

## 웨이블릿을 이용한 $\epsilon$ AURIGAE SYSTEM 주성 F별의 주기분석

김혁

영국 조드렐뱅크 천체물리학 센터

### PERIOD ANALYSIS FOR THE F COMPONENT OF THE $\epsilon$ AURIGAE SYSTEM USING WAVELETS

Hyouk Kim

Jodrell bank Centre for Astrophysics, The University of Manchester, Alan Turing Building,  
Oxford Road, Manchester, M13 9PL, UK

E-mail: vitkim@gmail.com; hkim@jb.man.ac.uk

(Received January 9, 2008; Accepted February 12, 2008)

#### 요 약

이 연구에서는 장주기 변광쌍성  $\epsilon$  Aurigae의 주성에 대한 측광 관측자료를 바탕으로 그 별의 변광주기를 분석하였다. 이를 위하여 1842년부터 2006년까지 약 160여년에 걸쳐서 여러 관측소에서 관측된 자료를 이용하였다. 식 바깥 부분의 자료를 선별하여 CLEANest와 Wavelet 알고리즘으로 주기를 분석한 결과  $\epsilon$  Aurigae의 주성 F별은 시간에 따라서 진폭이 변하기는 하지만 몇 개의 특정 주파수가 일정하게 유지되는 진동 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 특히 두 개의 주기(67일과 123일)가 지속적으로 나타난 것은 지금까지 부분적으로 주기를 구하였던 결과에서 주기가 시간에 따라서 불규칙하게 변한다고 판단되어졌던 것과는 달리  $\epsilon$  Aurigae의 주성이 이중 모드 또는 다주기적 변광을 하고 있다는 것을 말해준다고 하겠다. 이는  $\epsilon$  Aurigae의 주성이 post-AGB의 단계에 있다가 보다는 질량이 큰 초거성 상태임을 암시하는 결과라고도 할 수 있다. 또한 황색 초거성의 변광기작에 대해 명확하게 이해되지 못하고 있는 현재의 입장에서  $\epsilon$  Aurigae의 식 바깥부분에서의 추가적인 관측이 필요함을 논의하였다.

#### ABSTRACT

We present a detailed period analysis for the F-type primary of  $\epsilon$  Aurigae by means of Fourier and wavelet algorithm. After collecting all available data which have been observed for around 160 years (1842 – 2006) from various international databases and published references we selected only data obtained during outside eclipse among them again. As a result of analysis using CLEANest and WWZ(weighted wavelet Z-transform) several frequencies including two clear periods (67<sup>d</sup> and 123<sup>d</sup>) were found. In contrast to previous results that the periods vary irregularly it seems that the primary of  $\epsilon$  Aurigae is double mode or multiperiodic pulsator. The presence of the two periods and their ratio indicates that the high-mass interpretation of the variable could be valid. Also better understanding of the mechanisms driving the light variability of F-type supergiant stars requires continual series of photometric and radial velocity measurements in outside eclipse of this star.

*Key words:*  $\epsilon$  Aurigae, yellow supergiant, period analysis, wavelet

## 1. 서 론

$\epsilon$  Aur는 K. Fritsch에 의해서 1821년에 처음으로 변광여부가 확인된 식쌍성이다(Huffer 1932). 변광주기가 27.1년으로 밝혀진 이 변광성이 큰 관심을 받게 된 이유는 식지속시간이 보통의 쌍성과는 다르게 매우 길고(약 1.5 - 2년, Schmidtke 1985) 식이 진행되는 동안에 가시영역의 에너지 스펙트럼 분포가 거의 변하지 않으며(Thompson et al. 1987), 또한 보통 쌍성의 광도곡선에서 보이는 부식이 전혀 나타나지 않는 등 몇가지 특이한 관측 현상을 보여주기 때문이다. 전자기 스펙트럼에 대한 정보를 거의 주지 않는 반성(secondary)에 대한 궁금증이 이 쌍성에 대하여 아직까지 해결되지 못하고 있는 가장 큰 관심사이다. 이와 관련하여 다양한 모델이 제시되어 왔는데(Kuiper et al. 1937, Kopal 1954, Struve 1956, Wilson 1971, Lissauer & Backman 1984, Lissauer et al. 1996), 항성 진화적인 관점에서 볼 때 크게 상반된 두가지 주장으로 나뉘어 논란이 되고 있다. 그 중 하나는 이 쌍성계를 이루는 별들이 태양 질량보다 매우 크다고 하는 고질량 모델( $M_1 \sim 20M_\odot$ ,  $M_2 \sim 15M_\odot$ )(Stothers 1971, Castelli 1978, Ferluga 1989, Carroll et al. 1991, Sheffer & Lambert 1999)이며, 다른 하나는 태양 질량과 거의 비슷하다는 저질량 모델( $M_1 < 2M_\odot$ ,  $M_2 < 5M_\odot$ )(Eggleton & Pringle 1985, Lambert & Sawyer 1986, Saito & Kitamura 1986, Saito et al. 1987)이다. 흥미로운 문제는 고질량 모델의 경우에는 주성 F별이 후주계열을 지나고 있으며 반성은 원시형성계가 형성되고 있는 단계로 해석되어 질 수 있으며, 저질량 모델이 맞다면 후점근거성가지 단계에 있는 주성이 많은 질량을 방출하여 불투명한 원반이 형성되었다고 해석되어질 수 있다는 것이다. 원반은 반성을 직접적으로 대신할 수 있는 것이기 때문에 원반 형성의 가설에 대한 관측적 증거를 얻기 위하여 많은 노력을 기울이고 있으며, 특히 주성 또는 반성의 질량을 추정하는데 있어서 다양한 관측자료가 요구되고 있으나 고질량과 저질량 문제를 해결 할 수 있는 결정적인 단서를 찾는다는 더 많은 노력이 필요하다고 하겠다.

이 연구에서는 이 쌍성계의 주성이 고질량 모델과 저질량 모델 중 어떤 것에 더 적합한지 추정할 수 있는 하나의 단서를 구하고자 지금까지 관측된  $\epsilon$  Aur 주성 F별의 측광 자료를 바탕으로 주기분석을 시도하였다. Zsoldos(1994)는 Aikawa(1991)의 이론적 모델 계산 결과를 바탕으로 질량이 작은 별의 경우는 이중 모드의 맥동이 일어나기가 쉽지 않기 때문에 광도곡선의 분석으로 후점근거성가지에 있는 별인지 보통의 초거성인지 구분할 수 있는 단서를 찾을 수 있다고 제안하였다. Zsoldos & Sasselov(1992)는 광도곡선의 형태가  $\epsilon$  Aur와 비슷한 UU Her의 주기를 분석하여 이중모드의 맥동현상을 찾아내고 UU Her가 후점근거성가지에 있는 별이라기 보다는 질량이 큰 보통의 초거성일 수 있다는 단서를 제공하기도 하였다. 지금까지 진행되어온  $\epsilon$  Aur의 주성에 대한 주기 분석은 짧은 기간동안(약 1 - 2년정도)의 관측자료를 이용하여 부분적으로만 이루어져 왔다. Ludendorff(1924), Struve & Elvey(1930), 그리고 McLaughlin(1934)는  $\epsilon$  Aur 주성의 시선속도 곡선을 통해서 이 별의 평균적인 주기가 약 110일이라고 구한 바 있다. 이 결과를 이용해서 Abt(1957)는 B8부터 F8에 이르는 준규칙조기형 초거성들은 더 밝고 만기형으로 갈수록 평균적인 주기가 더 커진다는 관측적 증거를 제시했으며  $\epsilon$  Aur와 동일한 광도계급과 스펙트럼형을 가지는 89 Her(평균주기: 70일)의 주기를 구하고 이들을 서로 비교 분석하였다. Ferro(1985)는  $\epsilon$  Aur의 광도곡선에서 526일, 123.5일(\*), 110일(1928 - 1930년, 식으로부터), 123.3일, 100일(1927 - 1931년, 식바깥부분으로부터), 454일, 159일(\*), 69일(1959년, 식으로부터)의 주기를 찾았고, 시선속도 곡선에서 156일, 112일(\*)(1928 - 1930년, 식으로부터), 122일, 153일(1929년, 식으로부터), 526일, 188일(\*), 137일, 100일(1917 - 1928년, 식바깥부분으로부터),

556일, 167일(\*) (1930 - 1955년, 식바깥부분으로부터), 161일 (1957 - 1961년, 식바깥부분으로부터), 556일(\*), 167일, 57일 (1917 - 1961년, 식바깥부분으로부터), 161일 (1956년, 식으로부터)의 주기를 구하였다(여기서 (\*)는 파워 스펙트럼에서 가장 강한 파워를 보인 것임). 그러나 Ferro가 실질적으로 식바깥 부분의 광도곡선을 이용하여 구한 주기는 123.3일, 100일이라는 것에 주의해야 한다. 왜냐하면 반성에 대한 정보를 뚜렷하게 알 수 없으므로 식기간동안 발생하는 광도의 변화는 주성 자체의 물리적 변화인지 반성의 영향을 받은 것인지 구분하기 어렵기 때문이다. Nha et al. (1993)은 1984년부터 1989년까지의 UBV 광도곡선에서 95.5일의 주기가 가장 강한 파워를 나타낸다고 주장하였다. 가장 최근의 주기분석 결과로는  $\epsilon$  Aur를 지속적으로 관측하고 있는 Hopkins Phoenix 천문대에서 2003년부터 2006년까지 광전측광자료를 이용하여 분석한 66.2일의 주기이다 (Hopkins & Stencel 2006). 각각의 연구결과에서 불규칙한 광도변화의 현상이 비방사상 맥동에 의해서 나타나는 다주기성이라고 해석하고 있지만, 서로 다른 시기에 관측된 결과를 비교해보았을 때 분석된 주기들이 너무 큰 차이를 보여주고 있어 이를 다주기로만 해석하기에는 좀 무리가 있다. 이처럼 선행연구의 주기분석 결과를 볼 때  $\epsilon$  Aur의 주성에 대한 주기 분석이 좀 더 종합적으로 이루어질 필요가 있다고 하겠다. 따라서 지금까지 관측된  $\epsilon$  Aur의 관측자료를 종합적으로 분석하여 이 별의 주기특성을 보다 더 상세히 기술하려는 것이 이 연구의 목적이다.

## 2. 관측자료

여러 문헌을 통해서 1842년 4월 24일부터 2006년 4월 20일까지 약 164년(59,895일)간의 측광자료를 획득하여 식 바깥영역(out of eclipse)에서 관측된 것으로만 정리하였다(표 1). 표 1의 첫번째 열은 자료 구분을 위해 기호로 표시하였으며 두번째 열은 관측기간을 율리우스력과 서기력으로 나타냈다. 특히, 두번째 열의 I-a, I-b, I-c 자료에 표시된 (-)는 율리우스력 2,400,000일 이전에 관측된 자료를 의미한다. 세번째 열과 네번째 열은 각각 관측일수와 관측횟수를 나타냈으며, 다섯번째 열에서는 관측자(또는 관측소)와 평균 안시등급을 계산하여 표시하였다. 마지막 열은 문헌에서 제시한 주기분석 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 표 1에 제시된 자료의 출처는 각각 I, II: Ludendorff(1903), III: VSOLJ(Variable Star Observers' League of Japan)<sup>1</sup>, IV-1a: Güssow(1933), IV-1b: Huffer(1932), IV-2: VSOLJ, V-1: Gyldenkerne(1970), V-2: Larsson-Leander(1959, 1962), VI-1a: HPO(Hopkins Phoenix Observatory)<sup>2</sup>, VI-1b: Nha et al.(1993), VI-1c: VSOLJ, VI-2: KUO(Kongju National University Observatory)<sup>3</sup>, VII: HPO이다. 장주기 변광성의 연구에 많이 사용되고 있는 AFOEV(Association Francaise des Observateurs D'Étoiles Variables)와 AAVSO(American Association of Variable Star Observers)의  $\epsilon$  Aur에 대한 관측 자료는 등급의 유효숫자가 소수점 첫째 자리까지 기록되어 있어 약 0.2등급 정도의 진폭을 가지는  $\epsilon$  Aur의 주성에 대한 주기분석에 적합하지 않다고 판단하여 이 연구에서는 제외하였다. 모아진 관측자료는 부분적으로 오랜 시간 동안 관측되지 못한 부분으로 인하여 7개의 자료군으로 나누었으며 이들은 각각 표 1에서 로마숫자로 표시된 것들이다. 각 자료군의 관측 기간은 I: 7,139일, II: 12,295일, III: 1,870일, IV: 3,317일, V: 1,963일, VI: 2,337일 그리고 VII: 867일이며, 각 자료군들 사이의 시간 간격은 I-II: 4,829일, II-III: 1,192일,

<sup>1</sup> <http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/vsnet>

<sup>2</sup> <http://www.hposoft.com/Astro/PEP/EpsilonAurigae.html>

<sup>3</sup> 미출판된 자료

표 1. 식 바깥 영역에서 관측된  $\epsilon$  Aug의 측광 자료.

구분	관측기간(울리우스트립+2400000/서기력일)	관측일수	관측렛수	관측자(소)/평균 인시동글	문헌에서 제시된 주기(일) <sup>a</sup>
I-a	(-16050 (1842.4.24) - 1089 (1861.11.9)	7139	39	Argelander/ 3.28	-
I-b	(-3706 (1848.9.23) - 352 (1859.11.3)	4058	61	Heis/ 3.45	-
I-c	(-1510 (1854.9.28) - (-942 (1856.4.18)	568	16	Oudemans/ 3.30	-
II-1a	3950 (1869.9.9) - 4492 (1871.3.5)	542	8	Argelander/ 3.29	-
II-1b	4049 (1869.12.17) - 5590 (1874.3.7)	1541	22	Schönfeld/ 3.25	-
II-2	6614 (1876.12.25) - 7420 (1879.3.11)	806	27	Schwab/ 3.44	-
II-3a	8093 (1881.1.12) - 14961 (1899.11.2)	6868	85	Plassmann/ 3.46	-
II-3b	9147 (1883.12.2) - 13645 (1896.3.26)	4498	50	Sawyer/ 3.50	-
II-3c	14288 (1897.12.29) - 16217 (1903.4.12)	1929	36	Luizet/ 3.34	-
II-3d	14584 (1898.10.21) - 15339 (1900.11.15)	755	13	Frau von Prittwitz/ 3.19	-
II-3e	15259 (1900.8.27) - 16223 (1903.4.18)	964	8	Plassmann/ 3.45	-
II-3f	15373 (1900.12.19) - 16245 (1903.5.10)	872	12	Schwab/ 3.36	-
III	17436 (1906.8.14) - 19306 (1911.9.26)	1870	174	VSOLJ/ 3.22	-
IV-1a	24808 (1926.10.20) - 27154 (1933.3.22)	2346	77	Güssow/ 3.40	(123.3, 100)[E] <sup>b</sup> , (156, 112(*))[E], (153, 122)[E]
IV-1b	25266 (1928.1.21) - 26466 (1931.5.5)	1200	39	Stebbins & Huffer/ 3.45	(526, 123.5(*), 100)[OE] <sup>c</sup> , (526, 188(*), 137, 100)[OE]
IV-2	27369 (1933.10.23) - 28525 (1936.12.22)	1156	281	VSOLJ/ 3.23	(556, 167(*))[OE]
V-1	35060 (1954.11.14) - 35290 (1955.7.2)	230	33	Gyldenkerne/ 3.00	161[E(in 1956)]
V-2	36053 (1957.8.3) - 37023 (1960.3.30)	970	50	Larsson-Leander/ 3.42	(454, 159(*), 69)[E], 161[OE], (556(*), 167, 57)[OE]
VI-1a	45982 (1984.10.8) - 47519 (1988.12.24)	1538	182	Hopkins/ 3.05	-
VI-1b	45952 (1984.9.9) - 47627 (1989.4.11)	1675	271	Nha/ 3.61	95.5[OE]
VI-1c	45995 (1984.10.21) - 46066 (1984.12.31)	71	30	VSOLJ/ 3.08	-
VI-2	48274 (1991.1.17) - 48319 (1991.3.3)	45	310	Kim/ 3.02	-
VII	52978 (2003.12.5) - 53845 (2006.4.20)	867	201	Hopkins/ 3.07	66.2[OE]
	59895일(164년)	42508	2025	- / - 3.30( $\sigma$ :0.16)	-

<sup>a</sup>이탤릭체는 시선속도 폭선으로부터 구해진 주기임

<sup>b</sup>식 기간에 구해진 주기

<sup>c</sup>식바깥 기간에 구해진 주기

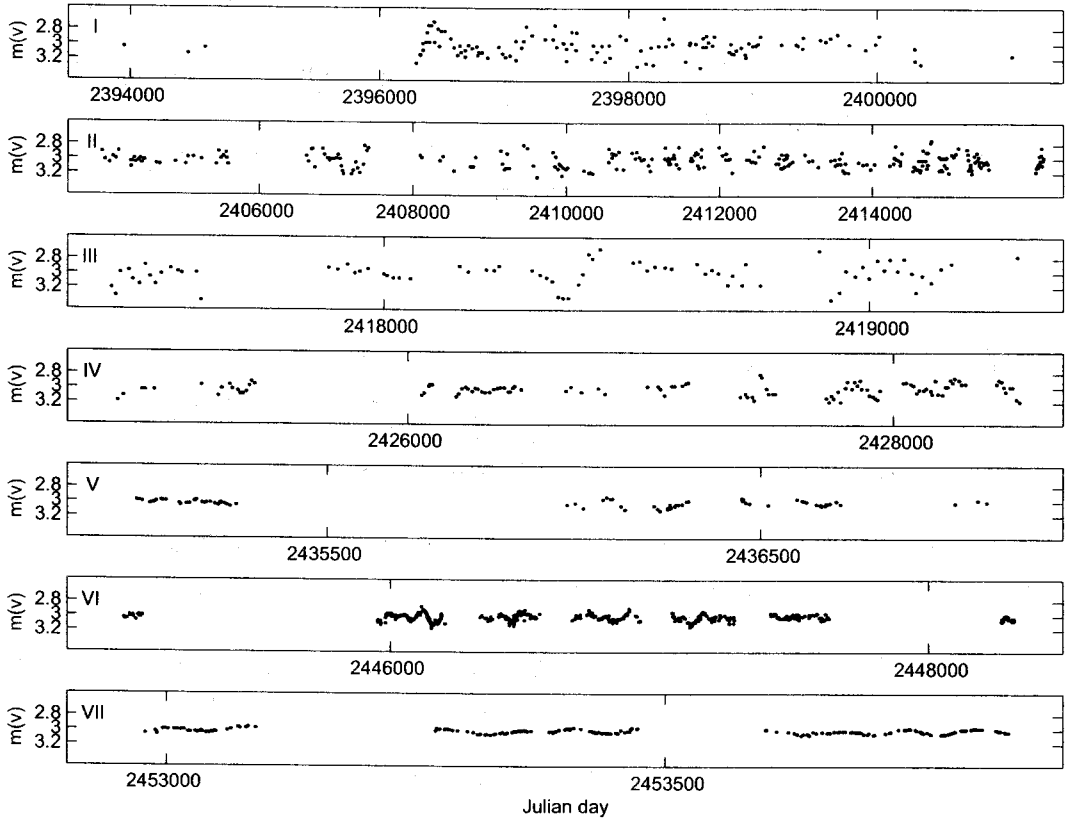


그림 1. 1842년부터 2006년까지 관측된  $\epsilon$  Aur의 식 바깥 영역 광도곡선.

III-IV: 5,502일, IV-V: 6,536일, V-VI: 8,959일 그리고 VI-VII: 4,660일이다. 모든 자료는 안시 파장영역에서 관측된 것이나 동일한 표준 등급계로 변환되어 있지 않아서 가장 조밀한 시간 간격으로 관측되고, 2차 대기 소광계수까지 보정하여 구한 VI-2의 평균 등급 3.02를 기준으로 하여 각 자료의 평균 등급의 영점을 조정하였다. 이렇게 영점이 조정된 안시등급을 광도곡선으로 나타낸 것이 그림 1이다. 이 광도곡선을 보면 알 수 있듯이, 1910년 이전의 자료(I, II, III)들은 밝기 변화가 매우 불규칙하며 그 이후에 관측된 자료에 비해 진폭이 더 큰 경향을 보인다. 이런 현상이 천체의 본질적인 것인지 관측오차인지 구분하는 것은 쉽지 않으나 매우 긴 시간동안에 주기변화를 알아보는 데는 관측값들의 정확성보다 관측자료의 길이가 더 중요하므로(Kiss et al. 1999),  $\epsilon$  Aur 주성의 주기를 분석하려는 이 연구에는 여기에서 정리한 자료들이 충분히 유효할 것이라고 판단하였다.

모아진 자료의 관측값에 표준오차는 제시되어 있지 않았으나 백분의 일등급까지 기록되어 있는 자료들만 분석에 이용하였으므로 개별 관측값의 표준오차가  $\pm 0.01$  등급을 크게 넘지 않을 것이라고 가정하였다. 이러한 가정은 자료군 VI중의 같은 기간동안에 서로 다른 관측소에서 관측된 자료 VI-1a과 VI-1b를 서로 비교하여 보았을 때 타당하다는 것을 알 수 있었다. 그림 2에 나타난 두 자료의 광도곡선을 보면 관측자료들이 매우 불규칙하게 보이지만 광도의 변화 양상은 서로 잘 일치함을

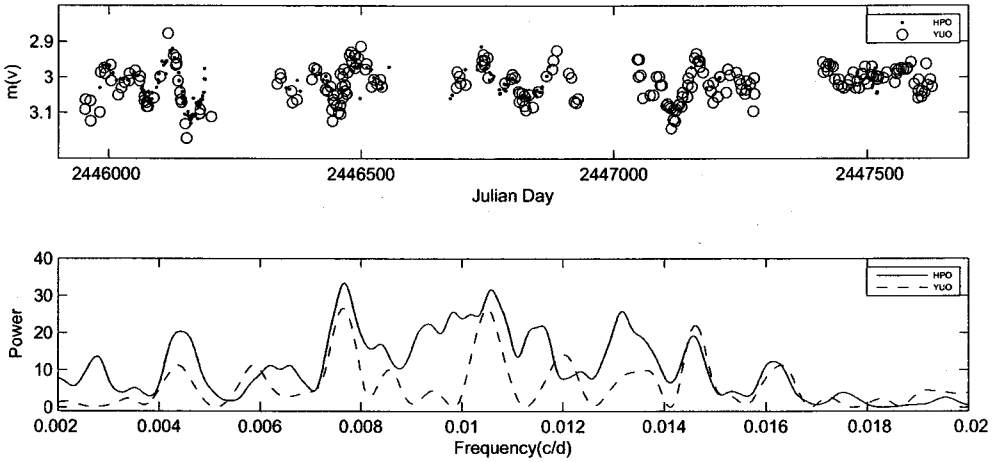


그림 2. 서로 다른 두 관측소(HPO와 YUO)에서 얻어진 광도곡선과 파워 스펙트럼의 비교.

볼 수 있다. 이것은 개별 관측값들의 오차가 광도곡선 본래의 패턴에 영향을 줄 수 있을만큼 크지않다는 것을 간접적으로 입증하는 것이라고 할 수 있다. 또한 두 관측값들의 파워스펙트럼도 비슷한 양상으로 나타났으며, 주요 주파수들이 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이처럼 서로 다른 관측소에서 관측된 자료들이 매우 유사한 파워 스펙트럼을 가지는 것으로 보아 개별 관측값들의 오차(내부 및 외부오차 포함하여)가 주기분석에 영향을 줄 만큼 크지 않다고 판단할 수 있다.

### 3. 주기분석 방법

앞에서 살펴본 것처럼 이 연구에서 분석되어질 시계열 자료들은 일정한 시간 간격으로 얻어지지 못하였다. 따라서 고르지 못한 시계열 자료를 분석하는데 적절한 알고리즘이 어떤 것인지 판단하는 것이 필요하다. 이미 Heck et al.(1985)는 Fourier's(Deeming 1975), autocorrelation(Burki et al. 1978), Lafler & Kinman's(1965), Renson's(1978) 그리고 Stellingwerf's(1978)의 방법들을 비교 연구하였고, Carbonell et al.(1992)는 불균등하게 얻어진 자료의 분석에 대해서 Scargle periodogram(Scargle 1982), Fahlman and Ulrych 방법(Fahlman & Ulrych 1982), Kuhn방법(Kuhn 1982) 그리고 CLEAN deconvolution 방법(Högbom 1974)들을 서로 비교하여 각 알고리즘의 적절성에 대해서 논하였다. Carbonell et al.(1992)는 CLEAN 알고리즘이 무작위 간격들을 가지는 자료에 대한 주기 분석에 가장 뛰어난 성능을 보인다고 하였다. Foster(1995)는 여러 주기를 갖는 자료에 대해서 CLEAN 알고리즘에 바탕을 둔 CLEANest 방법이 매우 적절하다고 하였다. 특히 그는 시간 간격이 큰 자료에 대해서 SLICK 스펙트럼의 유용성에 대해서 언급하였다. 그러나 그의 논문에서 실제 알고리즘을 구현하여 적용하지는 못하였다(Foster 1995). 한편 비정상 신호(Non-Stationary Signal)에 대한 주기 분석은 시간과 주파수공간에 동시에 표현할 수 있는 웨이블릿 변환이 매우 유용하다고 알려져 왔다(see e.g. Scargle 1993, for a detailed review). Foster(1996)은 불균등한 시계열 자료의 주기 분석을 위해서 WWZ(weighted wavelet Z-transform)알고리즘을 개발하였다. 그러나 그의 연구에서 FS Comae의 자료는 매우 큰 시간 간격을 가지고 있어서 주기 결정에 대한 뚜렷한 결론을 제시하지 못하였다. 이는 웨이블릿을 기반한 WWZ알고리즘이 큰 시간 간격을 포함하는 비정상 신호를 분석하는 도구로 더

유용하게 적용되기 위해서는 보다 체계적인 검증이 필요하다는 것을 말해준다고 하겠다. 이 연구에서는 분석되어질 자료의 특성을 고려하여 CLEANest의 SLICK 스펙트럼과 WWZ변환 각각에 대해서 두가지 형태의 모의 자료 - (1)다주기, (2)비정상 자료를 시험 분석하였다. CLEANest의 SLICK 스펙트럼은 PERANSO<sup>4</sup> 2.20(Light Curve and Period Analysis Software)을 이용하여 구하였고, WWZ 알고리즘의 주기 분석은 WinWWZ<sup>5</sup>(Versioin3, Release 2)를 이용하였다. 모의 시험에 사용할 다주기 시계열자료를 얻기 위해서 다음과 같은 방정식을 만들었다.

$$f(t) = 2 + 6 \sin\{2\pi(1/130)t\} + 3 \sin\{2\pi(1/100)t + 2\} + 4 \sin\{2\pi(1/75)t + 1\} + R.N. \quad (1)$$

여기서 t는 단위가 하루인 시간을 나타내며 R.N.은 다주기 함수의 최소 진폭에 대해서 100%이상에 해당하는 무작위 잡음이다. 이 함수에 의해서 생성되는 시계열 자료는 75일, 100일, 130일에 해당하는 주기를 가진다는 것을 알 수 있다. 총 2000일에 해당하는 모의자료를 만든 후에 시간 간격이 불균등하게 자료가 빠져있도록 하였고, 생성된 자료의 시간 간격도 이 연구에서 사용할 실제 자료와 비슷한 수준으로 만들었다. 총 자료에 대해서 각각 (a) 23.6%, (b) 38.3%, (c) 45.5%, (d) 57.9%, (e) 69.1%의 시간 간격이 있는 5개의 자료를 만들었다. 한편 비정상 자료는 2개의 일정한 주기(50일, 100일)를 가지며 동시에 시간에 따라서 주기가 7000일에서 약 20일까지 변하게 되는 함수를 이용하여 만들었다. 시간 간격은 총 자료에 대해서 각각 (a) 29.4%, (b) 34.3%, (c) 43.2%, (d) 59.5%, (e) 63.8%에 해당한다. 그림 3과 그림 4는 각각 다주기 및 비정상 자료에 대하여 CLEANest과 WWZ알고리즘으로 주기를 분석한 결과이다. 각 그림에서 왼쪽은 시계열 모의자료, 중간은 파워 스펙트럼, 그리고 오른쪽 그림은 각 모의자료에 대한 웨이블릿 분석 결과를 나타낸 것이다. 예상한 바와 같이 CLEANest 알고리즘은 SLICK를 적용하면 시간 간격이 매우 큰 다주기 자료에 대해서도 주요 파장을 매우 잘 구분해내고 있다. 그러나 주기가 시간에 따라서 변하는 비정상 시계열자료에 대해서는 어느 정도 이상의 시간 간격을 가지고 있을 때부터 거짓 주파수가 지나치게 증폭되어 주요 주파수를 검출하는데 한계를 나타내고 있음을 알 수 있다(그림 4c,d,e). 이러한 결과는 시간에 따라서 주파수가 변하는 자료에 대해서 CLEANest은 몇 개의 서로 근접한 주파수들이 믿을 수 없을 만큼 큰 파워를 나타내 보일 수 있다고 언급한 Foster(1995)의 주장과도 일치한다. 한편 WWZ의 분석은 시간에 따른 주파수의 변화를 뚜렷하게 알 수 있게 해준다는 것을 확인할 수 있었다(그림 4의 가장 오른쪽 열 참조). 그러나 WWZ의 계산 결과도 시간 간격이 큰 자료에서는 자료가 빠져있는 부분의 주파수 성분을 나타내지 못하므로 주기가 실제로 변하고 있는지(그림 4d) 아니면 시간 간격과 잡음이 지나치게 큰 다주기성 자료인지(그림 3d) WWZ의 등고선을 보아서는 제대로 구분할 수 없었다. 웨이블릿의 결과를 해석하는데 이러한 문제점을 해결하기 위해서 이 연구에서는 CLEANest의 결과를 보완적으로 사용하였다. 그림 3c,d,e에서 알 수 있듯이 잡음과 시간 간격이 매우 크다고 할찌라도 주파수가 시간에 따라서 변하지 않고 주기가 일정한 다주기성 자료라면 CLEANest의 분석은 주요 주파수를 잘 구분할 수 있게 해준다. 따라서 WWZ의 결과로 비정상인지 다주기자료인지 구분하기 어려운 상황에서는 CLEANest의 결과를 보고 비슷한 주파수들이 강한 파워를 나타내면 비정상 자료라는 것을 판단 할 수 있을 것이다.

<sup>4</sup><http://www.peranso.com/>

<sup>5</sup><http://www.aavso.org/data/software/wwzwin.shtml>

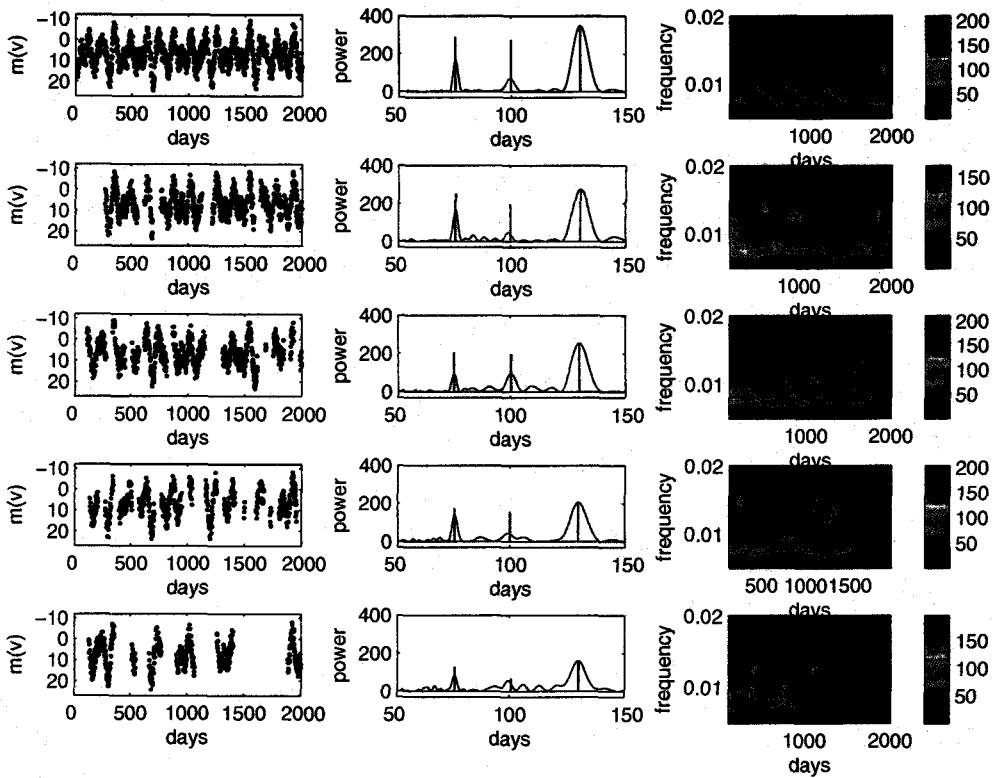


그림 3. 다주기성 시계열 모의자료에 대한 파워스펙트럼과 웨이블릿 분석 결과. 위로부터 (a), (b), (c), (d), (e)를 나타냄.

여기에서는 이 연구의 주기분석을 위해서 (1) 동일한 파장대역에서 관측되고 시간 간격이 지나치게 크지 않은<sup>6</sup> 적절한 자료를 선정하고 (2) CLEANest의 SLICK 스펙트럼으로 주요 주파수를 결정한 후에 (3) 다시 동일한 자료에 대해서 웨이블릿 분석으로 주기를 분석하고 (4) 마지막으로 구해진 주기들을 선행연구와 함께 비교하여  $\epsilon$  Aur의 변광 주기의 특성을 기술하기로 한다. 분석할 자료를 선정하기 위하여 나이퀴스트(Nyquist) 주기가 가능하면 60일이 넘지 않도록 하였으며 관측된 기간이 적어도 예상되는 최대 주기인 550일 보다는 크도록 하였다. 그러나 1954년부터 1955년 사이에 관측된 자료는 230일에 해당하는 자료밖에 없어서 분석에 포함하고 예외적으로 그 자료에 대한 결과를 해석할 때는 200일 이상 되는 주기에 대해서 고려하지 않기로 하였다. 선정한 총 10개의 분석할 자료군을 표 2에 제시하였다.

#### 4. 주기분석 결과

선정한 10개의 자료에 대해서 CLEANest 알고리즘으로 주기를 분석하였다. 가장 먼저 큰 시간 간격으로 인하여 발생할 수 있는 거짓주파수를 제거하기 위해서 창함수(Spectral Window)를 구하

<sup>6</sup>앞에서 모의자료 분석으로부터 총 관측기간의 70%이상에 해당하는 자료가 빠져 있는 것은 주기분석에 부적절하다고 판단할 수 있다.



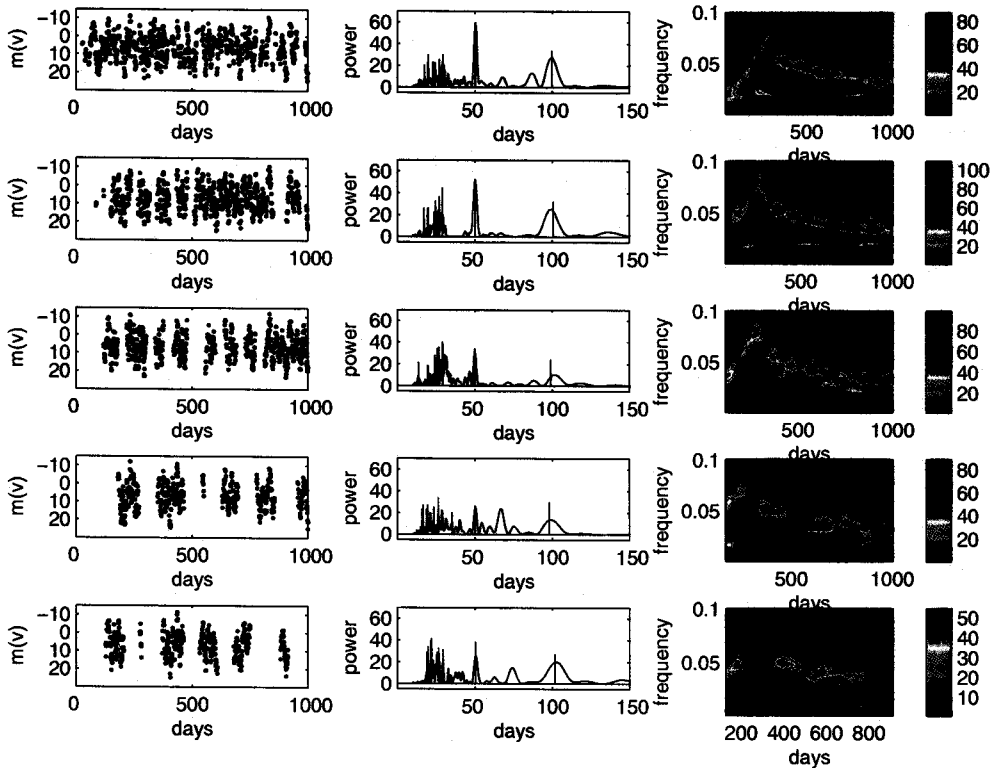


그림 4. 비정상 시계열 모의자료에 대한 파워스펙트럼과 웨이블릿 분석 결과. 위로부터 (a), (b), (c), (d), (e)를 나타냄.

표 2. 주기 분석 자료군.

자료명	관측 기간(JD)	총 관측일	관측횟수	평균 간격(일)	GAP 횟수(일수) <sup>a</sup>
DATA_I(1848-1857)	2396294 - 2399403	3109	101	30.8	6(740)
DATA_II(1876-1879)	2406614 - 2407420	806	27	29.9	2(209)
DATA_III(1897-1903)	2414288 - 2416245	1957	69	28.4	3(876)
DATA_IV(1906-1911)	2417436 - 2419306	1870	174	10.7	3(514)
DATA_V(1926-1933)	2424808 - 2427154	2346	116	20.2	4(1232)
DATA_VI(1933-1936)	2427369 - 2428525	1156	281	4.1	2(325)
DATA_VII(1954-1955)	2435060 - 2435290	230	33	7.0	0(0)
DATA_VIII(1957-1960)	2436053 - 2437023	970	47	19.4	1(123)
DATA_IX(1984-1989)	2445952 - 2447627	1675	271	6.2	4(530)
DATA_X(2003-2006)	2452978 - 2453845	867	201	4.3	2(309)

<sup>a</sup> 자료가 없는 부분의 시간 간격이 100일 이상

였다. 각 자료에 대한 창함수를 그림 5에서 그림 14까지 각 자료 분석결과의 우하단에 나타냈으며 두드러지게 보이는 피크들은 빠져있는 자료로 인하여 만들어진 거짓주파수일 가능성이 크다고 판단하여 본래 자료에서 제거하였다. 가장 강한 파워를 갖는 주파수부터 보통 4개 정도의 거짓 주파수를 제거하였는데, 예외적으로 DATA\_III에서는 7개를, DATA\_X에서는 1개만을 제거하였다. 백색화를 끝낸 자료에 대해서 0.001부터 0.02(주기/일)의 범위로  $10^{-5}$ (주기/일)의 간격으로 SLICK 스펙트럼을 구하였다(그림 5 - 그림 14의 우상단). 자료에 따라서 주요 주파수가 많이 나타나기도 하였으나

DATA\_I, DATA\_V, DATA\_VI, DATA\_VII은 주요 주파수가 2개씩만 나타났다. 앞의 1절과 2절에서 살펴본 기존 연구 결과와 비슷하게, 구하여진 주파수들이 일정하지 못하고 시기별로 매우 불규칙함을 알 수 있었다. SLICK의 차수를 높여서 분석을 하는데도 인접 주파수에서만 강한 피크를 보여주는 것들은 시간에 따라서 주파수가 변한다는 것을 보여준다고 하겠다. 또한 강한 피크를 보이는 것들 중에서도 안정적인 진동모드에 의해서 나타나는 주파수가 아니라 단순히 몇차례에 걸친 광도 변화에 기인한 것들도 있을 것이라고 추정할 수 있다. 이렇게 시간에 따라 주기가 변할 수 있는 자료들을 효과적으로 판단하기 위해서 동일한 자료에 대해서 같은 조건을 적용하여 웨이블릿 분석을 시도하였다. 그림 5에서 그림 14까지 왼쪽 하단은 각 분석자료의 광도곡선을 나타내고 왼쪽 상단은 웨이블릿 분석 결과를 보여준 것이다. 각 시기별로 웨이블릿 분석과 SLICK 스펙트럼 결과를 기술하면 다음과 같다.

1848 - 1857년(DATA\_I, 그림 5) : 앞에서도 언급한 것처럼 좌상단에 있는 그림은 좌하단에 있는 관측자료(광도곡선)에 대하여 웨이블릿 분석으로 구한 웨이블릿 지도이다. 또한 우하단의 그래프는 관측자료에 대한 창함수를 표현한 것이고 우상단에는 관측자료의 파워스펙트럼을 보인 것이다. 이 기간에 관측된 자료는 비교적 시간에 따라서 고르게 분포하고 있으나 창함수에서 강하게 나타난 4개(371.6일, 50.1일, 183.6일, 1000.0일)의 주파수는 제거되었다. SLICK(2)를 적용한 결과 63일, 171일이 주요 주파수로 나타났다. 웨이블릿 지도의 위쪽에는 칼라바(Colorbar)가 있어 웨이블릿 분석 결과에서 WWZ의 세기가 어떻게 되는지를 읽을 수 있도록 하였다. 따라서 웨이블릿 지도를 볼 때 파란색은 배경잡음에 가깝고, 붉은색 계열은 WWZ의 세기가 강한 것이라고 해석할 수 있다. 웨이블릿 지도의 가로축은 시간(관측기간), 세로축은 주파수를 나타낸다. DATA\_I에 대한 웨이블릿 지도의 아랫쪽에서 옆으로 길게 늘어져 보이는 붉은 색의 줄무늬는 이 구간의 전 기간에 걸쳐 걸쳐 370일과 1000일의 주기가 강하다는 것을 보여주고 있는데, 사실은 CLEANest의 결과를 참고해 볼 때 거짓 주파수로 나타났던 것임을 알 수 있다. 그 위쪽으로 대략 2397000일부터 2397500까지 나타난 강한 신호(노란색과 푸른색 부분들)는 약 230일의 주기에 해당하는데, 지속적이지는 못하고 일시적으로 나타난 것처럼 보인다. 그보다 약간 짧은 주기인 170일 정도의 신호가 상대적으로 약한 강도를 가지고 전 기간에 걸쳐 지속적으로 나타나는 것을 볼 수 있다. 125일의 주기가 2398000 근처에서 사라진 것처럼 나타났으나 비교적 지속적으로 나타났고 약 65일의 주기는 SLICK(1)의 스펙트럼 결과와 비슷하게 지속적으로 강한 피크들이 만들어졌다. 그 밖에 2399000일 근처에서 약 85일 정도의 주기가 일시적으로 강하게 보여지고 있다.

1876 - 1879년(DATA\_II, 그림 6) : 관측 자료에서 2406800일 직전과 2407200일 직전에 두 군데의 큰 틈새가 보인다. 백색화를 통해 제거한 주기로는 356.5일, 183.6일, 57.4일, 1000일이다. SLICK 스펙트럼에서는 115일, 66일(또는 75일), 142일(또는 150일)이 주요 피크로 나타났는데, CLEANest 알고리즘으로 각 피크들이 잘 구분되지 않는 것으로 보아 시간에 따라서 주파수가 변하는 자료로 추정된다. 웨이블릿 지도의 750일 근처에서 강한 신호가 나타났으나 이 분석 자료의 총 길이가 806일 정도이므로 큰 의미를 갖지 못한다고 판단하였다. 2407000일 전에 지속적으로 나타난 주기는 약 160일 정도이다. 그 이후로 이 신호는 사라지고 약 220일 정도의 신호가 2407200일 이후에 보여진다. 2407000일 전부터 2407300일까지 강하게 나타난 피크는 주기가 약 110일 정도되는 것인데, SLICK 스펙트럼에서 구하여진 115일의 주기와 비슷하다는 것을 알 수 있다. 또한 분석 자료의 전 구간을 보면 좌상단

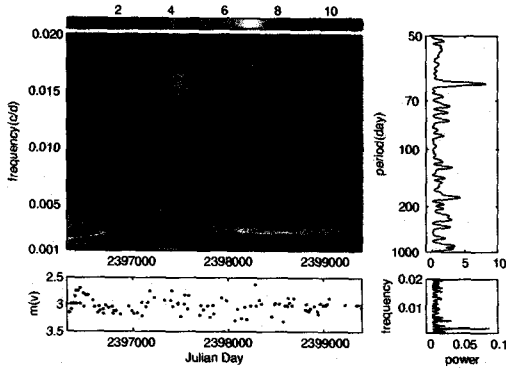


그림 5. DATA\_I(1848 - 1857년)의 분석결과.

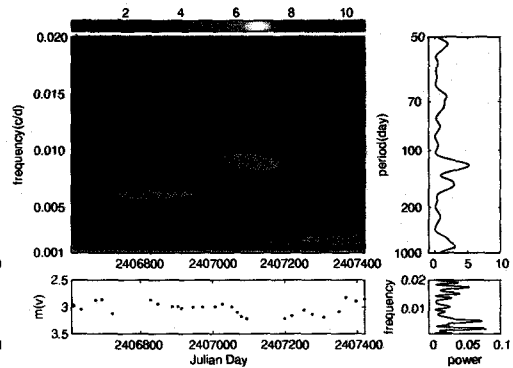


그림 6. DATA\_II(1876 - 1879년)의 분석결과.

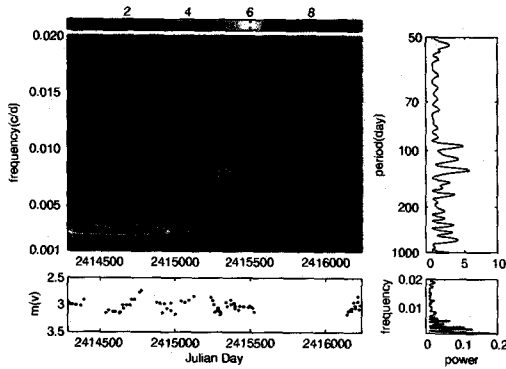


그림 7. DATA\_III(1897 - 1903년)의 분석결과.

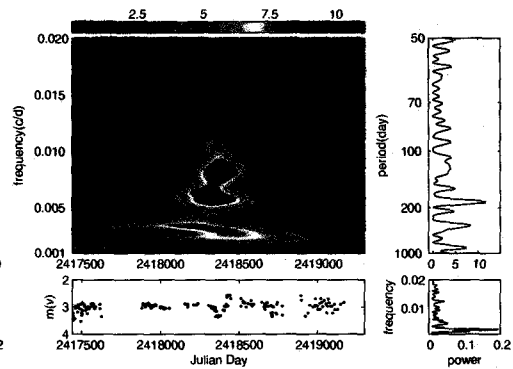


그림 8. DATA\_IV(1906 - 1911년)의 분석결과.

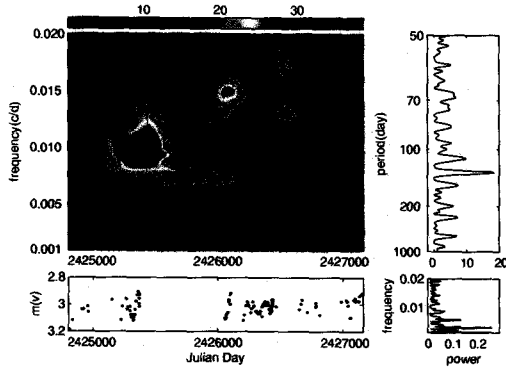


그림 9. DATA\_V(1926 - 1933년)의 분석결과.

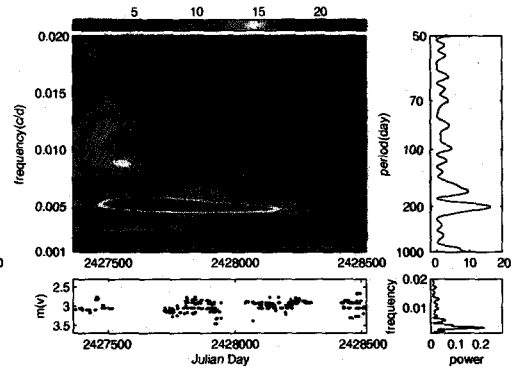


그림 10. DATA\_VI(1933 - 1936년)의 분석결과.

에서 후 하단 방향으로 사선을 그리며 나타난 피크들이 보이는데, 이는 주기가 약 75일부터 약 130일 까지 시간에 따라서 변하고 있다는 생각을 갖게 한다.

1897 - 1903년(DATA\_III, 그림 7): 총 관측 기간은 1957일이나 2415500일 이후로 약 700여일의 기간이 관측되지 않아 실질적으로는 약 1000일 정도의 자료가 분석되었다. 따라서 2415500일 이후로는 웨이블릿 분석이 되지 않았으나 CLEANest는 매우 큰 시간 간격이 있는 자료에 대해서도 주요 주파수를 잘 검출해 내므로 주기 분석의 자료로 사용할 수 있었다. 단, 창함수에서 7개(814일, 388일,

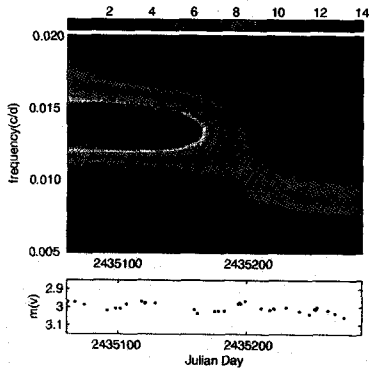


그림 11. DATA\_VII(1954 - 1955년)의 분석결과.

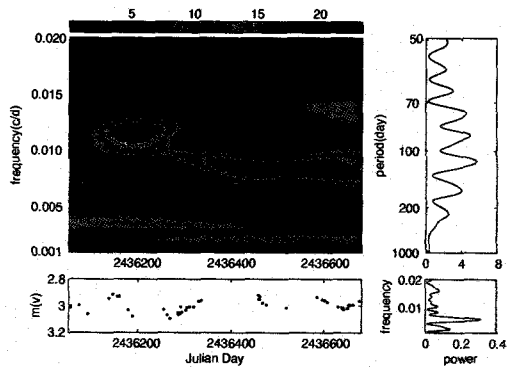


그림 12. DATA\_VIII(1957 - 1960년)의 분석결과.

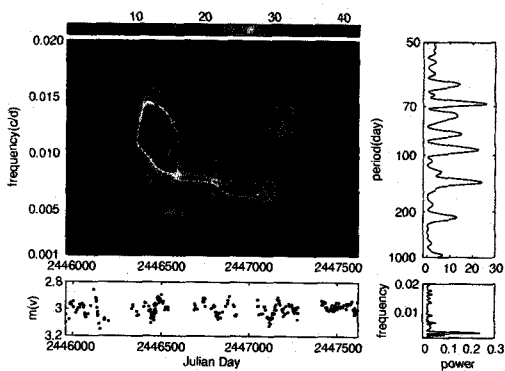


그림 13. DATA\_IX(1984 - 1989년)의 분석결과.

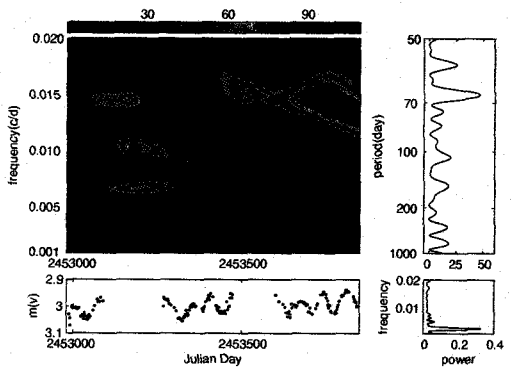


그림 14. DATA\_X(2003 - 2006년)의 분석결과.

310일, 184일, 230일, 262일, 157일)나 되는 강한 피크들을 제거해야만 했다. SLICK 스펙트럼에서 121일, 463일, 128일, 162일의 주기가 강하게 나타났다. 웨이블릿 지도의 좌측 하단에 보이는 강한 신호는 약 370일 근처로 창함수에서 나타난 거짓 주파수일 가능성이 높다고 판단되어 실제 주파수의 결과로는 고려하지 않았다. 2415500일 전에 보여지는 피크는 약 124일에 해당하는 주기로써 SLICK에서 나타난 121일과 128일의 주기가 함께 나타난 것으로 볼 수 있다. SLICK에서 나타나지 않은 약 58일의 주기가 2414700일과 2415500일에 연속적으로 나타나서 지속적인 신호일 가능성을 보여주었다. 오히려 SLICK에서 상대적으로 더 강하게 나타난 124일은 2415500일 전에만 주기성을 보여주고 있어 일시적인 신호일 가능성이 있다.

1906 - 1911년(DATA\_IV, 그림 8) : 이 기간에 관측된 자료들은 2417500일과 1418500일 근처에서 RV Tau와 광도 곡선의 특징을 보여준다. 3번의 큰 시간 간격이 보이기는 하나 관측된 자료수가 많아서 관측된 평균 시간 간격이 약 10일 정도이다. 창함수에서도 388일, 517.9일에 해당하는 두 개의 피크가 강하게 나타났다. SLICK를 4차례 적용하여 182일, 149일, 292일, 106일의 주기를 구하였다. 웨이블릿 지도에서는 2418300일부터 2418500일까지 광도곡선에서 뚜렷하게 나타난 파형때문에 매우 강한 피크들이 만들어졌다. 선명하게 보이는 3개의 강한 피크는 각각 121일, 169일, 312일에 해당한다. 웨이블릿 지도를 자세히 보면 이 3개의 주기는 진폭이 약해지기는 하지만 1800여일동안 지속적으로 나타나 있는 것을 알 수 있다. 그 외에 69일의 주기에 해당하는 신호가 2417800일부

터 2419000까지 반복적으로 나타났다. 이것은 2418000일 이후로 2418500일까지 70일에서 약 120일 까지 시간에 따라서 변화되는 신호가 강하게 나타나고 있어서 SLICK 스펙트럼에서는 제대로 분석 되지 못한 신호라고 생각된다.

1926 - 1933년(DATA.V, 그림 9) : 이 자료는 관측 기간 중 약 500여일(2425500일 - 2426000일)의 자료가 빠져있다. 창함수의 피크도 6개(358.9일, 963.4일, 183.0일, 556.2일, 116.5일, 282.0일)가 상당히 강하게 나타났다. 반면에 SLICK 스펙트럼은 125일과 105일 2개의 피크로 선명하게 나타났다. 웨이블릿 지도에서는 105일에 해당하는 신호는 자료의 전반부에 해당하는 2425500일까지 아주 강하게 나타났고, 2426500일 이후에 진폭이 아주 약해진 것을 보여준다. 125일에 해당하는 신호는 전반부와 후반부의 247000일 근처에서 보여진다. 한편, SLICK에서는 나타나지 않았던 67일의 신호가 2426000일에서 2426500일까지 보여지고 2426500일 이후에는 77.5일의 신호가 약 400일간 지속되었고, 58일의 신호는 약 1200일에 해당하는 후반부의 전 기간에 반복적으로 나타났다.

1933 - 1936년(DATA.VI, 그림 10) : 두 군데에서 100일 이상의 큰 간격을 보이며 약 325일 동안 자료가 누락되어 있었으나 4개의 주파수(342.6일, 262.3일, 176.2일, 544.7일)를 제거한 후에 SLICK를 적용한 결과 200일과 158일이 강한 주기로 나타났다. 앞의 자료들과 비교해 볼 때 60일과 110일 근처의 고주파 성분들이 검출되지 않았다. 웨이블릿 지도에서 나타난 150일과 200일 사이에 강한 피크는 창함수에서 구해진 176일 주기 성분을 제외하고 고려하면 SLICK의 결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 한편 SLICK에서는 검출되지 않았던 75일에서 90일 사이, 그리고 105일에서 120일 사이의 성분들이 2427500일 이전에 뚜렷하게 나타났고, 2428000일 이후에도 반복적으로 중간 정도의 적당한 진폭을 보여주었다. 이러한 결과는 고주파 성분들이 작은 진폭이지만 지속적으로 유지되고 있다는 것을 알 수 있게 해 준다.

1954 - 1955년(DATA.VII, 그림 11) : 이 시기에 관측된 자료는 총 길이가 230일 밖에 되지 않아서 저주파 성분의 주기는 검출되지 못하였다. 누락된 자료의 기간은 크지 않아서 창함수에서는 161.7일, 73.2일의 2개의 성분이 뚜렷하게 나타났다. SLICK(2)의 분석 결과는 61일과 123일의 주기를 얻게 하였다. 웨이블릿 결과의 전반부에서 보이는 중심 주파수 0.0136 c/d(73일 주기)의 성분은 창함수에서 나타난 73.2일과 유사하여 실제적인 신호의 성분에서는 제외하였다. 또한 웨이블릿 결과는 61일과 123일 주기의 성분과 더불어 SLICK 스펙트럼에서는 보이지 않았던 100일 근처의 주기도 지속적으로 나타나는 것을 보여주었다.

1957 - 1960년(DATA.VIII, 그림 12) : 창함수에서 구한 173.3일, 1000.0일, 425.7일의 주기 성분을 제거하였다. SLICK(6) 스펙트럼을 통하여 76일, 234일, 110일, 185일, 463일, 139일에 해당하는 주요 성분들을 구하였다. SLICK 스펙트럼을 반복적으로 구하는 과정에서 처음에 강하게 나타났던 성분보다 오히려 잔차 스펙트럼에서 더 강한 진폭의 성분들이 나타나는 등 단순한 다주기성 자료에서는 볼 수 없는 현상이 나타났다. 예상한 바와 같이 웨이블릿 분석에서 2436200일 부터 2436400일 까지의 기간에 주기가 85일에서 119일로 갑작스럽게 증가되고 있는 현상을 발견할 수 있었다. 또한 저주파 성분에서 지속적으로 유지된 것들은 476일과 약 270일 정도의 주기가 나타났고, 고주파 성분에서는 2436300일 이후에 69일 주기의 신호가 진폭이 강하게 나타났다.

1984 - 1989년(DATA.IX, 그림 13) : 앞서서도 언급한 바와 같이 두 관측소에서 동시에 관측된 자료들이 매우 유사한 패턴의 광도곡선을 보여주고 있는 구간이다. 창함수에서 369.0일의 성분이 현

저하게 강한 파워를 보여주었고 517.9일과 161일의 성분도 약하게 나타났다. 따라서 이 세계의 성분을 원래의 자료에서 제거한 후에 SLICK 스펙트럼을 구하였다. 관측오차가 크지 않을 것이라고 판단된 자료임에도 불구하고 SLICK를 구하는 과정에서 잔차들의 스펙트럼이 매우 불규칙하게 나타났다. 결국 SLICK(7)까지 적용하여 68일, 95일, 61일, 75일, 220일, 539일의 주요 성분을 구하였다. 이 성분들이 시간에 따라서 얼마나 오랫동안 지속되는지를 조사하는데, 웨이블렛 분석이 유용하였다. 그림 14에서 보는 바와 같이 2446300일부터 2447300일까지 89일에서 149일로 급격하게 주기가 증가하고 있는 패턴을 보여준다. SLICK 스펙트럼에서 나타난 주요 성분 중에서 61일, 75일, 95일, 220일 등의 주기는 전 구간에 걸쳐서 반복적으로 나타나 있는 것을 보여준다. 또한 SLICK에서는 제대로 검출되지 못하였으나 125일과 85일의 성분도 지속적으로 유지되고 있음을 알 수 있었다.

2003 - 2006년(DATA\_X, 그림 14) : 가장 최근에 얻어진 정밀한 측광자료로써 두 군데의 큰 시간 간격을 제외하고서는 샘플링의 시간 분해능이 매우 좋다. 창함수에서 얻어진 374.3일의 가장 강한 피크를 제거하였다. SLICK 스펙트럼에서는 66일, 310일, 108일의 주기를 구하였다. 웨이블렛 지도에서는 추가적으로 150일과 555일 주기의 성분이 검출되었고 2453550일경부터는 66일의 주기가 75일로 증가하고 있음을 발견할 수 있었다.

이상과 같은 결과에서 얻어진 주기들과 선행연구에서 제시된 주기들을 함께 종합하여 표 3에 정리하였다. 웨이블렛 지도에서 구한 주기는 숫자 옆에 (w)로 구분하였고, 선행연구에서 얻어진 주기는 (r)을 표기하여 구분하였다. 60 - 69일, 120 - 129일의 두 구간에서는 약 160년에 걸친 거의 모든 자료군에서 중요한 주기로 분석되었음을 선명하게 볼 수 있다. 위의 두 구간보다는 약하지만 100일에서 129일 사이와 150일에서 169일 사이의 구간에서도 많은 자료군에서 강한 주기들로 분석되어졌다.

주기 특성을 좀 더 자세히 알아보기 위해서  $\pm 2$ 일 구간으로하여 dots분포를 그려 보았다(그림 15). 앞에서 살펴본 바와같이 67일과 123일의 주기가 두개의 선명한 피크를 보여주고 있다. 각각의 편차는  $\pm 2$ 일이다. 또한 61일과 160일 근처에서도 전 구간에서 절반 정도 나타나는 좋은 주기 특성을 보여주고 있으며 110일과 552일도 반복적으로 나타나 있음을 알 수 있다. 그러나 이들은 편차가  $\pm 4 - 5$ 일 정도로 매우 커서 안정적인 진동모드라고 해석하기에는 어려움이 있다. 이 연구에서 찾아낸 두 개의 주기에 대해서 위상에 따른 광도곡선을 작성하기 위해서 진폭 차이가 크지 않은 4개의 자료군, 즉 DATA\_VII, DATA\_VIII, DATA\_IX, DATA\_X을 모두 합하였다. 그림 16은 이렇게 50년 이상(18,785일) 관측된 자료를 통하여 얻어진 위상 광도곡선이다. 간헐적으로 강하게 나타나는 다른 주기 특성들이 간섭현상을 일으켜 선명한 파형을 보기는 힘들지만 67일과 123일의 주기는 분명히 오랜 시간 동안 지속된다는 것을 확인할 수 있었다.

## 5. 결론 및 논의

지금까지  $\epsilon$  Aur의 주성에 대한 광도곡선을 분석하여 주기를 구하였다. 이 연구에서 구한 자료들과 측광 및 시선 속도곡선의 자료로 얻어진 선행 연구의 주기들을 통합적으로 분석하여 지속적이고 안정적으로 나타나는 2개의 주기를 찾아냈다. 이들은 각각 67일과 123일이며 모두  $\pm 2$ 일의 오차 범위에서 구하여졌다. 기존의 주기 분석 결과에서는 이와 같은 2개의 주기가 명확하게 드러나지 않았고, 단지 여러 개의 주기들이 관측할 때마다 불규칙하게 나타난다고 인지되어 왔었다. 이렇게 종합

표 3. 주기 분석 결과

구간(일)	DATA_I	DATA_II	DATA_III	DATA_IV	DATA_V	DATA_VI	DATA_VII	DATA_VIII	DATA_IX	DATA_X
50-59			57(w <sup>a</sup> )		58(w)			57(r)		
60-69	63 <sup>b</sup>	66(w)	66	69(w)	68(w)	61		69(w) 69(r)	61 68	66 68(w) 66.2(r)
70-79								76	75	
80-89						83(w)		86(w)		
90-99									95 95.5(r)	
100-109				106	105 100(w) 100(r <sup>c</sup> , 3회)	105(w)				108 100(w)
110-119		115 112(w)			112(r)	116(w)		110		
120-129	125(w)		121 128 124(w)	121(w)	125 125(w) 123(r <sup>d</sup> , 3회)	123		120(w)	125(w)	
130-139					137(r)			139		
140-149		142		149						
150-159		150			151(w) 153(r) 156(r)	158 158(w)		159(r)	155	150(w)
160-169	166(w)	165(w)	162	169(w)	167(r)	161(r)		161(r) 167(r)		
170-179	171									
180-189				182	188(r)			185		
190-199						192(w)				
200-249						200		234	220	
250-299				292				270(w)		
300-399				312(w)						310
400-499		463	434(w)			463 476(w) 454(r)				
500-599					526(r, 2회)	556(r)		556(r)	539	555(w)

<sup>a</sup> 웨이블릿 분석으로 구한 주기임.

<sup>b</sup> 숫자만 있는 것은 CLEANest 알고리즘의 SLICK를 적용하여 구한 주기임.

<sup>c</sup> 실험 연구에서 구한 주기이며 표 1에 제시되어 있음.

<sup>d</sup> 자체하는 각각 123, 123.5, 122

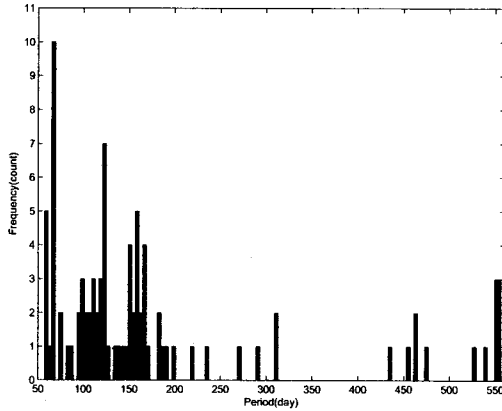


그림 15. 주요 주파수(주기)에 대한 돛수분포.

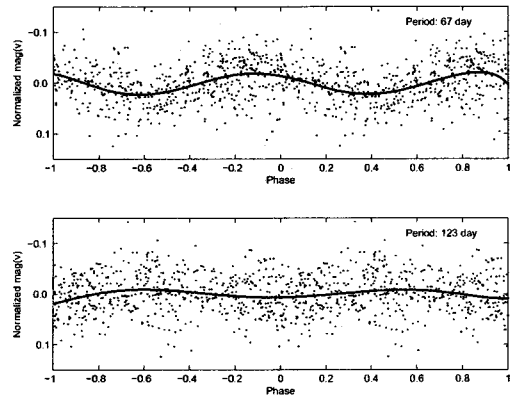


그림 16. 주기 67일과 123일에 대한 위상 광도곡선.

되어진 결과로 인하여 이 황색 초거성이 이중 모드 또는 다주기적 진동 특성을 가지고 있을 수 있다는 생각을 갖게 된다. 만약 이중 모드의 진동을 하고 있다고 하면 Petersen의 도표( $P_1/P_0$  대  $P_0$ )를 이용하여 질량을 추정할 수 있을 것이다(Petersen 1973). 67일과 123일을 각각  $P_1$ ,  $P_0$ 라고 가정하면  $P_1/P_0$ 은 0.54이며, 이러한 결과는 불행히도 Petersen 도표의 범위를 벗어난다. 그러나 그 도표를 통하여 대략 추정할 수 있듯이  $\epsilon$  Aur 주성 F별이 도표에서 읽을 수 있는 한계 질량  $12M_{\odot}$ 보다 훨씬 더 큰 질량을 가진다고 판단할 수 있다. 따라서 이 연구의 결과는 이 쌍성계가  $M_1 \sim 20M_{\odot}$ ,  $M_2 \sim 15M_{\odot}$ 로 이루어져 있다는 고질량 모델을 지지한다고 할 수 있다.  $\epsilon$  Aur의 주성과 비슷한 광도곡선의 특징을 보이는 BL Tel(Zsoldos 1994), HD 161796(Fernie 1983)도 Petersen 도표를 통하여 이와 유사한 결론들을 유추하고 있음을 상기할 필요가 있다.

이상과 같은 결론과 관련하여 몇가지 논의가 필요하다. 두개의 뚜렷한 주기 이외에도 2개, 더 많게는 4개까지 주요 주파수로 인정할 수 있다는 것이다. 관측 자료가 진폭의 변화까지 찾아낼 수 있을 만큼 엄밀하게 보정되었다면 각 주파수를 이론적인 모델에 맞도록 동정하고 이 별의 진동특성을 좀 더 명쾌하게 기술할 수 있었을 것이다. 현재로는 123일에 해당하는 0.00813 c/d 주파수를 기본 모드로 가정하였으나, 표준편차가 크기는 하지만 다른 주파수(예를 들면 555일에 해당하는 0.00180 c/d)들을 기본 주파수로 동정할 수도 있을 것이다. 또한 진폭의 변화를 정확하게 얻어낼 수 있다면 진동 주파수가 시간에 따라서 변하게 되는지도 점검할 수 있을 것이다. 이러한 연구를 더 이상 진행하지 못한 이유는 얻어진 관측 자료에 대한 정밀성의 한계때문이라는 것을 인정하지 않을 수 없다. 한편, 웨이블렛 분석을 통하여 알 수 있었던 바와 같이 시간에 따라서 일시적으로 변하는 진동 특성이라든지 안정적인 진동모드라고는 보기 어려운 몇 차례의 광도 변화 현상들을 웨이블렛 지도에서 효과적으로 구분할 수 있었다. 간헐적으로 나타나는 주기 특성이 웨이블렛의 지도에서는 마치 초거성의 표면에서 일어나는 매우 큰 대류 세포에 의해서 광도 변화가 유발되는 것처럼 유추할 수 있었는데, Kiss et al.(2006)도 초거성의 불규칙한 광도 변화는 대류와 진동의 결합 때문에 생성된다고 주장한 바 있다. 한가지 더 염두해 두어야 할 것은 현재로서는 이 별이 주기의 변화를 겪기 보다는 다 주기의 진동 특성을 가지고 있다고 결론 지을 수 있고, 뚜렷한 이중 모드 진동 특성은 가지지 못한



다고 하더라도 질량이 큰 별이라고 주장하는데는 변함이 없다는 것이다. 이것은 최근에 BOES(보현산 천문대 에셀분광기)로 관측된 고분산 분광자료(Lee 2007)<sup>7</sup>에서 3차 준선택과정을 확인할 수 있는 Tc<sup>99</sup>(흡수선 4238Å, 4262Å, 4297Å)를 검출할 수 없었다는 사실과도 일치하는 결론이다. 이렇게 매우 큰 시간 간격을 가지고 있는 자료를 몇 개의 자료군으로 구분하여 안정적인 주기들을 찾아냈음에도 불구하고 전 구간을 통하여 조밀한 자료를 획득하여 좀 더 명쾌한 결과들을 얻지 못한 것이 미흡한 점이라는 것을 인정하지 않을 수 없다. 여기에서 사용한 CLEANest와 웨이블렛 알고리즘이 시간 간격이 큰 자료와 비정상 자료의 시계열 분석에 매우 적합한 도구 중 하나라는 것을 부인할 수 없지만 최근에 활발하게 연구되고 있는 신경망(Neural networks) 알고리즘을 적용하여 분석해 보는 것도 좋을 것이라고 생각한다(eg. Tagliaferri et al. 1999, 2003, Ciaramella et al. 2004). 또한 Serre et al.(1992)이 RV Tauri 변광성의 광도곡선 분석에서 빠져 있는 자료 부분을 예측할 수 있는 알고리즘을 적용하고난 후 Sterl(2001), Fraillon & Appourchaux(2001) 등이 틈새 채우기(gap-filling) 방법으로 창합수가 좋지 못한 시계열 관측 자료의 한계를 극복한 것을 볼 때  $\epsilon$  Aur의 자료에도 다양한 분석 알고리즘을 적용해 보는 것이 중요하다고 생각한다. 그러나 조밀하게 관측된 자료를 가지고 분석을 시도하는 것이 가장 좋은 방법이므로 이렇게 밝은 별에 대해서 꾸준한 관측을 시도하는 것은 수세기과 같은  $\epsilon$  Aur의 정체를 밝혀내는 것 뿐만이 아니라 황색 초거성의 진동 기작을 명확하게 이해하는데 매우 귀중한 역할이 될 것이라고 생각한다.

**감사의 글:** 이 연구에서 인용된 미출판된 자료들을 제공해 주신 공주대학교 김희수 교수님과 보현산 천문대 이병철님께 감사를 드립니다. 또한 BOES에서 관측된 분광자료를 처리하여 이 연구의 귀중한 자료로 사용할 수 있도록 힘써 주신 강동일 박사님께도 감사를 드립니다. 더욱이 심사과정에서 논문 전체를 꼼꼼히 살펴주시고 미흡한 부분을 잘 보완할 수 있도록 좋은 조언을 해주신 익명의 심사위원님들과 편집위원님들께 깊은 감사를 드립니다. 이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2006-214-C00035).

## 참고문헌

- Abt, H. A. 1957, ApJ, 126, 138  
 Aikawa, T. 1991, ApJ, 374, 700  
 Burki, G., Maeder, A., & Rufener, F. 1978, A&A, 65, 363  
 Carbonell, M., Oliver, R., & Ballester, J. L. 1992, A&A, 264, 350  
 Carroll, S. M., Guinan, E. F., McCook, G. P., & Donahue, R. A. 1991, ApJ, 367, 278  
 Castelli, F. 1978, A&A, 69, 23  
 Ciaramella, A., Bongardo, C., Aller, H. D., Aller, M. F., De Zotti, G., Lähteenmaki, A., Longo, G., Milano, L., Tagliaferri, R., Teräsanta, Mornikoski, M., & Urpo, S. 2004, A&A, 419, 485  
 Deeming, T. J., 1975, Astrophys. Space Sci., 36, 137  
 Eggleton, P. P. & Pringle, J. E. 1985, ApJ, 288, 275  
 Fahlman, G. G. & Ulrych, T. J. 1982, MNRAS, 199, 53  
 Ferluga, S. 1989, MmSAI, 60, 211F  
 Fernie, J. D. 1983, ApJ, 265, 999  
 Ferro, A. A. 1985, MNRAS, 216, 571  
 Foster, G. 1995, AJ, 109, 4  
 Foster, G. 1996, AJ, 112, 4

<sup>7</sup>미출판된 자료

- Fraillon, D. F. & Appourchaux, T. 2001, *MNRAS*, 324, 1159
- Güssow, M. 1933, *Astronomische Nachrichten*, 250, 73
- Gyldenkerne, K. 1970, *Vistas Astr.*, 12, 199
- Heck, A., Manfroid, J., & Mersch, G. 1985, *A&ASS*, 59, 63
- Högbom, J. A. 1974 *A&AS* 15, 417
- Hopkins, J. L. & Stencel, R. E. 2006, *Astronomical Sciences symposium*, 25, 13H
- Huffer, C. M. 1932, *ApJ*, 76, 1
- Kiss, L. L., Szabó, Gy. M., & Bedding, T. R. 2006, *MNRAS*, 372, 1721
- Kiss, L. L., Szatmary, K., Cadmus, Jr. R. R., & Mattei, J. A. 1999, *A&A*, 346, 542
- Kopal, Z. 1954, *Observatory*, 74, 14
- Kuhn, J. R. 1982, *AJ*, 87, 196
- Kuiper, G. P., Struve, O., & Stromgren, B. 1937, *AJ*, 86, 570
- Lafler, J. & Kinman, T. D. 1965, *ApJS*, 11, 216
- Lambert, D. L. & Sawyer, S. R. 1986, *PASP*, 98, 389
- Larsson-Leander, G. 1959, *Arkiv. Astr.*, 2, 283
- Larsson-Leander, G. 1962, *Arkiv. Astr.*, 3, 17
- Lee, B. C. 2007, private communication
- Lissauer, J. J. & Backman, D. E. 1984, *ApJ*, 286, L39
- Lissauer, J. J., Wolk, S. J., Griffith, C. A., & Backman, D. E. 1996, *ApJ*, 465, 371
- Ludendorff, H. 1903, *Astronomische Nachrichten*, 164, 81
- Ludendorff, H. 1924, *Sitzungsab. d. Preuss. Akad. d. Wissensch, phys. math Kl*, p.49
- McLaughlin, D. B. 1934, *ApJ*, 79, 235
- Nha, I. S., Kim, H. I., Lee, Y. S., & Jeong, J. H. 1993, *ASPC*, 38, 291
- Petersen, J. O. 1973, *A&A*, 27, 89
- Renson, P. 1978, *A&A*, 63, 125
- Saito, M. & Kitamura, M. 1986, *Ap&SS*, 122, 387S
- Saito, M., Kawabata, S., Saijo, K., & Sato, H. 1987, 39, 135
- Scargle, J. D. 1982, *ApJ* 263, 835
- Scargle, J. D. 1993, in *Applications of Time Series Analysis in Astronomy and Meteorology*, eds. T. Subba Rao, M. B. Priestley & O. Lessi (London: Chapman & Hall)
- Schmidtke, P. 1985, in *1982-1984 Eclipse of Epsilon Aurigae*, NASA Conf. Publ. 2384, ed. R. Stencel (Washington: NASA), p.65
- Serre, T., Auvergnu, M., & Goupil, M. J. 1992, *A&A*, 259, 404
- Sheffer, Y. & Lambert, D. L. 1999, 111, 829
- Stellingwerf, R. F. 1978, *ApJ*, 224, 953
- Sterl, A. 2001, *Geophysical Research Letters*, 28, 2473
- Stothers, R. 1971, *Nature*, 229, 180
- Struve, O. 1956, *PASP*, 68, 27
- Struve, O. & Elvey, C. T. 1930, *ApJ*, 71, 136
- Tagliaferri, R., Ciaramella, A., Milano, L., Barone, F., & Longo, G. 1999, *A&ASS*, 137, 391
- Tagliaferri, R., Longo, G., Milano, L., Acernese, F., Barone, F., Ciaramella, A., De Rosa, R., Donalek, C., Eleuteri, A., Raiconi, G., Sessa, S., Staiano, A., & Volpicelli, A. 2003, *Neural Networks*, 16, 297
- Thompson, D. T., Lutz, B. L., Lockwood, G. W., & Sowell, J. R. 1987, *ApJ*, 321, 450
- Wilson, R. E. 1971, *ApJ*, 170, 529
- Zsoldos, E. 1994, *A&A*, 286, 870
- Zsoldos, E. & Sasselov, D. D. 1992, *A&A*, 256, 107