

채층 활동이 강한 별들의 분광선 SPECTRA OF CHROMOSPHERICALLY ACTIVE STARS

강영운¹, 김호일², 이우백², 오규동³

¹세종대 학교 지구과학과, ²한국천문연구원, ³전남대학교 지구과학교육과
YOUNG WOON KANG¹, HOIL KIM², WOO BAIK LEE² AND KYU DONG OH³

¹Dept. of Earth Sciences, Sejong University: kangyw@sejong.ac.kr

²Korea Astronomy Observatory

³Dept. of Earth Science, Chonnam National University

Received Jul. 15, 2000; Accepted Aug. 8, 2000

ABSTRACT

We have reviewed the magnetic activity in close binaries. Solar like magnetic activity indicators such as photometric spots, chromospheric emission, coronal X-ray and radio emission, and flare activity are commonplace in many cool stars with convective envelopes. Using the UV spectra we confirmed the strength of stellar activity increases with more rapid rotation and later spectral types which corresponds to the increasing depth of the star's convective envelope. Apart from very young stellar objects such as T Tauri stars, the stars with the highest levels of activity are close binary systems composed of cool stars, i.e., the chromospherically active binaries such as RS CVn, BY Dra, W UMa and related systems. The IUE low and high dispersion spectra of V711 Tau, VW Cep and SW Lac are used for ultraviolet photometry and for a variation study of chromospheric activity. Evidence of chromospheric activity is indicated by the intensity variation of the Mg II emission line with orbital phase.

Keywords: stars: chromospherically active stars: close binaries

1. 서론

태양의 분광형은 G2이므로 분광형이 만기형인 별에서는 태양과 비슷한 현상이 자주 일어나곤 한다. 그러므로 분광형이 만기형인 별들의 표면에서 일어나는 현상들을 태양과 같은 자기활동 (Solar-like magnetic activity)이라고 한다. 자기활동으로 별의 표면 즉 광구에는 흑점이 나타나고, 광구 윗층에는 채층이 형성되고, 채층 위에는 코로나가 광범위하게 뻗어있다. 이러한 일련의 활동을 간편히 채층활동이라고 칭하기도 한다. 채층활동은 별의 내부층에서 별 표면 쪽에 대류층이 형성되는 별에서 주로 나타나는 현상이다. 태양과 같은 별들은 내부 깊숙한 곳에서는 에너지 전달이 복사로 이루어지고, 별 표면 쪽으로 나오면서 에너지 전달 방식이 대류로 바뀐다. 이와같이 외부에 대류층이 형성되어 있는 별이 빠른 자전을 하면 채층활동이 활발해진다.

Single star인 경우 일반적으로 분광형이 G-M형으로 만기형이면 외부에 대류층이 형성되고, 나이가 어리면 자전 속도가 빠르다. 그 대표적인 예로 T Tauri 형 별들이 있다.

대부분의 single star들은 나이가 젊을 때는 강한 자기장으로 채층활동이 활발하지만 나이가 들면서 자전 속도가 느려지게 되고, 결국에는 자기장의 활동도 약해지고 소멸된다. 태양은 이미 자기장의 활동이 약해진 상태이며, single star들이 거성으로 진화하면 이미 나이가 많기 때문에 강한 자기장의 활동을 기대하기 어렵다.

근접 쌍성의 구성원들은 서로가 조석력으로 강하게 묶여 있어서 나이와 관계없이 별의 자전은 상대적으로 매우 빠르다. 일반적으로 태양같은 별은 자전 주기가 약 1달이 되지만 근접 쌍성인 경우 공전 주기가 수 시간에서 수 일 정도이다. 대부분의 근접 쌍성은 공전 주기와 자전 주기가 같은 동주기 자전을 하므로, 자전 속도가 single star보다 매우 빠르다. 그러므로 대류층이 형성되어 있는 근접쌍성에서는 강한 자기장 활동이 유발되어 채층 활동이 활발하다. 그 결과 별 표면에는 흑점이 형성되고, 가시광선 영역의 광도 곡선은 비대칭을 이루거나 식 바깥부근에서 물결 모양의 광도 곡선을 형성한다. 근접 쌍성들이 single star와 다른 점은 공전과 함께 자전하는 동주기 자전이 대부분이므로

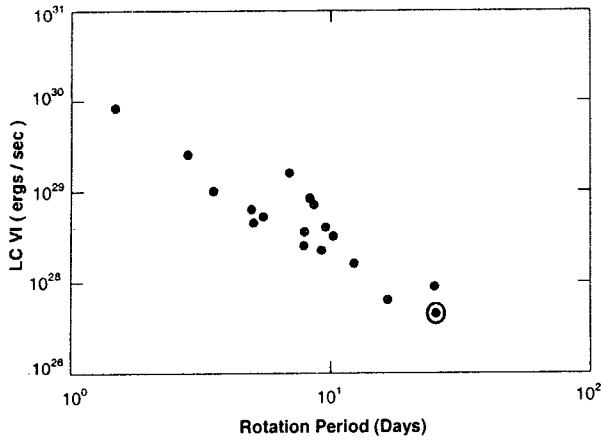


그림 1.—별들의 자전속도와 C IV 방출선의 세기. 자전속도가 알려진 single star 중에서 분광형이 GO-G8사이의 별들에 대하여 C IV 방출선의 세기를 측정된 결과 자전속도가 느릴수록 방출선의 세기도 감소하였다. 오른쪽 하단의 점이 태양이다. 태양은 이미 자전속도가 느려져서 방출선의 세기가 약하다.

로 시간이 흐름에도 불구하고 빠른 자전 속도를 유지하여 자기장의 활동이 오랜 세월동안 유지되는 것이다.

채층 활동이 활발한 별들에서는 관측적으로 가시광선 영역에서 Ca II H+K, 혹은 H α 방출선이 강하게 나타나고, 특히 천문 인공위성이 등장함에 따라 자외선 영역의 관측이 수행되면서 Mg II h+k, C IV 방출선들이 강하게 나타난다는 사실이 밝혀졌다. 그러므로 이 방출선들은 채층 활동을 조사하는 좋은 지침으로 사용되고 있다.

이 논문에서는 single star의 자전속도 및 나이와 방출선의 세기의 상관관계를 관측적으로 알아보고, 근접쌍성의 자기활동을 RS CVn형, Algol형, W UMA형 등으로 구분하여 조사하고, 사례연구로 V711 Tau, VW Cep, SW Lac를 선정하여 이들 쌍성계의 IUE 스펙트럼에 나타난 연속선과 방출선을 집중 조사하여 가시광선 영역의 광도변화와 비교하여 채층활동을 설명하였다. 특히 V711 Tau와 SW Lac에 대해서는 공전궤도 위상과 방출선 세기의 상관관계를 보였다.

2. Single star의 자기활동

Single star가 자기장이 강한 활동을 하려면 빠른 자전과 만기형의 분광형이 필수적이다. 그러나 빠른 자전은 아래의 관계식과 같이 시간이 흐름에 따라 느려지게 되고, 결국에는 자기장의 활동도 약해지고 소멸된다.

$$V_{rot} = 1/P_{rot} \propto 1/\sqrt{time} \quad (1)$$

single star 인 경우 거성으로 진화한 별은 이미 나이가 많기 때문에 강한 자기장의 활동을 기대하기 어렵다. 이와

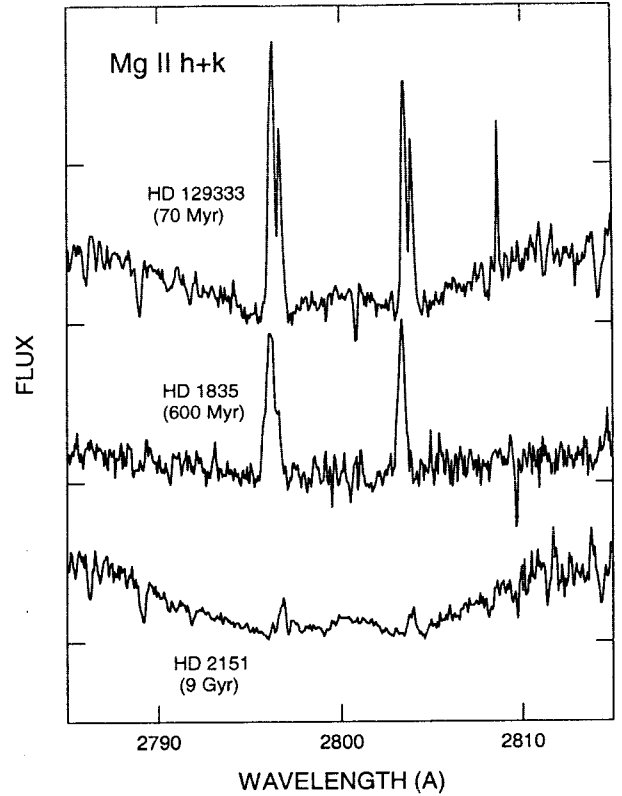


그림 2.—나이가 서로 다른 3개 별에 대한 Mg II h+k 방출선. IUE spectra에서 얻은 Mg II 방출선은 나이가 많을수록 약해진다. 이는 자전이 느려져서 채층 활동이 약해지는 것을 의미한다.

같은 사실을 관측적으로 증명하기 위해서는 별의 자기장을 측정하여야 하는데 별의 자기장을 측정하는 것은 극히 제한된 천체 외에는 매우 어려운 일이다. 다행히도 1980년대 이후 자외선 관측이 축적됨에 따라 자기활동의 뚜렷한 indicator로 Mg II, C IV 방출선등을 사용하게 되었다. 그림 1은 별의 자전과 방출선의 상관관계를 나타낸 그림이다. 자전주기가 알려진 별에 대하여 C IV 방출선의 세기를 조사하여 자전주기와 방출선의 세기에 대한 상관관계를 조사하였다. 조사 대상이 된 별들의 분광형은 G0 - G8 영역에 있는 별들이다. 그림 1에서 보듯이 같이 자전주기가 증가함에 따라 방출선의 세기는 감소하는 상관관계가 매우 뚜렷하게 나타났다.

그림 2에서는 나이가 알려진 대표적인 3개의 별을 선택하여 나이와 채층활동의 지표인 Mg II h+k 방출선의 세기를 비교하였다. 나이가 7000만년 밖에 안되는 HD 129333은 방출선이 매우 강하게 나온 반면에 나이가 수십억년 이상된 별은 방출선이 매우 약하게 나타난다. 이는 시간이 흐름에 따라서 자전 속도가 느려지고 나아가서 자기활동 및 채층활동이 약해지기 때문이다.

3. 근접쌍성의 자기활동

Struve (1950)가 특정 쌍성계에서 Ca II H+K 방출선이 강하게 나타남을 보고함에 따라 쌍성계에서도 태양과 같은 특성이 존재한다고 알려지기 시작했다. 그후 Ca II H+K 흡수선이 강하게 나타나는 쌍성이 축적됨에 따라 소위 RS CVn형이라는 그룹이 형성되었고 그 별들의 특성을 태양의 자기장 현상을 이용하여 설명한 연구자는 Hall (1976)이며, 그는 RS CVn 형별들의 특성을 요약하여 발표하였다.

한편 대부분의 근접쌍성들은 빠른 자전을 하기 때문에 근접쌍성계의 한별 혹은 두별 모두가 별의 외부에 대류층이 형성되어 있으면 자기장 활동이 활발해지고, 이것은 활발한 채층 활동으로 연결된다. 그러므로 근접쌍성 중에는 채층 활동이 활발한 별이 상당수 있다. 채층보다 더 바깥쪽에는 coronal heating 현상이 나타나며, 코로나의 온도는 2-30 Mk 사이가 된다. 이 높은 온도에서 X-선이 발생되는데 이와같이 만기형 별에서 방출되는 것을 소위 soft X-선이라고 한다. Soft X-선의 광도는 $L_x = 10^2 - 10^4 L_{x\odot}$ 로 태양에 비하여 매우 강하다. 이러한 별들의 표면에는 흑점이 형성되며, 흑점은 온도가 주위보다 낮고 어둡게 보이며, 광도 곡선이 뒤틀리는 모양으로 나타난다.

근접쌍성중에서 채층활동이 강할 것이라고 예상되는 별의 특성은 표 1에 요약하였고 각 그룹의 특성은 다음과 같다. (1) W UMa형은 두 별이 서로 붙은 접촉 쌍성이다. 공전 주기가 0.7일 미만으로 매우 빠른 자전이 특징이며, 분광형은 F-K 사이인 왜성들이다. 이들이 발생하는 X-선은 $L_x \approx 10^{29} - 10^{30}$ ergs/sec 가 된다. (2) 알골형 별은 반분리형 쌍성으로 한 별이 먼저 진화하여 roche lobe를 채우고 있는 상태이며, 질량 이동이 예상되는 계이다. 다른 한별의 분광형은 G-K형이며 광도 계급은 온도가 낮은 준거성, 혹은 거성이며, 이 종류의 별에서 발생하는 X-선은 $L_x \approx 10^{31}$ ergs/sec 가 된다. (3) RS CVn형 및 BY Dra형 등은 채층 활동이 강한 대표적인 별로써 공전 주기가 1일 이상이며, 분광형이 G-K형이며, RS CVn형은 광도 계급이 준거성 (IV)과 거성 (III)이 대부분이며, BY Dra형은 광도계급이 주계열이다. 이들 별들은 표면에는 흑점을 가지고 있는 분리형 쌍성이다. 이들 RS CVn형 별들은 $L_x = 10^{29} - 10^{32}$ ergs/sec 의 soft x-선을 방출하고 있다. (4) 격변변광성은 짧은 주기의 변광성으로 백색 왜성에 강착 원반이 형성되어 있고 반성은 분광형이 K-M 형이며, 이들이 발생하는 X-선은 $L_x \approx 10^{32} - 10^{34}$ ergs/sec 가 된다. (5) T Tauri형 별은 분광형이 F-K형인 거성 혹은 준거성 크기의 별로 아직 주계열에 도착하지 못한 별이다. 이 별의 주위에는 disk가 형성되어 있으며, 이들이 발생하는 X-선은 $L_x \approx 10^{31} - 10^{32}$ ergs/sec 가 된다. (6) FK Comma형 별은 빠르게 자전하며 매우 강한 자기장을 가졌으며 분광형이 G-K형인 거성들이다. 이별들은 근접 쌍성의 두별이 충돌로 인하여 합성된 별로 추정하고 있다. 이들이 발생하는 X-선은 $L_x \approx 10^{31}$ ergs/sec 가 된다.

4. V711 Tau의 채층활동

V711 Tau는 식쌍성이 아님에도 불구하고 광도가 변하는 분광 쌍성이다. Cousins (1963)가 V711 Tau의 광도변화를 발견한 이후 Landis & Hall (1976)이 준 사인형의 광도곡선을 관측함으로써 그 변화가 확인되었고, Nha & Oh (1986)와 그 밖에 여러 관측자들의 지속적인 관측 보고로 V711 Tau는 대표적인 RS CVn형 별로 널리 알려졌다. V711 Tau의 광도곡선은 매 관측 계절마다 다른 형태로 나타나므로, 광도곡선이 변하는 원인으로 별 표면에 있을 것으로 추정되는 흑점의 변화를 생각할 수 있다. Kang & Wilson (1989)은 1963년과 1981년 사이의 광도곡선을 수집하여 흑점모델을 개발하여 흑점인자가 포함되는 약 20년간의 광도곡선에 나타난 흑점들의 인자를 분석한 결과 흑점의 이동 주기를 7.6년으로 계산하였다. 그밖에 V711 Tau에 대한 연구 역사는 Kang & Wilson (1989)이 자세하게 서술하였다.

V711 Tau의 광도변화가 흑점의 영향이라면 분광학적으로 이 별의 채층활동을 점검하고 나아가서는 공전궤도 위상에 따른 광도변화와 분광학적으로 나타나는 방출선의 변화가 서로 상관관계가 있는지를 확인하는 것은 매우 흥미로운 일이다. 이러한 상관관계를 조사하기 위해서는 가시광선영역의 측광관측과 자외선 영역의 분광관측이 동시에 수행되는 것이 필수적이다. 그러나 현실적으로 동시관측은 많은 캠페인 관측에도 불구하고 성공율이 매우 낮다. V711 Tau인 경우 밝은 RS CVn형의 대표적인 별이므로 측광관측 및 IUE 관측역사가 매우 깊어서 문헌을 조사한 결과 일부의 관측이 동시에 수행되어 강영운 (1997)은 다음과 같은 간접적인 방법으로 상관관계를 조사하였다.

이 논문에서는 자외선 방출선과 광도곡선이 동시에 관측된 것이 없으므로, 첫째 가시광선 영역에서 관측한 광도곡선의 형태와 자외선 영역의 광도곡선 형태가 동일하게 유지됨을 확인하는 작업을 수행하였다. 즉, IUE 관측에서 저분산 관측은 노출시간이 고분산에 비하여 매우 짧으므로 관측 횟수가 상대적으로 훨씬 많다. 다행히도 가시광선 관측과 IUE 저분산 관측이 동일한 시기에 이루어진 관측을 찾아 두과장 영역의 광도곡선의 형태가 동일하다는 것을 확인하였다. 둘째 IUE 고분산 관측에서 방출선과 자외선 광도곡선을 동시에 얻어 방출선의 세기와 광도의 변화를 분석한 결과 이 상관 관계를 가시광선 영역의 광도곡선과의 상관관계로 유추하는 식으로 채층활동을 설명하려 한다.

자외선 영역의 광도곡선을 완성하기 위하여 IUE 천문대의 Merged Log를 조사한 결과 파장 영역이 약 2000-3000 Å인 LWP 카메라로 135개 스펙트럼이 (저분산 23개, 고분산 112개), 파장 영역이 1000-2000 Å인 SWP 카메라로 100개 스펙트럼이 (저분산 84개, 고분산 16개) 관측되었다. 가능하면 가시광선 영역의 관측이 이루어진 시기와 동일한 시기에 관측된 IUE 스펙트럼을 찾기위하여 관측

표 1. 채층활동이 강한 쌍성의 활동특징.

| 특징 | BY Dra Binaries | RS CVn Binaries | Algols | W UMa Systems | CV Binaries | Sun |
|--|---|---|--|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| 분광형 (주성/반성) | dG-dM dK-dM | G-K IV-III G-K V-IV | B5-F2 V G-K IV-III | F-K V F-K V | WD+disk dMe | G2 V |
| 쌍성구분 | detached | detached | semi-detached | contact | semi-detached | |
| 공전주기 | 0.5-15 ^d | 1-20 ^d | 1-20 ^d | 0.22-0.8 ^d | 0.06-0.4 ^d | |
| 동주기자전 | P<3 ^d =yes P>3 ^d =no | p<20 ^d =yes P>20 ^d =no | yes | yes | yes | P=25.6 ^d |
| 흑점 점유율 | 5-20 | 5-30 | 5-10 | 5-15 | ? | <0.2% |
| Temp diff.(K) | 300-1000 | 500-1200 | 500-800 | 500-1000 | ? | 1400 |
| F_{MgII} (erg/cm ² /sec) | 10 ⁶ -10 ⁷ | 2-10x10 ⁶ | 채층 ~10 ⁷ | 5-10x10 ⁶ | ? | 2-4x10 ⁶ |
| FCIV (erg/cm ² /sec) | 1-5x10 ⁶ | 10 ⁵ -10 ⁶ | Transition Region 1-2x10 ⁶ 10 ⁶ | | ? | 0.7-1x10 ⁴ |
| F(erg/cm ² /sec) | 10 ⁶ | 10 ⁶ -10 ⁷ | 코로나 10 ⁶ -10 ⁷ 10 ⁷ | | ? | 0.9-4x10 ⁴ |
| Lx(erg/sec) | 10 ²⁸ -10 ³⁰ | 10 ²⁹ -10 ³¹ | 10 ³⁰ -10 ³¹ | 10 ²⁹ -10 ³⁰ | 10 ³¹ -10 ³² | 10 ²⁷ |
| T ₁ (K) | 10 ⁶ -10 ⁷ | 3-7x10 ⁶ | 3-7x10 ⁶ | 10 ⁶ -10 ⁷ | - | 1-2x10 ⁶ |
| T ₂ (K) | ? | 15-50x10 ⁶ | 15-50x10 ⁶ | 2-5x10 ⁷ | - | |

시기를 조사한 결과 가시광선 영역에서 수행된 Mekkaden (1987)의 관측과 자외선 영역에서 1986년에 관측된 IUE 저분산 스펙트럼이 우연히도 V711 Tau를 같은 계절에 동시 관측되었음을 발견하였다. 그러므로 IUE 저분산 스펙트럼을 이용하여 광도곡선을 다음과 같이 완성하였다. IUE 스펙트럼은 엄밀히 말해서 spectrophotometry로써 지구 대기권 밖에서 관측한 것이므로 플럭스의 값을 절대값으로 환산하는 것이 용이하다. 그러므로 1986년에 관측된 23개의 저분산 스펙트럼을 NASA/GSFC의 IUE 천문대가 제공하는 RDAF (Regional Data Analysis Facility) 소프트웨어를 사용하여 각 파장별 플럭스의 값을 절대 단위 (erg/cm² sec Å)로 환산하였다. 처리된 자료를 100 Å간격으로 적분하여 IUE에서 제공한 절대 플럭스와 등급간의 상수를 이용하여 등급계로 환산하였고, Bopp & Fekel (1976)이 발표한 광도요소를 이용하여 광도곡선을 완성하였다.

위에서 언급된 자료처리 과정을 통해서 2000 - 3000 Å사이에서 각 100 Å 범위의 파장에서 자외선 광도곡선을 완성하여 총 10개의 광도곡선을 완성하였다. 한편 그림 3 상단에는 그 중 흡수선과 방출선등의 영향을 가장 적게 받아서 광도의 변화가 비교적 잘 나타난 중심파장이 3000 Å인 광도 곡선만을 나타내었다. 비록 자외선 광도곡선을 완성하는데 관측점이 충분하지 않아서 정확한 극심값을 결정하기에는 무리가 있지만 관측점들을 잘 만족시키는 임의의

곡선 (method of free hand curve)으로 연결해 보면 위상 0.^p1에서 최대 밝기가 나타나고 위상 0.^p5에서 최소 밝기가 나타난다. 광도곡선의 진폭은 0.^m13으로 나타난다.

가시광선 영역의 광도곡선으로는 Mekkaden (1987)이 1986년에 Stromgren y 필터를 이용하여 ESO 50 cm 반사 망원경으로 V711 Tau를 관측하여 완성한 광도곡선을 선정하여 그림 3 하단에 그렸다. Mekkaden의 광도곡선에서도 최대 밝기와 최소 밝기가 각각 공전궤도 위상 0.^p1과 0.^p5부근에서 나타나고, 진폭은 0.^m12로 나타난다. 이는 자외선 광도곡선의 결과와 잘 일치하는 것이다.

광도곡선상에 나타나는 V711 Tau의 광도변화 요인을 별 표면의 흑점모델을 사용하여 Kang & Wilson (1989), Dorren et al. (1981) 등이 설명하였고, 가시광선영역에서 관측된 광도곡선과 비교하여 흑점인자를 포함하는 해를 구하였다. 그러나 이들이 사용한 자료는 가시광선 영역의 자료만 사용하였다. 흑점활동의 원인을 제공해 주는 자기장의 활동은 자외선 영역에서 확인하는 것이 보다 직접적인 방법이므로 자외선 영역에서 관측된 자료를 분석하여 광도변화를 설명하는 일은 흑점활동을 확인하는 직접적인 방법이다. 분광형이 만기형별에서 자기장의 불균형으로 나타나는 현상은 채층활동이다. 채층활동은 온도가 10⁴K - 10⁵K인 범위에서 나타나기 때문에 IUE 파장 영역 (1000 - 3000 Å)에서 나타나는 방출선으로 채층활동의 유무 및 활동의 강도를 유추할 수 있다. V711 Tau에 대

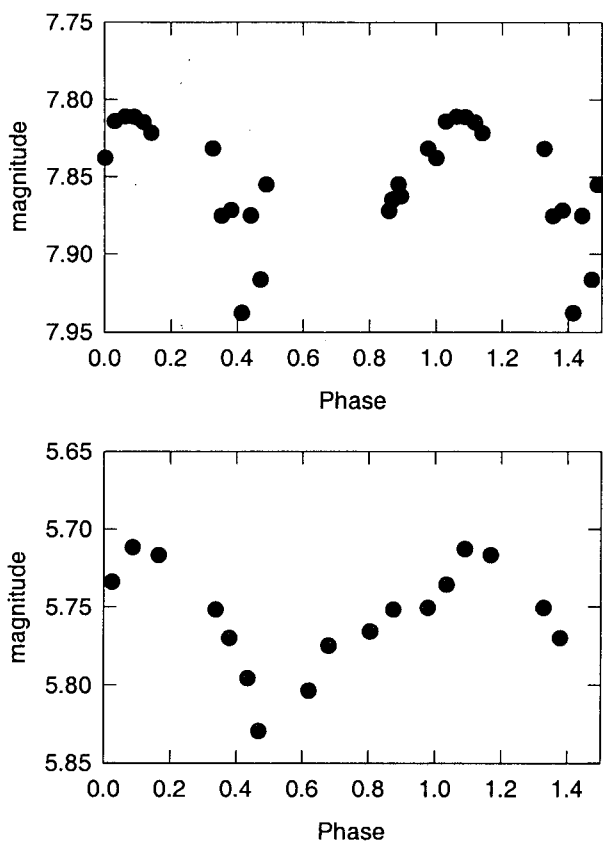


그림 3.—V711 Tau에 대한 자외선 및 가시광선의 광도곡선. 중심파장이 3000Å인 V711 Tau의 자외선 광도곡선 (위)은 Stromgren y 필터로 관측한 V711 가시광선 광도곡선 (아래)과 같은 형태를 나타내고 있다. 이는 광도의 변화에 영향을 주는 흑점이 자외선 영역에서도 광도의 변화를 주기 때문이다.

한 IUE Archive spectra를 조사한 결과 주로 긴 파장 영역에서 (2000 - 3000 Å) 관측이 많이 수행되었다. 채층활동의 지침으로 널리 알려진 방출선 중에서 IUE 긴 파장영역에서 나타나는 대표적인 방출선은 Mg II 방출선이므로 1984년 관측된 고분산 스펙트럼을 분석의 대상으로 선정하였다. 선정된 스펙트럼은 한 계절동안에 연속적으로 관측된 것이므로 공전궤도 위상에 따른 변화를 조사하는데 매우 적합한 자료이다.

Mg II 방출선의 세기와 광도변화를 비교하기 위하여 IUE 고분산 스펙트럼의 관측이 이루어진 시기와 동일한 시기에 이루어진 광학 관측을 수집하여 비교분석하는 것이 이상적이나, 불행하게도 자외선 영역의 고분산 스펙트럼과 동일한 시기에 가시광선 영역의 관측이 이루어지지 않았다. 이 논문에서는 차선책으로 방출선 부근의 연속선의 밝기를 적분하여 자외선 영역의 광도곡선을 완성하여 Mg II 방출선의 세기와 비교하였다.

자외선 영역의 광도곡선을 구하기 위하여 1984년에 관

표 2. V711 Tau의 위상에 따른 Mg II k 방출선의 상대적인 플럭스.

| IUE Image | 위상 | f_{mg}/f_{cont} |
|-----------|--------|-------------------|
| LWP5002 | 0.0001 | 31.96 |
| LWP5003 | 0.0182 | 37.31 |
| LWP4969 | 0.0220 | 27.11 |
| LWP4970 | 0.0457 | 30.78 |
| LWP4979 | 0.3841 | 34.87 |
| LWP4980 | 0.4026 | 31.53 |
| LWP4981 | 0.4201 | 32.41 |
| LWP4982 | 0.4390 | 32.19 |
| LWP4984 | 0.5698 | 31.57 |
| LWP4985 | 0.6063 | 25.89 |
| LWP4986 | 0.6274 | 25.37 |
| LWP4987 | 0.6489 | 26.73 |
| LWP4988 | 0.6729 | 24.22 |
| LWP4991 | 0.7627 | 25.32 |
| LWP4992 | 0.7771 | 22.79 |
| LWP4993 | 0.7938 | 28.96 |
| LWP4999 | 0.9346 | 27.10 |
| LWP5000 | 0.9561 | 28.42 |
| LWP5001 | 0.9776 | 27.50 |
| LWP4968 | 0.9982 | 27.82 |

측된 IUE 고분산 스펙트럼에서 채층활동의 지표로 잘 알려진 Mg II h & k 방출선과 방출선 부근의 연속선을 분석하였다. Mg II 방출선은 실험실에서 측정된 중심파장이 2796.0 Å와 2803.2 Å이므로 1984년에 관측된 20개의 고분산 스펙트럼에서 2790 Å과 2810 Å사이의 파장 영역에 대하여 저분산 스펙트럼과 같은 방법으로 자료를 처리하였다. 20개의 스펙트럼을 방출선이 나타나는 전후의 연속선에서 4 Å간격으로 적분하여 등급으로 환산하였다. 우리가 사용하는 IUE 관측 자료는 고분산이기 때문에 1 Å간격안에 약 50여개의 관측점이 포함된다. 연속선의 밝기를 구하기 위하여 1 Å간격으로 적분하여 완성한 광도곡선과 4 Å간격으로 적분하여 구한 광도곡선을 비교하였으나 오차의 범위 안에서 일치하였다. 이는 연속선의 밝기로 광도곡선을 구하는데 무리가 없다는 뜻이다.

8개의 광도곡선이 완성된 것중에서 비교적 표준편차가 적은 광도곡선 2개를 선정하여 비교하고 그 중 중심파장이 2790.5 Å (1 Å 간격)인 광도곡선을 그림 4 상단에 나타내었다. 이 광도곡선은 위상 0.^p40와 0.^p78에서 각각 최소 밝기와 최대 밝기를 나타내고, 진폭은 약 0.^m2 등급으로 측정되었다.

광도곡선을 완성하는데 사용한 20개의 고분산 스펙트

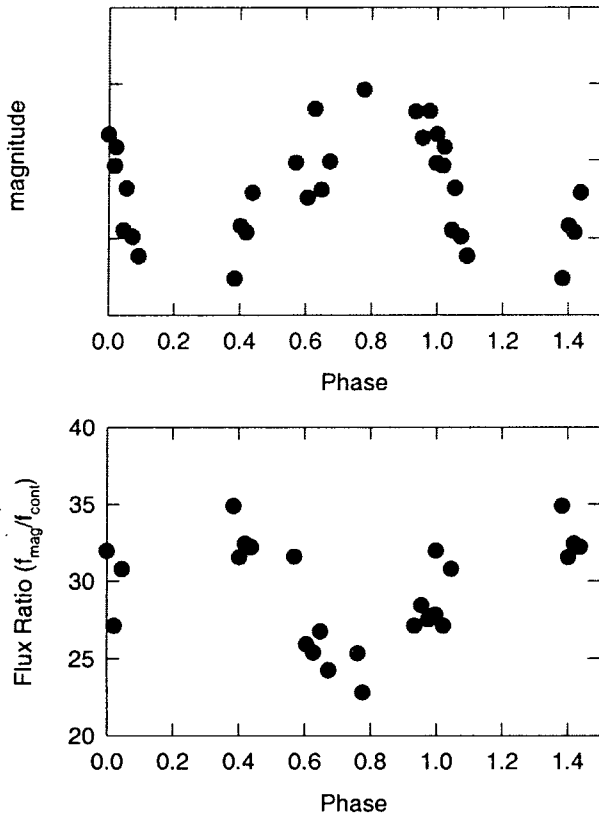


그림 4.—V711 Tau에 대한 자외선 광도곡선과 Mg II k 방출선의 세기. 중심파장이 2790.5 Å인 V711 Tau의 1984년 광도곡선 (위)은 위상이 0.8 부근에서 최대 밝기를 나타내고 있는 반면에 Mg II k 방출선의 세기 (아래)는 최소 값을 나타낸다. 이는 흑점이 없는 위상이거나 최소인 위상이다 그러므로 방출선의 세기는 최소로 나타난다. 반대로 위상이 0.3부근에서는 흑점활동이 강하므로 방출선의 세기는 최대로 나타난다.

럼에서 Mg II의 k 방출선의 세기를 측정하기 위하여, 방출선의 최대 플럭스와 연속선의 평균 플럭스의 비, 즉 f_{mg}/f_{cont} 를 구하여 방출선의 세기를 표 1에 수록하였다. 방출선의 세기가 공전궤도 위상과의 상관 관계를 알아보기 위하여 f_{mg}/f_{cont} 를 공전궤도 위상에 대하여 그림 4 하단에 그렸다. Mg II k 방출선의 세기는 위상 0.37과 0.78 부근에서 각각 최대값과 최소값이 나타났다. 방출선의 세기는 밝기와는 반대로 나타난 것이다. 즉 방출선의 세기가 최대가 되는 위상에서는 밝기가 어둡게 나타나고, 방출선의 세기가 최소가 되는 위상에서는 밝기가 최대로 나타났다.

V711 Tau는 분광 쌍성임이 밝혀진 이후 대부분의 관측은 가시광선 영역에서 이루어졌고, 전파 대폭발이 보고되면서 전파와 자외선 영역에서 관측이 수행되었다. 특히 자외선 영역의 관측이 활발해짐에 따라 V711 Tau에서 나오는 플레어에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. Rodono et

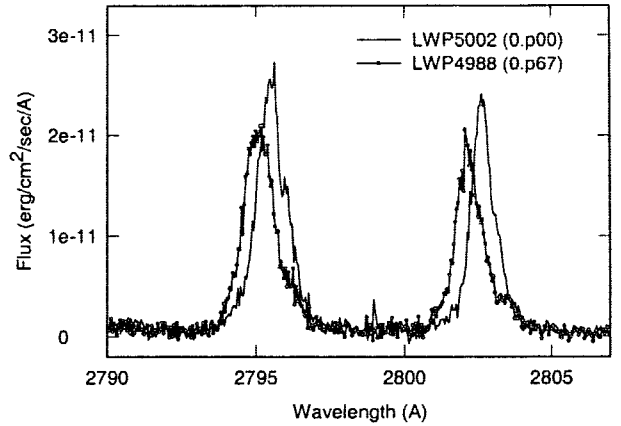


그림 5.—V711 Tau의 Mg II 고분산 방출선. 위상이 0.0부근에서는 강한 채층활동으로 방출선의 세기가 강하고 위상이 0.67부근에서는 방출선의 세기가 약하다.

al. (1987)은 채층과 transition 영역에서 나오는 방출선과 광구 표면에 위치한 저온의 흑점과의 상관 관계를 시도하였으나 명확한 관계를 유추하는데는 실패하였다. Andrew et al. (1988)는 Mg II k 방출선과 transition 영역의 방출선의 세기를 측정한 결과 이 영역의 모든 방출선들은 위상이 0.23과 0.75에서 증가하는 것을 발견하였다. 그밖에 Simon & Linsky (1980), Linsky et al. (1989) 등의 논문을 종합하여 분석하면, 채층활동이 활발한 시기와 활발하지 못한 시기로 구분되며, 이 시기에 따라서 방출선들의 세기는 증가하고 감소하였다. 이는 채층활동의 장주기 변화라고 할 수 있다. 계절에 따라서 채층활동이 심한 계절도 있고 상대적으로 활동이 없는 시기도 (quiescent period) 관측되었다.

그러나 광도 변화와 관련된 방출선의 세기 변화는 몇 논문에서 시도되었으나 명확한 관계를 발견하지 못하였다. 단지 Jeong et al. (1994)은 W UMa형인 SW Lac에서 방출선의 세기와 광도 변화에 대한 상관 관계를 유추하였다. 이 논문을 수행하는 과정에서도 상관 관계를 찾는데 여러 번의 시행착오를 반복하였다. 즉 V711 Tau는 매 계절 광도곡선이 변화하고, 심지어는 같은 계절에서도 관측 계절 초기와 말기에도 서로 다른 형태의 광도곡선을 보이고 있기 때문이다. 그러므로 같은 시기에 관측된 방출선과 광도곡선이 있어야만 상관관계를 정확히 유추할 수 있다. 특히 IUE 관측은 calibration의 문제가 있어서 flux를 절대값으로 환산하여도 관측 시기가 서로 다른 스펙트럼을 비교하는데는 세심한 주위가 필요하다.

그림 4에 나타난 결과는 방출선의 세기가 강하게 나타나는 위상 0.4 부근에서는 광도가 최소로 나타나고, 방출선의 세기가 약하게 나타나는 위상 0.8 부근에서는 광도가 최대로 나타났다. 이는 채층활동과 흑점관계를 잘 설명해 주는 것이다. 자기장의 활동이 강하게 나타나는 위상에

서는 채층활동이 강하고, 광학적으로는 흑점이 크게 나타나서 광도는 어두워져서 최소가 된다. 흑점모델을 적용하여 흑점인자를 구해본 결과 흑점의 크기는 반경이 30° 이상이며, 온도는 주위 온도에 0.7배 정도로 낮았다. 이는 두 별중 한 별에만 흑점이 있다는 가정아래 구한 흑점 인자이므로 다소 큰 규모의 흑점으로 산출되었다. 또한 자기장의 활동이 약한 위상에서는 채층활동과 흑점활동도 약해서 광도는 상대적으로 밝아진다. 그림 5에서는 밝기가 최대 및 최소로 나타나는 위상의 고분산 방출선을 예로 제시하였다. 연속선은 거의 일치됨에도 불구하고 방출선의 세기는 상당한 차이를 보이고있다. 또한 방출선의 파장이 변이된 것은 두 별이 서로 공전하기 때문에 나타난 현상이다.

5. 접촉형 쌍성의 자기활동

W UMa형 접촉쌍성의 성분 별들은 분광형이 F-K형이며 주계열에 속하므로 태양과 비슷한 특성을 가지고 있는 반면에 자전 속도는 태양과 비교가 되지 않을 정도로 빠르다. 이들의 공전 주기는 $0.2d < P < 0.8d$ 이면서 강한 조석력으로 동주기 자전을 하므로 자전 속도가 약 26일인 태양과는 비교할 수 없을 정도로인 $80 \sim 160\text{km/s}$ 의 자전 속도를 타낸다. 그러므로 W UMa형 접촉쌍성은 태양과 같은 별의 자기 활동에 대한 한계값을 제공할 수 있다.

Struve (1950)가 W UMa 계에서 Ca II H+K 방출선이 강하게 나타남을 보고함에 따라 W UMa계에서도 태양과 같은 특성이 존재한다고 알려지기 시작했다. 그 후 W UMa 계의 광도 곡선이 비대칭으로 나타나는 것을 흑점의 영향으로 설명하였다. W UMa 계가 RS CVn형의 특성과 태양과 같은 별의 자기장 현상 때문에 Hall (1976)은 W UMa 계를 주기가 짧은 ($P < 1\text{day}$) RS CVn 형으로 분류하였다.

태양과 같은 자기 활동이 W UMa 형 별에서 매우 강하게 나타나는 것은 IUE, Einstein, ROSAT 등의 인공위성을 이용한 자외선과 X-선 관측에서 알수 있다. 특히 IUE관측으로 UV영역의 방출선이 강하게 나타남을 여러 별에 대하여 확인하였다. 이들 방출선은 10^5K 의 높은 온도에서 나오는 Flux로 형성되는 방출선으로 C IV (1550\AA), NV (1240\AA), Si IV (1400\AA), He II (1640\AA) 등이 있으며, 또한 10^4K 의 온도에서 형성되는 방출선으로 Mg II h+k (2800\AA) 등이 있다. 한편 W UMa 계는 강한 X-선원으로 알려졌으며, X-선 영역의 광도는 $L_x \approx 10^{29} \sim 10^{30}\text{erg/sec}$ 이다. 이 강한 X-선 광도는 소위 soft X-선 파장 영역에서 방출하는 것이며, 강도와 에너지 분포가 RS CVn형이나 알골형 혹은 매우 젊은 별에서 관측되는 것과 매우 유사하다.

이러한 X-선 방출현상은 확장된 코로나의 높은 온도 때문인 것으로 믿어진다. W UMa 형 별들의 자외선과 X-선 영역의 특징은 Eaton (1983); Rucinski and Vilhu (1983); Cruddace and Dupree (1984); Vilhu et al. (1989) 등이

잘 정리하였다. RS CVn형 쌍성에서 관측된 방출선들은 대부분 자기장을 발생시킨 dynamo에서 생성된다. 왜냐하면 이들 별은 적어도 빠른 자전과 대류층이 두껍게 형성되어 있기 때문이다. 그러나 강한 조석력 때문에 W UMa 형계의 성분 별들에서는 차등회전이 일어나기 힘들다. 그런데 이 차등회전은 별이 dynamo 이론에서 매우 중요한 역할을 하는 것이다.

비록 W UMa형 별들에서 태양과 같은 활동이 강하게 나타나고 이들이 모두 주계열에 속하지만, 그 활동의 강도가 자전속도에 정비례하여 강해지는 것은 아니다. W UMa 형보다 자전 속도가 느린 RS CVn, BY Dra 혹은 Young Single star 와 비슷한 수준의 활동이 나타난다. 자전속도가 증가해도 더 이상 활동이 증가하지 않는 이유는 Vilhu (1984, 1987), Vilhu and Walter (1987) 등이 Saturation effect로 설명하였다. 이 효과는 별의 전 표면이 완전히 자기 구조로 덮였다는 것이다.

Binnendijk (1965)과 Kwee (1966)가 지적했듯이 W UMa 형 별들의 광도 곡선들은 흔히 비대칭을 보이며 최대 밝기, 식의 깊이 등이 시간에 따라 변화하는 것으로 나타난다. 이들 변화는 RS CVn 형과 BY Dra 형에서 관측되는 것과 비슷하다 그러나 이 변화를 연구하는데는 보다 어려움이 있다. 왜냐하면, 식 현상이나 별의 형태가 찌그러진 것 때문에 일어나는 광도 변화가 채층활동에 의한 광도변화 보다 훨씬 더 크기 때문이다. 광도 곡선의 비대칭과 형태가 변화하는 것을 설명하기에 가장 좋은 것은 흑점출현이다. W UMa 형에 대한 흑점 모델 작업은 여러 사람에게 의해서 수행되었다 (Yamasaki 1982, Brastreet 1985, Guinan 1990, Joeng et al. 1994). 흑점은 일반적으로 크기가 크고, 온도가 낮은 성분 별에 나타난다. 흑점의 크기는 우리에게 보이는 별의 표면의 5~15% 를 차지하며 온도는 표면 온도보다 $500 \sim 800\text{K}$ 정도 낮다.

Rucinski (1993)가 지적했듯이 W UMa형에서 나오는 전파 방출은 RS CVn과 Algol 등에서 나오는 것보다 현저히 약한 것으로 나타났다. 비록 W UMa에 대한 전파 관측 자료가 아직은 불충분하지만 전파 영역에서 광도 비율 즉, 전 파장 영역의 광도에 대한 전파 영역의 광도 비율은 $L_{\text{radio}}/L_{\text{bol}} \approx 10^{-12} \text{ to } 10^{-11}$ 이다. 한편 RS CVn 이나 알골형 등의 비율은 $L_{\text{radio}}/L_{\text{bol}} \approx 10^{-8} \text{ to } 10^{-7}$ (Drake et al. 1986, Rucinski and Seaguiet 1988, Vilhu et al. 1989)이다. 현재는 자료 축적이 불충분한 상태이므로 W UMa형에서 나오는 전파 방출이 상대적으로 약하다는 것을 설명할 시기는 아니다.

6. VW Cep와 SW Lac의 채층활동

VW Cep 는 두 성분 별의 분광형이 G5V와 G8V이며 공전 주기가 0.27일인 접촉 쌍성이다. VW Cep의 광도곡선은 비대칭으로 나타나며 형태도 시간에 따라 변화하는 것으로 보아 크기가 크고 온도가 낮은 별에 흑점이 있을 것으로 추

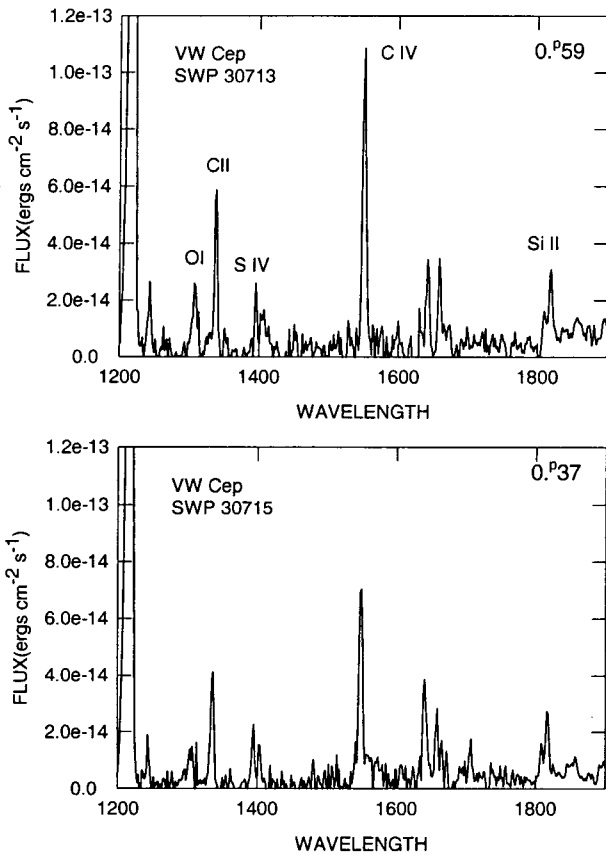


그림 6.—VW Cep의 IUE 저분산 스펙트럼. 채층활동이 강한 위상, 즉 흑점이 보이는 위상 (위)에서는 C II, C VI, Si II 등의 방출선이 강하게 나타나고, 채층활동이 약한 위상 (아래)에서는 방출선이 모두 약하게 나타난다.

정하고 있다. 흑점 모델을 적용할 경우 이론적인 광도곡선이 관측과 잘 일치한다. 흑점 모델에 적용한 흑점의 특성은 온도가 표면온도보다 500K 낮고, 크기는 반성의 표면에 약 6~10%를 차지하고 있다. VW Cep에 대한 IUE 관측은 1987, 1988, 1989년 3년 동안 수행되었다. 그림 6에는 저분산 스펙트럼을 공전궤도 위상별로 제시하였다. 위에 있는 그림은 흑점이 모두 보일 때이며 이때 TR 방출선인 C IV와 C II 등이 강하게 나타난다. 아래 두 그림은 흑점이 일부분만 보이는 위상이며 상대적으로 TR 방출선이 약하게 나타났다.

VW Cep에 대한 IUE 관측은 1978년부터 추적되었다. 더욱이 IUE 관측과 같은 시기에 빌라노바 대학에서는 지상에서 측광관측을 지속적으로 수행하여 광도곡선을 추적하였다. 1978년부터 1991년까지 관측된 광도곡선의 형태 및 밝기 변화를 분석하였다. 일반적으로 접촉형 쌍성의 광도곡선은 위상이 0.^p25 (max I)와 0.^p75 (max II)에서 최대 밝기가 각각 나타나는데 이 두 밝기가 동일하지 않게 나타나며 이를 O'Connell 효과라 한다. 비대칭으로 나타나

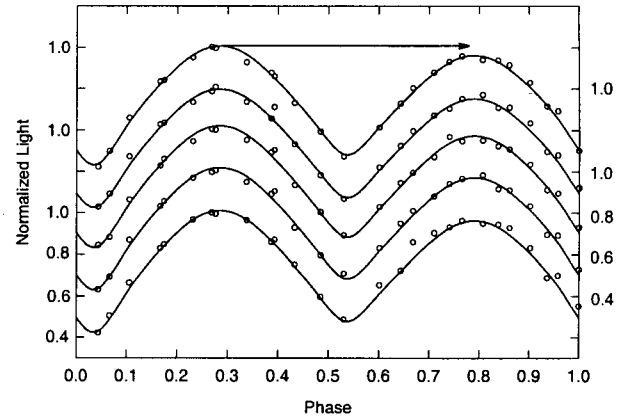


그림 7.—SW Lac의 자외선 광도곡선. 위상이 0.3부근이 0.8부근보다 밝게 나타난다. 이를 O'Connell 효과라고 한다. 이 효과는 W UMa형 쌍성에서 흔히 나타나는 현상이다. 이는 계의 두 별중 만기형인 별에서 강한 채층활동이 유발되어 광구에 흑점이 형성되기 때문이다. 두 지점의 밝기 비교를 위하여 화살표를 그렸다.

는 광도변화는 관측 계절별 혹은 같은 계절에서도 나타나는 것으로 보고되고 있다. VW Cep는 빌라노바의 자동 측광 망원경으로 집중적으로 관측한 결과 1978-1981년에 밝기의 변화는 155일을 주기로 max I 과 max II 밝기가 반전되고 1988-1989년 사이에는 320일을 주기로 (max I - max II)의 밝기가 변화하는 것으로 Guinan & Gimenez (1993)는 분석하였다. 이들의 관측을 통하여 광도곡선의 최대 밝기 max I 과 max II 가 변화하는 것은 분명하나, 변화의 주기를 측정하기에는 더 많은 관측과 보다 높은 관측 정확도가 요구된다.

이러한 변화의 주 요인으로는 흑점이 나타나는 지역의 자전 속도와 공전 궤도 주기 사이에 미소한 차이가 나타나기 때문으로 해석한다. 소위 물결 이동 주기 (wave migration period)는 공전 궤도 주기와 흑점이 존재하는 광구 영역의 자전 속도 사이의 차이의 주기이다. 예를 들어 물결 이동 주기가 320일이면 흑점이 위치한 영역의 별 자전 속도가 별의 동주기 자전보다 약 21초(0.1%) 길다는 뜻이다. 그러므로 반성의 흑점 이동에 따라서 비대칭의 정도가 변하고 max I 과 max II 의 밝기가 반전되기도 한다. 그러나 흔히 흑점 주기라고 하는 Spot Cycle은 VW Cep에 대하여 8-10년으로 추정하고 있다.

SW Lac는 두 성분 별의 분광형이 G3V와 G3V (Wyse 1934)로 알려졌으나, Roman (1956)은 반성을 K0V로 분류하기도 한 접촉형 쌍성이다. SW Lac의 자기 활동과 관련하여 IUE 관측이 2개의 스펙트럼이 IUE 짧은 파장 영역에서, 28개의 스펙트럼이 긴 파장영역에서 1983년 1월 19-20일 사이에 실행되었다. 이들 스펙트럼들은 모두 저분산으로 관측되었지만, 두 공전 주기에 걸쳐 전 위상을 끌고

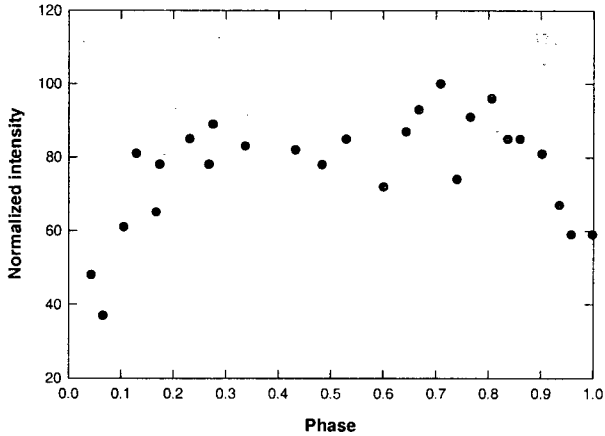


그림 8.—SW Lac의 저분산 스펙트럼에서 얻은 Mg II line의 강도. 공전궤도 위상이 0.8부근에서 방출선의 강도가 높게 나타났다. 이 현상은 그림 7에서 위상이 0.8부근에서 흑점의 출현으로 밝기가 어떻게 나타나는 현상과 잘 일치하는 것이다.

루 관측하였기 때문에 광도 곡선의 변화와 채층활동의 지표로 사용되는 Mg II h+k 방출선의 광도가 어떻게 변화하는가를 조사하기에 충분한 자료라 할 수 있다. SW Lac은 W형 접촉 쌍성으로 동일한 관측 계절에서도 광도 곡선의 형태가 변화하는 것으로 나타났으므로 가시광선 영역의 광도 곡선과 TR 방출선의 상관 관계를 구하기 위해서는 동일 시기에 지상 및 IUE 관측이 동시에 이루어져야 한다는 조건이 있어야 한다. 현실적으로 이 조건을 만족시키는 매우 어려우므로 차선택으로 IUE Spectrophotometry에서 3050Å, 2950Å, 2850Å, 2750Å, 2650Å 을 중심파장으로 각각 100Å의 파장영역에서 광도 곡선을 완성하여 그림 7에 나타내었다.

이들 광도 곡선은 Max I (0.3)이 Max II (0.8) 보다 밝은 것으로 나타났다. 한편, Mg II h+k 방출선의 강도를 위상별로 측정하여 그림 8에 제시하였다. Mg II 방출선의 폭 (FWHM)은 표면 중력이 감소함에 따라 넓어지고, 방출선의 강도 (intensity)는 채층활동의 세기에 따라 변화한다 (Ayres 1980). 그러므로 채층활동의 변화를 조사하기 위하여 IUE 긴파장영역에서 관측되는 Mg II 방출선의 강도를 방출선의 높이를 측정하여 결정하였다. 그 결과 방출선의 강도는 공전주기 위상에 따라서 변화하는 것이 분명하게 나타났으며, 특히 방출선의 강도는 Max II 위상에서 강하게 나타났다. 이는 비록 자외선 광도 곡선이지만 Max I 에서 밝기가 증가하는 것은 흑점이 보이지 않는 위상이기 때문이고, Max II에서 밝기가 감소하는 것은 흑점이 보이는 위상이므로, 이 위상에서는 자기장의 활동으로 광구에는 흑점이 나타나고 채층에서는 채층활동이 활발하여 Mg II 방출선의 강도가 증가한 것이다. 이와 같이 동일한 IUE 스펙트럼에서 측광으로 거의 밝기를 결정하고, 방

출선의 강도를 결정하면 광도 변화와 방출선의 강도에 대한 상관관계를 구할 수 있고. 이러한 상관관계는 쌍성의 자기활동이 single star와 달리 오랜 기간동안 지속됨을 보여주는 것이다.

7. 검토와 토의

분광형이 만기형인 별의 자기활동 때문에 나타나는 현상들을 관측적인 측면에서 조사하여, 채층활동의 관측적인 증거로 C IV, Mg II 등의 자외선 영역의 분광선들이 유용하게 사용될 수 있음을 확인하였다. 특히 관측자료가 많이 축적된 V711 tau 와 SW Lac인 경우 공전궤도 위상에 따른 광도변화와 자외선 방출선의 강도변화는 서로 상반된 관계가 있음을 알았다. 그러나 모든 RS CVn형 별에 대하여 위와같은 상관관계가 나타날 것으로 예측하기에는 아직 해야 할 일이 많다. 가시광선 영역에서는 채층활동의 결과로 흑점이 나타나서 광도가 어두워지는 현상을 초래하지만 반면에 광구에 faculae의 출현으로 광도가 오히려 밝아지는 현상이 있을 수도 있기 때문이다.

앞으로 추진해야 할 사항은 알골형, 격변변광성 등의 다른 종류의 별에 대한 자외선 고분산 분광선의 분석이 요구되고, 자기활동의 한 현상인 coronal heating을 연구하기 위하여 x-선 관측자료를 분석하는 것도 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENTS

광학천문학 워크샵 2000 - 천체 분광학의 개최에 감사드리며, 이 논문을 완성하는데 그림과 TEX 작업을 도와준 채요한군에게 감사드립니다.

참고문헌

Andrew, A. D., Rodono, M., Linsky, J. L., Brown, A., Buter, C. J., Catalano., S., Scaltriti, F., Busso, M., Nha, I. S., Oh, J. Y., Henry, M. C. D., Hopkins, J. L., Landis, H. J. & Engelbrektson, S. 1988, A&A, 204, 177
 Ayres, T. 1980, in The Universe at Ultraviolet Wavelengths, ed. R.D. Chapman, NASA CP2171, 237
 Binnendijk, L. 1965, AJ, 70, 209
 Bopp, B. W. & Fekel, F. C. 1976, AJ, 81, 77
 Bradstreet, D.H. 1985, ApJ, 58, 413
 Cousins, A. W. J. 1963, Mon. Notices Astron. Soc. S. Africa, 22, 58
 Cruddace, R.F. & Dupree, A.K. 1984, ApJ, 277, 263
 Drake, S.A., Simon, T. & Linsky, J.L. 1986, AJ 91, 1229
 Dorren, J. D., Siah, M. J., Guinan, E. F. & McCook, G. P. 1981, AJ, 86, 572
 Eaton, J.A. 1983, ApJ, 268, 800
 Guinan, E.F. 1990, in Evolution in Astrophysics: IUE Astronomy in the Era of New Space Missions, E.J. Rolfe, ESA SP-310, 73

- Guinan, E.F. & Gimenez, A. 1993, *The Realm of Interacting Binary Stars*, (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht), p51
- Hall, D.S. 1976, in *Multiple periodic Variable Stars*, ed. W.S. Fitch (Reidel: Dordrecht), 287
- Jeong, J.H., Kang, Y.W., Lee, W.B. & Sung, E.C. 1994, *ApJ*, 421, 779
- Kang, Y. W. & Wilson, R. E. 1989, *AJ*, 97, 848
- Kwee, K.K. 1966, *Bull. Astro. Inst. Netherlands Supple.*, 1., 245, 265
- Landis, H. J. & Hall, D. S. 1976, *IBVS*, 1113
- Linsky, J. L., Neff, J. E., Brown, A., Gross, B. D., Simon, T., Andrew, A. D., Rodono, M. & Feldaman, P. A. 1989, *A&A* 211, 173
- Mekkaden, M. V. 1987, *IBVS*, 3042
- Nha, I. S. & Oh, J. Y. 1986, *A&ASS*, 118, 299
- Rodono, M, Byrne, P. B. & Neff, N. E. 1987, *A&A*, 176, 267
- Roman, N. 1956, *ApJ*, 123, 246
- Rucinski, S.M. 1993, *The Realm of Interacting Binary Stars* (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht), p110
- Rucinski, S.M. & Seaguiet, E.R. 1988, *AJ*, 95, 1837
- Rucinski, S.M. & Vilhu, O. 1983, *MNRAS*, 202, 1221
- Simon, T. & Linsky, J. L. 1980, *ApJ*, 241, 759
- Struve, O. 1950, *Stellar Evolution* (Princeton Univ. Press: Princeton), p175
- Vilhu, O. 1984, *Proc. 4th European IUE Conf.*, (ESASP-218), 239
- Vilhu, O. 1987, in *Lecture Notes in Physics Vol. 291: Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun*, ed. J.L. Linsky and R.E. Stencel (Springer-Verlag: Berlin), 110
- Vilhu, O., Ambruster, C. W., Neff, J.E., Linsky, J.L., Brandenberg, A., Ilyin, I. V. and Shakjovskaya, N. 1989, *A&A*, 222, 179
- Vilhu, O. & Walter, F.M. 1987, *ApJ*, 321, 922
- Wyse, A.B. 1934, *Lick Bull.*, 17 (464), 37
- Yamasaki, A. 1982, *ApSS*, 85, 43