

국내 천문대 상공의 수증기량 조건과 적외선 관측

이성호^{1†}, 백정호², 문봉곤¹, 진호¹, 조정호²,
차상목¹, 조승현¹, 박영식¹, 육인수¹, 남육원¹, 박수중³
¹한국천문연구원 우주과학연구부 위성탑재체연구그룹
²한국천문연구원 우주측지연구부 지구관측연구그룹
³경희대학교 우주과학과

PRECIPITABLE WATER VAPOR CONDITIONS FOR INFRARED OBSERVATIONS AT KOREAN ASTRONOMICAL OBSERVATORIES

Sungho Lee^{1†}, Jeongho Baek², Bongkon Moon¹, Ho Jin¹, Jung-Ho Cho²,
Sang-mok Cha¹, Seoungyun Cho¹, Yungsik Park¹, In-Soo Yuk¹,
Uk-Won Nam¹, and Soojong Pak³

¹Space Science Division, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

²Space Geodesy Division, Korea Astronomy & Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

³Dept. of Astronomy and Space Science, Kyung Hee University, Gyeonggi-do 446-701, Korea
E-mail: leesh@kasi.re.kr

(Received October 15, 2007; Accepted November 08, 2007)

요 약

한국천문연구원은 1 - 5 μ m 파장영역에서 관측 가능한 근적외선 카메라 KASINICS(Korea Astronomy and Space science Institute Near Infrared Camera System)를 개발하였다. 열적외선이 강해지는 3 μ m 이상의 파장영역에서는 대기 중의 수증기에 의한 대기투과도가 중요해진다. 이 논문에서는 국내 천문대의 적외선 관측 조건을 알아보기 위해 한국천문연구원의 GPS 신호를 이용한 PWV(Precipitable Water Vapor) 측정 시스템을 사용하여 2006년 7월부터 2007년 8월까지의 보현산 및 소백산 상공의 월별 PWV 분포를 조사하였다. 그 결과, 국내 대기 수증기량 조건은 지표면의 이슬점온도를 이용해서 추정된 예상보다 좋았으며, 특히 가을철 및 겨울철에는 미국 Kitt Peak 천문대 상공의 조건과 비교하여 크게 다르지 않음을 확인하였다.

ABSTRACT

KASINICS (Korea Astronomy and Space Science Institute Near Infrared Camera System) is equipped with a InSb array which can observe 1-5 μ m bands in near-infrared. The absorption and emission by telluric water vapor becomes serious in the bands longer than 3 μ m. We measured PWV (Precipitable Water Vapor) levels above Bohyusan Optical Astronomy Observatory and Sobaeksan Optical Astronomy Observatory from July 2006 to August 2007 using the GPS PWV measurement system of KASI. We found that monthly averaged PWVs are lower than the prediction using dew-point temperature and as low as above Kitt Peak from September to February.

Key words: Infrared Observations, Precipitable Water Vapor, Atmospheric Transmission

[†]corresponding author



그림 1. 적외선카메라 KASINICS로 촬영한 토성의 근적외선 영상. 왼쪽부터 J, H, Ks, L 밴드.

1. 서 론

지구 대기의 투과율은 파장에 따라 달라서 X-선과 자외선 및 적외선과 전파의 일부 파장 영역은 지상에서 관측이 불가능하다. 대기투과율이 높을수록 대기 흡수에 의한 차폐율이 낮아지기 때문에 천문 관측에 유리한 것은 당연한 사실이지만, 적외선 관측의 경우에는 대기 자체의 열적복사가 주요 잡음원이기 때문에 높은 대기투과율의 중요성이 더욱 강조된다.

한국천문연구원은 지상관측용 근적외선 카메라 KASINICS(Korea Astronomy and Space science Institute Near Infrared Camera System)를 개발하였다(Cha et al. 2006, 진호 외 2006, 박수종 외 2004, 2005). KASINICS는 J, H, Ks, L 밴드의 파장대에서 목성형 행성의 대기, 변광성, 변광 AGN, 별탄생 영역 등의 천체 관측에 사용될 예정이다(이성호 외 2005). 2006년 12월 보현산 1.8 m 망원경에 장착하여 수행한 KASINICS 시험관측에서 J, H, Ks 밴드 관측을 성공적으로 수행했을 뿐만 아니라 토성의 L 밴드 영상 획득에 성공하였다(그림 1).

근적외선 천문 관측에서 대기투과율은 L 밴드에서 더욱 중요해지는데 이는 파장이 길수록 열적외선의 비중이 커지기 때문이다(McLean 1997). 근적외선 파장영역의 대기투과율은 주로 대기 중의 수증기 함량에 의해 좌우되므로 KASINICS의 L 밴드 관측 가능성을 가늠하기 위해서는 수증기량의 지표인 PWV(Precipitable Water Vapor)에 대한 정보가 필요하다. 문봉곤 외(2004)는 보현산 및 소백산 천문대 지표면에서 측정된 이슬점온도를 이용하여 PWV를 추정할 바 있으며, 그 결과를 바탕으로 국내에서도 겨울철에 L 밴드 관측을 수행할 수 있음을 예상하였다.

한국천문연구원은 1999년부터 국내 최초로 GPS 신호를 이용하여 대기 중의 PWV 측정을 수행하고 있다. 위성으로부터 수신되는 GPS 신호가 대기 중의 수증기에 의해 지연되는 효과로부터 PWV 양을 측정하는 방식으로서, 관측사이트 현장의 기압, 온도, 습도 등의 기상데이터를 사용하여 대기모델을 보정함으로써 측정 정밀도를 향상시킨다(조정호 외 2001). 한국천문연구원의 GPS PWV 측정은 소백산 및 보현산을 비롯한 전국 각지의 사이트에서 년중 1시간 단위로 실행되어 데이터를 축적하고 있다. 측정된 PWV 데이터는 2007년 10월부터 매일 업데이트되어 웹페이지를 통해 서비스되고 있으며 향후 준실시간 서비스를 제공할 계획이다.

이 논문에서는 2006년 7월부터 2007년 8월까지 1년 이상의 기간에 걸쳐 누적된 GPS PWV 측정 데이터를 분석하여 보현산 및 소백산 천문대 상공의 수증기량 조건의 년중 변화 양상을 조사한다. 또한 지표면의 이슬점 온도를 이용하여 추정된 PWV를 실제 측정치와 비교하고, 2006년 12월의 KASINICS L 밴드 시험관측 기간 중에 측정된 PWV 자료를 사용하여 당시의 대기투과율 조건을 확인한다.

표 1. GPS PWV 측정 결과(월평균).

년	월	보현산 천문대			소백산 천문대		
		PWV (mm)	관측일수	표준편차	PWV (mm)	관측일수	표준편차
2006	7	36.2	14	6.9	32.4	30	8.1
	8	35.1	21	7.4	28.7	31	6.9
	9	16.5	30	7.7	13.2	30	6.3
	10	10.7	27	3.6	9.0	29	3.2
	11	7.7	28	3.6	6.0	29	2.9
	12	4.7	27	2.8	4.1	31	2.5
2007	1	3.8	30	1.6	3.0	30	1.2
	2	5.0	24	3.2	4.0	28	2.2
	3	7.4	24	4.1	6.4	24	3.4
	4	7.3	26	2.5	6.4	28	2.1
	5	12.2	25	5.3	10.8	26	4.7
	6	21.2	29	8.3	18.0	30	7.8
	7	30.5	12	8.1	22.1	18	4.1
	8	37.8	9	5.5	33.2	15	5.2

2. GPS PWV 측정자료

현재 가장 정밀한 것으로 알려진 PWV 측정장비는 MWR(Microwave Radiometer)이다. MWR PWV는 연속적으로 측정 가능한 강점이 있지만 비가 오는 날은 관측이 불가능하다. 한편 라디오존데는 수소나 헬륨을 채운 풍선에 줄을 달아 밑에 계측장비를 연결해서 하늘로 띄우는 방식이다. 풍선이 하늘로 올라가면서 기압, 기온, 이슬점 온도, 바람 등을 측정하고 관측이 끝난후 측정된 고도별 기온 및 이슬점 온도를 이용해서 PWV를 결정한다. 국내 라디오존데 관측은 기상청(백령도, 속초, 포항, 고산) 및 공군(오산, 광주)에서 하루 2-4회 실시하고 있다. 라디오존데를 이용한 PWV 측정은 24시간 관측이 아니고 하루에 정해진 횟수만큼만 수행하므로 연속적인 값을 얻을 수 없으며 풍선이 올라가면서 바람에 의해 편류되는 단점이 있다(문용진 1998). 하지만 실측값이므로 기상연구자들이 가장 신뢰하는 측정방법이다.

반면 GPS 측정 방식은 24시간 관측가능하고 MWR와 달리 날씨의 영향을 받지 않는다. 또한 GPS PWV 값은 MWR 및 라디오존데 관측치와 비교하여 1-2mm 이내로 잘 일치하는 것으로 알려져 있다(Bevis et al. 1992). 한국천문연구원은 국내에 설치된 라디오존데 관측 장소 중 속초 기상대 내에 24시간 GPS 상시관측소를 운영하고 있다. 이 곳에서의 라디오존데 PWV 관측치와 GPS PWV 관측치를 서로 비교해 본 결과 1.7mm 이내로 일치하는 것을 확인하였다(백정호 외 2007).

표 1은 2006년 7월부터 2007년 8월까지 보현산 및 소백산 정상에서 측정한 GPS PWV 값이다. GPS PWV 데이터는 현재 한 시간 간격으로 측정되어 관측소의 기압, 기온, 습도 자료와 함께 기록된다. 표 1에 나타난 측정치들은 이 데이터로부터 월별 평균을 구한 것으로서 1개월 중의 관측일수 및 PWV 값의 표준편차를 함께 제시하였다. 일부 관측이 안 된 날짜가 있는 것은 주로 여름철에 보현산 및 소백산에 낙뢰가 빈번하여 수신기가 다운되는 경우가 종종 있기 때문이다. 이런 경우에는 대개 신속하게 복구될 수 있으나 수신기에 손상이 발생하면 몇 주 이상 지체되기도 한다. 그 밖에 간혹 예기치 못한 통신작업 등으로 인해 전원이 차단되는 경우도 있다.

그림 2와 그림 3은 각각 보현산과 소백산 상공의 년중 PWV 변화를 보기 위해 표 1의 GPS 측정치와 미국 Kitt Peak 천문대 상공의 측정치(Wallace et al. 1984; 1977-1982년 누적 자료의 월별 평

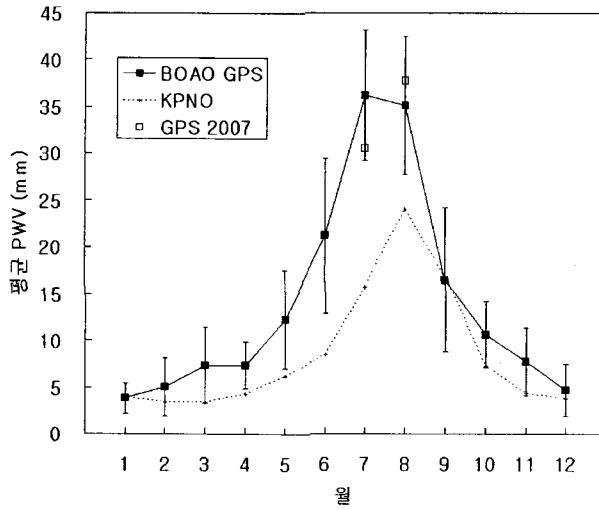


그림 2. 보현산 상공의 월별 PWV 분포(검은 사각형 - GPS 실측치(2006. 7. - 2007. 6.), 흰 사각형 - GPS 실측치(2007. 7. - 2007. 8.), 점선 - Kitt Peak 천문대의 측정치). GPS PWV의 오차막대는 월 중 관측데이터의 표준편차.

균)를 함께 표시한 것이다. 그림에서 사각형으로 표시한 GPS PWV 측정치 중 검은 사각형으로 표시한 것은 2006년 7월부터 2007년 6월까지의 1년치 데이터이고 흰 사각형은 2007년 7월과 8월의 데이터를 나타낸다. 7-8월 구간에서 2006년과 2007년 측정 결과를 비교해 보면 년차별 편차가 존재함을 알 수 있는데, 보현산과 소백산 모두, 7월에는 2006년보다 2007년의 PWV가 작고 8월에는 그 반대이다.

보현산과 소백산의 GPS PWV 실측치를 비교해 보면, 계절에 따른 변화 양상은 서로 비슷하지만 전반적으로 보현산의 PWV 값이 소백산에 비해 20% 정도 높은 것을 알 수 있다. 이는 보현산의 고도(1124m)와 위도(북위 36°)가 모두 소백산(고도 1378m, 북위 37°)에 비해서 낮은 것으로 설명될 수 있는데 대기 중의 수증기량은 기온이 낮은 고위도 지역으로 갈수록 감소하고(Wallace et al. 1984, 이용호 외 2000) 고도가 높아질수록 감소하기 때문이다(Traub & Stier 1976).

적외선 관측을 활발하게 수행하고 있는 미국 Kitt Peak 천문대의 조건과 비교해 보면 보현산 및 소백산 천문대의 PWV 조건도 겨울철에는 이에 못지않게 낮은 수준으로 측정되었는데, 특히 소백산에서는 가을철-겨울철(9-2월)의 PWV 조건이 Kitt Peak과 비슷한 수준으로 양호한 것을 볼 수 있다. 이는 대기 투과율의 측면에서 국내의 사이트도 년중 상당한 기간 동안 경쟁력 있는 적외선 관측을 수행할 수 있는 여건을 갖추고 있다는 것을 의미한다.

3. 이슬점온도를 이용한 PWV 추정치와 GPS 측정치 비교

문봉곤 외(2004)은 KASINICS의 기초 설계 단계에서 사전 검토의 일환으로 국내 천문대에서의 적외선 관측 조건을 알아보기 위해 지표면 이슬점 온도를 이용하여 대기 중의 PWV를 추정한 바 있다. 당시에는 소백산과 보현산에 GPS PWV 측정 시설이 갖추어지지 않았기 때문에 상관 관계가 가

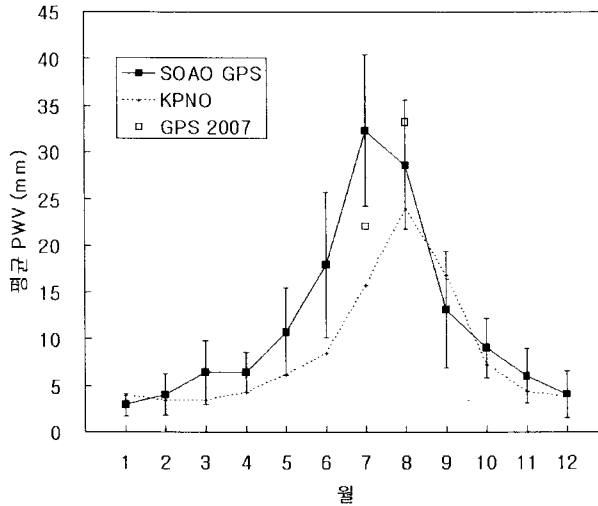


그림 3. 소백산 상공의 월별 PWV 분포(검은 사각형 - GPS 실측치(2006. 7. - 2007. 6.), 흰 사각형 - GPS 실측치(2007. 7. - 2007. 8.), 점선 - Kitt Peak 천문대의 측정치). GPS PWV의 오차막대는 월 중 관측데이터의 표준편차.

장 높은 물리량인 이슬점온도로부터 간접적으로 PWV를 추정하였다. 한영호(1968)는 경기도 오산 관측소의 라디오존데 관측 결과를 바탕으로 우리나라 중부 지방의 이슬점온도-PWV 관계식을 봄, 가을에는 식 (1), 여름에는 식 (2), 겨울에는 식 (3)으로 구분하여 얻었다.

$$\ln(W) = 0.0393 \times T_d - 1.155 \tag{1}$$

$$\ln(W) = 0.0393 \times T_d - 1.273 \tag{2}$$

$$\ln(W) = 0.0393 \times T_d - 1.204 \tag{3}$$

여기에서 W 는 월평균 PWV(단위:cm), T_d 는 지표면의 월평균 이슬점온도(단위: °F)이다. 이슬점온도는 기온과 상대습도로부터 계산될 수 있다. 한편, 한영호(1971)는 제주도 모슬포 관측소의 자료를 바탕으로 남부 지방의 지표면 이슬점온도와 PWV 관계식을 구하였으며, 이 관계식을 사용하여 계산한 보현산 및 소백산의 PWV 추정치는 위의 식을 사용한 결과와 크게 다르지 않았다(문봉근 외 2004).

이 논문에서는 GPS PWV와 함께 측정된 기온 및 상대습도 자료를 사용하여 문봉근 외(2004)와 동일한 방법으로 PWV 추정치를 계산하였으며, 그 결과를 표 2에 문봉근 외(2004)의 계산 결과와 함께 제시하였다. 문봉근 외(2004)이 사용한 기상자료는 보현산 천문대의 경우 1993년 4월부터 1994년 3월까지 측정된 기온 및 상대습도 자료(김지영 1994)이며, 소백산 천문대의 경우 1978년 1월부터 1980년 12월까지 측정된 자료(심경진과 한원용 1982)이다.

그림 4와 그림 5를 보면 여름철을 제외하고는 이슬점온도를 이용한 PWV 추정치가 GPS를 이용해서 실제 측정된 PWV 보다 표준편차 이상으로 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 문봉근 외(2004)이 예상한 대기 중 수증기량 조건이 실제보다 과대평가되었다는 것을 의미한다. 이슬점온도를 이용한 추정치의 오차의 원인으로는 한영호(1968, 1971)의 이슬점온도-PWV 관계식 자체의 오류 또는 관계

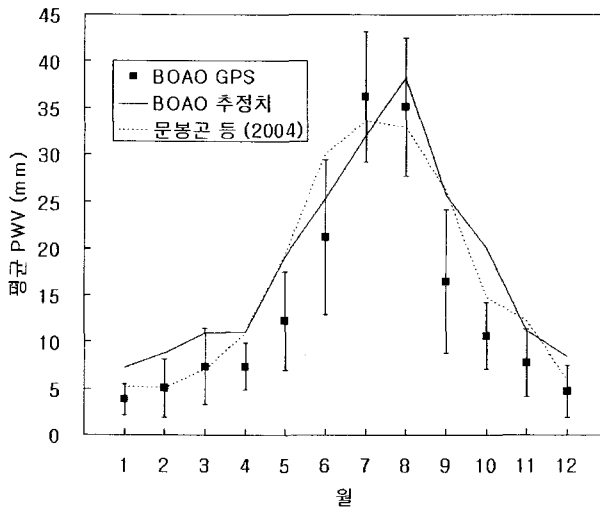


그림 4. 보현산 상공의 월별 PWV 분포(사각형 - GPS 실측치(2006. 7. - 2007. 6.), 실선 - 지표면 이슬점 온도를 이용한 예상치(2006. 7. - 2007. 6. 기상자료 사용), 점선 - 문봉곤 외(2004)의 예상치(1993. 4. - 1994. 3. 기상자료 사용)). GPS PWV의 오차막대는 월 중 관측데이터의 표준편차.

식을 도출한 지역 및 시기와 관계식을 적용한 지역 및 시기의 차이 등을 후보로 검토할 수 있겠으나, 정확한 분석을 위해서는 향후 다년간에 걸친 PWV 및 기상자료 측정을 통한 보다 체계적인 이슬점 온도-PWV 관계 연구가 필요할 것이다.

한편, 동일한 계산 방법을 사용한 문봉곤 외(2004)의 PWV 추정치는 이 논문에서 계산한 결과보다 대부분 작다(그림 4, 5). 문봉곤 외(2004)이 계산에 사용한 기상자료는 보현산의 경우 약 10년 전에 측정된 것이고 소백산의 경우 약 30년 전의 것이므로, 현재의 계산 결과보다 작다는 것은 현재보다 과거의 한반도 대기가 더 건조했다는 것을 의미하는 것으로 보인다. 표 2의 기상자료를 보면, 보현산의 기온(상대습도)은 1993-1994년에 최저 -6.3°C , 최고 18.9°C 였는데 2006-2007년에는 최저 -2.1°C , 최고 20.1°C 이고, 소백산의 경우 1978-1980년에 최저 -9.3°C , 최고 17.1°C 였으며 2006-2007년에는 최저 -5.1°C , 최고 20.4°C 로 전체적으로 $2-4^{\circ}\text{C}$ 상승하였다. 상대습도의 경우에는, 보현산에서 동 기간에 60.9-91.3%에서 67.5-94.6%로 3-7% 상승하였고, 소백산에서는 64.3-80.7%에서 60.6-96.6%로 최대 15% 이상 상승하였다. 과거에 비해 기온이 상승하였음에도 불구하고 상대습도 역시 더 높아졌다는 것은 공기 중의 수증기량이 증가하였음을 의미한다. 그림 4, 그림 5에서 이 논문의 계산 결과와 문봉곤 외(2004)의 결과를 비교할 때, 보현산의 경우에는 겨울철을 제외한 나머지 기간에는 그 차이가 크지 않은 반면, 문봉곤 외(2004)이 더 오래 전의 기상자료를 사용한 소백산의 결과는 년중 전기 간에 걸쳐 차이가 크다. 이는 장기간에 걸쳐 대기 중의 수증기량이 점차 높아져 왔다는, 즉 적외선 파장영역의 대기투과율 조건은 과거에 비해 나빠졌다는 추측을 가능케 한다.

4. KASINICS L-밴드 시험관측 및 PWV 조건

적외선카메라 KASINICS의 성능을 결정짓는 중요한 요인은 크게 3가지이다. 첫 번째 요인은 대

표 2. 지표면 이슬점온도를 이용한 PWV 추정 결과(월평균).

월	보현산 천문대				소백산 천문대			
	기온 (°C)	상대습도 (%)	이슬점온도 (°C)	PWV (mm)	기온 (°C)	상대습도 (%)	이슬점온도 (°C)	PWV (mm)
1	-2.1	76.8	-5.2	7.3	-5.1	64.9	-10.1	5.2
2	0.9	75.9	-2.5	8.8	-1.1	60.6	-7.0	6.4
3	3.4	77.7	-0.1	11.0	0.1	76.4	-3.1	8.9
4	5.5	67.5	0.0	11.1	5.0	61.2	-1.6	9.9
5	12.8	70.9	7.7	19.1	12.4	64.2	5.8	16.7
6	16.1	84.1	13.4	25.4	16.4	74.0	11.8	22.7
7	18.2	90.7	16.7	32.1	16.6	96.6	16.1	30.8
8	20.1	94.6	19.2	38.3	20.4	85.7	17.9	34.9
9	13.6	89.3	11.9	25.7	14.1	72.2	9.2	21.2
10	12.3	77.1	8.4	20.1	12.4	64.9	6.0	16.9
11	3.1	81.3	0.2	11.2	1.9	72.1	-2.3	9.4
12	-0.3	78.2	-3.2	8.4	-4.1	70.6	-8.1	5.9
문봉곤 외(2004) ¹								
1	-6.3	70.7	-10.3	5.1	-9.3	72.5	-12.9	4.2
2	-4.8	60.9	-10.5	5.0	-8.6	77.5	-11.5	4.7
3	-2.1	68.1	-6.6	6.9	-2.4	71.8	-6.3	7.1
4	6.3	62.5	-0.3	10.9	3.9	70.1	-0.9	10.4
5	12.5	72.8	7.8	19.2	10.7	64.3	4.2	15.0
6	17.2	91.3	15.8	30.1	15.0	76.4	10.9	21.3
7	18.9	90.6	17.3	33.6	17.1	79.6	13.5	25.7
8	18.9	89.1	17.1	32.9	16.7	80.7	13.4	25.4
9	14.7	84.6	12.1	26.1	12.4	78.2	8.7	20.5
10	7.8	77.4	4.1	14.8	6.8	74.4	2.6	13.3
11	5.0	77.6	1.4	12.2	0.1	71.6	-3.9	8.4
12	-4.6	72.8	-8.3	5.9	-7.2	70.3	-11.2	4.8

¹ 문봉곤 외(2004)가 사용한 기상자료는 보현산 천문대의 경우 1993-1994년, 소백산 천문대의 경우 1978-1980년에 측정된 것이다.

기에 의한 배경복사 잡음이고, 두 번째 요인은 광학망원경에서 발생하는 열복사 잡음이며, 세 번째 요인은 카메라의 내부 부품에서 발생하는 열복사 잡음이다. 광학망원경의 구조물에서 오는 열복사 잡음은 1:1 오프너 릴레이(Offner relay)를 사용하여 제거할 수가 있으며(육인수 외 2005, Offner 1975), 내부 부품의 열복사 잡음을 최소화하기 위해서는 근적외선 카메라의 경우 내부 부품들의 온도를 약 80K까지 낮추어서 내부 부품의 열복사 잡음이 관측하늘의 배경복사 잡음의 효과에 묻히도록 하여야 한다(Nagashima 2003). 그 외에 검출기의 암전류와 읽기잡음 등이 있으나 암전류는 검출기를 냉각하여 최소화 하면 무시할 수 있을 정도로 작아지고 읽기잡음은 전자부 제어기(Readout controller; Cho et al. 2006)의 조정 작업을 통하여 최소화하게 된다.

대기의 배경복사 잡음은 OH와 O₂ 분자의 방출선과 대기 수증기의 열복사로 나누어지는데 2.3 μ m 이하의 영역에서는 분자의 방출선이 주를 이루고 3-13 μ m의 영역에서는 수증기의 흑체복사가 주를 이룬다. 특히 수증기의 흑체복사는 3-13 μ m의 영역에서 망원경 경면과 관측기기의 흑체복사보다 더 큰 잡음을 유발한다(McLean 1997).

현재 대다수의 근적외선 카메라들이 HgCdTe detector를 탑재하여 주로 1-2.5 μ m의 짧은 파장 영역에서만 관측이 가능한 반면, KASINICS는 InSb detector를 탑재하여 L 밴드를 포함한 5 μ m 영역까지 관측이 가능한 장점을 가지고 있다. KASINICS는 3년 간에 걸친 설계, 제작 과정을 마치고 2006년 12월 보현산 1.8m 망원경에 장착되어 시험관측을 수행하였으며 이를 통해 토성의 L 밴드 영상 촬영

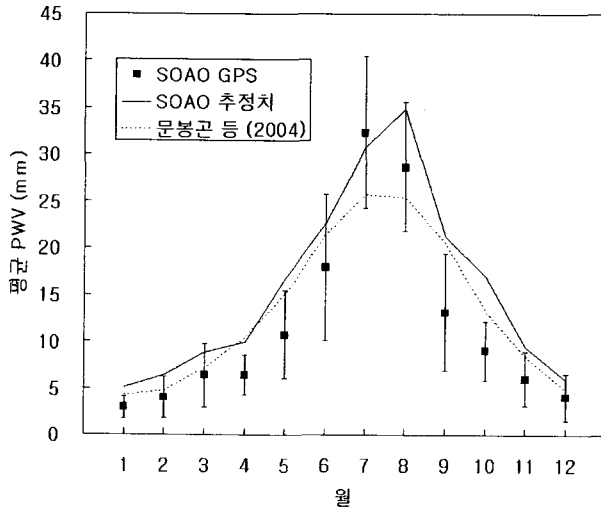


그림 5. 소백산 상공의 월별 PWV 분포(사각형 - GPS 실측치(2006. 7. - 2007. 6.), 실선 - 지표면 이슬점 온도를 이용한 예상치(2006. 7. - 2007. 6. 기상자료 사용), 점선 - 문봉곤 외(2004)의 예상치(1978. 1. - 1980. 12. 기상자료 사용)). GPS PWV의 오차막대는 월 중 관측데이터의 표준편차.

표 3. KASINICS L-밴드 시험관측 내역.

항목	내용
관측대상	토성
일시	2006년 12월 20일 03시
망원경	보현산 1.8m 광학망원경
필터	L-band(3.2 - 3.8 μ m)
노출시간	0.1초
촬영방식	5 frames \times 2 sets (70 arcsec offset)

에 성공하였다(그림 1). L 밴드 시험관측에 관한 내용은 표 3과 같다.

2006년 12월 15 - 20일의 KASINICS 시험관측 기간의 대기 투과율 조건을 확인하기 위하여 당시 보현산에서 측정된 GPS PWV 데이터를 분석하였다. 보현산 12월 시험관측 기간의 GPS PWV 측정치는 평균 7.2mm로서 이러한 조건 하의 이론적인 대기투과율은 그림 6과 같다. 이로부터 계산되는 L 밴드의 평균 대기투과율은 약 60%이다. KASINICS 개발 초기의 분석 단계에서 보현산 12월의 PWV는 6mm 수준으로 예상되었으며(문봉곤 외 2004), 12월을 포함해서 1월, 2월의 겨울철에는 L 밴드 관측이 가능할 것으로 기대되었다. 실제로 2006년 12월에 측정된 PWV는 예상치와 거의 같은 수준이었고 그림 1에서 보여진 바와 같이 토성의 L 밴드 영상을 성공적으로 획득할 수 있었다. 그러나 이 결과는 KASINICS 시스템에 고속 읽기 모드 등 본격적인 L 밴드 관측에 필요한 기능들이 구현되기 전에 최소한의 관측 가능성을 확인한 것이라고 할 수 있다. 국내에서의 L 밴드 관측가능성을 결정하기 위해서는 계절 별로 PWV가 다른 경우에 표준성을 관측하여 한계등급을 구해야 할 것이다. KASINICS 개발팀은 향후 지속적인 시스템 개선과 추가적인 시험관측을 통해 L 밴드 관측 가능성을 정량적으로 분석할 계획이다.

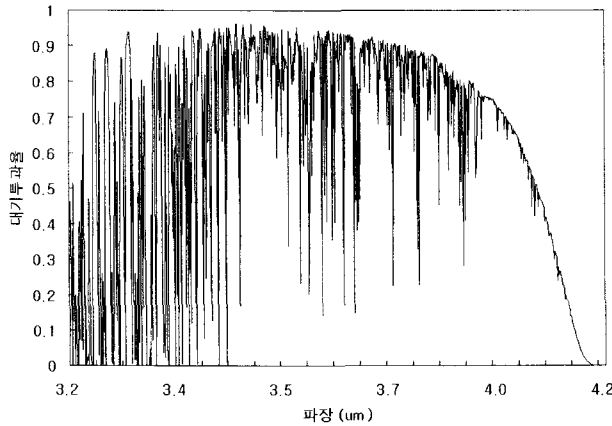


그림 6. PWV = 7.2mm일 때 L 밴드의 대기투과율.

5. 결론 및 토의

2006년 7월부터 2007년 8월까지 누적된 GPS PWV 자료로부터 보현산과 소백산 천문대 상공의 년중 PWV 변화 추이를 살펴 보았다. 그 결과, 국내 천문대도 가을철 및 겨울철에 미국 Kitt Peak과 같은 우수한 적외선 관측 사이트에 못지 않은 대기투과율 조건을 갖추고 있음을 확인하였다. 또한 2006년 12월의 KASINICS 적외선 시험관측을 통해 대기 투과율의 영향을 크게 받는 L 밴드 관측 가능성을 타진하였다.

한편 GPS PWV 측정치는 천문대의 기온 및 습도 자료를 이용하여 이슬점온도로부터 추정된 PWV 예상치보다 작았다. 이 논문의 계산 방법과 동일한 방법을 이용하였으나 수십년 전의 기상자료를 사용한 문봉근 외(2004)의 PWV 추정치는 현재의 추정치에 비해 전체적으로 작게 나타났다. 이는 과거의 대기투과율 조건이 현재보다 더 좋았을 가능성이 있음을 의미한다.

이 논문에서 제시한 PWV의 년중 변화 추이를 활용하면 계절별 적외선 관측조건과 년중 최적 관측 시기를 판단하여 망원경의 사용시간 제한 시 활용할 수 있다. 이러한 년중 변화 추이에 대한 분석은 해를 거듭해 데이터가 누적될수록 더욱 정밀해질 것이며 장기간의 데이터가 확보되면 기후 변화에 관한 연구도 가능할 것이다.

한국천문연구원의 GPS PWV 측정 시스템은 향후 자동화 및 최적화 과정을 거쳐 준 실시간(30분 내지 1시간 지연)으로 인터넷을 이용해 PWV 정보 서비스를 제공할 예정이다. 이 서비스를 천문대의 기상 모니터링 시스템과 연동하여 천문대 상공의 수증기량 정보를 관측자가 준실시간으로 볼 수 있게 하면 전반적인 대기상태의 파악에 도움이 될 뿐만 아니라 L 밴드 관측시 관측대상, 노출시간 등을 결정하는데 보조자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이 때 PWV와 필터 밴드별 대기투과율의 관계를 도표로 제시하면 보다 정확한 참고자료가 될 것이다.

감사의 글 : 논문의 완성도가 높아질 수 있도록 많은 조언을 주신 심사위원들과 기상자료와 관련하여 도움을 주신 보현산 천문대 및 소백산 천문대 관계자 여러분들께 감사를 드립니다. 이 연구는 한국천문연구원원의 적외선 관측기술 개발 연구사업과 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3104)의

지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김지영 1994, 석사학위논문, 경북대학교
- 문봉근, 이성호, 박수중, 진호, 김용하, 육인수, 한원용 2004, 한국우주과학회지, 21, 453
- 문용진 1998, 석사학위논문, 연세대학교
- 박수중, 한원용, 남옥원, 박장현, 육인수, 진호, 선광일, 이대회, 경재만, 천무영, 김영수, 성언창, 이성호, 문봉근, 공경남, 강지나, 한정열, 장유성, 박영식, 손종대 2004, 적외선관측기술개발, 기관고유사업보고서 (대전: 한국천문연구원)
- 박수중, 진호, 육인수, 이성호, 남옥원, 한원용, 박장현, 이대회, 경재만, 박영식, 문봉근, 공경남, 한정열, 조승현, 차상목, 목승원 2005, 적외선관측기술개발 II, 기관고유사업보고서 (대전: 한국천문연구원)
- 백정호, 이재원, 최병규, 조정호 2007, 한국우주과학회지, 24, 275
- 심경진, 한원용 1982, 국립천문대 논문집, 5, 41
- 육인수, 이성호, 진호, 선광일, 박수중, 이대회, 남옥원, 문봉근, 차상목, 한정열, 경재만, 김건희, 양진석 2005, 한국천문학논총, 20, 1
- 이성호, 육인수, 진호, 박수중, 한정열, 이대회, 공경남, 조승현, 박영식, 박장현, 한원용 2005, 한국천문학논총, 20, 151
- 이용호, 임규호, 이수정 2000, 한국기상학회지, 36, 257
- 조정호, 박필호, 박종욱, 임형철, 김상조, 조하만, 김명수, 서애숙 2001, 한국기상학회지, 37, 557
- 진호, 육인수, 이성호, 남옥원, 경재만, 박영식, 문봉근, 공경남, 조승현, 차상목, 목승원 2006, 적외선관측기술개발 III, 기관고유사업보고서 (대전: 한국천문연구원)
- 한영호 1968, 한국기상학회지, 4, 23
- 한영호 1971, 한국기상학회지, 7, 65
- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. 1992, JGR, 97, 11787
- Cha, S., Jin, H., Yuk, I., Lee, S., Nam, U., Moon, B., Mock, S., Han, J., Lee, D., Park, J., Kyeong, J., Pak, S., Kim, G., & Kim, C. 2006, in Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, eds. I. McLean & M. Iye (Bellingham: SPIE), p.62694W
- Cho, S., Jin, H., Nam, U., Lee, S., Kong, K., Yuk, I., Park, Y., Pak, S., Han, W., & Kim, S. 2006, in Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, eds. I. McLean & M. Iye (Bellingham: SPIE), p.62695Y
- McLean, I. 1997, Electronic Imaging in Astronomy (Chichester: Praxis publishing Ltd), pp.195-229
- Nagashima, C. 2003, PhD Thesis, Nagoya University
- Offner, A. 1975, Opt. Engineering, 4, 130
- Traub, W. A. & Stier, M. T. 1976, Appl. Optics, 15, 364
- Wallace, L., Brault, J. W., Brown, M., & Livingston, W. 1984, PASP, 96, 836