

삼중성 SW Lyncis에서의 광시간 효과와 질량이동

김 천 휘
충북대학교 천문우주학과

LIGHT-TIME EFFECT AND MASS TRANSFER IN THE TRIPLE STAR SW LYNCIS

Chun-Hwey Kim
Department of Astronomy & Space Science, Chungbuk National University, Korea
e-mail: kimch@astro.chungbuk.ac.kr

(Received April 14, 1999; Accepted June 2, 1999)

요 약

이 논문에서 삼중성 SW Lyn의 광전관측된 극심시각을 수집하여 이 별의 공전주기 변화를 제3천체에 의한 광시간 효과와 질량이동에 의한 영년 주기감소란 관점에서 분석하였다. 그 결과 가장 최근에 Ogloza *et al.*(1998)이 얻은 제3천체에 의한 광시간 궤도를 수정, 개선하였으며, 영년 주기감소가 일어나고 있음을 밝혔다. 제3천체는 매우 찌그러진 타원궤도($e=0.61$)로 약 5.77년마다 삼중성의 질량중심을 공전하고 있다. 제3천체 최소질량이 $1.13M_{\odot}$ 이며 쌍성의 형태이거나 백색왜성일 가능성이 높다. 또한, SW Lyn의 공전주기 감소율은 $\Delta P/P = -12.45 \times 10^{-11}$ 이며, 이는 질량이 큰 주성 으로부터 반성으로 질량이동을 의미한다. 공전주기의 감소율로부터 주성의 질량 이동율은 약 $1.24 \times 10^{-8} M_{\odot}/y$ 이다. 그 질량이동의 방향은 이전의 연구자들이 광도곡선 분석 으로부터 얻은 Roche 기하학에서 추측할 수 있는 것과 반대이다.

ABSTRACT

In this paper all the photoelectric times of minimum for the triple star SW Lyn have been analyzed in terms of light-time effect due to the third-body and secular period decreases induced by mass transfer process. The light-time orbit determined recently by Ogloza *et al.*(1998) were modified and improved. And it is found that the orbital period of SW Lyn have been decreasing secularly. The third-body revolves around the mass center of triple stars every 5^y.77 in a highly eccentric elliptical orbit($e=0.61$). The third-body with a minimum mass of $1.13M_{\odot}$ may be a binary or a white dwarf. The rate of secular period-decrease were obtained as $\Delta P/P = -12.45 \times 10^{-11}$, implying the mass-transfer from the massive primary star to the secondary. The mass losing rate from the primary were calculated as about $1.24 \times 10^{-8} M_{\odot}/y$.

It is noticed that the mass-transfer in SW Lyn system is opposite in direction to that deduced from it's Roche geometry by previous investigators.

1. 서 론

식쌍성 SW Lyn(BD+42°1811, $m_v=9.6$)은 궤도공전주기가 0.644일이고, 분광형이 F2이며 광도곡선이 β Lyr형인 근접 쌍성이다. 이 별의 변광을 Hoffmeister(1949)가 처음으로 발견한 후 Huth(1958)가 SW Lyn을 β Lyr형 식쌍성으로 분류하였다. 이 별의 최초의 광전관측 *uby* 광도곡선은 Gleim(1967)에 의하여 완성되었다. 그는 이 계의 공전주기가 약 75년 주기로 변하고 있고, 이 변화가 근성점 이동에 의해 변한다고 하였다. Gleim의 광도곡선은 매우 비대칭인 특징이 있다. Gleim과 거의 같은 시기에 Vetesnik(1968)는 SW Lyn을 광전관측하여 *by* 광도곡선을 작성하였다. 그는 Gleim이 주장한 75년의 근성점 이동 주기는 잘못된 것이라 수정한 후 SW Lyn의 공전 주기는 매우 빠르게 일어나며, 비주기적인 것이라고 발표하였다. 그의 광도곡선도 역시 비대칭적이며, Gleim의 광도곡선과 비교할 때 그 모양이 많이 달라졌음을 발견하고, 처음으로 광도변화에 대하여 언급하였다. Gleim과 Vetesnik은 모두 고전적인 Russell & Merrill (1952) 방법으로 SW Lyn의 해를 구하였다.

한편, Vetesnik(1977)는 SW Lyn의 분광관측을 처음으로 수행하여 시선속도 곡선을 완성하였는데, 그가 얻은 분광곡선은 약간 찌그러진 사인 곡선의 모양을 보이고 있어, 그는 SW Lyn이 원궤도가 아니라 타원궤도를 갖고 있을 것으로 가정하여, 이 별의 분광해를 산출하였다.

Gleim과 Vetesnik의 광전관측 이후의 1980년대 말까지 이 별의 연구는 위에 기술한 두 관측자의 광도곡선을 여러 쌍성 모델로 재분석하여 이 별의 해를 결정하는 연구가 진행되었다. Wilson(1979)과 Kaluzny(1985)는 Wilson-Devinney 방법(Wilson & Devinney 1971, 이하 WD 방법으로 약함)으로, Predolin et al.(1980)은 WINK 모델로 SW Lyn의 측광학적 해를 구하였으나 상호 다른 해를 산출하였다. 같은 광도곡선을 이용하고, 같은 모델을 사용하여도 다른 해를 산출한 것으로 미루어 SW Lyn은 매우 복잡한 별임을 알 수 있다.

1990년대에 들어서서 SW Lyn은 여러 연구자에 의하여 관측되었다. Qingyao et al.(1991)은 이 별의 BV 광도곡선을 완성하였고, WD 방법으로 새로운 광도곡선 해를 산출하였다. 한편, 김천휘(1990)는 UBV 광도곡선을 제시하였고, 이 광도곡선들은 김호일 등(1995)에 의해 분석되었다. 그들은 이 별의 측광학적 해를 새로 개정된 WD 방법(Wilson 1993)으로 구하여, 이 계가 질량이 작은 반성이 Roche 한계면을 채운 준분리형 쌍성이라 하였다. 그러나, 그들은 광도곡선을 분석할 때 광도곡선의 비대칭이 항성 흑점때문이라고 가정하여 그 해를 구하였으나 제3천체의 광도는 고려하지는 않았다. 한편, Kim & Han(1993)은 SW Lyn의 공전주기가 약 6년의 주기로 변하고 있음을 처음으로 발견하였고 그 변화가 SW Lyn계에 보이지 않는 제3천체에 의한 광시간 효과때문이라고 처음으로 제시하였다. Kreiner et al.(1997)은 1993년 부터 1995년까지 이 별을 집중적으로 관측하여 SW Lyn의 공전주기가 제3천체의 광시간 효과에 의하여 변하고 있음을 확인하였고, Kim & Han(1993)이

구한 제3천체의 광시간 궤도를 개선하였다. 그들은 4σ 수준(level)에서 포물선 항이 존재한다고 언급하였다. Ogloza *et al.*(1998)은 SW Lyn의 (O-C)도를 재분석하여 삼체의 궤도요소가 Kreiner *et al.*(1997)이 구한 것과 거의 같음을 재확인하였고 광도곡선을 분석하여 삼체의 광도를 구하였다.

이상에서 살펴본 것을 요약하면 근접 쌍성 SW Lyn이 Kim & Han(1993)에 의하여 삼중성일 가능성이 처음으로 언급된 이후, SW Lyn은 Kreiner *et al.*(1997)과 Ogloza *et al.*(1998)에 의하여 제3천체의 존재가 재확인되었다. SW Lyn계의 제3천체의 공전주기는 약 6년이다. 그러나, Kreiner *et al.*은 SW Lyn의 공전주기가 광시간 효과 이외에도 연속적인 주기 감소의 가능성을 언급하였으나 그후의 연구가 아직 없는 상태이다. 만약 연속적인 주기 감소가 SW Lyn계에 존재한다면 연속적인 주기 감소는 질량 이동에 대한 강력한 증거이기 때문에 이 연구는 여기에 초점을 맞추어 SW Lyn의 모든 극심시각을 수집하여 분석하였다.

2. SW Lyn의 (O-C)도와 주기변화

SW Lyn의 공전주기 변화를 살펴보기 위하여 문헌으로부터 총39개의 광전관측된 극심시각을 수집하여 표 1에 수록하였고, SW Lyn의 (O-C)도를 Ogloza *et al.*(1998)의 광도요소

$$C_1 = JD_{Hel}2443975.3866 + 0^d.42152227E \quad (1)$$

를 사용하여 그림 1에 그렸다. 표 1의 두 번째 열의 공전 회수는 방정식 (1)를 이용하여 계산한 것이다. 그림 1의 연속적인 곡선은 Ogloza *et al.*이 구한 제3천체에 의한 광시간 궤도요소(표 2참조)를 이용하여 그린 것이다. 이 그림에서 보듯이, SW Lyn의 공전주기는 확실히 주기적으로 변함을 알 수 있다. 그림 1의 아래 쪽에 그린 (O-C)도는 광시간 궤도에 의한 효과를 제거했을 때의 극심시각들의 잔차(residual)들로서 우리는 이 잔차들의 비교적 큰 산란(scatter)들의 행위에 주목한다. 이 값들은 표 2의 세 번째 열에 수록하였다. 이 잔차들의 표준 편차(σ)는 약 $0^d.0022$ 이다. 그런데 그 산란 폭은 최소 $-0^d.0057$ 에서 $0^d.0038$ 까지 걸쳐 있고, 이는 약 4σ 에 해당한다. 4σ 의 산란 폭은 광전 관측으로 얻은 극심시각의 평균 오차(약 $\pm 0^d.0005$)에 비하면 약 10배정도 큰 값이기 때문에 우리는 이 산란이 관측 오차에 기인한 것이 아니라는 것을 추측할 수 있다. 서론에서도 기술하였듯이 Kreiner *et al.*(1997)은 이미 4σ 수준(level)에서 포물선 항이 존재한다고 언급한 바 있다. 따라서, 우리는 광시간 효과(τ)에 포물선 항(AE^2)을 더한 광도요소, 즉,

$$C_2 = T_0 + PE + AE^2 + \tau \quad (2)$$

를 사용하여, SW Lyn의 극심시각을 이 방정식에 맞추었다. 여기서 τ 는 5개의 미지수를 포함하고 있다. 광시간 궤도 모델에 대해서는 Irwin(1952, 1959)의 논문에 자세히 기술되어 있다. 따라서, 방정식 (2)는 모두 8개의 미지수를 가지고 있다. (2)식을 풀기 위하여 사용된 방법은 반복 최소 자승법 중

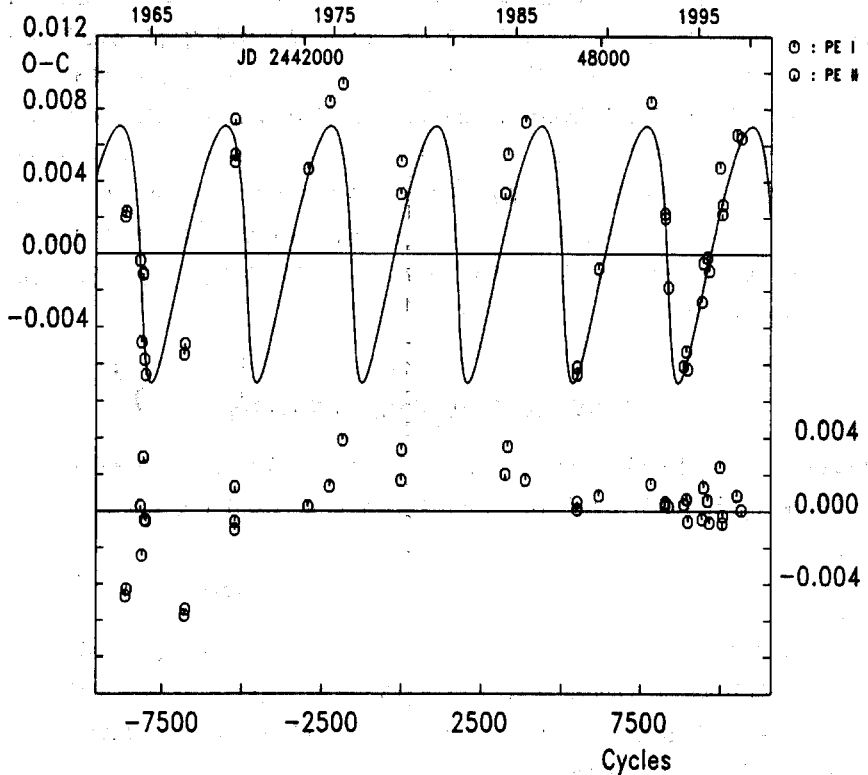


그림 1. SW Lyn의 (O-C) 도. 실선은 Ogloza et al.(1998)이 구한 이론적인 광시간 궤도를 나타내며, 아래 부분은 광시간을 제거하고 남은 잔차들을 표시한다.

의 하나인 Levenberg-Marquadt 방법(Press et al. 1989)을 사용하였다. 이 계산에서 제1 극심시각은 제2 극심시각보다 4배의 가중치를 두었는데, 그 이유는 제1 극심의 광도곡선은 제2 극심의 광도곡선보다 약 4배정도 식의 깊이가 깊어 약 4배정도 제1 극심시각이 제2 극심시각보다 정확하다고 추측하였기 때문이다.

최종적으로 구한 해는 표 2에 수록하였다. 이 표에서 K는 광시간 궤도의 반진폭을 나타낸다. 그림 2는 표 2에 수록된 선형광도요소로 계산한 SW Lyn의 (O-C)도이다. 이 그림에서 관측점을 잘 맞추는 곡선은 표 2에 수록한 광시간 궤도요소로 계산한 광시간과 포물선을 합친 이론적인 곡선이며, 포물선은 표 2의 이차항만을 그린 것이다. 그림 2의 아래 부분은 광시간 효과와 포물선 합을 제거하고 남은 잔차인데 이 값들을 표 1의 네 번째 열에 수록하였다. 이 잔차들의 표준 편차는 약 ± 0.0011 로

표 1. SW Lyn의 광전관측된 극심시각.

JD Hel. (2400000+)	공전횟수	(O-C)1	(O-C)2	형태	방법	참고문헌
38410.6582	-8640.0	-0.00467	0.00033	I	PE	Gleim (1968)
38430.6245	-8609.0	-0.00429	0.00061	I	PE	Gleim (1968)
38711.7566	-8172.5	0.00027	0.00174	II	PE	Kim & Han (1993)
38739.7690	-8129.0	-0.00244	-0.00172	I	PE	Gleim (1968)
38767.7896	-8085.5	0.00293	0.00319	II	PE	Kim & Han (1993)
38795.8018	-8042.0	-0.00049	-0.00010	I	PE	Gleim (1968)
38821.5636	-8002.0	-0.00054	0.00046	I	PE	Gleim (1968)
39598.3082	-6796.0	-0.00573	-0.00074	I	PE	Vetesnik (1968)
39615.3765	-6769.5	-0.00540	-0.00049	II	PE	Kim & Han (1993)
40613.6910	-5219.5	0.00132	0.00184	II	PE	Landolt (1973)
40614.0107	-5219.0	-0.00102	-0.00049	I	PE	Landolt (1973)
40615.9433	-5216.0	-0.00059	-0.00007	I	PE	Landolt (1973)
42091.4975	-2925.0	0.00027	-0.00009	I	PE	Patkos (1975)
42522.3813	-2256.0	0.00136	-0.00032	I	PE	Kim & Han (1993)
42786.4493	-1846.0	0.00388	0.00167	I	PE	Patkos (1976)
43966.372	-14.0	0.00169	0.00000	I	PE	Patkos (1980)
43975.3907	0.0	0.00336	0.00164	I	PE	Patkos (1980)
46068.2811	3249.5	0.00201	-0.00061	II	PE	Kim & Han (1993)
46121.4187	3332.0	0.00353	0.00077	I	PEB	Diethelm (1985)
46478.2330	3886.0	0.00171	-0.00179	I	PE	Kim & Han (1993)
47528.3690	5516.5	0.00050	-0.00065	II	PE	Qingyao <i>et al.</i> (1991)
47529.3347	5518.0	0.00009	-0.00105	I	PE	Qingyao <i>et al.</i> (1991)
47963.4409	6192.0	0.00084	-0.00094	I	PE	Huebscher (1990)
49016.49783	7827.0	0.00149	-0.00066	I	PE	Kreiner <i>et al.</i> (1997)
49302.45695	8271.0	0.00032	-0.00003	I	PE	Kreiner <i>et al.</i> (1997)
49311.47363	8285.0	0.00049	0.00018	I	PE	Kreiner <i>et al.</i> (1997)
49374.5883	8383.0	0.00027	-0.00002	I	PE	Kreiner <i>et al.</i> (1997)
49680.5153	8858.0	0.00038	0.00068	I	PE	Kreiner <i>et al.</i> (1997)
49736.54983	8945.0	0.00066	0.00094	I	PE	Kreiner <i>et al.</i> (1997)
49762.3115	8985.0	-0.00056	-0.00031	I	PE	Kreiner <i>et al.</i> (1997)
50049.56857	9431.0	-0.00042	-0.00050	I	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50080.48587	9479.0	0.00132	0.00108	I	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50160.35035	9603.0	0.00059	0.00022	I	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50196.4173	9659.0	-0.00062	-0.00104	I	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50411.5410	9993.0	0.00242	0.00176	I	PEV	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50457.58915	10064.5	-0.00066	-0.00137	II	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50465.64047	10077.0	-0.00025	-0.00097	I	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50753.5418	10524.0	0.00086	0.00020	I	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)
50841.4566	10660.5	0.00007	-0.00048	II	PE	Ogloza <i>et al.</i> (1998)

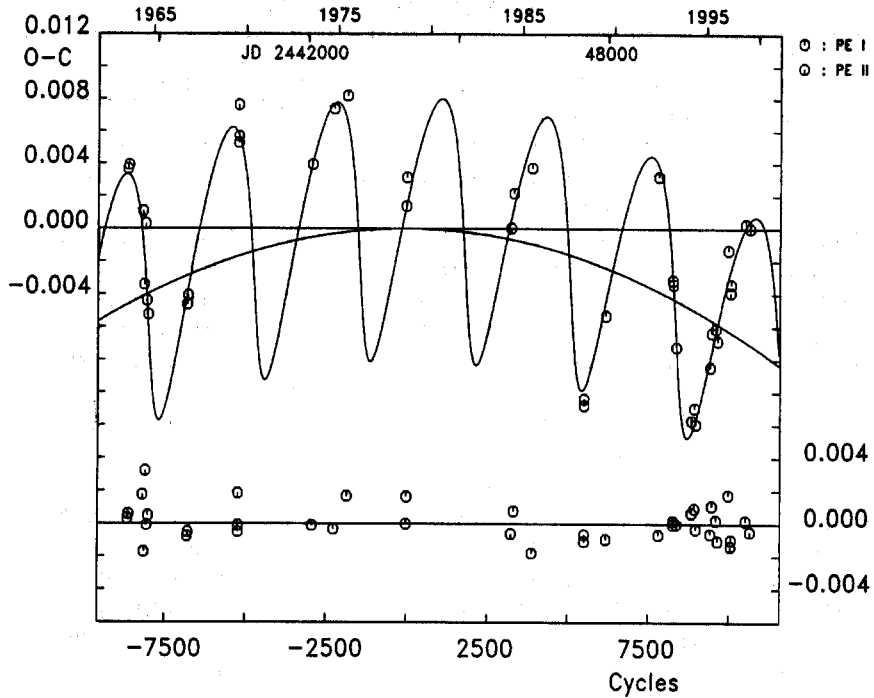


그림 2. SW Lyn의 (O-C) 도. 관측점을 지나는 실선은 이 논문에서 구한 이론적인 광시간 궤도와 포물선 항을 더하여 그린 것이며, 또 다른 실선은 포물선 항만을 나타내며, 아래 부분은 광시간과 포물선항을 모두 제거하고 남은 잔차들을 표시한다.

광전관측의 평균 오차(약 $\pm 0^d.0005$)보다 약 2배 큰데, 그 이유는 SW Lyn의 광도곡선이 비대칭이며, 그 광도곡선이 변하기 때문인 것으로 추측된다(Vetesnik 1977). 우리가 구한 광시간 궤도를 Ogloza et al.(1998)의 것과 비교해 보면, 표 2에서 알 수 있듯이, 반진폭(K)과 근성점 통과시각(T)이 각각 약 $0^d.001$ 와 107일 정도 커진 것을 제외하면 나머지 궤도요소는 거의 비슷하다.

3. 제3천체의 질량과 질량이동

표 2에 주어진 광시간 궤도로부터 제3천체의 질량함수와 최소 질량은 각각 $f(M_3)=0.1449M_\odot$ 와 $1.13 M_\odot$ 로 계산된다. 이 계산에 필요한 SW Lyn의 절대 질량은 표 3에 수록한 이 별의 천문학적 기본 자료를 사용하였다. 이 표에서 주어진 SW Lyn의 주성과 반성의 질량들은 Ogloza et al.(1998)이 제시한 주성에 대한 질량 영역($1.28-1.72M_\odot$)과 주성과 반성의 질량비($q = M_2/M_1$)영역($0.33-0.37$)을 평균하여 구한 것이다.

표 2. SW Lyn계에서의 광시간 궤도.

궤도요소	Ogloza et al. (1998)	이 논문(삼체 + 포물선)	단위
T_0	2443975.3866	2443975.3876	JD Hel
P	0.644065908	0.64406632	day
e	0.69	0.61	-
ω	197.4	201.2	deg
P'	5.826	5.768	year
K	0.0070	0.0081	day
T	2438746.3	2438854.0	JD Hel
A	-	-6.227×10^{-11}	day

만약 제3천체가 주계열성이면 우리는 이 별의 절대밝기를 질량-광도관계(Schmidt-Kaler 1982)로부터 약 $1.91L_{\odot}$, 전복사동급을 약 $4.1M_{bol}$ 로 얻을 수 있다. 그런데, 이 밝기는 SW Lyn계의 전체 밝기($l_t = l_1 + l_2 + l_3$)의 0.25배에 달하므로 측광관측에 의하여 쉽게 검출이 될 수 있다. 그러나, Ogloza et al.(1998)이 구한 제3천체의 밝기는 B 필터에서 전체 밝기의 0.01, V 필터에서 0.003이어서 0.25보다는 아주 작은 값이다. 따라서, 제3천체는 주계열 별이 아님을 알 수 있다. 질량이 $1.13M_{\odot}$ 인데 그 밝기가 아주 작다면, 제3천체는 고밀도의 백색왜성이거나 쌍성의 형태로 존재할 가능성이 높다.

표 2에 주어진 포물선 항의 계수는 연속적인 주기 감소에 대한 정보를 준다. 즉, 한 공전주기당 주기 감소율은 $\Delta P/P = 2A = -12.454 \times 10^{-11}$ 이다. 이는 100년에 약 0^s0025 의 주기감소에 해당한다. 이러한 공전주기의 연속적인 감소는 질량이동 이론(Huang 1963)에 의하면 주성(질량이 큰 별)에서 반성으로 질량이 이동할 때 일어난다. 따라서, 우리는 주기 변화 연구를 통하여 SW Lyn에서의 질량 이동에 대한 증거를 찾은 것이다. Vetesnik(1977)는 식부근에서의 광도곡선이 변하는 것을 발견하였는데 그는 이 변화를 구체적인 분석없이 질량이동에 의한 것으로 언급한 바 있다.

쌍성계의 궤도 각운동량과 질량이 보존되고 된다고 가정하면, 질량이동율과 공전주기 변화 사이의 관계를

$$\dot{M}_1 = \frac{\Delta P}{P} \left(\frac{M_1 M_2}{3(M_1 - M_2)} \right) \quad (3)$$

으로 유도할 수 있다(Huang 1963, Pringle 1975). 여기서 M_1 과 M_2 는 각각 주성과 반성의 질량을 나타낸다. 이 식을 이용하면 주성의 질량이동율은 약 $1.243 \times 10^{-8} M_{\odot}/y$ 이다. 이 계산에서 표 3에 수록한 값들을 사용하였다.

4. 결론과 논의

이 논문에서 삼중성 SW Lyn의 광전관측된 극심시각을 수집하여 이 별의 공전주기 변화를 제3천

표 3. SW Lyn의 질량과 밝기.

$M_1(M_{\odot})$	$M_2(M_{\odot})$	$L_1(L_{\odot})$	$L_2(L_{\odot})$
1.50	0.53	5.61	0.11

체에 의한 광시간 효과와 질량이동에 의한 영년 주기감소란 관점에서 분석하였다. 그 결과 가장 최근에 Ogloza *et al.* (1998)이 얻은 광시간 케도를 표 2에 수록한 바와 같이 수정, 개선하였으며, 영년 주기감소가 일어남을 밝혔다. 영년 주기감소로부터 주성의 질량이동율은 약 $1.243 \times 10^{-8} M_{\odot}/y$ 이다.

SW Lyn계에서 제3천체의 최소질량은 $1.13 M_{\odot}$ 으로 고밀도의 백색왜성이거나 쌍성의 형태로 존재할 가능성이 매우 높다. 이는 다른 쌍성계 XY Leo(Barden 1987)나 SS Ari(Demircan & Selam 1993)의 분광학적, 또는 주기 변화 연구에서 얻은 결과와 매우 비슷하다. 제3천체의 천체물리학적 성질을 더 확실히 알기 위해서는 극자외선 또는 X-선 영역의 측광 및 분광 관측이 필요하다.

Quinyao *et al.* (1991), 김호일 등(1995)과 Ogloza *et al.* (1998)의 광도곡선 분석 결과에 의하면, SW Lyn은 준접촉 쌍성계로 반성이 Roche 한계면을 채운 것으로 알려져 있다. 따라서, SW Lyn계의 질량교환은 질량이 작은 반성의 물질이 라그랑지안 L_1 점을 통하여 주성으로 이동할 것으로 예측된다. 그러나, 이러한 질량교환이 일어날 경우, 질량교환 이론(Huang 1963)에 의하면, 공전주기는 연속적으로 증가하게 되어 우리가 관측적으로 얻은 영년 주기감소와는 반대로 된다. 어떻게 이런 모순이 생긴 것일까? 현재로서는 그 모순에 대한 적절한 해답을 정량적으로 얻기가 어렵다. 그러나, 그러한 모순이 생겨나는데 기여할 수도 있는 몇가지 점을 제시해 본다. SW Lyn과 같이 삼중성이면서, 광도곡선에 비대칭이 존재하면서 광도 변화가 있고, 질량 교환이 있는 매우 복잡한 별의 광도곡선을 분석할 때, 질량이 이동됨에 따라 형성되는 강착판(accretion disk) 또는 hot spot의 효과와, 광도 변화의 가능한 원인(예를 들면, cool spot 등)을 고려해야 하며, 이와 더불어 제3천체의 광도도 동시에 고려하여야 좀더 확실한 Roche 기하를 알 수 있을 것이다. 그러나, Quinyao *et al.* (1991)은 위에 열거한 사항 중, 아무 것도 고려하지 않고 광도곡선 해를 산출하였고, 김호일 등(1995)는 흑점만을 고려하여 광도곡선을 분석하였으나, Ogloza *et al.* (1998)은 제3천체의 광도만을 고려하였다. 따라서, SW Lyn의 Roche 기하는 확정된 것으로 보는 것보다는 잠정적이어야만 한다.

SW Lyn 계의 천체물리학적 성질들을 더 자세히 이해하기 위해서 앞으로의 SW Lyn의 연구는 위에 지적한 여러 가지 사항들을 고려하여 수행되어야 할 뿐만 아니라 동시에 이별의 측광 및 분광 관측이 많이 필요하다.

감사의 글: 이 연구는 1999년도 교육부 기초과학연구소 학술연구조성비(과제번호 1998-015-D00286) 지원에 의한 것임.

참고문헌

- 김천휘 1991, 5개의 근접쌍성의 광도곡선 분석 연구(I)(과학기술처 기본연구보고서 B9014)
- 김호일, 한원용, 이우백, 김천휘 1995, 한국우주과학회지, 12(2), 196
- Barden, S. C. 1987, ApJ, 317, 333
- Dermircan, O. & Selam, S. O. 1993, A&A, 267, 107
- Diethelm, R. 1985, BBSAG Bull., 76
- Gleim, J. K. 1967, AJ, 72, 503
- Hoffmeister, C. 1949, A. N., 247, 272
- Huang, S. S. 1963, ApJ, 138, 471
- Huebscher, J. *et al.* 1990, B. A. V. Mitt., 56
- Huth, H. 1958, M. V. S., 351
- Irwin, J. B. 1952, ApJ, 116, 211
- Irwin, J. B. 1959, AJ, 64, 149
- Kaluzny, J. 1985, Acta Astron., 35, 327
- Kim, C.-H. & Han, W.-Y. 1993, in *New Frontiers in Binary Star Research*, eds. K. C. Leung & I.-S. Nha, *Astronomical Soc. of Pacific Confer. Series*, 38, 347
- Kreiner, J. M., Tremko, J. & Zola, S. 1997, in *The Third Pacific Rim Conference on Recent Development of Binary Star Research*, ed. K. C. Leung, *ASP Conference Series*, 130, 273
- Landolt, A. U. 1973, PASP, 85, 742
- Ogloza, W., Zola, S., Tremko, J. & Kreiner, J. M. 1998, A&A, 340, 81
- Patkos, L. 1975, IBVS, 1065
- Patkos, L. 1976, IBVS, 1200
- Patkos, L. 1980, IBVS, 1751
- Predolin, F., Giuricin, G. & Mardirosian, F. 1980, IBVS, 1801
- Press, W., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A., & Vetterling, W. T. 1989, *Numerical Recipes* (Cambridge Univ. Press : Cambridge), Chapter 14
- Pringle, J. E. 1975, MNRAS, 170, 633
- Qingyao, L., Yulan, Y., Yulin, Z. & Bi, W. 1991, IAPPP Comm., 45, 57
- Russell, H. N. & Merrill, J. E. 1952, *Contrib. Princeton Univ. Obs.*, 26, 50
- Schmidt-Kaler, Th. 1982, *Landolt-Bornstein* (Springer-Verlag: New York), Vol 2, 28
- Vetesnik, M. 1968, BAI Czech., 19, 110
- Vetesnik, M. 1977, BAI Czech., 28, 120
- Wilson, R. E. 1979, ApJ, 234, 1054

Wilson, R. E. 1993, Documentation of Eclipsing Binary Computer Model(University of Florida, Gainesville)

Wilson, R. E. & Devinney, E. J. 1971, ApJ, 166, 606