

AG Peg의 분광 관측과 Bowen 형광 기작의 효율 변화

형 식 · 이성재 · 이강환*

충북대학교 지구과학교육과, 28644, 충북 청주시 서원구 충대로 1

Spectroscopic Observation of AG Peg and Efficiency Changes of Bowen Fluorescence Mechanism

Siek Hyung, Seong-Jae Lee, and Kang Hwan Lee*

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

Abstract: We investigated the H I, He II and O III emission lines of the symbiotic star AG Peg, using the spectroscopic data secured at different phases in three periods at the Lick Observatory. We measured FWHM and the intensity of six O III Bowen lines and studied the efficiency of fluorescence mechanism. The mean FWHM of O III normal and Bowen lines observed during three time periods did not make much difference, while Bowen line intensities are about 4.0 times higher than the normal lines. Comparing the predicted and the observed ratios, we found that the observed intensities are higher than predicted intensities, except for O III λ 3759.87. The O III λ 3791.26 and 3754.67 intensity ratios observed only in 2001 are in good agreement with the predictions by Saraph and Seaton (1980). We obtained the Bowen efficiency parameter (R)=0.47 for 2002, but we could not find R for the other two periods of time. Because of this, based on the 2002 efficiency result, we calculated the intensity ratio of O III normal and Bowen lines relative to He II λ 4685.68 and derive the efficiency variation with time period. The result showed that the efficiency is the highest in 1998 and the lowest in 2001. We conclude that the efficiencies with phase are caused by the electron temperature changes in the ionized gas. The efficiencies of AG Peg are likely to increase along with electron temperature. Our analysis results may be useful in understanding the physical conditions of the ionized shell in symbiotic star and the intensity ratio and efficiency variation.

Keywords: symbiotic nova AG Peg, line profile, Bowen line, spectroscopic observation

요약: 미국 Lick 천문대에서 위상이 다른 세 시기에 공생별 AG Peg을 분광 관측하고 방출선 H I, He II, O III를 조사하였다. 6개의 O III Bowen 선의 FWHM과 선세기를 측정하고 형광 기작 효율을 연구하였다. 세 시기의 O III 일반 선과 Bowen 선의 평균 FWHM은 큰 차이가 없었으나 선세기 비는 약 4.0 배 정도로 O III Bowen 선이 높았다. O III Bowen 선의 이론적 세기 비와 관측 세기 비를 비교한 결과, O III λ 3759.87만 제외하고 관측한 세기가 이론적 세기보다 크다는 사실을 알았다. O III λ 3791.26과 3754.67의 선세기 비는 세 시기 중에서 2001년도만이 Saraph and Seaton (1980)의 모델과 잘 일치하였다. 다른 두 시기는 AG Peg의 효율(R)을 구할 수 없었으나 2002년은 $R=0.47$ 을 얻었다. 이 때문에, 2002년 효율 결과를 기초로 He II λ 4685.68에 대한 O III 일반선과 Bowen 선의 세기 비를 구하여 시기에 따른 효율 변화를 알아보았다. 그 결과 AG Peg의 효율은 1998년이 가장 높았고 2001년이 가장 낮았다. 결론적으로, 위상에 따른 효율 변화는 이온화된 가스의 전자 온도 변화에 기인하는데, AG Peg의 효율은 전자 온도가 증가함에 따

*Corresponding author: astroyv@cbe.go.kr

Tel: +82-43-230-1955

Fax: +82-43-236-1973

라 증가하고 있다. 우리 연구 결과는 선세기 비 및 효율의 경향성 파악과 공생별에서 이온화된 껍질의 물리적 조건을 이해하는데 사용될 수 있다.

주요어: 공생별 AG Peg, 선운곽, Bowen 선, 분광관측

서 론

1912년 공생별이 주목받기 시작한 후, Berman (1932)은 처음으로 공생별의 분광학적 특징이 쌍성에 의해 가장 잘 설명된다고 하였다. 그 후 60여년 이상 쌍성 모델과 단독별 모델이 대립하였으나 현재 공생별은 항성풍에 의해 상호작용하는 쌍성계로 널리 받아들여진다(Vogel and Nussbaumer, 1994; Proga et al., 1998; Kenyon et al., 2001).

Boyarchuk (1969)이 최초로 공생별의 관측적 특징을 거론한 이후, 현재까지 연구된 관측적 특징과 이론적 모델을 바탕으로 공생별은 다음과 같이 구체적으로 정의되고 있다. 공생별의 특징은 (1) 만기형 거성에서 나타나는 흡수선의 특징 출현, (2) 밝고 강한 H I과 He I의 방출선 출현, (3) 차가운 별의 특징(예로 TiO 흡수 밴드) 또는 그런 특징이 발견되지 않더라도 라만 산란선 $\lambda 6825$ 의 출현을 들 수 있다(Kenyon, 1986; Belczyski et al., 2000). 이러한 특징이 잘 나타나는 별이 AG Peg이다.

AG Peg (HD 207757; BD+11°4673)은 고이온화선이 형성되는 뜨거운 성분 영역, 낮은 이온화 허용선과 준금지선이 방출되는 차가운 거성의 바깥쪽 대기 근처의 고밀도 영역, 금지선이 형성되는 시스템 전체를 감싸는 저밀도 영역의 3개로 구성된 가장 오래된 공생별로 알려졌다. Table 1에 공생별 AG Peg의 3개 성분에 대한 물리량을 제시하였다.

약 80년 전 Bowen (1934, 1935)은 매우 들뜬 행성상 성운에서 O III 방출선 일부가 뚜렷이 나타나는데, 이는 He II Ly- α 와 O III 공명선(resonance line) 과정의 일치에 의해 설명된다고 하였다. UV 영역의 O III($2p^2 \ ^3P_2-2p3d \ ^3P_2$) $\lambda 303.800$ 은 He II Ly- α $\lambda 303.782$ 와 파장이 유사하여 He II에서 나온 광자를 O III가 흡수(pumping)하여 O III의 $2p3d \ ^3P_2$ 의 궤도에 흡수된 후, $2p3p \ ^3S$, $2p3p \ ^3P$, $2p3p \ ^3D$ 및 $2p3s$

3P 로 떨어지며 $\lambda 2700-3900\text{\AA}$ 에서 다른 O III Bowen 선들을 방출한다. 그리고 마지막 단계($2p3s \ ^3P-2p^2 \ ^3P$)에서 $\lambda 374.4$ 에 가까운 6개의 UV 선들을 방출한다. 이런 6개의 O III 공명선 중 $\lambda 374.432(2p3s \ ^3P_1-2p^2 \ ^3P_2)$ 은 두 개의 공명선 N III $\lambda 374.434$ 와 $\lambda 374.442$ 와 거의 같은 파장을 갖는다. 이러한 파장의 일치로 형성되는 선이 가시광선 영역의 N III Bowen 선들이다.

그 후, O III Bowen 선 형성 기작에 대해 연구가 활발하게 진행되었다. 특히 Bhatia et al. (1982)는 태양의 O III 극자외선 스펙트럼의 형성에서 전하 교환(charge exchange; CE) 과정이 중요한 요소가 아닌 것 같다고 하였다. Dalgarno and Sternberg (1982)는 Bowen 선세기에 CE 기여도를 조사했는데, 3D 항에서 붕괴하여 나오는 선들 중 $\lambda 3774.00$ 과 $\lambda 3757.21$ 은 거의 전적으로 CE 과정, 즉 $O^{3+}+H \rightarrow O^{2+}(2p3p \ ^3D_1) +H^+$ 에 기인한다고 하였다. Likkell and Aller (1986)는 17개 행성상 성운의 O III Bowen 선세기가 Saraph and Seaton (1980)이 예상한 상대적 세기와 만족스럽게 일치하며, Dalgarno and Sternberg (1982)의 전하 교환율을 지지한다고 하였다. Liu and Danziger (1993)와 Kastner and Bhatia (1996)는 O III $\lambda 5592.25$ 가 Bowen 기작에 의해 영향을 받지 않고 오직 CE 과정으로만 나오는 CE 선이라고 하였다.

행성상 성운과 공생별에서 O III Bowen 선으로 바뀌는 He II Ly- α 광자의 비인 형광 기작 효율은 천체에 따라 다르며 0.1-0.9 범위에 걸쳐 있다(Pereira et al., 1999). 그러므로 Bowen 기작은 He II Ly- α 광자의 일생에 큰 영향을 끼치고 결과적으로 천체를 구성하는 성운의 광이온화 평형에 영향을 주게 된다. 따라서 Bowen 형성 기작을 이해하려면, 자외선과 가시광선 스펙트럼의 올바른 해석이 절실히 요구된다. 또한 Bowen 선들은 O^{2+} , N^{2+} 이온화 과정에서 발생한 것이 아니라, He^+ 에서 발생한 빛을 흡수하여 방출

Table 1. Physical quantity for AG Peg (Kenny, 1995)

Mass (M_{\odot})		Radii (R_{\odot})		Temperature (K)			
Hot	Cool	Hot	Cool	Nebular	Hot	Cool	Nebular
0.5-2	2-4	0.6	120	750	52000	3430	400-20000

하면서 형성된 선이므로 중심별 주위 가스의 물리적 조건, 중심별의 복사 전달과 이온화 구조 등을 연구 하는데 매우 유용하다.

이러한 Bowen 선 형광 기작 연구는 세이퍼트 은하(Weymann and Williams, 1969; Grandi, 1980), 태양(Raymond, 1978; Kastner and Bhatia, 1984), X선 쌍성(Kallman and McCray, 1980; Deguchi, 1985), 행성상 성운(Likkell and Aller, 1986), 공생별(Eriksson et al., 2005; Selvelli et al., 2007) 등으로 다양한 천체를 포함하고 있다. 그러나 실질적으로는 행성상 성운에 대한 연구가 가장 많고 공생별은 적다.

공생별의 Bowen 선과 직접적으로 관련된 연구는 Wallerstein et al. (1991)이 처음이다. 그들은 5개 공생별(AG Dra, HM Sge, V1016 Cyg, V1329 Cyg, Z And)을 관측($\lambda\lambda$ 3200-3600Å)하여 여러 선들의 파장 동정과 상대적 세기를 자세히 분석하였으며, 뚜렷하게 O III Bowen 선이 나타났으나 파장 영역이 3300-3450Å이었다. 그 외 공생별 연구들의 관측 자료가 International Ultraviolet Explorer (IUE) 자료이었다. 가장 최근에 Eriksson et al. (2005)이 공생별 AG Peg의 Bowen 선 연구를 하였으나 3750-3815Å 사이의 중요한 O III 선 6개를 전혀 관측하지 못하였다고 하였다. 이에 따라 우리는 미국 Lick 천문대에서 관측한 공생별 AG Peg의 세 시기에 나타난 O III 일 반선과 Bowen 선의 특징, 선폭, 선세기를 분석하고 물리적 조건, 형광 기작 및 효율을 연구하려고 한다.

분광관측

미국 UCLA에 위치한 Lick 천문대의 3 m 망원경에 부착된 고분산 분광기 Hamilton Echelle Spectrograph (HES)를 이용하여 공생별 AG Peg의 가시광선 영역 분광 자료를 얻었다. 우리 연구에 사용된 HES 분광기는 1 cm 당 316개의 홈이 파여져 있는 에셀(echelle) 회절격자와 CCD 검출기로 이루어져 있다. 검출 가능한 파장 범위는 3600-10300Å이고, CCD

검출기는 2048×2048 화소(pixel)이다. HES는 Coude 초점면에 위치한 직사각형 슬릿의 크기를 천체에 맞도록 선택하여 사용할 수 있는데, 관측에 사용한 슬릿의 크기는 파장방향으로 1.2" (640 micron, μm)의 슬릿 폭을 선택함으로써 파장 분해능은 5000Å에서 약 0.2Å/pixel이다.

1998년, 2001년, 그리고 2002년 분광 관측에서 미약한 방출선들을 측정하기 위해 1800 sec 또는 3600 sec 노출을 하였고, H α 와 같이 매우 강한 방출선들은 포화(saturation)되기 쉬우므로 포화되지 않도록 하기 위해 180 sec, 300 sec, 또는 600 sec의 짧은 시간 노출로 관측을 하였다. 분광 관측 자료 처리의 마지막 단계인 플럭스 보정(flux calibration)을 위해 IRAF 표준성(standard star)중의 하나인 HR 7596을 관측하였다. Table 2는 AG Peg의 관측일지로, 관측 당시 평균 시상(seeing)이 약 0.8-1.5"로서 평균적인 시상보다 좋은 대기 상태에서 관측 자료를 얻었다.

AG Peg의 궤도 위상을 계산하기 위해 Iben and Tutukov (1996)가 광도가 극대일 때를 기준으로 제시한 다음 공식을 이용하였다.

$$JD_{\text{Max}(V)} = JD\ 2,442,710.0 + 816.5E \quad (1)$$

여기서 $JD_{\text{Max}(V)}$ 는 예상 광도 극대 시각, JD 2,442,710.0는 줄리안 일로 나타낸 기산점, 816.5는 공전 주기, 그리고 E는 공전회수를 의미한다.

일반적으로 공생별의 천체력은 광도가 최소일 때, 즉 GS에 의해 WD가 완전히 가리는 때를 위상 $\phi = 0$ 으로 정의한다(Lee et al., 2012; Hyung, 2014). 하지만 AG Peg의 경우는 이와는 달리, $\phi = 0.25$ 또는 0.75에서 우리는 WD와 GS를 모두 볼 수 있으며 이 위상은 1998년의 우리의 위상과 비슷하다. $\phi = 0$ 이면 WD가 GS의 앞에 있어 가장 밝을 때로 2002년 우리의 관측 위상이 이와 아주 비슷하며, $\phi = 0.5$ 이면 GS가 WD를 가리게 되어 WD 주위에서 형성되는 방출선이 어두운 때로 2001년 우리의 관측 위상과 비슷하다.

Table 2. AG Peg observation log

Observation date (year/month/day)	Julian date (+2450000)	Phase (ϕ)	Exposure (s)	Region (Å)	Seeing (")
1998/09/17	1073.70	0.24	300, 1800	3480-10300	1.5
2001/08/30	2151.60	0.56	180, 1800	3480-10650	1.0
2002/08/11	2498.92	0.98	300, 3600	3400-9925	0.8

자료 처리

분광자료 처리

1998년, 2001년, 2002년 AG Peg 분광 관측 자료는 NOAO (National Optical Astronomy Observatory)의 IRAF (Image Reduction and Analysis Facilities) 자료 처리 과정을 따라 처리하였다. 자료 처리를 간단히 요약하면, 1) 전처리(ZERO 및 DARK 보정), 2) CCD 화소반응 보정(flattening), 3) 에셀 스펙트럼 차수 추출하기(tracing echelle orders), 4) Th-Ar 비교 광원 영상을 이용한 파장 동정(wavelength identification), 5) 표준화 및 대기 소광 보정(Standard and atmospheric extinction correction), 6) 플럭스 보정(flux calibration)이다. 이렇게 파장과 플럭스로 된 fit 파일을 IRAF splot을 이용하여 중심파장, 플럭스, 선폭(Å) 등을 측정하였다.

또 위에서 얻은 파장과 플럭스로 된 fit 파일을 DIPSO에서 사용할 수 있도록 속도와 플럭스로 된 파일로 변환하였다. 변환과정은 1) IRAF scopy task: 구경별 스펙트럼 뽑아내기, 2) IRAF listpix task: 파장과 Flux 값 저장, 3) IDL Program: 태양 중심 시선속도(Heliocentric velocity)와 플럭스로 된 text 파일로 변환, 4) ESO의 StarLink DIPSO: Gaussian Fitting 및 성분 분석(선폭과 세기) 등이다.

지구 공전속도와 AG Peg 시스템속도 보정

먼저, 선운곽과 시선속도를 비교하기 위해 각각 관측 시각이 다른 1998년, 2001년, 2002년의 관측 당시 지구의 자전과 공전 속도를 보정해 주었다. 즉, 1998년 9월 17일($\phi=0.24$)의 경우 $H\alpha$ 는 $V_{\text{helio}} = -9.16 \text{ km s}^{-1}$ (300 sec), 나머지 선들은 $V_{\text{helio}} = -9.22 \text{ km s}^{-1}$ (1800 sec), 2001년 8월 30일($\phi=0.56$)에는 $V_{\text{helio}} = -1.79 \text{ km s}^{-1}$ (180 sec), 2002년 8월 11일($\phi=0.98$)에는 $V_{\text{helio}} = 7.05 \text{ km s}^{-1}$ (300 sec)와 같이 구하여 보정하였다. 다음으로 AG Peg 질량중심 계(0 km s^{-1})에서 본 방출선 윤곽을 얻고자 태양에 대한 AG Peg의 시선속도 $-17.09 \pm 3.32 \text{ km s}^{-1}$ (Lee et al., 2017)를 보정하였으며, 보정된 속도와 플럭스로 된 자료를 가지고 DIPSO에서 분석하였다. 이렇게 보정하였지만 방출선 윤곽이 0 km s^{-1} 에서 약간 벗어난 선들이 생기기도 하였다. Lee et al. (2017)에 나타난 바와 같이 앞선 여러 연구자들이 구한 AG Peg의 시선속도 값이 -14.33 km s^{-1} 에서 -25.00 km s^{-1} 사이의 범위를 보였다. 이러

한 시선속도로 인한 차이를 최소화하고자 평균하여 사용하였다. 일부 방출선의 중심이 0 km s^{-1} 에서 약간 벗어났다 할지라도 방출선 윤곽의 전체적인 위치가 약간 이동한 것이므로 가우시안 함수 맞추기에 의한 선폭과 선세기 측정에는 아무런 영향이 없다.

O III 방출선 분석

O III 일반선과 Bowen 선 spectrum

관측된 O III 일반선은 $\lambda\lambda 3423.36, 3702.75, 3707.25, 3714.03, 3715.08, 3961.57, 4074.02, 4081.00$ 이었다. 대체적으로 1998년과 2002년은 뚜렷하게 나타났으나, 2001년은 매우 미약하게 나타났다. Fig. 1은 약하지만 뚜렷하게 나타난 1998년 O III 일반선 스펙트럼이다. 아래 방향 화살표로 표시한 O III 일반선 $\lambda\lambda 3702.75, 3707.25, 3714.03, 3715.08$ 이외에 H 14-16, He I $\lambda 3705.00$, Ti II $\lambda 3706.22$ 등을 뚜렷이 볼 수 있다. 관측된 O III 일반선을 Table

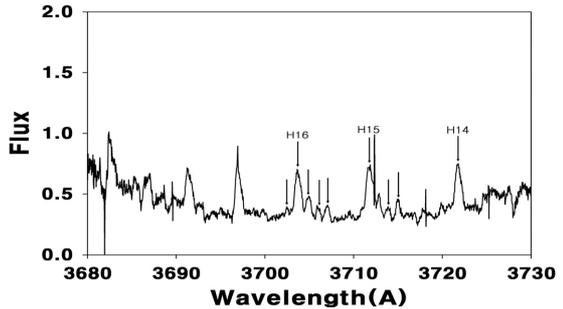


Fig. 1. Spectrum of the O III normal lines. Observation date=1998, exposure=1800 sec. Wavelength unit in horizontal axis: Angstrom (Å). Flux unit in vertical axis: $10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Å}^{-1}$. See the text.

Table 3. Observed O III normal lines

λ_{lab} (Å)	Transition		A_{ij} (s^{-1})
	upper	lower	
3423.36	$2s^2 2p(^2P^o)4d \ ^3D_1^o$	$2s2p(^1P)3s \ ^3P_0$	$3.62\text{e}+07$
3702.75	$2s^2 2p(^2P^o)3d \ ^3D_1^o$	$2s^2 2p(^2P^o)3p \ ^3P_0$	$5.45\text{e}+07$
3707.25	$2s^2 2p(^2P^o)3d \ ^3D_2^o$	$2s^2 2p(^2P^o)3p \ ^3P_1$	$7.34\text{e}+07$
3714.03	$2s^2 2p(^2P^o)3d \ ^3D_1^o$	$2s^2 2p(^2P^o)3p \ ^3P_1$	$4.06\text{e}+07$
3715.08	$2s^2 2p(^2P^o)3d \ ^3D_3^o$	$2s^2 2p(^2P^o)3p \ ^3P_2$	$9.73\text{e}+07$
3961.57	$2s^2 2p(^2P^o)3d \ ^1F_3^o$	$2s^2 2p(^2P^o)3p \ ^1D_2$	$1.25\text{e}+08$
4074.02	$2s2p(^2P)3p \ ^3D_2^o$	$2s2p(^2P)3s \ ^3P_1$	$4.54\text{e}+07$
4081.00	$2s2p(^2P)3p \ ^3D_1^o$	$2s2p(^2P)3s \ ^3P_2$	$6.02\text{e}+07$

Transition and Transition probabilities A_{ij} are from NIST (http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html).

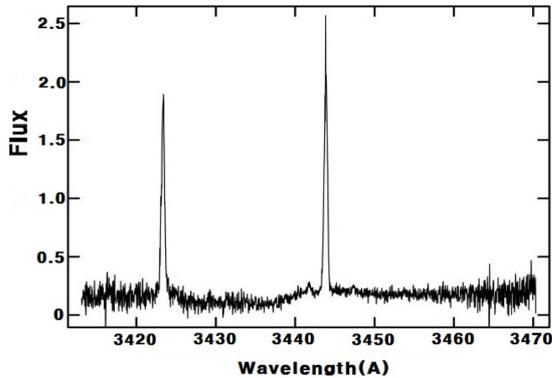


Fig. 2. Spectrum of the O III normal line $\lambda 3423.36$. Observation date=2002, exposure=300 sec. Wavelength unit in horizontal axis: Angstrom (\AA). Flux unit in vertical axis: $10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$. Right line is O III Bowen line $\lambda 3444.06$.

3에 정리하였다. $\lambda 3423.36$ 은 2002년만 나타났으며 $\lambda 3961.57$ 은 모든 관측년도에 뚜렷하고 세계 출현하였다.

위에 설명한 바와 같이 우리의 분광 관측 자료에 여러 개의 O III 일반선이 나타났지만 그 중에서 뚜렷하고 세계 나타난 O III 일반선의 특징은 다음과 같다.

(1) O III 일반선 $\lambda 3423.36$ 의 경우, 다른 관측년도에는 분광 관측 자료가 없으나, Fig. 2와 같이 2002년만 매우 세계 나타났으나 Na II $\lambda 3423.59$, Ni I $\lambda 3423.71$ 또는 Ne I $\lambda 3423.91$ 일 수도 있다.

(2) Fig. 3은 O III 일반선 $\lambda 3715.08$ 의 선 윤곽으로 1998년과 2002년 뚜렷하게 나타났으나, 2001년은 매우 미약하여 DIPSO 분석을 하지 못하였다. He II $\lambda 3715.15$ 과 혼동되지만 He II의 FWHM이 평균 약 60 km s^{-1} 인 것으로 볼 때, O III 일반선은 FWHM이

평균 약 20 km s^{-1} 정도 작았으므로 O III 일반선 $\lambda 3715.08$ 로 동정하였다.

(3) Fig. 4는 1998년, 2001년, 2002년 모두 뚜렷하고 세계 나타난 O III 일반선 $\lambda 3961.57$ 의 대칭적인 선 윤곽을 가우시안 fitting한 모습으로 FWHM이 서로 비슷하다.

O III $\lambda 303.800$ 천이와 밀접한 관계가 있는 O III Bowen 선이 $\lambda 3400\text{-}3800\text{\AA}$ 사이에서 총 6개 나타났다. 1998년과 2001년은 관측 파장 영역을 벗어나 O III $\lambda 3444.06$ 분광자료가 없으나 2002년은 O III $\lambda 3444.06$ 가 아주 뚜렷이 나타났다. 또 $\lambda 3700\text{-}3800\text{\AA}$ 사이의 O III Bowen 선을 관측년도마다 5개를 관측하였다. Fig. 5는 2001년의 O III $\lambda 3757.21$ 근처의 스펙트럼($\lambda 3750\text{-}3770\text{\AA}$)으로, He II $\lambda 3758$ 및 [Fe VII] $\lambda 3759$ 와 혼합되어 복잡하게 보이지만 O III Bowen 선 $\lambda\lambda 3754.67, 3757.21, 3759.87$ 이 뚜렷하게 보인다.

O III $\lambda 3759.87$ 은 연구자들을 매우 혼란스럽게 하였다. Mckenna et al. (1997)은 RR Tel에 나타난 이 선을 주로 O III에 기인하는 선으로 동정하였다. Kenyon et al. (2001)은 AG Peg에 나타난 $\lambda 3759$ 선을 [Fe VII] $\lambda 3759$ 으로 동정하였다. Eriksson et al. (2005)은 $2p3p \text{ } 3D\text{-}2p3s \text{ } 3P$ 천이로 발생하는 $\lambda 3755\text{-}3813\text{\AA}$ 사이의 중요한 6개 O III Bowen 선을 AG Peg에서 관측하지 못하였다. Selvelli et al. (2007)는 HST-STIS 분광 자료(2000.10.10)와 UVES 분광 자료(1999.10.16)를 이용한 RR Tel 연구에서 O III $\lambda 3759.87$ 이 더 강한 선 [Fe VII] $\lambda 3758.92$ 와 혼합되었다고 하였고, 따라서 FWHM과 세기를 측정하지 못하였다.

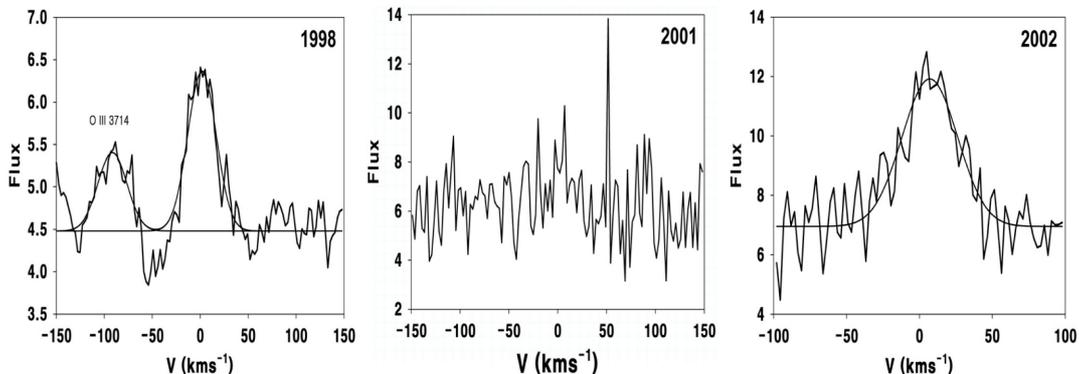


Fig. 3. The symmetric line profile of the O III normal line $\lambda 3715$ in 1998 (FWHM= 34.9 km s^{-1}) and 2002 (FWHM= 45.0 km s^{-1}) and a Gaussian fit. Velocity unit in horizontal axis: km s^{-1} . Flux unit in vertical axis: $10^{-15} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} (\text{km s}^{-1})^{-1}$.

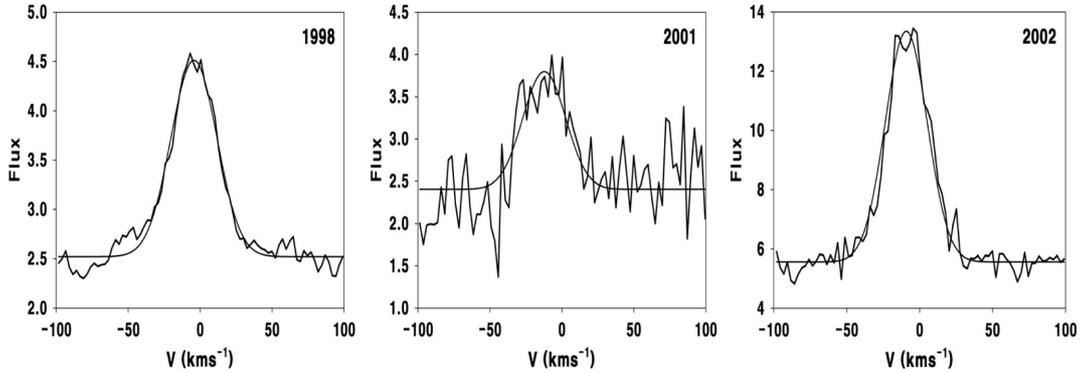


Fig. 4. The symmetric line profile of the O III normal line $\lambda 3962$ in 1998 (FWHM=37.6 km s⁻¹), in 2001 (FWHM= 34.9 km s⁻¹), and 2002 (FWHM=33.8 km s⁻¹) and a Gaussian fit. Velocity unit in horizontal axis: km s⁻¹. Flux unit in vertical axis: 10⁻¹⁵ erg s⁻¹ cm⁻² (km s⁻¹)⁻¹.

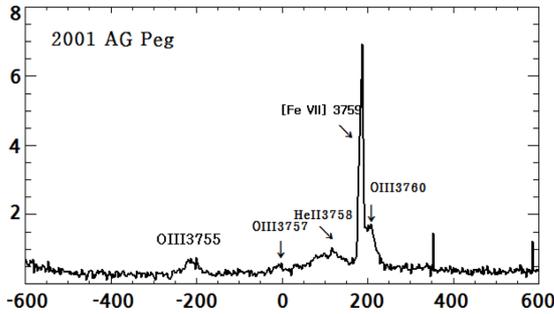


Fig. 5. Spectrum of the O III lines near $\lambda 3757.21$. Velocity unit in horizontal axis: km s⁻¹. Flux unit in vertical axis: 10⁻¹² erg s⁻¹ cm⁻² (km s⁻¹)⁻¹.

우리의 경우도 2001년과 2002년은 강한 선 [Fe VII] $\lambda 3759$ 가 혼합되어 있었으나 두 개 봉우리의 윤곽이 보였으므로 DIPSO로 성분 분석을 한 결과 [Fe VII] $\lambda 3759$ 와 O III $\lambda 3759.87$ 을 구별할 수 있었다. 1998년은 다른 두 시기와 달리 He II $\lambda 3758$ 과 [Fe VII] $\lambda 3759$ 가 보이지 않고 선폭이 매우 넓은 윤곽의 단일 봉우리가 나타나 DIPSO로 분석한 결과 선폭이 약 220 km s⁻¹인 알 수 없는 넓은 선과 또 다른 한 개 성분으로 구별할 수 있었다. 우리는 다른 한 성분의 선폭을 1998년에 나타난 다른 O III Bowen 선과 비교해 본 결과 O III $\lambda 3759.87$ 이라고 동정하였으나 알 수 없는 넓은 선과 혼합되어 다소 불확실하다고 본다.

O III 일반선과 Bowen 선의 FWHM 비교

우리의 분광 관측 자료에 나타난 O III 일반선들이 다른 경로를 통해 형성된 Bowen 선일 가능성이 있

으므로 O III Bowen 선과 FWHM을 비교해 보고자 O III 일반선의 FWHM을 측정하였다. 너무 미약하여 가우시안 fitting을 할 수 없는 경우는 IRAF *plot task*로 과장(단위: Å)으로 된 선폭을 측정하여 도플러 효과 공식으로 계산하였고, 뚜렷한 경우는 유럽 ESO (European Southern Observatory)에서 만든 StarLink DIPSO로 가우시안 fitting을 하여 측정하였다. 2001년의 O III 일반선은 $\lambda 3961.59$ 를 제외하고 대체로 미약하여 IRAF의 *plot task*를 이용하였다. 그리고 $\lambda 4074.02$ 와 $\lambda 4081.00$ 은 3개 관측년도 모두 미약하여 IRAF의 *plot task*를 이용하여 FWHM를 측정하였다.

방출선의 선폭은 가스가 이루는 구각의 팽창뿐만 아니라 총 4가지의 부수적인 요인에 의해 선폭이 증가함을 고려해야 한다. 열적 선폭 증가(V_{th}), 미세 구조(fine structure) 선폭 증가(V_{fs}), 분광기와 망원경 시스템에 의한 기계적 선폭 증가(V_{ins}), 난류(turbulence) 선폭 증가(V_{turb})도 기여한다. 따라서 우리는 O III 일반선과 Bowen 선의 FWHM을 측정하여 $2V_{exp} = (V_{FWHM}^2 - V_{th}^2 - V_{ins}^2 - V_{fs}^2 - V_{turb}^2)^{1/2}$ 로부터 4가지 선폭 증가 요인을 보정한 FWHM을 Table 4에 정리하였다.

한편, Eriksson et al. (2005)은 AG Peg에서 $\lambda 3755-3813\text{\AA}$ 사이의 중요한 6개 O III Bowen 선을 관측하지 못하였으므로 우리는 UVES (1999. 10. 16)의 가시광 영역 고분해 스펙트럼에서 측정한 Selvelli et al. (2007)의 RR Tel FWHM과 비교하고자 Table 4에 함께 나타내었다.

Bowen 선의 선폭이 일반선의 선폭보다 훨씬 더 클 것으로 예상하였으나 Table 4에서 보는 바와 같이

Table 4. FWHM (km s^{-1}) of O III normal lines and O III Bowen lines

λ_{lab} (Å)	1998	2001	2002	λ_{lab} (Å)	1998	2001	2002	1999
3715.08	33.2(D)	20.5(S)	43.9(D)	3754.67	34.7	36.3	34.4	31.8
3961.57	36.0(D)	33.6(D)	32.3(D)	3757.21	34.6	19.2	53.2	33.5
4074.02	25.1(S)	32.1(S)	40.4(S)	3759.87	37.8	19.7	28.0	-
4081.00	31.9(S)	16.3(S)	21.6(S)	3774.00	25.9	23.8	21.5	30.7
-	-	-	-	3791.26	46.3	21.4	28.0	35.4
mean	31.6±4.6	25.6±8.5	34.6±9.9	mean	35.8±7.3	24.1±7.1	33.0±12.2	33.3±2.0
-	-	-	-	He II 4686	60.1	61.4	57.8	56.2
-	-	-	-	H I 4861	114.3	147.3	93.7	60.0

*(D) and (S) of FWHM analysed by DIPSO and splot task, respectively.

**Data of 1999 are from Selvelli et al. (2007). See the text.

1998년은 O III Bowen 선이 일반선보다 4.2 km s^{-1} 크게, 2001년은 일반선보다 1.5 km s^{-1} 작게, 2002년도 일반선보다 1.6 km s^{-1} 작게 측정되었다.

우리는 O III Bowen 선의 선폭이 He II $\lambda 4685.68$ 의 선폭과 어떤 관계가 있는지 알아보려고 Table 4에 나타내었다. He II의 이온화 에너지가 54.4 eV , O III의 이온화 에너지가 54.9 eV 이므로 O III의 방출 영역이 He II의 방출 영역과 겹칠 가능성이 매우 높고 FWHM이 비슷할 것으로 생각할 수 있다. 그래서 방출 영역의 각 관측년도별 전자온도와 O III와 He II의 원자량을 대입하고 열적 선폭 증가를 보정하여 FWHM을 계산한 결과, Table 4에서 보는 바와 같이 O III Bowen 선의 선폭이 He II $\lambda 4685.68$ 의 선폭의 반 정도 밖에 되지 않았다. 마찬가지로 Selvelli et al. (2007)도 O III Bowen 선의 선폭이 He II $\lambda 4685.68$ 선폭의 반 정도였다.

Table 4에서 2002년 $\lambda 3757.21$ 의 FWHM은 가장자리가 He II $\lambda 3758.14$ 과 혼합되어 나타나므로 다소 불확실하고, 1998년, 2001년, 2002년 $\lambda 3759.87$ 의 FWHM도 동정하기 매우 어려운 [Fe VII] $\lambda 3759$ 와 혼합되어 나타나므로 다소 불확실하다. 또한 GS와 WD를 모두 관측할 수 있는 위상이 0.24 인 1998년과 WD가 GS의 앞에 있는 위상이 0.98 인 2002년은 평균 선폭이 위상을 보고하지 않은 Selvelli et al. (2007)의 RR Tel 평균 선폭과 비슷하지만, GS가 WD를 가리는 위상이 0.56 인 2001년도의 O III Bowen 선은 1998년, 2002년 및 RR Tel 보다 평균 선폭이 약 10 km s^{-1} 정도 작게 나타났다.

Fig. 6은 다른 관측년도와는 달리 분광 관측 범위가 $\lambda 3400-9925\text{\AA}$ 이었던 2002년도에 아주 뚜렷하고 세계 나타난 O III $\lambda 3444.06$ 의 대칭적인 선윤곽이다. 2002년도의 O III $\lambda 3444.06$ 은 FWHM이 41.5 km s^{-1}

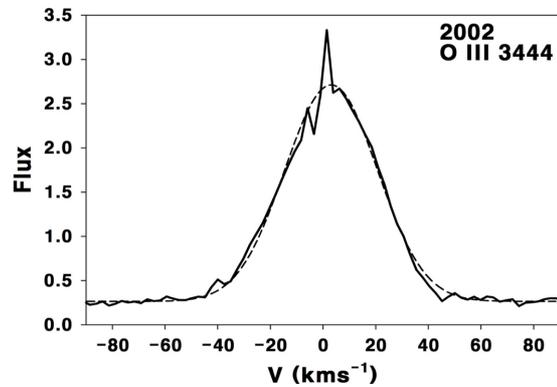


Fig. 6. The symmetric line profile of the O III $\lambda 3444.06$ (obs. year=2002, exposure=300 s) and a Gaussian fit with FWHM= 41.5 km s^{-1} . Velocity unit in horizontal axis: km s^{-1} . Flux unit in vertical axis: $10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} (\text{km s}^{-1})^{-1}$.

로 관측년도별 Bowen 선의 평균 FWHM보다 약 $6-17 \text{ km s}^{-1}$ 정도 크게 나타났다. 한편 Mckenna et al. (1997)은 RR Tel에서, Fang and Liu (2011)는 NGC 7009에서 O III $\lambda 3444.06$ 을 동정한 바 있으며, Selvelli et al. (2007)은 RR Tel 연구에서 O III $\lambda 3444.06$ 의 FWHM을 34.9 km s^{-1} 로 측정하였고, O III $\lambda 3444.06$ 이 red wing을 갖고 뚜렷하게 비대칭 선윤곽을 보인다는 점이 우리와 다르다.

O III 일반선과 Bowen 선세기 비교

앞에서 설명한 바와 같이 DIPSO로 분석 가능한 O III 일반선 $\lambda\lambda 3423.36, 3715.08$ 그리고 3961.57 은 제외하고 나머지 약하게 나타나 DIPSO 분석이 어려워 splot으로 측정된 O III 일반선 $\lambda\lambda 3702.75, 3707.25, 3714.03, 4074.02, 4081.00$ 을 살펴보았다.

$\lambda 3702.75$ 는 2001년은 선폭과 선세기를 측정하기 어려울 정도로 매우 미약하였으나, 1998년과 2002년

의 경우는 강한 선 H I λ 3703.85(H16) 바로 옆에 약하게 출현하였다. λ 3707.25도 λ 3702.75와 마찬가지로 2001년은 선폭과 선세기를 측정하기 어려울 정도로 매우 미약하였으나, 1998년과 2002년은 He³ I 3705.00과 Ti II λ 3706.22 옆에 약하지만 확인할 수 있었다. λ 3714.03은 2002년은 나타나지 않았으며, 2001년은 매우 미약하여 IRAF의 *splot* task로 선세기를 측정하였다. 1998년은 O III λ 3714.03이 매우 강한 선 H I λ 3711.97(H15)과 O III λ 3715.08 사이에 뚜렷하게 나타났다. λ 4074.02와 λ 4081.00은 3개 관측년도 모두 매우 미약하여 IRAF의 *splot* task를 이용하여 선세기를 측정하였다. Kim and Hyung (2008)이 제시한 소광 계수 $C=1.47E_{B-V}=0.04$ 를 가지고 Seaton (1979)의 소광 법칙에 따라 성간 소광을 보정한 세기를 구하였다. 이렇게 성간 소광을 보정한 O III 일반선 중에서 관측년도 모두 나타난 선의 상대적 세기를 Table 5에 나타내었다. 한편, 선세기를 비교할 때 일반적으로 H β 의 세기를 100으로 하여 표현한다. 우리가 연구한 AG Peg의 H β (H I 4861.33)는 Blue 성분, Red 성분, 그리고 Broad 성분이 존재하는데, 매우 넓은 선폭을 보이는 Broad 성분의 경우 라만 산란에 의해 형성된 것이므로 순수한 성운선이라 할 수 없다. 따라서 우리는 H β 의 Broad 성분을 제외한 순수한 성운선인 Blue 성분과 Red 성분의 합을 100으로 하여 상대적 세기를 비교하였다.

O III 일반선과 마찬가지로 IRAF의 *splot* task를 이용하여 O III Bowen 선의 세기를 측정할 후, 성간 소

광을 보정하였다. 그 중, 2002년만 나타난 O III 3444.06을 제외하고 3개 관측년도 모두 나타난 O III Bowen 선의 세기를 Table 6에 나타내었다. Table 5와 6의 천이와 천이 확률 A_{ij}은 NIST에서 인용하였다.

결과적으로 O III 일반선의 세기는 1998년과 2001년은 비슷하나 2002년은 감소하였다. 반면, O III Bowen 선의 세기는 감소하는 경향이 뚜렷하다. 또 O III Bowen 선이 일반선 보다 세기가 크다는 사실을 알 수 있는데, O III Bowen 선이 O III 일반선보다 1998년은 약 4.6배, 2001년은 약 4.0배, 그리고 2002년은 약 4.2배 높게 나타났다.

공생별에서 관측되는 O III 선의 들뜸 기작 이론은 (1) Bowen 공명 형광(Bowen resonance fluorescence; 한 이온에 의해 방출된 광자가 다른 이온에 흡수되고 중간 단계를 거치며 방출선을 연속으로 방출하며 떨어지는 과정), (2) 별빛 또는 성운에 의한 연속선 형광(continuum fluorescence; 강한 UV 복사가 이온을 들뜬 상태로 끌어 올리는 현상), (3) 분리전자 재결합(dielectronic recombinations; 원자핵 전자가 자유전자를 포획함으로써 들뜨는 과정), (4) 전하 교환(charge exchange; 한 이온이 가장 풍부한 원소인 H나 He과 충돌하는 동안 전자가 교환되는 반응)이 있다.

Table 5와 6를 보면 선세기와 관련이 있는 일반선 O III λ 3715.08과 λ 3961.57의 천이 확률 A_{ij}가 가장 선세기가 큰 Bowen 선 O III λ 3759.87의 A_{ij}보다도 같거나 더 크지만 그들의 상대적 선세기는 매우 작

Table 5. Relative intensity of O III normal lines [H β (nebular) I=100]

λ_{lab} (Å)	Transition (upper-lower)	A _{ij} (s ⁻¹)	1998	2001	2002
3715.08	3d ³ D ₃ -3p ³ P ₂	9.73e+07	0.710	0.536	0.457
3961.57	3d ¹ F ₃ -3p ¹ D ₂	1.25e+08	0.598	0.657	0.536
4074.02	3p ³ D ₂ -3s ³ P ₁	4.54e+07	0.213	0.360	0.122
4081.00	3p ³ D ₃ -3s ³ P ₂	6.02e+07	0.172	0.230	0.045
mean	-	-	0.423	0.446	0.290

Table 6. Relative intensity of O III Bowen lines [H β (nebular) I=100]

λ_{lab} (Å)	Transition (upper-lower)	A _{ij} (s ⁻¹)	1998	2001	2002
3754.67	3p ³ D ₂ -3s ³ P ₁	7.53e+7	1.841	2.629	1.077
3757.21	3p ³ D ₁ -3s ³ P ₀	5.56e+7	1.049	0.814	1.194
3759.87	3p ³ D ₃ -3s ³ P ₂	9.79e+7	5.213	3.965	3.464
3774.00	3p ³ D ₁ -3s ³ P ₁	3.91e+7	0.694	0.573	0.110
3791.26	3p ³ D ₂ -3s ³ P ₂	2.24e+7	1.007	0.882	0.249
mean	-	-	1.961	1.773	1.219

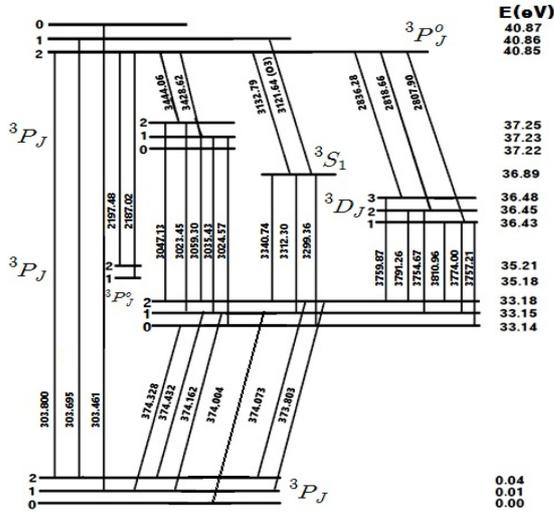


Fig. 7. A Grotrian diagram of O III transitions [after Selvelli et al. (2007)].

다. 이와 같이 O III Bowen 선이 일반선보다 강한 이유로 위의 4가지 들뜸 기작 이론 중에서 Bowen 공명 형광이 가장 큰 기여를 하는 것 같다. 성운에서 복사 및 분리 전자 재결합과 CE는 몇몇 O III 선이 2p3p ³D 준위로 이주하는데 효과적이고 O III Bowen 선세기에 기여할 수 있다(Liu et al, 1993). 우리의 분광자료에도 2p3p ³D_{1,2,3}으로부터의 붕괴에서 나타나는 6개 선 중 O III λ3810.96을 제외하고 5개 선은 잘 나타나므로 재결합과 CE가 O III Bowen 선의 관측된 선세기에 어느 정도 기여하였다고 생각된다. 그러나 분리전자 재결합이나 CE의 기여도는 우리의 연구 범위를 넘어 우리의 분석은 선세기 비로 제한한다.

O III Bowen선의 상대적 세기 비교

Fig. 7은 O III λλ 303.800와 303.695의 천이를 나타낸 그림이다. 우리는 O III의 Grotrian 도표 및 선세기와 관련 있는 천이 확률 A_{ij}를 이용하여 관측된 O III Bowen 선의 이론적 세기(I_{pred})를 알아보았다.

먼저, 우리는 Kim and Hyung (2008)으로부터 AG Peg의 전자밀도 N_e=7.00×10⁹와 전자온도 T_e (1998년 19,500K, 2001년 11,000K, 2002년 13,200K)를 택하였다. 강한 O III Bowen 선이 나타나 광학적으로 두꺼우므로 Case B를 적용하여 각 관측년도별로 I₃₀₄/I₄₆₈₆의 비를 각각 104.3, 96.7, 99.2로 가정하였다 (Storey and Hummer, 1995). 따라서 관측된 He II λ4685.68 세기로부터 He II Ly-α(λ 303.782)의 세기를 예측할 수 있었으며, He II Ly-α가 O III λ 303.800로 100% 갔다고 가정하고, Selvelli et al. (2007)가 제시한 O III Bowen 선의 천이 확률 A_{ij} 비율에 의해 아래로 떨어지는 선들의 이론적 선세기 (I_{pred})를 구하였다. 이렇게 구한 이론적 세기와 앞선 연구자들이 다른 천체를 대상으로 측정된 세기를 조사하여 Table 7에 나타내었다. Table 7의 모든 선들의 세기는 λ 3444.06을 100으로 한 상대적 세기이다. 우리의 H I λ 4861.33 세기는 2가지 값으로 나타내었는데, 괄호 없이 나타난 값은 Blue와 Red 성분의 합이고, 괄호 안의 값은 Blue, Red, 그리고 Broad 성분의 합이다. 그리고 1998년과 2001년 자료는 O III λ 3444.06 자료가 없어 I_{3444.06}=100으로 표준화된 상대적 세기가 아니라 단위가 10⁻¹³ erg s⁻¹ cm⁻²인 성간 소광 보정된 세기이다.

Table 7을 보면, Mckenna et al. (1997)의 O III λ 3759.87은 상대적 세기가 I_{pred}에 비해 너무 크다.

Table 7. Relative intensity of O III Bowen lines (I_{3444.06}=100)

λ _{lab} (Å)	I _{pred}	HA		Mc		Sel		FL	Ours		
		NGC 7009	RR Tel	RR Tel	RR Tel	NGC 7009	1998	2001	2002		
							AG Peg				
3444.06	100	-	100	100	100	100	-	-	100		
3754.67	2.32	1.029	10.081	(2.39)	3.76	5.6840	2.762	2.787	5.206		
3757.21	0.20	0.369	7.302	(0.78)	0.86	3.0878	1.573	0.862	5.775		
3759.87	31.48	3.669	560.606	bl	bl	15.7568	7.819	4.203	16.750		
3774.00	0.14	0.269	2.287	(0.87)	0.79	1.6631	1.040	0.608	0.533		
3791.26	0.70	0.356	3.369	-	1.08	1.5430	1.511	0.935	1.204		
He II 4686	-	-	558.148	458.07	-	133.3909	146.0	159.9	210.8		
H I 4861	-	-	614.700	503.1	-	863.9533	150.0 (188.0)	106.0 (125.0)	483.5 (535.5)		

*Ref.: HA=Hyung and Aller (1995), Mc=Mckenna et al. (1997), Sel=Selvelli et al. (2007), FL=Fang and Liu (2011)

또 그들의 논문을 보면 O III $\lambda 3759.87$ 의 선폭도 다른 O III Bowen 선들보다 2배 정도 크다. 우리가 측정한 세기와 비교했을 때, 너무 차이가 크게 나므로 Mckenna et al. (1997)의 $\lambda 3759.87$ 세기는 타당하지 않다고 본다. 관측한 세기와 예측된 세기를 비교한 결과는 다음과 같다.

(1) $\lambda 3444.06$ 이 관측된 모든 연구자들의 관측 세기가 I_{pred} 보다 크게 나타났다(O III $\lambda 3759.87$ 제외). 특히 Mckenna et al. (1997)의 관측 세기가 가장 크게 나타났다.

(2) 2002년도 AG Peg의 상대적 세기는 Fang and Liu (2011)의 NGC 7009의 상대적 세기와 비슷하다.

(3) 우리의 2002년도 세기를 파장별로 비교해보면 $\lambda 3754.67$ 은 I_{pred} 보다 약 2.2배, $\lambda 3757.21$ 은 I_{pred} 보다 약 29배, $\lambda 3759.87$ 은 I_{pred} 보다 약 0.5배, $\lambda 3774.00$ 은 I_{pred} 보다 약 3.8배, $\lambda 3791.26$ 은 I_{pred} 보다 약 1.7배 더 크다.

(4) 다른 연구자들의 세기를 파장별로 비교해보면 $\lambda 3754.67$ 은 I_{pred} 보다 약 1.6-4.3배, $\lambda 3757.21$ 은 I_{pred} 보다 약 4.3-36.5배, $\lambda 3759.87$ 은 I_{pred} 보다 약 0.5-17.8 배, $\lambda 3774.00$ 은 I_{pred} 보다 약 5.6-16배, $\lambda 3791.26$ 은 I_{pred} 보다 약 1.5-4.9배 더 크다.

O III $\lambda 3759.87$ 만 제외하고 우리의 결과를 포함한 모든 연구자들의 관측된 세기가 이론적 세기보다 크게 나타났다. Sabbadin et al. (2006)에 의하면 파장이 λ 인 어떤 선에서 방출되는 이론적 세기는

$$F(X^m, \lambda) = N_e N(X^n) \frac{hc}{\lambda_{ij}} \alpha_{eff}(X_i^m) B(\lambda_{ij}) \quad (2)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서 N_e 는 전자밀도, $N(X^n)$ 은 천이와 관련된 이온의 밀도, $n=m+1$, h 는 플랑크 상수, c 는 광속, $\alpha_{eff}(\lambda_{ij})$ 는 유효 재결합 상수, $B(\lambda_{ij})$ 는 Branching ratio로 $\frac{A_{ij}}{\sum A_{jk}}$ 로 표현할 수 있다. 이론과 관측 세기가 차이가 나는 이유는 식 (2)처럼 여러 가지를 고려해야 하지만 우리는 천이 확률 A_{ij} 만 고려하여 이론적 세기 I_{pred} 를 계산했기 때문이다. 다음으로 이론적 세기를 계산할 때 He II Ly- α 가 O I

$\lambda 303.800$ 로 100% 값이라고 가정하였으나, O3 $\lambda 303.695$ 또는 303.461 로 갈 수도 있는 점을 생각해 볼 수 있다.

우리의 분광관측 파장 범위를 벗어나는 EUV에 대한 자료가 없어서 많은 쌍의 선세기 비를 비교할 수 없었으나, O III Bowen 선 중에서 3791.26과 3754.67의 관측한 세기 비를 예측된 세기 비와 비교하여 Table 8에 나타내었다. Saraph and Seaton (1980) (SS), Bhatia and Kastner (1993) (BK), Froese-Fischer (1994) (FF)은 천이 비로 계산한 이론적 세기 비이며, UVES는 Selvelli et al. (2007)이 RR Tel에서 관측한 세기 비이다. 우리의 경우, 1998년은 SS, BK, FF가 예측한 세기비보다 크게, 2001년은 비슷하게, 2002년은 약간 작게 나타났다.

O III Bowen 형광 기작의 효율과 그 변화

Bowen 형광 기작(Bowen Fluorescent Mechanism; BFM)의 효율 R은 He II Ly- α 광자에서 O III Bowen 선 광자로 전환되는 비를 뜻한다. 일반적으로 O III $\lambda 3444.06$ Bowen 선과 He II $\lambda 4685.68$ 의 상대적 선세기 비를 이용하면 쉽게 R을 계산할 수 있다.

Burgess and Seaton (1960)은 처음으로 관측된 He II와 O III 선의 상대적 세기를 이용하여 R을 계산할 수 있다고 제안하였으며, NGC 7027의 R을 0.43으로 계산하였다. Weymann and Williams (1969)는 행성상 성운과 세이퍼트 은하 핵의 모델을 세우고 He II Ly- α 와 Bowen 선들에 대한 복사 전달 방정식의 해로부터 최초로 정확한 효율 R을 0.47로 계산하였다. Harrington (1972)은 행성상 성운 모델에 대해 Weymann and Williams (1969)보다 좀 더 자세한 연구를 하여 18개 행성상 성운 관측 자료와 잘 일치하는 R = 0.50을 얻었다. Kallman and McCray (1980)은 정적인 행성상 성운 모델에 대한 O III Bowen 선의 효율을 0.42로 계산하였으며, 19개 행성상 성운의 관측한 O III Bowen 선의 효율 평균 0.37과 잘 일치한다고 하였다.

효율 R은 다음과 같이 정의된다(Saraph and Seaton 1980).

Table 8. A comparison between observed and predicted line intensity ratio

O III line ratio	Ours			SS	BK	FF	UVES
	1998	2001	2002				
3791.26/3754.67	0.55	0.34	0.23	0.33	0.31	0.30	0.29

$$R = \frac{P \cdot \alpha_{eff}(HeII\lambda 4686) \cdot \lambda(\text{\AA}) \cdot I(\lambda)}{P(\lambda) \cdot \alpha_{eff}(HeII\lambda Ly-\alpha) \cdot 4686 \cdot I(HeII\lambda 4686)} \quad (3)$$

여기서 P는 cascade 확률로 Saraph and Seaton (1980)에 의하면 0.0187이다. P(λ)는 He II Ly-α에 의해 2p3d 3P₂로 들뜬 후 Bowen 선(예로 λλ3132.79 또는 3444.06)을 방출할 수 있는 가능성을 의미한다 (Aller, 1984). 또 α_{eff}는 He II λ4685.68과 He II Ly-α 선에 대한 유효 재결합 계수이며, I(λ)는 파장 λ인 Bowen 선의 세기를 의미한다.

He II가 재결합에 의해 발생한다면, He II Ly-α의 복사율은 성운의 온도에 거의 무관한 비례상수 κ를 갖는 He II λ4685.68의 복사율에 비례한다. 따라서 BFM의 효율은 일부 특정 선에 적용하면 직접 사용 가능한 간단한 식으로 표현할 수 있다. Harrington (1972)은 O III λ3444.06에 적용하여 T_e=15,000K에서 R=1.0×I(λ3444)/I(λ4686)이라고 하였으며, 숫자 계수가 T_e=10,000K에서는 1.1에서 T_e=20,000K에서는 0.92까지 변한다. Saraph and Seaton (1980)도 같은 표현을 제시하였으며, 다만 숫자 계수가 약간 다른데 T_e=10,000K에서는 1.2부터 T_e=20,000K에서는 1.0까지 변한다. 그러나 Likkell and Aller (1986)는 계수로 1.0을 사용하였으며, Selvelli et al. (2007)도 약 1.0이 적합하다고 하였다. 따라서 우리도 R의 계수로 1.0을 사용하여 O III λ3444.06가 관측된 2002년도 효율을 계산하여 보았다.

한편, Contini (1997)는 공생별 AG Peg 안에 BLN (Broad-Line-emitting Nebula)과 NLN (Narrow-Line-emitting Nebula)라는 두 종류의 성운이 있다고 언급하며, BLN의 최소 전자 온도는 18,000K, NLN의 최소 전자 온도는 14,000K라고 하였다. Kenyon et al. (2001)은 광이온화된 성운의 전자온도 T_e=10,000 K, Kim and Hyung (2008)은 AG Peg 성운 가스의 전자온도 T_e를 1998년 19,500K, 2001년 11,000K,

2002년 13,200K라고 하는 등 문헌마다 약간의 차이가 있었으나, 우리는 T_e=15,000K라고 가정하고 Harrington (1972)이 제시한 관계식

$$R=1.0 \times I(O \text{ III } 3444)/I(He \text{ II } 4686) \quad (4)$$

에 2002년 상대적 세기를 대입하여 R=0.47을 얻었다. AG Peg의 OI 효율 R 값에 대한 선행 연구가 없어 우리의 값을 비교할 수 없었다. 그래서 우리는 Table 7에 있는 다른 천체들의 상대적 세기를 이용하여 직접 효율 R을 구하였고, 또 Pereira et al. (1999)과 Selvelli et al. (2007)가 계산한 R 값을 수집하여 이를 Table 9에 함께 나타내었다. D형 공생별인 RR Tel과 HM Sge는 0.2-0.3, S형 공생별인 AG Peg은 0.47, 그리고 같은 행성상 성운 NGC 7009일지라도 방향에 따라 차이가 크다는 사실을 알 수 있다.

한편, 다른 관측 시기는 BFM의 효율을 구할 수 없었기 때문에 효율의 변화정도를 알아보기로 He II λ4685.68의 세기를 100으로 한 일반선과 다른 Bowen 선의 비를 구하여 Table 10에 나타내었다.

Table 10을 보면 세 시기에 공통으로 나타난 4개 O III 일반선의 상대적 세기 평균은 각각 0.435, 0.296, 0.665이었으며, 공통으로 나타난 5개 O III Bowen 선의 상대적 세기 평균은 2.015, 1.175, 2.795이었다. 이와 같이 O III 선세기는 WD가 GS의 앞에 있어 가장 밝을 때인 2002년(Φ=0.98)이 가장 높았고, GS가 WD를 가리게 되어 WD 주위에서 형성되

Table 9. Efficiencies of Bowen fluorescent mechanism

Object	I(3444)/I(4686)	Ref
RR Tel	0.18	Mckenna et al. (1997)
RR Tel	0.27	Pereira et al. (1999)
HM Sge	0.32	Pereira et al. (1999)
RR Tel	0.22	Selvelli et al. (2007)
NGC 7009 (minor axis)	0.37	Likkell and Aller (1986)
NGC 7009 (major axis)	0.75	Fang and Liu (2011)
AG Peg	0.47	This paper

Table 10. Relative intensity of O III normal and Bowen lines (I_{4685.68}=100)

λ _{lab} (Å)	1998	2001	2002	λ _{lab} (Å)	1998	2001	2002
3715.08	0.729	0.355	1.048	3754.67	1.892	1.742	2.469
3961.57	0.615	0.435	1.228	3757.21	1.078	0.539	2.739
4074.02	0.219	0.239	0.280	3759.87	5.357	2.628	7.945
4081.00	0.177	0.152	0.103	3774.00	0.713	0.380	0.253
-	-	-	-	3791.26	1.035	0.585	0.571
mean	0.435	0.296	0.665	mean	2.015	1.175	2.795

는 방출선이 어두운 때인 2001년($\Phi=0.56$)이 가장 작았다. 세 시기의 5개 O III Bowen 선의 상대적 세기 평균을 4개 O III 일반선의 상대적 세기 평균으로 나누어 보면, 각각 4.632, 3.970, 4.203로 모든 시기에 Bowen 선이 일반선보다 약 4배 정도 크다. 세 시기의 이들 세기 비는 감소하다가 증가하는 경향을 보이는데, WD와 GS를 모두 볼 수 있는 1998년($\Phi=0.24$)이 4.632배로 가장 컸고, GS가 WD를 가리게 되어 WD 주위에서 형성되는 방출선이 어두운 때인 2001년($\Phi=0.56$)이 3.970배로 가장 작았다.

한편, 이 세 시기에 관측한 He II $\lambda 4685.68$ 의 선 세기는 증가하고 있으며 5개 O III Bowen 선의 평균 세기는 감소하다가 증가하고 있다. 5개 O III Bowen 선의 평균 세기를 He II $\lambda 4685.68$ 의 선세기로 나누어 BFM의 효율 변화를 알아보았다. 앞에서 말한 바와 같이 O III Bowen 선의 평균 세기는 2002년이 2.795로 가장 높았지만 Table 11에 나타난 것처럼 효율은 1998년이 가장 높았고 2001년이 가장 낮았는데, 그 비는 약 1.9배 이었다.

이온화된 헬륨의 함량과 전자 밀도가 증가함에 따라 BFM의 효율이 증가하는 경향이 있으며 반대로 전자 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다 (Pereira et al., 1999). 우리의 경우, 세 시기의 자료를 가지고 경향성을 말할 수 없지만 BFM의 효율은 관측 시기의 위상 및 전자 온도와 관계가 있는 듯하다. 그러나 Pereira et al. (1999)과는 반대로 전자 온

도가 증가함에 따라 BFM의 효율이 증가하는 경향을 보이고 있다.

O III Bowen 선 광자수 조사

O III Bowen 선과 관련된 각각의 에너지 레벨에 출입하는 전이를 조사하여 O III Bowen 선의 광자수 평형을 알아보았다. Table 12는 세 시기에 관측된 O III 방출선의 세기 I ($10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$)와 $H\beta$ 의 Blue와 Red 성분의 합인 성운선 세기를 100으로 할 때의 상대적 세기 I_r 을 나타낸 것이다. 관측된 방출선의 세기로부터 계산한 N_e ($10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)은 관측년도별 각 방출선의 광자수를 의미한다.

같은 상위 레벨로부터 나오는 선들의 경우 광자수는 각각의 A_{ij} 에 비례하는데 Table 12의 자료를 보면, 관측된 O III 방출선의 광자수는 A_{ij} 천이 비와 대체로 일치함을 알 수 있다. 그러나 2002년도의 $\lambda 3757.21$ 과 $\lambda 3774.00$ 의 A_{ij} 천이 비가 1.4인데 반해 광자수 비는 약 11배 정도 크게 나왔다. 정확한 원인은 알 수 없지만, $\lambda 3774.00$ 이 매우 미약하게 출현했다는 것과 $\lambda 3757.21$ 주변에 O III $\lambda 3754.67$, He II $\lambda 3758.14$, [Fe VII] $\lambda 3759$, 그리고 O III $\lambda 3759.87$ 등이 복잡하게 혼합되어 분석하기가 어려워 다소 불확실하다고 볼 수 있다.

2p3d $^3P_2^o \rightarrow 2p3p \ ^3P_2$ 천이

Fig. 7에서 보는 바와 같이 He II Ly- α 에 의해 직

Table 11. Electronic temperature, intensity of He II $\lambda 4685.68$, mean intensity of O III Bowen lines, and efficiencies with Phase

	Phase (Φ)	T_e (K)	I_{4686}	Mean I (Bowen)	R (%)
1998	0.24	19,500	100	2.015	2.015
2001	0.56	11,000	109.6	1.175	1.072
2002	0.98	13,200	155.5	2.795	1.797

$I_{4686}=100=1.46 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$.

Table 12. Intensity I ($10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$), relative intensity I_r [$H\beta$ (nebular) I=100], and photon number N_e ($10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) of O III lines associated with the Bowen fluorescence

λ_{lab} (Å)	A_{ij} (s^{-1})	1998			2001			2002		
		I	I_r	N_e	I	I_r	N_e	I	I_r	N_e
3444.06	4.21e+7	-	-	-	-	-	-	107.8	20.68	1869.0
3754.67	7.53e+7	2.762	1.841	52.21	2.787	2.629	52.68	5.610	1.077	106.04
3757.21	5.56e+7	1.573	1.049	29.75	0.862	0.814	16.30	6.223	1.194	117.70
3759.87	9.79e+7	7.819	5.213	148.00	4.203	3.965	79.55	18.05	3.464	341.64
3774.00	3.91e+7	1.040	0.694	19.76	0.608	0.573	11.55	0.575	0.110	10.92
3791.26	2.24e+7	1.511	1.007	28.84	0.935	0.882	17.85	1.297	0.249	24.75
$H\beta$ (neb)	-	150.0	100.0	3670.9	106.0	100.0	2594.1	521.0	100.0	12750

접 들뜨는 $2p3d \ ^3P_2$ 레벨(40.85 eV)에서 떨어지는 첫 번째 붕괴 선은 $\lambda 3444.06$ 이외에 5개 있으며, 부가적으로 $\lambda 2187.02$ 와 $\lambda 2197.48$ 이 있다. 우리의 고분산 분광관측 자료 범위가 주로 가시광선 영역이므로 2002년도만 $\lambda 3444.06$ 이 뚜렷하게 나타났는데 광자수는 $1869.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 다른 O III Bowen 선에 비해 광자수가 매우 크다.

2p3p $^3D_1 \rightarrow 2p3s \ ^3P_0^o$ 천이

$\lambda\lambda 2836.28, 2818.66, 2807.90$ 인 $2p3d \ ^3P_2^o$ (40.85 eV)로부터의 천이에 의해 나타나는 3개의 레벨 $2p3p \ ^3D_{1,2,3}$ 은 아래와 같이 $\lambda 3750\text{-}3815\text{\AA}$ 사이에 약한 선 6개를 방출한다.

첫 번째, $2p3p \ ^3D_3$ (36.48 eV)에서 $2p3s \ ^3P_2^o$ 로 붕괴는 $\lambda 3759.87$ 선을 만드는데, 이 선은 $\lambda 303.800$ 에 의한 두 번째 붕괴 선으로 [Fe VII] $\lambda 3759$ 과 혼합되어 DIPSO에 의한 성분 분석을 어렵게 하여 불확실하지만 세 시기 광자수를 구할 수 있었는데, 각각 $148.0 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $79.55 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, $341.64 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로 다른 O III 선들보다 크다.

두 번째, $2p3p \ ^3D_2$ 레벨(36.45 eV)에서 $2p3s \ ^3P_{1,2}^o$ 로 붕괴는 두 개의 O III $\lambda 3754.67$ 과 $\lambda 3791.26$ 을 형성한다. 이 두 선의 광자수 합은 관측년도 별로 차이가 있는데 1998년 $81.1 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 2001년 $70.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 2002년 $130.8 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이다. 우리는 이 두 선의 광자수 합을 그 부모선인 $\lambda 2818.66$ 의 광자수 합과 비슷하지 알아보려고 하였으나 우리의 관측 파장 범위 밖이므로 비교할 수 없었다.

세 번째, $2p3p \ ^3D_1$ 레벨(36.43 eV)에서 $2p3s \ ^3P_{1,2}^o$ 로 붕괴는 세 개의 선 $\lambda\lambda 3757.21, 3774.00, 3810.96$ 을 형성한다. $\lambda 3810.96$ 은 우리가 관측한 세 시기 모두 나타나지 않았으나 다음의 두 개 선, 즉 $\lambda 3757.21$ 과 $\lambda 3774.00$ 은 우리의 3개 관측년도 스펙트럼에 모두 나타났다. $\lambda 3757.21$ 은 3개 관측년도 모두 He II $\lambda 3758.14$ 바로 옆에 혼합되어 나타났으며 1998년과 2001년은 미약하게, 2002년은 다른 해보다 4-7배 정도 강하게 나타났다. $\lambda 3774.00$ 은 3개 관측년도 모두 다른 O III Bowen 선 보다 아주 미약하게 나타났다. $\lambda 3757.21$ 과 $\lambda 3774.00$ 두 선의 광자수의 합은 1998년 $49.5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 2001년 $27.9 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 2002년 $128.6 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이다. 이처럼 $\lambda 3757.21$ 과 $\lambda 3774.00$ 가 세 시기 모두 나타나는 것으로 보아 Dalgarno and Sternberg (1982)가 밝힌 대로 CE 과정으로 방출

될 가능성이 높다고 볼 수 있다. 그러나 우리의 관측 파장 범위 밖에 있는 상위선인 $\lambda 2807.90$ 의 세기를 알 수 없었으므로 CE 과정에 의한 기여 정도를 더 정확히 알 수는 없었다.

결론

미국 Lick 천문대의 HES를 이용하여 위상이 다른 세 시기 1998년 9월 17일 ($\phi=0.24$), 2001년 8월 30일 ($\phi=0.56$), 2002년 8월 11일 ($\phi=0.98$)에 관측한 공생별 AG Peg의 O III 및 He II를 조사하여 선폭, 그리고 선세기 등을 측정하였다.

우리는 Eriksson et al. (2005)이 관측하지 못한 $\lambda 3400\text{-}3800\text{\AA}$ 의 O III Bowen 선 6개를 관측하였다. Bowen 선의 선폭이 일반선의 선폭보다 클 것으로 예상하였으나, O III Bowen 선의 평균 FWHM은 O III 일반선의 평균 FWHM과 크게 차이 나지 않았다. 또한 He II의 이온화 에너지가 54.4 eV, O III의 이온화 에너지가 54.9 eV이므로 O III의 방출 영역이 He II의 방출 영역과 겹칠 가능성이 매우 높고 FWHM이 비슷할 것으로 생각하였으나, O III Bowen 선의 선폭은 He II $\lambda 4685.68$ 의 반 정도였다. 그러나 O III Bowen 선과 O III 일반선의 세기를 비교해 보면, O III Bowen 선이 일반선보다 1998년은 약 4.6배, 2001년은 약 4.0배, 그리고 2002년은 약 4.2배 높게 나타났다. 선폭이 비슷하다는 사실은 O III 일반선과 Bowen 선이 같은 지역에서 방출되었음을 암시한다. O III와 He II가 이온화 에너지가 같지만 선폭이 크게 다르므로 방출 지역이 다르며, 같은 O III 선일지라도 세기가 4배 크다는 것은 일반선과는 다른 기작에 의해 들떠 형성된 것이라고 생각할 수 있다.

현재까지 알려진 O III 선의 들뜸 기작은 Bowen 공명 형광, CF, 분리전자 재결합, CE이다. 우리의 분광자료에 나타난 O III 선세기는 전반적으로 A_{ij} 가 작은 Bowen 선이 A_{ij} 가 큰 일반선 보다 매우 크게 관측되었는데, Bowen 공명 형광이 가장 큰 기여를 하는 것 같다. Dalgarno and Sternberg (1982)와 Aller (1984)에 의하면 3D_1 항에서 붕괴하여 나오는 선인 $\lambda 3774.00$ 과 $\lambda 3757.21$ 은 거의 전적으로 CE 과정에 기인한다고 하였으며, Kastner and Bhatia (1996)는 $\lambda 5592.25$ 가 오직 CE로부터 나오는 선이라고 하였다. 우리의 분광자료에는 세 시기 모두 CE 선 $\lambda 5592.25$ 와 $2p3p \ ^3D_1$ 에서 붕괴하여 나오는

$\lambda 3810.96$ 이 나타나지 않았다. 그러나 $\lambda 3774.00$ 은 매우 미약하게, $\lambda 3757.21$ 은 약하게 나타났으나 확인할 수 있었다. 이점에서 CE 과정이 O III Bowen 선의 관측된 선세기에 약간 기여한다고 말할 수 있으나, CE 기여도의 의미있는 해석을 위해서는 $\lambda 5592.25$ 세기의 정확한 측정이 필요하다.

천이 확률 A_{ij} 를 이용하여 O III Bowen 선의 이론적 세기(I_{pred})를 계산하였다. 그리고 우리의 결과 및 다른 연구자들이 여러 천체를 관측하여 측정된 세기와 비교하였다. O III $\lambda 3759.87$ 만 제외하고 우리의 결과를 포함한 모든 연구자들의 관측된 세기가 이론적 세기보다 크게 나타났다. 이론적 세기가 작은 이유는 천이확률만 고려했다는 점과 He II Ly- α 가 O I $\lambda 303.800$ 로만 100% 흡수되었다고 가정했다는 점 때문에 생긴 것으로 판단된다.

O III Bowen 선 중에서 $\lambda 3791.26$ 과 $\lambda 3754.67$ 의 관측한 세기 비를 Saraph and Seaton (1980), Bhatia and Kastner (1993), Froese-Fischer (1994)의 이론적 모델과 비교할 수 있었다. $\lambda 3791.26$ 과 $\lambda 3754.67$ 의 관측한 세기 비는 세 시기 중에서 GS가 WD를 가리는 2001년만이 Saraph and Seaton (1980)의 이론적 모델과 가장 잘 일치하였으며 1998년과 2002년은 차이가 있었다. 세 시기의 위상에 따라 WD와 GS의 위치가 다르고 O III 선의 세기가 달라지는데 이론적 모델은 이러한 조건을 모두 만족하지 못해 생기는 것으로 볼 수 있다.

Bowen 선 광자로 전환되는 He II Ly- α 광자의 비인 BFM의 효율 R은 $\lambda 3444.06$ 이 나타난 2002년만 0.47로 계산하였다. 다른 두 시기는 효율 계산에 필요한 $\lambda 3444.06$ 을 관측할 수 없었으므로 BFM의 효율을 구할 수 없었다. 이에 따라 세 시기의 효율 변화를 알아보고자 He II $\lambda 4685.68$ 의 세기를 100으로 한 O III 일반선과 Bowen 선의 비를 구하였는데, 일반선이나 Bowen 선 모두 2002년($\Phi=0.98$)이 가장 높았고, 2001년($\Phi=0.56$)이 가장 작았다. 그러나 세 시기에 관측한 He II $\lambda 4685.68$ 의 선세기가 증가한다는 사실을 고려하면 효율은 1998년이 가장 높았고 2001년이 가장 낮았는데, 그 비는 약 1.9배 이었다. Pereira et al. (1999)은 BFM의 효율이 전자 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 있다고 하였다. 그러나 우리의 경우, 세 시기의 자료를 가지고 경향성을 말할 수 없지만 BFM의 효율은 위상 및 전자 온도와 관계가 있는 듯하며 전자 온도가 증가함에 따라 효

율이 증가하고 있다.

AG Peg에서 관측된 O III Bowen 선의 세기로부터 광자수를 계산하여 각 레벨로부터 출입하는 붕괴를 알아보려고 하였지만 상위 레벨에 해당하는 $\lambda 2800-2840$ 사이의 관측 자료가 없으므로 광자수 평형을 비교할 수 없었다. 세 시기에 관측된 O III Bowen 선의 광자수는 2002년도의 $\lambda 3757.21$ 과 $\lambda 3774.00$ 만을 제외하고 A_{ij} 천이 비와 대체로 일치하였다. 그렇지만 O III Bowen 형성 기작과 광자수 평형의 정확한 연구를 위해서는 EUV 관측 자료가 절실히 필요하다.

앞선 연구자들의 Bowen 선 연구가 주로 행성상 성운이었다는 점과 공생별의 경우는 최근 10년 이내 연구가 매우 적었으며 또한 위상 변화를 고려하지 않은 점으로 볼 때, 우리의 연구 결과는 공생별 위상 변화에 따른 관측과 이론적 세기 비교, BFM의 효율에 영향을 주는 물리적·기하학적 조건 및 경향성 연구에 도움을 줄 것으로 본다. 앞으로 우리는 O III Bowen 선의 마지막 붕괴인 $2p3s \ ^3P$ 에서 바닥상태 $2p^2 \ ^3P$ 로 떨어지는 O III $\lambda 374$ 근처의 6개 선과 N III $\lambda 374$ 근처의 3개 선의 파장 일치로 형성되는 $\lambda 4000-4700\text{\AA}$ 의 N III 선 형성 기작과 N III 레벨에 대한 에너지 평형에 관한 연구를 진행할 것이다.

감사의 글

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

References

- Aller, L.H., 1984, Physics of thermal gaseous nebulae. Astrophysics and Space Science Library. 112, 360.
- Belczynski, K., Mikolajewska, J., Munari, U., Ivison, R.J., and Friedjung, M., 2000, A catalogue of symbiotic stars. Astronomy and Astrophysics Supplement, 146, 407-435.
- Berman, L., 1932, The Spectrum and Temperature of T Coronae (Nova 1866). Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 44, 318-323.
- Bhatia, A.K. and Kastner, S.O., 1993, Collision Strengths

- and Transition Rates for O III. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 54, 133-164.
- Bhatia, A.K., Kastner, S.O., and Behring, W.E., 1982, The solar O III spectrum. I-Photoexcitation of EUV lines by He II Lyman-alpha. *Astrophysical Journal*, 257, 887-895.
- Bowen, I.S., 1934, The Excitation of the Permitted O III Nebular Lines. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 46, 146-148.
- Bowen, I.S., 1935, The Spectrum and Composition of the Gaseous Nebulae. *Astrophysical Journal*, 81, 1-16.
- Boyarchuk, A.A., 1969, SYMBIOTIC STARS. Non-Periodic Phenomena in Variable Stars of IAU Colloquium, 65, 395.
- Burgess, A. and Seaton, M.J., 1960, The Abundance of Oxygen in the Planetary Nebula NGC 7027. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 121, 76-96.
- Contini, M., 1997, The Evolving Structure of AG Pegasi, Emerging from the Interpretation of the Emission Spectra at Different Phases. *The Astrophysical Journal*, 483, 887-898.
- Dalgarno, A. and Sternberg, A., 1982, The excitation of the triplet lines of O^{2+} in nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 200, 77-80.
- Deguchi, S., 1985, Bowen fluorescence mechanism in X-ray binaries. *Astrophysical Journal*, 291, 492-504.
- Eriksson, M., Johansson, S., Wahlgren, G.M., Veenhuizen, H., Munari, U., and Siviero, A., 2005, Bowen excitation of N III lines in symbiotic stars. *Astronomy and Astrophysics*, 434, 397-404.
- Fang, X. and Liu, X.W., Very deep spectroscopy of the bright Saturn nebula NGC 7009-I. Observations and plasma diagnostics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 415, 181-198.
- Froese-Fischer, C., 1994, Allowed transitions and intercombination lines in C III and C II. *Physica Scripta*, 49, 323.
- Grandi, S.A., 1980, On I 8446 A emission in Seyfert 1 galaxies. *Astrophysical Journal*, 238, 10-16.
- Harrington, J.P., 1972, The Bowen Fluorescence Mechanism in Planetary Nebulae. *Astrophysical Journal*, 176, 127-137.
- Hyung, S., 2014, Spectroscopic Study of the Symbiotic Star CI Cyg. *Journal of Korean Earth Science Society*, 35, 313-323.
- Hyung, S. and Aller, L.H., 1995, The optical spectrum of NGC 7009-II. A high-excitation bright ring region on the minor axis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 273, 973-991.
- 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.
- Kallman, T. and McCray, R., 1980, Efficiency of the Bowen fluorescence mechanism in static nebulae. *Astrophysical Journal*, 242, 615-627.
- Kastner, S.O. and Bhatia, A.K., 1984, On Bowen enhancement of the N III spectrum under solar and nebular conditions. *Astrophysical Journal*, 287, 945-951.
- Kastner, S.O. and Bhatia, A.K., 1996, The Bowen fluorescence lines: overview and re-analysis of the observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 279, 1137-1156.
- Kenny, H.T., 1995, Symbiotic Stars: The Geometry of the Radio Emitting Regions. PhD dissertation. University of Calgary, Alberta, Canada, 292.
- Kenyon, S.J., 1986, The symbiotic stars. PhD dissertation. Harvard University, Boston, Cambridge University Press, 295.
- Kenyon, S.J., Proga, D., and Keyes, C.D., 2001, The Continuing Slow Decline of AG Pegasi. *The Astronomical Journal*, 122, 349-359.
- Kim, H. and Hyung, S., 2008, Chemical abundances of the symbiotic nova AG Pegasi. *Journal of the Korean Astronomical Society*, 41, 23-37.
- Lee, K.H., Lee, S.J., and Hyung, S., 2017, An Analysis of the H Emission Line Profiles of the Symbiotic Star AG Peg. *Journal of Korean Earth Science Society*, 38, 1-10. (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)
- Likkell, L. and Aller, L.H., 1986, Observations of the Bowen fluorescence mechanism in planetary nebulae. *Astrophysical Journal*, 301, 825-833.
- Liu, X.W. and Danziger, J., 1993, Observations of the Bowen fluorescence mechanism and charge transfer in planetary nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 261, 465-495.
- Liu, X., Danziger, J., and Murdin, P., 1993, Observations of the Bowen fluorescence mechanism and charge transfer in planetary nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 262, 699-710.
- McKenna, F.C., Keenan, F.P., Hambly, N.C., Prieto, C.A., Rolleston, W.R.J., Aller, L.H., and Feibelman, W.A., 1997, The Optical Spectral Line List of RR Telescopii. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 109, 225-239.
- Pereira, C.B., de Araujo, F.X., and Landaberry, S.J.C., 1999, Bowen fluorescence lines in symbiotic stars-I. Observational data, line ratios and efficiency. *MNRAS*, 309, 1074-1084
- Proga, D., Kenyon, Scott J., and Raymond, J.C., 1998, Illumination in Symbiotic Binary Stars: Non-LTE Photoionization Models. II. WIND Case. *The Astrophysical Journal*, 501, 339-356.
- Raymond, J.C., 1978, Bowen fluorescence in the solar

- transition region. *Astrophysical Journal*, 224, 259-264.
- Sabbadin, F., Turatto, M., Ragazzoni, R., Cappellaro, E., and Benetti, S., 2006, The structure of planetary nebulae: theory vs. practice. *Astronomy and Astrophysics*, 451, 937-949.
- Saraph, H.E. and Seaton, M.J. 1980, Oscillator strength for O III and Bowen fluorescent mechanism. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 193, 617-629.
- Seaton, M.J., 1979, Interstellar extinction in the UV. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 187P, 73-76.
- Selvelli, P., Danziger, J., and Bonifacio, P., 2007, The Hell Fowler lines and the OIII and NIII Bowen fluorescence lines in the symbiotic nova RR Telescopii. *Astronomy and Astrophysics*, 464, 715-734.
- Storey, P.J. and Hummer, D.G., 1995, Recombination line intensities for hydrogenic ions-IV. Total recombination coefficients and machine-readable tables for $Z=1$ to 8, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 272, 41-48.
- Vogel, M. and Nussbaumer, H., 1994, The hot wind in the symbiotic nova AG Pegasi. *Astronomy and Astrophysics*, 284, 145-155.
- Wallerstein G., Schachter J., Garnavich P. M., and Oke J. B., 1991, Observation of Bowen fluorescence and other phenomena in five symbiotic stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 103, 185-193.
- Weymann, R.J. and Williams, R.E., 1969, The Bowen Fluorescence Mechanism in Planetary Nebulae and the Nuclei of Seyfert Galaxies. *Astrophysical Journal*, 157, 1201-1213.

Manuscript received: August 2, 2017

Revised manuscript received: August 31, 2017

Manuscript accepted: September 22, 2017