

식쌍성의 질량과 궤도 각운동량 관계

오 규 동
전남대학교 지구과학교육과

THE MASS AND ANGULAR MOMENTUM RELATION OF ECLIPSING BINARIES

Kyu-Dong Oh

Department of Earth Science Education, Chonnam National University
e-mail: ohkd@chonnam.chonnam.ac.kr

(Received April 10, 1998; Accepted May 4, 1998)

요 약

Svechnikov & Kuznetsova (1990)의 *Catalogue of Approximate Photometric and Absolute Elements of Eclipsing Variable Stars*로부터 3780개의 식쌍성들을 이용하여 식쌍성의 질량-궤도 각운동량과의 상관 관계를 조사하였다. 그 결과 쌍성이 진화하는 동안 궤도 각운동량이 보존되지 못하며, 비록 일정한 값을 갖지는 않지만 점진적으로 분리형에서 준분리형으로 그리고 접촉형으로 진화할수록 그 값이 감소하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT

With a total 3780 eclipsing binary system in the *Catalogue of Approximate Photometric and Absolute Elements of Eclipsing Variable Stars* by Svechnikov & Kuznetsova (1990), the empirical relations between the systemic mass and orbital angular momentum have been examined. It is found that, during the its evolution, the total orbital angular momentum of the eclipsing binary system is not conserved. It decreases gradually, though not at a constant rate, until the system becomes into contact from initially detached via semi-detached system.

1. 서 론

쌍성계에 대한 진화 (Paczynski 1971, Kippenhahn *et al.* 1967, Van den Heuvel 1976, McDermott *et al.* 1988)를 다루는 문제에 있어서 매우 중요한 물리량은 두 별의 질량과 궤도 각운동량이 어떤 변화량을 보이느냐 하는 것이다. 그런데, 쌍성 진화에 대한 이론적인 연구는 기본적으로 다음과 같은

두 가지 가정하에서 진화에 대한 일차적인 연구를 수행하게 된다. 첫째는 쌍성계의 질량이 보존된다는 것과 다음으로는 쌍성계의 궤도 각운동량이 보존된다는 것이다. 그러나 이러한 가정은 쌍성의 진화를 연구하는데 있어서 가장 단순한 일차적인 가정일 뿐으로서 실질적으로 쌍성은 그 진화 과정 속에서 두 별사이의 질량 교환에 따른 매우 복잡한 질량 및 각운동량의 손실 또는 각운동량의 교환 등이 나타나게 된다. 따라서 쌍성의 진화 단계에 따라 두 별의 질량의 합과 궤도 각운동량 사이에 어떠한 상관 관계가 나타나는가를 조사함으로써 우리는 쌍성 진화 단계에 따른 쌍성의 물리적 특성을 이해할 수 있을 것이다. 실제 여러 연구자 (Chaubey 1979, 1980, Trimble 1984)들은 많은 쌍성들을 표본으로 하여 두 별의 질량의 합과 궤도 각운동량 사이에 일차적인 상관 관계가 나타난다는 것을 밝힌 바가 있다. 그러나 이러한 연구들은 축적된 많은 쌍성들의 표본을 바탕으로 분석되었다고 하지만 엄격히 제한된 범위의 쌍성들 - Chaubey (1979)는 $6.5M_{\odot}$ 이하의 91개의 쌍성들만을 택하였으며, Chaubey (1980)는 54개의 Algol형만을 택하였고, 특별히 Trimble (1984)는 *Seventh Catalogue of the Orbital Elements of Spectroscopic Binaries* (Batten et al. 1978)로부터 978개의 분광쌍성만을 택하였다. - 만을 선택하여 분석한 것이다. 따라서 지금까지 조사 분석된 연구 결과들 보다 더 방대한 쌍성들을 표본으로 선택하고 그 범위도 광범위하게 설정하여 분석한다면 지금까지의 결과 보다 더 구체적인 쌍성의 질량과 궤도 각운동량 사이의 상관 관계를 얻게 될 것이다. 한편, Huang et al. (1992)는 쌍성의 진화에 있어서 쌍성의 각운동량은 궤도 각운동량 뿐만 아니라 스핀 각운동량까지도 고려하여야 한다고 주장하였다.

최근 Svechnikov & Kuznetsova (1990)는 3780개의 식쌍성들의 기하학적 또는 물리적 궤도요소들을 수집 목록화 하였다. 그런데 Svechnikov & Kuznetsova의 목록은 지금까지 수집 발표된 여러 목록 (Koch et al. 1970, Batten et al. 1978, 1989, Cester et al. 1979, Terrell et al. 1992)들과 비교하여 수집된 식쌍성의 수적인 면에서나 또한 제공된 자료의 범위 면에도 어떠한 목록들에 비하여 그 범위가 매우 광범위하다. 이러한 의미에서 이번 연구에서는 지금까지 발표된 어떠한 목록 보다 수집된 쌍성의 자료 및 범위가 매우 광범위한 Svechnikov & Kuznetsova (1990)의 목록을 이용하여 분석한다면 쌍성의 두 별의 질량의 합과 궤도 각운동량 사이에 대한 보다 구체적인 상관 관계를 얻게 될 것이다. 또한 이러한 분석 결과로부터 식쌍성의 진화 과정 속에서 궤도 각운동량의 변화가 어떻게 나타나고 있는가를 조사하였다.

2. 식쌍성의 일반적 특성

먼저 전반적인 식쌍성의 일반적 특성을 이해하기 위하여 Svechnikov & Kuznetsova (1990)의 *Catalogue of Approximate Photometric and Absolute Elements of Eclipsing Variable Stars* 으로부터 3780개의 식쌍성들에 대한 몇가지 인자 (공전주기, 질량비, 주성의 분광형 등등)들에 대한 통계적 분포를 조사하였다 (그림 1과 그림 2). 그런데, 이러한 식쌍성의 여러 물리량들에 대한 통계적 분석은 Giannone & Giannuzzi (1974), Cester et al. (1983), Giuricin et al. (1983), Gimenez & Zamorano (1985), Smith

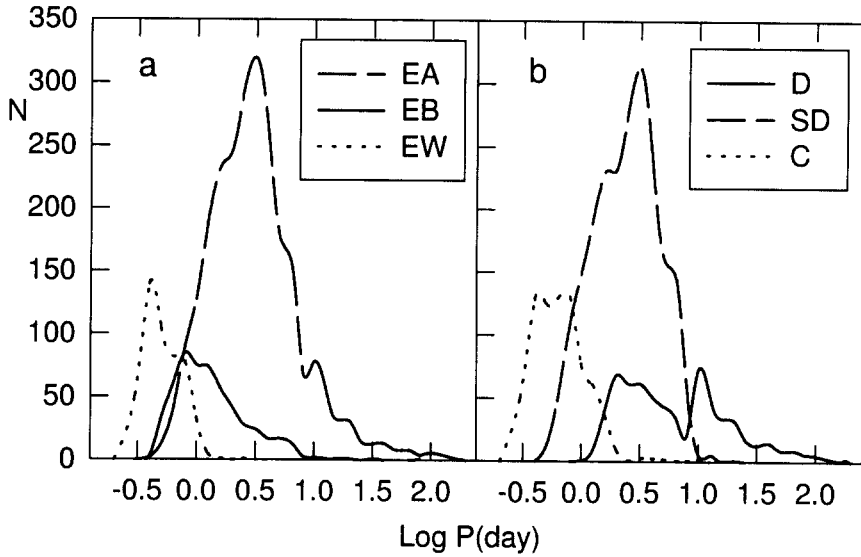


그림 1. 공전주기(P)에 따른 분포도.

(1983), Griffiths *et al.* (1988) 그리고 Demircan & Kahraman (1991) 등에 의하여 조사된 바도 있다. 그러나 이러한 조사는 서론에서도 밝힌 바와 같이 대부분 어떤 특정한 분류 또는 특정한 범위의 소수의 식쌍성들만을 적용하여 분석한 것이었기 때문에 그림1과 그림2의 이번 분석과 상대적으로 상호 비교가 되고 있다. 특별히 그림 1의 공전주기에 따른 식쌍성의 개수 분포도의 경우 Tsesevich (1973) 그리고 Petit (1987)에 의해서도 조사된 바가 있으나 그림 1b와 같은 분리형, 준분리형 및 접촉형에 따른 개수 분포는 지금까지 조사된 바가 없었다. 그런데 특이하게도 분리형의 경우 공전주기가 2일과 11일 부근에서 2개의 극대점을 보이고 있으며, 2일 부근에서는 주로 EB형이, 11일 부근에서는 대부분 EA형이 분포하고 있다. 그림 1과 그림 2의 EA, EB 그리고 EW는 각각 Algol형, β Lyrae형 그리고 W UMa형을 또한 D, SD 그리고 C는 각각 분리형, 준분리형 그리고 접촉형을 말한다.

한편, 그림 2의 주성의 분광형에 따른 분포도를 조사하여 보면 주성의 분광형은 대부분 A형을 갖는 별들이 많이 분포하고 있음을 확인 할 수가 있었으며 질량비에 따른 분포도에서는 Algol형과 준분리형들은 다른 형들에 비교하여 대부분 질량비가 상대적으로 작게 나타나고 있다.

3. 질량 - 궤도 각운동량 관계

식쌍성의 질량-궤도 각운동량과의 상관 관계를 얻기 위하여 Svechnikov & Kuznetsova (1990)의 목록에 주어진 식쌍성들의 기하학적 궤도요소와 절대량으로부터 각각의 식쌍성들에 대한 궤도 각운

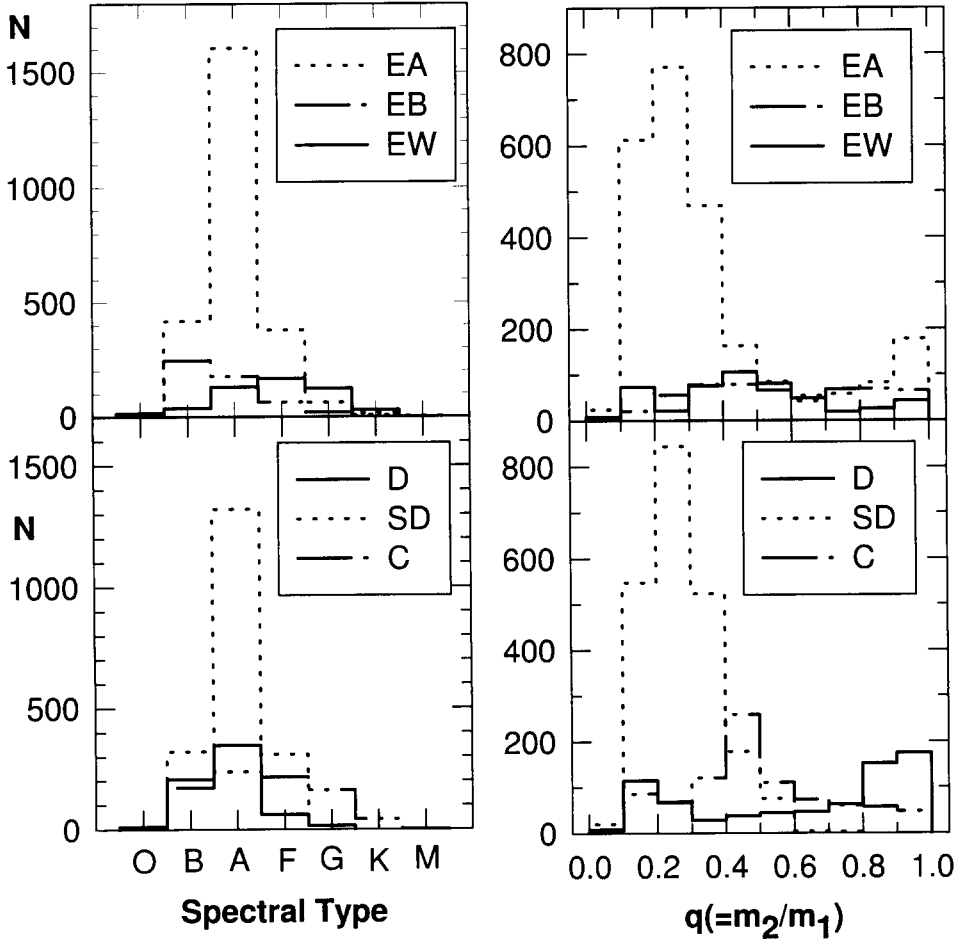


그림 2. 분광형 및 질량비(q)에 따른 분포도.

동량 J 를 다음과 같이 잘 알려진 일반적인 식으로부터 계산하였다.

$$J = [G(M_1 M_2)^2 A] / M \tag{1}$$

식(1)에 Kepler 3법칙을 적용하면,

$$J = (G^2 / 2\pi)^{1/2} [(M_1 M_2) / M^{1/3}] P^{1/3} \tag{2}$$

이다. 여기서 $M =$ 주성(M_1)과 반성(M_2)의 질량의 합, 단위는 태양 질량(M_\odot), $A =$ 주성과 반성 사이의 거리, 단위는 태양 반경(R_\odot), $P =$ 궤도 공전주기, 단위는 날 수(day), $G =$ 만유인력 상수이다.

다음으로 식쌍성들을 분리형, 준분리형 그리고 접촉형으로 분류하여 두 별의 질량의 합, $M(= M_1 + M_2)$ 과 식(2)에 의하여 계산된 궤도 각운동량, J 로부터 그림 3과 같은 식쌍성들에 대한 질량-궤도 각운동량과의 상관 관계를 얻었다. 그림 3에 나타난 바와 같이 각각의 분류된 식쌍성들에 대한 일차식의 상관 관계식을 다음과 같이 얻었다.

$$\begin{aligned} \text{분리형 : } \log J &= 1.586 + 1.699 \log M/M_\odot \\ &\pm .012 \pm .017 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \text{준분리형 : } \log J &= 1.227 + 1.980 \log M/M_\odot \\ &\pm .004 \pm .008 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \text{접촉형 : } \log J &= 1.163 + 1.933 \log M/M_\odot \\ &\pm .014 \pm .027 \end{aligned} \tag{5}$$

이와 같은 일차식의 상관 관계식 (3), (4) 및 (5)식의 결정계수(r^2)는 각각 0.958, 0.940 및 0.994이며, 그림 3에 나타난 바와 같이 분리형과 준분리형에서는 매우 좋은 상관 관계를 보이고 있으나 접촉형에서는 다소 미흡한 상관 관계를 보이고 있다. 따라서 접촉형의 경우에는 접촉형의 여러 가지 물리적 특성에 따라 질량-궤도 각운동량에 대한 상관 관계를 세분하여 분류할 필요성이 있다. 그러므로 그림 3c의 접촉형인 경우 RS CVn형 및 접촉형 가운데도 질량비가 0.18 이하의 별들만을 분리하여 제외시킨 후 나머지 접촉형에 대한 질량-궤도 각운동량의 상관 관계를 얻은 것이다. 여기서 접촉형 가운데 질량비가 0.18 이하의 식쌍성들은 실제 H-R도 상에서 주계열성의 하단에 놓이는 별들로서 이 별들의 진화를 아직도 설명하지 못하고 있는 별들에 속한다. 한편, Chaubey (1979)은 두 별의 질량의 합이 $6.5M_\odot$ 이하를 갖는 91개의 쌍성들만을 택하여 질량-궤도 각운동량의 상관 관계를 조사하였는데 그의 주장에 따르면 질량이 같은 식쌍성들은 분리형, 준분리형 그리고 접촉형으로 진화함에 따라 단계적으로 일정한 량의 궤도 각운동량이 손실되며 이에 따라 궤도 각운동량이 일정하게 감소한다고 주장하였다(Chaubey의 그림 1 참조). 그러나 그림 3d의 이번 조사에서 보인 바와 같이 Chaubey가 주장한 바와 같은 분리형, 준분리형 그리고 접촉형에 따라 일정한 량으로 단계적인 각운동량의 손실은 나타나지 않으며, 다만 질량이 대략 $10M_\odot$ 이하의 식쌍성들인 경우 다소 일정하고 단계적이지는 않지만 궤도 각운동량이 분리형, 준분리형 그리고 접촉형으로 갈수록 감소하게 나타고 있을 뿐이다. 따라서 Chaubey의 결과는 그가 특정한 어떤 범위에 해당되는 소수의 식쌍성들만을 택하여 분석하였기 때문으로 해석된다. 그림 3d는 154개의 RS CVn형들에 대해서도 함께 질량-궤도 각운동량의 상관 관계도 함께 조사하여 보았다.

한편, 그림 4에는 분리형 식쌍성 가운데 주성과 반성이 모두 주계열성인 경우(DM)와 반성이 거성 단계에 놓여 있으며, 로쉬면에 근접한 경우(DS)의 별들을 따로 분리하여 준분리형 및 접촉형들과

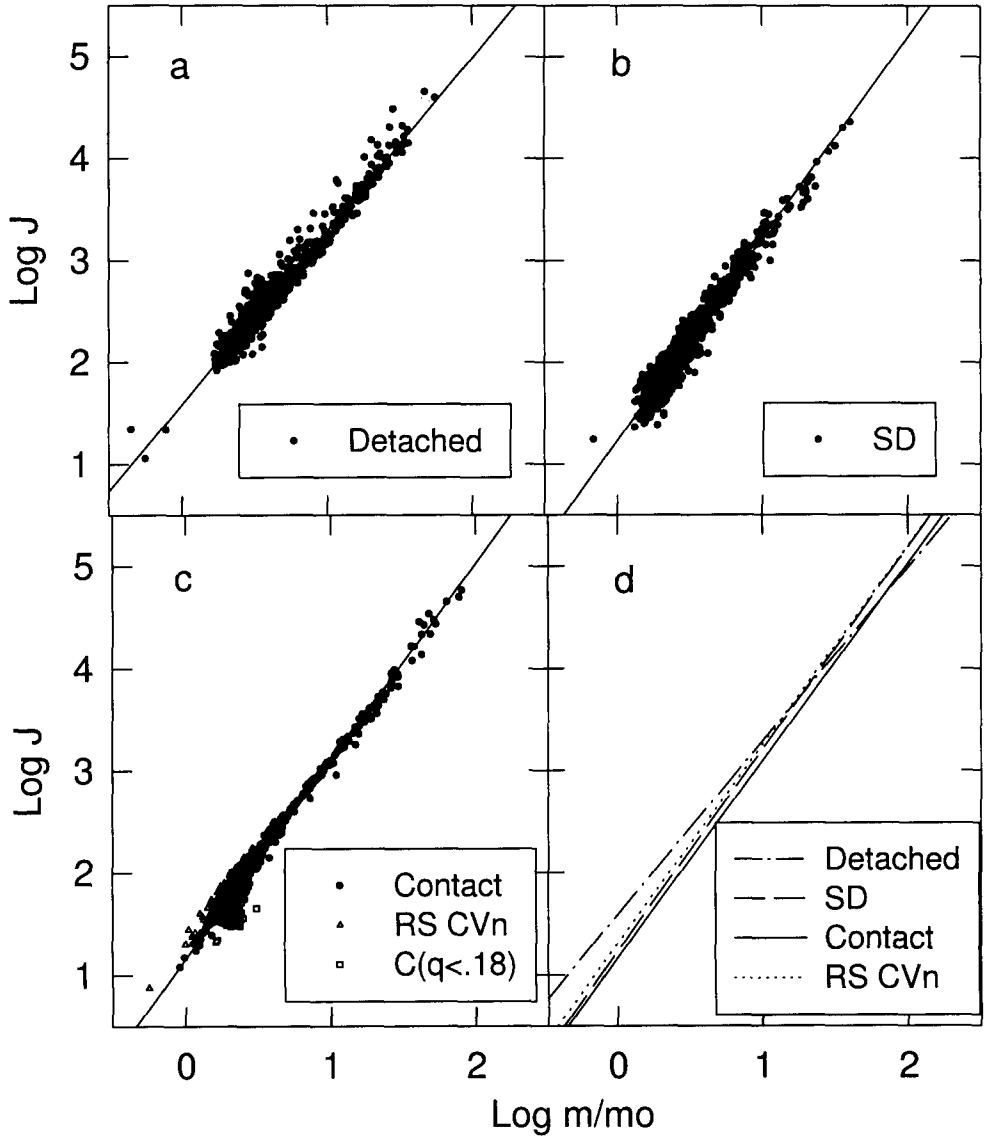


그림 3. 질량과 궤도 각운동량 관계.

함께 질량-궤도 각운동량의 상관 관계를 조사하여 보았다. 그 결과 분리형 가운데 DM형을 제외한다면 Chaubey (1979)가 주장한 바와 같이 정확하게 일정한 량의 단계적인 궤도 각운동량의 손실은 아니지만 다소 비례적으로 분리형 가운데 DS형, 준분리형 그리고 접촉형으로 갈수록 궤도 각운동량의

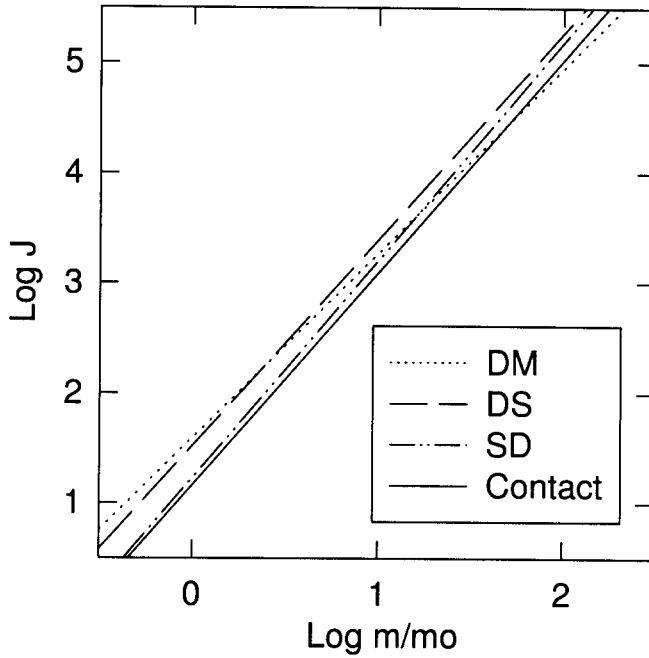


그림 4. 질량과 궤도 각운동량 관계.

손실이 나타나고 있음을 확인 할 수가 있었다. 따라서 식쌍성 가운데 어느 한 별이 로쉬면을 채울 경우 질량 교환에 따른 진화에 따라 궤도 각운동량의 손실이 나타나고 있음을 알 수가 있다.

4. 토의 및 검토

Svechnikov & Kuznetsova (1990)의 목록으로부터 3780개의 식쌍성을 택하여 그림 1과 그림 2에 일반적인 식쌍성의 기하학적 특성을 조사하였다. 특별히 그림 1b의 분리형, 준분리형 및 접촉형에 대한 공전주기에 따른 개수 분포도는 아직까지 조사된 바가 없었다. 그림 1b의 결과에 따르면 특이하게도 분리형에서 공전주기가 2일 및 11일 부근에서 극대점이 동시에 나타나는데 2일 부근의 극대점은 주로 β Lyrae형이 11일 부근에 서는 주로 Algol형이 차지하는 뚜렷한 차이점을 알 수 있었다.

식쌍성의 질량-궤도 각운동량에 대한 상관 관계를 조사하기 위하여 그림 3과 그림 4에 3780개의 식쌍성들을 분리형, 준분리형 그리고 접촉형으로 분류하여 그에 따른 질량-궤도 각운동량에 대한 상관 관계를 분석하였다. 그 결과 대체적으로 분리형, 준분리형 그리고 접촉형에 따라 각각 식(3), 식(4) 그리고 식(5)과 같은 일차적인 상관 관계식을 얻었다.

한편, Chaubey (1979)에 따르면 식쌍성이 분리형에서 준분리형으로 또한 접촉형으로 진화 함에 따라 일정하게 단계적으로 궤도 각운동량이 감소한다고 주장하였으나, 그림 3d에 나타난 바와 같

이 분리형에서 준분리형으로 또한 접촉형으로 갈수록 궤도 각운동량이 다소 감소하는 것은 확인 할 수 있으나 Chaubey가 주장한 바와 같은 일정한 량으로의 단계적인 감소는 확인되지 않았다. 따라서 Chaubey의 결과는 그가 특정한 어떤 범위에 해당되는 소수의 식쌍성들 만을 적용하여 질량-궤도 각운동량의 상관 관계를 얻었기 때문으로서 이번 조사에서 나타난 바와 같이 분석하고자 하는 별의 범위와 분포를 광범위하게 설정하여야 할 필요성이 강조되는 것이다. 한편, 그림 4에 보인 바와 같이 분리형 가운데 DM형을 제외한 DS형 및 준분리형 그리고 접촉형만을 적용하여 분석한 경우 Chaubey가 주장한 바와 같이 정확하게 일정한 량의 단계적인 궤도 각운동량의 손실은 아니지만 다소 비례적으로 DS형, 준분리형 그리고 접촉형으로 갈수록 같은 질량의 식쌍성에서 궤도 각운동량이 점진적으로 손실되어지고 있음을 확인 할 수가 있었다.

끝으로 이러한 연구 분석을 위해서는 보다 많은 식쌍성의 측광 및 분광학적 관측 결과와 함께 정확한 기하학적 또는 물리적 기본량이 요구된다.

참고문헌

- Batten, A. H., Flectcher, J. M. & Mann, P. J. 1978, Publ. Dominion Astrophys. Obs., 15, 121
 Batten, A. H., Flectcher, J. M. & MacCarthy, D. G. 1989, Publ. Dominion Astrophys. Obs., 17
 Cester, B., Fedel, B., Giuricin, G. & Mardirossian, F. 1979, Mem S. A. It., 50, 553
 Cester, B., Ferluga, S. & Boehm, C. 1983, Ap&SS, 96, 125
 Chaubey, U. S. 1979, Ap&SS, 64, 177
 Chaubey, U. S. 1980, Ap&SS, 73, 503
 Demircan, O. & Kahraman, G. 1991, Ap&SS, 181, 313
 Giannone, P & Giannuzzi, M. A. 1974, Ap&SS, 26, 289
 Gimenez, A. & Zamorano, J. 1985, Ap&SS, 114, 259
 Giuricin, G., Mardirossian, F. & Mezzetti, M. 1983, ApJS, 52, 35
 Griffiths, S. C., Hicks, R. A., Erikson, K. & Nordlund, A. 1988, A&Ap, 42, 407
 Huang, R. Q., Yu, K. N. & Han, Z. W. 1992, A&A, 256, 438
 Kippenhahn, R., Weigert, A. & Hofmeister, E. 1967, *Computational Methods in Physics*, Vol.7 (Academic Press: N.Y.), p.129
 Koch, R. H., Plavec, M. & Wood, F. B. 1970, Publ. U. of Pennsylvania, Vol.X
 McDermott, P. N., Taam, R. E. & Ringwald, F. A. 1988, ApJ, 328, 617
 Paczynski, B. 1971, Ann. Rev. Astr. Ap., 9, 183
 Petit, M. 1987, *Variable Stars* (John Wiley & Sons: N.Y.)
 Smith, R. C. 1983, The Observatory, 103, 29
 Svechnikov, M. A. & Kuznetsova, E. F. 1990, *Catalogue of Approximate Photometric and Absolute Elements of Eclipsing Variable Stars*, Vol.I & II (Ural State U. Press: USSR)
 Terrell, D., Mukherjee, J. & Wilson, R.E. 1992, *Binary Stars-A Pictorial Atlas* (Krieger Publ. Co.: FL)
 Trimble, V. 1984, Ap&SS, 104, 133
 Tsesevich, V. P. 1973, *Eclipsing Variable Stars* (John Wiley & Sons: N.Y.)
 Van den Heuvel, E. P. J. 1976, IAU Symp. No.73, 35