

접촉쌍성 AH Tauri의 공전주기 변화

이동주^{1,3†}, 이충욱^{1,3}, 이재우^{1,3}, 김승리¹, 오규동², 김천휘³

¹한국천문연구원

²전남대학교 지구과학교육과

³충북대학교 천문우주학과

PERIOD CHANGE OF THE CONTACT BINARY AH Tauri

DongJoo Lee^{1,3†}, Chung-Uk Lee^{1,3}, Jae Woo Lee^{1,3},
Seung-Lee Kim¹, Kyu-Dong Oh², and Chun-Hwey Kim³

¹Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

²Department of Earth Science Education, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

³Dept. of Astronomy & Space Science, College of Natural Science and Institute for
Basic Science Research, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

E-mail: marin678@kao.re.kr

(Received November 11, 2004; Accepted November 27, 2004)

요 약

2001년 9월부터 12월까지 총 7일간 소백산천문대의 61cm 망원경과 2K CCD 카메라로 접촉쌍성 AH Tau의 BVRI 측광 관측을 수행하였다. 관측으로부터 얻은 3개의 극심시각을 포함하여 지금까지 수집된 144개의 모든 극심시각을 분석한 결과, AH Tau의 공전주기는 영년 주기와 규칙적인 주기 변화가 중첩되어 변화함을 발견하였다. 궤도공전주기의 영년 감소율은 100년에 1.04초로 계산되었다. 보존적인 질량 이동 이론에 의하면, 이는 질량이 큰 주성에서 질량이 작은 반성으로 매년 $3.77 \times 10^{-8} M_{\odot}$ 의 질량이 이동됨을 의미한다. 규칙적인 주기 변화가 제3천체에 의한 광시간 효과에 의하여 생성된 것으로 가정하여 얻은 광시간 궤도의 반진폭은 0.014일이고, 그 주기는 약 35.4년이며 이심률은 0.52이다. 제3천체가 AH Tau계와 동일 평면상에 있다고 가정할 경우, 제3천체의 질량은 약 $0.24 M_{\odot}$ 으로 계산되었다.

ABSTRACT

New BVRI photometric observations of the contact binary AH Tau were performed with the 61 cm reflector and a 2K CCD camera at the Sobaeksan Optical Astronomy Observatory during seven nights from September to December, 2001. A total of 144 times of minima observed up to date, including three times of minima obtained from our observation, were analyzed. It is found that the orbital period of AH Tau has varied in a cyclic way superposed on a secular period decrease. The rate of the secular period decrease is calculated to be $1^{\text{s}}.04$ per century, implying that a mass of about $3.8 \times 10^{-8} M_{\odot}/yr$ from the more massive primary flows into the secondary if a conservative mass transfer is assumed. Assuming that the sinusoidal period variation is produced by a light-time effect due to an unseen third body, the resultant semi-amplitude, period, and eccentricity for the deduced light-time orbit are obtained as

[†]corresponding author

35.4 years, 0.014 day and 0.52, respectively. The mass of the third-body is calculated as about $0.24M_{\odot}$ when the third body is assumed to be coplanar with AH Tau system.

Keywords: binary star, AH Tau, period change, third body

1. 서 론

접촉쌍성 AH Tau의 변광은 Shapley & Hughes(1934)가 처음 발견하여 주기 $0^d.166334$ 인 RRc형 맥동변광성으로 발표하였으나, Binnendijk(1950)은 사진관측을 통해 색지수가 +0.50이고 분광형이 G1p이며 주기가 $0^d.33267447$ 인 W UMa형 식쌍성으로 분류하였다. 그 후 Romano(1962)는 광전관측으로 AH Tau를 β Lyrae형 식쌍성으로 재분류하고 광도요소를 산출하였다. Liu et al. (1991)은 BV 광전관측을 통해 Wilson-Devinney 모델로 측광해를 얻었다. 이들의 관측은 Magalashvili & Kumsishvili(1980)가 얻은 광도 곡선과는 달리 완전대칭인 전형적인 W UMa형 쌍성임을 보였다. 또한 그들은 성간흡수에 대한 보정과 복사보정을 이용하여 AH Tau의 거리를 약 281pc으로 추산하고, Kraft & Landolt(1959)와는 달리 AH Tau가 Pleiades 성단의 구성원이 아님을 주장하였다.

AH Tau는 질량이 큰 성분(이하 주성이라 함)이 주극심에서 가려지고, 두 극대점에서 비대칭을 보이는 A형 쌍성으로 광도곡선의 분석은 Liu et al. 에 의해 한번 이루어졌고, 현재까지 분광관측자료는 없는 상태이다. Liu et al. 은 q-search 방법(Leung et al. 1985)을 이용하여 질량비가 $q=0.5$ 인 측광해를 산출하였다. 이 논문의 주제인 AH Tau의 공전주기 변화에 대한 연구는 Yang & Liu(2002)에 의해 처음으로 수행되었다. 그들은 AH Tau의 주기변화의 원인을 자기 활동에 의한 자기제동(magnetic braking), 질량손실, 성분별들의 반경 증가 등으로 보고, 단기간에 많은 변화를 겪는 다소 복잡한 해석을 통해 이 쌍성계의 주기변화를 분석하였다. AH Tau의 주기 변화에 대한 그들의 분석과 해석은 접촉쌍성의 주기 변화에 대한 다른 연구자들의 일반적인 견해 (Demircan et al. 1994, Kim et al. 1997, Kim et al. 2003, Kang et al. 2004, Lee et al. 2004)와는 매우 상이하다. 따라서, 이 연구에서 지금까지 발표된 모든 극심시각을 분석하여, AH Tau의 공전주기 변화 양상이 다른 접촉쌍성에서 보이는 주기 변화와 차이가 있는지에 초점을 맞추어 살펴보고자 한다.

2. 관측과 극심시각

AH Tau의 측광 관측은 2001년 9월 20일부터 12월 18일까지 3개월 동안 총 7일간에 걸쳐 소백산 천문대에서, 61cm 망원경과 2K CCD 카메라를 이용하여 수행하였다. $f/13.5$ 의 61cm 망원경에 부착된 CCD의 관측 시야는 20.5×20.5 이다. 관측에 사용한 비교성은 AH Tau의 근처에 있는 별로써, 이 별은 Yang & Liu(2002)가 비교성으로 처음 사용한 것이지만, 이 별에 대한 정확한 정보가 없기 때

표 1. AH Tau의 측광관측에 사용한 비교성과 검토성.

	Star	R. A. (2000.0)	Dec. (2000.0)	SP	V
변광성	AH Tau (HV6187)	$03^h47^m12^s$	$+25^{\circ}07'00''$	G1p	$11.^m92 \sim 11.^m25$
비교성	GSC 01804-02485	$03^h47^m20^s$	$+25^{\circ}08'36''$	-	$11.^m6$
검토성	GSC 01804-02470	$03^h47^m00^s$	$+25^{\circ}05'29''$	-	$11.^m5$

표 2. AH Tau의 관측된 극심시각.

극심시각(HJD)	내부오차	필터	극심형태	가중 평균치(HJD)
2452233.1947	± 0.0002	B	Min I	2452233.1951(1)
2452233.1947	± 0.0002	V	Min I	
2452233.1950	± 0.0003	R	Min I	
2452233.1952	± 0.0001	I	Min I	
2452260.1407	± 0.0002	B	Min I	2452233.1413(2)
2452260.1414	± 0.0003	V	Min I	
2452260.1418	± 0.0003	R	Min I	
2452260.9737	± 0.0003	B	Min II	
2452260.9734	± 0.0004	V	Min II	2452260.9737(3)
2452260.9736	± 0.0003	R	Min II	
2452260.9739	± 0.0006	I	Min II	

문에 AH Tau 근처의 또 다른 별을 비교성의 검토성으로 사용하여, 선택된 비교성의 변광 여부를 조사하였다. 비교성과 변광성의 등급차는 각 필터별로 거의 비슷한 것으로 보아서, 비교성의 분광형이 변광성과 거의 비슷함을 확인하였다. 표 1은 AH Tau와 비교성 그리고 검토성의 위치와 특성을 나타낸다.

관측오차를 줄이기 위하여 관측성이 CCD 표면에 항상 같은 위치에 놓이도록 하였으며, CCD 표면에 기록되는 상의 크기가 일정하도록 초점을 계속 조정해주며 관측을 수행하였다. 플랫폼을 위하여 초저녁에 얻은 플랫폼과 새벽녘에 얻은 플랫폼을 모두 이용하여 합성플랫폼을 만들어 사용하였다. 구경측광시 사용한 구경의 크기는 관측 시상의 4배인 10픽셀을 사용하였다. 관측한 자료의 전처리과정과 측광은 IRAF를 이용하여 처리하였다. 자료처리를 통해 얻은 관측점들의 개수는 총 251점(B: 71점, V: 61점, R: 61점, I: 58점)이며, 전체 관측 자료에 대한 비교성과 검토성의 등급차에 대한 표준오차는 *BVRI* 각 필터에 대해 각각 $\pm 0.^m016$, $\pm 0.^m010$, $\pm 0.^m019$, $\pm 0.^m016$ 이다.

측광관측 자료로부터 Kwee & Van Woerden(1956) 방법을 이용하여 각 필터별로 극심시각을 구한 후, 각 필터의 극심시각을 가중 평균(weighted average)하여, 표 2와 같이 총 3개의 극심시각(주극심시각 2개, 부극심시각 1개)을 결정하였다.

3. 주기변화 연구

AH Tau의 공전주기 변화 양상을 살펴보기 위하여 우리는 현재까지 발표된 모든 극심시각을 수집하였다. 2000년 이전까지 발표된 극심시각은 Kreiner *et al.* (2001)에 의해 수집되었고, 그 이후에 Nelson(2001), Pribulla *et al.* (2001), Csizmadia *et al.* (2002), Bakis *et al.* (2003), 그리고 Byboth *et al.* (2004)에 의해 추가로 발표되었다. 우리가 새롭게 구한 극심시각을 포함하여 최종적으로 수집된 극심시각은 총 144개(육안관측: 109개, 사진관측: 14개, 광전관측: 9개, CCD관측: 12개, 주극심: 95개, 부극심: 49개)이다. 그림 1은 Kreiner *et al.* (2001)의 광도요소($MinI = HJD\ 2431822.3653 + 0^d.33267368E$)를 사용하여 그린 AH Tau의 (O-C)도이다.

3-1. AH Tau의 주기변화에 대한 Yang & Liu(2002)의 관점

가장 최근에 Yang & Liu(2002)는 그 당시까지 발표되었던 AH Tau의 극심시각 자료를 이용하

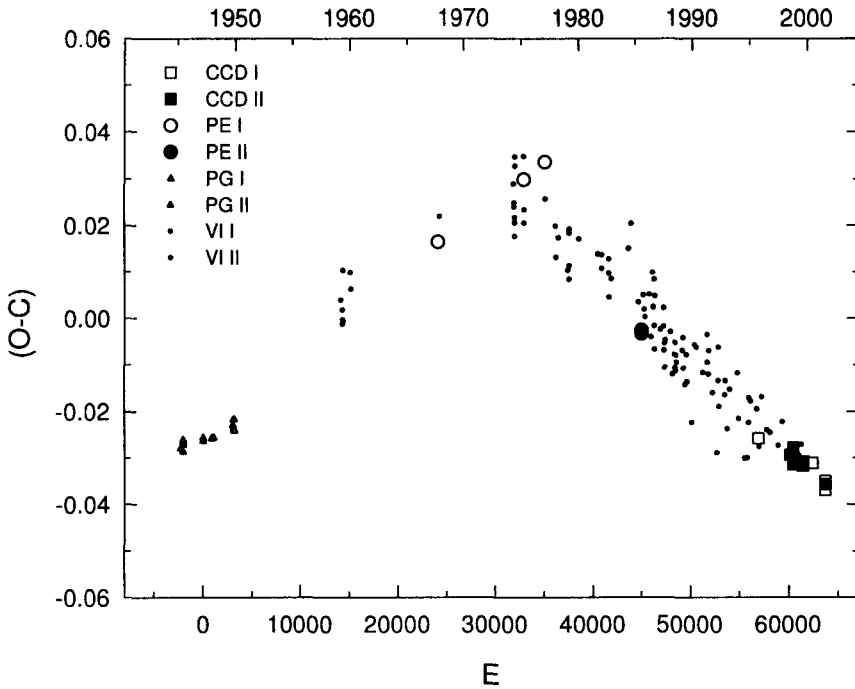


그림 1. Kreiner et al. (2001)의 광도요소로 작성한 AH Tau의 (O-C)도.

여 이 쌍성계의 주기변화 양상을 철저히 연구하였다. 그들은 AH Tau의 공전주기가, 1) 1944년부터 1976년 사이에 연속적인 주기 감소($\Delta P/P = -1.4 \times 10^{-11}$)를 보이다가, 2) 1976년 근처에서 약 $0^{\circ}.33$ 만큼 갑작스런 주기 감소가 발생한 후, 3) 1976년 이후 2001년까지 연속적으로 주기가 증가($\Delta P/P = 1.5 \times 10^{-10}$)하고 있다고 제안하였다. 이와 더불어 Yang & Liu는 1944년부터 1976년 사이의 AH Tau의 주기변화에 잘 맞는 광도요소를

$$MinI = HJD\ 2443462.3179(4) + 0^d.33267513(8)E - 6^d.9(7) \times 10^{-12}E^2 \quad (1)$$

으로, 1976년 이후 2001년까지는

$$MinI = HJD\ 2443462.3183(4) + 0^d.33267926(8)E + 7^d.6(5) \times 10^{-11}E^2 \quad (2)$$

으로 제시하였다. 그림 2는 우리가 수집한 모든 극심시각과 그들의 광도요소를 이용하여 그린 AH Tau의 (O-C)도로, 왼쪽 그림은 (1)식을 이용하여 그린 1944년부터 1976년 사이의 (O-C)도이며, 오른쪽은 (2)식을 이용하여 그린 1976년 이후 현재까지의 (O-C)도이다.

이러한 주기 변화가 일어나는 이유에 대한 Yang & Liu의 설명은 다음과 같다. AH Tau의 성분 별들은 태양과 같은 유형이어서 깊은 대류층을 가지고 있고, 빠른 자전을 하고 있기 때문에 자기 활동이 강하게 일어난다. 자기 활동이 낮은 수준에 있을 때, 자기 활동이 약한 상태에서 강한 상태로 점

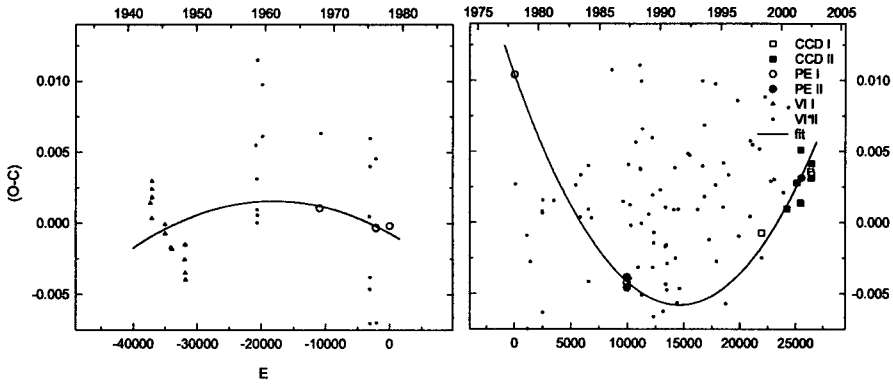


그림 2. Yang & Liu(2002)의 광도요소로 그린 AH Tau의 (O-C)도. 왼쪽 그림은 식 (1)로 작성한 1944년-1976년 사이의 (O-C)도이며, 오른쪽 그림은 식 (2)로 작성한 1976년 이후의 (O-C)도 이다.

차 진행됨에 따라, 궤도 운동의 자기제동도 점차 커지므로, 1944년에서 1976년 사이에 느리지만 연속적인 주기 감소가 일어났다. 1976년 근처에서 자기 활동이 충분히 높은 수준에 도달하면서, 별 표면의 물질이 그 쌍성계 바깥으로 방출되어, 이때 갑작스럽고도 급격히 주기가 감소하였다. 1976년 이후 자기제동은 강한 상태에서 약한 상태로 진행되어 공전주기가 연속적으로 증가하지만, 그 증가량($\Delta P/P = 1.5 \times 10^{-10}$)은 1944년에서 1976년 사이에 관측되었던 양($\Delta P/P = 1.4 \times 10^{-11}$)과 비슷하지 않고, 훨씬 크다. 따라서, 1976년 이후는 다른 원인이 크게 작용하여 주기 증가를 유발시켜야 한다. 1976년 이후 급격한 질량 손실로 인한 쌍성계의 당초 역학적 안정성이 깨지면서 새로운 역학적 안정 상태로 도달하기 위한 역학적 구조 조정을 겪는데, 질량이 손실될 때 잃어버린 각운동량을 보상하기 위한 각운동량 분배 과정이 일어났다고 그들은 설명한다. 즉, 두 성분별의 자전 각운동량의 일부가 궤도 각운동량으로 변환되면서 공전주기는 연속적으로 증가한다. 그 결과 두 성분별의 반경 증가가 예상된다. 따라서, AH Tau의 주기변화가 1) 1944년부터 1976년까지는 성분별들의 주기적인 자기제동, 2) 1976년 근처에서 갑작스러운 질량 방출, 3) 1976년 이후는 두 성분별의 반경 증가가 차례로 일어난 결과라고 Yang & Liu는 기술한다.

그러나, AH Tau의 (O-C)도에 대한 Yang & Liu의 주기변화 분석은, 그들도 언급하였듯이, 매우 희귀(rare)하며, 주기변화에 대한 그들의 해석 또한, 여러 면에서 다른 접촉쌍성들의 주기변화에 대한 여러 연구자들의 일반적인 해석과는 상이한 면이 많다. 많은 접촉쌍성계의 공전주기가 연속적으로 증가, 또는 감소하면서 그 위에 사인 곡선과 같은 주기적 변화가 겹쳐져 변화하는 것이 검출되었고, 많은 연구자들은 관측된 주기적 변화를 Applegate(1992) 모형으로 설명하거나, 또는, 제3천체의 광시간(light time) 효과로 해석하고 있으며, 영년 주기 감소나 증가를 질량교환으로 설명하고 있다(Demircan *et al.* 1994, Kim *et al.* 1997, Kang *et al.* 2004, Kim *et al.* 2003, Lee *et al.* 2004). Applegate에 의하면, AH Tau와 같은 W UMa형 접촉쌍성 성분별들은 자기 활동이 강하기 때문에 별들의 모양이 주기적으로 변함으로 인하여 공전주기는 주기적으로 변화를 하게 된다. 물론, Yang & Liu가 AH Tau계에 적용한 자기제동이 공전주기에 영향을 끼치는 것은 사실이나, 그것에 의한 주

기 변화는 영년 감소로만 나타난다(Guinan & Bradstreet 1988, van't Veer & Maceroni 1992). Yang & Liu가 AH Tau계의 자기활동이 자기제동에 의한 것이라고 했을 때, 동시에 그들은 Applegate 이론에 따른 주기적 주기변화도 언급하였어야 했다. 또한, 접촉쌍성은 성분별들이 상호 접촉되어 있기 때문에, 한 성분별에서 다른 성분별로의 질량 교환이 가능하며, 질량 교환 이론(Hilditch 2001)에 의하면, 두 별 질량의 대소에 따라 영년 주기 감소(질량이 큰 별에서 작은 별로 질량이 이동될 때)와 증가(질량이 작은 별에서 큰 별로 질량이 이동될 때)가 일어난다. AH Tau도 접촉쌍성이기에 질량이동에 의한 주기 변화가 있어야 한다.

한편, 그들이 주장한 1944년에서 1976년 사이의 연속적인 주기 감소는, 그림 2의 좌측 그림에서 보듯이, 매우 인위적인 것을 부인할 수 없다. 현재의 극심시각 자료만 갖고 그 기간동안 주기가 연속적으로 감소했다고 보기는 어렵다. 또한, Yang & Liu는 1976년 전후로 갑작스러운 주기감소가 있었다고 한다. 그림 1을 보면 1976년 전과 후의 (O-C) 잔차(residual)들의 행위가 확연히 다른 것은 사실이다. 그러나, 1976년 전후의 (O-C) 잔차들의 변화가 연속적이었는지, 불연속적이었는지를 말하기는 어렵다. 그 이유는 1976년 전후의 변화를 규정하는 극심시각들의 수가 적고, 그나마 거의 부정확한 안시관측치들로 이루어져 있으며, 정밀한 광전관측치는 단지 2개뿐이어서 변화의 성질을 현재의 관측자료만으로 알기가 어렵게 되어있기 때문이다.

3-2. 새로운 관점에서의 주기변화 분석

이 연구에서는 AH Tau의 주기변화 원인을 Yang & Liu(2002)가 분석한 것과 다르게 연속적인 주기변화라는 관점에서 새롭게 해석하였다. 먼저, 성분별 사이의 질량교환에 의한 영년 주기 변화란 관점에서 AH Tau의 (O-C)도를 해석하였다. 그림 1을 보면, AH Tau는 주기가 전체적으로 감소함을 보이므로, 모든 극심시각을 이차함수 광도요소에 최소자승법을 사용하여 맞추었다. 그 결과 산출한 광도요소는

$$MinI = HJD 2442748.3847(10) + 0^d.33267334(3)E - 5^d.0(1) \times 10^{-11} E^2 \quad (3)$$

이다. 그림 3의 위 부분은 (3)식의 광도요소의 선형항으로 그린 AH Tau의 (O-C)도로, 여기서 실선은 (3)식의 이차항을 나타낸다. 그림 3의 아래 부분은 극심시각에서 (3)식 전체를 빼준 잔차를 그린 것으로, 잔차들의 변화가 sine 곡선 형태의 주기성을 갖고 있다. 따라서, (3)식에 사인항을 포함한 광도요소를

$$C = T_0 + PE + AE^2 + K \sin(\omega E + \omega_0) \quad (4)$$

와 같이 사용하여, 관측점에 잘 맞는 광도요소 구성 인자들을 구하여 표 3에 수록하였다. 이때 Levenberg-Marquart 방법(Press et al. 1992, 이하 LM으로 약함)으로 광도요소 구성 인자들을 결정하였는데, LM은 비선형 함수를 맞추는 방법이다. (4)식의 선형 광도요소로 그린 AH Tau의 (O-C)도를 그림 4의 위 부분에 그렸다. 이 그림에서 점선은 (4)식의 이론적인 포물선항(이차항)을 나타내고, 실선은 포물선항과 sine항을 합친 함수를 나타낸다. 그림 4의 중간 부분은 관측치에서 포물선항을 제거하고 남은 잔차와 이론적인 sine 곡선을 실선으로 그렸다. 그림 4의 맨 아래 부분에 관측치에서 (4)식 전체를 빼준 잔차를 그렸다. 이 그림에서 보듯이, sine항을 포함한 (4)식의 광도요소가 AH Tau의 주기변화를 잘 나타낸다고 할 수 있다. 표 3의 포물선항의 계수로부터 구한 AH Tau의 공전주기의 영년 감소율은 100년에 약 1.04초이다. 또, sine항으로부터 AH Tau의 공전주기의 변화 주기는

표 3. 식(4)에 의해 유추된 물리량.

물리량	유추된 값	단위
T_0	2442748.3850(32)	HJD
P	0.33267340(14)	day
A	$-5.48(47) \times 10^{-11}$	day
K	0.0113(54)	day
ω	0.000169(14)	rad/P
ω_0	1.79(35)	rad
P_{12}	33.9(8.4)	yr
\dot{m}_1	3.77×10^{-8}	M_{\odot}/yr

약 33.9년이며, 그 진폭은 0.011일이다.

일반적으로 공전주기가 규칙적으로 변하면, 1) 근성점 이동, 2) 제3천체에 의한 광시간 효과(Irwin 1952, 1959), 그리고 3) 성분별들의 자기활동 변화의 효과(Applegate 1992) 등이 그 원인이 될 수 있다. 그런데 AH Tau는 제1극심시각과 제2극심시각이 같은 위상으로 변화므로, 근성점 이동은 이 계의 공전주기 변화의 원인이 될 수 없다. 따라서, AH Tau의 공전주기 변화의 원인을 나머지 두 효과에서 찾아야만 한다. 그런데, 주기적인 자기활동은 공전주기의 주기적 변화 뿐만 아니라, 주기적 광도변화를 초래한다(Applegate 1992). 따라서, 공전주기의 주기적 변화가 자기활동에 의하여 발생된 것인가를 검증하기 위해서는 광도변화가 공전주기변화와 같이 주기적으로 일어나는가를 조사하면 될 것이다. 안타깝게도, 현재까지 발표된 광도곡선이 충분치 않아 이를 검증할 수가 없다. 이 연구에서는 AH Tau의 규칙적 공전주기 변화의 원인을 제3천체에 의한 광시간 효과로 가정하여 제3천체에 관한 제 물리량을 산출하고, 산출된 물리량들이 타당한 것인가를 이어지는 분석을 통하여 조사하였다.

어떤 근접쌍성의 주위에 제3천체가 있어, 근접쌍성이 이 삼체계의 질량 중심 주위로 궤도운동을 한다면, 제3천체에 의한 광시간 궤도의 광도요소는

$$C = T_0 + PE + AE^2 + \tau \tag{5}$$

으로 표현할 수 있다. 여기서 τ 는 제3천체에 의한 광시간으로,

$$\tau = \frac{K}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}} \left[\frac{1 - e^2}{1 + e \cos \nu} \sin(\nu + \omega) + e \sin \omega \right], \quad K = \frac{a_{12} \sin i' \sqrt{1 - e^2 \cos^2 \omega}}{2.59 \times 10^{10}}, \tag{6}$$

으로 표시된다. 여기서, e, ω, ν, a_{12} , 그리고 i' 은 각각 광시간 궤도의 이심률, 근성점 이각, 진근점 이각, 장반경, 경사각을 나타낸다. 이 식은 모두 5개의 미지수(unknown)를 갖고 있다(τ 의 더 자세한 기술은 Irwin(1952, 1959)의 논문을 참조). 우리는 LM 방법으로 모든 관측된 극심시각을 (5)식에 맞추었다. 최종적으로 얻은 제3천체에 관한 물리량을 표 4에 수록하였다.

표 4에서 보듯이, (5)식의 해는 원궤도($e = 0$)인 (4)식의 해보다 제3천체의 공전주기가 약 1.5년 더 길고, 진폭은 $0^d.003$ 만큼 크다. 표 4의 선형 광도요소로 작성한 (O-C)도를 그림 5의 위 부분에 그렸다. 그림에서 실선은 (5)식의 비선형 항(이차항 + 광시간 궤도)들을 표 4의 변수들을 이용하여 그린 것이며, 점선은 이론적인 이차항만을 나타낸 것이다. 중간의 그림은 포물선항을 제거하여 광시간 효과만을 나타낸 것이며, 맨 아래 그림은 포물선 항과 광시간 효과를 모두 빼고 남은 잔차를 나타낸

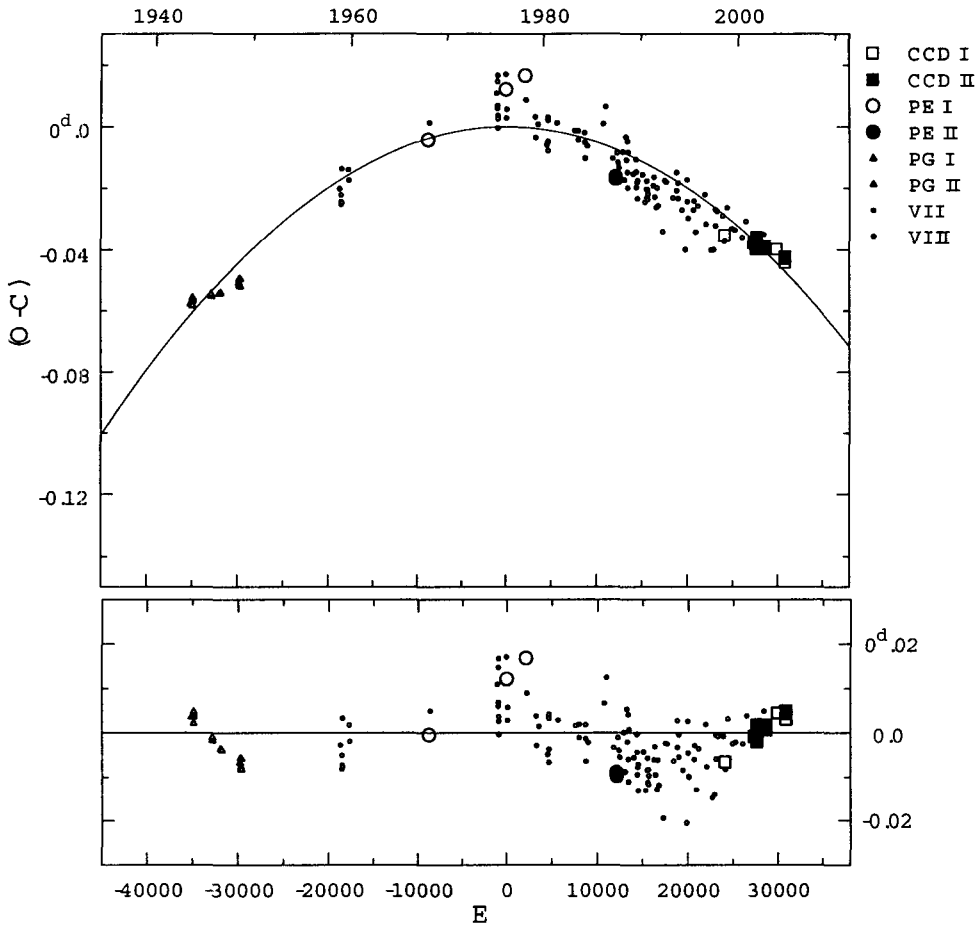


그림 3. (3)식의 광도요소로 작성한 AH Tau의 (O-C)도. 아래 그림은 관측치에서 (3)식의 이차항을 빼준 잔차로서, sine 곡선 형태의 주기적 진동이 보인다.

다. 그림에서 보듯이 제3천체에 의한 광시간 궤도가 관측치를 아주 잘 맞추고 있음을 알 수 있다. 우리가 구한 광시간 궤도는 약 $35.^d4$ 의 주기와 0.52의 이심률, 그리고 약 $0.^d014$ 의 반진폭을 갖는다. 또한, 제3천체의 궤도경사각이 AH Tau의 궤도경사각($84.^{\circ}.3$)과 같다고 가정하였을 때, 광시간 궤도 요소를 이용하여 구한 제3천체의 질량은 $0.24M_{\odot}$ 이다. 이 계산에서 사용한 궤도경사각과 AH Tau의 질량(주성: $1.05M_{\odot}$, 반성: $0.54M_{\odot}$)은 Liu et al. (1991)이 제시한 것을 사용하였다.

4. 요약과 논의

접촉쌍성 AH Tau의 4색 BVR CCD 측광 관측을 2001년 9월 20일부터 12월 18일까지 총 7일간 소백산천문대의 61cm 망원경을 이용하여 수행하였다. 우리의 관측으로부터 얻은 3개의 새로운 극심 시각을 포함하여, 지금까지 발표된 총 144개의 극심시각을 분석하였다. 그 결과, 우리는 AH Tau의 공전주기는 영년 주기 감소와 규칙적인 주기 변화가 중첩되어 변화함을 발견하였다(그림 4 참조). 궤

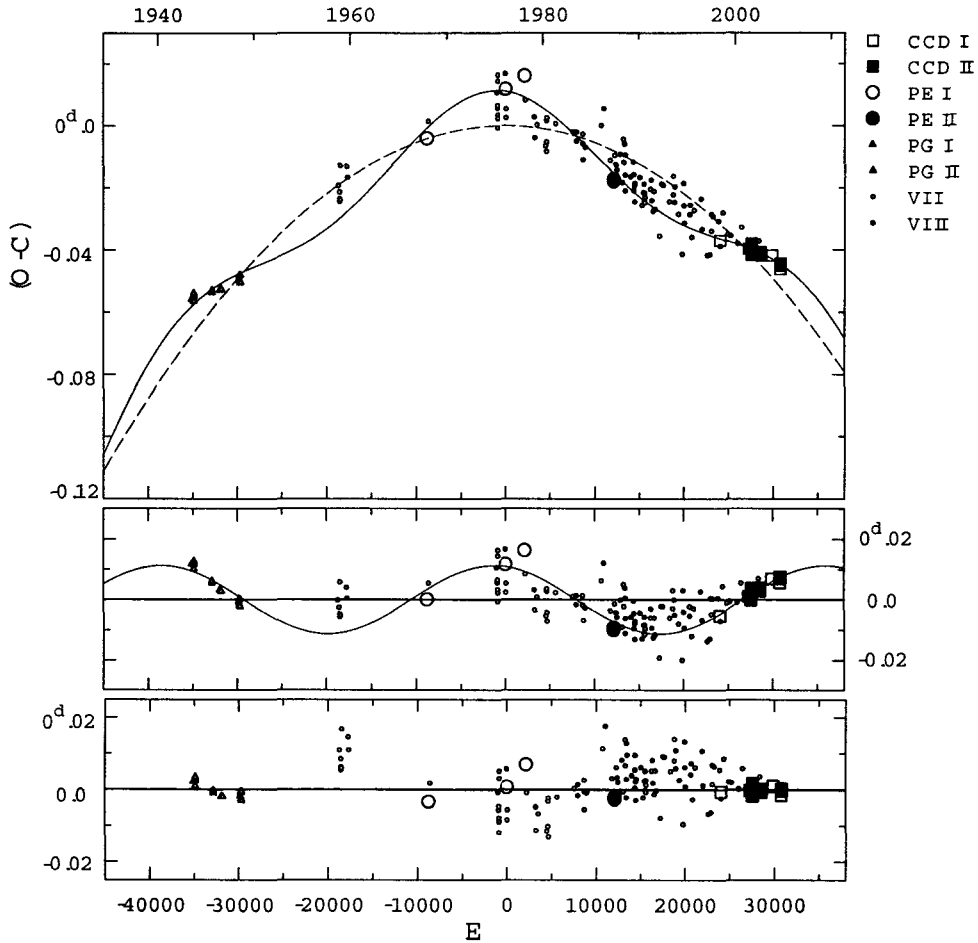


그림 4. 표 3의 광도요소로 작성한 AH Tau의 (O-C)도: 이 그림의 중간부분의 (O-C)도는 관측점에서 포물선 항을 제거하여 순수 sine 항만을 나타낸 것이며, 맨 아래 그림에 관측치에서 전체 식을 빼준 잔차들을 나타내었다.

도공전주기의 영년 감소율은 100년에 약 1.04초로 계산되었다. 보존적인 질량 이동 이론에 의하면, 이는 질량이 큰 주성에서 질량이 작은 반성으로 매년 $3.77 \times 10^{-8} M_{\odot}$ 의 질량이 이동됨을 의미한다. 규칙적인 주기 변화의 가능한 원인으로 들 수 있는 두가지 이론들, 즉, Applegate(1992)의 자기 활동 모형과 제3천체에 의한 광시간 효과 중에서 후자의 것을 택하여 관측된 극심시각을 분석하였다(그림 5 참조). 최종적으로 얻은 광시간 궤도의 진폭은 0.014일이고, 그 주기는 약 35.4년이며 이심률은 0.52이다. 제3천체가 AH Tau계와 동일 평면상에 있다고 가정할 경우, 제3천체의 질량은 $0.24 M_{\odot}$ 으로 계산되었다. Applegate의 자기 활동 모형은 AH Tau의 광도곡선 자료가 불충분하여, 시험할 수가 없었다.

AH Tau의 주기에 대한 우리의 연구는 Yang & Liu(1992)의 분석과는 매우 다르다. 그들은 AH Tau계에서 1944년부터 1976년까지는 성분별들의 자기활동의 변화에 따른, 즉, 약한 자기계동에서 강한 자기계동으로 변화함에 따라 연속적 주기 감소가 일어났고, 자기계동의 한계에 이르렀던, 1976년

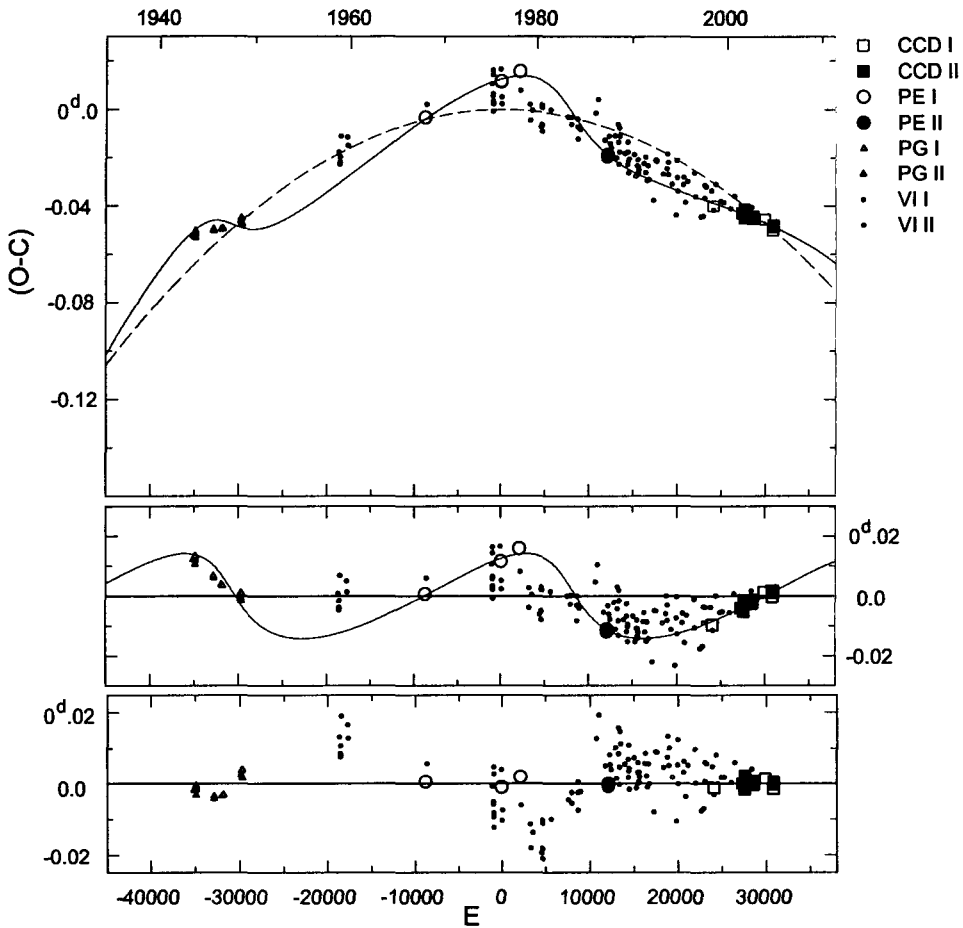


그림 5. 표 4의 광도요소로 작성한 AH Tau의 (O-C)도. 이 그림의 중간부분의 (O-C)도는 관측점에서 포물선 항을 제거하여 광시간 효과만을 나타낸 것이며, 맨 아래 그림은 전체 식을 빼준 후에 남은 잔차들을 나타낸 것이다.

근처에서 갑작스러운 질량 방출 결과, 주기 감소가 발생했으며, 1976년 이후 현재까지 두 성분별의 반경 증가에 따른 각운동량의 재조정 결과, 주기가 연속적으로 증가하고 있다고 설명한다. 그러나, Yang & Liu의 주기변화 분석과 해석은 AH Tau와 비슷한 다른 접촉쌍성들의 주기변화에 대한 여러 연구자들의 일반적인 해석과는 너무 상이하다. 특히, 자기제동이 공전주기에 영향을 끼치는 것은 사실이나, 그것에 의한 주기 변화는 영년 감소로만 나타난다(Guinan & Bradstreet 1988, van't Veer & Maceroni 1992). 또한, 그들이 주장한 1944년에서 1976년 사이의 연속적인 주기 감소는 매우 인위적이며, 현재의 극심시각 자료만 갖고 그 기간동안 주기가 연속적으로 감소했다고 보기는 어렵다. 따라서, 우리는 AH Tau의 주기변화에 대한 Yang & Liu의 해석은 재고되어야만 한다고 생각한다.

AH Tau는 정밀 측광, 분광, 측성 등 다양한 관측이 필요한 시스템이다. 이 연구에서 다른 AH Tau의 주기변화 성질이 더 자세히 밝혀지기 위해서 극심시각 관측과 측광 관측이 계속 수행되어야

표 4. 제3천체에 관한 물리량.

물리량	유추된 값	단위	물리량	유추된 값	단위
T_0	2442748.3852(14)	HJD	T	2445275(321)	HJD
P	0.332673508(65)	day	K	0.0142	day
A	$-5.23(23) \times 10^{-11}$	day	$f(m)$	0.0183	M_\odot
$a_{12} \sin i'$	$4.26(70) \times 10^8$	km	$m_3(i = 90^\circ)$	0.24	M_\odot
ω	164.4(6.1)	deg	$m_3(i = 60^\circ)$	0.28	M_\odot
e	0.52(17)		$m_3(i = 30^\circ)$	0.60	M_\odot
P_{12}	35.4(1.8)	yr	\dot{m}_1	1.35×10^{-8}	M_\odot/yr

한다. 특히, 분광관측이 없는 상태에서 광도곡선 분석만으로 유추된 성분별들의 질량은 이 쌍성계의 성질을 파악하는데 제한을 준다. 따라서, 분광관측은 AH Tau계를 이해하는데 큰 진전을 줄 것이다.

감사의 글: 이 논문은 2002년 한국학술진흥재단(과제번호: KRF-2002-015-CP0150)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Applegate, J. H. 1992, ApJ, 385, 621
- Bakis, V., Tüysüz, M., Zejda, M., Soyduğan, F., Soyduğan, E., Kabas, A., Dogru, S. S., Erdem, A., Budding, E., Demircan, O., Ozdemir, S., Cicek, C., & Bulut, A. 2003, IBVS, 5399
- Binnendijk, L. 1950, BAN, 11, 209
- Byboth, K. N., Markworth, N. L., & Bruton, W. B. 2004, IBVS, 5554
- Csizmadia, S., Zhou, A. Y., Könyves, V., Varga, Z., & Sándor, Zs. 2002, IBVS, 5230
- Demircan, O., Derman, E., Akahn, A., Selam, S., & Müyesseröğlü, Z. 1994, MNRAS, 267, 19
- Guinan, E. F., & Bradstreet, D. H. 1988, in Formation and Evolution of Low Mass Stars, eds. A. K. Dupree & M. T. V. T. Lago (Kluwer: Dordrecht), p.345
- Hilditch, R. W. 2001, An Introduction to Close Binary Stars (Cambridge: Cambridge Univ. Press), Chap.4
- Irwin, J. B. 1952, ApJ, 116, 211
- Irwin, J. B. 1959, AJ, 64, 149
- Kang, Y. W., Lee, H.-W., Hong, K. S., Kim, C.-H., & Guinan, E. F. 2004, AJ, 128, 846
- Kim, C.-H., Jeong, J. H., Demircan, O., Müyesseröğlü, Z., & Budding, E. 1997, AJ, 114, 2753
- Kim, C.-H., Lee, J. W., Kim, H.-I., Kyung, J.-M., & Koch, R. H. 2003, AJ, 126, 1555
- Kraft, R. P., & Landolt, A. 1959, ApJ, 129, 287
- Kreiner, J. M., Kim, C.-H., & Nha, I.-S. 2001, An Atlas of O-C Diagrams of Eclipsing Binary Stars, Part 6 (Krakow: Press of Pedagogical Univ.), pp.2085-2086
- Kwee, K. K., & Van Woerden, H. 1956, Bull., Astron., Insts., Neth., 12, 327
- Lee, J. W., Kim, C.-H., Han, W., Kim, H.-I., & Koch, R. H. 2004, MNRAS, 352, 1041
- Leung, K.-C., Zhai, D., Liu, Q., & Yang, Y. 1985, AJ, 90, 115

- Liu, Q. Y., Yang, Y. L., Zhang, Y. L., & Wang, B. 1991, *AcApS*, 11, 143
- Magalashvili, N. L., & Kumsishvili, J. I. 1980, *Abastumani Astrof. Observ.*, 53, 28
- Nelson, R. H. 2001, *IBVS*, 5040
- Press, W., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., & Vetterling, W. T. 1992, *Numerical Recipes* (Cambridge: Cambridge Univ. Press), Chap.15
- Pribulla, T., Vanko, M., Parimucha, S., & Chochol, D. 2001, *IBVS*, 5056
- Romano, G. 1962, *Publ. Osserv. Padova*, 123, 9
- Shapley, H., & Hughes, E. 1934, *Harvard Ann.*, 90, 168
- van't Veer, F., & Maceroni, C. 1992, in *Binaries as Tracers of Stellar Formation*, eds. A. Duquennoy & M. Mayor (Cambridge: Cambridge University Press), p.237
- Yang, Y. L., & Liu, Q. Y. 2002, *A&A*, 390, 555