

## 헤일-밥 혜성 (Comet Hale-Bopp, C/1995 O1)에 대한 근일점 근처에서의 분광측광 I: C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CN 분자 방출선의 측광학적 특성<sup>1</sup>

성언창<sup>†</sup>, 김호일, 윤재혁  
한국천문연구원

### NARROW-BAND SPECTROPHOTOMETRY OF COMET HALE-BOPP (C/1995 O1) NEAR PERIHELION I: PHOTOMETRIC BEHAVIOR OF C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, CN MOLECULAR BANDS<sup>1</sup>

Eon-Chang Sung<sup>†</sup>, Ho-Il Kim, JaeHyuk Youn  
Korea Astronomy Observatory  
61-1, Whaam-dong, Youseong-Gu, Taejeon  
email: ecsung@kao.re.kr

(Received October 15, 2000; Accepted November 17, 2000)

#### 요 약

이 연구는 1997년 2월 21일부터 5월 1일까지 소백산천문대 61 cm 망원경과 CCD 카메라, 그리고 5개의 협대역 필터를 이용하여 근일점 근방을 지나는 헤일-밥 혜성 (Comet Hale-Bopp, C/1995 O1) 코어 4' 내의 CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> 방출선에 대한 분광측광 관측 결과이다. 이 연구에서는 협대역 필터를 이용한 분자 방출선 영상의 형태학적인 특징과 근일점 근처에서의 시간에 따른 분자 방출선의 변화 추이에 대하여 논의하였다. 헤일-밥 혜성은 형태학적인 면에서 중심에서 반경 4' 내에 있는 혜성 코어의 CN의 분자 방출선은 C<sub>2</sub>나 C<sub>3</sub>에 비하여 구형의 대칭적인 형태를 보인 반면, C<sub>2</sub>나 C<sub>3</sub> 분자의 방출선은 비대칭적인 분포를 보였다. 그리고 이들 분자의 방출선 영상에서 광대역 필터의 영상에 나타난 나선팔과 같은 형태학적 특성이 나타났다. 한편 측광학적인 특징으로 C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> 분자 방출선의 광도 분포는 CN 보다 중심 집중도가 높게 나타났으며, 태양으로부터 거리에 따른 CN의 표면광도 변화는 C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> 표면광도 변화와 약간 다른 경향을 나타내었다. 그러나 근일점 근처에서 이들 분자의 방출선의 광도의 따른 변화는 이전 연구에서 제기되었던 7일 주기로 나타나는 극대 광도를 보여 주고 있다.

#### ABSTRACT

We present the results from narrow-band spectrophotometry of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) near perihelion obtained at Sobaeksan Optical Astronomy Observatory 61cm telescope equipped with PM 512 CCD camera (512 × 512, 0.5"/pixel) and narrow-band filter set for the comet on 19 nights from February 21 to May 1, 1997. We discuss molecular emission band morphology and photometric behavior of Comet Hale-Bopp.

<sup>1</sup>이 연구는 한국천문연구원 기관고유사업 2000-1-300-00 과제의 일부로 수행되었음

<sup>†</sup>corresponding author

The morphology of CN band shows more symmetric light distributions than C<sub>2</sub> or C<sub>3</sub> bands. On other hand, C<sub>2</sub> and C<sub>3</sub> band have more compact light distributions than CN band. Similar to wide-band image, molecular band morphology shows spiral structures at the core of the comet. The CN surface brightness variation with changing heliocentric distance shows difference from those of C<sub>2</sub> and C<sub>3</sub>. The brightness, however, of these molecular bands near perihelion shows previously known 7day period light variations.

*Key words:* comets, spectrophotometry, molecular bands

## 1. 서 론

20세기 최대 밝기를 보인 헤일-밥 혜성 (C/1995 O1)은 1995년 7월 23일 미국 아마추어 천문학자 Alan Hale과 Thomas Bopp (Hale et al. 1995)이 발견한 혜성으로 발견 당시에 태양으로부터  $r_h = 7.1$  AU의 거리에서 10.6 등급이나 될 정도로 매우 밝았다. 근일점을 통과한 것은 발견된지 1년 8개월 후인 1997년 4월 3일이였다. 발견된 다음날인 1995년 7월 24일에 벌써 꼬리가 보일 정도의 밝고 큰 혜성이였다. 허블 망원경의 관측 결과 이 혜성의 크기는 헬리 혜성의 약 3배에 달하는 27 km에서 42 km 핵을 갖고 있는 것으로 추정되었다 (Weaver et al. 1997).

한편 헤일-밥 혜성은 매우 활발한 활동을 보였던 혜성으로 거리  $r_h=6.5$  AU일 때 CO의 생성률이 1985년 헬리혜성 (P/Halley)이 1 AU일 때의 생성률과 같은  $10^3 \text{ kg sec}^{-1}$ 이나 되었다 (Weaver et al. 1997). 이 혜성은 코후테크 혜성 (C/Kohoutek 1973XII)과 유사하게 일반적인 혜성의 태양으로부터 거리에 따른 광도 증가 패턴 보다 더 밝은 광도를 나타내었다. 발견 초기인  $r_h = 5\sim 7$  AU일 때의 광도 증가 패턴은 처음 태양에 접근하는 혜성으로 증발하기 쉬운 초 휘발성 물질이 많은 것으로 해석되었다. 이 초휘발성 물질들은 CO나 H<sub>2</sub>O보다 더 적은 태양의 빛에 의하여 기화하는 물질로 전형적인 혜성들보다 더 먼 거리,  $r_h$ 에서 더 많은 가스와 먼지를 생성시키는 것으로 생각되었다 (Schleicher et al. 1997). Schleicher et al. (1997)의 연구결과에 따르면 헤일-밥 혜성은 1977년 이래 관측된 어느 혜성보다도 모든 거리에서 가장 많은 먼지 생성률을 보였다.

이전의 혜성 연구는 대부분 발견된 이후에 한 두 번의 분광 관측으로 혜성 일생의 특정 시간대의 분자 생성률을 측정하는데 그쳐 혜성의 일생에 대한 전반적인 연구가 부족했을 뿐만아니라, 분광관측에서는 혜성 전체에 대한 정확한 분자의 방출선의 플럭스를 측정할 수 없었고, 분자 방출선의 분포를 알 수 없었다는 단점이 있었다. 이 연구에서는 근일점 근처에서 혜성의 활동을 이해하기 위하여 특정 분자의 방출선에 집중하여 장기간 모니터링 관측함으로써 이들 분자 방출선의 밝기 변화와 형태학적 특성을 연구하고자 한다. 이 분자들의 생성률과 혜성의 활동은 이후 논문에서 자세히 다루려 한다.

이 연구는 여러가지 현대적인 방법으로 관측이 가능하였던 금세기 최대의 혜성인 헤일-밥 혜성의 핵에 대한 협대역 간섭필터를 이용하여 근일점 전후에서의 CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> 분자의 방출선의 광도를 분석한 연구이다. 이 연구에서 소백산천문대 61 cm 망원경과 CCD카메라, 그리고 협대역 간섭필터를 이용한 분자의 방출선에 대한 분광측광 모니터링 관측 결과를 보였다. 이 연구의 2장에서는 혜성

표 1. 협대역 혜성 필터.

Filter ID	중심파장 [ $\lambda_c$ (Å)]	FWHM [ $\Delta\lambda$ (Å)]	Bands
#38	3870	62	CN
#40	4062	62	C <sub>3</sub>
#44	4450	67	Blue Continuum
#51	5141	118	C <sub>2</sub>
#52	5261	56	Green Continuum
V	5448	960	Johnson V-band

필터를 이용한 분광측광 관측 및 표준화를 제시하였고, 3장에서는 분자의 방출선 광도 변화의 특징에 대하여 논의하였다.

## 2. 관측 및 표준화

### 2.1 혜성필터와 헤일-밥 혜성의 관측

소백산천문대에서는 1997년 2월부터 5월까지 소백산천문대 61cm 반사망원경과 PM512 CCD 카메라 ( $512 \times 512, 0.5''/\text{pix}$ ), 그리고 협대역 간섭 혜성필터를 이용한 분광측광 관측을 수행하였다. 이 혜성 관측을 위한 협대역 간섭 혜성필터에 대하여는 Farnham & Schleicher (1998), Farnham et al. (2000)에 잘 설명되어 있다. 이 연구에서는 표 1에 제시한 바와 같이 CN, C<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>, Blue Continuum, Green Continuum 등 5개의 협대역 필터와 Johnson V 필터 등 6개 필터를 한조로 하여 관측이 수행되었다. 혜성필터의 관측은 헤일-밥 혜성의 관측당시 투과대기량이  $\geq 2$ 로 매우 크기 때문에 투과대기량에 따라 파장이 짧은 필터부터, 혹은 파장이 긴 필터부터 관측하였다. 혜성관측은 혜성의 운동을 감안하여 60초를 넘지않게 노출을 조정하였다.

협대역 필터의 특성에 대하여는 성언창 (1999), 성언창 (2000)에 자세히 소개하였다. 일반적으로 협대역 필터를 이용한 영상 분광측광 관측은 해당 분광선을 관측하는 필터와 그 스펙트럼선 근처의 연속선을 관측하여 해당 이온의 순 플럭스를 얻는다. 예를 들면 은하의 순 H $\alpha$  영상을 얻기 위해서는 은하의 H $\alpha$  영상 (on-band images)과 H $\alpha$  근처의 H $\alpha$  연속선 영상 (H $\alpha$  continuum images; off-band images)의 관측이 필요하다.

혜성 필터를 이용한 혜성 분자의 연구의 경우  $\lambda$  3870 Å 근처의 CN 분자 밴드,  $\lambda$  4062 Å 근처의 C<sub>3</sub> 분자 밴드를 관측하기 위하여  $\lambda$  4450 Å 근처의 연속선을 관측한다. 협대역 관측에서 절대 플럭스로 환산하기 위하여 표준 광원 관측이 필요하다. 협대역 관측에서의 표준 광원은 H $\alpha$  등의 절대 밝기가 주어진 행성상 성운 (Ryder 1993) 또는 분광표준성을 이용한다 (성언창 1999). 행성상 성운의 경우 연속선 영상을 관측할 수 없는 경우가 많다. 그래서 분광 표준성, 특히 16 Å 간격의 분광 표준성을 이용하면 편리하다.

그러나 혜성필터의 표준화를 위한 표준성이 없었기 때문에 헤일-밥 혜성 근처의 *UBVRI* 표준성을 이용하였다. 협대역 필터를 이용한 분광측광 관측에 가장 이상적인 경우가 분광표준성을 이용하여 절대 플럭스로 환산하는 것인데, 헤일-밥 혜성의 경우 주위에 적당한 밝기의 분광표준성을 관측하기가 쉽지 않고, 혜성에 비하여 너무 어둡다는 단점이 있었다. 특히 큰 투과대기량에서 어두운 별

표 2. 소백산천문대의 헤일-밥 (C/1995 O1) 혜성 관측.

관측장비	관측일	표준성
소백산천문대 61cm 망원경& PM 512 CCD	Feb 21, 22, 23, 24, 27, Mar 27 Mar. 28, 30, Apr. 7, 8, 10, 11, 12, Apr. 13, 22, 23, 24, 25, 30, May 1	$\nu$ Lyr, $\alpha$ Del, $\eta$ Tau, $\eta$ Aur $\beta$ Lib, HR 1172, Landolts

을 관측하는 것은 어려운 일이다. 따라서 이 관측에서는 광대역 *UBVRI* 측광 표준성을 혜성필터를 이용한 분광측광 표준성으로 이용하였다. 이 혜성필터의 표준화에 대하여 Farnham et al. (2000)에 자세한 설명이 주어져 있으나 이들이 사용한 필터가 우리가 사용한 필터와 동일한 필터이지만 협대역 필터의 특성상 관측조건, 날씨등에 따라 다를 수 있다. 표 2는 1997년 소백산천문대의 헤일-밥 혜성의 분광측광 관측을 보인 것이다.

## 2.2 관측 자료 처리

협대역 혜성필터 분광측광 자료 처리는 기본적으로 광대역 CCD 영상관측 자료처리 과정과 같다. IRAF를 이용하여 바이어스 제거, 마름질, 바닥피기 등을 수행하는 표준 CCD 자료처리 과정 수행하였다. 표준성의 광도는 IRAF\$DIGIPHOT\$APPHOT 꾸러미를 이용하여 밝기를 구하였다.

## 2.3 표준화

*UBVRI* 광대역 표준성으로 협대역 필터를 표준화하기 위하여 다음과 같은 표준화 방정식을 이용하였다. 즉 필터  $f$ 에 대하여 관측계 (망원경+CCD+필터)의 감도 (sensitivity),  $S_f$ 는,

$$S_f = \frac{F_{abs} T}{F_{obs} 10^{0.4kx}}, \quad (1)$$

여기서  $F_{abs}$ 와  $F_{obs}$ 는 필터  $f$ 의 절대 플럭스와 겉보기 플럭스 (관측된 플럭스),  $T$ 는 필터의 투과율 (transmission),  $k$ 는 소광계수, 그리고  $x$ 는 투과대기량이다. 이 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m_{abs} = m_{obs} - kx + C - m_{zero}. \quad (2)$$

여기서  $m_{abs} = -2.5 \log F_{abs}$ ,  $m_{obs} = -2.5 \log F_{obs}$  이고, 상수  $C$ 는 표준화 계수로  $C = -2.5 \log (S_f/T)$ 이며,  $m_{zero}$ 는 표준성의 영점이다. 표준성의 영점은 연구자에 따라 직녀성의 밝기를 정의하는 방법에 따라 약간 차이가 나지만 대략 오차범위 내에서 일치한다. 직녀성의  $V$  광도를 0.04등급으로 두는 Bessell & Brett (1988)의 정의에 따르면 진동수 단위로 영점은 48.568등급, 플럭스로는  $F_{\lambda}^{zero} = 3.63710^{-20}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> Hz<sup>-1</sup> 이고, 파장단위로는 영점 및 플럭스가 각각 23.582등급,  $F_{\lambda}^{zero} = 3.691 \times 10^{-10}$  erg cm<sup>-2</sup> Å<sup>-1</sup>이다. 진동수 단위의 영점은 연구자 마다 약간 차이를 보이는데 분광표준성의 경우 48.595등급으로 두기도 한다.

표준성의 혜성필터 파장대역에서의 광도를 계산하기 위하여 *UBVRI* 광대역 필터의 파장 대역과 중심파장으로부터 광대역 필터의 중심파장에서의 절대 플럭스를 계산하였다. 이 표준성에 대한 각 혜성필터에서의 밝기는 광대역 필터 중심파장에서의 표준성의 플럭스를 이용하여 내삽함을써 구

표 3. 1996년 9월 MSO 분광관측을 이용한 헤일-밥 혜성의 연속선 측정.

연속선 스펙트럼
#38 & #40 근처의 연속선 세기 = $0.5 \times (\#44)$
#51 근처의 연속선 세기 = $1 \times (\#52)$

하였다. 이렇게 구해진 각 혜성필터의 중심파장에서의 플럭스를 혜성필터의 파장대역을 고려함으로써 해당 표준성에 대한 각 혜성필터의 플럭스를 계산하여 등급으로 환산하였다. 광대역 필터를 이용한 표준화의 오차는 대략 5% 이하일 것으로 추정된다.

이렇게 구한 표준성에 대한 각 혜성필터의 표준화된 등급과 지구대기의 소광이 보정된 겉보기 등급을 (2)식에 적용하여 상수값인 표준화 계수  $C$ 를 구하였다. 지구대기 소광계수  $k$ 는 소백산천문대와 비슷한 조건인 보현산천문대의 분광소광계수 (손동훈 등 1997)를 파장과 파장대역에 따라 내삽하여 평균 소광계수를 사용하였다. 평균소광계수를 사용함에 따른 오차는 대략 5% 이하로 추정된다. 위에서 구한 표준화 계수를 (2)식을 적용하여 혜성의 절대 플럭스 영상 (flux calibrated images)을 만들었다. 전처리 과정이 끝난 혜성 영상에 대기소광과 표준화 계수의 값을 적용 하여 (1)식으로부터 구한 값을 곱함으로써 절대 플럭스 영상을 구하였다.

#### 2.4 순 분자 방출선 영상

혜성필터를 이용한 관측으로부터 CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>의 순 영상 (pure molecular emission images)을 얻기 위해서는 이들 필터의 관측으로부터 연속선 관측을 제거해야한다. #38, #40필터로부터 CN, C<sub>3</sub> 영상을 얻기 위하여는 이들 필터 근처의 연속선을 관측해야하는데 혜성의 경우에 이들 근처에서 적당한 연속선을 찾기 어렵다. 우리의 경우에 #44를 연속선을 관측한 영상으로 대응하였다. 이 경우에는 실제 #38과 #40근처의 연속선과 #44근처의 연속선을 비교하여 그 차를 보정 해야한다.

근일점 근처의 분광관측 자료로 손동훈 등 (1997)이 제시된 1997년 3월의 보현산천문대 관측 자료는  $\lambda 4000\text{\AA}$ 이하의 관측이 없기 때문에 이용할 수 없었다. 그래서 이 연구에서는 1996년 9월에 우리가 관측한 MSO (Mount Stromlo Observatory) 분광관측 결과를 이용하였다. 표 3은 MSO의 74" 망원경과 카세그레인 분광기를 이용하여 1996년 9월에 얻은 헤일-밥 혜성의 분광 스펙트럼으로부터 측정된 혜성 필터의 중심파장 근처에서 헤일-밥 혜성 연속선의 세기를 혜성 필터 중 연속선 필터 근처의 세기로 나타낸 것이다.

### 3. 헤일-밥 혜성의 분자 방출선

#### 3.1 형태학적 특성

그림 1은 1997년 3월 28일부터 5월 1일까지의 헤일-밥 혜성의 코어  $200'' \times 200''$  범위의 CN 분자의 방출선 영상을 보인 것이다. 이 영상은 그림은 음화로 나타낸 것으로 색이 가장 진한 부분이  $14.8\text{mag/pixel}$  ( $1.2 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ ) 이상이고, 가장 낮은 부분이  $18.5\text{mag/pixel}$  ( $4.0 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ )이다. 이 그림에서 윗쪽이 북쪽이고 왼쪽이 동쪽이다. 그림에서 근일점 통과일

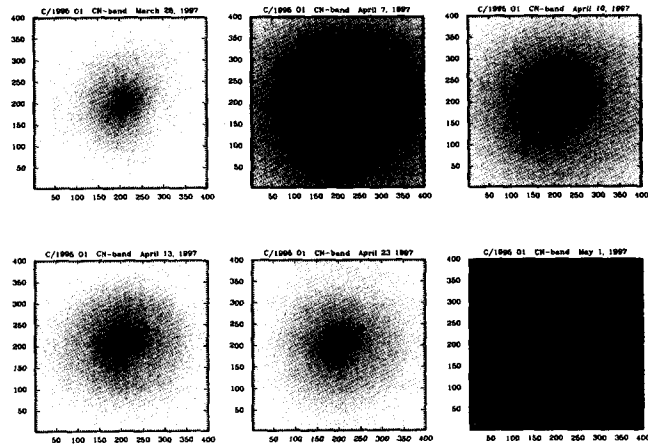


그림 1. 1997년 3월 28일부터 5월 1일까지의 헤일-밥 혜성의 코어  $200'' \times 200''$  범위의 CN 분자의 방출선 영상. 색이 가장 진한 부분이  $14.8\text{mag/pixel}$  ( $1.2 \times 10^{-6} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ )이고 가장 낮은 부분이  $18.5\text{mag/pixel}$  ( $4.0 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$ )이다. 이 그림에서 위쪽이 북쪽이고 왼쪽이 동쪽이다.  $x$ 축과  $y$ 축은 pixel 값으로  $0.5''/\text{pixel}$ 이다.

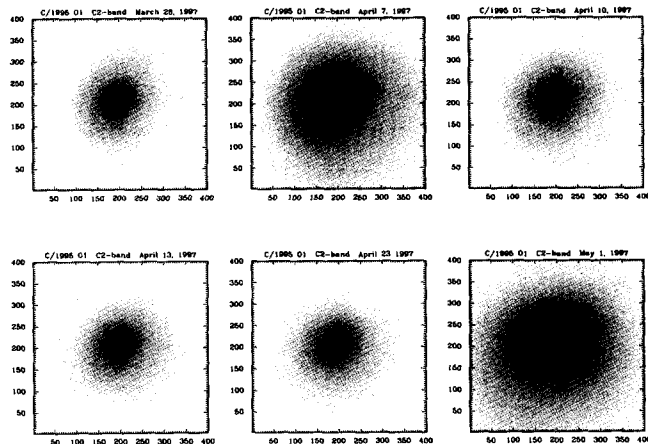


그림 2.  $\text{C}_2$  분자방출선의 영상의 변화. 그림 1과 같은 밝기 스케일이다.  $\text{C}_2$  분자 방출선의 영상은 CN이 원형의 대칭적인 분포를 보이는데 반하여 비대칭적인 분포를 보여주고 있다. 특히 CN 영상에서 희미했던 나선팔이 나타나고 있다. 축은 그림 1과 같다.

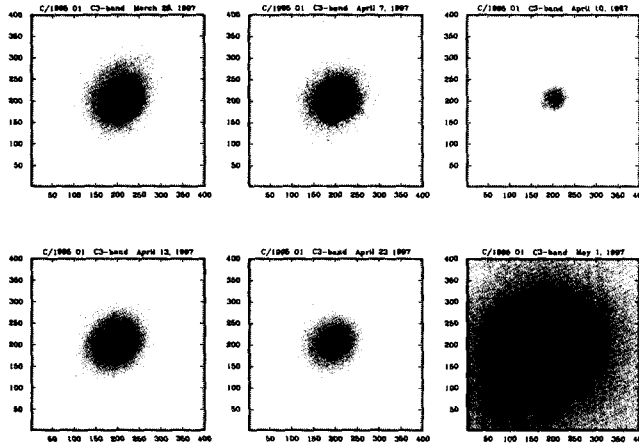


그림 3. C<sub>3</sub> 분자 방출선 영상의 변화. 색이 가장 진한 부분이 16.0mag/pixel ( $3.98 \times 10^{-7}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> Å<sup>-1</sup>) 이상이고 가장 낮은 부분이 18.5mag/pixel ( $4.0 \times 10^{-8}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> Å<sup>-1</sup>)이다. C<sub>2</sub> 영상과 마찬가지로 비대칭적인 분포를 보여 주고 있다.

인 4월 3일에 가까울수록 밝은 CN분자 방출선을 보여주고 있으며, 코어는 아주 원형의 대칭적인 분포를 보여주고 있다.  $r \leq 60''$ 의 평균 축비 (axial ratio,  $b/a$ )는 0.78이고,  $r = 120''$  근처의 평균 축비는 0.99로 나타나 중심에서는 나선팔로 인하여 분포가 비교적 비대칭적이거나 밖으로 갈수록 대칭적인 형태를 보여주고 있다. CN 영상의 특이한 것은 근일점 통과 3주 후인 5월 1일에도 아주 밝게 나타난다는 사실로, C<sub>2</sub>와 C<sub>3</sub>분자에서도 나타나고 있다.

그림 2는 C<sub>2</sub> 분자의 방출선 영상을 나타낸 것이다. 그림 2의 광도는 그림 1과 같은 스케일이다. C<sub>2</sub> 분자 방출선의 영상에서  $r \leq 60''$ 에서의 평균 축비 (axial ratio,  $b/a$ )는 0.84이고,  $r = 120''$  근처의 평균 축비는 0.90으로 CN이 원형의 대칭적인 분포를 보이는데 반하여 비대칭적인 분포를 보여주고 있다. 특히 CN 영상에서 희미했던 나선팔이 뚜렷이 나타나고 있으며, 중심에서 거리가 커질수록 꼬리방향으로 광도분포가 치우침을 보이고 있다.

그림 3은 C<sub>3</sub>분자의 방출선 영상을 나타낸 것이다. 색이 가장 진한 부분이 16.0mag/pixel ( $3.98 \times 10^{-7}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> Å<sup>-1</sup>) 이상이고, 가장 낮은 부분이 18.5mag/pixel ( $4.0 \times 10^{-8}$  erg cm<sup>-2</sup> sec<sup>-1</sup> Å<sup>-1</sup>)이다. C<sub>3</sub> 영상은  $r \leq 60''$ 의 평균 축비 (axial ratio,  $b/a$ )는 0.88이고,  $r = 120''$  근처의 평균 축비도 0.88로 안과 밖의 분포가 같게 비대칭적인 분포를 보여 주고 있다. C<sub>3</sub>도 C<sub>2</sub>와 마찬가지로 중심으로부터 거리가 멀어질수록 광도분포가 꼬리 방향으로 치우침이 나타나고 있다.

그림 1, 2, 3에서 보인 바와 같이 CN은 중심을 제외하고 비교적 원형의 대칭적이며 중심 집중도가 낮은 모습을 보이는데 반하여 C<sub>2</sub>와 C<sub>3</sub>는 중심 집중도가 높고, 중심에서 꼬리 방향으로 주로 분포하는 비대칭적인 분포를 보이고 있다. CN, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>의 이러한 분포는 분자의 생성 및 파괴 등 위치와 깊게 연관이 되는 것으로 해석된다. 즉, CN 분자는 혜성의 코마에 비교적 고르게 분포되어 있는데 반하여 C<sub>2</sub>와 C<sub>3</sub> 분포는 코마 중심부로부터 꼬리방향에 주로 분포함을 알 수 있다.

형태학적으로 광대역 필터의 관측 (예: Licandro et al. 1998)에서 보여주는 바와 같은 나선팔

이 분자의 방출선 영상에 여러개 나타나고 있다. 이 나선팔과 관련되어 7.19일와 5.5시간의 변화 (Rodriguez et al. 1997)에 영향을 주는 것으로 생각되고 있으며, 약 11시간으로 추정되는 혜성의 자전 (Licandro et al. 1998)과 관련되어 밝기 변화가 나타나는 것으로 보고되고 있다.

### 3.2 광도변화

이 연구에서는 혜일-밤 혜성 코어의 반경 약 2분 범위 (CCD 시야  $256'' \times 256''$ )를 관측하였으므로 이를 은하의 표면광도처럼 표면광도를 구하면 분자 생성물의 분포 등을 이해하기 편리하다. 표면광도,  $\Sigma(R, r_h)$ 는 은하의 표면광도처럼,

$$\Sigma(\rho, r_h) = \frac{L(\rho, r_h)}{\pi\rho^2}, \quad (3)$$

이 된다. 여기서  $\rho$ 는 혜성 중심으로부터 겉보기 각거리이고,  $r_h$ 는 태양에서부터 혜성까지의 거리이다. 이 식에서 표면광도  $\Sigma$ 는 지구에서 혜성까지 거리에 무관한 양이된다. 이 표면광도  $\Sigma$ 는 mag arcsec<sup>-2</sup> 단위가므로  $\Sigma = -2.5\log F_\Sigma$ 를 이용하여 플럭스 단위로 환산할 수 있다. 이 플럭스  $F_\Sigma$ 와 분자 생성물  $Q$ 와는 다음과 같은 관계가 성립한다 (손동훈 등 1997).

$$Q = \frac{8\pi\nu\rho F_\Sigma}{g}, \quad (4)$$

$g$ 는 태양광에 노출되는 단일 원자나 분자에 의하여 산란되는 광자의 단위시간 당 갯수 (erg molecule<sup>-1</sup>)로 태양-혜성간의 거리  $r_h$ 의 제곱에 반비례한다.  $\nu$ 는 분자의 분출 속도로 1km/sec 이하 이고,  $\rho$ 는 혜성에서 1''의 투영된 거리로 플럭스를 표면광도로 나타내면 1이 된다.  $Q$ 는 erg cm<sup>-2</sup> arcsec<sup>-2</sup>의 단위가 된다. 따라서  $Q$ 는 태양-혜성간의 거리  $r_h$ 와  $F_\Sigma$ 와 관계되며,  $F_\Sigma$ 가 일정하면  $Q$ 는 단순히  $r_h$ 의 제곱에 비례하게 된다.

(4)식에 log를 취하면,

$$\log(Q) = \text{const} + 2\log(r_h) + \Sigma, \quad (5)$$

형태가 된다.

이 연구에서는 관측된 자료중에서 자료의 질이 비교적 좋은 1997년 3월 이후 5월 1일까지 15일간의 결과를 이용하여 자세한 분자 생성물을 계산하지 않고 표면광도 변화로부터 분자생성물 추이를 분석하였다.

그림 4는 4월 12일 혜일-밤 혜성의 분자 방출선의 중심 거리에 따른 표면 광도 (mag arcsec<sup>-2</sup>) 분포를 보인 것이다. CN의 광도에 비하여 C<sub>2</sub>나 C<sub>3</sub>의 중심 집중도가 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 C<sub>2</sub>분자나 C<sub>3</sub>분자가 혜성의 코어 더 안쪽에서 발생함을 알 수 있다.

그림 5, 6, 7은 혜일-밤 혜성의 분자 방출선에 의한 표면 광도의 시간에 따른 변화를 보인 것이다. 3월 27일부터 5월 1일까지 근일점 근처의 분자 방출선의 표면광도 분포를 보인 것으로 그림 5는 중심에서 30'' 안쪽의 표면광도이고, 그림 6은 30''에서 60''까지의 표면광도를, 그리고 그림 7은 60''에서 90''까지의 표면광도를 나타낸 것이다. 이 그림에서 HJD 2450542.0 근처인 근일점에서 모든 분자 방출선의 밝기가 증가됨을 보이나 근일점 이후에도 아주 밝은 현상이 나타나고 있다. 전반적으로 경향이 잘 나타나지 않지만 대략 7일 간격으로 분자 방출선의 표면광도가 밝아짐을 보여 주고 있다. 이 결과는 Rodriguez et al. (1997)의 7.19일 변화를 반영하는 것으로 생각된다.



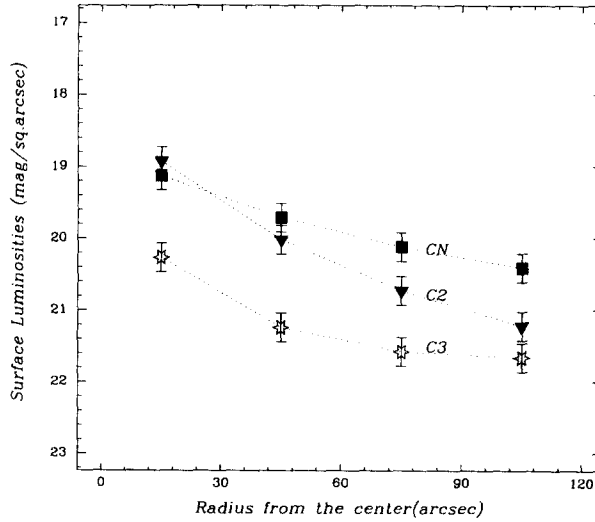


그림 4. 헤일-밥 혜성 분자 방출선의 거리에 따른 광도 분포. 4월 12일의 관측이다. CN에 비하여 C<sub>2</sub>나 C<sub>3</sub>의 중심집중도가 높다.

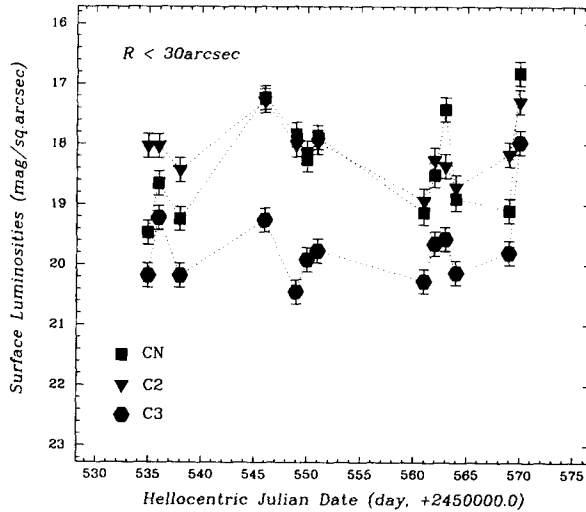


그림 5. 헤일-밥 혜성에 대한  $r_h \leq 30''$  영역의 분자 방출선의 시간에 따른 표면광도 변화. 3월 27일부터 5월 1일까지 근일점 근처의 분자 방출선의 표면광도 분포를 보인 것이다. 이 그림에서 HJD 2450542.0 근처인 근일점에서 모든 분자 방출선의 밝기가 증가됨을 보이거나 근일점 이후에도 아주 밝은 현상이 나타나고 있다. 전반적으로 경향이 잘 나타나지 않지만 대략 7일 간격으로 분자 방출선의 표면광도가 밝아짐을 보여 주고 있다. 이 결과는 Rodriguez et al. (1997)의 7.19일 변화를 반영하는 것으로 생각된다.

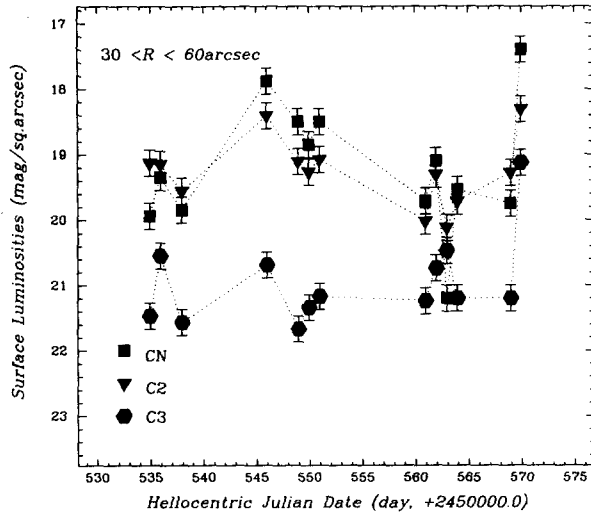


그림 6. 헤일-밥 혜성에 대한  $30'' \leq r_h \leq 60''$  영역의 분자 방출선의 시간에 따른 표면광도 ( $\text{mag arcsec}^{-2}$ ) 변화. 변화 양상은 그림 5와 같다.

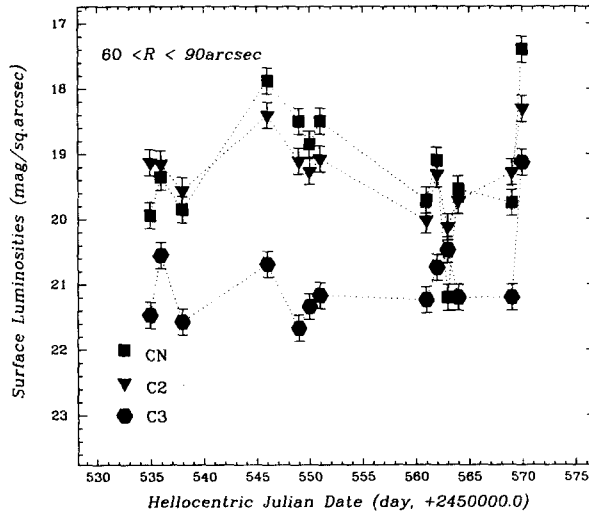


그림 7. 헤일-밥 혜성에 대한  $60'' \leq r_h \leq 90''$  영역의 분자 방출선의 시간에 따른 표면광도 변화. 변화 양상은 그림 5와 같다.

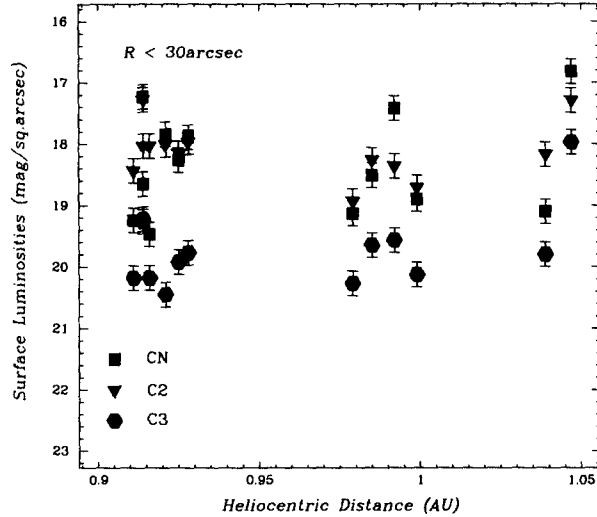


그림 8. 헤일-밥 혜성에 대한  $r_h \leq 30''$  영역의 분자 방출선의 태양 중심 거리에 따른 표면광도 변화.

그림 8은 분자 방출선에 의한 표면광도의 태양으로부터의 거리  $r_h$ 에 따른 밝기변화를 보인 것이다. (4)식과 (5)식에서 분자 생성률  $\log Q$ 는  $r_h$ 와 표면광도  $\Sigma$  합에 비례한다.  $C_3$  분자 방출선의 밝기는 거리가 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 보인다. 그러나 증가의 정도는 같은 거리에서 표면광도의 변화인 0.5등급보다 작은 0.1등급 이하이다. 한편 5월 1일의 관측을 제외하면 CN분자의 광도는 오히려 거리에 따라 떨어지고 있는 것으로 나타나고 있다. 그리고  $C_2$ 의 광도 변화는 거의 나타나지 않고 있다.

#### 4. 결 론

헤일-밥 혜성의 근일점 근처 약 2개월간 협대역 혜성필터를 이용하여 코어  $4' \times 4'$ 내의 CN,  $C_2$ ,  $C_3$  분자 방출선에 대하여 모니터링 분광측광 관측을 수행하였다. *UBVRI* 표준성을 이용하여 표준화를 수행하였고, 표준화된 영상으로부터 세 분자들의 순 방출선 영상을 얻었다. 분자 방출선의 형태학적 특성은 광태역 필터의 관측에서와 마찬가지로 여러개의 나선팔이 나타나고 있으며 이 나선팔의 변화가 혜성의 활동과 관련있는 것으로 추정된다. 한편 CN 분자의 방출은 중심에서 원형의 등방적이며 대칭적인 분포를 보이는 반면에,  $C_2$ 와  $C_3$ 는 비대칭적인 분포를 보여주고 있다.

순 분자 방출선 영상으로부터 구한 분자 방출선의 표면광도 분포에서 CN보다  $C_2$ 나  $C_3$ 가 중심 집중도가 크게 나타났다. 이것은 이들 분자의 형성과 관계 있는 것을 생각된다. 이 모니터링 관측 결과 분자 방출선의 광도는 근일점에서 밝아지지만 근일점 전후에 약 7일 간격의 광도의 증가를 나타내고 있음을 보여주고 있다. 한편 태양으로부터의 거리에 따른 CN 분자의 표면광도와  $C_2$ ,  $C_3$ 의 표면광도 분포 변화의 추이가 크지는 않지만 서로 다른 경향을 보이고 있어 이들 분자의 분자 생성률의 변화가 근일점 근처에서 서로 다르게 나타남을 보여주고 있다. 그러나 근일점 근처에서 7일 주기

등의 혜성 활동이 나타나 이와 같은 단기적 활동이 분자 생성률의 변화에 더 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다.

이상에서 헤일-밥 혜성에 대한 협대역 분광측광 모니터링 관측을 일차적으로 분석한 결과, 몇 개의 새로운 사실을 알 수 있었는데 이는 전체 관측자료를 모두 분석하고 이를 여러 혜성 모델과 비교하면 이 혜성에 대한여 좀더 잘 알 수 있을 것으로 기대된다. 특히 혜성필터 관측은 표준성이 잘 관측되어 있고, 10일 이상 연속 관측한 자료를 포함하고 있어 근일점 통과 근처에 있어서 혜성의 대표적 분자들의 특성을 보다 잘 설명할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

- 성언창 1999, 박사학위논문, 연세대학교  
성언창 2000, PKAS, 15S, 39  
손동훈, 김상준, 김주현, 김강민, 성언창, 형식 1997, PKAS, 12, 99  
Bessell, M. S., & Brett, J. M. 1988, PASP, 100, 1134  
Farnham, T. L., & Schleicher, D. G. 1998, A&Ap, 335, L50  
Farnham, T. L., Schleicher, D. G., & A'Hearn, M. F. 2000, & Lowell Observatory preprint  
Hale, A., Stevens, J., & Bopp, T. 1995, IAU Circ., 6187  
Licandro, J., Bellot Rubio, L. R., Boehnhardt, H., Casas, R., Goetz, B., Gomez, A., Jorda, L., Kidger, M. R., Osip, D., Sabalisck, N., Santos, P., Serr-Ricart, M., Tozzi, G. P., & West, R. 1998, ApJ, 501, L221  
Rodriguez, E., Ortiz, J. L., Lopez-Gonzalez, M. J., Rolland, A., Hobart, M. A., Sanchez-Blanco, E., Gutierrez, P. J., & Lopez-Moreno, J. J. 1997, A&Ap, 324, L61  
Ryder, S., 1993, PhD Thesis, Australian National University  
Schleicher, D. G., Lederer, S. M., Millis, R. L., & Farnham, T. L. 1997, Science, 275, 1913  
Weaver, H. A., Feldman, P. D., A'Hearn, M. F., & Arpigny, C. 1997, Science, 275, 1900