

타이탄의 고분산 스펙트럼  
HIGH RESOLUTION SPECTROSCOPY OF TITAN

김주현<sup>1</sup>, 김상준\*<sup>1</sup>, 김강민<sup>2</sup>, 심채경<sup>1</sup>, 손동훈<sup>1</sup>

<sup>1</sup>경희대학교 우주과학과

<sup>2</sup>한국천문연구원

JOO HYEON KIM<sup>1</sup>, SANG JOON KIM<sup>1</sup>, KANG-MIN KIM<sup>2</sup>, CHAE KYUNG SIM<sup>1</sup>, AND DONG HOON SON<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Astronomy and Space Science, Kyung Hee University, Yongin, Gyeonggi, 449-701, Korea

<sup>2</sup>Korea Astronomy Observatory, Daejeon, 305-348, Korea

E-mail: planets@khu.ac.kr

(Received December 20, 2004; Accepted December 27, 2004)

ABSTRACT

We have carried out the high-resolution spectroscopic observations of Titan using BOES (Bohyunsan Echelle Spectrometer) to establish a standard spectral atlas of Titan. The observations were made on November 3, 4, 16 and 17, 2003 using a 300  $\mu\text{m}$  fiber optics with a spectral resolving power of 30,000. The spectral atlas will be served as a reference for the future spectroscopic researches of Titan and other planetary objects. We were able to confirm  $\text{CH}_4$  absorption lines of the Kuiper bands, and find unidentified lines near 7500  $\text{\AA}$ .

*Keywords:* high-resolution spectroscopy, Titan, BOES, kuiper bands, reference

1. 개요

타이탄 대기에 대한 가시광선 영역에서의 연구는 1944년 G. R. Kuiper에 의해서 타이탄 대기가 발견된 후 본격적으로 시작되어, 70년대 이후 Owen, T. et al. (1975), Danehy, R. G. et al. (1978) 등의 몇몇 천문학자들에 의해서 활발한 연구가 이루어졌다. 1980년대 이후에는 Lockwood, G. W. et al. (1986), Karkoschka, E. (1998), McKay, C. P. et al. (2001), Lemmon, M. T. et al. (2002)의 연구가 있었으나, 다른 천체들에 대한 연구와 비교할 때, 발표된 연구의 수는 매우 적을 뿐만 아니라, 고분산 분광 관측에 의한 연구는 소수에 불과하다.

행성들과 타이탄에 대한 연구는 1970년대 말 IUE에 의한 자외선 영역 연구들이 활기를 띠게 되었고, 1980년대에 들어와서는 적외선 및 전파 망원경에 대한 개발이 가속화되면서 상대적으로 이들 천체에 대한 가시광선 영역에서의 분광학적 연구는 소홀하게 되었다. 특히, 1980년대 이후 적외선 분광기의 급속한 발전으로 타이탄에 대한 분광 연구는 거의 대부분 적외선 영역에서 이루어져 왔으며, Voyager 탐사선과 최근의 Cassini/Huygens 탐사선에 의한 연구 역시 그 초점이

주로 적외선 영역에 맞춰져 있다. 이러한 상황에서 가시광선 영역에서의 고분산 분광관측에 의한 연구는 최근 관측기술의 추세로 비추어 볼 때 대형망원경에 있어서 소외된 파장영역이 되었지만, 우리나라와 같은 천문학 여건에서는 연구의 여지가 많은 영역이라고 할 수 있다.

지금까지 연구되었던 타이탄 대기에 대한 가시광선 영역의 주된 연구는 albedo와  $\text{CH}_4$ 에 대한 중·고분산 분광 관측에 의한 연구가 대부분일 뿐만 아니라, 가시광선 전 파장 영역에 대한 연구보다는 일부 파장영역에 국한된 경우가 많았다. 최근 Lemmon, M. T. et al. (2002)의 연구에서처럼 HST (Hubble Space Telescope)에 장착된 STIS (Space Telescope Imaging Spectrograph)에 의한 타이탄의 가시광선영역 분광 관측의 경우에도 최신 기술을 이용한 연구이지만, 이 역시 파장분해능이 약 4.9 $\text{\AA}$ 인 중분산 분광관측에 의한 연구이다.

또한, 목성형 행성이나 타이탄과 같은 짙은 대기를 가지고 있는 천체의 경우 이들 천체의 대기에는 수소와 헬륨과 함께,  $\text{CH}_4$ 가 다량 함유되어 있음은 이미 오래 전에 밝혀졌다. 그리고, 이들의 상층대기에는 태양빛을 받아

\* 교신저자(corresponding author)

CH<sub>4</sub>로부터 분해된 CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>와 같은 radical도 미량 존재할 것이라고 여겨지고 있기 때문에 고분산 분광관측에 의한 타이탄 연구는 CH<sub>4</sub>의 흡수선 연구뿐만 아닌 CH, CH<sub>2</sub>, CH<sub>3</sub>와 같은 radical의 fluorescence emission에 관한 연구 등과 haze (혹은 tholin)에 대한 연구도 가능하다. 특히, 현재까지 목성과 타이탄에서 CH(A-X, B-X)의 방출선이 발견되었다는 보고가 없기에 이에 대한 관측연구를 통해서 타이탄이나 목성에서 이들 방출선이 검출된다면 광화학적 분해과정에 대한 시나리오가 자세히 만들어질 수 있을 것이다. 뿐만 아니라, Kim (1994)에 의해서 이미 구축되어진 분광학적 데이터베이스가 있으나 본 연구를 통하여 타이탄 대기에 대한 고분산 분광 데이터베이스로의 확장도 가능하다. 이는 국내 천문대의 관측시설을 이용한 데이터베이스의 구축이라는 의의를 둘 수 있다.

2. 관측 및 자료처리

2.1. 관측

관측은 2003년 11월 3일, 4일, 13일, 14일에 보현산 천문대의 BOES를 이용하여 이루어졌다. 관측에는 300 $\mu$ m 굵기의 광섬유가 사용되었으며, CCD 소자 1개의 화소당 파장은 0.024 Å (5000 Å 기준)에 해당하며, FWHM은 7개의 화소이고, 파장분해능이 약 30000이므로, 0.168 Å (5000 Å 기준)의 파장해상도를 가진다. BOES의 시야각은 7.3 × 14.7 arcmin<sup>2</sup>이며, 화소척도는 0.2 x 0.2 arcsec<sup>2</sup>이다 (한국천문연구원, 2000). 관측 당시 타이탄의 시직경은 약 0.8 초로 보현산 천문대의 대기상태를 고려할 때 시상이 1초 이상이다. 따라서, 타이탄 표면상의 정확한 위치를 분간할 수 없으므로, 지구를 바라보는 타이탄 면 전체에 대한 분광관측이라고 할 수 있다. 2003년 11월 당시에는 BOES의 성능 개선되기 전이므로 현재보다는 낮은 효율을 보여주어 약 8등급 (표 1)의 밝기를 갖는 타이탄의 관측과 자료처리에 있어서 어려움이 많았다.

표 1. 관측 당시 타이탄의 좌표\*

```

*****
1Date      2-1R.A.      2-2Dec      3Mag.  4-1Sub-long  4-2Sub-lat.  5P.A.  6Delta Dot(km/s)
*****
Nov-03  06 56 43.16    +22 02 25.8    8.24    341.43   -24.43   353.65   -24.61863
Nov-04  06 56 44.66    +22 02 38.7    8.24     4.00   -24.44   353.65   -26.30425
Nov-16  06 55 04.73    +22 05 35.1    8.19   275.36   -24.53   353.66   -17.10112
Nov-17  06 54 57.05    +22 05 22.4    8.19   297.97   -24.53   353.66   -17.51255
*****
    
```

- \* JPL's HORIZONS System (<http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.html>)
- 1. 00<sup>h</sup> KST(UT+9h)
- 2-1, 2-2 Apparent R.A. & Dec.
- 3. Apparent brightness
- 4-1, 4-2 Sub-earth longitude and latitude(지구 직하점)
- 5. North pole position angle
- 6. Relative velocity to the Earth

표 2. 1970년대 이후 타이탄의 가시광선영역에서 분광 연구 사례

저 자	파장대역	분해능
Lemmon, M. T. et al, 2002	3000~11000 Å	4.92 Å
Karkoschka, E., 1998	3000~10500 Å	4~10 Å
Lockwood, G. W. et al., 1986	3295~8880 Å	6~8 Å
Nelson, R. M. et al., 1978	3200~8600 Å	40 Å
Danehy, R. G. et al., 1978	7500 Å	4 Å, 1 Å
Owen, T. and Cess, R. D., 1975	4000~7000 Å	4 Å

## 2.2. 자료처리

관측된 자료의 기본적인 처리는 경희대학교 천문대에 설치된 Sun Blade 2000의 IRAF 2.12.2에 의해서 이루어졌으며, Sky subtraction과 IRAF에서 처리된 결과를 표로 나타내는 작업은 IDL로 본 논문의 저자가 만든 프로그램을 이용하여 수행하였다. 장파장(약 9000 Å 이상)과 단파장(약 4000 Å 이하) 영역에서의 낮은 효율과 강한 박명하늘의 분광선에 의해서 양질의 관측 자료를 획득하기가 어려웠다.

## 3. 분광도(SPECTRAL ATLAS)

본 연구에서는 약 3800~10200 Å 영역을 포함하고 있으며, 본 논문에서는 그 예로서 일부 파장영역을 40~100 Å 범위로 나누어 그림 1~6에 나타내었다. 관측된 파장영역 내의 다른 파장의 관측 자료들은 본 논문의 저자에게 연락을 할 경우 기본적인 자료처리가 완료된 형태의 Data를 받을 수 있다. 이와 같은 타이탄과 목성형 행성에 대한 가시광선 전 파장영역에서의 분광학 관측은 Lemmon, M. T. et al.(2002), Karkoschka, E. (1998, 1994)와 Lockwood, G. W. et al. (1986)등에 의해서 이루어고, 당시의 파장 분해능은 4~10 Å으로 중-저분산 분광연구였다. 따라서 본 연구는 지금까지 발표되었던 타이탄에 대한 가시광선 영역에서의 분광연구들 중 가장 높은 파장 분해능을 갖는 연구 중의 하나이다. 7500 Å 영역에서는 타이탄의 haze 구성물질로 알려진 tholin의 주요 성분인 CH<sub>4</sub>에 의한 약한 흡수선이 나타나는 Kuiper bands의 흡수선을 확인할 수 있다. 특히, 과거 Kuiper bands에 대한 연구(Lutz, B. L. et al., 1972 ; Danehy, R. G. et al., 1978)에서는 언급되지 않았던 2개의 미확인 흡수선을 발견할 수 있다(그림 3).

### 3.1. 박명 하늘

박명 당시의 하늘을 관측한 것으로서 이 자료에는 태양에 의한 흡수/방출선과 지구 대기에 의한 흡수/방출선이 나타나 있다. 이는 지상관측에 있어서 기본적으로 필요한 자료로써 본 연구와 같이 어두운 대상에서 나오는 약한 세기의 분광선에 대한 세밀한 연구의 경우에 더욱 필요하다. 약한 분광선을 검출하고자 하는 경우 태양의 분광선이나 지구 대기 흡수선에 의해서 가려질 수 있기 때문에 원하고자하는 분광선을 얻기 위해서는 이를 제거하여야 하기 때문이다. 뿐만 아니라, 낮은 S/N을 갖는 관측 자료의 경우 효율적인 sky subtraction이 이루어진다면 S/N의 향상을 가져올 수 있다. 본 연구에서는 같은 order 내에서 라도 파장에 따라 타이탄에서 나타나는 하늘의 분광선과 순수한 하늘의 분광선이 서로 다르게 나타날 가능성이 있기 때문에 효과적인 sky subtraction을 할 수

있도록 1개의 order에 대해서 4부분으로 나누어 작업을 수행하였다. 또한, 관측되어진 하늘과 타이탄이 천구상의 위치와 관측 시간이 다르기 때문에, 두 분광선 세기의 차이를 보정하기 위해서 적절한 수를 곱하고, 타이탄의 도플러 효과와 자료처리과정 등에서 발생한 하늘과 타이탄의 파장 차이를 최소화하기 위한 작업을 수행하였다. 그러나, 이 과정에서 제거되지 않은 박명하늘의 분광선은 Paris-Meudon 천문대의 태양 분광데이터 베이스(BASS 2000)를 이용하여 박명하늘 분광선임을 구분하였다.

### 3.2. 타이탄

타이탄의 대기에 대한 연구는 1944년 Kuiper, G. P. 에 의해서 시작되어, 50년대에 매우 적은 수의 연구가 이루어지다가, 1970년대 이후부터 분광기술의 발달로 가시광선영역에서의 타이탄 대기에 대한 분광 연구가 본격적으로 이루어져 왔다. 1980년 대 이후에는 가시광선 영역에서의 관측보다는 적외선이나 전파에 의한 관측이 주로 이루어졌으며, 가시광선영역에서는 Karkoschka, E. (1998)나 Lemmon, M. T. et al. (2002)등과 같은 몇몇 천문학자들에 의해서 타이탄 대기 중에 존재하는 CH<sub>4</sub>과 NH<sub>3</sub>의 분자선이 나타나는 영역을 중심으로 연구가 수행되어졌다. 이들 연구는 타이탄 대기 중의 aerosol과 tholin에 대한 연구와 albedo의 변화에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 그러나, 앞에서 언급했듯이 이들 연구의 분광학적 분해능은 1~40 Å 정도로서 중·저분산 연구(표 2)가 대부분이다. 본 연구에서는 우선적으로, CH<sub>4</sub>가 태양빛에 의해서 분해되어 생성된 CH(A-X, B-X)의 3890 Å과 4300 Å 영역(Swamy, K. S. K. et al., 1973) 방출선을 확인하고자 하였으나, 본 연구에서는 명확히 확인할 수가 없었다. 그러나 앞서 언급했듯이 Kuiper bands로 잘 알려진 7500 Å 영역에서 약한 CH<sub>4</sub> 흡수선을 확인할 수 있었다. 또한, G. P. Kuiper에 의해서 타이탄의 대기가 발견된 이후 다른 천문학자들에 의해서 천왕성, 해왕성에서도 7500 Å 영역의 Kuiper bands가 발견되어 이들 천체에서도 CH<sub>4</sub>의 존재가 확인되었다. Lutz, B. L. et al. (1972)와 Danehy, R. G. et al. (1978)에 의해서 천왕성의 관측과 실험실 분석으로 Kuiper bands에 대한 재확인이 이루어졌는데, 이 연구와 비교해 볼 때 본 연구에서 확인된 CH<sub>4</sub> 흡수선은 Lutz, B. L. et al. (1972)와 Danehy, R. G. et al. (1978)의 연구와 1 Å 범위 이내에서 일치함을 보였다. 또한, Lutz, B. L. et al. (1972)와 Danehy, R. G. et al. (1978)의 연구와 비교할 때 Kuiper bands중 1차적으로 검토를 마친 7460~7513 Å 영역에서 새로운 미확인 흡수선 2개를 발견할 수 있었다(그림 3). 이 2개의 흡수선은 BOES와 같은 고분산 분광기에 의한 연구가 이루어지지 않을 경우 강한 하늘의 분광선에 의해서 발견되기가 매우 어려운 파장에 위치해 있거나 그 세기가 매우 약했다.

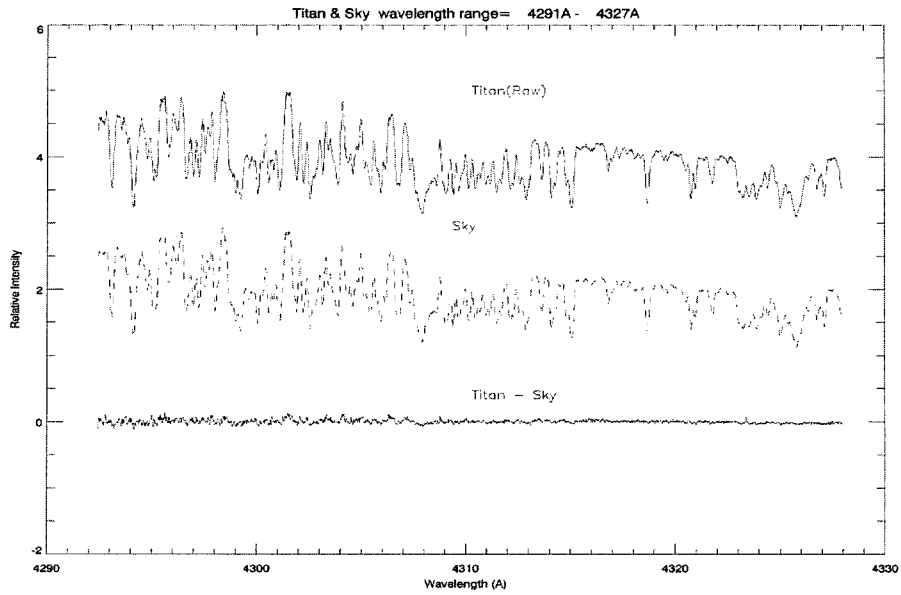


그림 1. CH(A-X) 영역. 역시 타이탄의 분광선에서 CH(A-X) 분자선을 확인할 수 없다. 그러나 관측당시의 S/N이 낮았기 때문에 CH가 없다고 단정 지을 수는 없다.

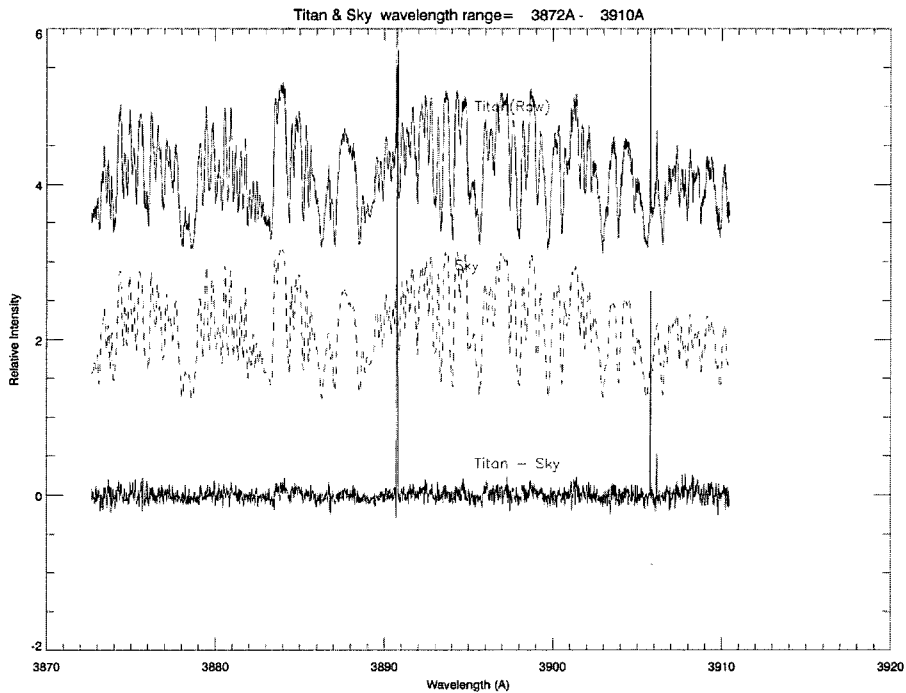


그림 2. CH(B-X) 영역. 낮은 S/N으로 CH(B-X) 분자선을 확인할 수 없다. (3890 Å과 3906 Å 부근에서 나타나는 방출선은 hot pixel이다.) 여기서 박명하늘의 분광선에는 태양의 분광선과 지구 대기에 의한 흡수선들이 포함되어있다.

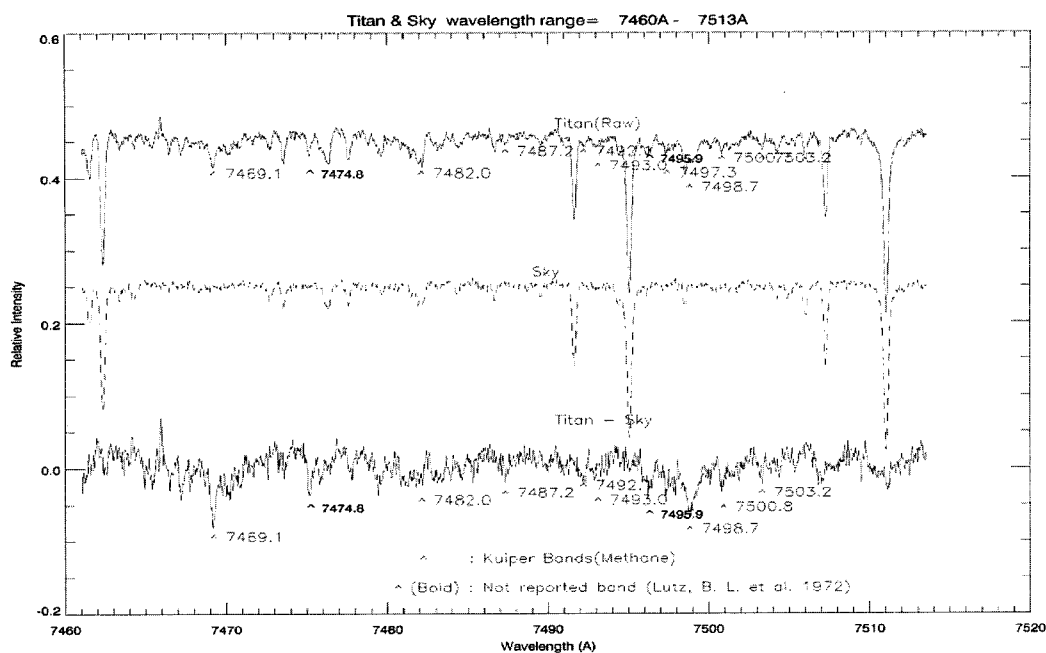


그림 3. Kuiper bands 영역의 고분산 Spectrum. Lutz, B. L. et al.(1972)와 Danehy, R. G. et al., (1978)의 연구와 비교할 때, 과거 연구에서 발견되지 않았던 새로운 2개의 약한 흡수선을 확인할 수 있었다 (표 3). (7478Å과 7479Å부근의 흡수선은 제거되지 않은 박명 하늘의 흡수선이다.)

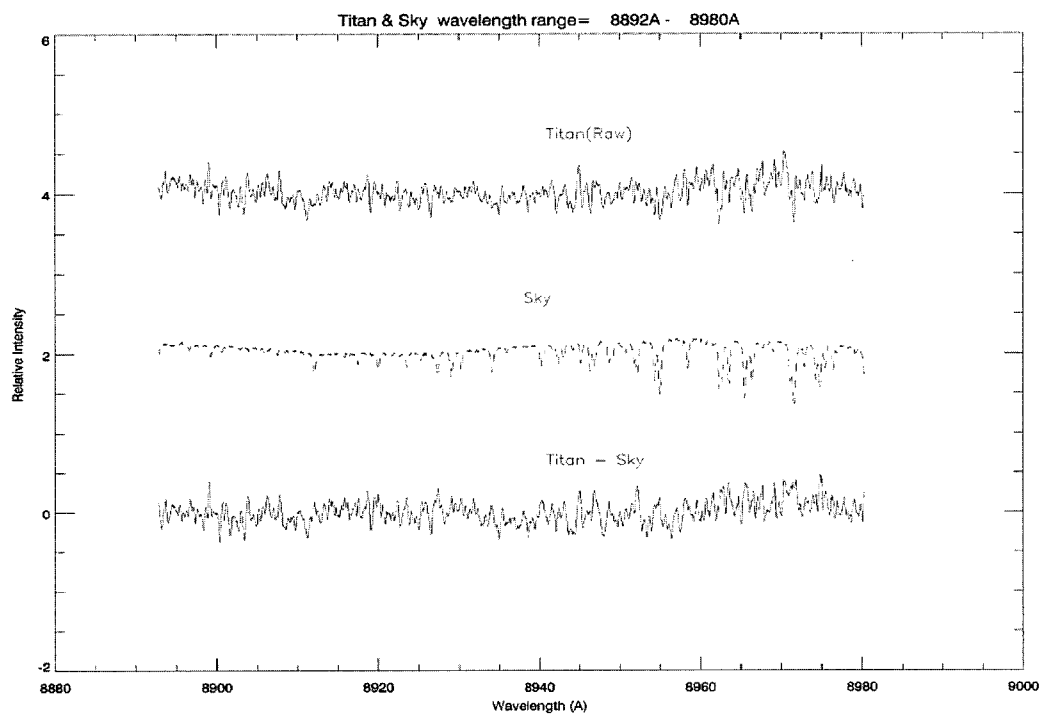


그림 4. 장파장에서의 CCD의 낮은 효율로 S/N이 낮다.

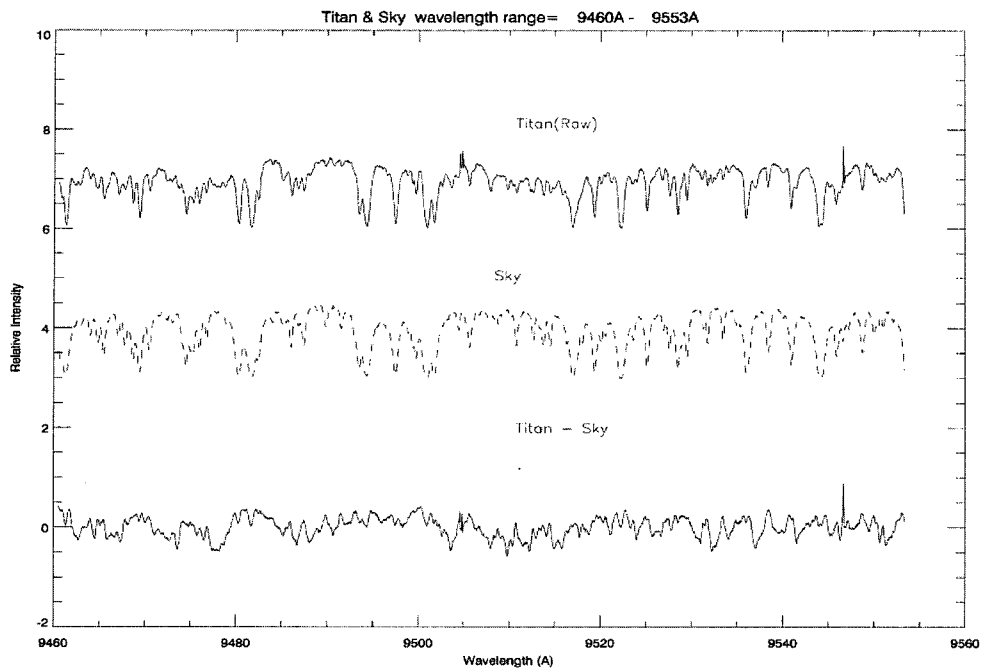


그림 5. 지구의 흡수선들과 장파장에서의 CCD의 낮은 효율로 S/N이 낮다.

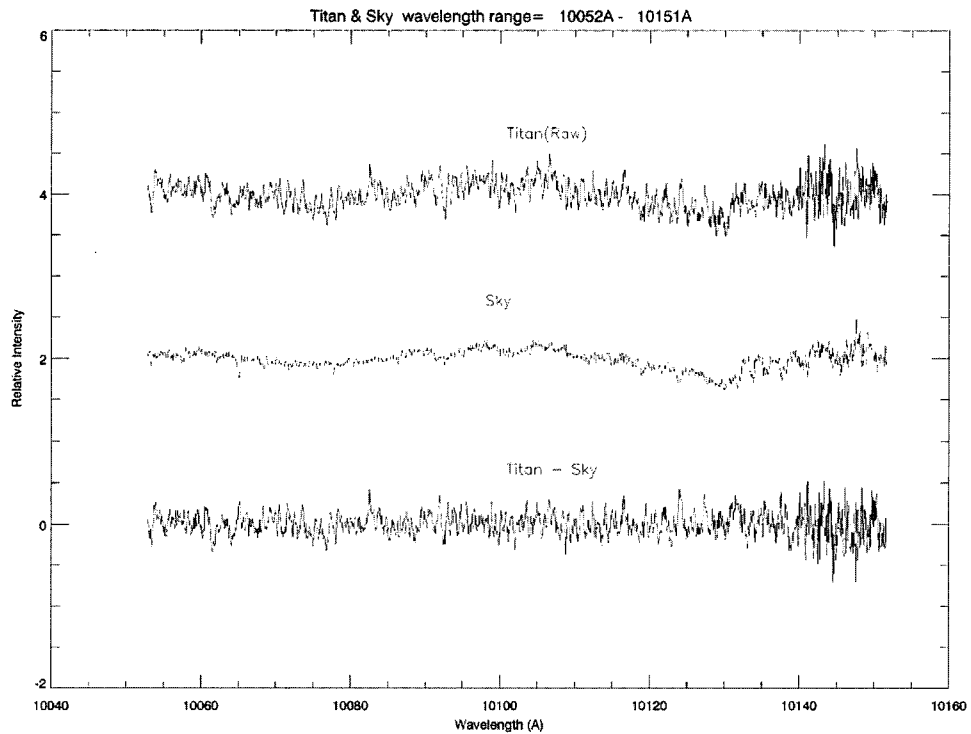


그림 6. S/N이 낮아 확실한 흡수/방출선을 확인하기가 어려우나 이 파장영역은 haze(혹은 tholin)에 의한 CH<sub>4</sub> 흡수선이 나타나는 영역 (McKay, C. P., et al., 2001) 이다.

표 3. 7460~7513 Å 영역(그림 3)에서의 CH<sub>4</sub> 흡수선에 대한 과거 연구<sup>1</sup>와의 비교

CH <sub>4</sub> 흡수선 관측		
Uranus <sup>1</sup> (Å)	Lab. <sup>1</sup> (Å)	Titan <sup>2</sup> (Å)
7469.2	7469.37	7469.1
-	-	<b>7474.8</b>
7482.0	7482.02	7482.0
7487.2	7488.29	7487.2
7492.6	7491.97	7492.1
7493.0	7492.92	9493.0
-	-	<b>7495.9</b>
7497.3	7497.26	7497.3
7498.8	7498.86	7498.7'
7501.1	7501.10	7500.7
7503.7	7503.24	7503.2
7515.9	7515.88	7515.9

1. Lutz, B. L. et al., 1972, Table 1
2. This work

#### 4. 결론 및 토의

이번 연구에서는 크게 두 가지 면에서 연구의 의의를 들 수 있었다. 첫 번째로 최근 활발한 연구의 대상으로 각광 받고 있는 타이탄에 있어서 소외된 과장대역인 가시광선에서의 연구라는 것뿐만 아니라 지금까지 거의 이루어져 오지 않았던 고분산 분광관측을 통한 연구라는 점에서 관련 연구를 하고자 하는 천문학자들에게 참고자료를 제공한다는 데 그 의의가 있다. 두 번째로는 과거 고분산 echelle 분광이 제대로 이루어지기 전인 1970년대까지 적 으나마 연구가 되었으나, 오랜 기간 공백기가 있었던 타이탄의 Kuiper bands에 대한 재확인 작업을 통해서 약한 미확인 흡수선들이 새로 발견되었다는 것을 성과라 할 수 있다. 이 흡수선들의 경우 CH<sub>4</sub>에 의해서 나타나는 것일 가능성이 높기 때문에 정확한 확인을 위해서 실험실에서 CH<sub>4</sub> 고분산 분광분석이 요구된다.

현재 BOES의 효율은 여러 차례에 걸친 성능 개선작업을 통하여 세계 유수의 천문대와 견줄 만한 효율을 가지고 있으나, 본 연구가 시행되던 당시에는 타이탄과 같이 비교적 어두운 (8등급이하) 천체에 대한 고분산 분광관측이 사실상 매우 어려운 상태였다. 따라서, 원하던 성과였던 CH 분자선에 존재유무를 확인하지 못하였으나, 현재

BOES가 효율에 있어서 크게 개선되었기에 향상된 S/N을 가진 관측 자료가 획득된다면 앞으로 타이탄과 목성형 행성들의 CH의 존재유무를 보다 정확히 확인할 수 있을 것으로 기대되어진다. 뿐만 아니라 S/N이 높은 관측 자료와 sky subtraction에 대한 보다 효과적인 방법을 통한 자료처리가 이루어진다면, 앞서 언급한 천체들의 미확인 방출, 흡수선에 대한 보다 면밀한 연구도 수행할 수 있을 것으로 보여진다. 또한, 현재 진행 중인 전 과장 영역에 대한 미확인 분광선에 대한 검토 작업이 끝나면, 이번 연구에서 밝혀진 2개의 미확인 흡수선 이외에 더 많은 분광선이 발견되어질 수도 있을 것으로 예상되어진다. 끝으로, 앞서 언급했듯이 지금까지 타이탄에 대한 고분산 분광관측이 거의 이루어지지 않았던 점을 감안할 때 본 연구는 앞으로 짙은 대기를 가진 외행성에 대한 연구에 참고 자료로써 이용될 수 있다.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구는 KISTEP에서 지원하는 특정연구개발 과제의 천체분광관측연구사업으로부터 지원을 받아 수행되었다 (M1-0222-00-0002).

## 참고문헌

- 한국천문연구원, 광학망원경을 이용한 천체 분광관측연구, BOES 최종보고서, 2000
- Lemmon, M. T., Smith, P. H., Lorenz, R. D., 2002, *Icarus* 160, 375
- McKay, C. P., Coustenis, A., Samuelson, R. E., Lemmon, M. T., Lorenz, R. D., Cabane, M., Rannou, M., P., Drossart, P., 2001, *P&SS* 49, 79
- Karkoschka, E., 1998, *Icarus* 133, 134
- Karkoschka, E., 1994, *Icarus* 111, 174
- Kim, S. J., 1994, *JKAS* 9, 111-166
- Lockwood, G. W., Lutz, B. L., Thompson, D. T., Bus, E. S. 1986, *ApJ* 303, 511
- Danehy, R. G., Owen, T., Lutz, B. L., Woodman, J. H., 1978, *Icarus* 35, 247
- Nelson, R. M., Hapke, B. W., 1978, *Icarus* 36, 304
- Owen, T., Cess, R. D., 1975, *ApJ* 197, L37
- Swamy, K. S. K., Tarafdar, S. P., 1973, *A&A* 28, 99
- Lutz, B. L., Ramsay, D. A., 1972, *ApJ* 176, 521
- Kuiper, G. P., 1944, *ApJ* 100, 378
- BASS 2000, [http://bass2000.obspm.fr/solar\\_spect.php](http://bass2000.obspm.fr/solar_spect.php)