

행성상 성운 NGC 6881의 운동학적 특성과 기하학적 구조

이상민 · 형 식*

충북대학교 지구과학교육과, 361-763 충북 청주시 개신동 12

Kinematics and Geometrical Structure of the Planetary Nebula NGC 6881

Sang-Min Lee and Siek Hyung*

School of Science Education, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

Abstract: The Planetary nebula NGC 6881 displays quadrupole morphology and it also has a jet feature in its image. We investigated the line profiles of the optical region spectral emission lines, using the Hamilton Echelle Spectrograph (HES) at the Lick observatory. The HES data obtained in this study was the radiation coming from the inner region within the diameter of 4 second of arc. Expansion velocity was obtained, based on the strong emission line profiles of e.g. HI, HeI, HeII, [OIII], [NII], [ArIII], [SII], and [SIII], using the IRAF and StarLink/Dipso reduction packages. The HI recombination lines showed one single peak profile, while the He and forbidden strong lines displayed double peaks. The results of this study show that the outflow velocity of gas increases radially outwards due to the central stellar radiation pressure. It was concluded that three central rings appeared in the HST image are the result of a combined structure of bipolar cones (seen in e.g. HI lines) and a ring (seen in He, [SIII] lines) in projection.

Keywords: ISM, planetary nebula, spectroscopic observation, NGC 6881

요약: 행성상성운 NGC 6881은 4극자형태를 이루고 있고 JET이 영상에 나타난다. Lick 천문대에 있는 Hamilton Echelle Spectrograph(HES)을 사용하여 관측한 가시광 영역의 방출선 스펙트럼의 선윤곽을 연구하였다. 우리가 연구하는 HES 분광 자료는 직경이 4초각인 영역의 안에서 관측된 것이다. IRAF와 StarLink/Dipso 분석프로그램을 사용하여 HI, HeI, HeII, [OIII], [NII], [ArIII], [SII], [SIII] 등의 강한 선들의 선윤곽을 통해 팽창속도를 얻었다. HI선의 경우 단일 정상을 보이는 반면, He과 다른 금지선들은 두 개의 정상 분포가 겹치는 특성을 보였다. 가스 유출 속도는 중심 별의 복사압에 의해 바깥쪽으로 갈수록 가속되는 것으로 분석되었다. 우리는 팽창속도자료를 통해, HST 영상에서 보여진 중심부분의 세 개의 고리는 양극콘(HI 선등에 나타남)과 고리(He, [SIII]선에 특성이 보임)의 복합 구조가 투영된 것으로 결론지었다.

주요어: 성간물질(ISM), 행성상 성운, 분광관측, NGC 6881

서론

행성상성운(planetary nebula, PN)이란 푸른색을 띠는 고온의 별 주위에 있는 기체 구각(shell)이다. 별의 헬륨 연소단계에서 별의 내부구조는 역학적으로 불안정하게 되는데 이 때 어떤 별들은 맥동 운동을 Asymptotic Giant Branch(AGB)에서 맥동운동을 시작하여, 이 후에 자신의 외곽부를 온통 날려버리기도 한다.

다. AGB이후 별의 중심부는 표면 온도가 50,000-100,000K에 이르는 고온의 상태로 중앙에 남게 되고 외곽부의 기체가 10-30 km/s로 팽창하여 행성상성운이 된다. 수만 년이 경과하면 행성상성운은 성간 물질에 그대로 섞여 버리고, 중심별은 식어서 백색 왜성으로 된다. 우리 은하에는 총 50,000개의 행성상성운이 있는 것으로 추산되며, 이 중에 실제로 관측된 것은 1000개 정도이다. NGC 6881은 타원형의 가스로 둘러싸여져 있는데 질소가 많은 별이 그렇듯이 특이한 운동학적 모양을 가지고 있을 것이라고 추정된다.

행성상성운에서 팽창하는 가스체의 스펙트럼인 방출선은 행성상성운의 운동학적 특징을 자세히 알려주

*Corresponding author: hyung@chungbuk.ac.kr

Tel: 82-43-261-2726

Fax: 82-43-271-0526

며 성운의 화학 원소비는 행성상성운의 진화 과정과 초기 질량에 대한 정보를 준다. 따라서 행성상성운의 방출선 연구는 태양과 같은 정도의 질량을 가진 별의 진화에 대한 단서를 얻게 해 줄 것이다. 행성상성운 NGC 6881($l = 74.5^\circ$, $b = 2.1^\circ$)은 태양의 항점 부근에 위치하며($RA = 20^h 10^m 52.5^s$, $Dec = +37^\circ 4' 41.2''$), 태양에 대해 -14.4 km/s 의 시선속도를 가지고, 약 2-3 kpc의 거리에서 태양을 향해 접근하고 있다(Acker et al., 1992). 이 행성상성운의 크기는 $25''$ 이고 등급은 13.^m9이다. 일반적으로 질소(N)를 많이 포함한 천체로 알려져 있고, 특이한 운동학적 특징을 가지고 있다. NGC 6881은 지상 망원경을 통해서 영상을 연구하기는 힘든 천체인데, $\lambda = 6 \text{ cm}$, 3 cm의 전파관측을 통해서 보다 좋은 영상이 얻어졌다(Hua et al. 1993). N이 풍부한 천체는 일반적으로 질량이 큰 별에서 진화한 것으로 알려졌는데, 최근 허블망원경(HST)에 의해 관찰한 NGC 6881은 4극의 형태를 띠고 있음이 밝혀졌다(Kwok and Su, 2000). 이러한 영상 연구는 3차원적인 구조를 확인하는데 한계가 있어 고분산 분광연구를 통한 운동학적 특성을 분석한 후 기하학적 연구가 필요하다.

우리는 NGC 6881의 분광관측 자료를 분석하여 성운 중심부의 기하학적 특성을 연구하고자 한다. 이를 확인하기 위하여 Lick 천문대의 고분산분광기인 HES(Hamilton Echelle Spectrograph)를 이용하여 관측한 3700-10050Å의 자료를 분석하였다. 제 2절에서는 분광자료의 분석과정을, 제 3절에서는 NGC 6881의 방출선에서 팽창속도를 구하여 반경에 따라 속도가 어떻게 변하는지를 분석하고, 기하학적인 구조에 대한 모델을 제시하여 논의 하였다. 제 4절에서는 이 연구의 결과를 요약하였다.

분광 관측 및 자료 분석

분광자료

가시광영역의 분광자료는 형식과 Aller가 1998년 11월 18일 미국 San Jose 근처의 Mt. Hamilton의 Lick Observatory에서 3 m 망원경과 고분산 분광기인 HES를 사용해 얻은 자료이다. 사용된 CCD 검출기는 2048×2048 화소로 한 번의 노출로서 3700Å에서 10050Å까지 영역의 분광 자료들이 얻어지는데, 모든 분광선에 대한 자세한 분석이 진행 중이지만, 이 논문에서는 강한 분광선을 선택하여 분석 연구하였다.

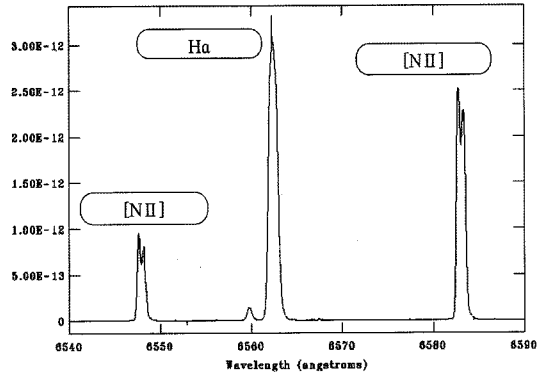


Fig. 1. The flux calibrated HES spectrum, showing H α , [NII]6548Å, & [NII]6583Å lines. Exposure time = 2 hours.

HES의 슬릿크기는 $4'' \times 1.2''$ 로, 성운의 일부분인 중심 부분만이 우리의 연구에서 분석되었다. $4''$ 는 공간 방향이고, $1.2''$ 는 파장방향인데, 파장방향 $1.2''$ 의 선택으로 인한 파장 분해능은 5000Å 의 파장에서 약 $0.2\text{Å}/\text{pixel}$ 이다. 미약한 선들을 측정하기 위해서 매우 장시간인 7200초(즉 2시간) 노출을 하였다. 강한 방출선들은 포화(saturation)되므로, 이 선들을 측정하기 위해 600초(10분)의 짧은 시간의 노출이 되었는데, 우리는 두 자료를 모두 연구에 사용하였다.

Fig. 1에 2시간 노출한 HES spectrum 자료를 IRAF를 이용해, 암잡음(dark count), 우주선(Cosmic Rays) 제거 등의 전처리 과정과, 파장 동정(wavelength calibration), 대기 소광 보정(atmospheric extinction correction), 플럭스를 보정(flux calibration)등을 통해 얻은 스펙트럼을 제시하였다. 강한 분광선인 H α , [NII]선의 스펙트럼 등 여러 선이 보인다. 허용선 또는 재결합선인 HeII 6560Å, H α 6563Å선에는 하나의 가우스 프로파일(single gaussian profile)이 보이지만, 충돌에 의해 생성된 금지선 [NII]6548, 6583Å선에는 두 개의 가우스 윤곽을 가지는 두개의 봉우리(double peak, dp)가 보인다. HES 스펙트럼 자료를 측정하여 H β 선세기를 $I(H\beta) = 100.0$ 으로 표준화하여 구한 상대적 선세기를 Table 1에 제시하였다. 첫째 행부터 관측된 파장, 실험실 파장, 방출선을 내는 이온, $I(H\beta) = 100.0$ 을 기준으로 정리한 성간소광은 보정되지 않은 선세기, 평균계급근(RMS)% 오차의 값이 주어졌다. 오차는 두 노출에서 2번 관측되는 경우만 제시하였다. 첫째 행에 주어진 관측된 파장은 행성상성운 관측 당시의 지구 공전속도, 자전 속도를

Table 1. NGC 6881 spectral line intensities

λ_{obs} (Å)	λ_{lab} (Å)	Ion	I (H β = 100)	RMS error (%)
4340.53	4340.47	HI	36.22	
4861.52	4861.33	HI (H β)	100.00	
6562.86	6562.82	HI (H α)	1032.76	6.0
8413.09	8413.32	HI	3.65	
8545.13	8545.38	HI	5.64	
8751.00	8750.48	HI	10.72	
8864.25*	8862.78	HI	5.05	
9015.90*	9014.91	HI	31.41	
9228.67	9229.02	HI	44.26	4.0
5875.88	5875.67	HeI	31.62	2.0
7065.19	7065.28	HeI	28.51	13.0
7282.08*	7281.35	HeI	4.03	
7177.83	7177.50	HeII	2.13	
7231.24	7231.12	CII	0.42	
8196.74	8196.48	CIII	1.48	
3728.80	3728.82	[OII]	9.72	
5006.95	5006.84	[OIII]	1774.19	9.0
4959.06	4958.92	[OIII]	526.02	10.0
6583.46	6583.45	[NII]	709.58	1.0
4076.31	4076.35	[SIII]	1.02	
9068.50	9068.90	[SIII]	368.13	46.0
9530.51	9531.00	[SIII]	2023.02	
8433.76	8433.85	[CIII]	0.79	
7135.78	7135.78	[ArIII]	145.21	
7751.18	7751.43	[ArIII]	42.46	
7263.12	7262.96	[ArIV]	2.35	

*: poorly measured due to the atmospheric absorption.

고려하여 구한 지구에 대한 행성상 성운의 시선속도인 -0.03 km/s(2 hr), -0.13 km/s(10 min)을 보정하였다. 또한 지구의 공전속도가 행성상 성운에 미치는 영향을 제거한 후, 관측된 HES 자료 중 비교적 강한 선들, 즉 $I(H\beta) = 100$ 을 기준으로 선세기가 1.0이상인 선들의 관측된 파장과 실험실 파장을 비교하여, 행성상 성운이 태양에 대해 -18.85 km/s로 움직이는 시선속도 값을 구하였다. 우리가 구한 이 시선속도는 Acker et al.(1992)의 값과 약간 차이가 난다. 이는 사용된 분광기가 행성상 성운의 어느 부분을 관측했는가에 기인한다. 즉 Acker et al.이 인용한 자료는 저분산 분광관측이므로 NGC 6881의 외곽지역까지 포함된 가스로부터 구한 시선속도 값이다. 반면 우리의 자료는 중심부분 가스의 시선속도인데, 중심부분이 우리에게 좀 더 빨리 다가오는 운동학적 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

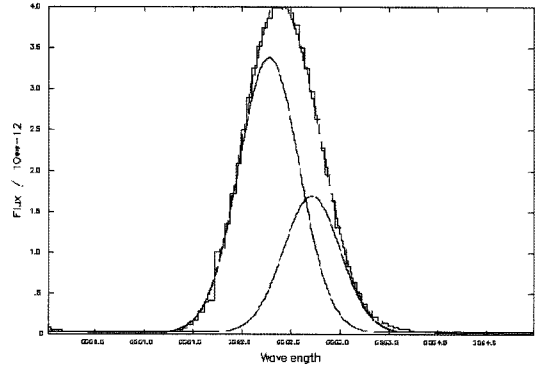


Fig. 2. H-alpha 6563Å line profile.

선분광 자료 분석

선분광의 분석에는 유럽 ESO에서 만든 Starlink/Dipso라고 하는 프로그램을 사용하였다. 대부분의 분광자료들의 선분광은 Gaussian 형태를 보이는데 수소를 제외한 나머지 원소들은 두 개의 봉우리를 가진다. Starlink/Dipso 작업을 통해 두 개의 Gaussian 분포로 정확히 분리가 되고 이를 바탕으로 성운의 운동학적 특징을 조사할 수 있었다.

수소(H), 헬륨(He): Fig. 2은 10분 노출한 스펙트럼에서 추출한 H α -6563Å 방출선이며 하나의 Gaussian line을 보이고 있다. 하지만 Starlink/Dipso 작업 결과 두 개의 선으로 분리가 되었고 이것으로 보아 다가오는 앞의 방출선의 세기가 뒤에 멀어지는 방출선의 세기보다 2.16배 더 강하다는 것을 알 수 있다.

HeI-7281Å의 방출선은 Fig. 3에서 보듯이 선의 peak 부분이 H α 선처럼 매끈하지 않고 두 개의 봉우리가 붙어 있는 형태를 갖는다. 방출선은 앞쪽의 선 세기가 강하고 뒷부분이 약하게 나왔으나 Starlink/Dipso로 작업한 결과 비슷한 선세기를 가진 두 개의 선으로 분리가 되었다. HeI을 방출하는 지역의 팽창하는 구각(shell)이 비교적 균일함을 알 수 있다. 선 플럭스(line flux)값을 자세히 비교하면 파장이 긴 쪽, 즉 관측자 쪽에서 멀어지는 쪽이 선의 봉우리 높이가 낮음에도 불구하고, 다가오는 쪽의 선 세기보다 약 1.1배 정도이다. 즉 HI에 안쪽에 있는 HeI을 방출하는 지역은 상대적으로 대칭적인 구조임을 알 수 있다.

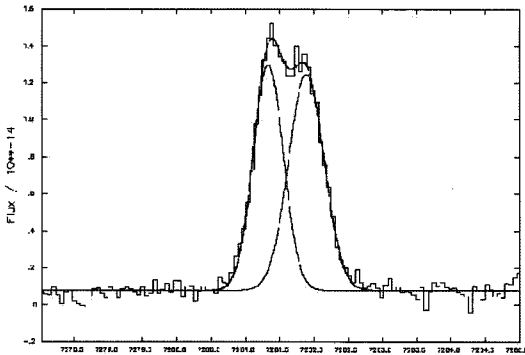


Fig. 3. Hel 7281Å line profile.

다른 금지선들: Table 2에 H α , HeI7281, [SIII], [ArIII] 등에 대한 파장 및 선세기의 중간지점에서 구한 선폭, 즉FWHM(Full width at half maximum)과 선의 플럭스 세기(line flux)값을 제시하였다. 이 외에도 [SII], [OII], [OIII], [CIII], [ArIV] 등 여러 가지 방출선의 선윤곽을 Starlink/Dipso를 이용하여 분석하였다(Table 4에 FWHM에서 구한 팽창속도가 주어짐). S의 금지선인 [SIII]-9068Å도 두 개의 선으로 분리되는데, 앞쪽의 방출선 즉 관측자 쪽으로 다가오는 가스에서 나온 선의 세기가 멀어지는 선의 세기보다 1.9배 강하게 측정된다. 이로 미루어보아 앞쪽 구각의 가스양이 많고, 또한 가스 온도도 약간 높은 것을 알 수 있다. 반면, [ArIII]-7135Å 방출선은 He의 경우와 유사하게, 파장이 긴 쪽, 멀어지는 쪽에서 나오는 선이 더 강하게 관측된다. Ar은 다가오는 선의 세기는 부분적으로 밀집된 지역에서 나오기 때문 최대의 높이는 크지만, 전반적으로 멀어지는 쪽의 구각에 많은 가스가 분포하고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Line flux measurement for each component

Line	Doppler Shift	Centre (Å)	FWHM (Å)	Line Flux (10^{-14} erg/Å/s/cm 2)
HI6563	blue	6562.277 \pm 0.024	0.729 \pm 0.024	260.4 \pm 27.38
	red	6562.713 \pm 0.043	0.680 \pm 0.024	120.4 \pm 27.01
HeI7281	blue	7281.337 \pm 0.019	0.520 \pm 0.022	0.675 \pm 0.048
	red	7281.894 \pm 0.014	0.610 \pm 0.029	0.758 \pm 0.048
[SIII] 9068	blue	9067.738 \pm 0.005	0.529 \pm 0.013	104.5 \pm 3.483
	red	9068.229 \pm 0.008	0.448 \pm 0.017	55.44 \pm 3.454
[ArIII] 7135	blue	7135.055 \pm 0.002	0.380 \pm 0.004	19.14 \pm 0.449
	red	7135.508 \pm 0.006	0.585 \pm 0.007	31.52 \pm 0.476

HI and [SIII] are strong in the approaching shell, while HeI and [ArIII] are weak.

각 선의 선폭증대 요소

선폭 증가의 기준은 선세기의 최대 높이의 반(1/2)이 되는 지점에서의 폭(width), 이것을 FWHM(full width with half maximum)이라고 한다. 하지만 관측된 분광선은 폭은 여러 가지 이유로 증가하는데, 이러한 선폭증가에 기여하는 주요 요소는 다음의 5가지가 있다.

(1) $\Delta\lambda_{exp}$: 행성상성운의 구각(shell)의 팽창(V_{exp})에 의해 선폭이 증가된다. 모든 구각이 같은 속도로 팽창하는 경우, 시선방향의 속도는 구체의 중심부분을 관측하는 경우 가까워지는 성분과 멀어지는 부분으로 선폭을 증가시킨다. 하지만, 구각 가스의 팽창 속도가 반지름에 따라 증가하거나 감소하는 경우 팽창속도는 단순히 선폭에서 구할 수 없다.

(2) $\Delta\lambda_{th}$: 가스 자체의 내부 열적운동에 의해서도 선폭이 증가되는데, $V_{th} = 21.6 \times 10^{-2} \times T_e^{0.5} \times m^{-0.5}$ km/s (Clegg et al. 1999)을 사용하여 V_{th} 를 구할 수 있다. 여기서 m은 각 원소의 원자량이고, T_e 는 전자온도이다. 일반적으로 [OIII]이나 HI선은 성운의 평균온도에 해당하므로 다른 선들의 온도를 계산할 수 없으므로 보통 [OIII]에서 구한 온도 정보를 이용 한다. NGC 6881의 전자의 온도는 Hyung and Feibelman(2004)에서와 같은 방법으로 diagnostic 선인 [OIII]5009,4959와 [OIII]4363의 선세기 이용하여 약 13,000K를 얻었는데, 우리는 이 성운의 가스의 온도가 $T_e = 13,000K$ 라고 가정하여 여러 원소의 열적 선폭증가 값을 구하여 Table 3에 제시하였다.

(3) $\Delta\lambda_{fine-s}$: 가령 H α 6563Å 선의 경우, 주양자수 $n=3 \rightarrow 2$ 인 단일 천이인 것처럼 일반적으로 알고 있지만, 사실은 여러 미세한 경로를 천이하여 파장이

Table 3. Thermal velocity, V_{th}

Element	Atomic weight	V_{th} (km/s)
H	1	24.628
He	4	12.314
C	12	7.109
N	14	6.582
O	16	6.157
Ne	20	5.507
Mg	24	5.027
S	32	4.354
Cl	35.5	4.133
Ar	40	3.894
Mn	55	3.321
Fe	56	3.291

$T_e = 13000K$ assumed.

6563Å인 주위에 여러 선이 형성되므로 이러한 여러 선이 경로를 고려하여 선폭의 증가가 어느 정도 인지를 구해야 한다. 이러한 미세구조(fine-structure) 선폭증가는 주로 허용선에서 크게 나타나는데, 우리의 연구에서 수소는 $V_{fine-s} = 7.549$ km/s에서 8.94 km/s 사이의 값을 다른 원소들은 5 km/s값을 적용하였다 (Clegg et al. 1999).

(4) $\Delta\lambda_{turb}$: 분자들의 난류(turbulence)의 운동(V_{turb})에 의해서도 무질서하게 선폭이 증가한다. 이 효과는 금지선의 선폭증대에 큰 영향을 끼친다. λ_{turb} 은 정확한 값을 판단하기는 어렵다. Sabbadin et al. (2006)이 고분산 슬릿관측 연구 자료를 분석하여 얻은 5.0 km/s 값을 모든 금지선에 우리도 적용하였다.

(5) $\Delta\lambda_{inst}$: 분광기와 망원경 시스템에 의해서 선폭이 증가한다. Sabbadin et al.(2005)의 연구에서는 [OI] night-sky line $\lambda 6300\text{\AA}$ 를 사용하여 $\Delta\lambda_{inst}$ 를 구하였는데, 우리가 분석한 Lick 천문대 분광관측 자료에서 유사한 night-sky 선들이 보이지 않았다. 우리는 망원경 시스템과 분광기 자체가 가지는 모든 종류의 선폭증가요소가 Th-Ar의 선폭에 포함되어 나타난다고 가정하여, Th-Ar의 선폭에 측정하였다. HES의 스펙트로그램의 여러 파장 대에서 총 11개의 Th-Ar 방출선을 측정하여 $V_{inst} = 7.892 \pm 0.497$ km/s를 얻었다.

기하학적 구조와 구각의 팽창

가스의 중심으로부터 반경에 따른 팽창속도

전형적인 행성상 성운의 방출선 모양은 Gaussian 함수 형태의 윤곽을 가지며, 관측된 방출선은 여러

개의 Gaussian 형태의 요소들이 복합되어 있으므로, 관측선 윤곽은 $P(v) = \sum E_i \times \exp\{- (v - u_i)^2 / w_i\}$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 v 는 팽창으로 인한 시선방향의 시선 속도(radial velocity)이고, u_i 는 v 에서 벗어난 팽창 등에 의한 시선방향의 속도 요소들, w_i 는 2.2절에서 언급한 선폭증가들이고, E_i 는 방출계수에 대한 분배 함수이다(Tamura and Shibata 1990). 고분산분광기로 관측된 NGC 6881의 많은 금지선들은 Fig. 3에서와 같이 두 개의 봉우리(dp)를 보여준다. 이 경우 dp의 파장에서 u_1, u_2 를 구한 후

$$2V_{dp} = |u_1 - u_2| \tag{1}$$

에서 V_{dp} 를 간단히 구할 수 있다. 하지만, 앞에서 언급한 것처럼, 구각의 모든 반경에서 가스들이 일정한 속도로 팽창하지 않고, 반경에 따라 속도가 증가하거나 감소한다. 경우 u_1, u_2 에서 구한 팽창속도(V_{dp})는 구각의 중간 지점 또는 평균 정도의 속도를 나타낸다.

Fig. 2의 경우처럼 방출선이 한 성분(single Gaussian)만을 보이는 경우는, 우선 FWHM을 측정한 후, 이러한 선폭증가에 영향을 준 여러 요소들을 제거하였다. 그렇게 구한 팽창속도 V_{exp} 는

$$2V_{exp} = (V_{FWHM}^2 - V_{th}^2 - V_{inst}^2 - V_{fine-s}^2 - V_{turb}^2)^{1/2} \tag{2}$$

로부터 구할 수 있다.

Table 4에 몇 개의 중요한 허용선과 금지선으로 부터 각 구각의 팽창속도 V_{exp} 와 V_{dp} 값들을 구하여 제시하였다. 한 이온에 대해 몇 개의 팽창속도를 구할 수 있는 경우 평균값(mean value)과 RMS 오차 값을 구하였다. Fig. 2에서 보듯이 다른 원소선들과는 달리 수소 재결합선은 대부분 single Gaussian를 형태를 보이지만, Starlink/Dipso 분석 프로그램을 이용하여 dp를 가진 선윤곽으로 분리할 수 있었다. HI선은 이들 중 제일 강한 두 선스펙트럼인 $H\alpha, H\beta$ 선으로부터 V_{dp} 를 구하였다.

일반적으로 고온의 중심별을 둘러싸고 있는 구각의 기체는 중심별에서 멀어질수록 기체의 온도는 낮아진다. 따라서 중심에서 먼 곳 일수록 온도가 낮으므로 이온화 에너지가 낮은 원소의 선들이 있고, 중심 가까이에는 이온화 에너지가 높은 선들이 생성된다. Table 5와 Fig. 4에 이온화 에너지의 감소에 따라서 팽창속도의 변화를 제시하고 나타내었다. Table 5에는 Table 4에서 제시하지 않은 [SII] $\lambda 4076, [OII]\lambda 3729,$

Table 4. Nebular shell expansion velocities, V_{exp} and $V_{\Delta p}$

lines	λ (Å)	V_{FWHM}	V_{th}	$V_{\text{fine-s}}$	V_{turb}	V_{exp}	ΔP (Å)	$V_{\Delta p}$
H β	9015	38.7	24.63	7.62		13.88	.	
	8863	37.73	24.63	7.62		13.2	.	
	8750	39.19	24.63	7.61		14.22	.	
	8545	39.36	24.63	7.61		14.34	.	
	8413	38.8	24.63	7.62		13.98	.	
	6563	46.54	24.63	7.6		18.97	.	
	6563*	43.43	24.63	7.61		17.02	0.436	9.97
	4861	41.47	24.63	7.61		15.76	.	
	4861*	46.9	24.63	7.6		19.19	0.227	7
4340	44.24	24.63	7.61		17.54	.		
mean						15.81 \pm 2.11		8.49 \pm 1.49
HeI	5875	43.4	12.31	5		20.28	0.395	10.09
	7065	45.44	12.31	5		21.37	0.39	8.28
	7281	47.79	12.31	5		22.61	0.48	9.89
	9228	47.46	12.31	5		22.25	0.661	10.75
mean						21.63 \pm 0.90		9.75 \pm 0.91
HeII	7177	31.35	12.31	5		13.64	0.399	8.34
CII	7231	39.33	7.11	5		18.77	.	
CIII	8196	24.38	7.11	5		10.68	.	
[OIII]	5006	37.15	6.15		5	17.71	0.297	8.9
	4958	38.11	6.15		5	18.22	0.296	8.96
mean						17.97 \pm 0.26		8.93 \pm 0.03
[NII]	6583	48.76	6.58		5	23.7	0.571	13.01
[ArIII]	7135	39.94	3.89		5	19.32	0.454	9.55
	7750	40.25	3.89		5	19.48	0.501	9.7
mean						19.40 \pm 0.08		9.62 \pm 0.08
[SII]	9067	31.44	4.35		5	14.85	0.491	8.12
	9531	37.46	4.35		5	18.01	0.604	9.51
mean						16.43 \pm 1.58		8.82 \pm 0.70
[ClIII]	8433	52.53	4.13			25.75(24.19)		

* from the 10 minutes exposures, since the 2 hour exposure is saturated for these strong lines. All velocities are in km/s. $V_{\text{inst}} = 7.89$ km/s applied for all lines. CII and CIII are from 4267Å and 8196Å. See text.

[ClIII]8434 등에서 구한 팽창속도 값도 제시하였는데 이선들은 신호대 잡음비 S/N는 5정도로 다른 선보다 자료의 질이 좋지는 못하다.

Fig. 4를 보면 전반적으로 가스의 이온화 에너지가 클수록, 즉 안쪽에서 생성된 선일 수록 팽창속도가 작지만, 이온화 에너지 적은 즉 성운의 중심에서 먼 곳에서 생성된 선들을 방출하는 구각일수록 빠른 속도로 팽창되고 있음을 알 수 있다. 즉 안쪽의 구각은 팽창속도가 느리지만, 성운의 중심에서 먼 곳의 가스는 중심에서 멀어질 수록 가속됨을 알 수 있다. 가장 안쪽에서 생성되었을 HeII는 $V_{\text{exp}} = 13.64$ km/s이고, 중간정도의 지역에서 생성되는 [OIII]로 구한 팽

창속도는 $V_{\text{exp}} = 17.97 \pm 0.26$ km/s로서 외각 지역에서 생성되는 [NII]의 팽창속도가 $V_{\text{exp}} = 23.7$ km/s로 HeII 등에 비해 크다.

가장 안쪽에서 생성되었을 HeII 보다 약간 바깥쪽에서 생성되었을 HeI의 $V_{\text{exp}} = 21.63 \pm 0.90$ km/s로 He을 팽창하는 속도 역시 가스가 중심에서 멀어질수록 커진다. 일반적으로 HeII나 HeI선이 방출되는 지역은 온도가 높은 안쪽에 한정된 국한되므로 He은 안쪽의 가스속도를 나타내는 반면, HI는 전체지역에서 나오므로, 성운 전체의 팽창속도로 해석되어질 수 있는데, HI선에서 구한 팽창속도 $V_{\text{exp}} = 15.81 \pm 2.11$ km/s이다. HeI, HeII선은 같은 온도에서 생성되었을 다른 선들

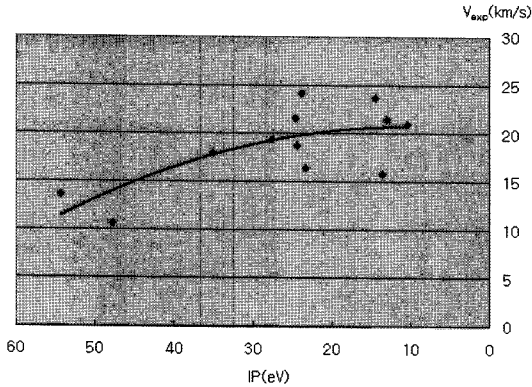


Fig. 4. Expansion velocity, V (km/s) vs. IP (eV). A smaller IP (eV) corresponds to the larger radial distance from the central star.

Ar 등에 비해 빠른 속도를 보이는 데, 이는 He, Ar 등이 구대칭을 이루지 않는 NGC 6881의 복잡한 구조를 반영한 것으로 보인다. NGC 6881의 HST 영상은 여러 개의 고리(torus ring)로 된 구조를 보이는데 이는 아마도 적도 방향에서 생성된 구조로 추정된다. 또한 HST 망원경으로 분해되지 않는 중심부에는 양극 방향의 최근 분출이나 적도방향 고리구조가 최근에 생성되었을 가능성을 암시한다.

대 다수의 다른 행성상 성운의 경우, UV영역에서 CII 1909Å, 가시광 영역에서 CII 4267Å선이 보인다. HI이나 HeI, HeII선들처럼 재결합(recombination)과정으로 생성되었다고 가정하여 4267Å선세기를 계산한 이론값이 관측 값 보다 2-3배 약하게 예측되곤 한다 (Hyung and Feibelman, 2004). NGC 6881의 자외선 영역(1000-3200Å)의 IUE 관측 자료로는 SWP51724 (1100-2200Å, 180 min), LWP28823(2000-3200Å, 60 min)의 2개가 있다. 하지만, IUE 자료에서 CII 1909, 1910선의 자료를 구할 수 없었고, 가시광 영역의 HES 광학자료에서도 CII4267Å는 보이지 않았다. 반면 다른 행성상성운에서 흔하게 출현하지 않는 7231 Å선이 관측되었는데, 이 연구에서는 이 선이 CII 허용선으로 동정하여 팽창속도를 구하였다. 많은 수의 다른 행성상 성운에서는 λ 7231Å선이 보이지 않는데, 이 선이 CII선이라고 해도 재결합과정으로 생성된 선이 아닌, 형광작용과 같은 다른 물리적 과정에 의해 생성 것으로 판단된다. 분명 행성상 성운 NGC 6881은 N이 풍부한 반면, C가 결핍된 별에서 진화한 것으로 보인다.

CII나 CIII 8196으로부터 구한 팽창속도는 다른 원

Table 5. Expansion velocity vs. ionization potential energy.

Ion	IP (eV)	V_{∞} (km/s)
HeII	54.4	13.64
CIII	47.8	10.68
[OIII]	35.1	17.97
[ArIII]	27.6	19.40
HeI	24.6	21.63
CII	24.4	18.77
[CIII]	23.8	24.19
[SIII]	23.3	16.43
[NII]	14.5	23.70
HI	13.6	15.81
[OII]	13.0	21.49
[SII]	10.4	20.98

소의 값보다 작고, 특히 CIII는 HeII로 구한 값보다 현저하게 작다. 만일 CIII의 팽창속도가 HeII와 유사하다면, HeII 영역의 빛을 받아 생성되었을 것으로 추정해 볼 수 있다. CIII는 HeII의 빛을 받아 생성되지 않고, 중심별의 UV 광자를 받아 중심별 주위의 가스 속의 C가 형광작용에 의해 형성되었을 것으로 추정된다. CIII는 하나의 붕우리를 가지나 CII는 두 개의 붕우리를 가지는 것을 보이지만 두 개의 붕우리를 Dipso를 사용해 분리하기에는 선세기가 너무 미약하다. C 허용선은 광자로 여기된 전자가 가라앉으면서 생성되는 재결합과정이지 형광작용으로 형성되었을 가능성이 크고, HI의 Lyman선, HeI, HeII 등의 가스에서 나온 빛의 형광작용이 아닌 중심별의 UV continuum의 형광작용으로 생성된 것으로 여겨진다.

Fig. 4와 Table 5에 주어진 반경에 따른 팽창속도를 보면, NGC 6881 행성상 성운의 안쪽에 있는 가스는 느리게 팽창하고 바깥쪽으로 갈수록 빠르는데, 이는 가스의 팽창속도가 가속됨을 보여준다. 이러한 가속 현상은 NGC 6881만의 특이한 현상은 아니지만, NGC 6881이 다른 것과 달리 복잡한 다중고리가 있음을 고려할 때 이 구조의 기원에 대해 음미해 보아야 할 것이다. 이러한 방출선은 방출선이 형성된 지역이 한 특정 반경에서만 대표하는 것이 아니고 일정한 두께를 가진 구각에서 나오므로 안쪽지역의 팽창속도와 바깥쪽지역의 팽창속도는 차이가 날 것으로 예상된다. 이러한 특성에 대해 다음절에서 살펴보았다.

방출선과 기하학적 구조

Fig. 2와 Fig. 3에서 같은 두 개로 붕우리를 가진

Table 6. Expansion velocities of front and rear shells

iso	Front		Rear		
	1909	9069	1909	9069	
[OIII]	35.1	-9.33	2.45	3.46	24.86
[ArIII]	27.6	-18.62	-2.64	-3.69	20.69
HeI	24.6	-22.69	-14.85	-11.41	16.63
[SIII]*	23.3	-27.45	-9.92	-2.31	4.96
[NII]	14.5	-22.12	-2.26	-1.17	13.19
HI**	13.6	-15.18	5.24	6.71	23.21

*: from [SIII] 9069; **: from H α 6563. Radial Velocities are given relative to the Helio-centric value, using -19.85 km/sec.

Line broadening not corrected. See Fig. 6 for 1, 3, 1', and 3'.

선을 다가오는 쪽의 구각(front shell)과 멀어지는 쪽의 구각(rear shell)에서 독립적으로 선이 형성되었다고 가정하여, 가까운 쪽의 구각(front shell)의 청색편이와 적색 편이, 먼 곳으로 팽창하는 지역(rear shell)의 청색 적색편이를 구하여 Table 6에 제시하였다. 또한 Fig. 5에 IP별로 Table 6에서 구한 시선속도 값을 나타내었다. Table 6에 주어진 시선속도는 관측시 NGC 6881과 태양과의 상대적인 시선속도인 -19.85 km/s를 보정한 값(Helio-centric radial velocity)이다. 분광선을 내는 지역을 세분화하여 각각의 구각에서 어떠한 팽창속도를 보이는지 구각의 폭이 어떠한지를 연구하는 것이 이 논문의 연구 성격의 범위를 벗어난 것이므로 여기에서는 세밀한 선편증가를 수정하지는 않았다.

Table 6에 나타난 자료는 어떠한 기하학적 구조에

서 발생한 것일까? 가장 단순한 가정은 1) 구대칭체(spherical symmetry)에서 나온 것이거나 2) 적도의 고리에서 나온 것으로 해석해 볼 수 있다. 하지만 Table 6에 나타난 front shell과 rear shell의 특성이 너무도 분명하게 차이하고 있음을 알 수 있다. 우리는 NGC 6881의 중심부분이 Fig. 6의 왼쪽 그림에서와 같은 양극콘(bi-cone)과 적도 고리의 복합적인 구조라고 해석하였다. 이 기하학적 구조는 관측자에게 다가오는 성분과 멀어지는 부분으로 구성된 양극콘과 중심부분에 적도방향의 고리의 3 부분으로 구성되어 있다. 만일 관측자가 Fig. 6의 오른쪽에 있다면, 관측자에 가까운 쪽의 전면 구각(front shell)과 관측자로부터 먼 쪽의 후면 구각(rear shell)에서 주로 방출선을 내고 있을 것으로 여겨진다. 즉 Table 6의 전면 구각(front shell)의 경우, 청색편이(3번째 열)선은 그림의 (1)지점에서 방출되고 적색편이(4번째 열)는 그림의 (3)지점이 방출되는 것으로 해석할 수 있다. 마찬가지로 후면 구각(rear shell)에서도 청색편이(Table 6의 5번째 열)의 방출선 부분은 그림의 (3')지점에서, 적색편이(Table 6의 6번째 열)의 방출은 그림의 (1')에서 나온 것으로 해석된다.

Fig. 6에 제안된 기하학적 모델에 의하면 (2)-(2') 방향은 양극콘의 중심부분 또는 축 부분으로 이 부분으로 가스가 가장 많이 분포하기 때문에 이중 봉우리를 가진 분광선이 형성되었을 것이다. 그림의 (1)은 시선방향으로 다가오는 속도가 가장 큰 곳으로 아래에 제시한 방출 선의 가장 짧은 파장 부분인 (1)번에 해당된다. 그림의 (1')은 관측자로부터 가장 먼

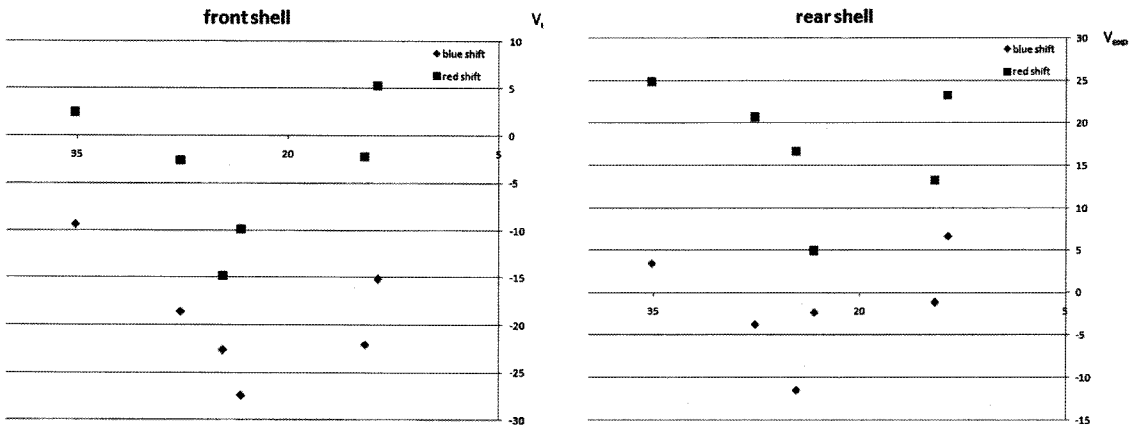


Fig. 5. Expansion velocity of front and rear shell. Horizontal and vertical axes are the same as in Fig. 4. ◆: blue shift; ■: red shift (see Table 6).

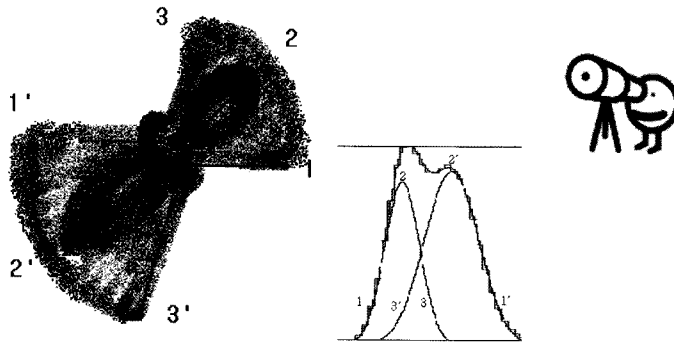


Fig. 6. Schematic diagram of NGC 6881. It consists of a large scale bi-cone and a compact size equatorial ring. The observer is at the left side.

지점으로 분광선에서 가장 파장이 긴 곳에 해당된다. (3)은 다가오는 시선방향의 속도가 가장 느린 곳으로 왼쪽 방출선의 오른쪽 부분에 해당한다. (2)지역의 시선속도는 (1)과 (3)의 중간 값을 가지며, 대다수의 물질이 분포하고 있는 특성을 반영하여 방출선의 세가 중심에서 강하게 나타난다.

멀어지는 방향도 마찬가지이다. (1')는 멀어지는 속도가 가장 큰 곳으로 오른쪽에 위치한 방출선의 파장이 긴 부분을 나타내고 (3')는 멀어지는 속도가 가장 작은 곳인데, 이는 적색편이된 선윤곽의 짧은 쪽에 해당된다. (2')는 (1')와 (3')의 중간속도를 가진 곳으로 가스가 가장 많이 분포하여 선이 강하게 나타나는 것으로 여겨진다.

선폭증가를 제거한 후 그림 (3)지역의 선 파장이 (3')의 파장을 다시 비교하여 전자가 후자보다 길다면, 두 개의 FWHM부분이 겹친다. 이 경우 양극콘의 열린각(opening angle) 커서 (3)의 위치가 (3')의 위치보다 관측자로부터 더 멀다는 결론에 도달할 수 있다. 그런데 Table 6를 보면 선폭 증가를 수정하지 않았음에도 대다수의 선은 겹치지 않고 두 지역으로 잘 분리되고 있다. 따라서 양극콘의 열린각은 90°보다 크지 않을 것, 즉, 콘의 위도 $\Phi > 45^\circ$ 일 경우로 여겨진다.

Table 6와 Fig. 5의 HeI, [SIII]의 자료가 다른 선들과는 틀린 경향을 보인다. HeI의 경우 다가오는 성분과 멀어지는 성분이 균등한 반면 Table 6에 주어진 [SIII]은 자료의 질(S/N의 비)가 그다지 좋지 못한 $\lambda 9068$ 는 접근성분이 강하고, $\lambda 9531$ 은 후퇴성분이 강하다. 이러한 비교적 높은 온도에 생성된 선들은 이것은 앞에서 언급한 것처럼, 중심부분의 적도 고리부분에서 나온 방출선의 기여도가 큰 것으로 해석된다.

결론

NGC 6881에는 [OIII], [NII] 같은 중원소에서 생성된 여러 금지선과 가장 많은 수의 H, He에서 생성된 허용선이 관측되었다. Kwok and Su(2004)의 HST영상을 분석하여 중심에 직경이 3"인 3개의 고리와 직각 방향으로 배열된 직경이 약 9-10"인 2 쌍의 고리를 확인하여, 이들이 서로 직각으로 놓여있다고 해석하였다. 그런데 중심부분의 3개의 타원형 처럼 보이는 구조가 과연 고리인지, 아니면 우리가 이 연구에서 제안한 것과 같은 적도부분의 고리와 극방향으로의 양극콘이 겹친 복합적인 구조인지를 이 연구에서 밝히고자 하였다. 만일 Kwok and Su의 해석이 옳다고 한다면, 이 행성상 성운은 HST 영상이 암시하는 지난 수 천년 동안에 자전축이 직각으로 변하였다고 해야만 한다. 수 천년전에는 북동-남서방향으로 향하던 축이 바뀌어 현재는 북서-남동 방향으로 기울어진다는 것은 사실상 물리적으로 불가능하다. 또한 HST나 전파에 의해 얻어진 자료는 하늘에 투영된 모습이므로 3차원적인 구조를 파악하는데는 한계가 있다. 우리는 Kwok and Su가 제시한 해석의 모순점을 극복하기 위해 이 연구를 통해 고분산 분광선의 선윤곽 분석하고, 운동학적 특성을 연구하여 기하학적 구조를 추정하였다.

Fig. 2, Fig. 3과 같은 두 개의 봉우리의 선윤곽을 가진 경우, 팽창속도를 구하는 식 (1), (2)에서, 언급한 것처럼 어떠한 이온에서는 V_{exp} 와 V_{ap} 의 두 팽창속도 값을 얻을 수 있는 경우가 있는데, 만일 행성상 성운이 구대칭을 이루면 V_{exp} 는 이온을 내는 성운의 최대 속도이고, V_{ap} 는 구각(shell)의 중심부 또는 이온을 방출하는 구각의 평균 속도라고 해석할 수 있

다. 우리는 NGC 6881이 구대칭에서 벗어나 있으므로 이 같은 단순한 해석은 옳지 않다. 우리는 Table 6등에 나온 dp 자료에 근거해 HST 영상에서 보이는 구조를 운동학적으로 무리없이 설명할 수 있는 기하학적 구조는 Fig. 6에 나온 것과 유사할 것이라고 판단된다. 양극론의 열린각은 90° 보다 작을 것으로 보이며, HST 영상에서 보이는 고리는 이러한 구조의 적도방향에 생성된 것이 팽창하여 커진 것으로 해석될 수 있다.

분광자료에 보이는 선세기의 폭을 통한 운동학적 해석과 적색편이 청색편이의 세기비등의 통해 기하학적 구조를 추정된 후 우리는 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다: (1) 전반적으로 NGC 6881은 Fig. 4에서 보여준 것처럼 가스가 별에서 유출된 후 중심별의 복사압 영향으로 인해 계속 가속되어 왔다. (2) 수소의 경우 행성상 성운의 전 지역에서 고르게 방출되지만 주로 양극론의 구조의 특성이 반영되어 나타난다. (3) 중심부분에 있을 것으로 추정되는 적도 고리(equatorial torus ring)의 운동학적 특성은 He선 등 들뜸이 강한 선에 나타난다. (4) 또한 중심에는 양극방향으로 최근의 분출이 있을 것으로 짐작되며, 이러한 복잡한 특성이 [ArIII] 등의 선운곽에 반영되고 있는 것으로 보인다. NGC 6881에는 다른 행성상 성운에서 잘 나타나지 않는 여러 CII, CIII 허용선이 보이는데, 반면 CII 4267Å은 보이지 않는다. NGC 6881의에서 보이는 CII 7231이나 CIII 8196 선은 이온의 재결합 과정으로 설명이 불가능하다. 따라서 우리는 이 선들이 중심부분의 고리구조와 연관이 있을 것으로 결론지으며, 중심별의 UV continuum에 의한 고리가 반사하여 형광작용으로 형성되었을 것으로 추정한다. (5) 이 연구에서 미처 분석되지 못한 다른 원소들의 방출된 선들의 심도 깊은 연구를 통해 좀 더 확실한 기하학적 구조와 물리화학적 진화연구가 진행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 2007학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었다. 이 연구자료의 바탕이 된 행성상 성운의 관측에 참여하고 함께 연구를 수행하였던, 지금은 고인이 되신 UCLA의 Lawrence H. Aller교수께 감사사를 드린다.

참고문헌

- Acker, A., Ochsenbein, F., Stenholm, B., Tylanda, R., Marcout, J., and Schohn, C., 1992, Strasbourg-ESO Catalogue of Galactic Planetary Nebulae. European Southern Observatory, Garching bei Munchen, Germany, 747 p.
- Clegg, R.E.S., Miller, S., Storey, P.J., and Kisielius, R., 1999, Recombination line intensities for hydrogenic ion: The fine-structure components of HI and HII. *Astronomy and Astrophysics*, 135, 359-370.
- Kwok, S. and Su, K.Y.L., 2000, Discovery of multiple coaxial rings in the quadrupolar planetary nebula NGC 6881. *The Astrophysical Journal*, 635, 49-52.
- Sabbadin, F., Benetti, S., Cappellaro, E., Ragazzoni, R., and Turatto, M., 2005, The 3-D shaping of NGC 6741: A massive, fast-evolving planetary nebula at the recombination-reionization edge. *Astronomy and Astrophysics*, 436, 549-567.
- 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.
- Hua, C.T., Grundseth, B., and Maucherat, A.J. 1993, Faint halos around compact planetary nebulae. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 101, 541-550.
- Hyung, S. and Feibelman, W.A. 2004, Optical and IUE spectra of the planetary nebula NGC 7026. *Astrophysical Journal*, 614, 745-756.
- Tamura, S. and Shibata, K.M., 1990, Expansion Analyses on Low-excitation Planetary Nebulae with Stellar Images. *Publications Astronomical Society of The Pacific*, 102, 1301-1309.

2007년 10월 4일 접수

2007년 11월 7일 수정원고 접수

2007년 11월 15일 채택