J. Astron. Space Sci. 21(4), 453–466 (2004)

보현산천문대와 소백산천문대에서의 근적외선 관측 조건

문봉곤[1,2†], 이성호[2,3], 박수종[2], 진호[2], 김용하[1], 육인수[2], 한원용[2]
[1]충남대학교 천문우주과학과
[2]한국천문연구원
[3]서울대학교 지구환경과학부 천문학전공

NEAR-INFRARED OBSERVING CONDITIONS AT THE BOAO AND THE SOAO

Bongkon Moon[1,2†], Sungho Lee[2,3], Soojong Pak[2], Ho Jin[2], Yong Ha Kim[1], In-Soo Yuk[2], and Wonyong Han[2]
[1]Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam University, Daejeon 305-764, Korea
[2]Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea
[3]Astronomy Program in SEES, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
E-mail: bkmoon@kao.re.kr

(Received October 21, 2004; Accepted November 16, 2004)

요 약

한국천문연구원에서는 적외선관측기술 개발의 일환으로 지상망원경용 근적외선 카메라인 KAONICS(KAO Near-Infrared Camera System)를 개발하고 있다. 이러한 개발의 선행 연구 과정으로서 우리는 보현산천문대와 소백산천문대의 근적외선($1-5\mu$m) 관측 조건을 정량적으로 조사했다. KAONICS의 기본 파장 밴드인 J, H, K, L 에 대해 대기 투과 모델을 사용하여 PWV(Precipitable Water Vapour)에 따른 대기투과율을 계산했으며, 각각의 파장 밴드에서 관측 한계 등급을 계산했다. 계산 결과, 두 천문대 모두 근적외선 영역에서 관측이 가능하며, 서로 비슷한 관측 능력을 가지고 있다는 결론을 얻었다.

ABSTRACT

Korea Astronomy Observatory(KAO) has been developing the KAONICS, KAO Near-Infrared Camera System, which will be used for near-infrared observations in the ground-based telescopes of Korea. As a phase-A study for this work, we investigated observational environments at the Sobaeksan Optical Astronomy Observatory(SOAO) and the Bohyunsan Optical Astronomy Observatory(BOAO) quantitatively. In the J, H, K, and L bands, atmospheric transmission was calculated mainly depending on the PWV(Precipitable Water Vapour), and limiting magnitudes were computed for the SOAO and the BOAO, respectively. We conclude that these observatories have similar observing capabilities and domestic observations are possible in near-infrared.

Keywords: near-infrared, limiting magnitude

†corresponding author

1. 서 론

최근 천문학계에서는 관측기술의 발달로 인해 적외선 천문학 분야에 많은 연구가 활발히 진행되고 있으며, 세계적으로 여러 적외선 우주 망원경 미션들이 진행되고 있다. 이런 추세와 더불어 한국천문연구원에서는 과거의 경험(경재만 외 1997)을 바탕으로 새롭게 지상망원경용 근적외선 카메라 KAONICS(KAO Near-Infrared Camera System)를 개발하고 있다. 이에 필요한 선행 연구로서 소백산천문대와 보현산천문대의 망원경을 이용할 경우를 상정하여 각 천문대에 대한 관측환경의 조사 및 천체의 관측 한계를 조사했다. 적외선 관측에서는 가시광 관측에서 고려되지 않는 망원경의 열적 복사, 대기의 열적 복사 등 다양한 열적 복사들이 영향을 미치기 때문에 실제 관측에 있어서 매우 큰 배경 잡음을 고려해야 한다. 우리는 이러한 조건들을 고려한 정량적인 계산을 통해서 천문 관측의 한계를 가늠하고자 한다. 이 연구에서는 먼저 근적외선 영역에서 대기투과율에 중요한 영향을 미치는 대기 수증기량을 조사하고, 이를 이용하여 KAONICS의 기본 관측 파장대인 J, H, K, L 밴드에 대한 대기투과율과 관측 한계등급을 계산하여 비교하고자 한다.

2. 근적외선 영역에서의 대기투과

2.1 대기 중의 수증기

지상망원경을 이용한 적외선 관측에서 대기에 포함된 수증기는 대기 흡수와 대기 열적 복사의 주요 원인으로써 각각 대기 불투명도와 방출율에 큰 영향을 미친다. 특히, 검출기에 들어오는 전체 배경 열적 복사 중에서 대기 열적 복사는 $2.3-13\mu$m에서 가장 큰 비중을 차지하고, 13μm 이상에서는 망원경 열적 복사가 더 커진다(McLean 1997). 그러므로 근적외선 관측에서 대기 중의 수증기량은 반드시 고려되어야 한다.

일반적으로 대기 중 수증기량을 측정하는 지표로써 가강수량 즉, PWV(Precipitable Water Vapour)를 사용한다. PWV는 대기 중의 전체 수증기가 액체 상태로 지면에 쌓였을 때의 높이로 정의되며, mm 단위로 표시된다. 대기 중의 수증기량은 기온에 따른 증발량에 비례하므로 고위도 지역으로 갈수록 감소하고, 동일 위도에 따라 대체로 평행하게 분포하며, 계절 변화에 따라 여름철에 증가하고 겨울철에 감소한다(Wallace et al. 1984, 이용호 외 2000). 대기 중 수증기의 높이 척도(scale height)는 약 2km이기 때문에 PWV는 고도가 높아질수록 급격히 감소한다(Traub & Stier 1976). 따라서 Mauna Kea와 같은 해발 4km 이상의 높은 산 정상이 보다 최적의 적외선 관측환경을 제공한다.

PWV 측정 방법에는 여러 가지가 있다. 가장 일반적인 방법은 라디오존데로 측정한 고도별 비습(specific humidity)을 적분하여 PWV를 구하는 것이다(한영호 1968, 1971). 비습은 단위 부피당 전체 공기 질량에 대한 수증기 질량의 비율을 의미한다. 다른 방법으로 필터를 사용하여 1.65μm 밴드와 1.87μm 밴드에서 태양광의 대기투과율을 측정하여 PWV를 구하는 이동식 태양광 측정기(Westphal 1975)는 Cerro Tololo, Chacaltaya, Kitt Peak, Lemmon, Mauna Kea, McDonald, Palomar, Sacramento Peak, San Pedro Martir, White Mountain, Wyoming 등 유수의 적외선 관측 사이트의 평가에 사용되었다(Westphal 1975, Beckers et al.1979). 태양광 측정 방식 중 보다 정밀한 방법은 고분해능 태양 분광기를 이용한 PWV 연구이다. 예를 들어 Kitt Peak McMath 망원경은 grating spectrograph을 사용한 1.0832μm(Wallace & Livingston 1984), FTS(Fourier Transform Spectrometer)를 사

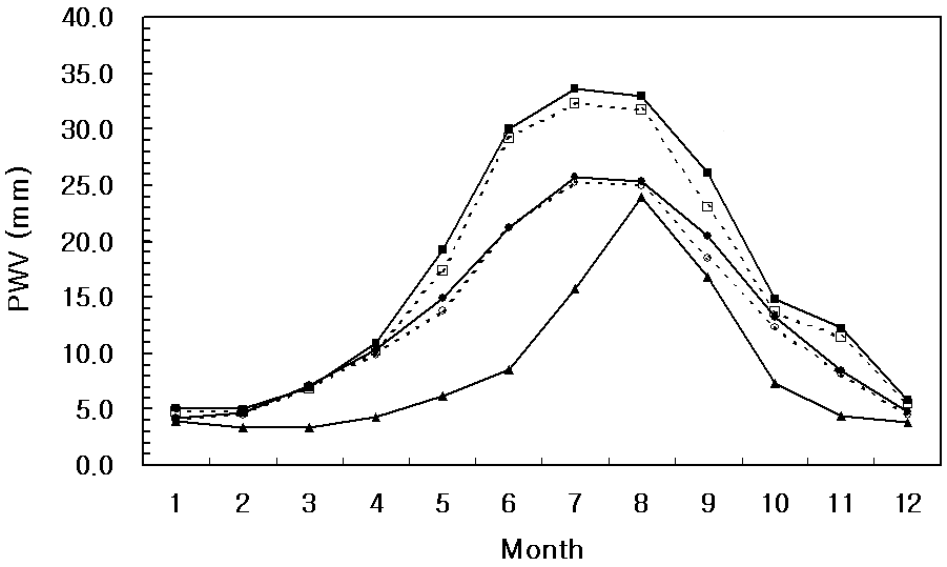

그림 1. 각 지역별 월평균 PWV. 사각형: 보현산, 원: 소백산, 삼각형: Kitt Peak(Wallace et al.(1984)의 그림 1 참조). 실선은 중부지방 관계식 이용, 점선은 남부지방 관계식 이용.

용한 2.1882μm, 2.1905μm, 2.1946μm(Wallace et al. 1984) H_2O선 관측 및 PWV 측정 연구에 이용되었다. 적외선 밴드에서의 태양 관측 결과와 라디오존데 측정 결과를 비교하면 대체로 잘 일치는데, 예를 들어 Kitt Peak과 Tucson 공항 관측소, Mauna Kea와 Hilo 관측소를 비교한 측정결과에서 여름철을 제외하고는 잘 일치하고 있으며(Wallace et al. 1984), 유럽 지역 관측 결과도 대체적으로 잘 만족한다(Greve 1978). 이 외에도 PWV 측정 방법에는 기상위성 관측, GPS를 이용한 방법이 있다. 기상위성 관측은 공간 분해능이 떨어지는 반면 넓은 지역의 분포 조사에 이용할 수 있다(이용호 외 2000). GPS를 이용한 방법은 GPS 신호의 대류층 지연효과를 이용하여 PWV를 측정할 수 있으며 측정 정밀도 향상을 위해 연구 중이다(조정호 외 2001). 하지만, 현재 소백산과 보현산에서는 측정기기의 부재 및 자료 부족으로 위에서 열거한 측정방법을 이용하기가 힘들다. 그래서 우리는 가장 상관 관계가 높은 물리량으로부터 PWV를 추정하려고 한다. 이것은 지표면 이슬점 온도를 이용한 PWV 추정 방법이다. 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. 이 계산의 오차 범위는 ±12% 이다. 남부 지방의 경우에는 제주도 모슬포 관측소의 결과를 바탕으로 봄, 여름, 가을의 관계식으로 식 (4)를, 겨울에는 식 (5)를 구하였다(한영호 1971). 이 계산의 오차 범위는 ±10% 이다.

$$\ln(W) = 0.0393 \times T_d - 1.155 \quad (1)$$

$$\ln(W) = 0.0393 \times T_d - 1.273 \quad (2)$$

$$\ln(W) = 0.0393 \times T_d - 1.204 \quad (3)$$

표 1. 대기 수증기량.

PWV	소백산	보현산	Kitt Peak
여름(최대)	25 mm	33 mm	24 mm
겨울(최소)	4.2 mm	5.0 mm	3.4 mm

$$\ln(W) = 0.0361 \times T_d - 1.108 \quad (4)$$

$$\ln(W) = 0.0361 \times T_d - 1.221 \quad (5)$$

여기에서 W는 월평균 PWV(단위: cm), T_d는 지표면의 월평균 이슬점 온도(단위: °F)이다. 이슬점 온도는 기온과 상대습도로부터 계산될 수 있다. 우리는 소백산의 경우 1978년 1월부터 1980년 12월까지 소백산 천문대에서 측정한 기온 및 상대습도 자료(심경진과 한원용 1982)를, 보현산의 경우 1993년 4월부터 1994년 3월까지 보현산 천문대에서 측정한 기온 및 상대습도 자료(김지영 1994)를 가지고 관련 프로그램 Psy 1.0(국민대학교 열환경실험실 제공)을 이용하여 이슬점 온도를 계산했다. 지표면 이슬점 온도와 PWV 관계식은 우리나라 중부 지방 관계식과 남부 지방 관계식을 둘 다 사용했으며 그 결과에는 큰 차이가 없다. 계산 결과는 그림 1에서 잘 나타내고 있다.

고도 측면에서 소백산(1378m)은 Kitt Peak(1938m)에 비해 낮아서 PWV가 더 클 것으로 예상되지만, 위도 측면에서는 소백산(북위 37°)이 Kitt Peak(북위 32°)보다 높기 때문에 PWV 감소 효과가 예상된다. 소백산의 겨울철의 최소 PWV(4.2mm)는 Kitt Peak(3.4mm)보다 약간 큰 수준이며 이런 수준의 PWV가 유지되는 시기는 2 – 3개월로 Kitt Peak의 절반 정도에 불과하다. 미국 Arizona 지역이 계절풍의 영향을 받는 여름철(Warner 1977)은 Kitt Peak의 PWV(24mm)도 상당히 증가해서 소백산(25mm)과 비슷한 수준까지 상승한다. 보현산은 고도(1124m)와 위도(북위 36°)가 모두 소백산보다 낮아서 PWV가 더 클 것으로 예상할 수 있다. 보현산의 겨울철 최소 PWV(5.0mm)는 소백산(4.2mm)보다 약간 크지만 여름철에는 최대 33mm까지 증가한다. 계절에 따른 변화 양상은 소백산과 비슷하여 최소 수준의 PWV가 유지되는 기간은 역시 2 – 3개월 정도로 Kitt Peak에 비해 훨씬 짧다. 위 결과를 표 1은 간략하게 나타내고 있다.

2.2 대기 투과율

대기 투과 모델을 사용하여 소백산천문대와 보현산천문대 상공의 대기 투과율을 계산하고, 성공적인 근적외선 관측 사이트 중의 하나인 Kitt Peak 천문대의 계산 결과를 기준으로 비교하였다. 대기 투과 모델에는 IRTRANS4(Traub & Stier 1976), ATRAN(Lord 1992), ATMO(Grossman 1989) 등이 있는데, 우리는 이 모델들 중에서 ATMO를 사용하여 대기 투과율을 계산했다. ATMO의 계산 결과는 IRTRANS4의 계산 결과(http://www.jach.hawaii.edu/JACpublic/UKIRT/astronomy/calib/atmos-index.html 참조) 및 ATRAN의 계산 결과(Cox 2000)와 비교해서 큰 차이가 없었다. 우리는 이 모델들 중에서 ATMO 모델을 사용하여 대기 투과율을 계산했다. ATMO에 들어가는 입력값은 관측지의 위치, PWV, 천정거리이다. 관측지의 위치는 위도, 경도, 고도가 입력되며, 소백산의 위치는 동경 128° 27′27.3594″, 북위 36° 56′ 3.8843″, 고도 1377.99m(http://www.kao.re.kr/∼sobaek 참조), 보현산의 위치는 동경 128° 58′ 35.68″, 북위 36° 9′ 53.19″, 고도 1124m(http://www.boao.re.kr 참조), Kitt

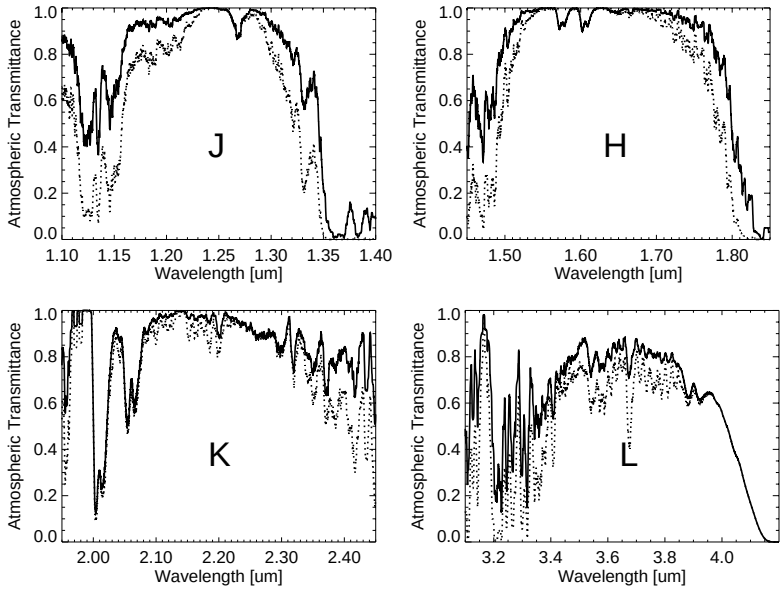

그림 2. 계산된 소백산 상공의 대기 투과율(J, H, K, L 밴드, 천정거리는 60도). 겨울(PWV = 4.2mm - 실선)과 여름(PWV = 25mm - 점선).

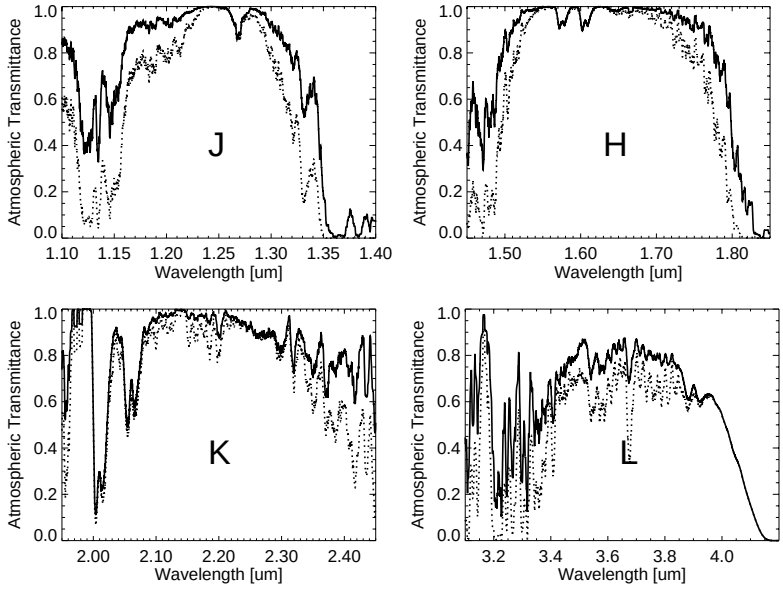

그림 3. 계산된 보현산 상공의 대기 투과율(J, H, K, L 밴드, 천정거리는 60도). 겨울(PWV = 5.0mm - 실선)과 여름(PWV = 33mm - 점선).

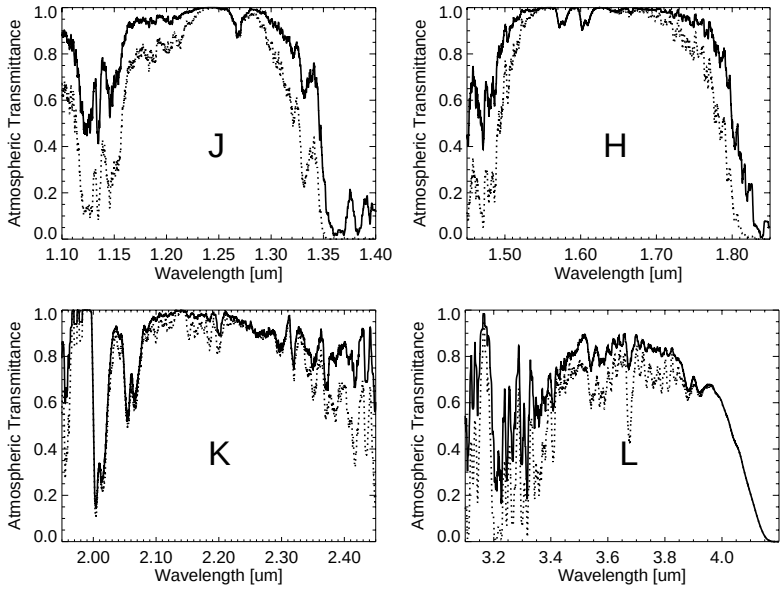

그림 4. 계산된 Kitt Peak 상공의 대기 투과율(J, H, K, L 밴드, 천정거리는 60도). 겨울(PWV = 3.4mm - 실선)과 여름(PWV = 24mm - 점선).

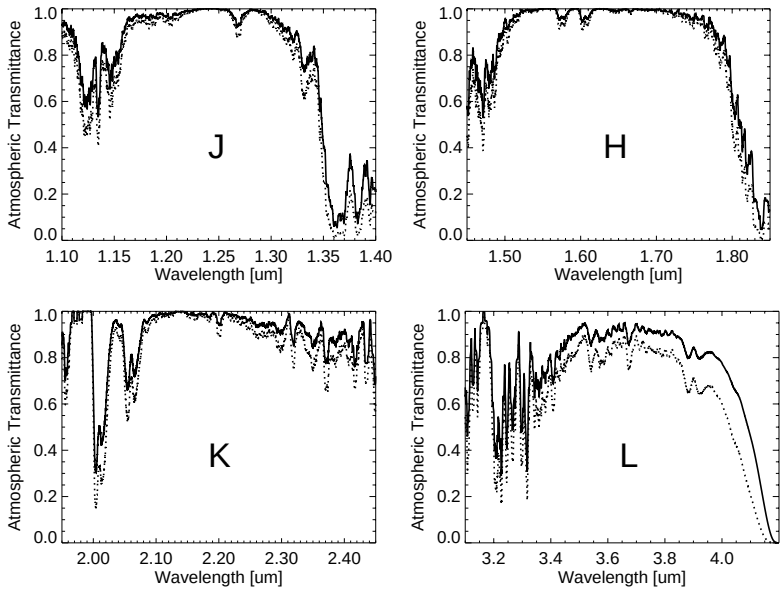

그림 5. 천정거리에 따른 대기 투과율 차이 1(J, H, K, L 밴드). PWV = 3.4mm, 천정거리 0도(실선), 60도(점선).

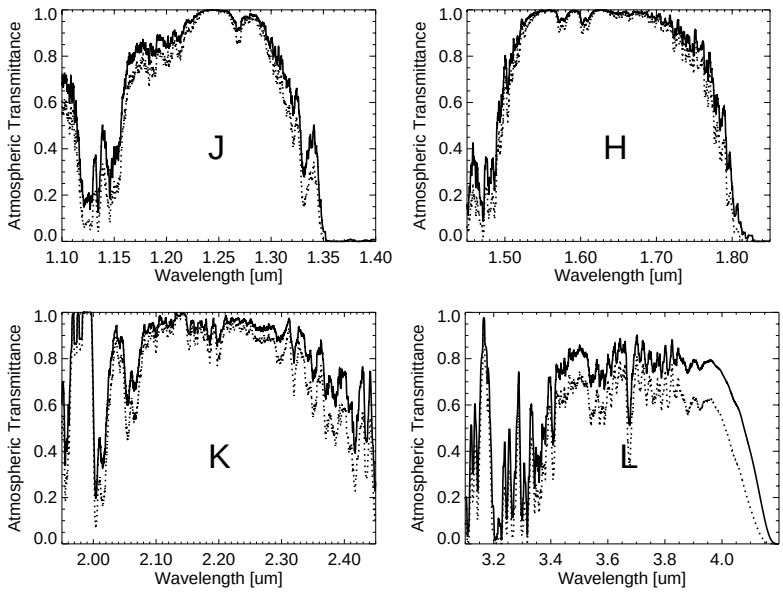

그림 6. 천정거리에 따른 대기 투과율 차이 2(J, H, K, L 밴드). PWV = 33mm, 천정거리 0도(실선), 60도(점선).

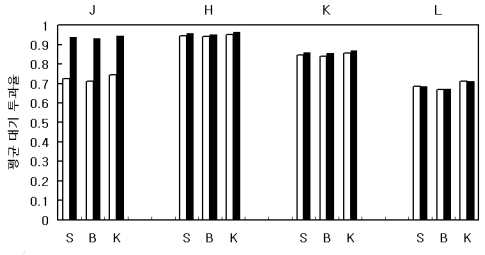

그림 7. 겨울철(PWV 최소) 평균 대기 투과율 비교. 흰색 막대는 표준 필터 시스템, 검정색 막대는 Mauna Kea 필터 시스템. 가로축에서 S는 소백산, B는 보현산, K는 Kitt Peak을 의미한다.

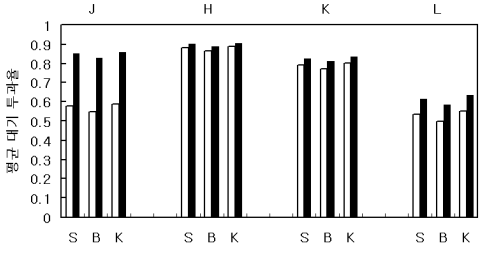

그림 8. 여름철(PWV 최대) 평균 대기 투과율 비교. 나머지는 그림 7과 동일.

표 2. KAONICS 광학계의 효율.

광학요소	J-Band	H-Band	K_s-Band[1]	L-Band
망원경(반사 × 2)	∼ 90%	∼ 90%	∼ 90%	∼ 90%
입사창(투과 × 1)	≥ 95%	≥ 95%	≥ 95%	≥ 95%
Offner(반사 × 3)	≥ 83%	≥ 83%	≥ 83%	≥ 83%
Blocking filter 1	∼ 91%	∼ 90%	–	–
Band-pass filter 1	∼ 80%	∼ 80%	∼ 80%	∼ 80%
KAONICS	≥ 57%	≥ 57%	≥ 63%	≥ 63%
망원경+KAONICS	≥ 52%	≥ 52%	≥ 57%	≥ 57%

[1]K short band: 1.99 – 2.31 μm, K-band에 비해서 배경 열적 복사의 영향이 적다.

Peak의 위치는 서경 111° 36′53.475″, 북위 31° 57′ 11.990″, 고도 1938m(http://www.nas.edu/bpa1/US_Radio_Astronomy_Observatories.htm 참조)를 사용하였다. 소백산 및 보현산의 PWV는 지표면 이슬점 온도에서 추정한 결과를 사용했으며, Kitt Peak의 PWV는 분광기 관측으로 측정한 결과를 사용했다. 천정거리는 그 값을 다양하게 변화시켜 계산했다. 계절에 따른 PWV값을 변화시키면서 J, H, K, L 밴드 각각에 대한 대기 투과율을 계산한 결과는 소백산, 보현산, Kitt Peak에 대해 각각 그림 2, 그림 3, 그림 4에서 나타내고 있다. 또한, 각 파장 밴드에서 천정거리의 변화에 따른 대기 투과율 계산 결과는 그림 5(PWV가 최소 3.4mm일 때)와 그림 6(PWV가 최대 33mm일 때)과 같다. 천정거리가 클수록, 즉 관측 지향점의 고도가 낮을수록 대기 투과율이 감소함을 알 수 있다.

파장에 따른 대기 투과율 계산 결과로부터, 표준 필터 시스템과 Mauna Kea 필터 시스템(Tokunaga et al. 2002)에 대해 여름과 겨울로 나누어서, J, H, K, L 밴드별 평균 대기 투과율을 계산해 보았다. 그 결과를 그림 7과 그림 8에 나타내고 있다. 여기에서 H, K 밴드는 평균 대기 투과율 측면에서 표준 필터와 Mauna Kea 필터의 차이가 거의 없지만, J 밴드 표준 필터는 흡수가 많은 파장영역을 포함하므로 평균 대기 투과율이 Mauna Kea 필터에 비해 낮다. 그리고 L 밴드의 경우에 겨울철에는 차이가 없지만 PWV가 커지는 여름철에는 표준 필터의 평균 대기 투과율이 더 낮아진다. 또한, Kitt Peak, 보현산, 소백산 순으로 투과 밴드에 관계없이 평균 대기 투과율이 높다. 그림에 나타낸 PWV 최소와 최대의 경우만 보면 투과율의 차이는 크지 않아 보이지만 실제로 높은 수준의 대기 투과율이 유지되는 기간은 Kitt Peak이 소백산 및 보현산에 비해 월등히 길다.

3. 관측 한계등급 계산

대기 투과율 계산과 더불어 우리는 소백산천문대와 보현산천문대에서 관측 가능한 천체의 한계등급을 계산했다. 검출기에 입사되는 잡음원은 가장 지배적인 배경 열적 복사(background thermal radiation)만을 고려했으며, 신호 대 잡음비(S/N)가 10이 될 때 관측 가능한 것으로 계산했다. 그리고, 이 계산에서 적용되는 시스템은 현재 한국천문연구원에서 개발 중에 있는 KAONICS를 기준으로 고려를 하고자 한다. 현재의 KAONICS 설계 사양에 따르면 광학계의 투과율은 표 2와 같이 예상되며, 밴드별 필터 파장은 표 3과 같다. 배경 복사는 크게 망원경 열적 복사, 지구 고층대기의 OH 대기광, 대기 열적 복사로 나눌 수 있다. 각각의 자세한 내용은 다음 단락에서 구체적으로 기술된다.

첫째로, 망원경의 열적 복사는 망원경의 주경과 부경에서 나오는 열적 복사를 의미한다. 우리는

표 3. KAONICS 밴드별 파장 영역.

밴드	J-Band	H-Band	K_s-Band	L-Band
중심파장(μm)	1.25	1.64	2.15	3.50
밴드폭(μm)	0.16	0.29	0.32	0.60

표 4. KAONICS 밴드별 시상 크기.

천문대	Visual[1]	J-Band	H-Band	K_s-Band	L-Band
SOAO(주경 직경 0.61m, 부경 직경 0.18m)[2]	2.0″	1.67″	1.58″	1.49″	1.36″
BOAO(주경 직경 1.8m, 부경 직경 0.585m)[3]	1.5″	1.25″	1.18″	1.12″	1.02″

[1]가시광 영역에서 경험적 평균값(경재만 외 1997)
[2]홈페이지 http://www.kao.re.kr/∼sobaek 참조
[3]경재만 외(1997) KAO 기술보고서 참조

주경과 부경의 열적 복사를 Planck 복사 관계식인 식(6)으로부터 계산한다.

$$B_\lambda(T_{tel}) = 1.1910 \times 10^8 \lambda^{-5}/(e^{14387.7/(\lambda T_{tel})} - 1) \;\; [W\ m^{-2}\mu m^{-1} sr^{-1}] \tag{6}$$

여기에서 파장 λ 는 μm 단위로 근적외선 밴드별 중심파장이 입력되고(표 3 참조), T_{tel}는 망원경 주경과 부경의 온도로서 절대온도 K 단위로 입력된다. 다음 단계로 검출기에 입사되는 주경과 부경의 복사 플럭스를 다음 식 (7)을 적용해서 계산한다.

$$F_{tel} = B_\lambda(T_{tel}) \cdot \Delta\lambda \cdot \varepsilon \cdot \tau \cdot \Omega \;\; [W\ m^{-2}] \tag{7}$$

여기에서 $\Delta\lambda$는 밴드폭(bandwidth)을 의미한다(표 3 참조). ε은 주경과 부경의 방출율(emissivity)을 의미하며 약 0.1 이 대입되고, τ는 광학계의 투과율을 의미하며 표 2에서 KAONICS 만의 투과율을 적용하여 계산한다. Ω는 입체각(solid angle)으로서 각 파장 영역의 시상 크기(seeing size)를 이용하여 대입한다. 시상 크기는 일반적으로 $\lambda^{-0.2}$ 에 비례한다(Glass 1999). 표 4는 소백산천문대(SOAO)와 보현산천문대(BOAO)의 가시광 영역의 평균 시상 크기를 기준으로 해서 계산한 양을 나타내고 있다.

최종적으로 망원경 열적 복사에 의한 광자의 개수는 식 (8)과 같이 되며 주경과 부경에 대해 각각 계산한 값의 합이 된다.

$$N_{tel} = F_{tel}/E_{ph} \cdot t \cdot (A_p + A_s) \;\; [photons] \tag{8}$$

여기에서 t는 적분 시간을 나타내고, A_p와 A_s는 주경과 부경의 면적을 의미한다. E_{ph}는 광자 1개당의 에너지를 나타내며, hc/λ_0 식에서 중심파장을 대입하여 계산한다.

둘째로, 지구의 고층대기 현상인 OH 대기광은 중간권계면 부근에서 발생하며 수십 분 간격으로 강도 변화가 심하게 나타나므로 지속적인 배경 잡음으로 신호에 섞여 들어오게 된다. 특별히, $1-3\mu m$ 파장 영역에서 주로 강하게 나타나기 때문에 J, H, K_s 밴드에서는 고려해야 하며 L 밴드에서는 무시할 수 있다. 표 5는 문헌에서 참고한 밴드별 OH 대기광의 평균 표면밝기와(Cox 2000, Matsumoto et al. 1994), 관측 입체각(시상 크기의 제곱)으로 입사되는 플럭스의 계산 결과를 보현산천문대와 소백

표 5. OH 대기광의 밝기와 플럭스.

	J-Band	H-Band	K_s-Band
OH airglow$[mag\ arcsec^{-2}]$	15.6	13.8	15.5
SOAO flux$[W\ m^{-2}]$	4.292×10^{-16}	1.322×10^{-15}	1.101×10^{-16}
BOAO flux$[W\ m^{-2}]$	2.405×10^{-16}	7.376×10^{-16}	6.223×10^{-17}

표 6. 대기의 열적 복사 방출율.

	J-Band	H-Band	K_s-Band	L-Band
여름(최대)	0.15	0.10	0.20	0.50
겨울(최소)	0.05	0.05	0.15	0.30

산천문대에 대해 나타내고 있다. 여기서, 소백산천문대의 시상 크기가 보현산천문대에 비해 약 1.3배 크기 때문에 소백산천문대에서의 플럭스가 더 크게 나타났지만, 최종적으로 검출기에 입사되는 복사량은 여기에 망원경의 구경 면적 등을 곱한 값이므로 보현산천문대에서 더 커지게 된다.

셋째로, 대기의 열적 복사는 관측지점 상공의 대기권 전체에서 방출되는 열적 복사의 총합을 의미한다. 대기 열적 복사의 가장 중요한 원천인 수증기의 대기권 전체에 대한 유효 온도는 지표면에 비해서 20 K 정도 낮은 것으로 알려져 있다(McLean 1997). 본 연구에서는 배경 열적 복사로 인한 잡음에 대해 최악의 조건을 상정하기 위하여 대기권 전체의 유효 온도를 관측지에서 측정한 기온에 비해 10 K 낮은 것으로 가정하였다. 계산 방법은 위의 식 (6), (7), (8) 과정과 유사하다. 광학계의 투과율(τ)은 망원경을 포함한 전체 시스템을 고려해야 하며, 집광 면적 A는 주경의 면적으로 계산한다. 대기의 방출율(ε)은 그림 7, 8에서 참고하면 각각 밴드별로 표 6과 같다.

따라서, 근적외선 영역에서 관측할 수 있는 별의 한계등급은 다음 식(9)와 식(10)으로부터 계산될 수 있다.

$$m_{star} = 2.5 \log(F_{vega}/F_{star}) \ \ [mag] \tag{9}$$

$$F_{star} = (S/N) \cdot \sqrt{E_{ph}/(t \cdot A_p)} \cdot \sqrt{(1 + A_s/A_p) \cdot F_{tel} + F_{oh} + F_{atmo}} \ \ [W\ m^{-2}] \tag{10}$$

여기에서 m_{star}는 (S/N)을 가지는 관측 한계등급(limiting magnitude)이고, F_{vega}는 근적외선 관측에서 기준별이 되는 0등급인 Vega를 관측할 때의 플럭스이며(표 7 참조, Cox 2000), F_{star}는 (S/N)을 가지는 한계등급 m_{star}의 플럭스이다. t는 검출기의 적분 시간이고, F_{tel}, F_{oh}, F_{atmo}는 각각 망원경에 의한 열적복사플럭스, OH 대기광의 플럭스, 대기의 열적복사플럭스이다. 우리는 검출기의 적분 시간 변화에 따른 관측가능 한계 가시등급의 변화를 계산했고, 망원경의 주경과 부경 온도를 절대온도 263 K, 273 K, 283 K 일 경우에 대해서 반복 계산했다. 그림 9, 10, 11, 12는 각각 J, H, K_s, L

표 7. 기준별 0등급 Vega에 대한 플럭스.

	J-Band	H-Band	K_s-Band	L-Band
N_ϕ $[photons\ s^{-1}m^{-2}\mu m^{-1}]$	2.02×10^{10}	9.56×10^{9}	4.66×10^{9}	1.17×10^{9}
flux $[W\ m^{-2}]$	2.674×10^{-10}	1.754×10^{-10}	7.863×10^{-11}	2.274×10^{-11}

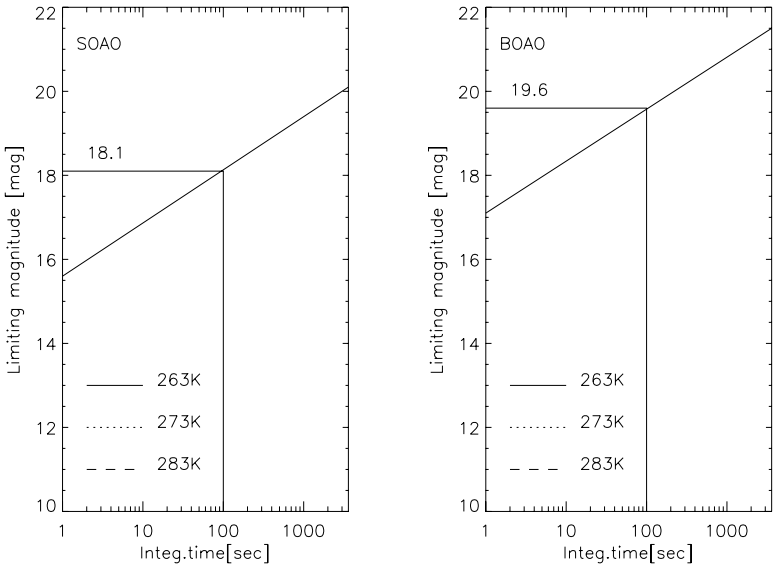

그림 9. J 밴드에서 적분 시간 및 주 · 부경의 온도에 대한 별의 관측한계 가시등급(S/N=10 가정). 왼쪽은 소백산천문대(SOAO, 0.61m), 오른쪽은 보현산천문대(BOAO, 1.8m).

밴드에 대해 그 계산 결과를 보여주고 있다. 근적외선 영역에서는 파장이 길수록 열적 배경 복사가 중요해진다는 사실로부터 예상할 수 있듯이, 망원경의 온도 변화는 J, H 밴드에서는 등급 변화에 영향을 주지 않고, K_s, L 밴드에서만 약간의 등급 변화를 나타내며 L 밴드가 K_s 밴드보다는 더 큰 폭의 변화를 보여준다. 또한, 전체적으로 파장이 긴 밴드로 갈수록 한계등급이 더 낮아지는 경향을 가지며, 단지 K_s 밴드에서는 OH 대기광이 상대적으로 적은 이유로 H 밴드보다 약 0.3 등급 더 어두운 별을 관측할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 100초의 적분 시간에 대해 소백산천문대는 J, H, K_s, L 밴드 순으로 18.1, 17.2, 17.5, 12.4 등급까지 관측 가능하며, 보현산천문대는 J, H, K_s, L 밴드 순으로 19.6, 18.7, 19.0, 13.9 등급까지 관측 가능하다. 보현산천문대가 소백산천문대보다 약 1.5등급 정도 더 어두운 별까지 관측가능함을 보여주며 그 차이는 크지 않음을 보여준다. 그리고 L 밴드는 망원경의 열적 복사와 대기 열적 복사에 더 큰 영향을 받기 때문에, 관측 한계등급이 J, H, K_s 밴드보다 훨씬 더 낮게 계산됨을 알 수 있다.

또한, 퍼진 광원(extended source)을 관측할 경우에 대해서도 고려해 보았다. 예를 들어, 목성의 대기에서 방출되는 H_3^+ 강도(intensity)는 L 밴드에서 평균적으로 $4\times10^{-6}[W\ m^{-2}sr^{-1}]$ 이다. 이 계산을 위해 필요한 적외선 검출기의 한 픽셀의 시야(field of view)는 검출기의 한 픽셀의 크기를 $27\mu m$라고 가정했을 때, 소백산천문대(0.61m, F/13.5)와 보현산천문대(1.8m, F/8)에서 각각 $0.68\ ''/pix$과 $0.39\ ''/pix$이다. 망원경의 온도를 263K으로 가정하고, S/N가 10이 되기 위해 관측이 요구되는 적분 시간은 소백산천문대에서 약 48분, 보현산천문대에서는 약 13분이다. 그리고 동일 조건의 L 밴드에서 협대역($\Delta\lambda\sim0.035\mu m$) 필터를 사용할 경우에 S/N가 10이 되기 위해 관측이 요구되는 적분시간은 소백산천문대에서 약 168초, 보현산천문대에서 약 46초이다. 목성의 대기 관측에서 수 일동안 동

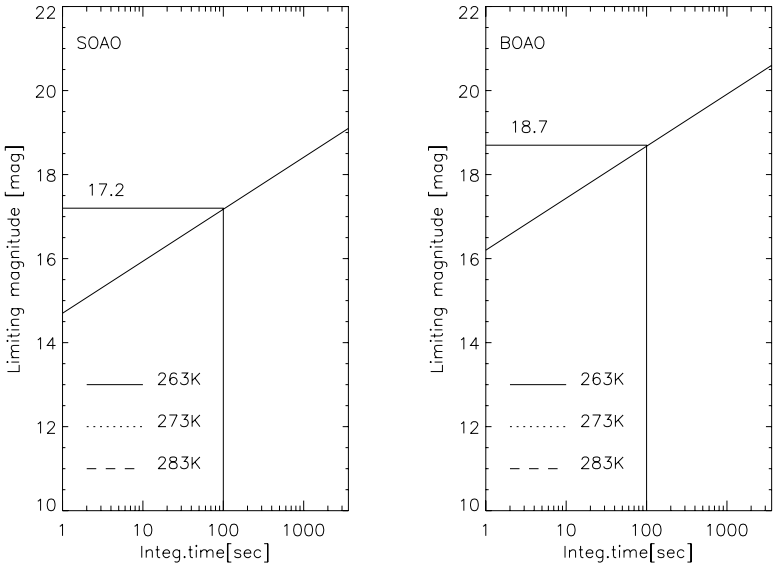

그림 10. H 밴드에서 적분 시간 및 주 · 부경의 온도에 대한 별의 관측한계 가시등급(S/N=10 가정). 나머지 내용은 그림 9와 같다.

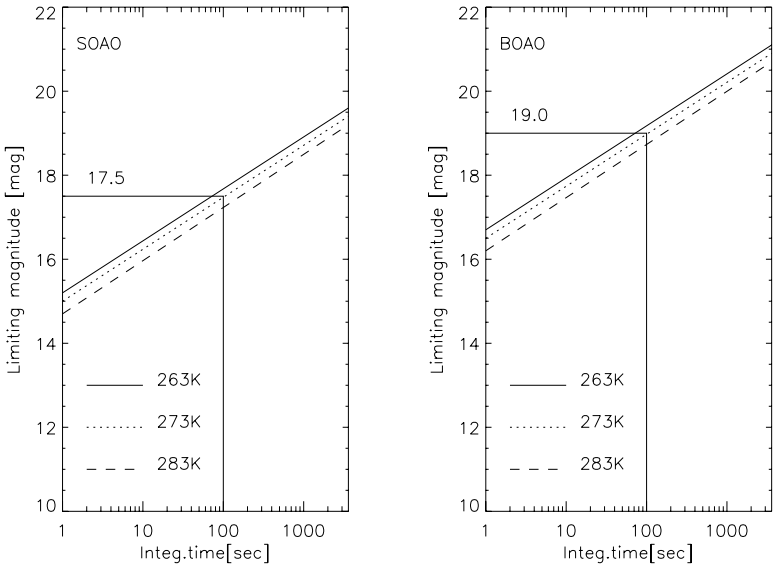

그림 11. K_s 밴드에서 적분 시간 및 주 · 부경의 온도에 대한 별의 관측한계 가시등급(S/N=10 가정). 나머지 내용은 그림 9와 같다.

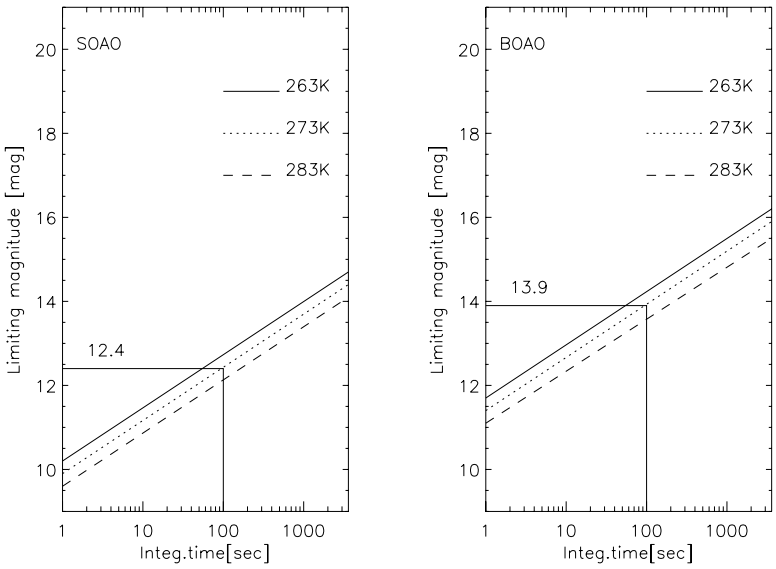

그림 12. L 밴드에서 적분 시간 및 주 · 부경의 온도에 대한 별의 관측한계 가시등급(S/N=10 가정). 나머지 내용은 그림 9와 같다.

일 위치의 H_3^+ 강도는 비슷하게 나타나므로(Miller et al. 1997), 목성의 대기에 대한 관측도 가능할 것이다.

4. 결론 및 토의

우리 나라의 지상망원경에서 이루어질 근적외선 관측을 대비해서 이 논문은 관측에 영향을 미치는 대기수증기량을 고려하여 대기투과율을 계산했으며, 관측 가능한 천체의 한계등급을 계산함으로써 KAONICS를 사용하여 연구 가능한 과학 목적의 범위를 정하는데 기여할 수 있었다. 우리 나라의 두 천문대 모두가 외국의 Kitt Peak 천문대와 대기수증기량을 비교했을 때 전체적으로 조금 높은 편이지만, 겨울철에는 비슷한 조건을 보여주고 있으므로 우리 나라에서도 근적외선 관측이 가능할 것으로 예상된다. 그리고 소백산천문대와 보현산천문대에서 근적외선 관측을 수행할 경우 보현산 천문대가 약 1.5등급 더 어두운 별을 관측할 수 있어서, 두 망원경간의 한계등급 차이는 그리 크지 않은 것으로 여겨진다.

여기서 우리는 검출기 자체의 잡음 및 양자 효율을 고려하지 않았지만, 기술개발에 따른 검출기의 좋은 성능으로 인해 관측 한계등급 계산에서 최대 1등급 이상의 변화를 주지 않을 것으로 기대된다. 그리고, 계산에서 망원경 주경과 부경의 반사율은 최적의 조건을 가진 것으로 가정했지만, 광학계의 코팅 후 시간이 경과함에 따라 반사율이 낮아지는 것을 고려하면 더 정확한 한계등급을 계산할 수 있을 것이다. 향후 우리는 KAONICS를 소백산천문대에 설치할 계획 중에 있으며, 기기 개발 과정에서 더욱 정확한 관측 한계를 도출 할 것으로 기대된다.

감사의 글: 이 연구는 한국천문연구원의 "적외선관측기술 개발" 연구사업의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 이 연구에서 대기투과율 계산에 이용된 ATMO 모델 사용을 협조해 주신 Texas Austin 대학의 Greg Doppmann 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

경재만, McGregor, P., 성언창, 김호일 1997, 1.8m 망원경용 근적외선 관측시스템 개념설계 (대전: KAO 기술보고서)

김지영 1994, 석사학위논문, 경북대학교

심경진, 한원용 1982, 국립천문대 논문집, 5, 41

이용호, 임규호, 이수정 2000, 한국기상학회지, 36, 257

조정호, 박필호, 박종욱, 임형철, 김상조, 조하만, 김명수, 서애숙 2001, 한국기상학회지, 37, 557

한영호 1968, 한국기상학회지, 4, 23

한영호 1971, 한국기상학회지, 7, 65

Beckers, J. M., Breedlove, W. O., Devegvar, P. G. N., Johansen, E. E., Gilliam, L. B., Mann, G. R., Mauter, H. A., Phillis, G. L., & Demastus, H. L. 1979, PASP, 91, 857

Cox, A. N. 2000, Allen's astrophysical quantities, 4th Ed. (London: AIP press), pp.143-167

Glass I. S. 1999, Handbook of infrared astronomy (Cambridge: Cambridge universiy press), p.156

Greve, A. 1978, Infrared Physics, 18, 127

Grossman, E. 1989, AT program, Ver. 1.5, Air Head Software, unpublished

Lord, S. 1992, NASA Technical Memorandum 103957, Ames Research Center

Matsumoto, T., Matsuura, S., & Noda, M. 1994, PASP, 106, 1217

McLean, I. 1997, Electronic Imaging in Astronomy (Chichester: Praxis publishing Ltd), pp.195-229

Miller, S., Achilleos, N., Ballester, G. E., Lam, H. A., Tennyson, J., Geballe, T. R., & Trafton, L. M. 1997, Icarus, 130, 57

Tokunaga, A. T., Simons, D. A., & Vacca, W. D. 2002, PASP, 114, 180

Traub, W. A., & Stier, M. T. 1976, Appl. Optics, 15, 364

Wallace, L., & Livingstone, W. 1984, PASP, 96, 182

Wallace, L., Brault, J. W., Brown, M., & Livingston, W. 1984, PASP, 96, 836

Warner, J. W. 1977, PASP, 89, 724

Westphal, J. A. 1975, Final Report NASA Grant NGR 05-002-185