

## W UMa형 접촉쌍성 SS ARIETIS의 공전주기 변화<sup>1</sup>

김 천 휘

충북대학교 천문우주학과

한 원 용 · 윤 재 혁

천문대

나 일 성

연세대학교 천문대기과학과

### PERIOD CHANGES OF W UMa TYPE CONTACT BINARY SS ARIETIS

Chun-Hwey Kim

Department of Astronomy & Space Science, Chungbuk National University

Wonyong Han, Jae Hyuk Yoon

Korea Astronomy Observatory

Il-Seong Nha

Department of Astronomy & Atmospheric Science, Yonsei University

e-mail: kimch@astro.chungbuk.ac.kr, whan@hanul.issa.re.kr, isnha@bubble.yonsei.ac.kr

(Received April 20, 1997; Accepted May 20, 1997)

#### 요 약

1996년 11월부터 1996년 12월까지 열흘간 W UMa형 접촉쌍성 SS Ari의 BVR CCD 측광관측을 수행하였다. 이 관측으로부터 여덟 개의 새로운 극심시각을 결정하였다. 이 극심시각과 발표된 모든 극심시각을 분석하여 SS Ari의 공전주기가 이전 학자들이 주장한 바대로 주기적인 변화를 한다는 것을 확인하였다. SS Ari의 궤도공전주기의 변화 진폭은 약 0.053일이며, 그 주기는 약 58년이다. 이 변화의 원인을 1) 제3 천체에 의한 광시간 효과, 2) 한 성분별에서의 주기적 자기활동에 의한 형상 변화 효과란 두 가지 관점에서 조사하였다. 전자로 해석할 경우 제3 천체의 질량은 약  $1.3M_{\odot}$ 인데, 존재한다면, 백색왜성이나 쌍성일 가능성이 높다. 분광관측으로 얻은 SS Ari계의 시스템 속도는 이를 뒷받침하는 것 같다. 후자로 해석할 경우, 자기활동이 심한 별은 주성이다. 이때 이론적인 주성의 밝기 변화 요구량은  $\pm 0.^m08$ 이다. 그러나, 관측자료의 부족으로 이를 검증할 수 없다. 결론적으로 현재의 관측자료를 가지고, 두 해석 중 어느 것이 바른 해석인지를 결론지을 수 없다. 또한, SS Ari의 공전주기의 변화에는 위의 변화 위에 약  $0.^d001$ 의 작은 진폭을 갖고 약 14년의 주기적 변화가 겹쳐 있다. 이 변화의 원인에 대해서도 아직 명확히 결론을 내릴 수 없다.

<sup>1</sup>이 연구는 1996년도 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비 (BSRI-96-5426) 지원에 의한 것임.

## ABSTRACT

The BVR CCD photometric observations of W UMa-type eclipsing binary SS Ari were made on ten nights from November 1996 to December 1996. Eight new times of minimum lights were derived. The analysis of times of minima of SS Ari confirms the suggestions of other previous investigators that the orbital period of SS Ari have been suffering from a sinusoidal variation. The amplitude and period for the cyclic period changes were calculated as about  $58^s$  and  $0.^d053$ , respectively. The period variation has been discussed in terms of two potential mechanisms: 1) the light-time effect due to a hypothetical third body and 2) deformations in the convective envelope of a magnetically active component. In the earlier case, the third body has a mass of  $1.3M_{\odot}$ , if exists, in the form of a white dwarf or a binary system. It seems that the system velocities from the spectroscopic observations supports this interpretation. Meanwhile in the latter case, the primary component is mainly responsible for the magnetic activity of this system with a theoretical magnitude amplitude of  $\pm 0.^m08$ . However, we cannot make a conclusion which is reasonable explanation at this point, due to lack of observational data. Moreover, the period variation of SS Ari shows duplication about  $14^d$  cyclic period with an amplitude of about  $0.^d001$  to the above periodic change. We also cannot make an acceptable conclusion for it at this time.

## 1. 서론

W UMa형 접촉쌍성 SS Ari( $BD + 23^{\circ}0279$ ,  $m_v = 10.^m37$ )는 Hoffmeister (1934)에 의하여 식쌍성으로 발견되었다. 이 별은 분광형이 G0V인 주계열성의 주성과 종주계열(TAMS)을 갓 벗어난 반성으로 이루어져 있고 (Lu 1991), 이 두 별은 약  $0.^d406$ 마다 그들의 질량중심 주위로 공전한다. 최근에 발견된 W UMa형을 제외한 대부분의 W UMa형 식쌍성들이 많은 학자들에 의하여 많은 관측과 연구가 수행되어온 것에 반해 SS Ari의 관측과 연구는, 이 별의 발견이래 약 60여년이 지났음에도 불구하고, 상대적으로 그 수가 매우 적다. 이 별의  $UBV$  3색 광전관측이 Zhukov (1975)에 의하여 최초로 이루어진 후, Kaluzny & Pojmanski (1984a)에 의한  $BV$  측광, Rainger *et al.* (1992)의  $JK$  적외선 측광, Liu *et al.* (1993)의  $BV$  측광이 보고 되었다. Lu (1991)와 Rainger *et al.* (1992)은 이 별의 분광관측을 수행하였다.

한편, 이 논문의 주제인 SS Ari의 공전주기 변화를 처음으로 발견한 Braune (1970)이래, 여러 학자들에 의하여 이 별의 공전주기 연구가 수행되었다 (Kaluzny & Pojmanski 1984a,b, Kurpinska-Winiarska & Zakrzewski 1990, Rainger *et al.* 1992, Demircan & Selam 1993). Kaluzny & Pojmanski (1984a,b)는 이 별의 공전주기가 사인곡선 모양과 같이 연속적으로 변하여 왔을 가능성을 제시하였

고, 그 변화에 대한 이유로서 이 쌍성계에 제3 천체의 존재를 처음으로 언급하였으나, 갑작스러운 주기 변화가 여러번 일어나서 사인곡선과 비슷한 모양을 생성하였을 가능성도 있다고 하였다. 또한, Kurpinska-Winiarska & Zakrzewski (1990)는 이 별의 ( $O-C$ )도가 사인곡선에 잘 맞추어 질 수 있지만, 1950년 이전에 관측된 극심시각의 공전 수를 반주기만큼 감소시킨다면, 포물선으로도 잘 표시될 수 있음을 주장하였다. 최근에 Rainger et al. (1992)은 사인곡선의 변화 주기(약 43년)와 진폭(약  $0.4036$ )으로부터 3체계의 전체 질량을  $0.13M_{\odot}$ 으로 계산하였다. 그런데 SS Ari의 질량만도 약  $1.5M_{\odot}$ 이므로 제3 천체 가설은 있을 수 없다고 하였다. 따라서, 그들은 Kurpinska-Winiarska & Zakrzewski (1990)가 제시한 포물선 모양의 주기 변화가 SS Ari의 계의 주기 변화를 더 타당하게 설명할 수 있다고 주장하였다. 그들이 3체계의 전체 질량을 계산할 때 이용한 케플러의 제3 법칙( $M_{123} = \frac{a^3}{P^2}$ )에 3체계의 장반경  $a$ 의 값으로서  $0.4036$ 에 광속도를 곱한 값(AU 단위로 환산하여)을 직접 넣었는데 이 값은 장반경이 아니라 삼체의 질량중심에 대한 이체(SS Ari)의 질량중심까지의 거리이다. 그러므로 3체계의 전체 질량은  $0.13M_{\odot}$ 이 아닌  $8.6M_{\odot}$ 이어야 한다.

가장 최근에 Demircan & Selam (1993)은 Kurpinska-Winiarska & Zakrzewski (1990)가 제안한 포물선 모양의 변화는 1950년 이전의 극심시각들을 그들이 잘못 해석한데서 일어났다고 주장하였다. 그 극심시각들은 Odynskaya (1949)가 그의 안시관측치들을 평균한 것이기 때문에 거의 광전관측치만큼 신뢰할 수 있고, 반주기만큼 공전횟수를 변경하여 포물선 모양에 맞추는 것은 잘못이라고 지적하였다. 따라서, 그들은 SS Ari의 극심시각을 잘 맞추는, 진폭과 주기가 각각  $0.40398$ 과  $44.48$ 인 사인곡선을 구하였고, 이 변화를 1) 그 계의 질량이동, 2) 성분별들의 자기활동으로 유발된 대류대기의 형태의 변화 (Applegate 1989, 1992), 3) 성분 별 내부 핵에서의 질량 운동, 4) 제3 천체의 광시간 효과 등과 연관시켜 논의하였는바 현재로서는 제3 천체의 광시간 효과가 SS Ari의 공전주기 변화를 가장 잘 설명한다고 결론지었다. 그들은 제3 천체의 질량을 약  $1.0M_{\odot}$ 으로 추정하였고, 그 별이 주계열별이라면 당연히 그 스펙트럼이 보여야 하나 이제까지 제3 천체의 존재를 검출하였다는 어떠한 보고가 없었던 것으로 보아 이 천체는 쌍성계로 이루어졌거나, 백색왜성일 수 있다고 하였다. 또한, 그들은 SS Ari의 ( $O-C$ )도에서 또 다른 규칙성(그 진폭은 약  $0.4004$ 이며, 주기는 약  $28^y$ )이 있다는 것을 발견하였다. 이 규칙성이 제4 체에 의한 광시간 효과에 의한 것이라고 가정할 때 그 제4 체의 질량을 약  $0.1M_{\odot}$ 로 추산하였으나 이 추측은 향후 관측에 의하여 검증될 수 있다고 그들은 결론지었다.

SS Ari의 향후 측광 관측과 극심시각의 획득이 위에서 제기된 공전주기 변화에 관한 여러 문제를 해결하는데 중요한 자료와 단서를 제공할 수 있다는 인식 하에 우리의 관측 프로그램 별에 SS Ari를 포함시켰고, 이 별의 CCD 측광을 시도하였다. 이 논문은 우리가 관측한 측광 자료로부터 결정된 극심시각과 이제까지 발표된 모든 극심시각 자료를 수집하여 위에서 언급한 SS Ari의 공전주기 변화 연구를 염두에 두고 이 별의 주기 연구를 재검토하였다.

## 2. 관측과 극심시각

1996년 11월 9일부터 12월 15일까지 10일 밤 동안 SS Ari의 CCD 측광관측을 소백산천문대의

표 1. SS Ari의 관측된 극심시각.

극심시각 (JD Hel 2450000+)	필터 형태	중량 평균치 (JD Hel 2450000+)	극심시각 (JD Hel 2450000+)	필터 형태	중량 평균치 (JD Hel 2450000+)
398.1062 ±4	B I	398.1064 ±4	429.1652 ±4	V II	
398.1065 ±4	V I		429.1654 ±3	R II	
398.1064 ±3	R I		430.9911 ±3	B I	430.9914 ±2
412.1142 ±10	B II	412.1138 ±10	430.9915 ±1	V I	
412.1134 ±10	V II		430.9914 ±1	R I	
414.9565 ±9	B II	414.9553 ±5	432.0064 ±5	B II	432.0068 ±3
414.9559 ±4	V II		432.0067 ±3	V II	
414.9551 ±2	R II		432.0069 ±2	R II	
415.1582 ±3	B I	415.1583 ±3	433.0213 ±4	B I	433.0213 ±3
415.1585 ±3	V I		433.0214 ±3	V I	
415.1583 ±2	R I		433.0211 ±3	R I	
429.1638 ±9	B II	429.1652 ±5			

61cm 반사망원경을 이용하여 수행하였다. 액체질소로 냉각되는 PM512 CCD 카메라에 표준 BVR 필터를 부착하여 사용하였다. SS Ari의 밝기를 비교하기 위한 비교성은 BD+23°0277로서 Kaluzny & Pojmanski (1984a)와 Rainger *et al.* (1992)이 사용한 비교성과 같다. CCD 관측 자료의 획득을 위해 소백산천문대에서 개발한 관측 프로그램 DIPHO를 이용하였다. 관측된 원시 자료는 차등 측광 (differential photometry) 방법으로 처리하여 총 1,626점 (B 필터: 547점, V 필터: 556점, R 필터: 523점)을 획득하였다. 이 관측으로 얻은 SS Ari의 관측점들과 광도곡선은 다른 곳에 발표할 예정이다. 또한, 이 관측으로부터 총 8개의 극심시각 (제1 극심시각: 4개, 제2 극심시각: 4개)을 Kwee & van Woerden (1956) 방법으로 결정하였다. 표 1에 이 논문에서 산출한 극심시각을 수록하였다.

### 3. 주기 연구

SS Ari의 공전주기 변화 양상을 살펴보기 위하여 여러 문헌으로부터 이제까지 발표된 이 별의 총 169개의 극심시각(안시관측: 90개, 사진관측: 3개, 광전관측: 68개, CCD 관측: 8개)을 수집하였다.

먼저, Demircan & Selam (1993)이 결정한 광도요소

$$C = \text{JD Hel } 2444469.4790 + 0.^d40599144E + 0.^d0398 \sin(2\pi(E + 25500)/44.^y8 - \pi/2) \quad (1)$$

의 선형항을 사용하여 SS Ari의 ( $O - C$ )도를 그림 1과 같이 작성하였다. 그림 1의 곡선은 (1)식의 사인항을 이용하여 그린 것이다. 실제로 (1)식의 사인항을 적용할 때 44.<sup>y</sup>8을 일(day) 단위로 바꾼 후 공전주기(0.<sup>d</sup>40599144)로 나누어 준 후 사용하였다. 그림 1에서 보듯이 1990년 이후의 극심시각들은 Demircan & Selam (1993)의 사인곡선에서 벗어나고 있다. 이들은 1991년까지 관측된 극심시각을 사용하여 SS Ari의 과거의 공전주기 변화를 잘 표현하는 그들의 사인함수들을 구한 후 1993년에 그 결과를 발표하였다. 그 발표가 끝나자마자 SS Ari의 극심시각들은 그 사인곡선에서 벗어나기 시작하고 있었다. 이것은 Demircan & Selam (1993)의 사인곡선의 광도요소를 개정할 필요가 있거나, 또는 SS Ari의 공전주기가 사인곡선과 같은 단순한 형태의 변화보다 더 복잡한 변화를 겪고 있다는 것을 암시한다.

1965년 이후에 관측된 극심시각들을 그림 1의 ( $O - C$ )도에서 보면 먼저, 안시관측은 짧은 시간에도 약 0.<sup>d</sup>05의 분산을 보이는 반면 광전관측의 분산은 약 0.<sup>d</sup>003 정도이다. 안시관측의 이러한 분산은 그림에서도 명확히 알 수 있듯이 짧은 시간에 일어나는 실제 공전주기의 변화가 아니라 관측오차에 기인한다. 한편, 1965년 이전의 7개의 극심시각(안시관측 5개, 사진관측 2개)은 그 이후에 비해 분산량이 매우 적은 것처럼 보인다. 이는, Demircan & Selam (1993)에 의하면, 5개의 안시관측 극심시각이 많은 안시관측치를 평균한 것이어서 그 정확도가 광전관측치 정도로 높기 때문이다. 따라서, 1965년 이전의 7개의 극심시각과 1965년 이후의 광전관측과 CCD 관측에 의한 극심시각들만을 우리의 분석에 사용하였다. 표 2에 사용한 극심시각들을 수록 하였다.

먼저, 표 2의 극심시각들을 사인항을 포함한 광도요소에 맞추는 작업을 시도하였다. 이를 위하여 미분보정법의 한 방법인 Lenvenberg-Marquardt (Press et al. 1989) 방법을 사용하였는데, 이때 미지수  $T_0$ ,  $P$ ,  $A$ ,  $\omega$ , 그리고  $\omega_0$ 의 초기값으로 Demircan & Selam (1993) 이 구한 값들을 이용하였다. 최종적으로 구한 광도요소는

$$C = \text{JD Hel } 2444469.4628 + 0.^d40599041E + 0.^d0481 \sin(0.^o00745 E + 114.^o4) \quad (2)$$

$\pm 18$                        $\pm 21$                        $\pm 29$                        $\pm 31$                        $\pm 2.8$

이다. 이 계산을 할 때 광전관측과 CCD 관측치는 안시관측과 사진관측치보다 중량(weight)을 2배 더 주었다. (2)식의 선형항으로 그린 SS Ari의 ( $O - C$ )도를 그림 2에 제시하였다. 그림 2의 곡선은 (2)식의 사인항을 그린 것이다. (2)식의 사인항의 각진동수로부터 사인항의 주기 53.<sup>y</sup>7(±2.3)을 얻었다. 우리의 해는 Demircan & Selam (1993)의 해((1)식 참조)보다 진폭은 0.<sup>d</sup>0083만큼 크고, 사인 함수의 주기는 8.9년 길다. 또한,  $\chi^2(= \Sigma(O_i - C_i)^2 / (n - 1))$ 은 0.0264로 계산되었다. 관측치와 (2)식 전체를 사용한 이론치의 차이를 그림 2의 아래 부분에 그렸는데, 그것을 자세히 살펴보면, Demircan & Selam (1993)이 지적한 것처럼, 작은 진폭을 가진 요동이 있다. 이에 대하여는 후에 좀 더 살펴 볼 것이다.

표 2. 분석에 사용한 SS Ari의 극심사각.

극심사각 (JD 2400000+)	공전횟수	$(O - C)_1$	$(O - C)_2$	방법	형태	참고 문헌
30948.329	-33304.0	-0.0344	0.0089	VI	I	Odynskaya (1949)
32455.347	-29592.0	-0.0516	0.0003	VIN	I	Kramer (1948)
32455.552	-29591.5	-0.0495	0.0024	VIN	II	Kramer (1948)
32786.229	-28777.0	-0.0515	0.0012	VIN	I	Kramer (1948)
32786.43	-28776.5	-0.0437	-0.0049	PG	I	Huth (1964)
36075.581	-20675.0	-0.0311	0.0036	PG	I	Huth (1964)
39040.5713	-13372.0	0.0136	0.0009	PE	I	Kaluzny & Pojmanski (1984b)
39389.5261	-12512.5	0.0200	0.0015	PE	II	Kaluzny & Pojmanski (1984b)
39391.5552	-12507.5	0.0191	0.0005	PE	II	Kaluzny & Pojmanski (1984b)
41947.4934	-6212.0	0.0468	-0.0025	PE	I	Zhukov (1975)
41951.5542	-6202.0	0.0477	-0.0016	PE	I	Zhukov (1975)
41960.4865	-6180.0	0.0482	-0.0012	PE	I	Zhukov (1975)
41972.4638	-6150.5	0.0488	-0.0006	PE	II	Zhukov (1975)
41975.5072	-6143.0	0.0473	0.0000	PE	II	Zhukov (1975)
42037.421	-5990.5	0.0476	-0.0022	PE	II	Zhukov (1975)
42727.4086	-4291.0	0.0550	0.0025	PE	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
42758.2642	-4215.0	0.0554	0.0028	PE	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
42759.2791	-4212.5	0.0553	0.0027	PE	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
43455.3481	-2498.0	0.0543	0.0015	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
43615.4581	-1611.0	0.0511	-0.0008	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
43927.3091	-1335.5	0.0519	0.0004	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
44146.5426	-795.5	0.0507	0.0001	PEB	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
44469.5074	0	0.0504	0.0015	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
44605.3103	334.5	0.0496	0.0016	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
44642.2567	425.5	0.0509	0.0031	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
44823.5267	872.0	0.0464	-0.0001	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
44911.424	1088.5	0.0468	0.0010	PE	II	Diethelm (1981)
45261.3850	1950.5	0.0443	0.0014	PE	II	Kaluzny & Pojmanski (1984b)
45261.5860	1951.0	0.0424	-0.0005	PE	I	Kaluzny & Pojmanski (1984b)
45262.3987	1953.0	0.0431	0.0002	PE	I	Kaluzny & Pojmanski (1984b)
45295.2840	2034.0	0.0432	0.0006	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
45323.2968	2103.0	0.0427	0.0003	PEV	I	Pohl <i>et al.</i> (1983)
45593.4817	2768.5	0.0412	0.0014	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
45605.8630	2799.0	0.0398	0.0001	PE	I	Faulkner (1986)
45609.5174	2808.0	0.0403	0.0007	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
45651.3318	2911.0	0.0377	-0.0015	PEV	I	Pohl <i>et al.</i> (1985)
45698.2264	3026.5	0.0404	0.0017	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
45943.8485	3631.5	0.0385	0.0024	PE	II	Faulkner (1986)
46021.5914	3823.0	0.0343	-0.0010	PE	I	Faulkner (1986)
46327.4994	4576.5	0.0288	-0.0029	PEV	II	Pohl <i>et al.</i> (1987)
46440.5677	4855.0	0.0289	-0.0015	PE	I	Faulkner (1986)
46714.6062	5530.0	0.0241	-0.0029	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
46716.4360	5534.5	0.0269	-0.0001	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
46745.4636	5606.0	0.0262	-0.0004	PE	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
46761.2955	5645.0	0.0245	-0.0019	PEB	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47118.7666	6525.5	0.0213	-0.0005	PE	II	Rainger <i>et al.</i> (1992)
47119.7814	6528.0	0.0212	-0.0006	PE	I	Rainger <i>et al.</i> (1992)
47143.3294	6586.0	0.0217	0.0003	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47206.253	6741.0	0.0169	-0.0037	PEV	I	Keskin & Pohl (1989)
47439.4958	7315.5	0.0184	0.0009	PE	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47444.5695	7328.0	0.0172	-0.0002	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47449.4417	7340.0	0.0175	0.0002	PE	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47450.4569	7342.5	0.0177	0.0004	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47452.4872	7347.5	0.0181	0.0008	PE	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47469.3389	7389.0	0.0212	0.0041	PE	I	Huebscher (1990)
47511.3531	7492.5	0.0154	-0.0011	PEV	II	Keskin & Pohl (1989)
47512.3675	7495.0	0.0149	-0.0016	PE	I	Hanzl (1990)
47561.2904	7615.5	0.0159	0.0001	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47562.3033	7618.0	0.0139	-0.0019	PEB	I	Huebscher (1990)
47791.4825	8182.5	0.0117	-0.0009	PE	II	Huebscher (1990)
47823.5577	8261.5	0.0137	0.0015	PE	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47828.4289	8273.5	0.0130	0.0009	PEV	II	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47834.3148	8288.0	0.0120	0.0000	PEV	I	Kurpiska-Winiarska & Zakrzewski (1990)
47847.3116	8320.0	0.0171	0.0053	PE	I	Huebscher (1990)
47848.3223	8322.5	0.0129	0.0011	PE	II	Huebscher (1990)
48501.5500	9931.5	0.0025	-0.0001	PE	II	Huebscher (1992)

표 2. (계속)

극심시각 (JD 2400000+)	공전횟수	$(O - C)_1$	$(O - C)_2$	방법	형태	참고 문헌
48569.1482	10098.0	0.0034	0.0018	PE	I	Liu et al. (1993)
48570.1604	10100.5	0.0006	-0.0010	PE	II	Liu et al. (1993)
48604.2656	10184.5	0.0026	0.0015	PE	II	Huebscher (1992)
48623.3495	10231.5	0.0050	0.0041	PEB	II	Diethelm (1992)
49287.5387	11867.5	-0.0056	0.0029	PEB	II	Ogloza (1995)
49688.4452	12855.0	-0.0143	-0.0003	PE	I	Ogloza (1995)
49689.4625	12857.5	-0.0120	0.0020	PE	II	Ogloza (1995)
50398.1064	14603.0	-0.0237	-0.0004	CCD	I	This Paper
50412.1138	14637.5	-0.0230	0.0005	CCD	II	This Paper
50414.9553	14644.5	-0.0234	0.0001	CCD	II	This Paper
50415.1583	14645.0	-0.0234	0.0001	CCD	I	This Paper
50429.1652	14679.5	-0.0232	0.0005	CCD	II	This Paper
50430.9914	14684.0	-0.0239	-0.0002	CCD	I	This Paper
50432.0068	14686.5	-0.0235	0.0002	CCD	II	This Paper
50433.0213	14689.0	-0.0240	-0.0002	CCD	I	This Paper

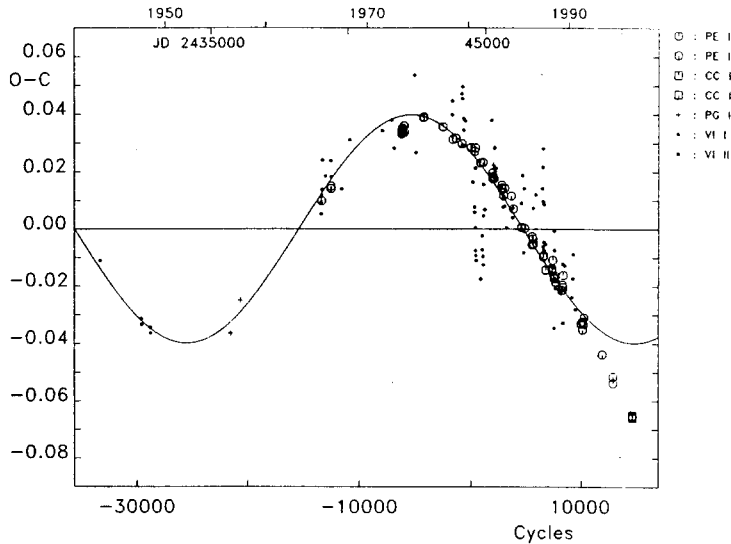


그림 1. SS Ari의  $(O - C)$ 도. 이 그림은 (1)식 (Demircan & Selam 1993)의 선형항으로 작성되었다. 연속적인 곡선은 (1) 식의 사인항을 나타낸다. 최근의 관측치는 그 사인 곡선에서 벗어나고 있다.

1940년대 초부터 1996년까지 약 60년 동안 SS Ari의 공전주기가 사인곡선의 형태와 같이 주기적으로 변화한 것은, 그림 2에서 보듯이, 명백하다. 또한, 이 변화를 포물선에 맞추려는 것은 무리인 것 같다. 1950년 이전의 극심시각들의 기점(epoch)을 반주기만큼 임의로 옮긴다 하더라도, 1975년 이후부터 최근까지 공전주기 변화율( $dP/dE$ )의 형태가 포물선의 그것과는 약간 다르게 나타나는 것이 그림 2에서 보이기 때문이다. 따라서 이 논문에서는 SS Ari의 공전주기가 주기적으로 변한다고 가정하고, 그 원인에 대한 논의를 진행하려 한다.

일반적으로 식쌍성의 공전주기가 규칙적으로 변하면, 그 원인을 1) 근성점 이동, 2) 제3 천체에 의한 광시간 효과, 그리고 최근에 제안된, 3) 한 성분별의 자기활동에 의한 형상 변화 효과 (Applegate

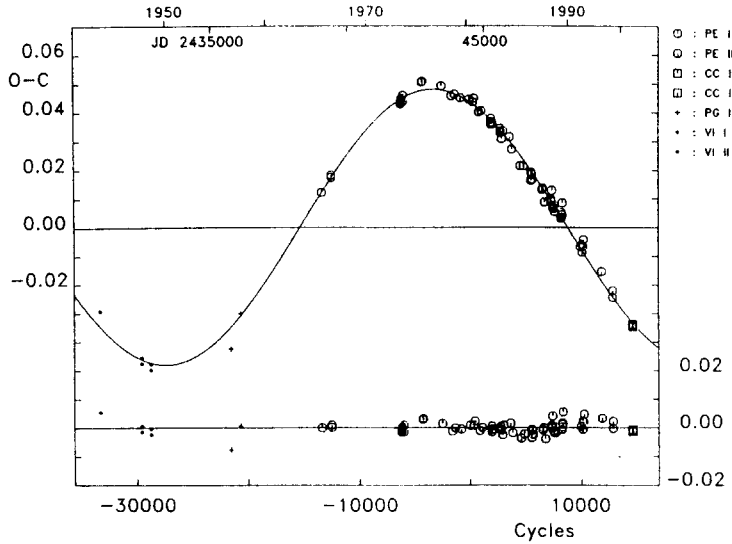


그림 2. SS Ari의 (O-C)도. 이 그림은 이 논문에서 구한 (2)식의 선형항으로 작성되었다. 연속적인 곡선은 (2)식의 사인항을 나타낸다. 아래 부분은 사인항을 제거한 후 남은 값들로서 작은 진폭을 가진 진동이 보인다.

1992)로 해석하고 있다. 근성점 이동 효과는 제2극심시각의 변화 행위가 제1 극심시각의 그것과 180° 위상차가 나므로 나머지 두 효과와 명확히 다르게 나타난다. SS Ari의 제1 극심시각과 제2 극심시각은 같은 위상으로 변하므로, 근성점 이동은 이 별의 공전주기 변화 원인이 될 수 없다. SS Ari의 공전주기 변화에 대한 원인은 나머지 두가지 효과에서 찾아야만 한다. 그런데, SS Ari의 (O-C)도만으로는 두 효과 중 어느 것이 이 별의 공전주기 변화의 진실한 원인인지를 알 수 없기 때문에 각각의 효과가 공전주기의 변화의 원인이라고 가정한 후, 각각에 대한 물리적 변수의 특성을 산출하여, 그것들이 물리적으로 타당한지를 다른 여러 관측치들과 비교하여 살펴 보고자 한다.

3.1 제3 천체에 의한 광시간 효과로의 해석

SS Ari의 주기변화의 원인으로 제3 천체를 고려한다면, (2)식의 사인곡선을 사용하는 것보다는 일반적인 광시간 궤도(Irwin 1952, 1959)를 사용하는 것이 더 타당하다. 그 이유는 사인곡선은 광시간 궤도의 특별한 경우, 즉 이심율이 0인 것을 의미하기 때문이다. 제3 천체에 의한 광시간( $\tau$ )을 포함한 광도요소는

$$C = T_0 + PE + \tau \tag{3}$$

이다. (3)식은 모두 7개의 미지수를 포함하고 있다 (Irwin 1959). 그 미지수를 구하기 위하여 (3)식을 Lenvenberg-Marquardt 방법을 사용하여 미분보정법으로 풀었다. 그 결과를 물리적으로 연관된 다른 변수들과 함께 표 3에 수록하였다. 표 3에서 K는 광시간의 진폭으로  $K = (\tau_{max} - \tau_{min})/2$ 이다.

표 3의 선형광도요소로 계산한 각 극심시각의 (O-C)<sub>1</sub> 값들을 표 2의 세 번째 줄에 수록하였고 그 (O-C)도를 그림 3에 그렸다. 이 그림에서 곡선은 표 3의 변수들을 이용하여 그린 이론적인 광시



표 3. 제3 천체에 관한 물리량.

물리량	유추된 값	단위	물리량	유추된 값	단위
To	2444469.4570	HJD	$P_{12}$	58.4	year
	$\pm 18$			$\pm 1.0$	
P	0.40599008	day	T	2439504	HJD
	$\pm 22$			$\pm 131$	
$a_{12} \sin i$	$1.378 \times 10^9$	km	K	0.053	day
	$\pm 72$		$\chi^2$	0.0157	-
$\omega_{12}$	22.5	deg	$f(m)$	0.227	$m_{\odot}$
	$\pm 2.5$		$m_3$		
e	0.11	-	$i = 75^\circ$	1.28	$m_{\odot}$
	$\pm 6$				

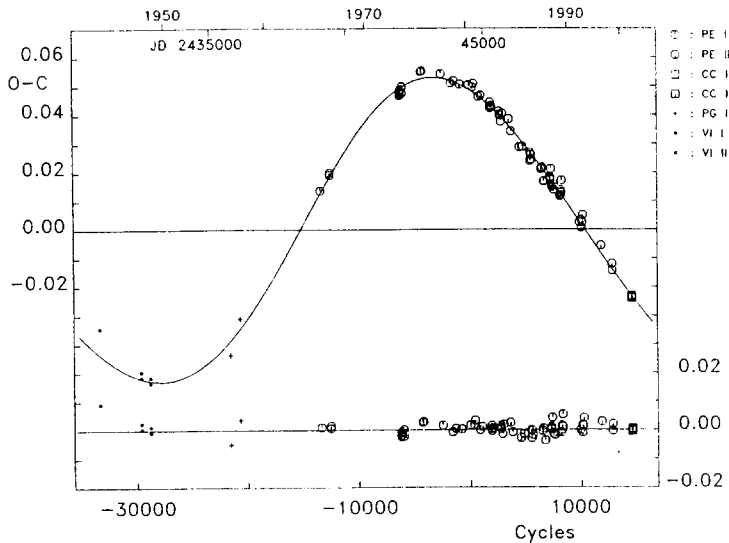


그림 3. SS Ari의  $(O - C)$ 도. 이 그림은 표 3에 수록된 선형 광도요소로 작성되었다. 연속적인 곡선은 이론적인 광시간 궤도를 나타낸다. 아래 부분은 광시간 궤도를 제거한 후 남은  $(O - C)$  값들로서 작은 진폭을 가진 진동이 보인다.

간 궤도이다. 또한, 광시간 궤도를 뺀  $(O - C)_2$  값들을 표 2의 네 번째 줄에 수록하였고, 그것들을 그림 3의 아래 부분에 그렸다. 그림 2에서와 마찬가지로  $(O - C)_2$ 의 변화에는 작은 진동이 남아 있다.

표 3에서 보듯이, (3)식의 해는 (2)식의 사인함수보다 제3 천체의 공전주기가 4.7년 길고, 진폭은  $0.005$ 만큼 크다. 또한, 계산된  $\chi^2$ 은 (2)식의  $\chi^2$ 보다 약 2배정도 작다. 이는 비록 (2)식과 (3)식의 미지수의 수가 다르다 할지라도 관측된 극심사각은 제3 천체의 광시간 모델에 더 잘 맞는다는 것을 의미한다. 한편, 제3 천체의 궤도이심율은 0.11로서 원궤도에 가까운 타원궤도이다. 제3 천체의 궤도경사각이 SS Ari의 궤도경사각  $75^\circ$  (Lu 1991, Rainger et al. 1992, Liu et al. 1993)와 같다고 가정할 때, 유

표 4. 이 논문에서 사용한 SS Ari의 천문학적 기본 자료 (Lu 1991).

	질량 ( $M_{\odot}$ )	반경 ( $R_{\odot}$ )	밝기 ( $L_{\odot}$ )	$M_{bol}$ (mag)
주성	1.34	1.37	1.83	4.1
반성	0.41	0.80	0.71	5.1

추된 제3 천체의 질량은  $1.34M_{\odot}$ 이다. 제3 천체의 질량 계산을 위하여 필요한 SS Ari의 질량은 표 4에 수록한 Lu (1991)의 값을 이용하였다.

한편, 제3 천체가 존재한다면, SS Ari계의 질량중심은 3체계의 질량중심 주위로 케도운동을 할 것 이므로 분광관측에서 얻는 SS Ari의 질량중심의 시선속도(또는, 시스템 속도 ( $v_r$ ))는 시간에 따라 변 할 것이다. SS Ari의 분광관측은 Lu (1991)와 Rainger *et al.* (1992)에 의하여 거의 같은 시기에 수행 되었는데, Rainger *et al.* (1992)은  $\bar{E} = 6503$ 에서  $v_r = -11.4(\pm 1.4)$ km/s를, Lu (1991)는  $\bar{E} = 9222$ 에 서  $v_r = -3.2(\pm 1.3)$ km/s를 각각 산출하였다. 여기서,  $\bar{E}$ 는 그들의 분광관측 시간의 평균치를 표 3에 제시한 광도요소를 이용하여 구한 평균 공전횟수이다. 두 관측사이의 공전횟수의 차이는 2719로 이 는 약 3.0년에 해당한다. 한편, Mayer (1990)에 의하면, 이론적인 시스템 속도  $v_r$ 은

$$v_r = K\{\cos(\nu + \omega) + e \cos \omega\} \tag{4}$$

이다. 여기서  $\nu$ ,  $\omega$ , 그리고  $e$ 는 각각 진근점 이각, 근성점 이각, 그리고 케도이심율을 나타낸다.  $K$ 는

$$K = \frac{A}{P_2} \frac{5156}{\sqrt{(1 - e^2)(1 - e^2 \cos^2 \omega)}} \tag{5}$$

이며, 여기서,  $P_2$ 는 케도공전주기 이며,  $A$ 는

$$A = \frac{a_{12} \sin i \sqrt{(1 - e^2 \cos^2 \omega)}}{173.15} \tag{6}$$

이다. 여기서,  $a_{12}$ 는 삼체계의 질량중심에 대한 식쌍성의 질량중심의 반장경이며,  $i$ 는 케도 경사각이 다. 각각의 인수들의 단위는 다음과 같다:  $a_{12}(AU)$ ,  $A(day)$ ,  $P_2(year)$ ,  $K(km/s)$ . (4) ~ (6)식을 잘 알 려진 다음의 식

$$\tan \frac{E}{2} = \left\{ \frac{1 - e}{1 + e} \right\}^2 \tan \frac{\nu}{2} \tag{7}$$

과, 케플러 방정식

$$M = \frac{2\pi}{P_2}(t - T) = E - e \sin E \tag{8}$$

을 이용하여 풀었다. 여기서  $E$ 는 이심근점이각이다. 이 계산에서 각 식에 들어가는 상수들은 표 3에 제시한 물리량들을 사용하였다. 그림 4는 SS Ari의 시스템 속도를 나타낸 것으로 이 그림에서 연속 적인 곡선은 (4) ~ (8)식으로 구한 이론치이다. 그림에서 보듯이 Lu (1991)가 구한 시스템 속도는 이론치에 근접하지만 Rainger *et al.* (1992)의 것은 이론치와 상당히 비껴나 있다. 그러나 Rainger *et*

al. (1992)도 언급하였듯이 그들이 구한 시스템 속도는 단지 6개의 분광관측 자료로부터 결정한 것인데 반해 Lu (1991)의 것은 30개의 자료로부터 산출한 것이기 때문에 Lu (1991)가 구한 것이 더 신뢰할 수 있다. 그렇다면, SS Ari계에 제3 천체의 도입은 분광관측에 의하여 지지를 받는다고 할 수 있다.

상정한 제3 천체를 주계열성으로 가정할 때  $M_{bol}$ 은 약  $3.^m6$ 이다 (Allen 1976). 그런데, Lu (1991)에 의하면, SS Ari의  $M_{bol}$ 은 약  $3.^m7$ 이므로, 제3 천체의 궤도경사각을 고려한다면, 제3 천체의 광도는 SS Ari 보다 거의 비슷하거나 더 밝아야 한다. 이것은 제3 천체의 스펙트럼이 관측으로부터 충분히 검출되어야 함을 의미하지만, 이제까지 제3 천체의 스펙트럼을 발견했다는 어떠한 보고도 없다. 따라서, 제3 천체가 존재한다면, Demircan & Selam (1993)이 주장하였듯이, 이는 백색왜성이거나 쌍성계일 수 있다.

### 3.2 한 별에서의 자기활동에 의한 형상 변화 효과로의 해석

최근에 Applegate (1992)는 강한 자기장이 존재하는 별에서 자기력은 별의 모양을 왜곡시켜, 이에 따라 발생한 자기 토오크가 자전 각운동량의 재분배를 초래하고, 따라서 궤도 각운동량에 영향을 미쳐 공전주기가 변한다는 모델을 제시하였다. 이 이론에 의하면, 각운동량의 재분배를 위한 수송에너지가 필요하다. 따라서, 자기장이 주기적으로 변한다면 별의 모양도 주기적으로 변하며, 에너지량도 주기적으로 변하기 때문에 주기적 밝기 변화를 초래한다는 것이다.

우리는 Applegate (1992)모델을 이용하여 그 모델 인수를 계산해 보았다. 성분 별 중에서 자기활동이 있는 별이 어떤 별인지를 알 수 없기 때문에 두 별 모두에 대해서 모델 인수를 각각 계산하였다. 이 계산을 위하여 필요한 SS Ari의 천문학적 기본 자료를 위하여 표 4에 수록한 Lu (1991)의 자료를 이용하였다. 두 별 사이의 거리도 역시 Lu (1991)의  $A = 2.779R_{\odot}$ 를 사용하였다. 그 결과를 표 5에 수

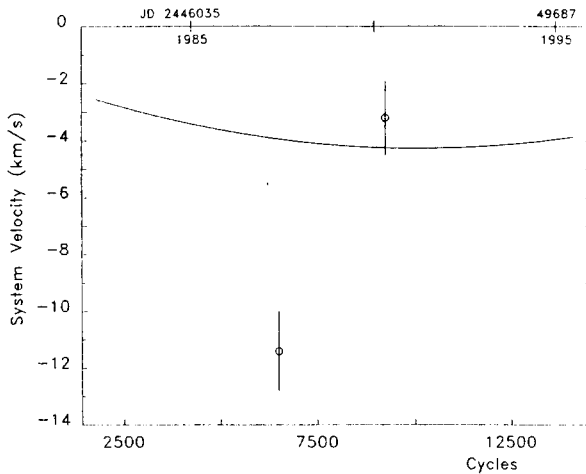


그림 4. SS Ari의 관측된 시스템 속도. 연속적인 곡선은 이론적인 시스템 속도이다. Lu (1991)가 구한 시스템 속도는 이론치와 거의 일치하나, Rainger et al. (1992)의 것은 많이 비켜나 있다.

표 5. SS Ari의 자기 활동 모델 변수.

모델 변수	주성	반성	단위
$\Delta P$	0.556	0.556	sec
$\Delta P/P$	$1.59 \times 10^{-5}$	$1.59 \times 10^{-5}$	
$\Delta J$	$5.11 \times 10^{-47}$	$2.53 \times 10^{-47}$	$\text{g cm}^2/\text{s}$
$I_s$	$1.40 \times 10^{54}$	$1.69 \times 10^{53}$	$\text{g cm}^2$
$\Delta \Omega$	$3.66 \times 10^{-7}$	$1.50 \times 10^{-6}$	sec
$\Delta E$	$3.74 \times 10^{41}$	$7.58 \times 10^{41}$	erg
$\Delta L_{rms}$	$6.80 \times 10^{32}$	$1.38 \times 10^{33}$	erg
	$1.78 \times 10^{-1}$	$3.60 \times 10^{-1}$	$L_{\odot}$
	$9.12 \times 10^{-2}$	$3.77 \times 10^{-1}$	$L_{p,s}$
	0.06	0.13	mag
$B$	$8.29 \times 10^3$	$1.24 \times 10^4$	gauss

록하였다. 이 표에서  $\Delta P, \Delta P/P, \Delta J, I_s, \Delta \Omega, \Delta E, \Delta L_{rms}$ , 그리고  $B$ 는 각각 주기변화량, 각운동량의 변화량, 대류층의 관성모멘트, 차등회전의 변화량, 각운동량을 수송하기 위해 필요한 에너지량, 초래 되는 밝기 변화, 그리고 대류층 밑바닥에서의 자기장의 세기이다. 이 계산을 위해 대류층의 질량을 Applegate (1992)의 제안에 따라 각 별의 질량의 0.1배로 하였다. 표 5에서 계산된 각 변수들의 값을 보면, 주성인 경우, Applegate (1992)모델에서 요구하는 정도의 값들을 만족하고 있으나, 반성은 밝기와 자기장의 세기가 주성에 비해 큰 것으로 나타났다. 특히, 밝기 변화에 있어 주성이  $\pm 0.^m083$ 의 변화를 보여야하는 반면 반성은  $\pm 0.^m17$ 의 무리한 변화를 요구하고 있다. 이 결과는, 만약 SS Ari의 공전주기 변화 원인이 어느 한 별의 자기활동에 기인하여 나타난 것이라면, 주성이 자기 활동별임을 암시한다.

Applegate (1992) 모델을 검증하기 위해서는 표 5에 제시한 바와 같이 SS Ari의 밝기 변화가 공전주기의 변화처럼 변화해 왔는가를 조사해야만 한다. 불행하게도 SS Ari에 대한 측광 관측이 공전주기 변화의 시간 간격에 걸쳐 이루어져 있지 않기 때문에 현재로서는 이를 검증할 방법은 없으나, 우리의 관측을 포함하여 현재까지 발표된 SS Ari의 광도곡선을 분석해 보면, SS Ari의 밝기가 변화하는 것은 사실이다. 즉, V 광도의 Max I(제1식심 이후의 최대 밝기)와 Max II(제2식심 이후의 최대 밝기)의 차이를 조사해 본 결과  $0.^m013$  (1972년, Zhukov 1975),  $0.^m038$  (1982년, Kaluzny & Pojmanski 1984a),  $-0.^m007$  (1991년, Liu *et al.* 1993),  $0.^m017$  (1996년, Kim *et al.* 1997)로 변화하였다. 이러한 광도변화가 주기적인지에 대해서는 현재로서는 알 수 없으나, 우리는 이를 포함한 SS Ari의 광도변화에 대한 연구를 진행하고 있다.

#### 4. 토의와 결론

제 3장에서 자세히 논의하였듯이 SS Ari의 공전주기는 약  $0.^d053$ 의 진폭을 가지고 약 58년을 주기로 규칙적으로 변화하고 있다. 이와 더불어 이 큰 주기를 뺀 나머지 잔차들을 살펴보면, 그림 2와 3의

아래 부분에 있는  $(O - C)$ 도에서 보듯이, 주기적으로 진동하는 것처럼 보인다. 이 현상은 Demircan & Selam (1993)이 처음으로 발견하였는데, 그 당시까지 관측된 광전관측치만을 가지고 자세히 살펴본 결과, 그들은 약  $0.4004$ 의 진폭을 가진 약 28년의 주기성이 있다고 하였다. 우리는 그림 3의 아래 부분에 있는  $(O - C)$  값들을 미분보정법을 이용하여 사인함수에 맞추기를 시도하였다. 재미있게도 5회 정도 반복 후 빠르게 수렴이 되었다. 그 결과를 그림 5에 그렸다. 이 그림에서 곡선은 최종적으로 구한 진폭이  $0.40013(\pm 0.0023)$ 이고 주기가  $13.6(\pm 4.5)$ 년인 사인곡선이다. 그 그림의 아래 부분은 사인함수를 뺀 잔차들이다. 아래 그림에서 보듯이 몇 개의 관측치를 제외하면, 그 잔차는 약  $\pm 0.4002$ 의 띠를 형성하고 있다. 따라서 위 그림의 사인 곡선은 주기적 띠의 변화로 해석해야 한다.  $\pm 0.4002$ 의 띠는 광전관측의 최대 평균 오차가 약  $\pm 0.4001$ 인 점을 감안하면, 인자 2 정도 크다. 이 띠가 형성되는 이유는 여러 가지가 있을 수 있겠으나 심하게 비대칭적인 SS Ari의 광도곡선에 기인한 것으로 보인다.

비록 관측치들의 심한 분산 때문에 위에서 구한 주기성을 강하게 주장할 수는 없으나, 그 분산 속에서 주기적 진동이 있는 것은 확실하다. 이 변화의 원인을 제4 천체의 광시간 효과로 가정하고, 이 천체의 궤도 경사각이 SS Ari의 공전궤도면과 같다고 하여, 제4 천체의 질량을 구하면, 약  $0.09M_{\odot}$ 로 산출된다. 이 정도의 질량에서 나오는 빛은 현재의 관측으론 검출이 불가능하다. 한편, 이 변화를 자기장의 효과로 가정하여 Applegate (1992) 모델 변수 값을 추산하면, 주성과 반성 모두 이 주기 변화의 원인별이 될 수 있다. 산출된 자기장의 세기는 두 별 각각  $5.6 \text{ kG}$ 와  $8.6 \text{ kG}$ 이며, 이때의 밝기 변화량은 각각  $\pm 0.0004$ 와  $\pm 0.0008$ 로 각각 계산되었다. 이 밝기 변화량은 현재의 측광 관측 오차에 근접하고 있어, 이를 검출하기 위해서는 매우 세심한 측광 관측 계획이 필요할 것이다.

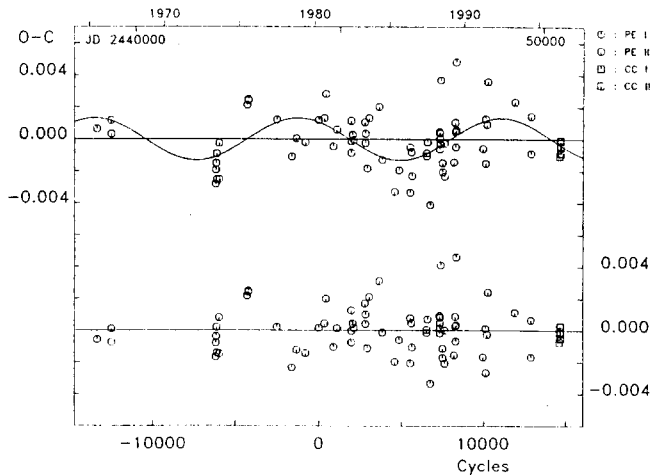


그림 5. 광시간 효과를 제거하고 남은 SS Ari의  $(O - C)$ 도. 연속적인 곡선은 이 관측치들에 가장 잘 맞는 사인 함수이다. 아래 그림은 사인 함수를 제거한 후 남은  $(O - C)$  값들이다.

SS Ari의 공전주기 변화에 대한 우리의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다. 1) SS Ari의 궤도공전 주기는 1940년 이래로 약 0.053일의 진폭을 갖고 약 58년 주기로 주기적 변화를 해왔다. 2) 이 변화를 해석하는 방법은 현재의 이론은 제3 천체에 의한 광시간 효과이거나, 한 성분별에서의 주기적 자기활동 효과이다. 3) 전자로 해석할 경우 제3 천체의 질량은 약  $1.3M_{\odot}$ 인데 존재한다면, 백색왜성이나 쌍성일 가능성이 높다. 약하나마 분광관측으로 얻은 SS Ari계의 시스템 속도는 제3 천체의 존재를 뒷받침하는 것 같다. 4) 후자로 해석할 경우, 자기활동이 심한 별은 주성이다. 이때 이론적인 주성의 밝기 변화 요구량은  $\pm 0.008$ 이지만, 관측자료의 부족으로 이를 현재 확인할 수 없다. 5) 결론적으로 현재의 관측 자료만으로 두 해석 중 어느 것이 바른 해석인지를 결론지을 수 없다. 6) SS Ari 계의 위의 공전주기의 변화에 약 0.001일의 진폭을 갖고 약 14년의 주기적 변화가 겹쳐 있다. 이 변화의 원인에 대해서도 아직 명확히 결론을 내릴 수 없다. 7) 마지막으로, SS Ari 계의 공전주기 변화의 실체는 아직도 베일에 싸여 있다. 그 베일을 벗기기 위해서 긴 시간에 걸친 다양한 관측(분광, 측광, 측성, 편광 등)이 필요하다.

#### 참고문헌

- Allen, C. W. 1976, *Astrophysical Quantities*, 3ed. (Athlone Press: London)
- Applegate, J. H. 1989, *ApJ*, 337, 865
- Applegate, J. H. 1992, *ApJ*, 385, 621
- Braune, W. 1970, *IBVS*, 440
- Demircan, O. & Selam, S. O. 1993, *A&A*, 267, 107
- Diethelm, R. 1981, *BBSAG Bull.*, 57
- Diethelm, R. 1992, *BBSAG Bull.*, 99
- Faulkner, D. R. 1986, *PASP*, 98, 690
- Hanzl, D. 1990, *IBVS*, 3423
- Hoffmeister, C. 1934, *AN*, 253, 195
- Huebscher, J. 1990, *BAV*, 56
- Huebscher, J. 1992, *BAV*, 60
- Huth, H. 1964, *Mitt. Sonneberg*, 2, 112
- Irwin, J. B. 1952, *ApJ*, 116, 211
- Irwin, J. B. 1959, *AJ*, 64, 149
- Kaluzny, J. & Pojmanski, G. 1984a, *Acta Astr.*, 34, 445
- Kaluzny, J. & Pojmanski, G. 1984b, *IBVS*, 2564
- Keskin, V. & Pohl, E. 1989, *IBVS*, 3355
- Kim, C.-H., Lee, J. W., Han, W. & Yoon, J. H. 1997, in preparation

- Kramer, E. H. 1948, *Astr. Circ. USSR*, 79, 9
- Kurpinska-Winiarska, M. & Zakrzewski, B. 1990, *IBVS*, 3485
- Kwee, K. K. & van Woerden, H. 1956, *Bull., Astron., Insts., Neth.*, 12, 327
- Liu, Q., Yang, Y., Gu, C. & Wang, B. 1993, *A&ASS*, 101, 253
- Lu, W. 1991, *AJ*, 102, 262
- Mayer, P. 1990, *BAIC*, 41, 231
- Odynskaya, O. K. 1949, *Perem. Zvezdy*, 6, 316
- Ogloza, W. 1995, *IBVS*, 4263
- Pohl, E., Akan, M. C., Ibanoglu, C., Sezer, C. & Gudur, N. 1987, *IBVS*, 3078
- Pohl, E., Hamzaoglu, E., Gudur, N. & Ibanoglu, C. 1983, *IBVS*, 2385
- Pohl, E., Tunca, Z., Gulmen, O. & Evren, S. 1985, *IBVS*, 2793
- Press, W., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. & Vetterling, W. T. 1989, *Numerical Recipes* (Cambridge Univ. Press: Cambridge), Chapter 14
- Rainger, P. P., Bell, S. A. & Hilditch, R. W. 1992, *MNRAS*, 254, 568
- Zhukov, G. V. 1975, *Astr. Circ. USSR*, 888, 7