

전천 카메라와 페브리-페로 간섭계 자료를 이용한 한반도 상공 중간권 중량파의 고유파동계수 및 운동량 플럭스 산출

정종균^{1†}, 김용하², 원영인³, 지건화⁴

¹한국천문연구원 지구관측연구그룹

²충남대학교 천문우주학과

³Goddard Space Flight Center, NASA

⁴한국해양연구원 부설 극지연구소

ESTIMATION OF INTRINSIC WAVE PARAMETERS AND MOMENTUM FLUXES OF MESOSPHERIC GRAVITY WAVES OVER KOREA PENINSULA USING ALL-SKY CAMERA AND FABRY-PEROT INTERFEROMETER

Jong-Kyun Chung^{1†}, Yong Ha Kim², Young-In Won³, and Gunhwa Jee⁴

¹EOS Research Group, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Dept. of Astronomy & Space Science, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, MD 20770, USA

⁴Korea Polar Research Institute, Incheon 406-840, Korea

E-mail: jkchung@kasi.re.kr

(Received October 11, 2007; Accepted November 07, 2007)

요 약

보현산(36.2° N, 128.9° E)의 전천카메라로 관측한 OI 557.7nm 밤대기광 방출선에 나타난 단주기 중량파의 운동량 플럭스가 산출되었다. 중량파의 고유위상속도(C_{int}), 고유주기(τ_{int}), 그리고 수직파장(λ_z)는 전천 화상에서 도출된 수평파장(λ_h), 관측파동주기(τ_{ob}), 진행방향(ϕ_{ob}), 관측위상속도(v_{ob})와 일본 Shigaraki(34.8° N, 13.1° E) 페브리-페로 간섭계로부터 관측된 중성바람으로부터 유도되었다. 2002년부터 2006년까지 두 관측소의 기상 및 관측 장비 상태를 고려한 결과 총 5일이 분석 가능일로 선택되었다. 중량파 고유파동계수의 평균값은 $(\tau_{int}) = 12.9 \pm 6.1$ m/s, $(\lambda_z) = 12.9 \pm 6.5$, $(C_{int}) = 40.6 \pm 11.6$ min으로 나타났다. $\lambda_z < 6$ km인 경우를 제외하고 4일에 대한 계산된 운동량 플럭스의 값은 12.0 ± 15.2 m²/s²이다. 중간권 중량파의 전형적인 운동량 플럭스를 획득하기 위하여 전천 카메라와 중성바람을 측정할 수 있는 장비와의 장기간에 걸친 연계관측이 요구된다.

ABSTRACT

We estimate the momentum fluxes of short-period gravity waves which are observed in the OI 557.7 nm nightglow emission with all-sky camera at Mt. Bohyun (36.2° N, 128.9° E) in Korea. The intrinsic phase speed (C_{int}), the intrinsic period (τ_{int}), and vertical wavelength (λ_z) are also deduced from the horizontal wavelength (λ_h), observed period (τ_{ob}), propagation direction (ϕ_{ob}), observe phase speed (v_{ob}) of the gravity wave on the all-sky images. The neutral winds to deduce intrinsic wave parameters are measured with Fabry-Perot interferometer on Shigaraki (34.8° N,

[†]corresponding author

13.1° E) in Japan. We selected 5-nights of observations during the period between July 2002 and December 2006 considering of the weather and instrument conditions in two observation sites. The mean values of intrinsic parameter of gravity waves are $(\tau_{int}) = 12.9 \pm 6.1$ m/s, $(\lambda_z) = 12.9 \pm 6.5$, and $(C_{int}) = 40.6 \pm 11.6$ min. The mean value of calculated momentum fluxes for four nights besides of $\lambda_z < 6$ km is 12.0 ± 15.2 m²/s². It is needed the long-term coherent observation to obtain typical values of momentum fluxes of the mesospheric gravity waves using all-sky camera and the neutral wind measurements.

Keywords: gravity wave, intrinsic wave parameters, momentum flux

1. 서 론

중간권 및 열권 하부(Mesosphere and Low Thermosphere, MLT) 지역은 태양 X-선 및 극자외선 복사 흡수와 자기권으로부터 유입되는 고에너지 입자 충돌 이외에도 지구 내부의 대류층과 성층권에서 발생한 중량파(gravity wave)와 대기 열적 조석파(atmospheric thermal tide)의 운동량과 에너지에 의해서 온도, 밀도, 바람, 구성성분의 변화가 발생하는 것으로 알려져 있다(Swenson & Gardner 1998, Liu & Swenson 2003). Vincent(1984)는 Adelaide(남위 35°, 동경 138°)에서 MF 레이더로 65 ~ 100km 고도 사이의 중성바람을 관측하여, 0.1 ~ 20시간 주기를 갖는 대기파동 중에서 에너지 플럭스의 70%가 1시간 이하 주기의 중량파에 의해 발생했음을 발표하였다. Tang et al.(2005)은 하와이에서 전천 카메라(all-sky camera)와 유성 레이더(Meteor radar)를 이용하여 계절에 따른 운동량 플럭스 방향성의 원인으로 중량파 발생 고도인 대류권 하부부터 관측 고도인 중간권 상부 사이의 바람 방향에 의해 결정되는 것으로 발표하였다. 중량파에 의한 대류권 및 성층권으로부터 MLT 지역으로의 운동량 전달은 고층대기의 동역학적 변화에 주요한 원인으로 작용하기 때문에 이에 대한 정량화가 요구되며, 이는 전 지구적 고층대기 동역학적 현상에 대한 이해를 높일 것이다.

이와 같이 MLT 지역에 큰 영향을 미치는 1시간 이하 주기 중량파의 대부분은 수 십 km의 수평 파장과 수 십 분의 주기를 갖는 것으로 알려져 있다(Smith et al. 2000, 정중균 2005). 대기 조석파가 대류층 수증기와 성층권 오존의 태양 복사 흡수에 의해 발생하기 때문에 위도와 고도에 따라서 24시간 조화주기를 갖고 비교적 규칙적으로 발생하는 것에 비해, 중량파는 국부적 지역에서 주기의 대부분이 1시간 이하의 일정하지 않는 주기와 불규칙적인 발생 빈도를 갖는 특징을 보인다. 이는 중량파의 발생 원인이 대류층의 강한 대류나 전선대와 같은 불규칙한 기상학적 현상, 산이나 산맥과 같은 지형적 요소, 지자기 폭풍 기간 동안의 오로라 지역의 열적 팽창인 것과 관련된 것으로 알려져 있다(Taylor & Hapgood 1988, Swenson & Espy 1995). 대류권의 강한 대류활동에 의해 발생한 중량파는 연직 방향으로 진행하면서 소멸한 후에 2차 중량파로 발생되어 중간권 상부 및 열권 하부에서 관측되는 것으로 알려져 있다(Snively & Pasko 2003).

중량파의 발생빈도 및 특성이 시간과 지역에 따라 다르기 때문에 다양한 지역에서의 관측과 분석은 MLT 지역의 온도 및 동역학적 구조를 이해하기 위하여 필요하다. 우리나라는 2001년부터 2006년 사이에 극지연구소와 충남대학교는 한국천문연구원 보현산 천문대(36.2° N, 128.9° E)에 전천 카메라

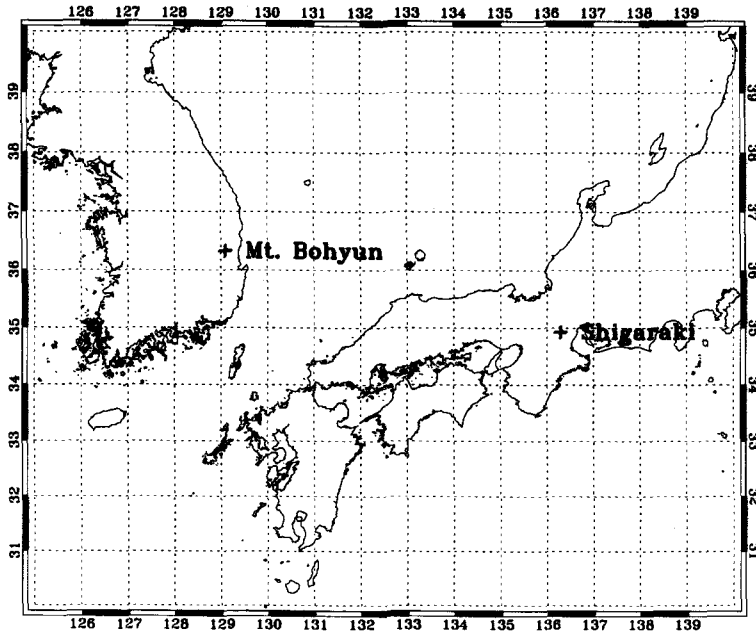


그림 1. 보현산 전천 카메라 관측소(36.2° N, 128.9° E)와 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계 관측소(34.8° N, 136.1° E)의 지리적 위치.

라 관측소를 설치하여 한반도 상공 MLT 지역 중량파 관측을 수행하였다. 그 결과 한반도 상공 중량파의 계절에 따른 진행방향 경향과 수평과장 및 주기, 진행 속도 등이 통계적으로 분석되었다(Chung et al. 2003, 정중균 2005).

전천 카메라는 MLT 지역 밤대기광의 2차원 영상을 연속적으로 촬영하기 때문에 중량파의 진행 방향과 발생 빈도를 비교적 정확하고 효율적으로 기록할 수 있다. 그러나 전천 영상에 나타난 중량파는 중성바람에 의해 진행 속도가 변화하므로, 대류권에서 진행되어 MLT 지역까지 올라온 중량파의 특성을 알기 위해서는 중성바람 관측을 통한 보정이 필요하다. Swenson & Liu(1998)은 전천 카메라로 관측된 OH 밤대기광의 2차원 영상에 나타난 중량파에서 중성바람을 보정한 후, 해석적 모델을 사용하여 운동량 플럭스를 계산하였다.

Swenson et al.(1999)이 제시한 방법을 바탕으로 하여 보현산 전천 카메라 관측소에서 2002년부터 2004년 사이에 관측된 중량파의 고유과동계수를 결정하여 운동량 플럭스를 계산하였다. 중량파 운동량 플럭스 계산에 필요한 고유과동계수는 보현산과 지리적으로 가장 인접한 일본 Shigaraki(34.8° N, 136.1° E) 페브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer, FPI)에서 관측된 중성대기 바람 관측 자료를 사용하였다. 그림 1은 보현산 전천 카메라 관측소와 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계 관측소의 위치를 나타낸다. 본 논문에서 기술하는 MLT 지역 중량파의 정량화 과정과 산출된 과동 계수는 향후 전천 카메라와 중성바람을 이용한 고층대기의 동역학적/열역학적 특성을 이해하기 위한 중요한 방법으로 제시될 것이다.

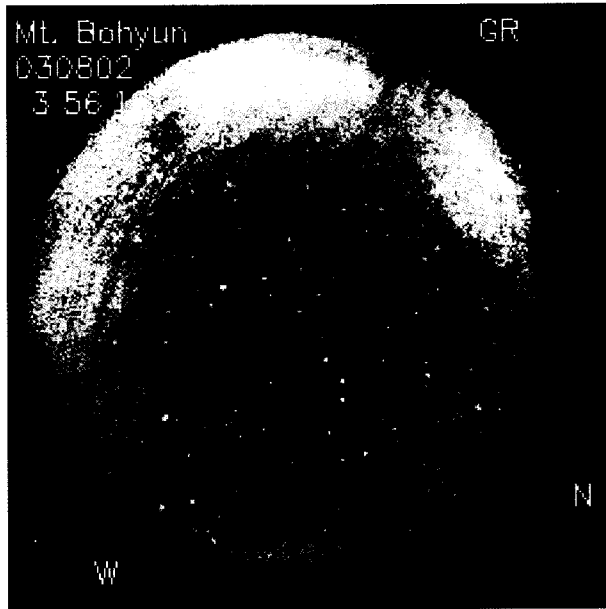


그림 2. 2002년 3월 8일 보현산 전천 카메라 필터에 나타난 밴드형 대기 중량파 화상.

2. 자료 분석 및 결과

2.1 관측파동계수

2001년 7월부터 2006년까지 보현산 전천카메라 관측소에서 열권 및 중간권 상부 지역의 대표적 밤 대기광인 OI 630.0nm(~250km), OI 557.7nm(~97km), OH Meinel band(~87km), O₂ Atmospheric band(~84km) 방출선의 2차원 영상 관측이 수행되었다. 괄호안의 값은 각 파장별 밤대기광의 최대 밝기가 나타난 고도이다. 전천 카메라는 초창기에 오로라 관측을 위해 개발 되었으나, 단주기 중량파 관측에도 매우 유용한 것으로 입증되어 이를 활용한 연구가 활발히 수행되고 있다(Taylor & Garcia 1995). 중량파의 2차원 관측은 마이켈슨 간섭계나 페브리-페로 간섭계 등을 이용한 분광 관측으로는 결정할 수 없는 대기파동의 이동 방향과 수평 파장을 영상 자료로부터 직접 유도할 수 있는 장점을 갖는다. 보현산에서 관측하는 동안 한반도 상공 중간권 대기파동의 관측적 특성에 대한 분석이 수행 되었으며, 이중 많은 대기 파동이 대기 내중량파(Atmospheric internal gravity waves)의 관측적 특성과 일치하는 것으로 나타났다(Chung et al. 2003, 정종균 2005).

그림 2는 2002년 3월 8일 OI 557.7nm 밤대기광 전천 화상에 나타난 중량파 예이다. 전천 영상에 나타난 파동의 수평파장(λ_h), 주기(τ_{ob}), 진행방향(ϕ_{ob}) 및 속력(v_{ob})들을 일반적으로 관측파동 계수로 정의한다. 이들 관측파동 계수는 전천영상을 위도-경도의 지리적 좌표계로 변환하는 공간교정 후에 결정된다. 파동의 λ_h 는 전천 영상을 위도-경도 좌표계로 변환한 후, 공간에 대한 푸리에 변환을 이용하여 결정한다. 그러나 전천 영상에 나타난 밝은 별은 위도-경도 좌표계로 전환되면서 파장 크기 값에 영향을 줄 수 있기 때문에 공간교정 전에 제거된다. 파동의 위상속도는 연속된 두 영상의 관

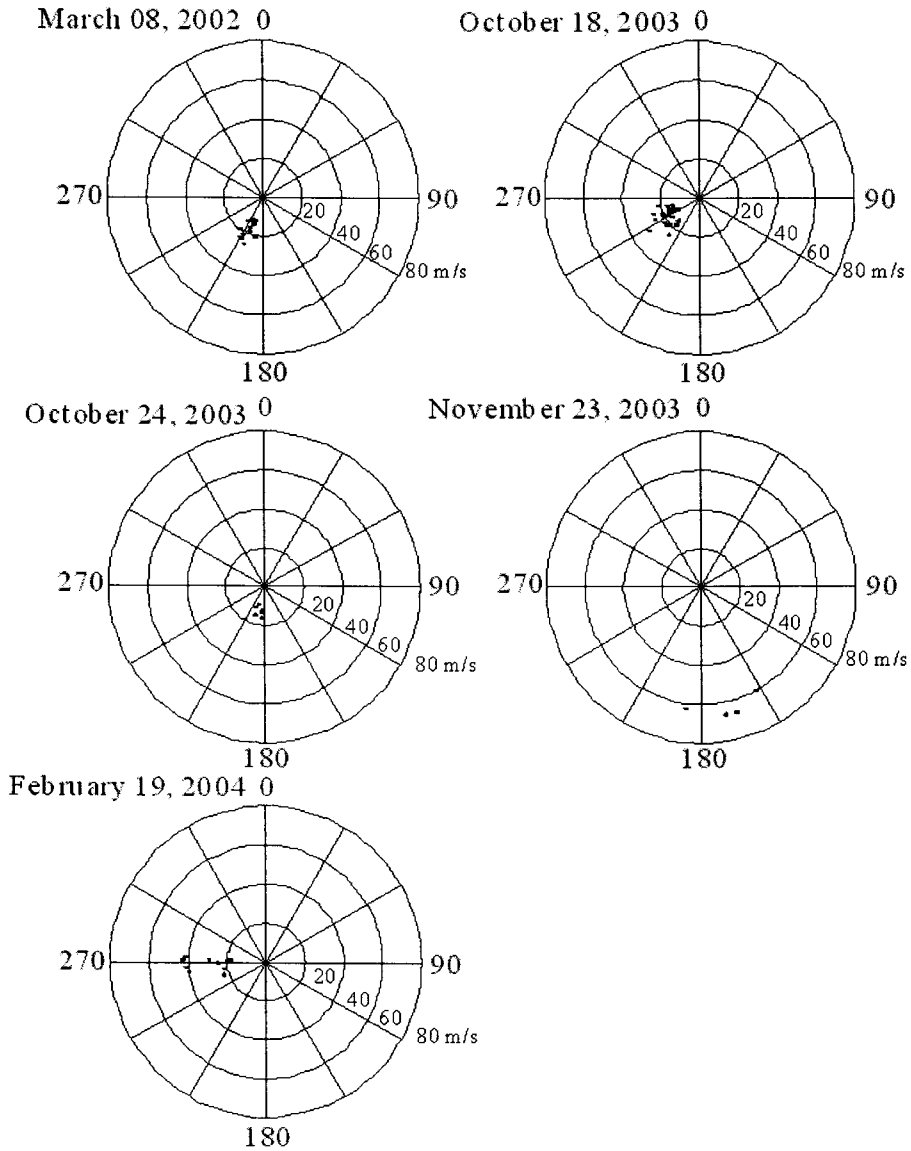


그림 3. 보현산 전천 카메라 필터에 나타난 대기 중량파의 관측위상 속도.

측된 시간차 동안 이동한 파동의 위치로부터 유도할 수 있으며, 관측주기는 앞에서 결정된 수평파장과 위상속도로부터 계산된다. 전천 영상에 나타난 중량파의 관측 파동계수를 결정하기 위한 과정은 정종균(2005)에 의해 자세히 기술되었다.

중량파는 중성바람에 의해서 속도가 변하기 때문에, 중성바람의 영향을 받기 전의 특성을 알기 위해서는 중량파가 관측된 고도의 바람의 속력과 방향을 알아야 한다. 국내에는 고층대기 중성대기 바람을 측정할 수 있는 장비가 없기 때문에, 보현산(36.2° N, 128.9° E)과 위치적으로 가장 인접한 일

본 Shigaraki(34.8° N, 13.1° E) 페브리-페로 간섭계에서 관측된 중성바람 자료를 이용하였다. 그러나 Shigaraki 페브리-페로 간섭계는 OI 630.0nm와 OI 557.7nm의 두 밤대기광만을 관측하기 때문에, 이 연구에서는 보현산 전천 카메라의 관측원과 중복되는 OI 557.7nm 방출선에서 도출된 중성바람 자료를 사용하였다. 두 관측소의 관측 시간동안의 기상상태와 기기의 작동 여부, 그리고 자료 상태를 고려한 결과, 2002년 3월 8일, 2003년 10월 18일, 10월 24일, 11월 23일, 그리고 2004년 2월 19일을 분석 가능일로 선택되었다.

그림 3은 이번 연구에서 이용된 OI 557.7nm 밤대기광 영상에 나타난 중량파의 관측위상 속도와 진행방향이다. 관측된 중량파의 방향을 살펴보면 남쪽과 서쪽 방향으로 나타난다. 이와 같은 한반도 상공 중량파 진행방향의 편향성은 2001년 7월에서 2004년 8월까지 보현산에서 전천카메라 관측에 의해서도 이미 알려진 사항이다(정중균 2005).

2.2 중성바람

대류권 또는 성층권에서 발생한 중량파는 고층대기로 진행하는 동안 각 고도의 배경 중성바람과의 상호작용을 통해 특정한 방향과 주파수를 갖는 중량파만 중간권에 도달하여 관측된다. 또한 중간권에서 관측된 중량파는 중성바람에 의한 도플러 편이가 발생하며 이를 단일파로 가정할 경우, 식 (1)과 같이 고유파동주파수(intrinsic wave frequency)는 관측파동주파수(observed wave frequency)로 변형된다.

$$\omega^+ \equiv \omega - k\bar{u} \quad (1)$$

여기서 ω^+ 는 고유파동주파수, ω 는 관측파동주파수, k 는 파수, \bar{u} 는 중성바람 속도이다. 일반적으로 중간권 상부의 대기광으로부터 관측된 중량파는 고진동수 파동으로 빠르게 연직으로 전파되므로 파동원천으로부터 중간권 상부까지 전파되는 동안 배경대기의 시간적 변화는 거의 없다고 가정할 수 있다. 따라서 지상에서 관측된 중간권 상부 중량파의 진동수는 일정하다고 가정할 수 있다. 만일 중성바람이 파동의 위상속도와 같은 방향이면 지상에서 관측된 중간권 상부 중량파의 진동수에 대해 고유진동수는 작아지고, 이에 따라 수평파수도 작아져서 파장은 커지게 된다. 반대로 중량파의 수평 전파 방향과 중성바람의 방향이 다를 경우 고유 진동수가 커져서 수평파수가 커지고 파장은 줄어든다. 결국 중간권 상부에서 중량파가 관측된 것은 저층대기에서 발생한 파동이 중성바람과의 상호작용을 거친 후 선택적 조건에 의해 나타난 것으로 해석될 수 있다.

중량파의 본래적 특성을 이해하기 위한 중량파가 관측된 고도의 중성대기 바람은 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계 자료가 사용되었다. 2000년 10월부터 운영되기 시작한 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계는 OI 557.7nm와 OI 630.0nm의 밤대기광 방출선의 도플러 편이를 통해 고층대기 바람을 측정하고 있다(Shiokawa et al. 2003). OI 557.7nm와 OI 630.0nm 파장에 대한 관측 오차는 각각 $\sim 5 - 8\text{m/s}$ 와 $\sim 10 - 50\text{m/s}$ 이다.

일반적으로 중성대기 바람은 대기 조석파의 특성 때문에 위도와 경도에 의존하여 시간에 따라 바람의 방향과 속력이 주기와 위상의 파동 특성이 나타난다. 한국의 보현산과 일본 Shigaraki의 두 관측소가 위치한 30° N ~ 40° N 사이의 중위도 중간권의 경우 24시간 및 12시간 주기의 대기 조석파가 주로 존재하는 것으로 알려져 있다. 두 관측소의 경도차는 7.2°로서 시간적으로 29분의 시간차가 나기 때문에 중위도 조석파의 주기와 비교할 때 경도차에 의한 변화는 작음을 알 수 있다. 따라서 두 관측소 상공 중간권의 물리적 상태가 조석파에 의해 변화되지 않음을 가정하였다. 그림 4 ~ 8은

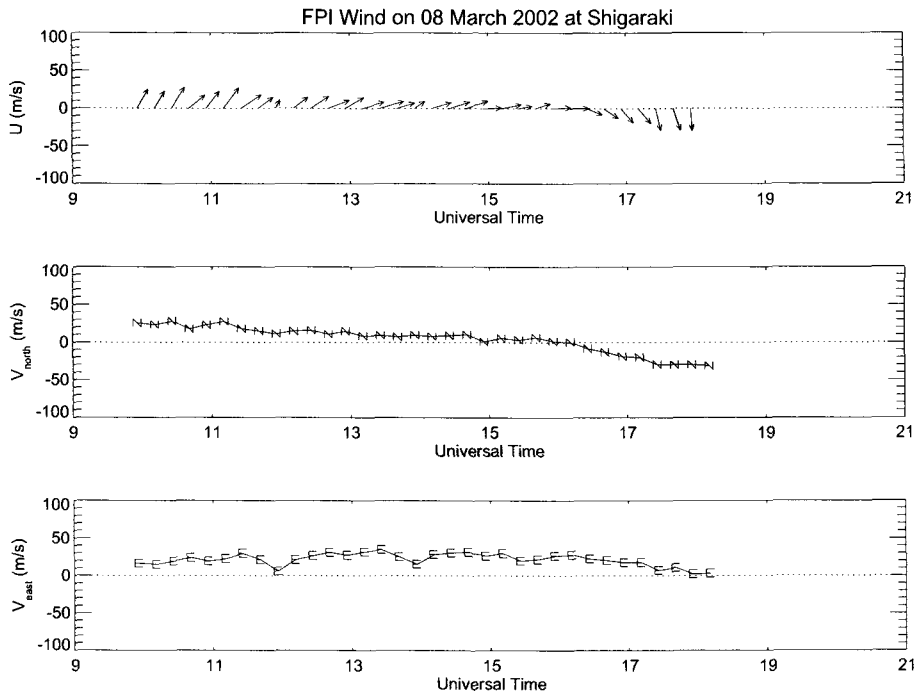


그림 4. 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계에서 관측된 중성바람 속도의 시간에 따른 변화(2002년 3월 8일).

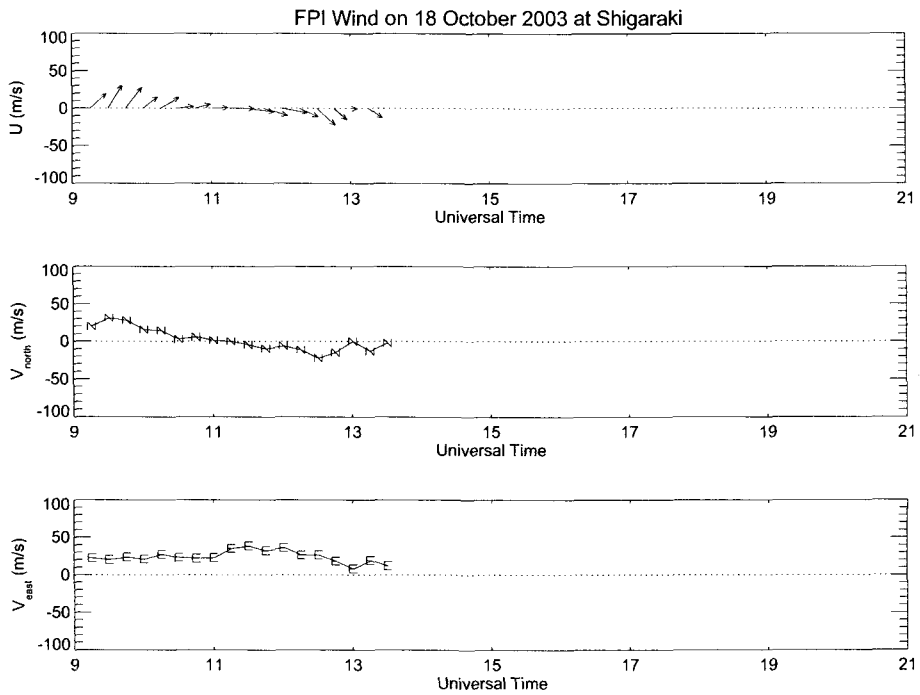


그림 5. 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계에서 관측된 중성바람 속도의 시간에 따른 변화(2003년 10월 18일).

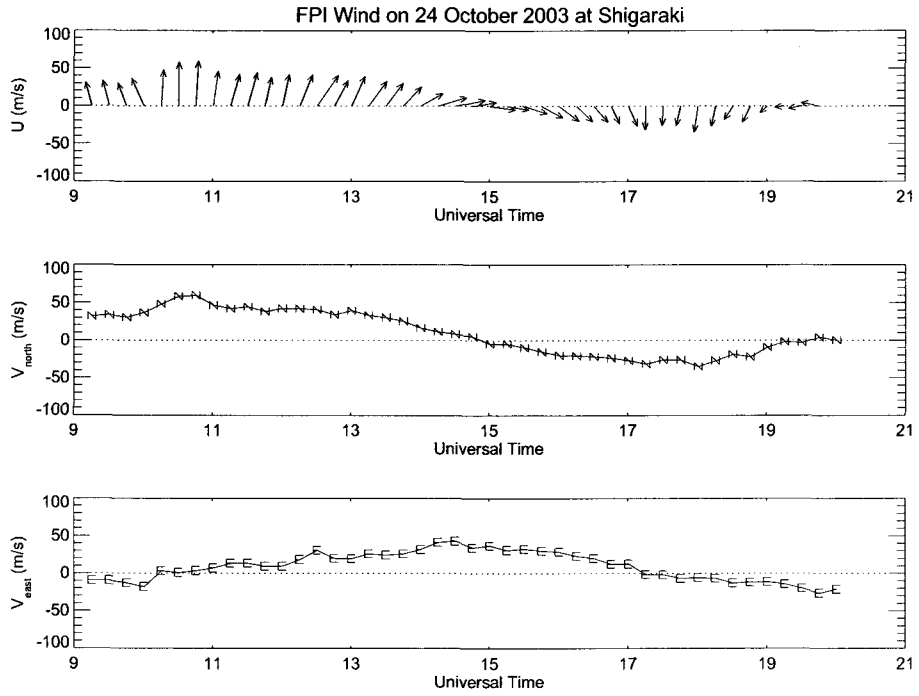


그림 6. 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계에서 관측된 중성바람 속도의 시간에 따른 변화(2003년 10월 24일).

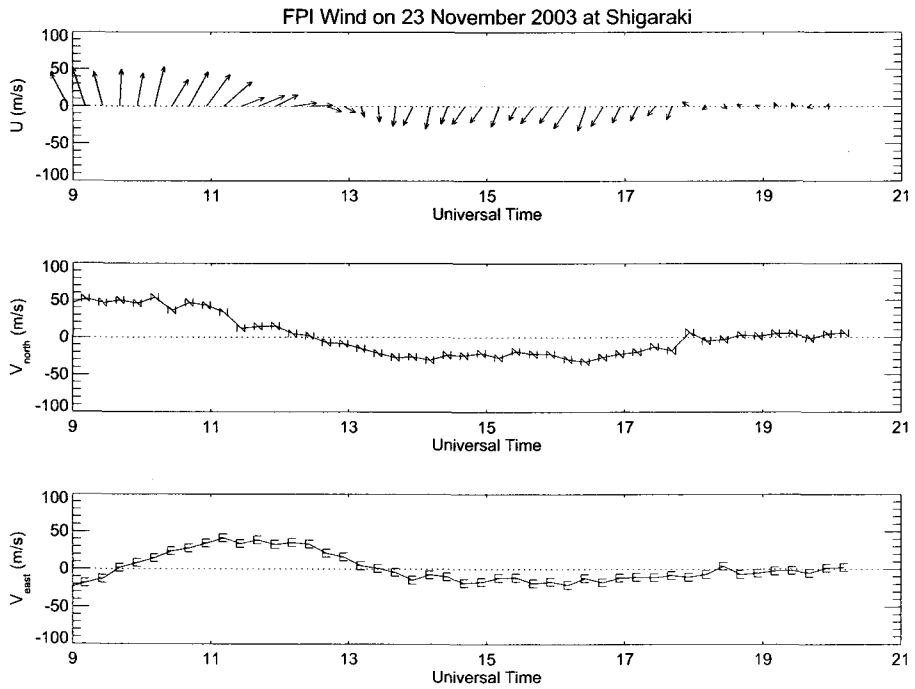


그림 7. 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계에서 관측된 중성바람 속도의 시간에 따른 변화(2003년 11월 23일).

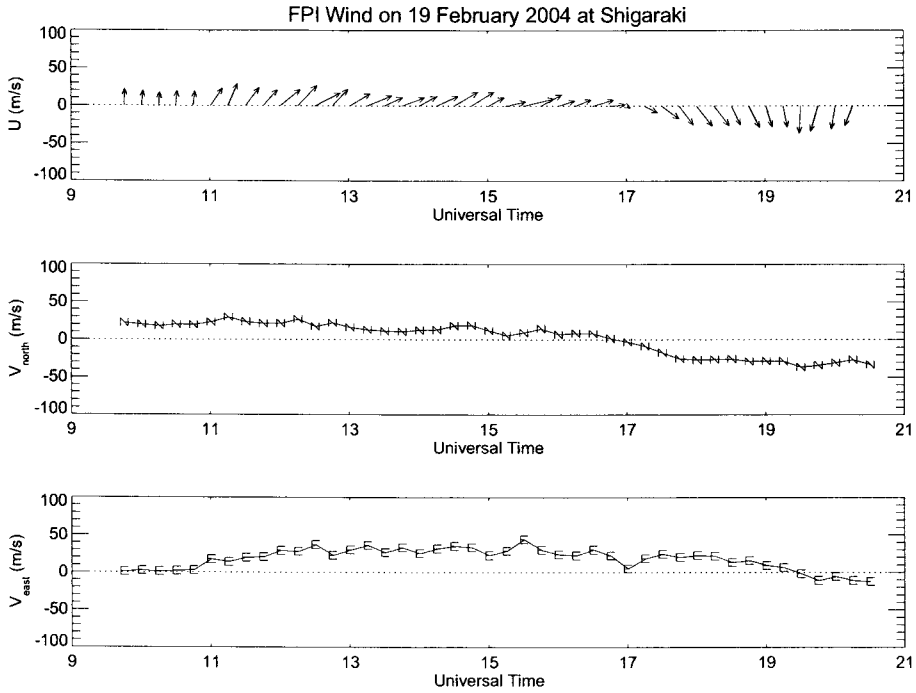


그림 8. 일본 Shigaraki 페브리-페로 간섭계에서 관측된 중성바람 속도의 시간에 따른 변화(2004년 2월 19일).

Shigaraki 페브리-페로 관측소에서 관측된 OI 557.7nm 고층대기 바람의 시간에 따른 변화이다. 그림 4 ~ 8에서 위 방향은 북쪽, 오른쪽은 동쪽 방향을 나타내며 화살표의 길이는 바람 크기를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 중간권의 바람은 날짜(계절)와 시간에 따라 변화하기 때문에 관측된 중간권 파동의 고유파동 성질을 알기 위해서는 같은 시간의 중성바람 관측이 필수적이다.

2.3 고유파동계수

고유파동속도(C_{int})는 파동이 관측된 고도의 중성바람 효과를 보정함으로서 식 (1)의 관계로부터 도출할 수 있다. 표 1의 C_{int} 값을 살펴보면 2003년 11월 23일에 관측된 파동을 제외하고 고유파동 속도는 관측된 속도보다 증가함을 볼 수 있다. 계산된 고유파동속도는 22.2 ~ 50.2m/s의 범위 값을 갖으며, 이는 Smith et al.(2000)이 미국 Massachusetts Millstone Hill(42.6° N, 71.5° W)에서 관측한 20 ~ 65m/s의 값과 유사하다. 고유파동주기(τ_{int})는 8.4 ~ 23.3분 사이 값을 보이며, 평균 12.9 ± 6.1 분이다. 평균 관측파동주기(τ_{ob})가 17.1 ± 4.9 분 임을 고려할 때 중성바람에 의해 파동의 주기가 증가했음을 알 수 있다. 중간권에서 파동의 수직파장(λ_z)은 대기 분산방정식을 식 (2)와 같이 간단히 표현될 수 있다(Swenson & Liu 1998).

$$\lambda_z \approx \lambda_h \frac{\tau_B}{\tau_{int}} \tag{2}$$

여기서 τ_B 는 Brunt-Vaisala 주기로서 중간권에서는 약 5분 정도이다. 식 (2)를 통해 계산된 λ_z 는 5.8 ~ 22.2km이며, 이는 Smith et al.(2000)가 도출한 12 ~ 21km와 큰 차이를 보이지 않는다.

표 1. Gravity wave parameter and momentum flux.

Date(yy.mm.dd)	ϕ	λ_h	I'/I	C_{ob}	τ_{ob}	C_{int}	τ_{int}	λ_z	Fm
2002.03.08	201.8	19.2	2.2	20.7	15.5	36.5	9.5	10.1	34.2
2003.10.18	240.9	28.3	2.1	24.5	19.3	48.4	8.4	16.8	7.5
2003.10.24	192.5	15.4	1.5	17.8	14.4	22.2	13.4	5.7	-
2003.11.23	168.1	45.5	1.4	64.1	11.8	45.9	23.3	9.8	6.1
2004.02.19	266.7	44.0	0.2	29.9	24.5	50.2	9.9	22.2	0.03

2.4 중량파 운동량 플럭스

중량파의 운동량 플럭스를 계산하기 위하여 Swenson & Liu(1998)의 식(3)의 모델을 사용하였다.

$$F_M = \frac{g^2}{N^2} \frac{\lambda_z}{\lambda_x \cdot CF^2} \left(\frac{I'}{I} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 $g_{94km} = 9.5m/s^2$, $N = \frac{2\pi}{\tau_B} = 0.02rad/sec$ 이다.

이전의 중간권 중량파 운동량 플럭스 산출은 OH Meinel band 밤대기광에 대해서만 이루어졌으며, OI 557.7nm 대기광에 대한 관측적 연구 결과는 발표되지 않고 있다. 이는 OI 557.7nm 대기광에 대한 Cancellation Factor(CF) 관계식을 위한 모델이 정립되지 않았기 때문이다. Vargas et al.(2007)은 기존의 OH 뿐만 아니라 OI 557.7nm와 O₂ Atmospheric band 대기광에 대한 CF 관계식을 발표함으로써, 중간권의 가장 대표적 대기광에 나타난 중량파의 운동량 플럭스 계산이 가능하게 되었다. 식(4)는 OI 557.7nm 밤대기광에 나타난 파동의 CF 관계식이다.

$$CF = 4.68 - 3.73e^{-0.006(\lambda_z - 6km)^2} \quad (4)$$

식(4)는 수직파장이 6km 이상인 파동에 대해서만 성립하기 때문에 $\lambda_z = 5.7km$ 인 2003년 10월 24일에 관측된 파동은 운동량 플럭스 계산에서 제외하였다. 파동 섭동 I'/I 가 2.2%로 가장 크게 나타난 2003년 3월 8일의 운동량 플럭스는 $34.2m^2/s^2$ 이다. $I'/I = 0.2\%$ 일 경우 $0.03m^2/s^2$ 으로 가장 작게 계산되었다. OI 557.7nm 대기광(고도 94km)에 대한 운동량 플럭스 결과는 아직 발표된 바가 없으나, OH 마이넬 밴드 대기광(~87km)에 나타난 중량파 영상을 분석한 Smith et al.(2000)은 평균 $30.3m^2/s^2$, Swenson et al.(1999)은 평균 $21.9 \pm 9.2m^2/s^2$ 의 결과를 발표하였다. 또한, Tang et al.(2005)은 OH 관측을 통해 중량파 운동량 플럭스의 방향성을 고려하여 남쪽 방향으로 $3.14m^2/s^2$, 서쪽 방향으로 $2.23m^2/s^2$ 의 결과를 발표하였다.

3. 토의 및 결론

표 1은 5일간의 보현산 천문대(36.2° N, 128.9° E)에 위치한 전천 카메라로 관측한 OI 557.7nm 밤대기광에 나타난 중간권 중량파의 관측파동계수, 고유파동계수, 그리고 운동량 플럭스이다. 고유파동계수와 운동량 플럭스를 계산하기 위한 중성바람은 국내에 관련 관측 시설이 없기 때문에 보현산과 가장 가까운 일본 Shigaraki의 페브리-페로 간섭계 관측소(34.8° N, 136.1° E)에서 측정된 자료를 사용하였다. 보현산과 Shigaraki 두 관측소의 날씨 및 기기 운영 상태를 고려한 결과 표 1에 제시된 5일이 분석 가능일로 선택되었다. 두 관측소의 위도와 경도를 고려해 볼 때, 조석파에 의한 바람의 세기와 방향의 변화는 없다고 가정하였다.

중량파의 진행방향은 이전의 결과와 마찬가지로 2003년 11월 23일의 남동 방향을 제외하고 나머지 날들은 남서방향을 보인다(정종균 2005). Yu & Hickey(2007)는 단주기 중량파의 대류권에서 열권하부로의 전파에 관한 모델 결과에서 배경바람에 의한 필터효과로 인해 특정방향의 중량파가 관측됨을 제시하였다. 연직방향으로 진행되는 중량파는 파쇄되어 2차 중량파가 발생할 수 있다(Zhou et al. 2002, Vadas et al. 2003). 이는 중간권과 열권 하부에서 관측되는 중량파의 진행방향은 대류권이나 성층권의 하부대기권의 바람 구조에 의해 진행방향이 결정됨을 의미하는 것이다. 이는 고층대기 중량파의 진행방향과 발생원을 알기 위해서는 계절에 따른 대류권과 성층권의 바람구조를 파악해야 함을 의미한다.

표 1에 제시된 관측파동계수(λ_h , C_{ob} , τ_{ob})의 평균값은 $\lambda_h = 30.5 \pm 13.9\text{m/s}$ 과 $C_{ob} = 31.4 \pm 18.8\text{m/s}$, $\tau_{ob} = 17.1 \pm 4.9$ 분으로 전형적인 열권하부 중량파의 모습을 보여준다. 이는 미국 Millstone Hill에서 Smith et al.(2000)이 OI 557.7 nm 밤대기광으로 관측한 $\lambda_h = 21.8 \pm 8.1\text{km}$ 및 $C_{ob} = 42.2 \pm 20.7\text{m/s}$, $\tau_{ob} = 8.6 \pm 3.6$ 분의 중량파의 특성과 비교해 볼 수 있다. 보현산과 일본 Shigaraki 상공 약 97km의 중성바람의 구조가 동일하다는 가정에 의해서 Shigaraki 페브리-페로 간섭계의 바람관측 자료를 사용하여 보현산에서 관측된 중량파의 고유파동계수를 유도하였다. 표 1에 제시된 고유파동계수(λ_z , C_{int} , τ_{int})의 평균값은 각각 $C_{int} = 40.6 \pm 11.6\text{m/s}$, $\lambda_z = 12.9 \pm 6.5\text{km}$, 그리고 $\tau_{int} = 12.9 \pm 6.1$ 분이다. 평균적으로 C_{ob} 보다 C_{int} 값이 크다는 것은 중성바람과 중량파가 반대 방향임을 의미한다. 분석된 중량파 중에서 무한대의 λ_z 값이 존재하지 않음은 소멸파(*evanescent wave*)가 아님을 의미한다. 이는 분석된 중량파가 발생된 고도가 도파(wave ducting) 지역이거나 파동이 소멸되기 전에 관측된 것으로 해석될 수 있다. 만약 도파 지역이라면 그 고도의 중량파는 거의 소멸되지 않고 수평방향으로 수 백 km를 진행할 수 있다(Isler et al. 1997). 자세한 분석을 위해서는 고도 80 - 100km 사이의 온도나 바람의 수직 구조의 측정이 필요하다.

중간권 및 열권 하부에서 관측되는 중량파의 운동량 플럭스는 그 동안 OH Meinel band 밤대기광에 의해 관측된 자료에 대해서 계산되었다. 이는 대기광의 밝기와 온도와의 관계식인 CF가 OH Meinel band 밤대기광에 대해서 모델화되었기 때문이다. 그러나 Vargas et al.(2007)은 OH뿐만 아니라 OI 557.7nm와 O₂ Atmospheric band 대기광에 대한 CF 관계식을 제시하였다. 표 1에서 수직 파장이 5.7km인 경우는 경험식인 식 (4)에 해당하지 않으므로 제외하였다. 총 4일에 관측된 운동량 플럭스의 평균값은 $12.0 \pm 15.2\text{m}^2/\text{s}^2$ 로서 편차가 매우 크다. 분석일이 4일이므로 이 값들이 한반도 상공 중량파 운동량 플럭스의 일반적인 값으로 보기에는 힘들다. 그러나 향후 전천 카메라를 이용한 중량파 관측 연구를 수행할 시에 표 1에 제시된 파동계수 및 운동량 플럭스 값들의 지속적인 정량화는 중간권에 대한 중량파의 영향을 연구하는 데 있어 주요 기준값으로 제시될 것으로 기대한다.

감사의 글: 이 연구는 한국천문연구원 기관고유 과제인 우주측지분석센터운영(2007-1-720-00)과 극지연구소 극지대기 및 기후변화 연구(PE07030) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 정종균 2005, 박사학위논문, 충남대학교
 Chung, J.-K., Kim, Y. H., & Won, Y.-I. 2003, *Adv. Space Res.* 32, 825
 Isler, J. R., Taylor, M. J., & Fritss, D. C. 1997, *JGR*, 102, 26301

- Liu, A. Z. & Swenson, G. R. 2003, *JGR*, doi:10.1029/2002JD002474
- Shiokawa, K., Kadota, T., Otsuka, Y., Ogawa, T., Nakamura, T., & Fukao, S. 2003, *Earth Planets Space*, 55, 271
- Smith, S. M., Mendillo, M., & Baumgardner, J. 2000, *JGR*, 105, 27119
- Snively, J. B. & Pasko, V. P. 2003, *GRL*, 30, doi:10.1029/2003GL018436
- Swenson, G. R. & Espy, P. J. 1995, *GRL*, 22, 2845
- Swenson, G. R. & Gardner, C. S. 1998, *JGR*, 103, 6271
- Swenson, G. R., Haque, R., Yang, W., & Gardner, C. S. 1999, *JGR*, 104, 6067
- Swenson, G. R. & Liu, A. Z. 1998, *GRL*, 25, 477
- Tang, J., Swenson, G. R., Liu, A. Z., & Kamalabadi, F. 2005, *JGR*, 110, D09S09
- Taylor, M. J. & Garcia, F. J. 1995, *GRL*, 22, 2473
- Taylor, M. J. & Hapgood, M. A. 1988, *Planet. Space Sci*, 35, 413
- Vadas, S. L., Fritts, D. C., & Alexander, M. J. 2003, *JASTP*, 60, 194
- Vargas, F., Swenson, G. R., A. Liu, & Gobbi, D. 2007, *JGR*, 112, 10.1029/2006JD007642
- Vincent, R. A. 1984, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 46, 119
- Yu, Y. & Hickey, M. P. 2007, *GRL*, 34, L11103
- Zhou, X., Holton, J. R., & Mullendore, G. L. 2002, *JGR*, 107, doi:10.1029/2001JD001204