

## H $\alpha$ 방출선을 통한 Be 항성 원반 DISK OF Be STAR WITH EMISSION

안대건<sup>1</sup>, 배장호<sup>1</sup>, 이상각<sup>2</sup>, 신영우<sup>2</sup>, 고연경<sup>2</sup>, 강석철<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울과학고등학교

<sup>2</sup>서울대학교 물리·천문학부

DAE-GUN AHN<sup>1</sup>, JANG-HO BAE<sup>1</sup>, SANG-GAK LEE<sup>2</sup>, YOUNG-WOO SHIN<sup>2</sup>,

YEON-GYUNG KO<sup>2</sup>, AND SUK-CHUL KANG<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Seoul Science High School

<sup>2</sup>Department of Physics and Astronomy, Seoul National University

E-mail: daepary331@hanmail.net

(Received November 19, 2007; Accepted December 27, 2007)

### ABSTRACT

We have determined the disk size of Be stars by using H $\alpha$  emission. We observed spectra of Be stars with telescope in SNU, equipped with SB SGS (Santa Babara Self Guided Spectrograph) and CCD ST-8. The size of disk of Be stars was estimated with the Be star model of Grundstrom & Gies (2006). This study suggests that the medium resolution spectra taken with small telescope equipped with commercial spectrograph are useful to estimate the approximate size of the H $\alpha$  emitting disk around Be stars.

*Key words:* stars; Be stars; H $\alpha$  emission

### 1. 서론

Be 항성은 매우 빠르게 회전하는 B형 항성으로 수소, 헬륨, 철 등 여러 원소의 방출선을 보이거나 보였던 적이 있는 별을 가리킨다. 과거 Struve (1931)는 Be 항성이 빠르게 회전하기 때문에 주변에 물질을 방출하여 원반을 형성한다고 하였으나, 실제 회전 속도는 물질이 뿜어나갈 정도의 이탈 속도에는 미치지 못하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 원반의 생성은 항성풍에 의한 물질 방출, 빠른 회전 및 자기장 등과 연관된 것으로 추론되고 있으며 방출선은 이 원반에서 발생한다. 이 원반은 Herbig Ae/Be와 같은 천체의 강착 원반과 달리 항성에서 방출된 물질로 이루어졌기 때문에 항성의 특성과 원반이 서로 상관관계가 있음을 유추할 수 있다. 비록 가까운 별에 제한되지만 최근에는 간섭계에 의하여 원반을 직접 관측하여 원반의 크기를 측정하는 것이 가능해졌다 (Quirrenbach et al. 1997; Gies et al. 2007).

Grundstrom & Gies (2006)는 수소 방출선의 등가폭이 원반의 크기와 항성의 온도, 시선 방향에 대한 원반 축의 기울기 등에 의존하는 모형을 만들어 H $\alpha$  방출선의 등가폭과 원반의 크기 관계를 제시하였다. 따라서 H $\alpha$  방출선의 등가폭을 측정하면 간섭계로 직접 관측이 어

려운 Be 항성의 원반에 대한 연구를 수행할 수 있다. 이러한 등가폭 측정은 중분산 분광관측으로도 가능하며 작은 망원경에 범용 분광기를 부착하여 H $\alpha$  방출선 측정을 통해 Be 항성의 원반 연구를 수행할 수 있다.

본 연구에서는 서울대학교 61cm 반사 망원경에 SB SGS 분광기와 ST-8 CCD를 부착하여 잘 알려진 4개의 Be 항성 (HD 5394 =  $\gamma$  Cas, HD 10516 =  $\phi$  Per, HD 200120 = 59 Cyg, HD 202904 =  $\upsilon$  Cyg)에 대해 분광관측을 수행하였다. 관측을 통해 얻은 H $\alpha$  방출선의 등가폭을 Grundstrom & Gies (2006)가 제시한 모형에 적용하여 수소 방출선 영역의 크기를 도출하고, 이를 기존 연구들과 비교하였다.

관측 대상 중, HD 5394 ( $\gamma$  Cas)는 Be 항성으로 알려진 첫 번째 천체로 1800년대 말부터 지금까지 꾸준히 관측이 이루어졌다. 그동안 HD 5394는 보통의 B형 항성, 수소, 헬륨, 철 등의 방출선이 보이는 Be형 항성, 방출선에서 예리한 흡수선 (sharp absorption)이 보이는 Be(sh) 항성 등의 다양한 변화를 보여 왔다. 또한 HD 5394는 X선 방출원임이 밝혀졌으나, X선의 플럭스가 보통의 Be/X-Ray 쌍성계에 비해 상당히 약하여 X선 방출 기작에 대한 다양한 해석이 제시되고 있다 (Smith

et al. 2004). 최근에는  $H\alpha$  선과 He I 6678 Å 선의 시선 속도 변화에서 203.59일의 궤도 주기를 가진다는 연구 결과가 있었으나 (Harmanec et al. 2000) X선 플럭스는 이와 다른 시간 간격으로 변한다는 연구결과가 알려지면서 (Robinson, Smith & Henry. 2002) X선 방출은 동반성보다 HD 5394 자체에서 발생하는 것으로 추론되고 있다.

HD 10516 ( $\phi$  Per)은 He II 4686 Å 방출선의 위상 변화를 통해서 동반성이 헬륨 항성으로 예상되었다 (Poeckert, 1981). 그러나 IUE (International Ultraviolet Explorer), HST/GHRS의 분광 자료에서 철 (Fe V)의 약한 흡수선들과 강한 탄소 방출선 (C IV 1550 Å)이 발견됨에 따라 동반성이 유효 온도가 50,000K 이상인 O형 준왜성 (sdO)으로 밝혀졌다 (Thaller et al. 1995; Gies et al. 1998). Be 항성의 쌍성계 중, Be/sdO 시스템이 발견된 것은 HD 10516이 처음이었으며, 이후 HD 58978 (FY CMa)과 HD 200120 (59 Cyg)도 HD 10516과 같은 Be/sdO의 쌍성계로 추정되고 있다.

HD 200120 (59 Cyg)은 백조자리의 OB7 성협외의 가장 밝은 별로, 1910년대 이후 지속적인 관측을 통해 주기적인 스펙트럼의 변화가 보고되었다. HD 200120은 1980년부터 쌍성계라고 알려졌으며, 이후  $H\alpha$  와 He I 방출선의 시선 속도 변화가 확인되면서 궤도 요소들이 확인되었다. 특히 일반적인 O형 항성에서 나타나는 He II 4686 Å 방출선이 관측되었다. 이 방출선의 위상은 다른 선 스펙트럼과 반대로 변화하였으며, 속도 변화를 통해 동반성의 질량이 HD 200120의 1/5임이 확인되면서 HD 10516과 같은 Be/sdO 쌍성계로 추정된다 (Harmanec et al. 2002; Maintz et al. 2005).

HD 202904 ( $\nu$  Cyg)는 19세기 말, 처음 관측된 이후,  $H\alpha$  방출선이 크게 변하지 않았다. 그러나 1983년 이후  $H\alpha$  방출선 세기의 변화가 관측되었으며, 특히 1991년 중반과 2000년의 관측 자료에서는 약 100일 동안 0.3등급(V)이 밝아지기도 하였다 (Neiner et al. 2005). 아울러 HD 202904는 흡수선의 좁은 선폭들로부터 원반의 경사각이 30°보다 작은 'pole-on' 형태를 띤다고 알려져 있다 (Slettebak & Howard. 1955; Peters. 1979).

위에서 언급된 관측 대상 천체 중, 특히 HD 5394와 HD 10516은  $H\alpha$  간섭 관측을 통해 원반에 대한 정보가 알려졌다. Tycner et al. (2006)은 이들의 경사각 값을 각각  $\geq 55^\circ$ ,  $\geq 74^\circ$ ,  $H\alpha$  선을 방출하는 원반의 크기를 3.59mas, 2.89mas (mili-arcsec)라고 발표하였다. 본 연구에서는 소형 망원경과 범용 분광기를 사용하여 Be 항성의 분광자료를 획득하고,  $H\alpha$  방출선의 선운곽 및 등가폭을 측정하여 원반의 크기를 추정하고, 이를 간섭 관측의 결과와 비교하고자 한다. 따라서 이러한 비교를 통해 본 연구와 같이 작은 망원경 및 범용 분광기를 이

표 1. 관측 대상 천체

천체	이름	분광형	등급 (V)
HD 5394	$\gamma$ Cas	B0IVpe	2.39
HD 10516	$\phi$ Per	B2Vpe	4.09
HD 200120	59 Cyg	B1.5Vne	4.74
HD 202904	$\nu$ Cyg	B2Vne	4.43

용한 Be 항성의 원반 연구가 가능한지를 알아볼 수 있을 것이다.

2절의 관측 및 자료 처리에서는 본 연구를 수행하는데 필요한 관측 장비, 관측 방법, 자료 처리에 대한 내용을, 3절의 분석 및 결과에서는 관측 자료와 Be 항성 모형에 대한 설명을 정리하고 그로부터 유추한 각 항성들의 원반 크기를 추정한다. 4절에서는 본 연구에서 얻은 결과와 이전의 연구를 비교하고, 그 차이의 원인에 대해 논의할 것이며, 마지막으로 5절에서는 결과를 요약한다.

## 2. 관측 및 자료 처리

### 2.1 사용 장비

관측에 사용된 망원경은 서울대학교에 있는 61cm Ritchey-Chretien식 망원경으로 초점 비는 F/7 이다. 망원경에 부착된 분광기는 SBIG사의 SGS (Self Guided Spectrograph)로 유효 파장 영역이 3800 ~ 7500 Å 이며 슬릿의 폭 (width)은 18 $\mu$ m, 회절격자는 600 l/mm를 사용하였다. 분광기에 장착된 CCD는 SBIG ST-8으로, 1530 $\times$ 1020 화소를 갖는 Kodak사의 KAF-1603ME + TI TC-237 칩이 내장되어 있다. CCD의 냉각은 열전효과를 이용한 전기냉각방식으로, 관측 중에는 -10°C를 유지하도록 설정되어 있으며, 암전자 생성율은 1  $e^-$  pixel/sec 이하이다. CCD 화소의 크기는 9 $\mu$ m $\times$ 9 $\mu$ m으로 SGS 분광기와 연결 시, 1.05 Å/화소의 분해능을 보여준다. 또한 읽기 잡음은 15e<sup>-</sup>이다.

### 2.2 관측

표 1은 관측 대상의 분광형, 등급 등을 수록하였다.

2006년 9월 13일 및 22일, 이틀에 걸쳐 4개의 Be 항성에 대한 관측이 수행되었다. 관측 당일 얇은 구름이 전 하늘에 끼어 수초에서 수백 초까지 노출 시간을 다르게 하였으며 노출 시간 정보는 표 2에 기재하였다.

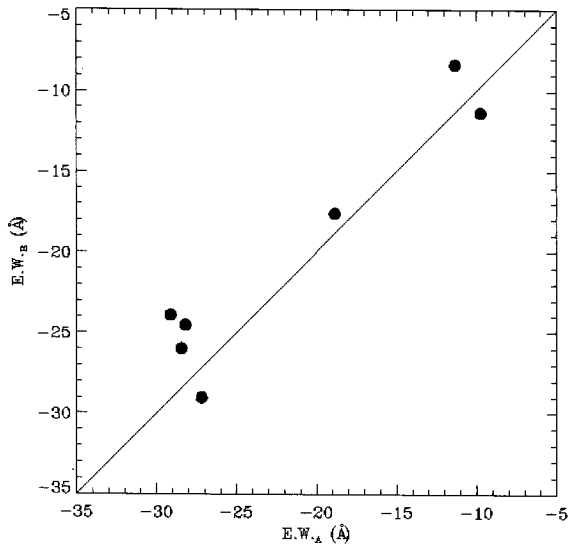


그림 1. 두 연구자가 독립적으로 수행하여 계산한 각 천체의 H $\alpha$  방출선 등가폭 비교

바닥고르기 영상은 텅스텐-할로겐 광원을 사용하여 관측 전후로 5~10장씩 얻었으며 노출 시간은 0.4~50초로 주었다. 파장을 동정하기 위해서 네온을 비교 광원으로 사용하였다. 관측 중, 분광기에 작용하는 중력 변화로 인해 내부 구조가 미세하게 움직여서 스펙트럼의 위치가 이동할 가능성이 있기 때문에 대상 천체의 관측 전후로 네온 비교 광원의 스펙트럼을 얻었다. 네온 비교 광원은 광섬유를 이용하여 슬릿으로 입사시켜 관측하였다.

### 2.3 자료 처리

관측 자료는 IRAF의 ccdred 패키지를 이용하여 기기적 영점변위를 보정하고 암전자를 제거한 후, 바닥고르기 과정을 거쳤다. 이 영상을 apextract 패키지의 apall task를 이용하여 1차원 스펙트럼으로 추출하였다. 네온 방출선의 알려진 파장 정보를 이용하여 좌표의 정보를 파장 정보로 변환하였고, splot을 사용하여 스펙트럼을 연속 스펙트럼에 대한 상대적인 세기로 규격화하였다. H $\alpha$  방출선의 등가폭은 두 연구자 (D.-G. A. & J.-H. B.)가 IRAF/splot을 사용하여 독립적으로 측정을 하였으며 그 결과는 그림 1에 제시하였다.

두 연구자가 독립적으로 측정한 등가폭의 차이는 최대 5.2 Å 이었으며, 평균 차이는 3.0 Å 이었다. 특히 13 일에 관측한 HD 200120은 등가폭의 14.9%만큼 차이가 났다. 같은 관측 자료를 각각 따로 처리한 스펙트럼의

등가폭이 차이가 나는 것은 주로 IRAF의 apall task를 이용하는 과정에서 발생한 것으로 보인다. apall의 스펙트럼 추출 시, 배경을 어떻게 설정하는가에 따라 등가폭의 측정에 영향을 줄 수 있으며, 또한 스펙트럼을 적분하는 단계에서도 개인차가 발생할 수 있었다. 흡수선의 등가폭을 측정할 때에는 가우시안 선윤곽 (Gaussian profile)이나 보이트 선윤곽 (Voigt profile)을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서는 각 연구자가 H $\alpha$  방출선보다 짧은 파장 영역과 긴 파장 영역을 기준으로 연속 스펙트럼을 추정하였고 이를 기준으로 H $\alpha$  방출선 영역을 직접 적분하였다. 이는 실제 광구에서의 H $\alpha$  흡수선을 무시한 것이다. 표 3은 각자의 등가폭과 두 사람의 평균값, 원반의 크기 계산에 적용한 값이며, 그림 2에 각 항성의 H $\alpha$  선윤곽을 보였다.

동일 천체에 대해 등가폭의 변화 유무를 보기 위해 날짜에 따른 평균치를 비교해 보았다. 그 값은 최대 0.7 Å 이었으며 이는 등가폭의 6.9%였다. 두 사람의 측정 차이가 등가폭의 15%까지 나올 수 있다는 것을 감안하면 이 자료에서 날짜에 따른 등가폭 변화가 있다고 추론하기는 어렵다. 따라서 관측 대상 천체의 H $\alpha$  방출선 영역 크기 측정을 위해서 날짜에 따른 두 사람의 평균치를 평균하여 적용하였다.

### 3. 분석 및 결과

그림 3에서는 본 연구에서 얻은 HD 5394, HD 200120의 H $\alpha$  선윤곽과 고분산 분광 연구에서 얻어진 선윤곽을 비교하였다. 왼쪽 스펙트럼은 2006년 9월 13일 서울대학교 61cm 망원경에 범용 분광기를 부착하여 관측한 중분산 스펙트럼(R~3,000) 결과이고, 오른쪽의 스펙트럼은 같은 항성들을 2005년 11월 및 2006년 6월, 보현산 천문대 1.8m 망원경의 고분산분광기 BOES (R=44,000)을 사용하여 얻은 자료이다. 중분산 분광기로 얻은 스펙트럼에서 측정한 H $\alpha$  방출선의 등가폭이 약 2 Å 작게 추정되었다. 그러나 표 3에 제시된 바와 같이 H $\alpha$  방출선의 등가폭에서 1 ~ 2 Å 정도의 차이를 변화로 볼 수 없으므로 2 Å의 차이도 시간에 따른 변화나 기기에 따른 차이로 볼 수 없다. 따라서 Be 항성의 H $\alpha$  방출선 관측이 작은 망원경과 범용 중분산 분광기로도 수행 가능하다는 것을 확인할 수 있다.

Grundstrom & Gies (2006)는 H $\alpha$  선의 등가폭과 원반과의 관계를 다음과 같은 가정에서 유도하였다. 그들은 원반으로부터 방향성이 없이 방출되는 고유세기 (specific intensity:  $I_{\lambda}^d$ )를 가정하고 원반은 기하학적으로 얇지만, 수소 방출선을 내는 지역은 광학적으로 두껍다는 가정에서 원반에서 방출되는 H $\alpha$  영역의 플럭스를 다음과 같이 기술했다.

표 2. 관측 기록

날 짜	대 상	노출시간 (s)
2006년 09월 13일	바닥 고르기 영상 (텅스텐 할로겐)	50 (10회)
	네온 비교 광원	200, 500
	HD 5394	20, 20, 20
	HD 10516	100, 40, 20
	HD 200120	100, 120, 100
	HD 202904	100, 60, 100
2006년 09월 22일	바닥 고르기 영상 (텅스텐 할로겐)	50, 10, 2, 0.4 (2회), 20 (10회)
	네온 비교 광원	150, 200
	HD 5394	2, 2, 2
	HD 10516	600, 120, 100
	HD 200120	100, 120, 150, 150, 150

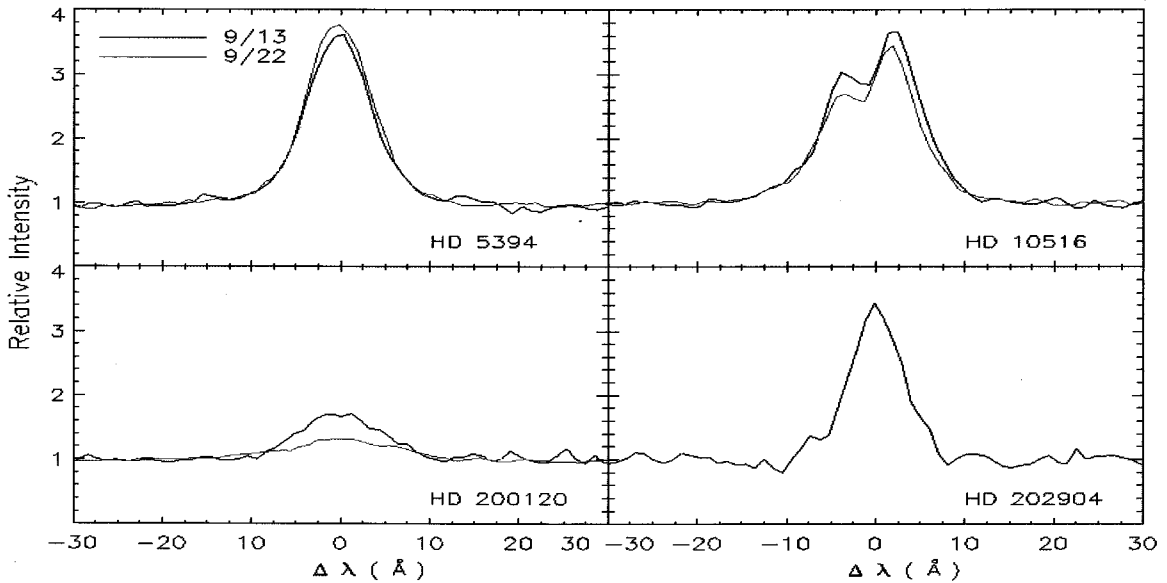


그림 2. 관측일에 따른 각 천체의 H $\alpha$  방출선의 선윤곽

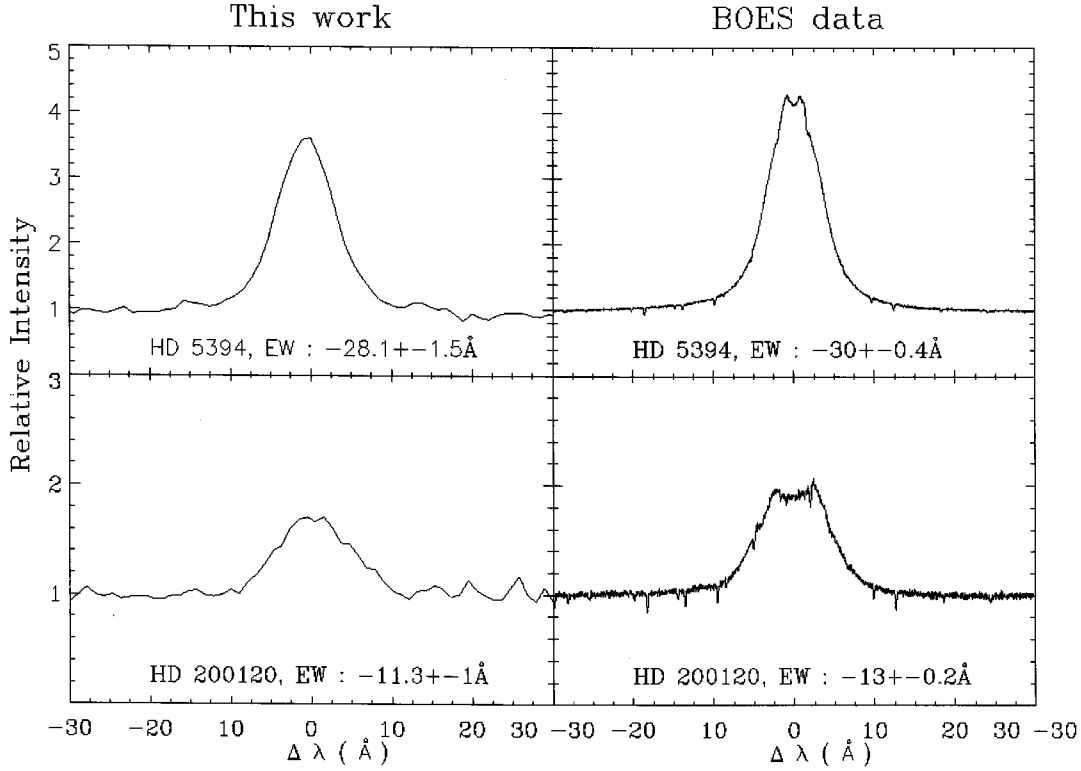


그림 3. 본 연구에서 얻은 스펙트럼 (2006년 9월 13일)과 보현산의 고분산 분광 관측으로부터 얻은 스펙트럼 비교. (BOES 자료는 다른 연구에서 처리중인 것으로 HD 5394는 2005년 11월 12일, HD 200120은 2006년 6월 15일 관측한 자료이다.)

$$F(H\alpha) = \pi I_{\lambda}^d \langle \Delta\lambda \rangle \cos i \left( \frac{R_{H\alpha}}{D} \right)^2 \quad (1)$$

$\langle \Delta\lambda \rangle$ 는 광학적으로 두꺼운 원반에서 수소가 방출하는 H $\alpha$  방출선의 평균적인 파장 간격 (wavelength interval),  $i$ 는 시선 방향에 대한 원반 축의 기울기,  $R_{H\alpha}$ 는 수소 방출선이 나오는 원반 영역의 크기,  $D$ 는 항성과 관측자 사이의 거리를 나타낸다. 또한  $F(H\alpha)$ 는 항성의 고유세기 ( $I_{\lambda}^s$ ), 항성과 원반의 연속 플럭스의 비 ( $\epsilon$ ), H $\alpha$  방출선의 등가폭 ( $|W_{\lambda}|$ ), 그리고 항성의 반지름 ( $R_s$ )으로 다음과 같은 관계로 기술할 수 있다.

$$F(H\alpha) = |W_{\lambda}| (1 + \epsilon) \pi I_{\lambda}^s \left( \frac{R_s}{D} \right)^2 \quad (2)$$

따라서 위의 식 (1)과 (2)로부터 원반의 크기를 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{R_{H\alpha}}{R_s} = \sqrt{\frac{I_{\lambda}^s |W_{\lambda}| (1 + \epsilon)}{I_{\lambda}^d \langle \Delta\lambda \rangle \cos i}} \quad (3)$$

$I_{\lambda}^s / I_{\lambda}^d$ 는 항성 및 원반의 온도에 의해 결정이 되는 물리량으로, 원반은 항성의 0.6배의 유효 온도로 등온 상태를 유지한다고 가정한다. 위의 식은 수소 방출선 원반의 크기 ( $R_{H\alpha} / R_s$ )가 등가폭 ( $|W_{\lambda}|$ )의 제곱근에 비례한다는 관계를 준다. 이를 바탕으로 Grundstrom & Gies (2006)는 모형을 세워서 항성의 온도 (분광형), 원반 모형을 정의하기 위한 원반 전체의 경계 ( $R_d$ ), 원반의 기울기 ( $i$ )를 변수로 하여 H $\alpha$  방출선의 등가폭과 수소 방출선 영역의 크기 관계를 제시하였다.

표 4에 수소 방출선 영역의 크기를 결정하기 위해 필요한 4가지 물리량, 즉 측정된 H $\alpha$  방출선의 등가폭, 참고 문헌들로부터 인용한 항성의 유효 온도, 원반의 기울기 그리고 원반 전체의 크기를 제시 하였고, 이로부터 추정된 수소 방출선 원반 크기도 함께 제시하였다.

표 3.  $H\alpha$  방출선의 등가폭 비교. A, B 값은 두 연구자가 독립적으로 자료 처리하여 얻은 것이다.

천체		$H\alpha$ 방출선 등가폭 ( $\text{\AA}$ )						적용값
		9/13			9/22			
		A	B	평균	A	B	평균	
HD	5394	-28.1	-24.6	-26.4	-29.1	-23.9	-26.5	-26.4
HD	10516	-28.4	-26.0	-27.2	-27.1	-29.1	-28.1	-27.7
HD	200120	-11.3	-8.4	-9.9	-9.7	-11.4	-10.5	-10.2
HD	202904	-18.8	-17.6	-18.2				-18.2

표 4. Grundstrom & Gies (2006)의 모형을 이용하여 구한 수소 방출선 원반 영역의 크기.

참고문헌-<1>Harmanec et al. 2000; <2>Gies et al. 1998; <3>Harmanec et al. 2002; <4>Neiner et al. 2005; <5>Tycner et al. 2006; <6>Maintz et al. 2005; <7>Peters et al. 1979; <8>Grundstrom & Gies. 2006;

	HD 5394	HD 10516	HD 200120	HD 202904
$H\alpha$ 등가폭 ( $\text{\AA}$ )	-26.4	-27.7	-10.2	-18.2
유효 온도 ( $^{\circ}\text{K}$ )	28800 <sup>&lt;1&gt;</sup>	29300 <sup>&lt;2&gt;</sup>	25880 <sup>&lt;3&gt;</sup>	19800 <sup>&lt;4&gt;</sup>
경사각 ( $^{\circ}$ )	$\geq 55$ <sup>&lt;5&gt;</sup>	$\geq 74$ <sup>&lt;5&gt;</sup>	70 <sup>&lt;6&gt;</sup>	0 <sup>&lt;7&gt;</sup>
원반 전체의 크기 ( $R_d/R_s$ )	27 <sup>&lt;8&gt;</sup>	22 <sup>&lt;8&gt;</sup>	10 <sup>&lt;3&gt;, &lt;6&gt;</sup>	100
수소 방출선 영역의 크기 ( $R_{H\alpha}/R_s$ )	$6.7 \pm 0.3$	$8.2 \pm 0.4$	$6.0 \pm 0.4$	$4.1 \pm 0.1$

$H\alpha$  방출 영역의 크기를 구하기 위해 적용한 경사각들은 다음과 같다. HD 5394와 HD 10516의 원반 경사각은 간섭계의 관측 결과로부터 얻은  $\geq 55^{\circ}$ ,  $\geq 74^{\circ}$ 을 활용하였고, 쌍성계로 알려진 HD 200120은 궤도 경사각  $70^{\circ}$ 를 사용하였다 (Gies et al. 2007). HD 202904는 스펙트럼이 'pole-on'의 특성을 보이므로 (Peters. 1979) 원반의 기울기를  $0^{\circ}$ 로 놓고 수소 방출선 영역의 크기를 유추하였다. 한편 이 방법으로  $H\alpha$  방출선을 내는 원반의 크기를 얻으려면 원반 전체의 크기가 필요하다. HD 5394, HD 10516, HD 200120의 경우, 동반성과 Be 항성의 중력이 같아지는 로쉬 로브 (Roche Lobe) 값에 해당되는 27, 22, 10  $R_d/R_s$ 을 취하였으며, HD 202904

는 모형에서 선택할 수 있는 가장 큰 값인 100  $R_d/R_s$ 을 선택하였다.

위의 값들로부터 수소 방출선 영역 크기는 HD 5394, HD 10516, HD 200120 및 HD 202904에서 각각  $6.7 \pm 0.3$ ,  $8.2 \pm 0.4$ ,  $6.0 \pm 0.4$ ,  $4.1 \pm 0.1$   $R_{H\alpha}/R_s$ 로 추정되었다. 오차는 등가폭의 측정 오차로부터 발생한 값이다. 이 중, HD 5394와 HD 10516은  $H\alpha$  간섭계 관측을 통해 알려진 수소 방출선 영역의 크기와 비교하였다. Quirrenbach et al (1997)은 HD 5394와 HD 10516의 원반 크기를  $3.47 \pm 0.02 \text{mas}$ ,  $2.67 \pm 0.20 \text{mas}$ 로 추정하였으며, Tycner et al (2006)은  $3.59 \pm 0.04 \text{mas}$ ,  $2.89 \pm 0.09 \text{mas}$ 로 얻었다. 이를 항성의 크기 단위로 환산하기 위하여

측광 관측과 대기 모형으로부터 계산된 항성의 크기를 활용하였으며, HD 5394는 0.45mas (Ochsenbein & halb wachs 1982), HD 10516은 0.26 $\pm$ 0.004mas (Underhill et al. 1979)을 취하였다. 따라서 H $\alpha$  방출선을 내는 원반 영역의 크기는

$$8.0 \pm 0.09 R_{H\alpha}/R_s, 11 \pm 0.35 R_{H\alpha}/R_s,$$

가 된다. 둘의 결과를 비교해보면, 본 연구에서 얻어진 수소 방출선 영역의 크기가 각각 16%, 25%정도 작다.

#### 4. 토의

이 연구에서는 광구로부터 나오는 H $\alpha$  흡수선을 고려하지 않고 방출선을 측정하여, 방출선 영역에서 나오는 H $\alpha$  등가폭을 그만큼 적게 측정하였다. HD 5394 및 HD 10516과 유사한 물리량을 갖는 항성 ( $T_{eff} = 30,000\text{K}, \log g = 3.7\text{cm s}^{-2}$ )의 NLTE 모형에서 H $\alpha$  흡수선 등가폭이 2.3 Å으로 추정되었다 (Auer & Mihalas 1972). 이 값을 보정하여 H $\alpha$  방출 영역의 크기를 다시 추정하면 HD 5394가 7.3  $R_{H\alpha}/R_s$ , HD 10516이 8.9  $R_{H\alpha}/R_s$ 가 된다. 이 값은 간접계를 통해 측정된 H $\alpha$  방출선 영역의 크기보다 여전히 10%, 18% 정도 작은 값을 보인다.

그렇다면 실제로 원반의 크기가 변하였을까? 1991~1992년과 2004년에 H $\alpha$  간접계 관측에서 보인 수소 방출선 영역의 크기는 HD 5394가 3.47 $\pm$ 0.02mas에서 3.59 $\pm$ 0.04mas으로, HD 10516이 2.67 $\pm$ 0.20mas에서 2.89 $\pm$ 0.09mas으로 약 3~8%정도 증가한 값을 보였다 (Quirrenbach et al. 1997; Tycner et al. 2006). 따라서 이와 같은 변화를 고려할 때, 수소 방출선 영역 크기가 실제로 변화한 것인지 확인하기는 어려우나, 해당 천체들의 H $\alpha$  방출선 선윤곽이 수개월에서 수년에 걸쳐 변화하기도 하기 때문에 (Tycner et al. 2005) 수소 원반의 크기가 변화하였는지를 알아보기 위해서는 지속적인 관측이 요구된다.

또는 Grundstrom & Gies (2006)의 모형이 너무 단순화한 모형은 아닐까? 한 예로 Grundstrom & Gies (2006)는 Be 항성의 원반 모형을 축대칭으로 가정하였다. 그러나 그림 3의 오른쪽 위의 그림과 같이, 수소 방출선의 끝이 두 개로 갈라져서 주기적으로 세기가 변하는 현상을 (Violet and Red variation) one-armed disk로 설명하고 있다 (Papaloizou & Savonije 2006). 또한 모형에서는 원반의 온도가 일정하다고 가정하였는데, 이는 계산의 편의를 위하여 도입한 가정으로, 이러한 가정들이 실제 원반의 크기를 결정하는데 오차를 유발할 수 있을 것이다. 이러한 단순 모형이 수소 방출선 원반 크기를 작게 측정하도록 할 수 있다. 아울러 등가폭 외의

입력 인자인 항성의 유효 온도, 원반 경사각, 원반 전체의 크기의 부정확함도 수소 방출선 영역의 크기를 결정하는데 영향을 줄 수 있다. HD 5394는 알려진 유효 온도 범위에서 (28,800~30,000K : Harmanec et al. 2000; Telting et al. 1993) 수소 방출선 영역의 크기가 0.17  $R_{H\alpha}/R_s$ , 즉 2.5%만큼 달라진다. 그리고 HD 5394의 경사각이 55°보다 큰 64°거나, 원반 전체의 크기가 28  $R_d/R_s$ 보다 작은 16  $R_d/R_s$ 이면 수소 방출선 영역 크기는 0.5  $R_{H\alpha}/R_s$  증가한다. 따라서 원반 경사각이 더 크거나 원반 전체의 크기가 작으면, 수소 방출선 영역의 크기는 크게 측정된다.

마지막으로 본 연구의 자료 처리에서 발생한 오차의 영향을 고려해 보았다. 같은 관측 자료에서 두 연구자의 등가폭 값이 최고 5.2 Å의 차이를 보였으나, 자료 처리에서 발생한 요인들을 모두 고려한 원반 크기의 오차를 계산해보면 최대 0.4  $R_{H\alpha}/R_s$ 가 된다. 따라서 자료 처리에서 발생하는 오차만으로 수소 방출선 원반의 크기가 간접 관측에 의한 원반 크기보다 작게 추정된 것을 설명할 수 없다. 따라서 앞에서 논의한 여러가지 요인들 (원반의 크기가 변화, 모형의 단순성, 모형에 입력된 온도·경사각·전체 원반의 크기 등의 부정확도) 이 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 보인다.

그러므로 본 연구에서 사용한 방법으로 Be 항성의 원반을 연구할 경우, 위에서 언급한 오차 유발 요인들에 대한 개선 노력이 필요하다.

이상의 논의를 요약하면 H $\alpha$  방출선에서 추론한 수소 방출선 영역의 크기는 간접계 관측의 결과와 비교하여 다소 차이를 보였다. 그러나 원반의 크기가 실제로 변화하였다는 가능성을 배제할 수 없었으며 Grundstrom & Gies (2006)의 모형보다 현실적인 모형과 천체들에 대한 정확한 물리량들을 이용하면 Be 항성의 수소 방출선 원반에 대한 보다 정확한 연구가 가능하다는 것을 시사한다. 본 연구가 관측 환경이 좋지 않은 서울에서 61cm 반사망원경과 범용 분광기와 CCD로 수행했다는 것을 감안하면, Be 항성의 원반 연구는 열악한 연구 환경에서도 충분히 수행 가능하다고 사료된다. 이번 연구에서 이용한 장비들과 비슷한 정도의 관측 시설이 최근 사설 및 공공 천문대를 중심으로 많이 늘어나고 있다. 이를 활용하여 Be 항성들의 시간에 따른 관측 자료가 누적된다면 Be 현상의 기작과 원반 형성 및 특성에 대한 연구에도 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

#### 5. 요약

서울대학교의 61cm 망원경에 SGS 분광기를 부착하여 4개의 Be 항성에 대한 분광 관측을 수행하였다. 관측으로부터 얻은 각 항성의 H $\alpha$  등가폭은 HD 5394가 -26.4

Å, HD 10516이  $-27.7\text{Å}$ , HD 200120이  $-10.2\text{Å}$ , HD 202904가  $-18.2\text{Å}$ 이다. 이로부터 Grundstrom & Gies (2006)가 제시한  $H\alpha$  방출선의 등가폭과 수소 방출선 영역의 크기 관계를 이용하여 구한 원반의 수소 방출선 영역의 크기는 HD 5394가  $6.7 \pm 0.3 R_{H\alpha}/R_s$ , HD 10516이  $8.2 \pm 0.4 R_{H\alpha}/R_s$ , HD 200120이  $6.0 \pm 0.4 R_{H\alpha}/R_s$ , HD 202904가  $4.1 \pm 0.1 R_{H\alpha}/R_s$ 이었다. HD 5394와 HD 10516에 대한 결과는  $H\alpha$  간섭 관측으로부터 얻어진 결과와 약 20% 정도 차이가 났다.

항성의 광구에서 발생한  $H\alpha$  흡수선의 등가폭을 정밀하게 보정하고, Grundstrom & Gies (2006)의 모형이 좀더 현실적으로 개선되며 정확한 항성 물리량 (유효 온도, 원반 경사각, 원반 전체 크기)을 적용할 경우, 보다 정확한 원반크기를 구할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 61cm 구경의 반사망원경과 범용의 중분산 분광기를 활용한 분광관측으로도 충분히 Be 항성의 원반 변화에 대한 연구를 수행할 수 있다는 것을 제시하고 있다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 한국과학재단의 과학고 영재교육 내실화 지원사업의 지원을 받았다.

#### 참고 문헌

- Auer, L. H. & Mihalas, D., 1972, Non-Lte Model Atmospheres. VII. The Hydrogen and Helium Spectra of the O Stars, *ApJS*, 24, 193
- Gies, D. R., et al., 1998, Hubble Space Telescope Goddard High Resolution Spectrograph Observations of the Be + sdO Binary phi Persei, *ApJ*, 493, 440
- Gies, D. R., et al., 2007, CHARA Array K'-Band Measurements of the Angular Dimensions of Be Star Disks, *ApJ*, 654, 527
- Grundstrom, E. D. & Gies, D. R., 2006, Estimating Be Star Disk Radii using  $H\alpha$  Emission Equivalent Widths, *ApJ*, 651, L53
- Harmanec, P., et al., 2000, Properties and nature of Be stars. XX. Binary nature and orbital elements of gamma Cas, *A&A*, 364, L85
- Harmanec, P., et al., 2002, Properties and nature of Be stars. XXI. The long-term and the orbital variations of V832 Cyg = 59 Cyg, *A&A*, 387, 580
- Maintz, M., Rivinius, T., Stahl, O., Stefl, S., Appenzeller, I., 2005, 59 Cyg - A second Be binary with a hot, compact companion, *PAICz*, 93, 21
- Neiner, C., et al., 2005, Rotation, pulsations and outbursts in the Be star  $\nu$  Cygni (HD 202904), *A&A*, 437, 257
- Ochsenbein, F. & Halbwachs, J. L., 1982, A list of stars with large expected angular diameters, *A&AS*, 47, 523
- Papaloizou, J. C. B. & Savonije, G. J., 2006, One-armed oscillations in Be star discs, *A&A*, 456, 1097
- Peters, G. J., 1979, An analysis of the far-ultraviolet spectra of the pole-on Be stars Upsilon Cygni and MU Centauri, *ApJ*, 39, 175
- Poeyckert, R., 1981, A spectroscopic study of the binary Be star Phi Persei, *PASP*, 93, 297
- Robinson, R. D., Smith, M. A., & Henry, G. W., 2002, X-Ray and Optical Variations in the Classical Be Star  $\gamma$  Cassiopeia: The Discovery of a Possible Magnetic Dynamo, *ApJ*, 575, 435
- Quirrenbach, A., et al., 1997, Constraints on the Geometry of Circumstellar Envelopes: Optical Interferometric and Spectropolarimetric Observations of Seven Be Stars, *ApJ*, 479, 477
- Slettebak, A. & Howard, R. F., 1955, Axial Rotation in the Brighter Stars of Draper Types B2-B5., *ApJ*, 105, 121
- Smith, M. A., et al., 2004, High-Resolution Chandra Spectroscopy of Cassiopeiae (B0.5e), *ApJ*, 600, 972
- Struve, O., 1931, On the Origin of Bright Lines in Spectra of Stars of Class B, *ApJ*, 73, 94
- Telting, J. H., et al., 1993 Long-term changes in emission line and continuum spectrum of the Be star Gamma Cassiopeiae - H-beta V/R and IR continuum flux variations, *A&A*, 270, 355
- Thaller, M. L., Bagnuolo, W. G., Jr., Gies, D. R., & Penny, L. R., 1995, Tomographic Separation of Composite Spectra. III. Ultraviolet Detection of the Hot Companion of phi Persei, *ApJ*, 448, 878
- Tycner, C., et al., 2005, Properties of the  $H\alpha$ -emitting Circumstellar Regions of Be Stars, *ApJ*, 624, 359
- Tycner, C., et al., 2006, Constraining Disk Parameters of Be Stars using Narrowband  $H\alpha$  Interferometry with the Navy Prototype Optical Interferometer, *AJ*, 131, 2710
- Underhill, A. B., Divan, L., Prevot-Burnichon, M.-L., & Doazan, V., 1979, Effective temperatures, angular diameters, distances and linear radii for 160 O and B stars, *MNRAS*, 189, 601