 2006: Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *J. Clim.*, **19**(18), 4605-4630.

Dee, D. P., and coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137**, 553-597.

Drob, D. P., J. T. Emmert, J. W. Meriwether, J. J. Makela, E. Doornbos, M. Conde, G. Hernandez, J. Noto, K. A. Zawdie, S. E. McDonald, J. D. Huba, and J. H. Klenzing, 2015: An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere, *Earth and Space Science*, **2**, 301-319, doi:10.1002/2014EA000089.

Duck, T. J., J. A. Whiteway, and A. I. Carswell, 1998: Lidar observations of gravity wave activity and Arctic stratospheric vortex core warming. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 2813-2816, doi: 10.1029/98GL02113.

——, ——, and ——, 2001: The Gravity wave-Arctic stratospheric vortex interaction. *J. Atmos. Sci,* **58**, 3581-3596.

Eckermann, S.D. and C.J. Marks, 1997: GROGRAT: A new model of the global propagation and dissipation of atmospheric gravity waves. *Adv. Space Res.* **20**, 1253-1256.

Ern, M., P. Preusse, M. J. Alexander, and C. D. Warner, 2004: Absolute values of gravity wave momentum flux derived from satellite data, *J. Geophys. Res.*, **109,** D20103, doi:10.1029/2004JD004752.

Geller, M. A., M. J. Alexander, P. T. Love, J. Bacmeister, M. Ern, A. Hertzog,

KOPRI 극지연구소

E. Manzini, P. Preusse, K. Sato, A. A. Scaife, and T. Zhou, 2013: A comparison between gravity wave momentum fluxes in observations and climate models. *J. Climate*, **26**, 6383-6405.

Harada, Y., Goto, A., Hasegawa, H., Fujikawa, N., Naoe, H., & Hirooka, T., 2010: A major stratospheric sudden warming event in January 2009. *J. Atmos. Sci.*, **67**(6), 2052-2069.

Huffman, G. J., Adler, R. F., Morrissey, M. M., Bolvin, D. T., Curtis, S., Joyce, R., McGavock, B., and Susskind, J., 2001: Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, **2**(1), 36-50.

Jia, J., P. Preusse, M. Ern, H.-Y. Chun, J. Gille, S. Eckermann, and M. Riese, 2014: Sea surface temperature as a proxy for convective gravity wave excitation: a study based on global observations in the middle atmosphere. *Ann. Geophys*, **32**, 1373-1394.

Ki, M.-O., and H.-Y. Chun, 2011: Inertia-gravity waves associated with deep convection observed during the summers of 2005 and 2007 in Korea, *J. Geophys. Res.* **116,** D16122, doi:10.1029/2011JD015684.

Kim, J.-H., H.-Y. Chun, R. Sharman, and T. Keller, 2011: Evaluations of upper-level turbulence diagnostics performance using the Graphical Turbulence Guidance (GTG) system and pilot reports (PIREPs) over East Asia, *J. Appl. Meteor. Climatol.,* **50**, 1936-1951.

Kim, Y.-H, and H.-Y., Chun, 2009: Effects of the basic-state wind on secondary waves generated by the breaking of gravity waves in the mesosphere. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.,* **45**, 1, 91-100.

Lighthill, M. J., 1978: *Waves in Fluids*. Cambridge University Press, 504 pp.

McCann, D. W. and J. P. Whistler, 2001: Problems and solutions for drawing fronts objectively, *Meteorol. Appl.*, **8**, 195-203.

Manney, G.L., Schwartz, M.J., Kruger, K., Santee, M.L., Pawson, S., Lee, J.N., Daffer, W.H., Fuller, R.A. and Livesey, N.J., 2009: Aura Microwave Limb Sounder Observations of Dynamics and Transport during the Record-Breaking 2009 Arctic Stratospheric Major Warming. *Geophy. Res. Lett.*, **36**, L12815

Moore, J. T. and W. A. Abeling, 1988: A diagnosis of unbalanced flow in upper

KOPRI 극지연구소

levels during the AVE-SESAME I period, *Mon. Weath. Rev.*, **116**, 2425-2436.

Picone, J. M., Hedin, A. E., Drob, D. P., and Aikin, A. C., 2002: NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophy. Res.: Space Physics*, **107**(A12).

Preusse, P., M. Ern, P. Bechtold, S. D. Eckermann, S. Kalisch, Q. T. Trinh,, and M. Riese, 2014: Characteristics of gravity waves resolved by ECMWF, *Atmos. Chem. Phys.*, **14**, 10483-10508.

Richter, J., F. Sassi, and R. Garcia, 2010: Toward a physically based gravity wave source parameterization in a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, **67**, 136-156.

Rienecker, M. M., and Coauthors, 2011: MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications, *J. Clim.*, 24, 3624-3648, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1

Sharman, R., C. Tebaldi, G. Wiener, and J. Wolff, 2006: An integrated approach to mid- and upper-level turbulence forecasting, *Wea. Forecasting*, **21**, 268-287.

Shiokawa, K., S. Suzuki, Y. Otsuka, T. Ogawa, T. Nakamura, and T. Horinouchi, 2007: An intense gravity wave near the mesopause region observed by a Fabry-Perot interferometer and an airglow imager. *J. Geophys. Res.*, **112**(D07), D07106, doi:10.1029/2006JD007385

Song, I.-S., G. Jee, and B.-M. Kim, 2015: Gravity Waves in Polar Mesosphere and Lower Thermosphere Revealed in a Whole-atmospheric Global Atmospheric Model. *2015 AGU Fall Meeting*. AGU.

Suzuki, S., K. Shiokawa, Y. Otsuka, T. Ogawa, K. Nakamura, and T. Nakamura, 2007: A concentric gravity wave structure in the mesospheric airglow images. *J. Geophys. Res.*, **112**, D02102, doi:10.1029/2005JD006558

Wang, L., and M. J. Alexander, 2009: Gravity wave activity during stratospheric sudden warmings in the 2007-2008 Northern Hemisphere winter. *J. Geophys. Res.* **114**, D18108, doi:10.1029/2009JD011867.

Wrasse, C. M., T. Nakamura, T. Tsuda, H. Takahashi, A. F. Medeiros, M. J. Taylor, D. Gobbi, A. Salatun, Suratno, E. Achmad, and A. G. Admiranto, 2006: Reverse ray tracing of the mesospheric gravity waves observed at

KOPRI 극지연구소

23°S (Brazil) and 7°S (Indonesia) in airglow imagers *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys,* **68,** 163-181.

Zhang, F., S. Koch, C. Davis, and M. Kaplan, 2001: Wavelet analysis and the governing dynamics of a large amplitude mesoscale gravity wave event along the east coast of the united states, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **127**, 2209-2245.

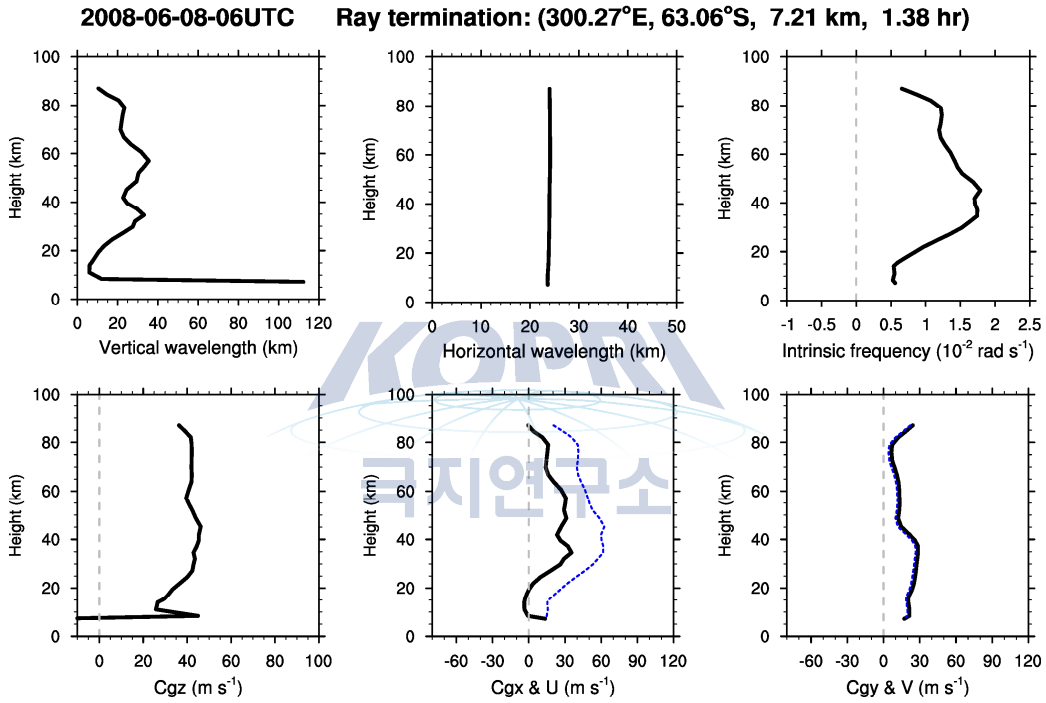
Zhang, F., 2004: Generation of Mesoscale Gravity Waves in Upper-Tropospheric Jet-Front Systems. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 440-457.

전혜영, 2013: *제트/전선이 발생시키는 중력파 모수화의 중력파 발생 진단 방안 개발*, (재)한국형수치예보모델개발사업단 연구 용역 최종보고서, 75 pp.

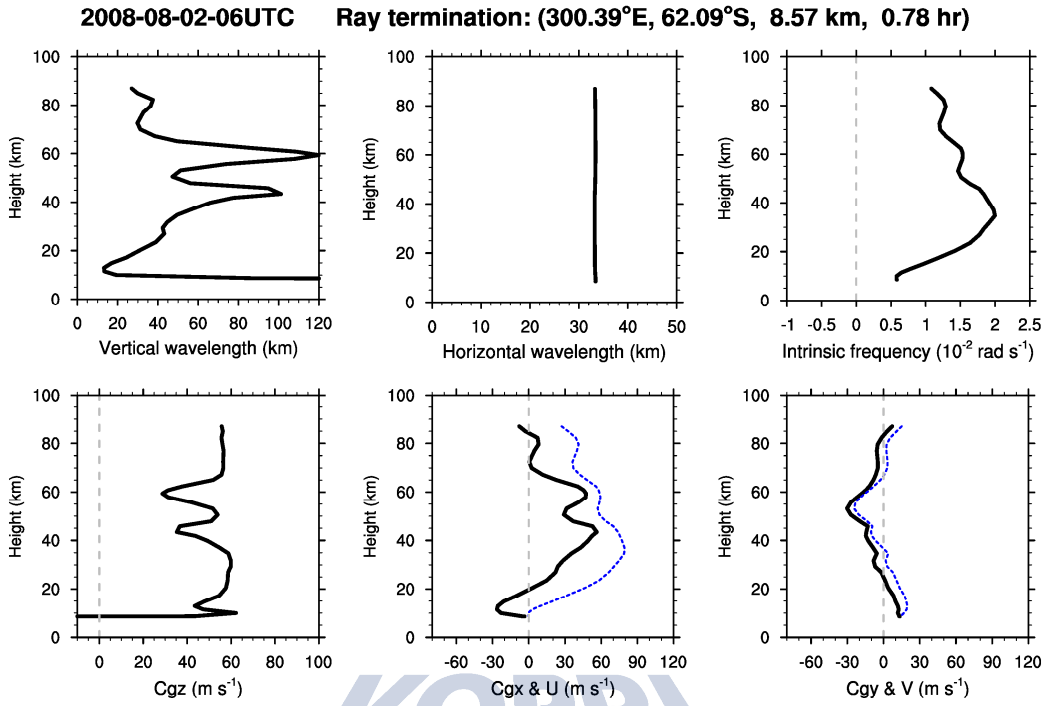
KOPRI
극지연구소

부 록

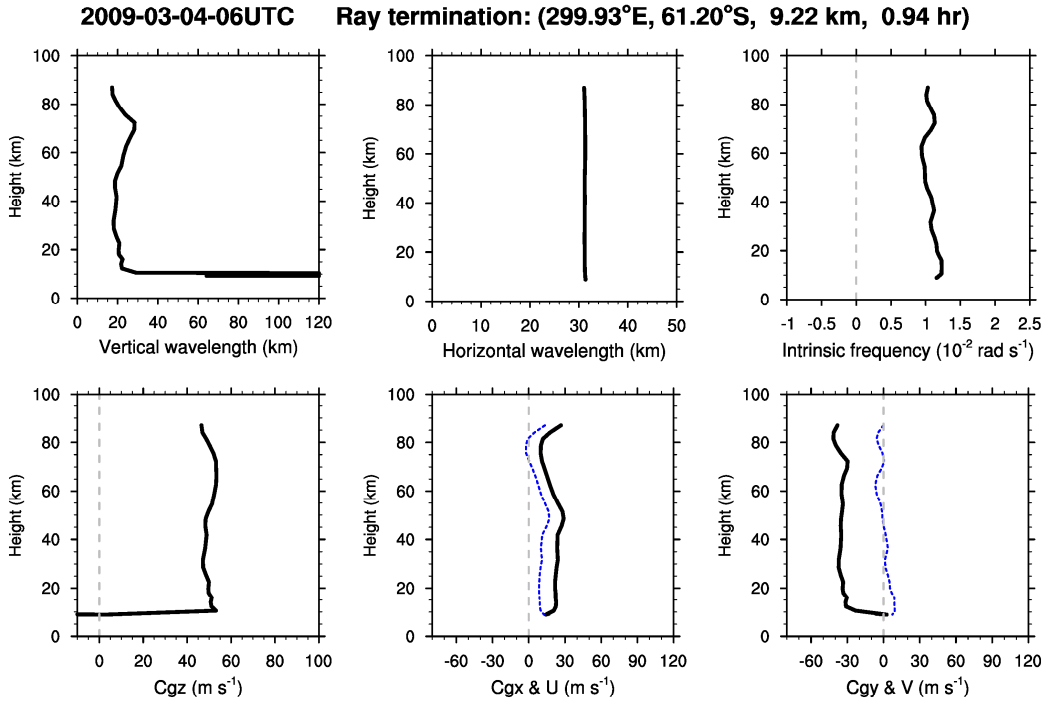
대류권에서 레이 추적이 종료되었던 총 24개의 사례에 대하여, 레이 추적을 하는 동안의 연직 파장, 수평 파장, 고유 진동수, 연직 군속도, 수평 군속도의 연직 프로파일을 수록하였다. 각 패널의 상단에는 중력파 관측 날짜와 레이 종료 지점의 경도와 위도, 고도, integration time을 표기하였다. 수평 군속도 프로파일에는 파란색 점선으로 배경 대기의 동서, 남북 바람 프로파일을 함께 나타내었다.

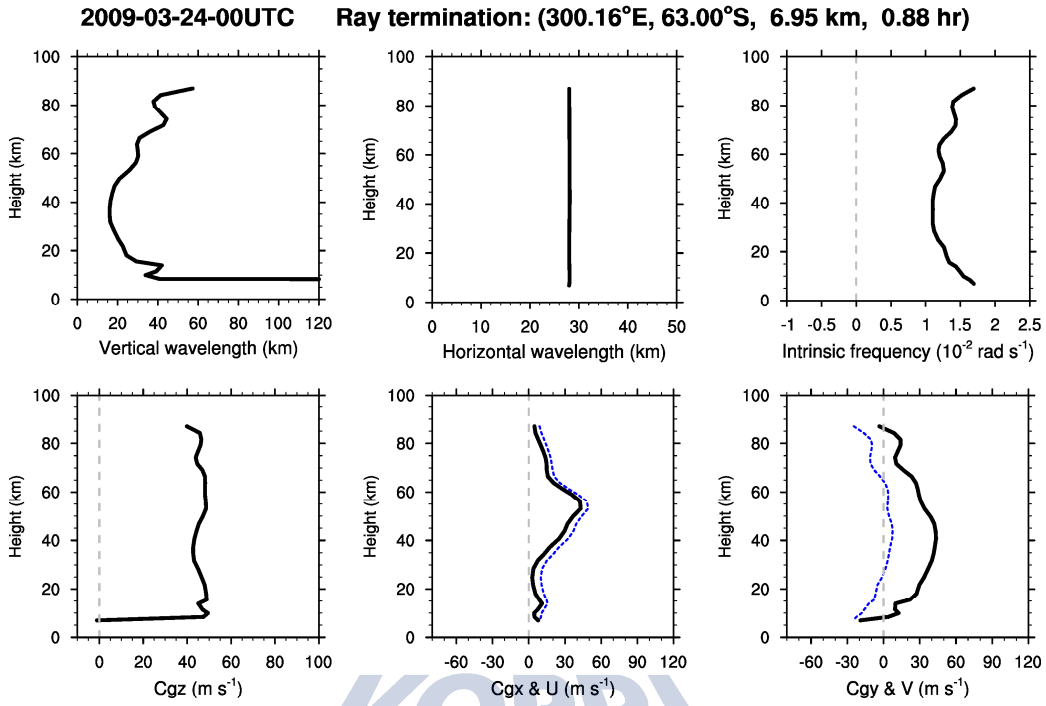


KOPRI 극지연구소

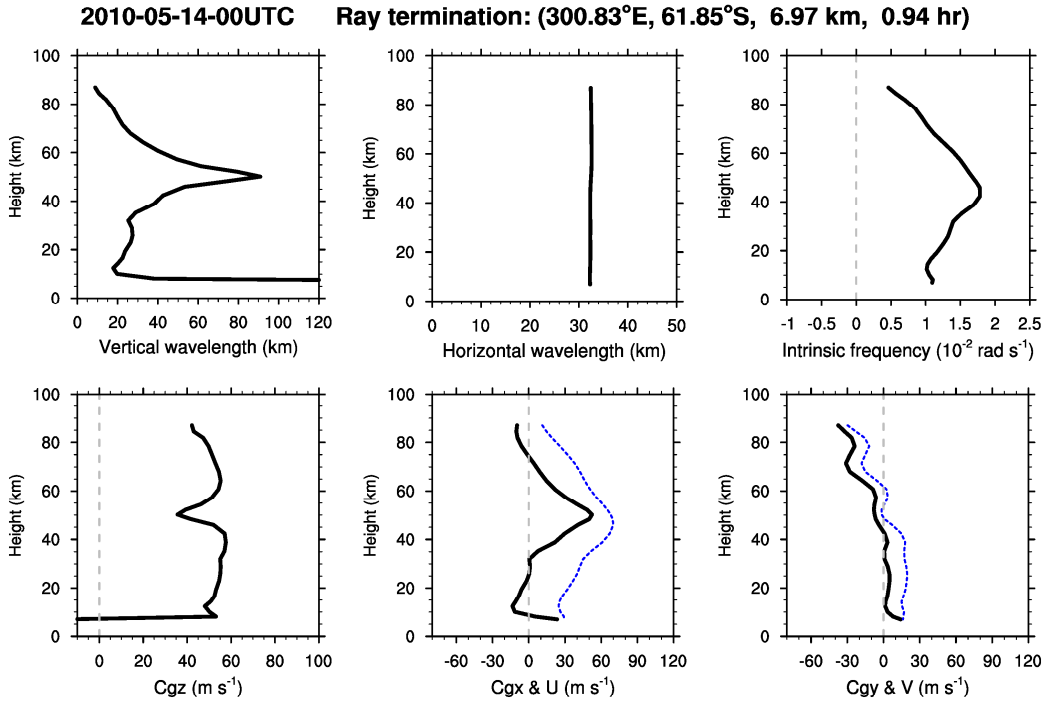

2008-08-02-06UTC Ray termination: (300.39°E, 62.09°S, 8.57 km, 0.78 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

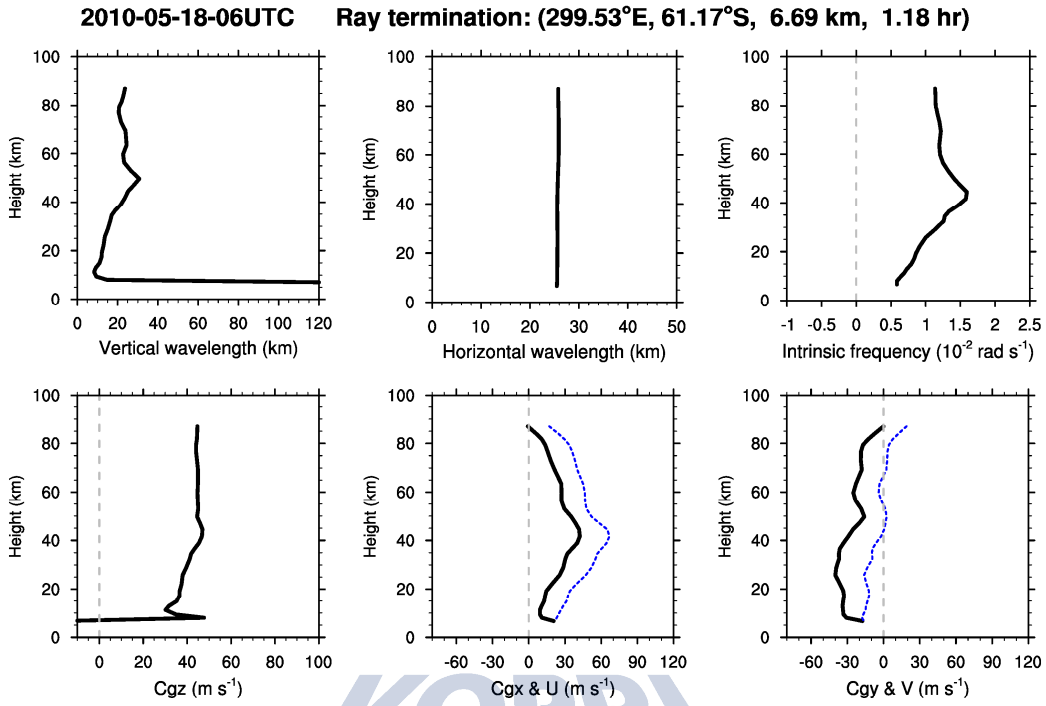
KOPRI
극지연구소


2009-03-04-06UTC Ray termination: (299.93°E, 61.20°S, 9.22 km, 0.94 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

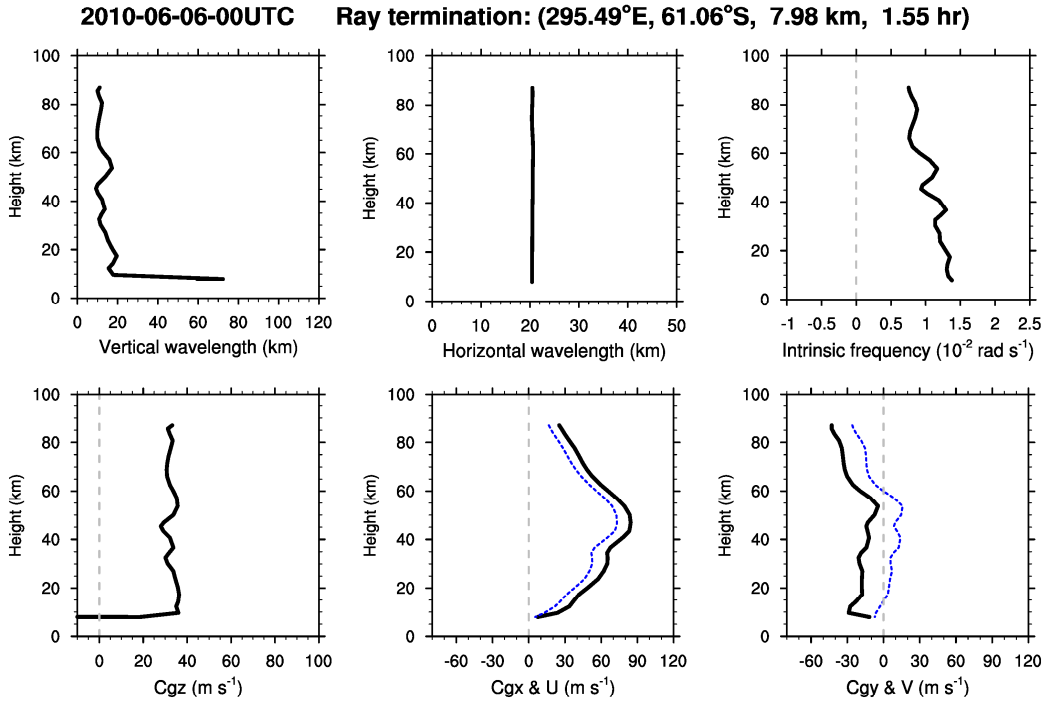

2009-03-24-00UTC Ray termination: (300.16°E, 63.00°S, 6.95 km, 0.88 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

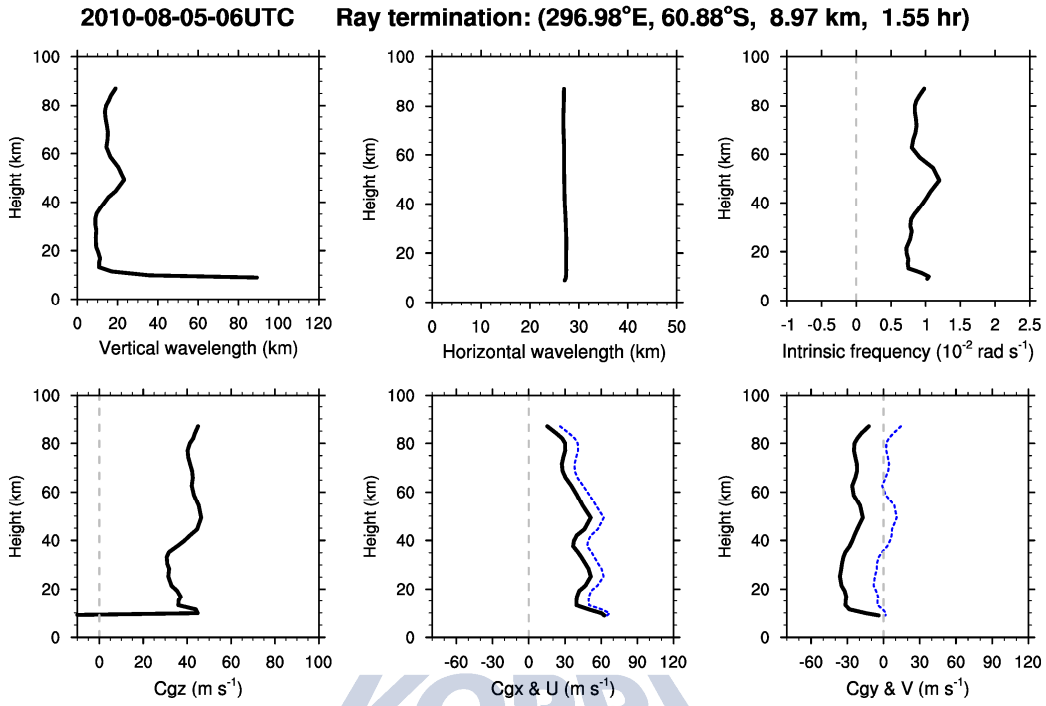
KOPRI
극지연구소


2010-05-14-00UTC Ray termination: (300.83°E, 61.85°S, 6.97 km, 0.94 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

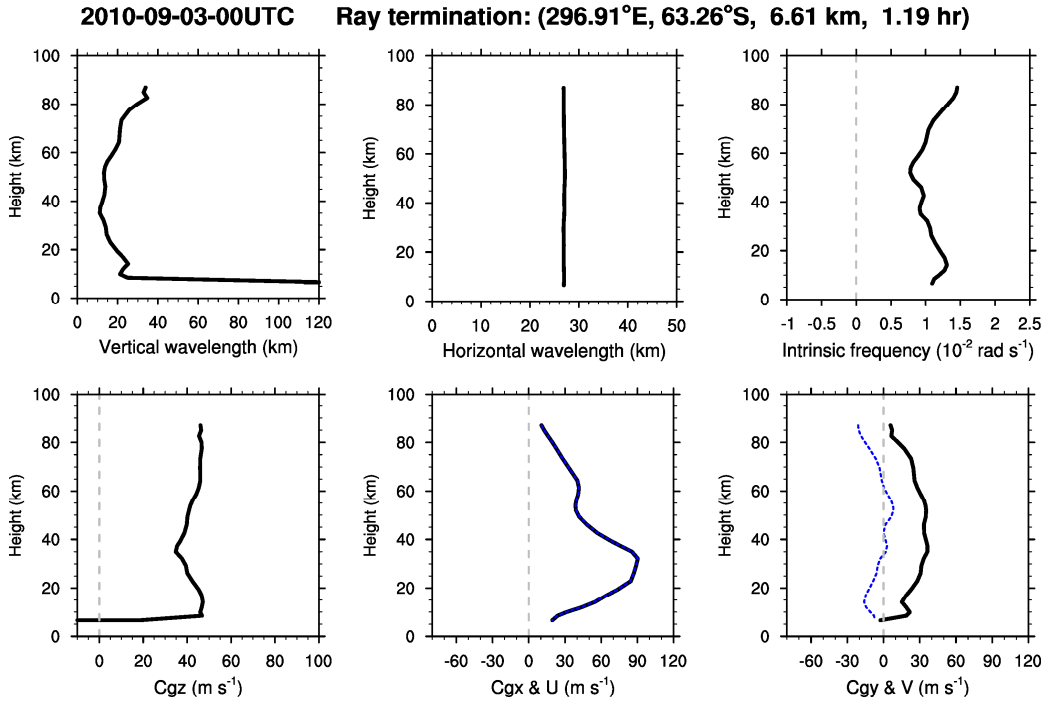

2010-05-18-06UTC Ray termination: (299.53°E, 61.17°S, 6.69 km, 1.18 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

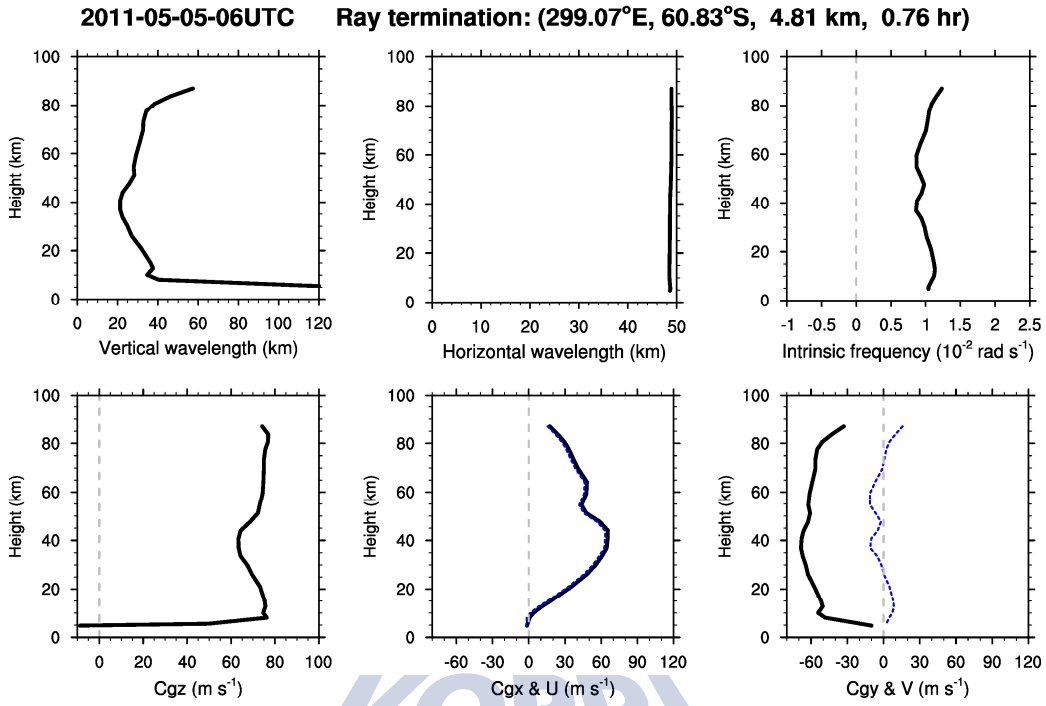
KOPRI
극지연구소


2010-06-06-00UTC Ray termination: (295.49°E, 61.06°S, 7.98 km, 1.55 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

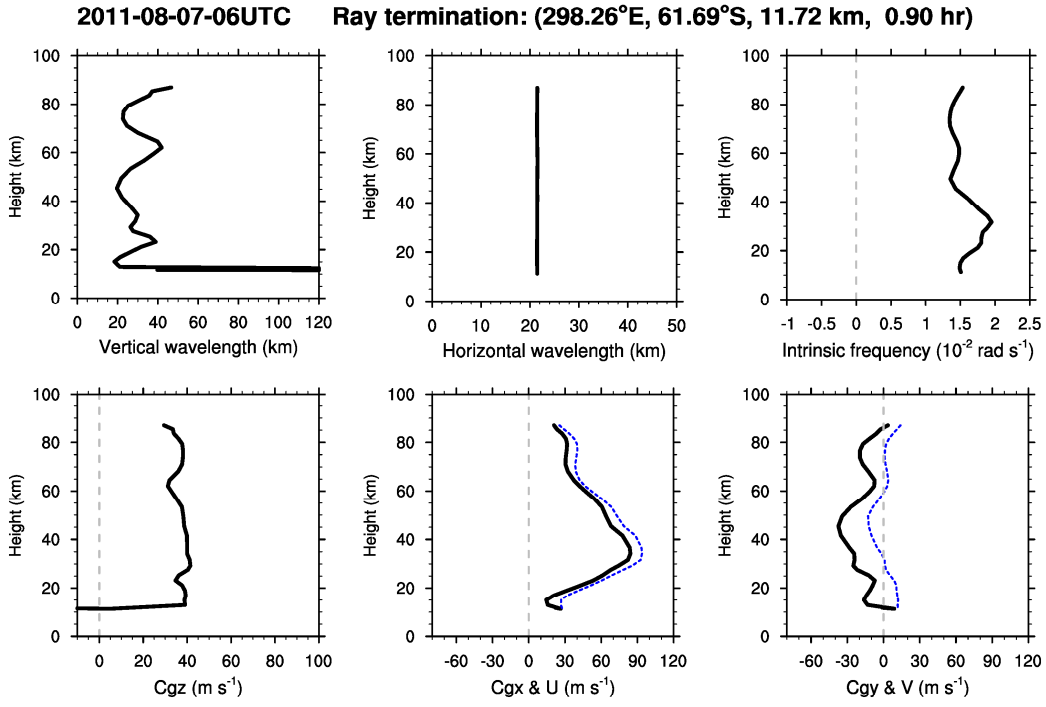

2010-08-05-06UTC Ray termination: (296.98°E, 60.88°S, 8.97 km, 1.55 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

KOPRI
극지연구소

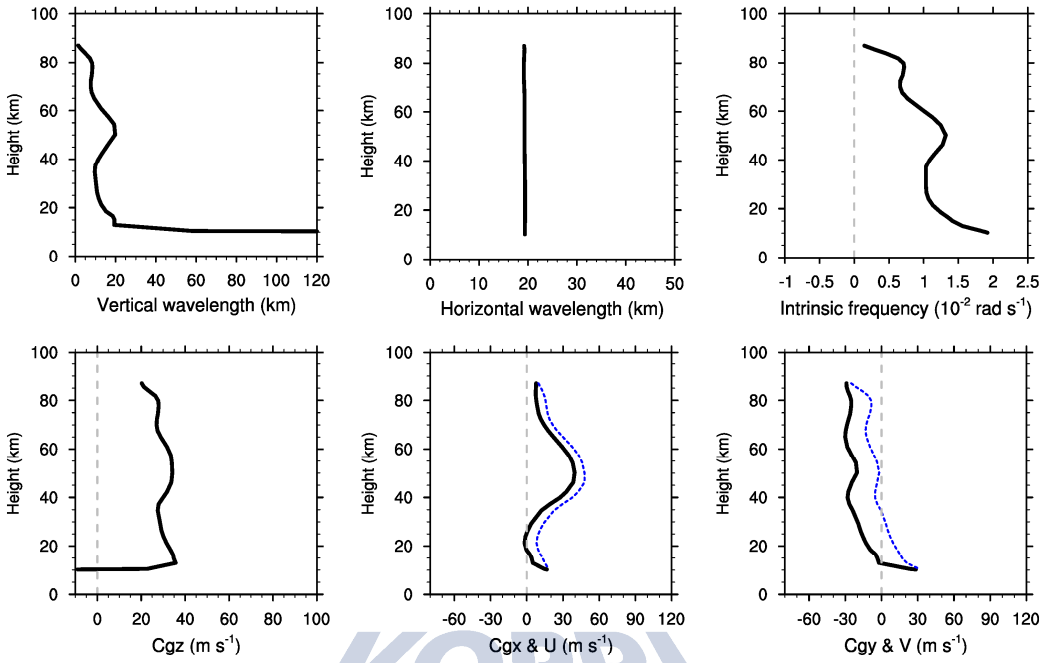

2010-09-03-00UTC Ray termination: (296.91°E, 63.26°S, 6.61 km, 1.19 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)


2011-05-05-06UTC Ray termination: (299.07°E, 60.83°S, 4.81 km, 0.76 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

KOPRI
극지연구소

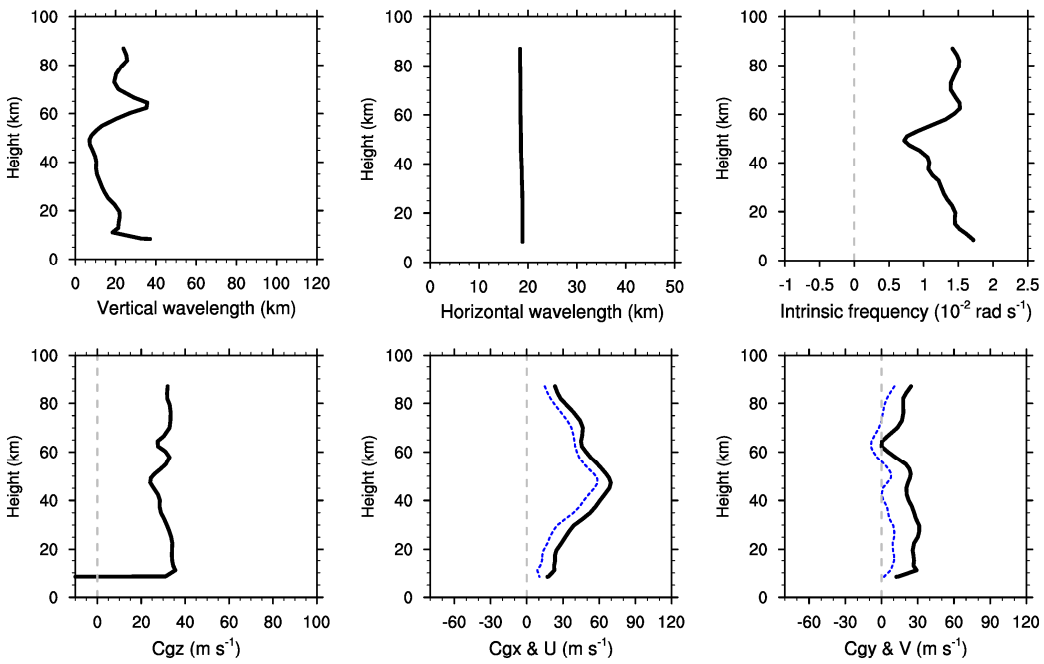

2011-08-07-06UTC Ray termination: (298.26°E, 61.69°S, 11.72 km, 0.90 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

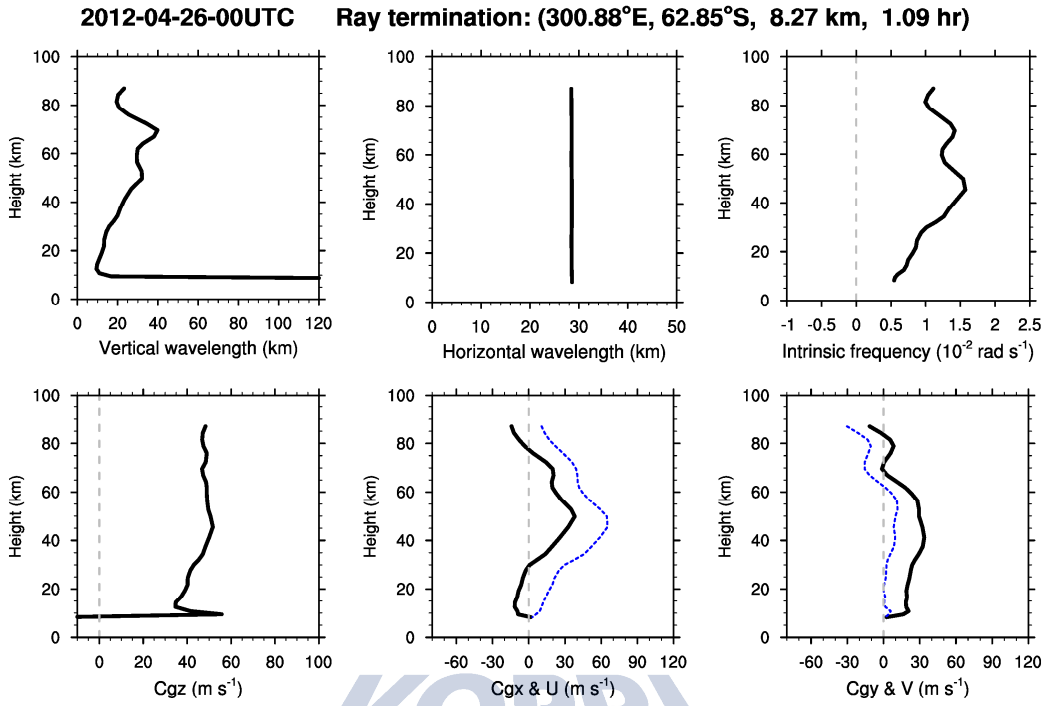
2012-03-23-00UTC Ray termination: (298.99°E, 60.12°S, 10.20 km, 2.61 hr)



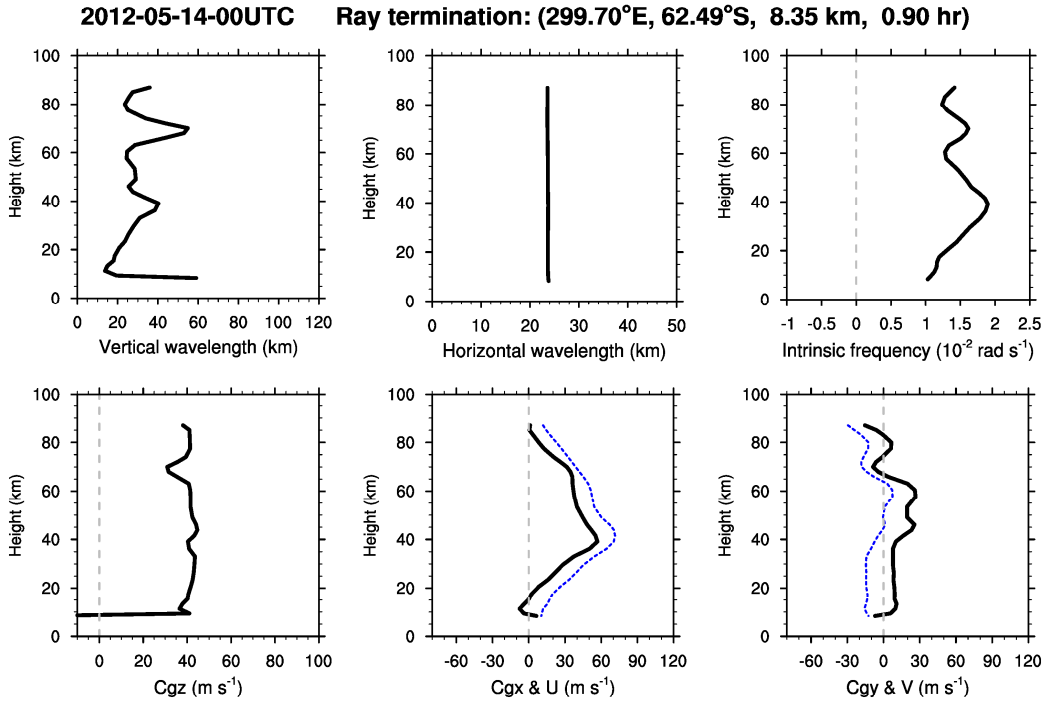
KOPRI
극지연구소

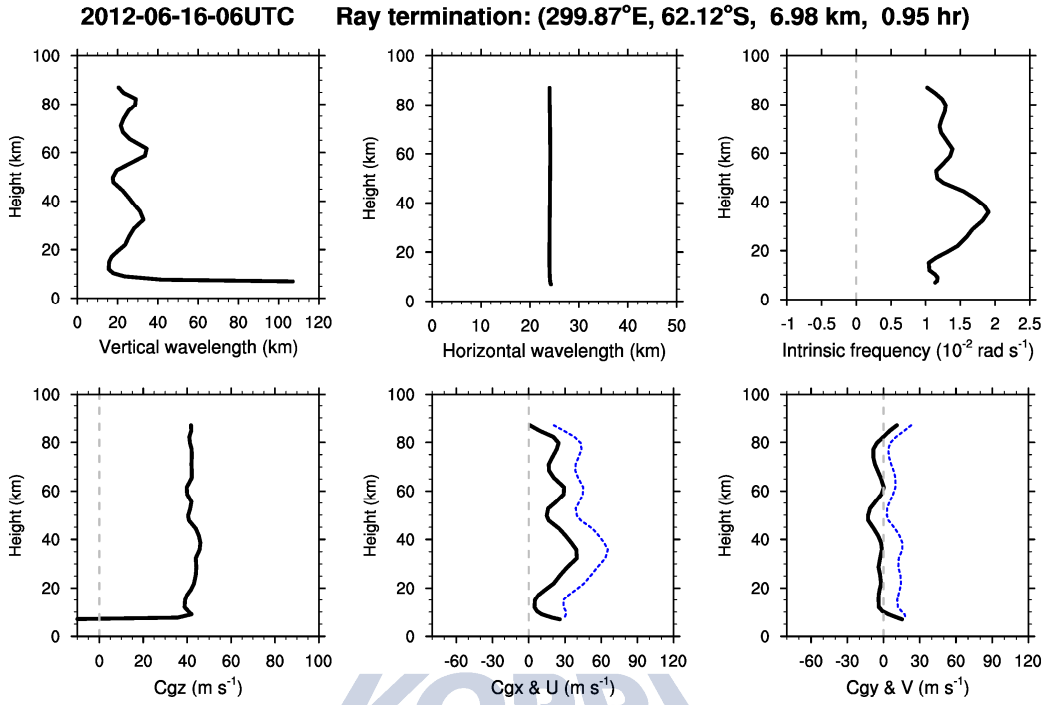
2012-04-20-06UTC Ray termination: (296.66°E, 63.13°S, 8.38 km, 1.38 hr)



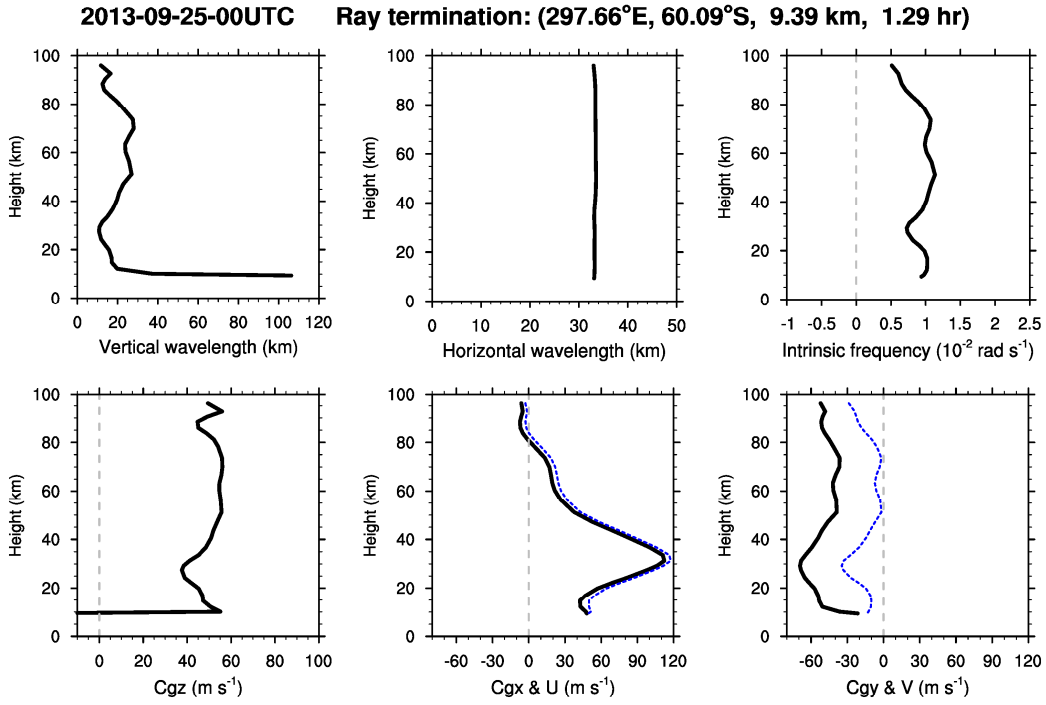

2012-04-26-00UTC Ray termination: (300.88°E, 62.85°S, 8.27 km, 1.09 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10-2 rad s-1)
Cgz (m s-1)
Cgx & U (m s-1)
Cgy & V (m s-1)

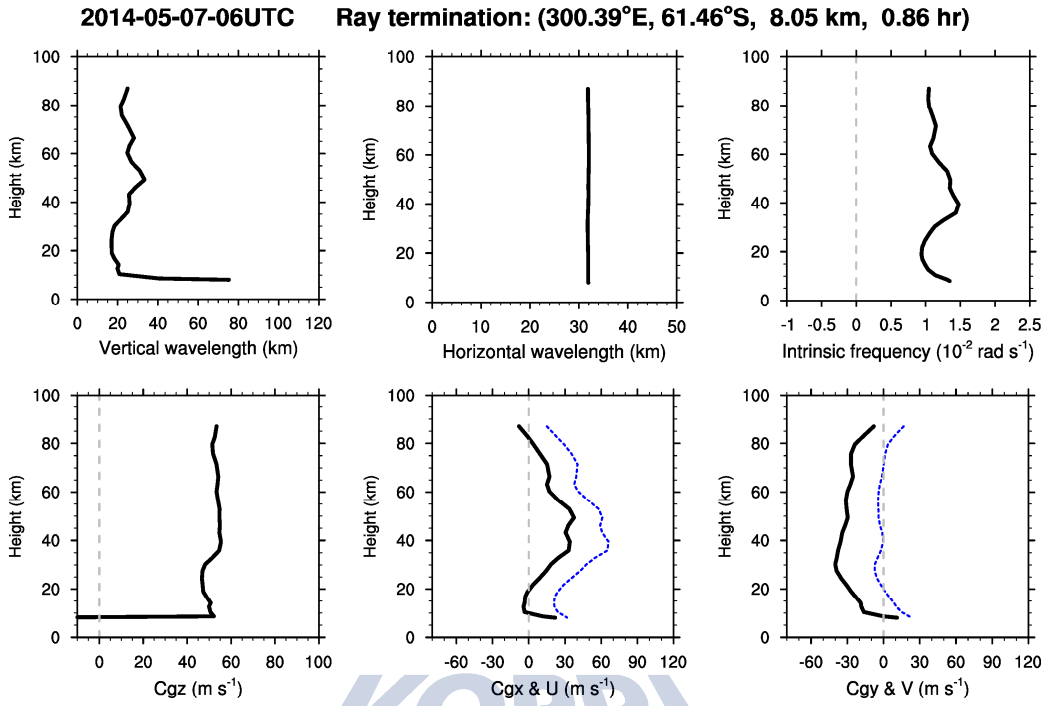
KOPRI
극지연구소


2012-05-14-00UTC Ray termination: (299.70°E, 62.49°S, 8.35 km, 0.90 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10-2 rad s-1)
Cgz (m s-1)
Cgx & U (m s-1)
Cgy & V (m s-1)

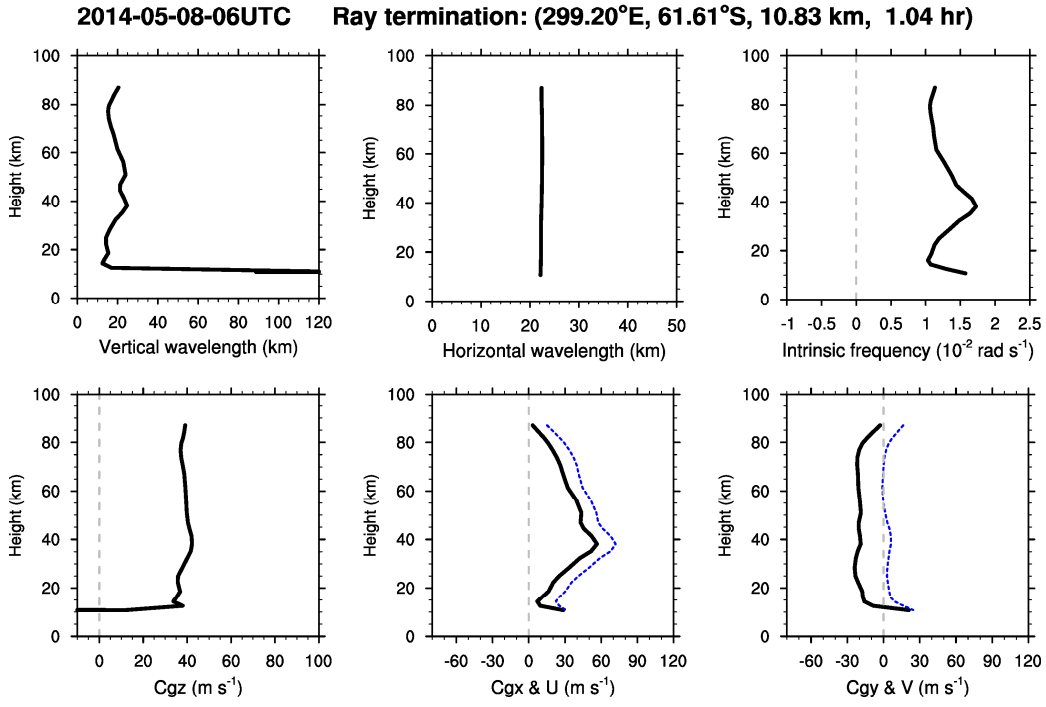

2012-06-16-06UTC Ray termination: (299.87°E, 62.12°S, 6.98 km, 0.95 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

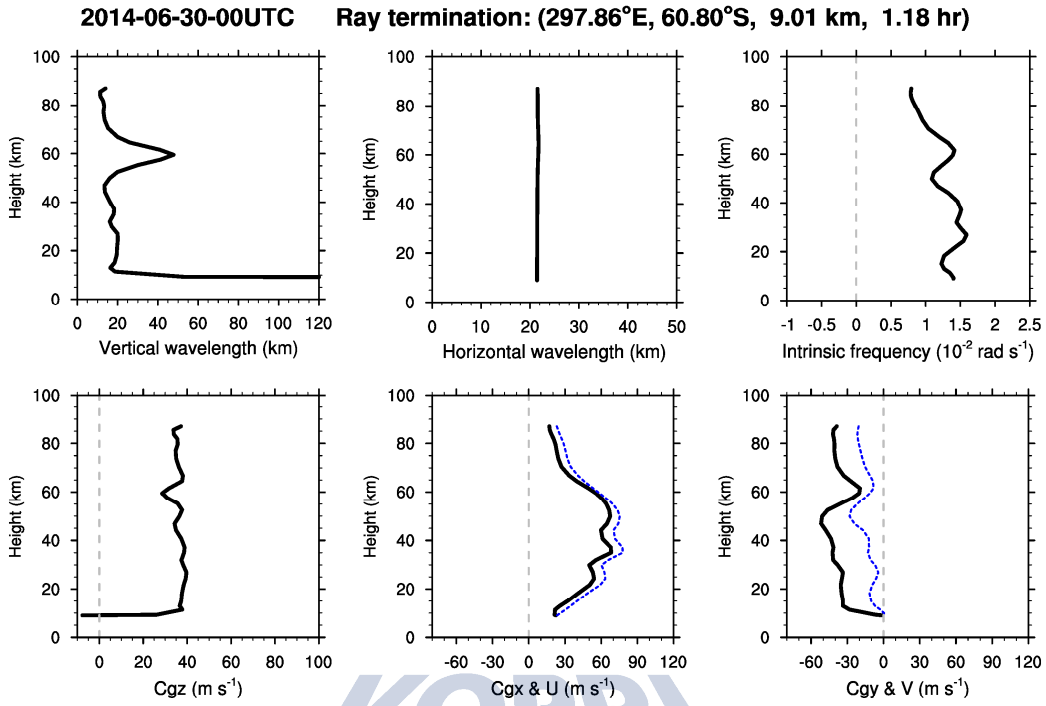
KOPRI
극지연구소


2013-09-25-00UTC Ray termination: (297.66°E, 60.09°S, 9.39 km, 1.29 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

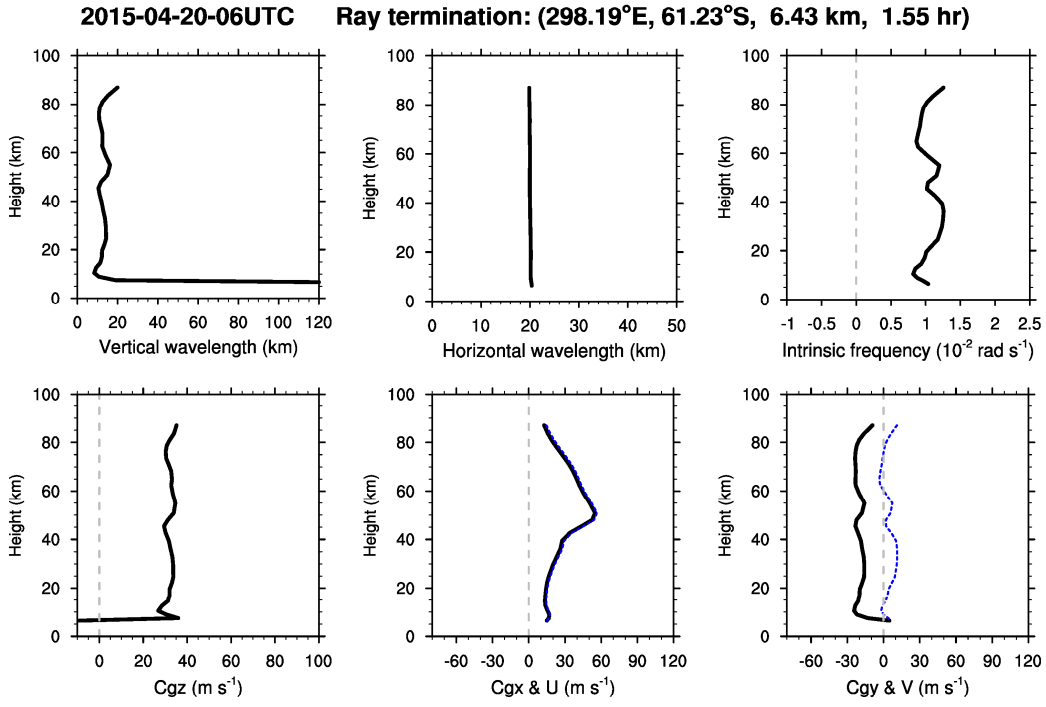

2014-05-07-06UTC Ray termination: (300.39°E, 61.46°S, 8.05 km, 0.86 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

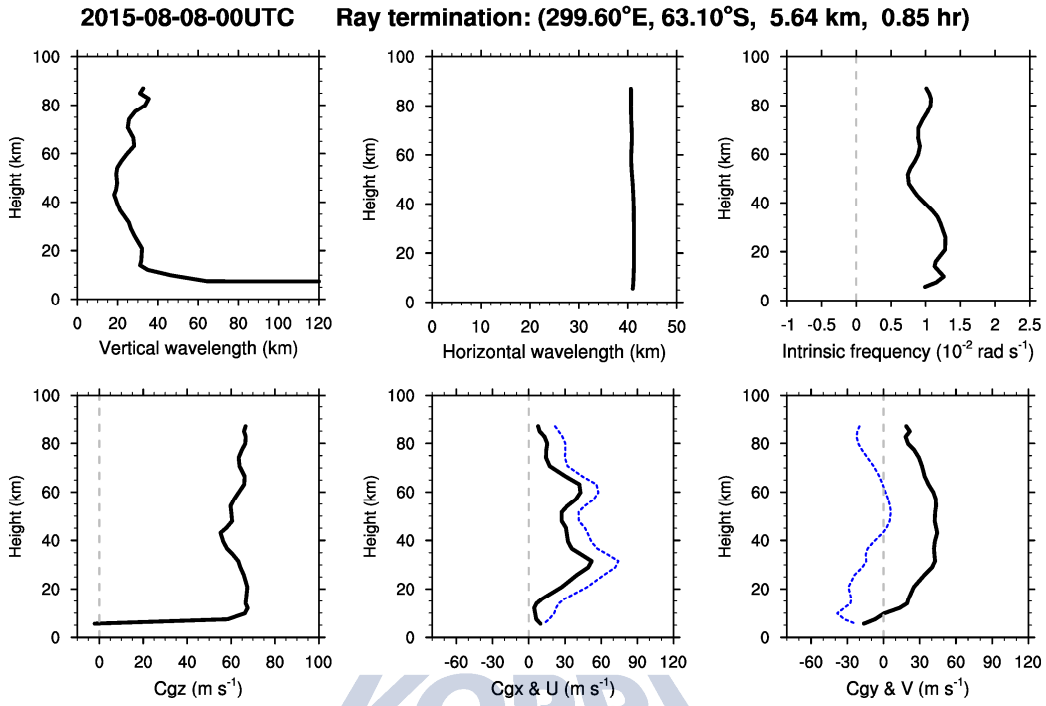
KOPRI
극지연구소


2014-05-08-06UTC Ray termination: (299.20°E, 61.61°S, 10.83 km, 1.04 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

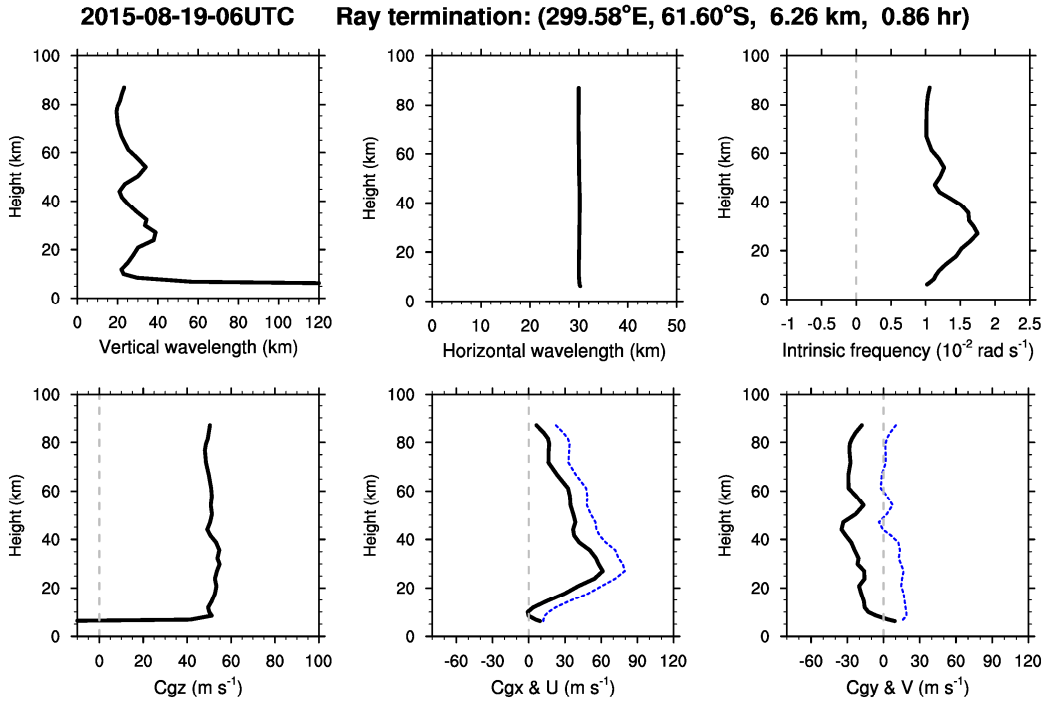

2014-06-30-00UTC Ray termination: (297.86°E, 60.80°S, 9.01 km, 1.18 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

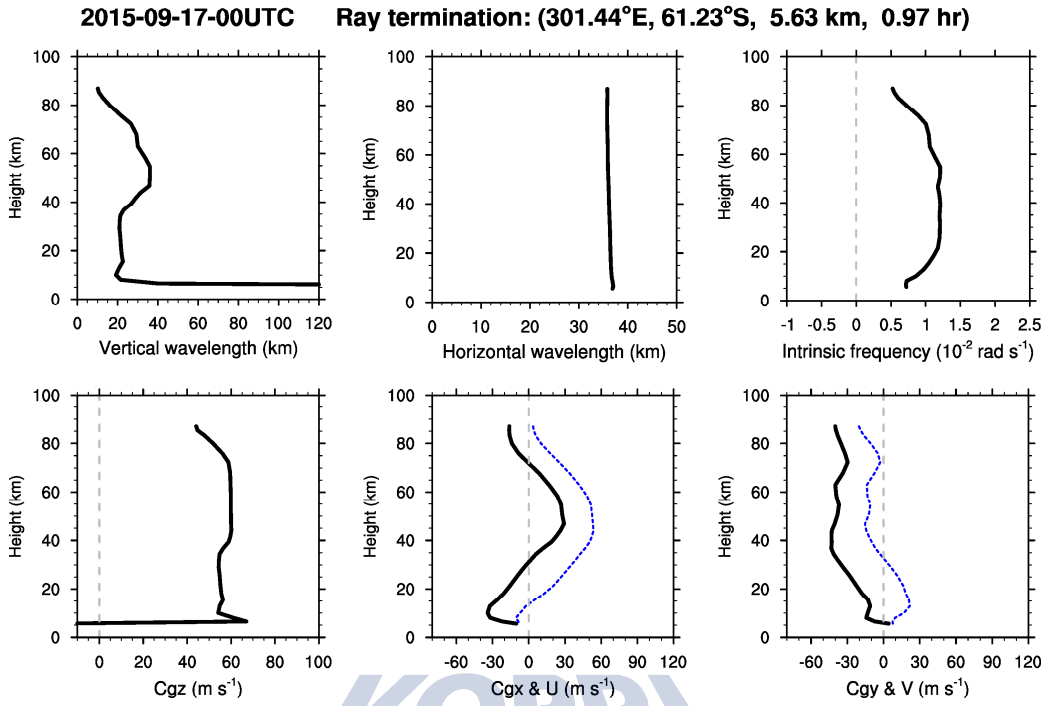
KOPRI
극지연구소


2015-04-20-06UTC Ray termination: (298.19°E, 61.23°S, 6.43 km, 1.55 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)


2015-08-08-00UTC Ray termination: (299.60°E, 63.10°S, 5.64 km, 0.85 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

KOPRI
극지연구소


2015-08-19-06UTC Ray termination: (299.58°E, 61.60°S, 6.26 km, 0.86 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)


2015-09-17-00UTC Ray termination: (301.44°E, 61.23°S, 5.63 km, 0.97 hr)
Height (km)
Vertical wavelength (km)
Horizontal wavelength (km)
Intrinsic frequency (10^-2 rad s^-1)
Cgz (m s^-1)
Cgx & U (m s^-1)
Cgy & V (m s^-1)

KOPRI
극지연구소

KOPRI
극지연구소

주 의

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