

## 근접촉쌍성 DO Cas와 SW Lyn의 로쉬 모형

김호일, 이우백, 성언창, 경재만, 윤재혁

한국천문연구원, 대전시, 305-348

## ROCHE CONFIGURATIONS OF TWO NEAR-CONTACT BINARIES: DO CAS AND SW LYN

Ho-Il Kim, Woo-Baik Lee, Eon Chang-Sung, Jae-Mann Kyeong, Jae-Hyuk Youn

Korea Astronomy Observatory, Taejon, 305-348

E-mail: hikim@hanul.issa.re.kr

(Received October 15, 1999; Accepted November 16, 1999)

### 요약

근접촉쌍성으로 분류된 두개의 식쌍성 DO Cas와 SW Lyn의 광도곡선을 분석하여 이들의 로쉬 모형을 알아보았다. DO Cas는 이 연구를 위하여 새로이 관측하였으며 SW Lyn은 이미 발표되어 있는 자료를 이용하였다.

DO Cas에 대한 관측은 짧은 기간에 완성하여 체계적인 관측 오차를 최소화하였다. WD 모델을 사용한 우리의 분석에 의하면, DO Cas는 근접촉쌍성으로 분류될 수 있으나 SW Lyn은 준분리 형으로 분류하는 것이 타당함을 알 수 있었다. 더구나, DO Cas는 접촉쌍성으로도 분류가 가능하므로 근접촉쌍성이 하나의 독립된 로쉬모형으로 인정되기 위해서는 근접촉쌍성으로 분류된 쌍성들의 광도곡선을 보다 면밀하게 재분석할 필요가 있다고 판단된다.

### ABSTRACT

Light curves of two near-contact binaries DO Cas and SW Lyn are analyzed to investigate their Roche configurations. We made new BVR observations for DO Cas and employed the published observation data for SW Lyn. Our four night observations for DO Cas were secured over 8 days so that the contamination by the intrinsic light variation is minimized.

Based on the WD model, we found that DO Cas could be classified as a near-contact binary, while SW Lyn is better described by semi-detached configuration. Furthermore it is also possible to classify DO Cas as a contact binary. It appears that there are ambiguities in the class of near-contact configuration, and further observations and re-analysis are required to establish the near-contact nature of binary systems.

## 1. 서 론

최근 Shaw(1990)에 의해 분류된 근접촉쌍성은 근접쌍성의 진화에 대한 실마리를 제공할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 이들은 대체로 접촉과 분리형 사이의 불확실한 로쉬모형을 보이고 있는 쌍성들로 작지만 불안정한 광도변화를 보이며, 위상 0.25와 0.75에서의 밝기가 서로 다른 특성을 보이기도 한다. Shaw, Caillault,& Schmitt(1994)는 이 별들이 쌍성의 진화과정 중 A형 W UMa 쌍성의 모체이며, 빠른 질량교환을 일으키기 전 단계의 쌍성이라고 주장하고 있다. 하지만 근접촉쌍성으로 분류한 별들이 모두 동일한 로쉬모형 즉, 주성과 반성이 모두 로쉬한계면을 거의 채우고 있는 형태를 하고 있는지의 여부는 아직 검증이 필요한 상태라고 생각된다. 로쉬모형만으로 쌍성들의 진화 과정을 정확히 설명할 수는 없어도 대체적인 예측은 가능하기 때문에 근접촉쌍성으로 분류된 쌍성의 정확한 로쉬모형을 파악하므로서 이들이 같은 진화단계에 있는 것인지 아니면 서로 무관한 진화과정을 겪고 있는지를 알아 볼 수 있기 때문이다. 이 연구에서는 근접촉쌍성으로 분류되는 두개의 대표적 쌍성인 DO Cas와 SW Lyn의 광도곡선을 분석하여 이들의 로쉬모형을 확인하려고 한다. 실제로 DO Cas는 W UMa 형 쌍성으로도 알려져(Kaluzny, 1985) 있으며, SW Lyn의 경우는 준분리형 쌍성으로도 알려져(김호일 등, 1995) 있다.

## 2. 관측과 광도곡선

DO Cas는 소백산천문대 61cm 망원경과 PM512 CCD 카메라 그리고 BVR 필터를 사용하여 DIPHO 프로그램(박남규, 1993)으로 1998년 12월에 4일 동안 관측하여 B, V, R에서 각각 1508, 1611, 1638 개의 차등측광 관측점을 얻었다. 관측에 사용된 비교성과 겸토성은 이미 많은 관측자들이 사용하여 변광하지 않는다고 알려진 것으로 각각 BD+59 0548과 BD+59 0530이다. 이 관측점을 이용하여 그림 1과 같은 광도곡선을 만들었다. 위상은 오규동과 김천희(1996)의 광도요소를 사용하여 계산하였는데 그 공전주기는 0.6846661일이다. 이 그림에서 관측점은 점으로 표시하였고 실선은 이론적인 광도곡선으로 다음 절에서 설명하였다. 또한, 각 필터별 광도곡선이 잘 나타나도록 관측된 차등등급에 광도곡선 별로 적당한 값을 더하거나 빼서 표시하였다. 이 광도곡선은 지금까지 발표된 광도곡선 중에서 가장 짧은 기간동안에 완성된 것으로 쌍성계 자체의 광도변화에 의한 영향이 최소화되어 있는 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고, 그림 1에서 보듯이 부극심을 중심으로 좌우가 약간의 비대칭을 보이고 있는데 이것은 근접촉쌍성의 보편적 특징이기도 하다. 한편, SW Lyn의 광도곡선은 그 관측자료와 함께 김호일 등(1995)이 이미 발표한 것을 이 연구에 사용하였다.

DO Cas 와 SW Lyn 광도곡선 모두 제2극심을 중심으로 좌우가 비대칭이며, 제2극심으로부터 최대밝기를 보이는 위상 0.75까지의 밝기가 위상 0.25에서 제2극심까지의 밝기에 대하여 약간 어두운 관측오차의 범위를 초과하고 있다. 또한 DO Cas의 경우 위상 0.25에서의 최대밝기보다 위상 0.75에서의 최대밝기가 약간 어둡게 나타나는 소위 O'Connell 효과를 보이고 있는데 그 정도는 파장이 짧을수록 더 심하게 나타난다.

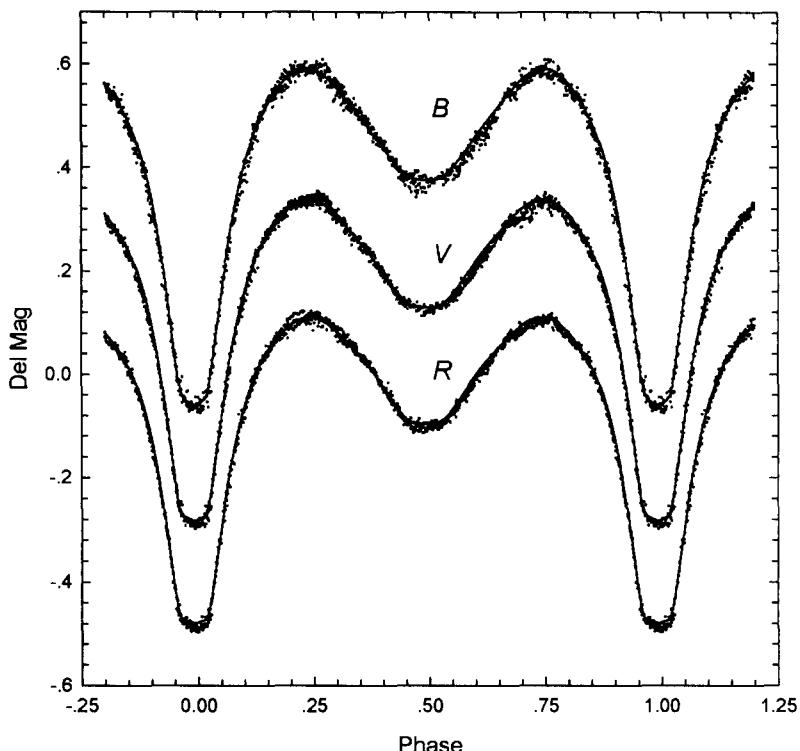


그림 1. DO Cas의 광도곡선. 점으로 표시한 것은 관측점이고 실선으로 표시한 것은 표2에서 얻은 광도곡선의 해을 이용해 이론적으로 계산한 광도곡선이다.

Shaw et al. (1994)은 DO Cas의 경우 O'Connell' 효과가 있으나 SW Lyn은 O'Connell 효과가 나타나지 않는다고 하면서 그 이유를 질량이동과 연관지어 설명하였다. 즉, 이동하는 질량에 의한 광손실에 의해 광도가 감소할 것이므로 전체 광량의 2~3% 만을 차지하는 반성의 일부가 가려져서는 광도곡선에 나타나는 정도의 밝기변화가 불가능하기 때문이라는 것이다. 하지만 이것은 단순히 위상 0.25와 0.75만을 비교한 것이고 제2극심으로부터 위상 0.75에 이르기까지의 광도변화는 간과한 결과라고 생각된다.

### 3. 광도곡선의 분석

DO Cas와 SW Lyn의 광도곡선을 분석하기 위하여 WD 모델(Wilson, 1993)을 사용하였다. 근접축식쌍성의 경우 그 정확한 로쉬 구조를 밝히는 것이 중요한 논점이므로 이를 검증하기 위해 DO Cas와 SW Lyn 모두 로쉬포텐셜면을 주성이 채우고 있는 경우, 반성이 채우고 있는 경우, 그리고 주성과 반성 모두

가 채우고 있는 경우를 가정하여 해를 구해보았다. 특별히, 주성과 반성 모두가 로쉬포텐셜면을 채우고 있는 접촉쌍성으로 분석할 때에는 기존의 WD 프로그램 내용 중에서 두 별의 온도뿐만 아니라 주변감광계수와 반사도를 각기 다른 값을 사용할 수 있도록 개정한 WD 모델(오규동 1999)을 사용하였다. 그 이유는 주변감광계수와 반사도는 별의 온도와 대기의 구조에 의해 결정되는 것으로 쌍성을 이루고 있는 두 별의 온도가 서로 다른 경우 이들 값도 각기 상이한 값을 가져야 함에도 불구하고 기존 WD 프로그램의 접촉형쌍성 모드는 두 별의 온도는 다른 값을 사용할 수 있으나 주변감광계수와 반사도는 같은 값을 사용해야 하는 불합리한 면이 있기 때문이다. 우리가 사용한 수정된 WD 프로그램에서는 선형 주변감광계수 만을 사용할 수 있었으나 동일한 모드에서 얻어지는 광도곡선의 해가 사용되는 주변감광계수의 유형에 따라 차이가 있기는 하지만 허용할 수 있는 오차범위 내에 든다는 것(김호일 등 1995)은 이미 확인되어 있다.

WD 프로그램의 입력 관측치를 얻기 위해, DO Cas의 경우 관측 점을 BVR에 대하여 각각 76, 75, 76개의 대표점을 만들어 분석에 사용하였으며 이는 표1에 정리한 바와 같다. 한편, SW Lyn의 경우에는 김호일 등(1995)가 이미 사용한 대표점을 사용하여 해를 구하였다. SW Lyn에 대해서는 이미 분석 결과를 발표한 바 있으나, 이 연구에서 다시 해를 구하려고 하는 이유는 당시 광도곡선의 비대칭성을 설명하기 위해 흑점률 도입할 수 있는 가에 분석의 초점이 맞추어져 있었고 로쉬모형을 알아내기 위한 노력이 없었기 때문에 다시 분석 할 필요가 있기 때문이다.

WD 프로그램의 인자들 중에서 우리가 선택한 조정인자는 반성의 온도, 궤도경사각, 질량비, 주성 혹은 반성의 포텐셜과 광도 등이었으며 나머지는 모두 주성과 반성의 온도에 해당하는 이론적인 값들을 사용하였다. 즉, 두 쌍성 모두 주성은 복사대기를 가지며 반성은 대류대기를 가진다고 가정하였다. 또한 주성과 반성 사이의 거리가 매우 가까우므로 반복반사를 한다고 가정하였고, 주변감광계수는 준분리형의 경우 Van Hamme(1993)의 지수형 계수를 그리고 접촉형인 경우에는 Gleim(1967)의 선형 계수를 사용하였다.

DO Cas의 경우 주성이 로쉬포텐셜면을 채우고 있는 모드를 사용하여 분석한 결과 반성이 로쉬포텐셜면 보다 커지는 오류가 발생하였으며, 반성이 로쉬포텐셜면을 채우고 있는 경우와 두 별이 접촉상태인 경우에는 모든 조정인자가 수렴하는 만족스러운 결과를 얻을 수 있었다. 반면, SW Lyn의 경우에는 반성이 로쉬포텐셜면을 채우고 있는 경우와 접촉형인 경우에 대해서는 해를 얻을 수 없었고, 주성이 로쉬포텐셜면을 채우고 있는 경우에 대해서만 만족스러운 해를 얻을 수 있었다. 특히, 접촉형으로 가정하여 해를 구하고자 할 경우 두 별 모두가 로쉬포텐셜면을 채우지 못한 분리형으로 수렴되는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 분리형으로 가정하여 다시 분석을 시도하였으나 이 경우 역시 주성의 크기가 로쉬포텐셜면에 수렴하는 결과를 얻었다. DO Cas와 SW Lyn 광도곡선의 분석 결과를 표2에 정리하였다. 이 표에서 mode 3은 접촉형을, mode 4는 부성이 로쉬포텐셜면을 채우고 있는 준분리형을 그리고 mode 5는 반성이 로쉬포텐셜면을 채우고 있는 준분리형을 의미한다. 또한 구해진 해 중, mode 4의 결과를 이용하여 이론적인 광도곡선을 만들어 DO Cas의 경우 그림1에 실선으로 표시하였고 SW Lyn의 경우에는 그림 2에 점으로 표시한 관측점 위에 실선으로 표시하였다.

표1. DO Cas의 관측 대표점.

P	IB	P	IB	P	IV	P	IV	P	IR	P	IR	
0.0061	0.5489	0.4879	0.8163	0.0002	0.5615	0.5025	0.8207	0.0003	0.5761	0.5024	0.8250	
0.0188	0.5600	0.5054	0.8177	0.0162	0.5692	0.5196	0.8252	0.0131	0.5797	0.5154	0.8253	
0.0277	0.5783	0.5262	0.8238	0.0261	0.5832	0.5377	0.8309	0.0231	0.5892	0.5284	0.8277	
0.0354	0.6060	0.5435	0.8299	0.0350	0.6183	0.5526	0.8418	0.0313	0.6127	0.5415	0.8354	
0.0428	0.6416	0.5576	0.8322	0.0440	0.6530	0.5660	0.8522	0.0397	0.6465	0.5536	0.8464	
0.0510	0.6735	0.5694	0.8475	0.0545	0.6954	0.5774	0.8629	0.0493	0.6823	0.5645	0.8575	
0.0604	0.7082	0.5824	0.8588	0.0653	0.7312	0.5889	0.8724	0.0600	0.7209	0.5778	0.8694	
0.0681	0.7344	0.5942	0.8688	0.0770	0.7721	0.6041	0.8888	0.0692	0.7541	0.5912	0.8842	
0.0787	0.7709	0.6101	0.8841	0.0882	0.8099	0.6209	0.9034	0.0808	0.7915	0.6080	0.9016	
0.0863	0.7924	0.6247	0.8929	0.0972	0.8309	0.6363	0.9219	0.0892	0.8208	0.6241	0.9141	
0.0955	0.8168	0.6388	0.9123	0.1094	0.8643	0.6537	0.9399	0.0994	0.8453	0.6396	0.9331	
0.1097	0.8531	0.6569	0.9390	0.1241	0.8985	0.6699	0.9581	0.1112	0.8742	0.6574	0.9507	
0.1247	0.8954	0.6771	0.9596	0.1380	0.9215	0.6843	0.9637	0.1233	0.8991	0.6731	0.9673	
0.1391	0.9237	0.6951	0.9714	0.1529	0.9430	0.6998	0.9686	0.1349	0.9189	0.6885	0.9711	
0.1550	0.9474	0.7168	0.9869	0.1660	0.9573	0.7168	0.9796	0.1475	0.9358	0.7054	0.9809	
0.1683	0.9572	0.7340	0.9947	0.1784	0.9683	0.7295	0.9899	0.1611	0.9536	0.7214	0.9887	
0.1806	0.9670	0.7494	0.9981	0.1908	0.9800	0.7446	0.9957	0.1739	0.9668	0.7343	0.9928	
0.1945	0.9845	0.7639	0.9958	0.2027	0.9896	0.7600	0.9935	0.1867	0.9760	0.7498	0.9946	
0.2093	0.9975	0.7783	0.9890	0.2147	0.9922	0.7754	0.9883	0.2023	0.9906	0.7651	0.9954	
0.2252	0.9995	0.7928	0.9736	0.2269	0.9972	0.7908	0.9734	0.2184	0.9964	0.7806	0.9826	
0.2408	0.9989	0.8069	0.9638	0.2392	0.9972	0.8064	0.9609	0.2344	0.9987	0.7961	0.9706	
0.2573	1.0004	0.8201	0.9527	0.2518	1.0009	0.8215	0.9472	0.2505	1.0001	0.8115	0.9560	
0.2751	0.9928	0.8333	0.9368	0.2642	0.9999	0.8365	0.9295	0.2674	0.9952	0.8265	0.9432	
0.2910	0.9744	0.8464	0.9104	0.2779	0.9941	0.8516	0.9054	0.2867	0.9867	0.8416	0.9272	
0.3041	0.9679	0.8596	0.8826	0.2906	0.9789	0.8665	0.8756	0.3016	0.9752	0.8567	0.9007	
0.3165	0.9522	0.8731	0.8551	0.3039	0.9684	0.8805	0.8425	0.3142	0.9646	0.8715	0.8721	
0.3283	0.9375	0.8852	0.8267	0.3171	0.9558	0.8921	0.8131	0.3276	0.9547	0.8846	0.8412	
0.3430	0.9297	0.8952	0.7950	0.3330	0.9400	0.9017	0.7822	0.3433	0.9417	0.8961	0.8100	
0.3588	0.9140	0.9045	0.7694	0.3532	0.9243	0.9098	0.7620	0.3600	0.9258	0.9057	0.7787	
0.3751	0.8964	0.9133	0.7392	0.3741	0.9049	0.9175	0.7329	0.3775	0.9117	0.9137	0.7548	
0.3924	0.8797	0.9216	0.7079	0.3915	0.8845	0.9252	0.7010	0.3946	0.8881	0.9213	0.7255	
0.4059	0.8693	0.9301	0.6754	0.4027	0.8734	0.9331	0.6737	0.4086	0.8746	0.9291	0.6965	
0.4171	0.8513	0.9389	0.6402	0.4137	0.8634	0.9407	0.6451	0.4216	0.8590	0.9369	0.6688	
0.4283	0.8412	0.9480	0.6080	0.4250	0.8485	0.9485	0.6141	0.4347	0.8443	0.9456	0.6333	
0.4395	0.8292	0.9568	0.5783	0.4362	0.8370	0.9564	0.5878	0.4477	0.8308	0.9552	0.6023	
0.4506	0.8243	0.9659	0.5622	0.4502	0.8301	0.9674	0.5697	0.4606	0.8243	0.9652	0.5840	
0.4617	0.8183	0.9775	0.5518	0.4682	0.8268	0.9831	0.5616	0.4755	0.8225	0.9752	0.5807	
0.4729	0.8167	0.9919	0.5486	0.4856	0.8210				0.4894	0.8228	0.9866	0.5777

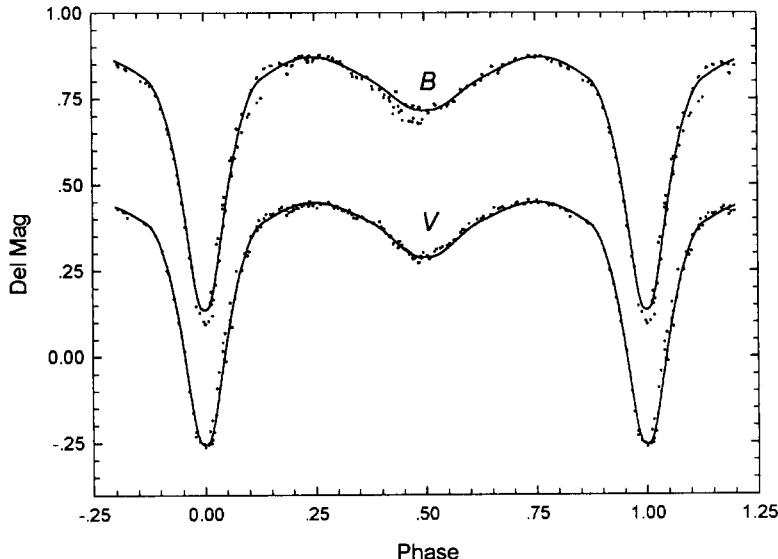


그림 2. SW Lyn의 광도곡선. 점으로 표시한 것은 관측점이고 실선으로 표시한 것은 표2에서 얻은 광도곡선의 해을 이용해 이론적으로 계산한 광도곡선이다.

#### 4. 결과 및 토의

근접촉쌍성으로 분류된 쌍성들은 대체로 부극심을 중심으로 좌우가 비대칭인 경향을 보이고 있다. 이러한 점에 착안하여 Shaw(1990)은 근접촉쌍성을 두개의 유형으로 나누었는데 위상 0.25부근의 광도가 0.75의 광도에 비하여 더 밝은 것과 그 반대되는 것을 기준으로 하였다. 이 연구에서 다루고 있는 DO Cas와 SW Lyn은 각각 다른 유형으로 분류되어 있다. 하지만 우리의 광도곡선에서 보듯이 두 별 모두 0.25에서의 광도가 더 밝게 나타나고 있다. 따라서 근접촉쌍성의 광도곡선이 항상 같은 모습을 하고 있는지 혹은 변화하고 있는지의 검증이 필요한 상태라고 생각되며 광도변화의 원인도 다양한 관점에서 검증되어야 한다고 생각된다. 또한 SW Lyn의 경우 근접촉쌍성으로는 도저히 광도곡선을 만족시키는 해를 찾을 수 없으며 어떤 가정을 하여도 명확하게 준분리형으로 귀결되는 결과를 얻은 점도 중요하게 지적되어야 한다. DO Cas의 경우에도 근접촉형 쌍성으로 분류하는데 어려움이 없지만 같은 정도의 신뢰도로 접촉형 쌍성으로도 분류 가능하다는 점은 시사하는 바가 크다고 생각된다.

이 연구에서 얻은 해와 이들에 상응하는 물리량들을 계산하여 그림 3과 같은 질량-반경도를 그려보았다. 이 그림에서 파선은 Menzel et al.(1979)의 항성 진화 모형에서  $Y=0.20$ ,  $Z=0.01$ 인 것을 선택하여 그린 영년주계열과 종년주계열을 의미하며, 1과 2는 각각 주성과 반성을 의미하는데 DO Cas 와 SW Lyn에 대하여 1과 2를 연결한 선의 기울기가 서로 다른 것을 알 수 있다. 일반적으로 같은 형태의 로쉬모형을

표2. DO Cas 과 SW Lyn의 광도 요소.

	DO Cas			SW Lyn		
	mode 3		mode 4			mode 5
$i$	85.7		87.5			82.7
$q$	0.328		0.330			0.313
$T_1$	8200K		8200K			7040K
$T_2$	4600K		4680K			4359K
$\Omega_1$	2.5008		2.5309			2.7716
$\Omega_2$	2.5008		2.5383			2.4948
$A_1$	1.0		1.0			1.0
$A_2$	0.5		0.5			0.5
$g_1$	1.0		1.0			1.0
$g_2$	0.32		0.32			0.32
	B	V	R	B	V	R
$X_1$	0.598	0.507	0.402	0.802	0.694	0.567
$X_2$	0.933	0.776	0.638	0.832	0.803	0.747
$Y_1$				0.306	0.281	0.248
$Y_2$				-0.230	-0.041	0.083
$l_1$	0.979	0.967	0.957	0.977	0.966	0.955
$l_2$	0.021	0.033	0.043	0.023	0.034	0.045
$r_1(\text{side})$	0.488			0.481		0.423
$r_2(\text{side})$	0.285			0.277		0.275
$M_1$	2.2			2.2		1.5
$M_2$	0.72			0.73		0.47
$R_1$	2.28			2.25		1.69
$R_2$	1.33			1.30		1.10

갖는 쌍성은 위와 같은 그림의 기울기가 서로 비슷한데 반하여 이 들은 서로 다른 기울기를 갖고 있으며 또한 로쉬모형도 상이한 것으로 보아 진화 과정이 서로 다른 단계에 있다고 할 수 있다. 따라서 근접 촉쌍성을 근접쌍성의 하나의 부류로 인정하기 위해서는 많은 검증이 이루어져야 한다고 생각된다.

감사의 글: 이 연구는 한국천문연구원 기관고유사업 99-1-300-00 과제로 수행되었습니다.

### 참고문헌

김호일, 한원용, 이우백, 김천희 1995, 한국우주과학회지, 12, 196

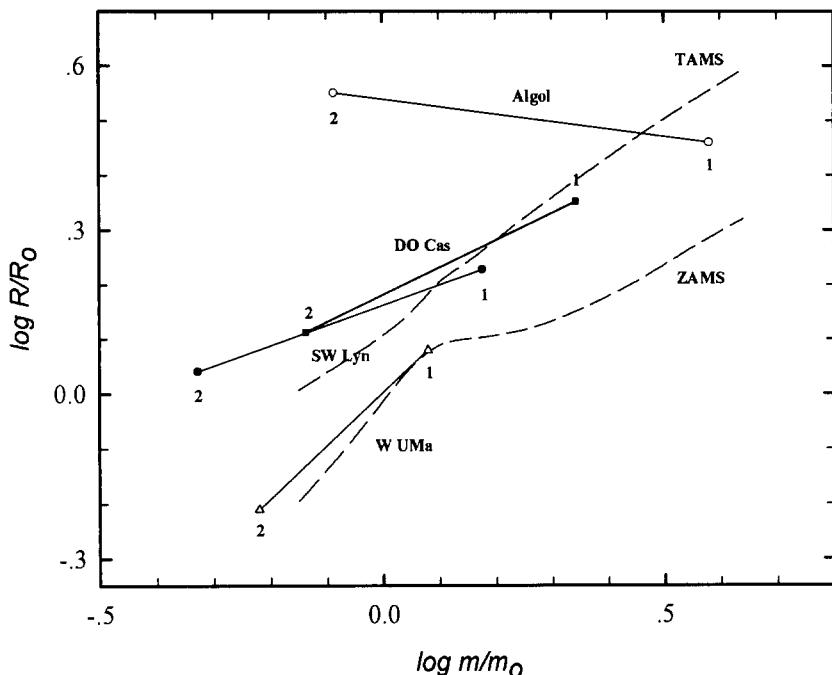


그림 3. 반경-질량도. 파선으로 표시한 것은 영년주계열과 종년주계열을 의미하며 1과 2는 각각 주성과 반성을 의미한다.

박남규, 1993, 박사학위 논문, 서울대학교

오규동 1999, 개인서신

오규동, 김천희 1996, 한국우주과학회지, 13, 134

Gleim, J. K. 1967, AJ, 72, 493

Kaluzny, J. 1985, Acta Astr, 35, 327

Menzel, J. G., Sweigart, A. V., Demarque, P., & Gross, P. G. 1979, ApJS, 40, 733

Shaw, J. S. 1990, in Active Close Binaries, ed. C. Ibanoglu (Dordrecht: Kluwer), 241

Shaw, J. S., Caillault, J.-P. & Schmitt, J. H. M. M. 1994, ApJ, 461, 951

Van Hamme, W. 1993, AJ, 106, 2096

Wilson, R. E. 1993, private communication