

2004년 PU VUL의 고분산 스펙트럼 - I  
THE HIGH RESOLUTION SPECTRA OF PU VUL IN 2004 - I

유계화

이화여자대학교 과학교육과

KYE HWA YOO

Department of Science Education, Ewha Womans University, Seoul 120-750

E-mail: khyoo@ewha.ac.kr

(Received October 26, 2005; Accepted November 7, 2005)

ABSTRACT

We present a high resolution spectrum of PU Vul observed at Bohyunsan Optical Astronomy Observatory (BOAO) on April 9, 2004. Permitted emission and nebular lines of PU Vul had been significantly changed compared to all spectra observed since its eruption in 1979. Therefore all new lines should be re-identified and were done so. We de-convoluted a H $\beta$  line into several emission components with Gaussian functions. Then we carefully discussed the geometrical feature of PU Vul in April 2004.

*Key words:* high resolution spectrum; slow nova, PU Vul; spectral line variation; geometrical structure

1. 서론

Pu Vul은 1898년 관측된 후 1956년까지 B등급 광도곡선에서 밝기의 변화량이 작은 변광성이었다(Liller and Liller 1979; Hoard and Wallerstein 1996). 관측이 시작된 이래 처음으로 1977년 후반에 PU Vul의 폭발현상이 관측되었다. 1977년 이후 PU Vul은 광도가 계속 증가하여 1979년의 최대 밝기를 거쳐 일정 밝기로 1980년 식까지 유지되어오다 식 때는 폭발 이전의 밝기로 되었다 (Vogel and Nussbaumer 1992; Nussbaumer and Vogel 1996). 그 후 PU Vul은 일정한 밝기를 유지하다 1983년 최대 밝기에 이르렀고 이때부터 밝기는 점차 감소되면서 차츰 성운 스펙트럼 선을 보이기 시작했다 (Chochol et al. 1998). 1988년과 1989년에 H I, Fe II의 방출선과 전형적인 성운선인 [Fe II] 등의 방출선이 관측되기 시작하였다 (Iijima 1989; Vogel & Nussbaumer 1992; Klein et al. 1994; Nussbaumer & Vogel 1996).

첫 번째 식은 1980년부터 1982년까지 약 500일 동안 관측되었으며, 그 후 1993년에 시작된 두 번째 식은 거의 1년에 걸쳐 일어났으며 (Nussbaumer & Vogel 1996), UBV 광도곡선의 밝기가 최소가 되었다 (Garnavich & Trammell 1994).

첫 번째 식의 측광자료를 분석한 결과 PU Vul은 쌍성계로 밝혀졌다(Iijima 1989; Kanamitsu 1991; Kanamitsu et al. 1991). 두 번째 식의 관측 결과에서 PU Vul은 쌍성계의 궤도 기울기가 약 90도이고, 주기는 13.4년임을 알았다 (Kolotilov et al. 1995; Nussbaumer & Vogel 1995; Chochol et al. 1997). 그 후 PU Vul의 주성인 백색 왜성의 시선 속도에서 제3의 천체의 존재가 제안되었다. 즉 백색 왜성과 M형 거성은 760일 주기로 안 궤도를, M형 AGB 거성은 4900일의 주기로 바깥 궤도를 공전하는 3중성 계가 제안되었다(Chochol et al. 1998).

PU Vul은 1898년부터 1956년까지 B 등급의 광도곡선에서 밝기의 변동(Liller & Liller 1979)을 알아냈고 이 후 변동주기가 약4900일 및 232일임을 찾아냈다(Chochol et al. 1997). 그 후 PU Vul의 V 광도곡선에서도 214일의 진동주기가 확인되었다(Chochol et al. 1998; Yoon & Honeycutt 2000). 또한 이 주기는 R띠 측광 관측에서도 확인되었으며 이 진동 주기는 M 형 밝은 AGB 거성의 맥동 때문으로 알려졌다(Chochol et al. 1998).

PU Vul의 폭발은 M형 별로 부터 유입된 질량이 백색 왜성의 표면에서 핵반응을 일으키기 때문이며, 그 광도 곡선은 신성과 비슷하나 그 진폭과 빠르기가 PU Vul은 작고 늦어 PU Vul을 완만(slow) 신성으로 분류하고 있다.

PU Vul의 폭발 초기는 A 만기 형 초거성, 식 동안은 M형 거성, 폭발 후기는 F형 초거성의 스펙트럼을 보였지만(Yamashita et al. 1982, 1983), 1979년의 PU Vul은 폭발 후기와 같은 F 형 초거성, 1984년 이후부터 1987 년까지는 A 형 초거성 스펙트럼을 보였다(Nussbaumer & Vogel 1996). PU Vul의 폭발 현상 때 관측된 Fe II, He II 와 같은 방출 선은 공명선인 O VI의 자외선에 의해 형성된다고 알려지고 있다 (Hoard et al. 1996).

PU Vul은 2004년 현재에 있어서도 1989년 이후 밝기가 서서히 감소하고 있는 연장선에 있으며, 1977년의 폭발 이전으로 되돌아가고 있는 것 같다.

현재 PU Vul은 폭발현상이 끝나 성운 상태에 있지만, 2007년에 식이 예고되고 있다 (Garnavich 1994). 그러나 이 별에 대한 스펙트럼 관측 보고서가 1995년 이후 없다. 다행히 2003년 후반부터 보현산 천문대의 1.8m에 부착한 에셀 분광기를 사용할 수 있어, 2004년 4월 9일 하루 PU Vul을 관측하여 얻은 4월의 스펙트럼 자료를 이용하여 선행 연구 결과를 간단히 보고하고자 한다.

제 2절에서는 관측과 자료 처리에 관하여, 3 절에서는 PU Vul의 스펙트럼들을 동정하고 동정된 스펙트럼 선의 일부에 대해 그 변화를 살펴보고, 4절에서는 H $\beta$  스펙트럼 선을 Gauss함수로 분해하고 그 결과를 보고하고, 마지막 장에서는 스펙트럼선의 형성에 대하여 논의한다.

## 2. 관측 및 자료처리

보현산 천문대(BOAO)의 1.8m 반사망원경에 부착한 고분산 에셀분광기 BOES (BOAO Echelle Spectrograph)를

이용하여 2004년 4월 9일 하루 동안 PU Vul을 주로 가시광선 영역에서 분광관측을 하였다. 그러나 관측기간 동안 굵은 일기로 단 한 개의 frame만 얻을 수 있었다. 스펙트럼을 얻을 때 2024 x 4096소자의 CCD검출기를 사용하였으며 1개의 소자는 1.5 $\mu$ m x 1.5 $\mu$ m 크기로 되어있다. 아울러 41 grooves mm<sup>-1</sup>의 격자분광기, 200 $\mu$ m 직경의 광케이블을 사용하였는데 분해능은 40000이었다. 스펙트럼의 노출 시간은 1800초 주었으며 그 결과 파장 범위는 3200Å - 9100Å 이었다. 출력 분산은 파장 범위에 따라 1.56-2.14 Å mm<sup>-1</sup>이었다. 읽기 잡음은 4 e<sup>-</sup> 이었고 증폭율(gain)은 1.8 e<sup>-</sup>/ADU 이었다.

파장 계산을 위하여 Th-Ar을 사용하였고, Halogen lamp는 플랫폼 field를 고정하는데 사용하였다. 모든 자료 처리는 IRAF를 사용하여 환산하였다. 스펙트럼은 bias, flat 및 sky를 처리한 후 픽셀과 파장의 관계는 6차의 Spline 함수를 적용하여 얻었다. 이와 같이 처리된 스펙트럼은 다시 국지 연속광(local continuum)으로 정규화하였다.

## 3. 스펙트럼 선운곽의 변화

2004년 4월 9일의 PUVul의 스펙트럼 선은 연속광에서 대부분의 선들의 폭이 2.9~6.5Å 정도로 넓고, H I의 경우 ~15Å의 폭을 가졌다. 이렇게 스펙트럼 선 폭이 넓기 때문에 다른 선들과 중복(blend)을 세심히 검토하였는데도 선들을 동정하는 데 무척 어려움이 있었다. 즉 [Ar V] 의 동정은 Moore(1958)의 표의 값과 일치하지 않아 다른 선으로 동정될 우려가 있었다. 세심한 주의를 기울여 작업한 후 동정된 PU Vul의 스펙트럼 선의 동정표는 표 1에 수록되었다.

표 1에서  $\lambda$  는 Moore (1958)의 표에서 구한 동정된 원소의 파장이며, Int. 는 정규화된 선의 상대적 세기인데, 매우 약하여 1000을 곱한 값으로 표현했다. 여기서 Min-Max 는 동정된 원소의 스펙트럼 선의 방출 성분의 상대적 선의 세기 중 가장 작은 것과 제일 큰 값을 의미한다.

H I의 발머(Balmer)선 중 H $\beta$ 는 폭발 이후 흡수선으로 관측되어 오다가 1983년 중순부터 방출선으로 변하였다. 이후 다시 H $\beta$ 는 이전보다 약해진 흡수선으로 남았다가, 1986년 중순부터 폭 넓은 방출선으로 변하였다(Yamashita et al. 1982, 1983; Kanamitsu et al. 1991). 이때는 방출선의 시선속도는 증가하였고, 흡수선의 시선속도는 감소하였던 것으로 관측되었고(Klein et al., 1994), F형 스펙트럼을 보였다(Yamashita et al. 1982, 1983; Nussbaumer & Vogel 1996).

표 1. 2004년 4월에 관측된 스펙트럼선의 동정

$\lambda$ (Å)	Int. (Min.- Max.)	Identification	$\lambda$ (Å)	Int. (Min.- Max.)	Identification
4340.47	4.8-6.9	H $\gamma$	5333.65	5.4	[Fe II] 19F
4363.21	5.5-5.6	[O III] 1F	5412.52	2.4-6.7	He II 2
4471.48	1.6	He I 14	5425.27	3.7	Fe II 49
4685.68	14.6-17.9	He II 1	5631.6	1.8-2.8	[Fe VI] 1F
4714.9	1.4-2.2	[Ne IV] 1F	5720.9	12.6-18.9	[Fe VII] 1F
4724.9	1.1-2.3	[Ne IV] 1F	5754.8	8.5-11.9	[N II] 3F
4861.33	20.9-43.6	H $\beta$ , He II 2	5875.75	13.3-4.1	He I 11
4921.93	2.5	He I 48	6085.5	22.6-29.6	[Fe VII] 1F
4958.91	5.1-11.4	[O III] 1F	6300.23	2.2-39.4	[O I] 1F
4965.78	2.3	[Fe II] 3F	6363.88	15.4	[O I] 1F
5006.84	20.2-46.8	[O III] 1F	6456.38	3.3	Fe II 74
5015.68	1.6-3.0	He I 4	6562.82	187.9-572.9	H $\alpha$ , He II 2
5018.43	2.4	Fe II 42	6678.15	4.7-20.5	He I 46
5176.43	4.5-10.5	[Fe VI] 2F	7006.3	5.8-9.5	[Ar V] 1F
5197.57	3.2	Fe II 49	7065.19	13.2-52.5	He I 10
5261.61	6.9	[Fe II] 19F	7135.8	3.3-6.2	[Ar III] 1F
5284.09	2.3	Fe II 41	7156.80	2.1-11.3	O I 38
5308.9	3.7-8.0	[Ca V] 1F	7170.6	2.8-3.8	[Ar IV] 2F
5316.61	6.1	Fe II 49	7281.35	8.1	He I 45

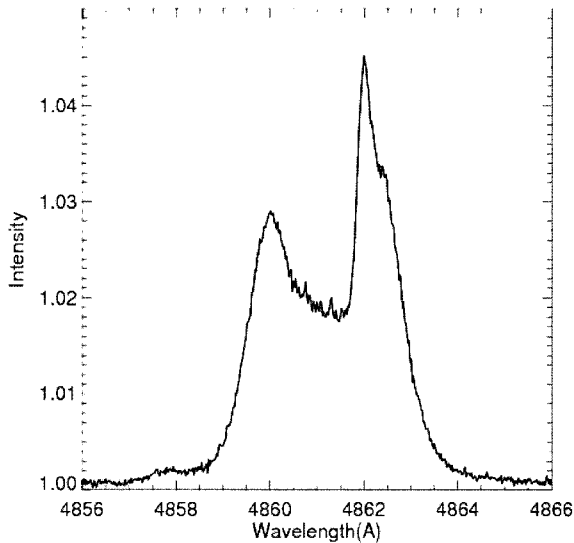


그림 1. H $\beta$ 의 선윤곽. 선의 중심에서 짧은 파장 긴 파장 양 쪽으로 방출선 성분이 있다.

1989년 관측에서도 H I 선의 흡수선 성분이 나타나기도 하고 나타나지 않기도 하였다. 이것은 수개월의 간격보다 짧은 시간 규모로 계 내에서 변화가 발생되었다는 것을 의미한다(Tamura et al. 1992; Van Winkel et al. 1993; Klein et al. 1994). H I 선의 방출선 성분은 1989년 이후 3년 동안 이 성분의 강도가 약해져 왔는데(Andillat & Houziaux 1994), 이 때는 A형 스펙트럼을 보였다 (Yamashita et al. 1982, 1983; Nussbaumer & Vogel, 1996). 이후 1991년에는 H I 선의 발머선과 파선(Paschen)선의 세기의 감소가 관측 되었으나 이 선의 세기의 감소는 온도와 밀도에 크게 민감하지 않았다(Andillat & Houziaux 1994).

2004년 4월 스펙트럼에서의 H I선은 앞서 서술했던 선 윤곽과 달리 직사각형 선윤곽에 3개 이상의 방출선 성분을 가진 것으로 관측되었다. 4월 9일의 H  $\beta$ 선 윤곽은 그림 1에 제시되어 있다.

1989년-1990년에 [O III]는 관측되기 시작하여 1991년부터 시간이 지남에 따라 [O III]선의 등가폭이 점점 증가하였다고 보고되었다(Tomov et al. 1991; Andriolat & Houziaux 1994). 이후 1994년 10월에 [O III]는 폭넓은 방출선으로 관측되었다 (Kolotilov et al. 1995). 그 후 1997년부터 2004년까지 PU Vul이 현재 M형 스펙트럼 위상으로 떨어지고 있어 아직 많은 연구자들에게 관심의 대상이 되지 않은 것 같다. 그러나 PU Vul은 1997년 이전의 스펙트럼보다 큰 변화가 있어 보인다.

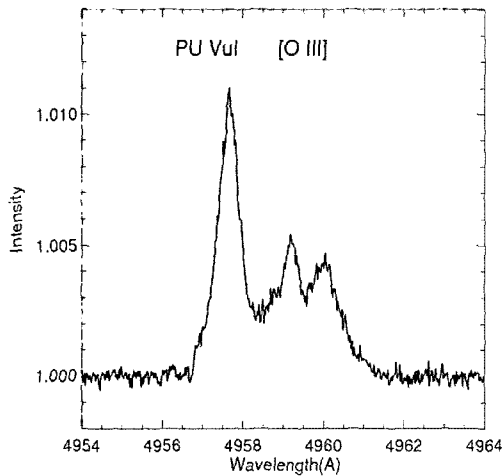


그림 2. [O III] 4959 Å의 선운곽. Flat-top 선운곽에 개의 방출선 성분이 겹쳐 있다.

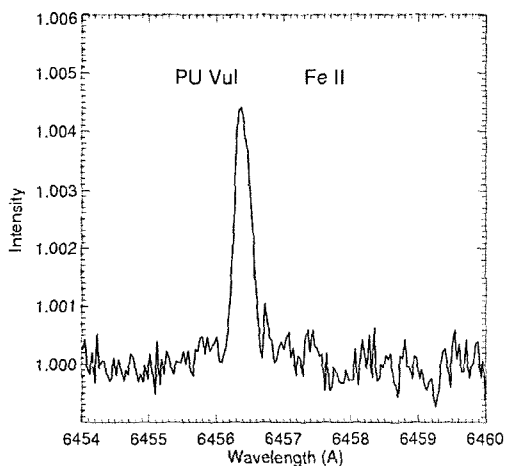


그림 3. 뾰족한 단 한 개의 방출선 성분을 가진 Fe II 6456 Å

Fe II는 1982년 말에 그 세기가 약하여지기 시작하다가 Fe II(#40)만, 1984년 11월에는 같은 해 7월 수준으로 돌아갔으며, 1985에도 전 해 7월 같은 수준을 유지해 왔다(Kanamitsu et al. 1991). 1986년에는 Fe II(#40, 46, 74)선이 관측된 수나 강도에서 1983년 약간 비슷한 수준으로 되돌아갔다(Klein et al. 1994). 이들 선은 1989년에는 대부분  $\lambda 8296$ ,  $\lambda 9196$ ,  $\lambda 9210$  등이었다. 1988년 4월에는 Fe II 5535Å은 연속광보다 약간 강하였지만 이후부터는 계속 약해져서 1990년 4월에 Fe II 5535Å은 연속광 수준이 되었다 (Klein et al. 1994). 1989년에 Fe II 8926Å는 TiO 띠에서 관측되었으나 1989년 이후 이 선의 세기가 점점 약해졌다 (Andriolat and Houziaux 1994, 1995).

2004년 4월 노출시간은 적었지만 이 때 얻은 스펙트럼에서 Fe II(#41, 42, 49)이 관측되었다. Fe II 선운곽은 단 하나의 뾰족한 방출선으로 관측되었다. [Fe II](#3F, 19F) 선들은 Fe II 선과 비슷한 선운곽을 가졌다. 예로 Fe II 6456Å의 선운곽을 그림 3에 제시하였다.

불행히도 1991년 이후 Fe II 선들의 년 단위나 월 단위의 시간적 진화모습을 자료의 부족으로 연속적으로 추적 할 수 없었다. 그러나 분명한 것은 2004년 현재 관측된 Fe II 선들의 수는 많지 않고, 뾰족한 방출선 선운곽을 가졌으나 마치 [Fe II]와 비슷한 선운곽을 가지고 있다는 것을 확인 할 수 있었다

#### 4. Gauss 함수로 분해

모든 스펙트럼 선의 선운곽은 다소 복잡한 선운곽으로 보이며 H $\beta$  역시 복잡한 방출선 성분을 갖는다. H $\beta$ 는 이온화된 H I 속도장에서 형성되었다고 믿고 우리는 이들 속도장을 간단한 함수인 Gauss 분포로 간주하고 관측된 H $\beta$  선운곽을 Gauss 함수로 분해하였다. Yoo (2006)에 제시된 Gauss 함수를 이용하고 이 때 Dr. J. C. Chai의 프로그램을 사용하였다. 예상한 바와 같이 H $\beta$ 는 6개의 방출성분으로 Gauss 함수로 분해 가능하였다. 결과는 표 2에 제시되었다.

표 2에서 B는 가장 넓은 선폭을 가진 성분을, 그리고 b는 B의 중심파장보다 짧은 파장 쪽의 방출선을 나타내고, r은 B의 중심파장보다 긴 파장 쪽에 있는 방출선 성분을 표시한다.  $\lambda_0$ , FWHM,  $V_r$ 은 각각 Gauss 성분의 중심파장, Gauss 성분의 중간 높이에서의 선폭 및 시선속도를 나타낸다. FWHM=2.355 $\sigma$ 이며  $\sigma$ 는 Gauss 성분의 속도 분산을 표시한다.  $V_r$ 은 태양에 대하여 보정한 값이다.

표 2. H $\beta$ 에 대한 Gauss 성분의 FWHM와  $V_r$

components	$\lambda_0$	FWHM( $\text{\AA}$ )	$V_r$ (km s $^{-1}$ )
b <sub>1</sub>	4859.97	0.94	-75.2
b <sub>2</sub>	4861.14	1.10	-3.0
B	4861.16	4.98	-1.5
r <sub>1</sub>	4862.04	0.48	+52.7
r <sub>2</sub>	4862.54	0.38	+83.3
r <sub>3</sub>	4862.98	0.50	+110.9

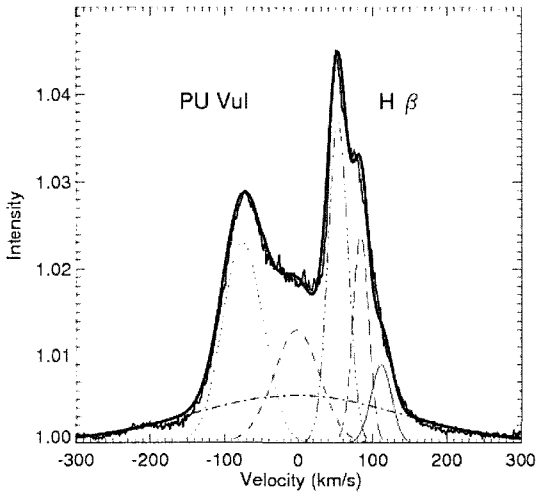


그림 4. H $\beta$ 에 대한 Gauss 함수의 분해의 예. 굵은 실선은 각 Gauss 성분의 합을 나타낸다. 여러 개의 Gauss 성분으로 구성되어 있다.

PU Vul 계의 속도는 약 4km s $^{-1}$  이다(Nussbaumer & Vogel 1996). 따라서 H $\beta$ 의 방출선 성분은 계의 속도보다 적색 쪽에 많이 분포되어 있어 H $\beta$ 를 방출하는 영역의 분포는 비대칭적이다.

5. 논의 및 결론

1979년 PU Vul 의 폭발 현상은 동반성인 백색왜성의 표면에서 핵반응으로 인한 폭발 때문으로 알려졌다

(Kenyon 1986). 핵반응을 일으킨 물질은 M형 거성으로부터 유입되었다고 일반적으로 믿고 있다. 폭발 때 Eddington 한계에 가까운 약 2000 태양광도의 밝기가 핵반응을 뒷받침한다고 생각한다(Kenyon & Webbink 1984).

폭발할 때 물질은 백색왜성 주위로 계속 팽창하여 성간공간에 퍼져있는 물질과 충돌한다고 본다. 이 때 성운선 [O III]선이 형성된다. PU Vul에서 [O III]선이 관측된 이후 2004년에 관측된 [O III]선은 폭이 넓고 직사각형 선윤곽 위에 3개의 방출선이 놓인 것으로 관측되었다. 이것은 백색왜성 주위에 형성된 구각이 팽창되어 변화되어 왔음을 시사하고 [O III] 선은 광학적으로 얇은 비대칭구각 (Spherical asymmetric shell) 속에 3 개의 비균질적 구름(inhomogeneous cloud) 덩어리에서 형성된 3개의 방출선 성분을 갖는다 생각된다.

한편 H I 의 H $\beta$  선윤곽으로 미루어 보아 선윤곽 중심으로 H $\beta$ 의 방출선 성분들은 비대칭적으로 분포되어 있다. 그리고 H $\beta$  선윤곽 중심으로부터 청색 및 적색 쪽의 방출선 성분은 PU Vul 의 백색 왜성 주위에 강착원반에서 형성되고 있다고 믿는다. 즉 폭발로 인한 물질이 백색 왜성 주위로 팽창하고 있는 반면, 아직도 백색 왜성 주위에 형성되어 있다고 생각된 강착원반은 깨어지지 않고 2004년에 현존하고 있다고 짐작된다. 그러나 이 강착원반이 형성된 시점은 정확히 알 수 없다. 다만 2004년 현재, 강착원반에서 형성된 것으로 H $\beta$ 를 지목하는 것은 무리 없어 보인다.

Fe II선의 상대세기가 강하게 관측되었다가 다시 약한 Fe II 선이 관측되었다는 사실과 2004년 현재, 단 한 개의 뾰족한 선윤곽이 아주 약하게 관측되었던 것은 시간이 경과하면서 Fe II를 형성한 영역이 팽창하여 밀도가 상대적으로 감소하였다는 것을 의미한다. Fe II 선은 [Fe II] 보다 고밀도의 영역에서 형성된다고 알려져 있다 (Andrillat & Houziaux 1994). 2004년 4월의 스펙트럼에서 Fe II 선윤곽과 마찬가지로 [Fe II] 선윤곽도 단일 방출선 성분으로 뾰족하게 관측되었다. 따라서 Fe II 선이 형성한 영역과 [Fe II] 선이 형성한 영역은 서로 가까우면서 밀도가 차이가 난 영역에서 각각 형성된다고 믿고 있다. 잘 알려진 바와 같이 금지선을 형성한 영역의 밀도는 허용선을 형성한 영역의 밀도보다 낮다.

PU Vul의 스펙트럼 선의 합리적인 해석은 아직 4월의 자료를 처리 중이므로 모든 선의 윤곽을 종합하고 시선속도도 구하여 종합적으로 분석한 후 차후에 보고하기로 하고 여기서는 그 해석의 예비 단계적 해석만 보고하고 있다.

## 사 사

저자는 이 논문의 동정에 대한 자문에 응해 주신 Yamashita 교수님께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 한국과학재단목적기초연구(과제번호: R01-2001-000-00026-0(2001)및 R01-2001-000-00026-0(2002))지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Andrillat, Y. & Houziaux, L., 1994, MNRAS, 271, 875  
 Andrillat, Y. & Houziaux, L., 1995, IBVS, 4251, 1  
 Chochol, D., Pribulla, T., & Tamura, S., 1998, IBVS, 4571, 1  
 Chochol, D., Pribulla, T., Tamura, S., Tajitsu, A., & Kanamitsu, O., 1997, PPSB Conf., 127  
 Garnavich, P. M. & Trammell, S. R., 1994, IAU Circ. No. 6089  
 Garnavich, P., 1996, IAU Circ. No. 5969  
 Hoard, D. W., Wallerstein, G., & Willson, L. A., 1996, PASP, 108, 81  
 Honda, M., Ishida, K., Noguchi, T., Norimoto, Y., Nakagiri, M., Soyano, T., & Yamashita, Y., 1979, BToK. 262, 2983  
 Iijima, T., 1989, A&A, 215, 57  
 Kanamitsu, O., 1991, PASJ, 43, 225  
 Kanamitsu, O., Yamashita, Y., Norimoto, Y., Watanabe, E., & Yutani, M., 1991, PASJ, 43, 523  
 Kenyon, S. J., 1986, AJ, 91, 563  
 Kenyon, S. J. & Webbink, R. F., 1984, ApJ, 279, 252  
 Klein, A., Bruch, A., & Luthardt, R., 1994, A&AS, 104, 99  
 Kolotilov, E. A., Munari, U., & Yudin, B.F., 1995, MNRAS, 275, 185  
 Kuano, Y., 1979, IAU Cir., Nos. 3344  
 Liller, M. H. & Liller, W., 1979, AJ, 84, 1357  
 Moore, C. E., 1958, A Mutliplet Table of Astrophysical Interest, National Bureau of Standards, Technical Note No. 36  
 Nussbaumer, H. & Vogel, M., 1996, A&A, 307, 470  
 Tamura, S. I., Kanamitsu, O., & Yamashita, Y., 1992, PASJ, 44, 543  
 Van Winckel, H., Duerbeck, H. W., & Schwarz, H. E., 1993, A&AS, 102, 401  
 Tomov, T., Zamanov, R., Iliev, L., Mikolajewski, M., & Georgiev, L., 1991, MNRAS, 252, 31  
 Vogel, M. & Nussbaumer, H., 1992, A&A, 259, 525  
 Yamashita, Y., Maehara, H., & Norimoto, Y., 1982, PASJ, 34, 269  
 Yamashita, Y., Norimoto, Y., & Yoo, K. H., 1983, PASJ, 35, 521  
 Yoo, K.- H., 2006, NEWAST, in press  
 Yoon, T.- S. & Honeycutt, R. K., 2000, PASP, 112, 335