

## 공생별 AG Peg의 H 방출선 윤곽 분석

이강환 · 이성재 · 형 식\*

충북대학교 지구과학교육과, 28644, 충북 청주시 서원구 충대로 1

### An Analysis of the H Emission Line Profiles of the Symbiotic Star AG Peg

Kanghwan Lee, Seong-Jae Lee, and Siek Hyung\*

Department of Earth Science Education, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

**Abstract:** The symbiotic star AG Peg is a nebulous binary system that consists of giant star (GS) and white dwarf (WD). We investigated the H I Balmer emission lines of the symbiotic nova AG Peg, observed in 1998, 2001, and 2002 at Lick Observatory. The H $\alpha$  and H $\beta$  line profiles consist of blue-shifted, red-shifted, and broad components of which intensities and width showed notable changes. The H I emission line profiles that represent the kinematics of the gaseous nebula appear to be mainly from an accretion disk in relatively large radius from the WD. Considering the line of an observer's sight, both GS and WD are located at the sky plane side by side during the 1998 observation, while the WD is in front of GS during 2002 but the WD in rear during 2001. Such a relative position and the spectral line intensity variation imply that a fairly constant outflow occurs into WD from GS which caused to maintain the rotating thick accretion disk structure responsible for the observed spectral lines.

**Keywords:** symbiotic star, AG Peg, interstellar matter, line profile, spectroscopic observation

**요약:** 공생별 AG Peg는 적색거성(GS)과 백색왜성(WD)으로 구성된 쌍성계이다. AG Peg의 분광 자료는 1998년, 2001년, 그리고 2002년의 세 시기에 미국 Lick 천문대에서 관측한 자료로 H I 발머 방출선 자료를 분석하였다. AG Peg의 선세기와 폭은 각 시기에 따라 변하는데, H $\alpha$ 와 H $\beta$  선에서 모두 청색편이, 적색편이, 넓은 폭 성분이 나타났다. 가스 성운의 운동학적 특성을 보여주는 방출선은 WD주변에 형성된 강착원반의 반경이 매우 큼을 보여 준다. 관측자의 시선 방향을 고려하면, 1998년 관측은 AG Peg의 GS와 WD가 나란히 하늘에 있는 반면, 2002년에는 WD가 GS의 전면에, 2001년에는 WD가 GS의 뒷면에 위치하였다. 이러한 상대적인 위치와 분광선의 변화를 고려하여, 우리는 GS에서 WD로의 가스유입이 지속적으로 이루어지고, 그 결과 형성된 두꺼운 원반의 회전이 관측된 분광선 윤곽의 형성을 가져온 것으로 결론지었다.

**주요어:** 공생별, AG Peg, 성간물질, 선윤곽, 분광 관측

## 서론

AG Peg (HD 207757)는 뜨거운 백색왜성(White Dwarf, WD, 0.6-0.7 M $\odot$ )과 차가운 적색거성(Giant

star, GS)으로 구성된 S형 공생별(Symbiotic Star)이다. 적색거성은 분광형이 M3.0 III인 별(2.5 M $\odot$ )로 알려져 있다. 이 천체는 Fleming (1907)에 의해 강한 H I 방출선이 처음으로 관측되어 Be star로 보고 된 후, Merrill (1916, 1929, 1932, 1942)에 의해 중성 금속의 방출선과 He과 Ca II 같은 많은 흡수선이 발견되고, TiO 흡수 밴드와 더 높은 이온화된 방출선이 검출되었다. 이후 1980년의 추가 연구에 의해 전형적인 원시 공생별로 주기는 약 800일이 밝혀졌다(Allen, 1980; Kenyon, 1986; Viotti, 1988; Nussbaumer, 1992). Kenny et al. (1991)는 1.5 GHz, 5 GHz 전파관측연구에서, 안쪽에서 직경이 2"인 가스성운과 이를 감싸는

\*Corresponding author: hyung@chungbuk.ac.kr

Tel: +82-43-261-2726

Fax: +82-43-271-0526

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**Table 1.** Basic data for AG Peg

RA (2000)	Dec (2000)	d (kpc)	P (day)	$V_0$ (km s <sup>-1</sup> )	e	a · sini (R <sub>☉</sub> )	f(M <sub>☉</sub> )
21 51 01.9	+12 37 29.4	0.7	816.5	-15.9	0.11	87	0.0135M

d: distance from Iben and Tutukov (1996), P: period from Fernie (1985) and other data from Fekel et al. (2000).  $V_0$ : systematic velocity, e: eccentricity. a: semi-major axis.  $i$ : inclination angle. f(M): mass function.  $f(M)=(m \sin i)^3/(m+M)^2$ .

직경이 약 20"인 보다 큰 성운과 양극방향으로 분출되는 1' 크기의 양극체가 존재함을 보고하였다. 1978년에서 1995년 사이의 IUE자료인 Altamore and Cassatella (1997)의 연구에 의하면, 광도가 1850 L<sub>☉</sub>에서 430 L<sub>☉</sub>으로 감소했음에도 불구하고, 중심별의 온도는 86500±1300 K로 일정하였다. Table 1에 공생별 AG Peg의 천구 상 위치와 두 별의 궤도 이심률 등이 제시 되었다.

Ikeda and Tamura (2004) 등의 H $\alpha$ 선 분석에 의하면 AG Peg는 위상  $\phi=0.45$ 일 때 이중 가우시안 선윤곽(double Gaussian, dG, line profile)을 보이는데, 이렇게 두 개로 분리되는 방출선의 모양은 GS가 방출선 형성 영역을 앞에서 차폐할 때 나타나는 현상으로 해석하고 있다. 2015년도에 대폭발(major outburst)이 AG Peg에서 일어났는데, 이것은 1850년 관측된 첫 번째 대폭발에 비해 짧은 기간이었지만 두 번째의 폭발로 기록되고 있다. 이 자료를 연구한 논문에서도 이러한 dG 선윤곽이 관찰된다. 이전에 우리가 관측한 자료로 위상이 전혀 다른 H $\alpha$  선윤곽도 유사한 현상이 나타남을 알 수 있다. 가시광 영역에서 관측되는 분광자료는 <0.1" 영역에 대한 자료로, 지상망원경으로 관측한 영상으로는 직접 확인할 수 없는 영역이다.

Penston and Allen (1985)이 처음으로 충돌하는 항성풍(colliding wind) 모델을 제시한 후, 항성풍이 선의 형성에 영향을 주었을 것으로 많은 후속 연구에서 추정하였다(Girard and Willson, 1987; Kenyon et al., 1993; Tomov, 1998; Vogel and Nussbaumer, 1994; Altamore and Cassatella, 1997). 이러한 추정은 Murset et al. (1995)의 ROSAT X-선 관측을 통해 항성풍에 의한 충격파 영역을 확인함으로써 입증되었다. H $\beta$ 선보다 선폭이 넓은 H $\alpha$ 선이 이러한 충격파의 영향으로 보인다.

우리의 가시광 영역에서 관측되는 분광자료는 <0.1" 영역에 대한 자료로, 지상망원경으로 관측한 영상으로는 직접 확인할 수 없는 영역이다. 우리는 미국 Lick 천문대의 Hamilton Echelle Spectrograph

(HES)로 관측한 공생별 AG Peg의 위상  $\Phi=0.24, 0.56, 0.98$ 인 세 시기에 대한 HI 방출선의 고분산 스펙트럼의 선윤곽을 분석하였다. 선윤곽 자료를 위상별로 분석하고, 간단한 기하학적 모델을 이용하여, WD와 GS의 위치가 관측자에 대해 어떠한 위치에 놓여있는지를 파악한 후, 이를 근거로 AG Peg의 운동학적 특성 및 기하학적 구조를 파악하고자 한다.

## 분광자료 처리 및 분석

연구에 사용된 분광자료는 Aller와 Hyung이 1998년 9월 17일, 2001년 8월 30일, 2002년 8월 11일 미국 San Jose 근처에 있는 Hamilton산의 Lick 천문대에서 3 m 망원경에 부착된 고분산 분광기 Hamilton Echelle Spectrograph (HES)를 사용해 얻은 것이다. 관측에서 사용된 HES의 슬릿 크기는 5"×1.2"로, 파장방향으로 1.2" (640 micron,  $\mu\text{m}$ )의 슬릿 폭을 선택하여 파장 분해능은 5000Å의 파장에서 약 0.2Å/pixel이다. 5" 슬릿길이는 이웃하는 에셀 차수(echelle orders) 사이에 겹치지 않도록 관측당시 선택한 값이다. CCD 검출기는 2048×2048 화소(pixel)인데, 이 CCD 면에 약 100개의 에셀 차수 스펙트럼선상에 3470-9775Å 파장 영역의 방출 또는 흡수 스펙트럼선이 관측된다.

세 차례의 관측에서는 약한 선을 얻기 위해 장시간 노출(1800 sec 또는 3600 sec)을 하였고, 강한 선의 포화(saturation)를 방지하기 위해 단시간 노출(300 sec, 600 sec, 또는 180 sec)을 하였다. 관측시 플럭스 교정(flux calibration)을 위해, IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) 표준성(standard star)중의 하나인 HR 7596을 관측하였다. Table 2는 AG Peg의 관측일지로, 관측일(율리우스일), 위상, 노출시간, 관측 파장 영역, 시상(seeing) 등이 각각 제시되었다.

관측된 자료는 NOAO (National Optical Astronomy Observatory)의 IRAF를 사용해 분석되었다. 자료 분석의 순서는 1) 암잡음 제거(dark count and read-out

**Table 2.** Symbiotic star AG Peg observation log

Observation date (Julian date)	phase ( $\phi$ )	exposure( s)	region ( $\text{\AA}$ )	seeing (")
1998/09/17 (2451073.70)	0.24	300, 1800	3480-10300	1.5
2001/08/30 (2452151.60)	0.56	180, 1800	3480-10650	1.0
2002/08/11 (2452498.92)	0.98	300, 3600	3400-9925	0.8

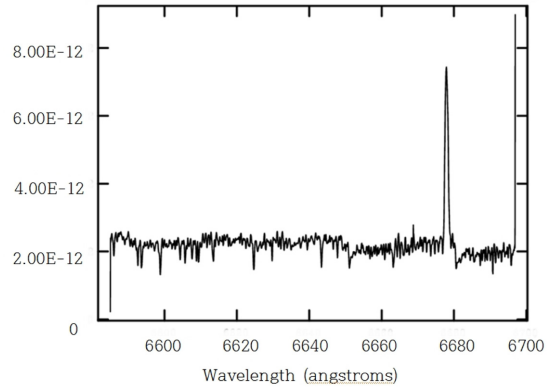
**Table 3.** Systematic velocity data for AG Peg

year	$V_{\text{sys}}$ (km s <sup>-1</sup> )	Ref.	note
1953	-17.10	(1)	
1975	-16.30	(2)	M-Star absorption velocities
1990	-15.60	(3)	
1993	-15.90	(4)	M Giant absorption line velocity
1993	-16.00	(4)	M Giant absorption line velocity
1993	-17.20	(4)	Iron line (FeII) data
1998	-18.88	(5)	absorption and emission line average
2004	-25.00	(6)	H $\alpha$ Gaussian fitting absorption
2008	-20.00	(7)	by Herrick (1935) method
2008	-14.33	(8)	M-Star absorption line (~5900 $\text{\AA}$ )
mean	-17.09 $\pm$ 3.32		

Ref.: (1) Wilson (1953). (2) Hutchings et al. (1975). (3) Komarek (1990). (4) Kenyon et al. (1993). (5) Tomov et al. (1998). (6) Ikeda and Tamura (2004). (7) Kim and Hyung (2008). (8) Yoo (2008).

noise elimination), 2) CCD 화소반응 보정(flattening), 3) 에셀 차수 추출하기(tracing echelle orders), 4) 실험실 Th-Ar을 이용한 파장동정(wavelength identification with Th-Ar), 5) 대기 소광보정(atmospheric extinction correction), 6) 표준성 58 Aql를 사용한 플럭스 구하기(flux calibration with the standard star 58 Aql) 등의 표준작업을 진행하여 분석하였다.

서로 각기 다른 시기에 관측한 1998년, 2001년, 그리고 2002년의 선윤곽과 시선속도를 비교하기 위해서, 관측시 지구의 자전과 공전 속도도 보정하였다. 예를 들어, 1998년 9월 17일(위상  $\phi=0.24$ 일 때)에는  $V_{\text{helio}} = -9.16 \text{ km s}^{-1}$  (300 sec) 값을 이용해 분광선을 수정하였다. 지구의 공전, 자전을 보정한 즉 태양에 대한 AG Peg의 시선속도는 여러 연구자가 서로 다른 값을 제시하고 있는데, Table 3에 여러 선행연구에서 구한 시선 속도 값이 제시되었다. 선행연구에서 제시된 시선속도 범위는  $-14.33 \text{ km s}^{-1}$  (Yoo, 2008)에서  $-25.00 \text{ km s}^{-1}$  (Ikeda and Tamura, 2004)인데 이를 평균한 값,  $-17.09 \pm 3.32 \text{ km s}^{-1}$ 를 사용하여 보정한 후, 공생별 AG Peg의 질량 중심계(center of mass, CM:  $0 \text{ km s}^{-1}$ )에서 본 분광선들의 선윤곽을 얻었다.



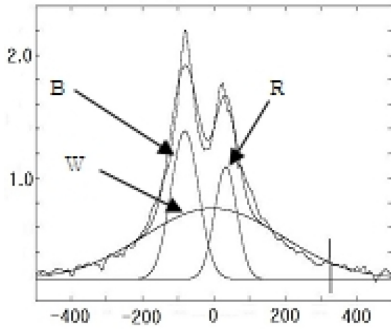
**Fig. 1.** Lick HES spectral scan, showing HeI 6678 $\text{\AA}$  emission line. Observation date=1998, exposure=1800 sec. Flux units: erg s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>  $\text{\AA}^{-1}$ .

Fig. 1은 1998년에 관측한 자료를 분석한 그림으로 장시간 노출(exp=1800 sec) 스펙트럼이다. Fig. 1에서 보이는 방출선은 봉우리가 1개인 가우시안 윤곽(single Gaussian profile) 형태를 가진 HeI 6678 $\text{\AA}$ 이다. 이러한 single Gaussian profile은 등방적으로(isotropically) 팽창하는 완전 구체 또는 원반에서 형성되며, 가스를 방출하는 중심영역이 정지되어 있어야 가능하다. 하지만, 강한 세기의 방출선의 경우, 분광선이 포화(saturation)되므로 180초 또는 300초의 노출시간을 이용해야 한다. 이러한 분석에는 IRAF이 외에, 추가로 다른 분석툴을 이용하여야 한다.

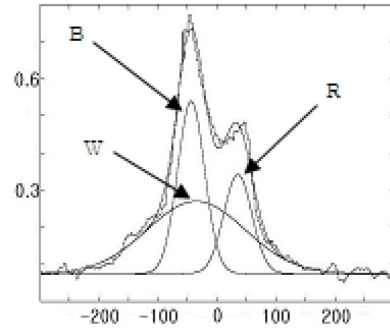
### 분광 관측 자료 분석

#### 선윤곽(line profile) 분석

선윤곽의 모양은 방출지역의 운동학적 특성을 반영하고 있는데, HI 선은 Fig. 1의 HeI 선과 다른 선윤곽을 보인다. HeI과 달리 2개의 봉우리를 보이는 HI 방출선을 연구하기 위해 우리는 역합성곱(deconvolution) 과정을 통해 HI 구성 성분에 대한 자료를 구하였다. 이를 위해, IRAF로 분석된 자료는 IDL (Interactive Data Language) 및 유럽 ESO (European Southern



**Fig. 2.**  $H\alpha$  spectral line profile for 2001 ( $\phi=0.56$ ) observation. Blue (B), red (R), wide (W), and synthetic line profiles (analyzed by Dipso analysis tool) are also overlapped. Exposure is 180 sec. Radial velocity unit in horizontal axis:  $\text{km s}^{-1}$ . Flux unit:  $10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$ .



**Fig. 3.**  $H\beta$  for 2001 ( $\phi=0.56$ ) observation. See Fig. 2 captions for other parameters.

Observatory)에서 만든 StarLink Dipso를 사용하였다.

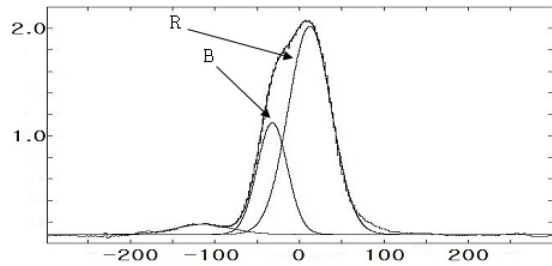
일반적으로 수소(HI)선은 이온화된 전 영역으로 매우 광범위한 지역에서 방출되는 반면, 헬륨 이온(HeII)선은 뜨거운 별 가까운 지역에서만 형성된다. 따라서 이러한 선이 시기별로 어떠한 변화를 보이는지를 조사하면, 공생별의 가스 영역이 어떻게 변화되었는지를 알 수 있을 것이다. 우리가 연구한 HI선은 방출선이 형성되는 전 지역을 대표하므로, AG Peg의 전리수소(HII) 영역의 운동학적 특징과 가스 분포에 대한 단서를 얻을 수 있다.

AG Peg는 주기 816.5일로 1998, 2001, 2002년 관측시점의 위상은, 광도가 극대일 때를 기준으로 천체력(Ephemeris, E)을 이용해 위상( $\phi$ )을 다음과 같이 정의할 수 있다(Iben and Tutukov, 1996).

$$\text{Max (V)} = \text{JD } 2,442,710.1 + 816.5 \cdot E$$

다른 공생별의 연구에서 천체력은 광도가 최소일 때를 기준(Lee et al., 2012)으로, 즉 WD가 가려지는 시점으로 정의하기도 하는데, AG Peg의 경우는 이와는 달리, WD가 GS의 앞에 있어 밝을 때가  $\phi=0$ 이며,  $\phi=0.5$ 는 GS가 WD를 가리는 시기에 WD 주위에서 형성되는 방출선이 어두운 때이다(Lee et al. 2012). 우리가 관측한 1998년, 2001년, 2002년 시점의 위상은 각각,  $\phi=0.24, 0.56, 0.98$ 이다.

Fig. 2에 2001년에 관측한  $H\alpha$ 선의 선운곽 자료가 제시되었는데, Starlink/Dipso tool로 분석한 청색편이, 적색편이, 폭이 넓은 wing성분이 나타난다. HES로 관측한 세시기 AG Peg의 분광자료 모두에서 세 중



**Fig. 4.** H spectral line profile. Observation date=2002 ( $\phi=0.98$ ) and exposure=300 s. Note that the H ( $n=5-2$ ) line and other higher n Balmer lines do not show broad W-component. Flux unit:  $10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$ . The left weakly register line is HeII 4338.67. See Fig. 2 captions for other parameters. See the text.

류의 운동 성분, 즉, (a) 청색편이 성분(B-성분)과 (b) 적색편이 성분(R-성분), (c) 폭이 매우 넓은 성분(W-성분)이 분명하게 존재함을 알 수 있다.

Fig. 3은  $H\beta$ 의 선운곽이다.  $H\beta$ 도  $H\alpha$ 와 같이 3개의 성분이 나타나는데, W-성분의 폭이  $H\alpha$ 에 비해 작아 보인다. Fig. 4는 H(4340.47)선으로 B-성분과 R-성분은 존재하는데,  $H\alpha$ 와  $H\beta$ 와 달리 W-성분이 존재하지 않는다. 다른 발머선들, 즉 H(4101.74), H(3970.07) 등은 모두 W-성분을 가지고 있지 않다.

Table 4는  $H\alpha$ 선과  $H\beta$ 선의 각 성분의 FWHM로부터  $2V_{\text{exp}} = (V_{\text{FWHM}}^2 - V_{\text{th}}^2 - V_{\text{inst}}^2 - V_{\text{fs}}^2 - V_{\text{turb}}^2)^{1/2}$ 을 적용하여 구한 FWHM의 선폭을 고려한 각각의 팽창속도( $V_{\text{exp}}$ )이다. 제3행과 제4행은 B-성분과 R-성분의 팽창속도이고, 제5행은 Lee et al.(2012)의 선행연구에서와 같이 B-성분과 R-성분으로 구분하지 않고 전체 선운곽(B+R)의 FWHM에서 구한 팽창속도이며, 마지막 제6행은 선폭이 넓은(broad) wide (W)-성분으로부터

**Table 4.** Expansion velocities derived from the H $\alpha$  and H $\beta$  three components

Obs.	line	blue (B)	red (R)	total (B+R)	broad (W)
1998	H $\alpha$	112.0( $\pm$ 3.3)	62.1( $\pm$ 0.4)	171.2( $\pm$ 3.3)	414.6( $\pm$ 2.3)
	H $\beta$	35.8( $\pm$ 0.4)	57.3( $\pm$ 0.2)	109.1( $\pm$ 0.4)	224.6( $\pm$ 1.3)
2001	H $\alpha$	88.5( $\pm$ 0.6)	69.9( $\pm$ 0.8)	195.8( $\pm$ 1.0)	456.5( $\pm$ 3.2)
	H $\beta$	48.8( $\pm$ 0.4)	50.8( $\pm$ 0.6)	132.0( $\pm$ 0.7)	194.6( $\pm$ 2.4)
2002	H $\alpha$	80.8( $\pm$ 1.9)	66.4( $\pm$ 0.8)	155.5( $\pm$ 2.1)	276.0( $\pm$ 4.5)
	H $\beta$	38.3( $\pm$ 0.5)	49.9( $\pm$ 0.4)	98.3( $\pm$ 0.6)	197.9( $\pm$ 5.3)

112.0 ( $\pm$ 3.3) means 112.0 $\pm$ 3.3 km s<sup>-1</sup>. total (B+R) means the expansion velocity derived from the total FWHM, that is, from both blue (B) and red (R) components combined. See the text.

터 구한 팽창속도이다.

2001년과 2002년의 분광 자료는 위상의 차이가 약 0.5이므로, 2001년에는 GS가 전면에 2002년에는 GS가 후면에 위치한다. GS가 전면에 위치한 2001년에는 B성분이 강한 반면, GS가 후면에 위치한 2002년에는 R-성분이 강하게 나타남을 알 수 있다. Table 4를 보면 H $\alpha$ 선과 H $\beta$ 선에서만 나타나는 폭이 넓은 W-성분은 GS가 전면에 위치한 2001년에 2002년보다 더 강하게 나타나고 있다.

Ikeda and Tamura (2004)의 자료에서도 우리의 2001( $\phi=0.56$ ) 관측 자료와 유사한 위상( $\phi=0.45$ ) 시기인 1993년 11월 4-9일에 관측한 H $\alpha$ 에 이러한 현상이 나타나는데, 우리는 H $\alpha$ , H $\beta$  뿐만 아니라, HeI에서도 같은 현상을 확인하였다. 특이하게도 이 시기에는 singlet과 doublet이 역전되는 Gaussian현상을 보이는데, 이를 Ikeda and Tamura (2004)는 WD의 전면에서 GS가 전리수소(HII)영역을 차폐하기 때문에 생기는 것으로 해석하고 있다. 하지만, 우리는 Fig. 2와 Fig. 3에 보듯이, 이러한 dG 선윤곽은 위상이 전혀 달라 GS가 HII 영역을 가리지 못하는 1998( $\phi=0.24$ )과 2002( $\phi=0.98$ )의 관측 자료에서도 나타남을 확인할 수 있다.

H $\alpha$ 와 H $\beta$ 를 비롯한 모든 발머선의 B-성분과 R-성분이 모두 같은 운동학적 특성을 가지는지를 알아보기 위해서, 선폭을 비교해 볼 필요가 있다. 각 선윤곽의 성분으로 부터 FWHM 선폭을 측정된 후, 이 성분을 형성한 구각(shell)의 팽창속도를 구할 수 있다. 이렇게 구한 팽창속도의 변화를 위상별로 비교하면, 방출선이 형성한 구각의 운동학적 특성을 알 수 있을 것이다.

방출선의 선폭은 주로 구각의 팽창 운동( $V_{exp}$ )에 의해 결정되지만, 이러한 운동학적 요인이외에, 다른 부수적인 요소들, (1) 열적운동의 선폭 증가( $V_{th}$ ), (2)

**Table 5.** Expansion velocities of the H $\gamma$  and H $\delta$

	line	blue	red	total
1998	H $\gamma$	39.1( $\pm$ 0.3)	59.8( $\pm$ 0.3)	101.5( $\pm$ 0.4)
	H $\delta$	36.7( $\pm$ 0.4)	70.3( $\pm$ 0.3)	99.7( $\pm$ 0.5)
2001	H $\gamma$	64.6( $\pm$ 2.8)	45.6( $\pm$ 4.1)	129.2( $\pm$ 5.0)
	H $\delta$	59.7( $\pm$ 2.4)	37.8( $\pm$ 4.5)	118.0( $\pm$ 5.1)
2002	H $\gamma$	35.2( $\pm$ 0.8)	55.6( $\pm$ 0.7)	92.7( $\pm$ 1.1)
	H $\delta$	35.3( $\pm$ 0.9)	50.9( $\pm$ 0.9)	84.1( $\pm$ 1.3)

Measurements are from corrected FWHMs (km s<sup>-1</sup>).

망원경 시스템에 의한 기기 선폭증가( $V_{inst}$ ), (3) 미세 구조(fine structure) 선폭증가( $V_{fs}$ ), (4) 난류(turbulence)의 선폭증가( $V_{turb}$ )도 기여한다(Lee and Hyung, 2007; Lee et al., 2009).

다른 발머선들의 FWHM을 측정하면, 유사한 방법으로 구각의 팽창속도를 구할 수 있다. Table 5에 H와 H선의 팽창속도가 제시되었다. H과 같은 또 다른 발머선들도 보이지만 신호 대 잡음비(S/N ratio)가 좋지 않아 이 연구에는 사용하지 않았다. Table 5의 제 3행, 제4행, 그리고 제5행은 앞에서 언급한 B-성분, R-성분과 (B+R)-성분의 팽창속도이다. H $\alpha$ 와 H $\beta$ 와는 달리 H와 H선은 W-성분이 존재하지 않는다.

### 세 관측의 위상별 선폭 비교

Table 6은 Table 4와 Table 5에 근거해 위상별로 선을 형성하는 지역의 팽창속도가 어떻게 달라지는지를 알아보기 위해 정리한 자료이다.

1998년 자료를 보면, H $\alpha$ 의 FWHM의 팽창속도 값은 H $\beta$ 에 비해 큰 값을 가지는데, B-성분은 3.13배이고 R-성분은 거의 같다. 두 선을 구분하지 않은 (B+R)-성분은 약 1.57배로 전반적으로 빠른 속도로 팽창하는 것을 보여주고 있다. 같은 H선임에도 불구하고, H $\alpha$ , H $\beta$ 의 선폭이 다르게 차이를 보이는 이유

**Table 6.** Expansion velocity ratios

	line	blue	red	total	broad
1998	H $\alpha$	3.13	1.08	1.57	<b>3.80</b>
	H $\beta$	1	1	<b>1</b>	<b>2.06</b>
	H $\gamma$	1.09	1.04	0.93	
	H $\delta$	1.03	1.23	0.91	
2001	H $\alpha$	2.47	1.22	1.79	<b>4.18</b>
	H $\beta$	1.36	0.89	1.21	<b>1.78</b>
	H $\gamma$	1.80	0.80	1.18	
	H $\delta$	1.67	0.66	1.08	
2002	H $\alpha$	2.26	1.16	1.43	<b>2.53</b>
	H $\beta$	1.10	0.87	0.90	<b>1.81</b>
	H $\gamma$	0.98	0.97	0.85	
	H $\delta$	0.99	0.89	0.77	

FWHM expansion velocity ratios are found based on the 1998's  $V(H\beta)=1$  value: all the blue, red, and total velocities in Tables 4 and Table 5 are divided by the same component 1998 H $\beta$  values, respectively, while broad W-component values are found relative to the 1998 total (B+R) value.

는 H $\alpha$ , H $\beta$ 선이 단순한 재결합 형성기작(recombination mechanism)에 의해 형성된 것이 아닌 다른 형성기작(mechanism)에 의해 발생하였음을 암시한다. 재결합 선은 온도가 높은 WD의 UV광자를 가스가 흡수하여 이온화 된 HII 영역에서 일어난다. 이러한 환경이 아닌 다른 환경이라면, 가스끼리 서로 충돌하여 충격파에 의하여 가열(shock heating)되는 과정이 일어났음을 암시하고 있다. 정량적인 모델 계산 연구는 이 논문의 연구 범위를 벗어나서 자세한 분석은 뒤로 미룬다.

Fig. 2에서 보듯이 B-성분이나 R-성분과 전혀 다른 W-성분이 존재하는데, 1998년 자료를 보면, W-성분의 팽창속도와 (B+R)-성분의 팽창속도 비는 H $\beta$  팽창속도 보다 2.06배, H $\alpha$  팽창속도 보다 2.42(=3.80/1.57)배이다. W-성분의 경우, 형성 기작이 재결합이나 충격파와 같은 현상으로 설명하기에는 너무나 넓은 선포이어서 단순한 구각의 팽창으로 설명하기는 불가능하다. 이를 설명하기 위해서 라만 산란과 같은 선의 형성에 관한 전혀 다른 이론이 필요하다. 산란기작에 의해 형성될 것으로 보이는 W-성분의 경우도 선세기가 강한 H $\alpha$  W-성분의 팽창속도가 H $\beta$  W-성분보다 강하게 나타난다. 이는 곧 선세기와 선이 형성되는 지역의 운동학적 특성이 양의 상관관계에 있음을 보여준다. 즉 강한 세기의 H $\alpha$ 선에서 보다 큰 팽창속도의 운동학적 특성이 존재함을 알 수 있다.

Penston and Allen (1985)은 충돌하는 항성풍(colliding wind) 모델을 제시하였는데, 백색왜성에서 나온 항성풍의 역할로 인해, 폭이 넓은 선에 제한적인 영향을 미쳐, 폭이 더 넓은 방출선이 형성되었을 것으로 추측하고 있다.

이러한 운동학적 특성의 경향은 Table 6의 값들에서 보면, 위상  $\phi=0.56$ 인 2001년과  $\phi=0.98$ 인 2002년에 관측된 다른 위상에서도 보인다. 하지만 위상에 따라 약간의 차이가 존재하는데, 이것은 AG Peg를 구성하는 GS와 WD의 궤도 운동에도 영향을 받고 있음을 암시한다. 이것을 알아보기 위해서 GS와 WD 또는 선이 형성된 HII영역의 지역이 관측자의 시선 방향에 대하여 어떤 위치에 있는지를 살펴볼 필요성이 있다.

위상이 다른 세 자료를 비교하면, B-성분의 경우는  $FWHM(H\alpha)/FWHM(H\beta)$ 의 비가 3.1(=3.13/1)에서 1.8(=2.47/1.36) 사이의 값을 갖는데, R-성분의 경우는 1.4(=1.22/0.89)에서 1.1(=1.08/1) 사이의 값을 가져, 청색편이에서 더 큰 변화를 보인다. 이러한 결과는 B-성분의 FWHM으로 구한 구각 영역, 즉 관측자를 향해 접근하는 (관측자 쪽에 위치하는) HII 영역의 운동학적 특성이 더욱 활발함을 알 수 있는데, 다른 해석으로는 관측자로부터 먼 쪽의 HII영역이 GS에 의해 일부 차단되었다고 해석할 수도 있다.

W-성분의 경우는 성분비가 2.3(=4.18/1.78)에서 1.3(=2.53/1.81)배의 값으로 R과 B 두 성분 변화의 중간 값을 가지고 있다. Raman(라만) 산란이 일어나면 자외선 영역의 Lyman 광자가 산란으로 Balmer선으로 나오고 이때 선포이 6.4배까지 넓어지는 것으로 알려지고 있다(Lee and Hyung, 2007).

W-성분과 같이 넓은 형태의 선포이 형성되기 위해서는 가스 밀도가  $N_H \sim 10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  정도의 이온화되지 않은 HI 중성 가스가 HII 영역 근처에서 존재해야, HII 영역에서 형성된 Ly- $\beta$ 선이 라만 산란에 의해 H $\alpha$  파장대에 W-성분 같은 산란선을 형성할 수 있다(Lee and Hyung, 2007). 하지만, 라만(Raman) 산란에 의해 형성된 W-성분은 H $\alpha$ 와 H $\beta$ 에만 나타나고, H $\gamma$ , H $\delta$  등에서는 나타나지 않는다. 이러한 이유는 H $\alpha$ 와 H $\beta$ 의 W-성분을 형성하게 하는 L $\beta$ , L $\gamma$ 의 선세기가 강한 반면 L $\delta$ , L $\epsilon$  등의 선세기가 무시될 정도로 약하기 때문이다(Lee and Hyung, 2007의 Table 1참조). W-성분이 어떠한 물리적 조건에서 라만 산란의 결과에 의하여 형성되었는지를 정량적으로

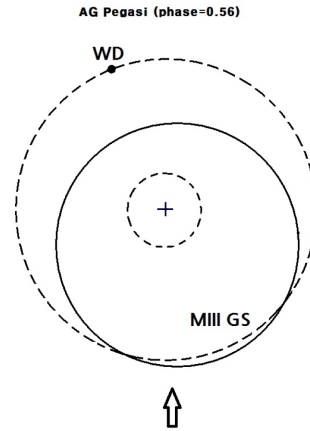
확인하려면 몬테카를로 기법에 의한 수치 모델 작업이 필요한데, 이는 아쉽게도 현재의 연구에서 다룰 수 없는 영역이다.

**방출선의 모양이 암시하는 HII 영역의 기하학적 구조**

H $\alpha$  같은 수소 방출선을 분석하면, WD 주변 가스의 운동학적 특성을 알 수 있다. WD 주위의 가스는 적색거성에서 팽창된 가스가 분리되어 WD를 향해 이동한 GS의 가스이다. 하지만 H $\alpha$  방출선은 선윤곽의 성분이 어떠한 원인에서 생성되었는지를 정의하기 전에는 방출선 형성기작에 대해 알기는 쉽지 않다. 앞 절에서 살펴본 B-성분, R-성분, (B+R)-성분이 위상에 따라 달라지는 것은 HII 영역의 기하학적 구조와 WD와 GS의 궤도운동의 영향에서 비롯되었을 것으로 추측된다. 이 절에서는 AG Peg의 HII 영역의 모습을 추정하기 위해, AG Peg를 구성하는 두 별에 대한 분광학적 특성에 근거해 AG Peg의 기하학적 모델을 구성하려 한다.

GS인 별은 분광형 M0III-M3III으로, 장반경(a)은 50-90R $_{\odot}$ 로 알려져 있다(Dumm and Schild, 1998). AG Peg를 구성하는 GS와 WD 두 별의 질량이 각각 2.5M $_{\odot}$ , 0.6M $_{\odot}$ 라면, GS와 WD로부터 제1 라그랑지안 점(Lagrangian point) L1까지의 거리는 0.64a: 0.36a이다. 두 별사이의 거리 또는 장반경이 Table 1에 제시된 것처럼 a=87R $_{\odot}$ 이다. 만일 a=87R $_{\odot}$ 이라면, GS와 WD로부터 L1까지의 거리는 56R $_{\odot}$ 와 31R $_{\odot}$ 이고, 만일 a=100R $_{\odot}$ 이라면, 각각의 거리는 64R $_{\odot}$ 와 36R $_{\odot}$ 이다. 즉, 반경이 약 70R $_{\odot}$ 인 MIII 적색 거성이 로시로브의 반경 또는 적색거성 중심에서 L1까지의 거리에 매우 근접해 있음을 알 수 있다. 이러한 반경을 가정하여 2001년( $\phi=0.56$ )의 관측자와 두 별의 위치에 대한 기하학적 모형이 Fig. 5에 제시되었다. 이 모형도에서는 두 별 WD와 GS의 공전 면, 즉 그림의 위쪽에서 보면, 반시계 방향으로 회전하는 것으로 표시하였다. 관측자의 위치는 그림의 아래쪽에 화살표로 표시되어 있고, GS는 관측자에 가까운 쪽에, WD는 GS의 뒤쪽에 있다.

쌍성계에서 GS가 팽창하기 시작한 후 항성풍으로 방출하게된 가스는 로시로브의 반경에 도달하게 된다. 로시로브 경계에 도달한 가스의 대다수는 GS를 탈출하여 성간으로(radially outward) 가지 못하고, L1를 통해서 WD쪽으로 유입되어 WD의 주위에 강착원반을 형성하게 된다. 이 쌍성계는 더욱 진화함에



**Fig. 5.** AG Peg model diagram showing two components and their relative positions to the observer when  $\phi=0.56$ . Plus-sign (+): CM (center of mass). See Table 2 for others. The semi-major radius is assumed to be 100R $_{\odot}$ , while the GS radius is 64R $_{\odot}$  (limited by the Lagrangian point, L1), smaller than 70R $_{\odot}$  of the M3III star radius. Distance from the CM to the two stars, r (GS) and r (WD) are 64R $_{\odot}$  and 36R $_{\odot}$ , respectively. The line of sight is at the bottom.

**Table 7.** Relative position and motion of WD in AG Peg

obs-date(phase)	1998(0.24)	2001(0.56)	2002(0.98)
WD position	right	rear (block?)	front
WD motion	receding	tangential	tangential
(GS position)	(left)	(front)	(rear)

The relative position of WD determines whether the emitting zone around the WD is blocked by GS. See the text.

따라 Roche lobe 형태와 WD를 감싸는 강착원반의 복합된 기하학적 구조가 형성될 것으로 추정된다. 방출선은 이러한 두 구조가 결합된 Roche lobe와 WD를 감싸는 강착원반에서 형성되었을 것이다.

Fig. 5를 근거로 관측자의 시선 방향에 대한 WD와 GS의 상대적 위치를 추정하여 보면,  $\phi=0.56$ 인 2001년에는 GS가 WD를 가리지만,  $\phi=0.98$ 인 2002년에는 WD가 GS에 의해 전혀 가려지지 않음을 알 수 있다. WD는 관측자에 대해 1998년에는 멀어지고 2001년과 2002년에는 접선방향으로 공전할 것이다. Table 7은 관측자에 대하여 두 별의 상대적 위치와 WD의 상대적 운동방향을 보여 주고 있다.

1998년과 2002년에는 WD가 GS에 의해 전혀 가려지지 않았다. 하지만, 2001년 관측에서는 WD는 GS에 의해 가려져서 보이지 않는 위치에 있음을 알 수 있다. 실제 HI 재결합선이 형성되는 HII 지역이

WD를 감싸는 강착원반이라고 하면, 그 규모(반경)는 매우 커서 2001년 WD가 차폐되는 때를 포함해서 어떠한 위상에 있든지 GS에 의해 HII지역이 가려지지 않음을 알 수 있다. 2001년에는 두 개의 가우시안 봉우리(dG)의 선운곽이 나타나기 때문에 앞에서 언급한 Ikeda and Tamura (2004)가 해석한 GS가 HII 영역을 차폐한다는 설명은 완전한 해석이 아님을 알 수 있다.

위상이 0.24와 0.98인 1998년과 2002년의 관측 자료에도 double Gaussian 선운곽이 나타나는 것으로 보아, B-성분과 R-성분은 WD를 감싸는 강착원반의 회전에서 기원된 것으로 보인다. Kim and Hyung (2008)의 CLOUDY 모델을 이용한 광이온 연구에 의하면, AG Peg의 방출선은 두께가 얇은 고밀도 지역에서 형성되었다. 그들은 선을 형성한 HII영역이 구체인지 강착원반인지에 대한 결론은 내리지 않았고, 단지 WD를 중심으로 빈 구각(hollow shell)의 형태를 가지며 두께는  $r=1.16-3.21 \times 10^{13}$  cm로 추정하였다.

이 연구에서 분석한 B-성분과 R-성분의 선운곽을 설명하기 위해서는, AG Peg의 기하학적 형태는 구체(sphere)와 얇은 원반(thin disk)의 중간 형태인, 회전하는 두꺼운 강착 원반(예, 적도 각  $\phi=0^\circ-45^\circ$ )을 포함하여야 한다는 결론에 도달할 수 있다. 즉 HII영역은 Roche lobe의 영향으로 규모가 매우 크지만 강착 원반처럼 정지 좌표계(또는 관측자인 지구에 대하여)에 대하여 회전하기 때문에, 관측된 double Gaussian 선운곽이 형성되는 것으로 보인다. GS에서 WD로의 가스유입은 전반적으로 내부 라그랑지안 점(Lagrangian point, L1)을 통해 한정된 범위에서 일어나지 않고, Roche lobe를 통해 전반적으로 가스가 이동하는 과정에서 WD 주위에 강착원반이 형성되었기 때문에 나타난 현상으로 해석된다.

Fig. 3과 Fig. 4의 위상차,  $\Delta\phi=0.5$ 가 되는 2001년과 2002년 분광 자료를 보면, WD가 GS의 후면에 위치하는 2001년에는 청색편이의 B성분이 강한 반면, WD가 전면에 위치하는 2002년에는 적색편이의 R-성분이 강하게 나타났다. WD와 GS의 공전궤도면 또는 강착원반의 중심평면은 일반적으로 관측자에 대해 나란하지 않을 것으로 추정된다. 공전 축이나 강착원반의 중심축이 관측자의 시선방향에 대하여 경사를 이루어( $i \neq 0^\circ$ ), WD 중심으로 하여 양극 방향으로 가스 분출이 일어났던 것으로 추정된다. 이 경우, 필사에서 관측되는 것과 같은 등대효과로 인하여 한

성분이 강하게 나타나는 시점은 한 쪽 방향을 기준으로 나타날 수 있다. 2001년( $\phi=0.56$ )의 강한 B-성분이 이러한 조건에서 생성된 것으로 보인다.

GS가 전면에 있는 2001년에 H $\alpha$  선과 H $\beta$  선의 W-성분이 강한 것은 GS의 질량손실과 밀접한 관계가 있는 것으로 보이는 데, 이는 라만 산란선이 형성되기 위해서는 가스 밀도가 높은 중성지역이 존재해야 하고, 이러한 조건을 가진 지역은 GS 주변이기 때문이다.

Tomov et al. (2016)의 연구에는 2002년 8월(0.99), 2004년 10월(0.95), 2013년 7월(0.76)과 제2차 폭발당시 2015년 8월(0.79), 10월(0.90), 12월(0.97)에 관측한 방출선이 제시되었다. 위상이 다르고 폭발현상이 있었지만, 우리의 관측 자료에서 보이는 두 개로 분리되는 봉우리가 존재함을 확인할 수 있다.

위상의 변화와 무관하게 double Gaussian으로 정의되는 B-성분과 R-성분이 세 시기 모두 존재한다는 것은 GS로부터 WD로의 질량 유입이 L<sub>1</sub>점에 한정되지 않고, Roche lobe를 통해서 안정적으로 질량이동이 이루어지고 있는 것으로 보인다. 즉 GS로부터 많은 질량손실이 일어나지 않아 폭발이 관찰되지 않았던 고요한 시기 동안에는 AG Peg의 HII 영역은 안정된 운동학적, 기하학적 구조를 유지하고 있는 것으로 추정된다.

위상의 변화와 무관하게 존재하는 B-성분과 R-성분은 준안정적인 원반구조가 쌍성계가 회전함에 따라 함께 회전하여, 원반에 접근하는 쪽과 후퇴하는 쪽이 각기 B-성분과 R-성분을 형성할 것으로 판단된다. 고요한 상태를 유지하는 평상시의 AG Peg는 GS의 질량이 강착원반의 형성에 기여하지만, 만일 질량 유입이 증가하거나 또 다른 원인으로 인해 원반구조가 불안정하게 되면, 때로는 WD 표면으로 많은 양이 누적되기도 할 것으로 추정할 수 있다. 적색거성으로부터의 질량손실이 증가할 경우 강착원반으로 가스 유입량의 증가가 일어나고, 이로 인해 강착원반 구조가 불안정해지고, WD표면으로 낙하하는 가스양도 증가하여 WD 표면에서 대폭발이 일어났을 것을 추정해 볼 수 있다.

이러한 격렬한 폭발 현상은 과거에 있었을 수도 있다. 만일 과거에 있었던 지금과 다른 진화 단계의 GS에서 많은 양의 질량 손실이 일어났었고, WD쪽으로 가스유입이 증가하여 누적된 질량이 한계점에 도달하여 표면에서 핵융합 반응과 폭발이 발생하였다면, 2015년과 전혀 다른 많은 양의 가스 분출이 있었을



것이다. 전파 파장영역에서 관측된 20" 직경의 가스 성운이 이러한 과정에서 형성되었을 것으로 보이며, 이는 공생별로 진화하기 전에 GS와 WD가 어떠한 진화를 겪어 왔는지에 대한 중요한 단서이다. 이를 판별하기 위해서는 가스 역학 수치모델이 필요한데, 이는 우리의 연구 한계를 벗어나므로 자세한 언급은 미래 연구로 미룬다.

Kim and Hyung (2008)의 광이온 연구에서 WD와 GS주위의 가스를 이온화 시키는 WD 표면온도가 폭발시에 낙하 물질 층들에 의해 110,000 K에서 150,000 K로 변했던 것으로 추정할 수 있다. 이러한 온도 변화는 WD 표면으로 낙하하는 물질의 양과 관계가 있는데, 낙하한 물질의 양이 증가하면 WD 표면 온도가 증가하는 요인이 될 것으로 추정된다. 이러한 WD 표면 온도의 변화 가능성과 달리 HI선이 형성된 원반구조는 폭발이 일어나지 않는 지난 100여년동안 상대적으로 안정된 구조를 유지해 온 것으로 보인다.

AG Peg는 19세기 말 1차 폭발이 관측된 후 지난 130년 동안 조용한 단계를 유지해왔다. 이렇게 안정적인 HII 영역 상태는 2015년에 이르러 폭발이 관찰되었는데, 이때 강착원반 구조의 물리적 조건(밀도, 온도)이 변화되었을 것으로 판단된다. 이 폭발현상이 바로 AG Peg가 새로운 진화 단계로 접어들었다는 것을 보여준다고 선행연구에서 단정하고 있는데, 이를 확인하기 위해서 추가로 많은 관측이 이루어져야 할 것이다.

## 결 론

AG Peg는 상대적으로 먼 거리에 있어, 지상의 대형 망원경이나 공간 분해능이 1" 이하인 위성망원경으로도 모양을 알아 볼 수 없다. 영상을 통해 구조를 직접적으로 파악할 수는 없지만, 고분산 분광 관측을 통해 얻은 선윤곽 자료의 분석을 통해 운동학적 특성을 파악한 후 기하학적 구조와 물리적 특성을 추정해 볼 수 있다. 우리는 Lick 천문대의 3 m 망원경에 부착된 HES 고분산 분광기를 사용하여 세 시기에 관측한 수소 방출선의 선윤곽과 FWHM을 분석하여, 이 선들이 형성된 전리수소 영역에 대한 기하학적 모델을 추정하였다.

방출선의 선윤곽의 모양이 변하고, B-성분이나 R-성분의 상대적 세기가 달라지는 이유는 공생별을 구성하는 두 별의 공전 궤도 운동, 적색거성으로부터의

질량손실을 변화, WD를 중심으로 한 강착원반의 구조에 따라 달라진다. 적색거성으로 부터 질량손실이 일정해도, 시간에 따라 강착원반 및 WD로 질량 유입이 누적되고, 한계점에 이르면, 격변현상이 발생할 수 있다.  $H\alpha$  선과  $H\beta$  선의 W-성분에서 보듯이 가스 밀도가 높은 중성수소 영역이 존재하면, 산란이 일어나 Lyman-광자가 Balmer선 근처로 탈출하여, 선폭이 넓은 성분을 형성하기도 한다.

선이 형성되는 지역은 Roche lobe 영역 안에 WD를 중심으로 한 강착원반이며, AG Peg를 구성하는 WD와 GS가 공전함에 따라 이 원반은 WD와 함께 회전하는 것으로 보인다. 강착원반 자체도 GS에서 유입된 가스로 이루어져 있으므로 가스유입과 함께 회전하고 있는 것으로 보이며, 이러한 회전이 double Gaussian 선윤곽을 만드는 것으로 여겨진다. 강착원반은 매우 안정되어 19세기 말에 대폭발 이후 130년 동안이나 큰 변화가 없었던 것으로 보인다. 이는 GS의 질량손실이 적어도 130년 동안에 매우 안정적이었음을 암시한다. Allen (1980), Kenyon (1986), Viotti (1988), Nussbaumer (1992) 등의 많은 선행 연구에서는 AG Peg는 초기 진화 단계(prototypical) 공생별로 정의되었는데, 제2차 폭발 전까지 매우 조용한 삶을 유지해왔다.

AG Peg의 경우 방출선이 형성되는 지역인 WD의 강착원반이 GS에 가려져도(2001년,  $\phi=0.56$ ), 방출선의 세기가 감소하지 않음을 알 수 있다. 이러한 이유는 두 별이 떨어진 상대적 거리에 비해 방출선이 형성되는 지역인 강착원반이 크기 때문으로 보인다. GS가 전면에 있을 때는 넓은 폭의 W-성분이 강하게 나타나고 있는데, 이것은 라만 산란선으로 추정된다. 이것을 연구하기 위해서는 AG Peg의 HII 영역 주변의 높은 밀도와 연관된 중성 수소 영역의 물리적 조건에 대한 이론적 모델과 HII 영역에서 형성되는 Lyman  $\beta$ , Lyman  $\gamma$  선세기에 대한 이론적 예측 값이 필요하다.

## 감사의 글

이 논문은 한국 연구재단 연구비 지원(NRF 2015 RID1A3A01019370; NRF2014R1A1A4A01006509)에 의하여 연구되었다. HES를 이용한 관측을 같이 수행하였고 지금은 고인이 된 UCLA의 Lawrence H. Aller교수에게도 감사를 표한다.

## References

- Allen, D.A., 1980, On the late-type components of slow novae and symbiotic stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 192, 521-530.
- Altamore, A. and Cassatella, A., 1997, The 1978-1995 variability of the symbiotic star AG Pegasi in the ultraviolet. *Astronomy and Astrophysics*, 317, 712-722.
- Dumm, T. and Schild, H., 1998, Stellar radii of M giants. *New Astronomy*, 3, 137-156.
- Fekel, F.C., Joyce, R.R., Hinkle, K.H., and Skrutskie, M.F., 2000, Infrared spectroscopy of symbiotic stars. I. Orbits for well-known S-type systems. *Astronomical Journal*, 119, 1375-1388.
- Fleming, W.P., 1907, A photographic study of variable stars. *Annals of the astronomical observatory of Harvard College*, 47, 1.
- Girard, T. and Wilson, L.A., 1987, Winds in collision. III-Modeling the interaction nebulae of eruptive symbiotics. *Astronomy and Astrophysics*, 183, 247-256.
- Hutchings, J.B., Cowley, A.P., and Redman, R.O., 1975, Mass transfer in the symbiotic system AG Pegasi. *Astrophysical Journal*, 201, 404-412.
- Iben, I.J. and Tutokov, A.V., 1996, On the evolution of symbiotic stars and other binaries with accreting degenerate dwarfs. *Astrophysical Journal*, 105, 145-180.
- Ikeda, Y. and Tamura, S., 2004, Spectroscopic Diagnostics of Symbiotic Stars. II. Statistical Analyses of Highly Resolved Emission-Line Profiles. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 56, 365-373.
- Kenny, H.T., Taylor, A.R., and Seaquist, E.R., 1991, AG Pegasi: A multishell radio source. *Astrophysical Journal*, 366, 549-559.
- Kenyon, S.J., 1986, The symbiotic stars. PhD dissertation. Harvard University, Boston, Cambridge University Press, 295.
- Kenyon, S.J., Mikolajewska, J., Mikolajewski, M., Polidan, R.S., and Slovak, M. H., 1993, Evolution of the symbiotic binary system AG Pegasi-The slowest classical nova eruption ever recorded. *Astronomical Journal*, 106, 1573-1598.
- Kim, H. and Hyung, S., 2008, Chemical abundances of the symbiotic nova AG Pegasi. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 41, 23-37.
- Komarek, Z., 1990, AG Peg-observations and prospects. *Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso*, 20, 89-98.
- Lee, S.M. and Hyung, S., 2007, Kinematics and Geometrical Structure of the Planetary Nebula NGC 6881. *Journal of Korean Earth Science Society*, 28, 847-856. (in Korean)
- Lee, S.-J., Hyung, S., and Lee, K.H., 2012, An analysis of the symbiotic star Z And line profile. *Journal of Korean Earth Science Society*, 33, 608-617. (in Korean)
- Lee, S.-J., Wi, J.K., and Hyung, S., 2009, Spectroscopic study of the planetary nebula NGC 6210. *Journal of the Korean Earth Science Society*, 30, 611-621. (in Korean)
- Nussbaumer, H., 1992, The Outburst of Symbiotic Novae. *Symposium of the International Astronomical Union*, 151, 429-433.
- Merrill, P.W., 1916, A spectrum of the P Cygni type. *Publications of the Astronomical Observatory of the University of Michigan*, 2, 71-75.
- Merrill, P.W., 1929, The spectrum of BD+11 4673. *Astrophysical Journal*, 69, 330-378.
- Merrill, P.W., 1932, The Spectrum of B. D. 11°4673 during the years 1929-1931. *Astrophysical Journal*, 75, 413-422.
- Merrill, P.W., 1942, The Spectrum of BD+11°4673 during the Years 1937-1941. *Astrophysical Journal*, 95, 386-401.
- Murset, U., Jordan, S., and Walder, R., 1995, The ROSAT spectrum of the symbiotic nova AG Pegasi: evidence for colliding winds. *Astronomy and Astrophysics*, 297, L87-L90.
- Penston, M.V. and Allen, D.A., 1985, On the ultraviolet spectrum of AG Peg. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 212, 939-954.
- Tomov, T.V., Stoyanov, K.A., and Zamanov, R.K., 2016, AG Pegai-now a classical symbiotic star in outburst? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462, 4435-4441.
- Tomov, N.A., Tomova, M.T., and Raikova, D.V., 1998, The visual line spectrum of AG Pegasi in 1995. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 129, 479-488.
- Viotti, R., 1988, The Symbiotic Novae. *The Symbiotic Phenomenon Proceedings of IAU Colloquium*, 103, 269.
- Vogel, M. and Nussbaumer, H., 1994, The hot wind in the symbiotic nova Ag Pegasi. *Astronomy and Astrophysics*, 284, 145-155.
- Wilson, R.E., 1953, General catalogue of stellar radial velocities. *Washington (Carnegie Institution of Washington)*, 601, 343-344.
- Yoo, K.H., 2008, High resolution spectra of the symbiotic star AG Pegasi in 2004-2006. *New Astronomy*, 13, 646-655.

---

Manuscript received: January 6, 2017

Revised manuscript received: February 6, 2017

Manuscript accepted: February 7, 2017