

## 23개 공생별의 분광학적 특성 THE SPECTROSCOPIC CHARACTERISTICS OF 23 SYMBIOTICS

김여정<sup>1</sup>, 형식<sup>2</sup>, Lawrence H. Aller<sup>3</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 천문우주학과

<sup>2</sup>한국천문연구원 보현산 천문대, <sup>3</sup>UCLA

YEJOEONG KIM<sup>1</sup>, SIEK HYUNG<sup>2</sup> AND LAWRENCE H. ALLER<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Astronomy and Space Science, Chungnam National University

<sup>2</sup>Korea Astronomy Observatory

<sup>3</sup>Dpet. of Physics and Astronomy, UCLA, CA 90095, U.S.A.

Received Jul. 5, 2000; Accepted Aug. 4, 2000

### ABSTRACT

Symbiotic stars are known as binary systems with both cool and hot components with enshrouding nebulous gas. The cool component, M-type giant, is presumably losing its mass into a hot white or main sequence companion star through the inner Lagrangian point. The lines emit from the ionized nebulous region around the hot star while the mass loss or accretion activity is believed to be the main cause of sudden variation of the continuum and line fluxes. We selected 17 symbiotics for which the emission line fluxes were measured from the IUE SWP, LWR data, to find variability of spectrum. We also investigated the periodic variation of emissions or eclipsing effect from the IUE lines. All of our symbiotics show very high electron densities in the emission regions. For other optical symbiotics, the observations had been carried in 1999 with BOAO mid-resolution spectrometer. We classified symbiotics based on their outburst activities, or emission line characteristics, i.e., OVI $\lambda$ 6830. The OVI  $\lambda$ 6830 emission lines are also found in S-type symbiotics, which have been known as characteristics of D-types.

*Keywords:* symbiotic stars, variability of spectrum, periodic variation of emissions, eclipsing effect

### 1. 서론

#### 1.1. 연구목적

공생별계(Symbiotic Star System)는 1912년에 주목받기 시작하여 1919년에 Merrill에 의해 R Aqr에 대한 최초의 계통적인 연구가 실행되었다. 그 이후로 비슷한 분광학적 특징을 가진 별들이 꾸준히 발견되어, 지금은 130여 개를 넘는다. 이전의 연구는 단편적인 분광과 측광을 통한 공생별의 역학적 구조를 알아내는데 치우쳐 있었다. 1960년에 들어 Boyarchuk(1969)에 의한 구체적인 공생별의 구조가 모델화 되면서 연구는 활발해졌고, 1980년대 이후의 공생별들 각각에 대한 자세한 연구로 이어졌다. 주된 연구 목적은 공생별의 구조와 역학적인 운동이었고, 물리적인 특성에 대한 연구는 드물다.

이 논문의 연구 목적은 18년간의 IUE 위성 자료에서 플럭스를 측정하고, 그와 동시에 광학 파장대 중분산 분광 관측을 통해 얻은 관측 자료로부터 공생별의 시간에 따른 주기순환 모습과 관측적인 특징을 분석하는데 있다. 또한 그

에 따른 전반적인 분류를 하고자 하며, 이를 바탕으로 공생별의 물리적, 기하학적인 구조에 대한 연구를 진행하고자 한다. 이 연구의 범위는 이론적인 모델을 만들기 위한 선행 작업으로서, 관측된 분광자료를 설명하는 분광자료 분석에 초점을 맞추었다.

#### 1.2. 공생별의 분류

Boyarchuk(1969)에 의해 최초로 관측적인 특징이 거론된 이래 공생별에 대한 정의는 계속 구체화되고 있다. 관측적 특징은 가) 불규칙한 변광이 있고, 나) 만기형 거성의 흡수선을 보이며, 다) 밝은 HI과 HeI 방출선, 라) 밝고 붉은 연속선, 마) 강한 TiO 흡수선이 관측된다. 또한 바) 두드러지게 나타나는 high ionization 방출선(풍부한 자외선 영역의 방출선)과 사) 약한 청색 연속선 등을 보여준다. 관측을 통해 밝혀진 일반적인 공생별의 구조는 주로 이중성계를 형성하고 있으며, 차가운 천체와 뜨거운 천체로 구성되어 있다. 차가운 천체는 주로 적색 거성이며, 뜨거운 천체

는 백색왜성이나 주계열성으로 여겨지고 있다. 주변에는 이온화된 성운이 존재한다. 거성은 물질을 잃어버리고 있으며, 물질은 항성풍의 형태, 혹은 자신의 tidal lobe를 채운 후 Lagrangian point를 경유해 그의 동반성에 전달되어 응집 원반을 형성하는 것으로 믿어지고 있다.

이제까지 공생별은 두 가지 기준에 의해 분류되어 왔다. 하나는 폭발시기의 분광학적 진화 모습에 따른 것이고, 다른 하나는 적외선으로 관측된 IR-Excess에 따른 것이다. 폭발 시기의 분광학적 진화는 폭발의 원인이 무엇이냐에 따라서 형태가 달라진다. 폭발의 원인은 크게 두 가지로 제시되는데 가) 거성에서부터 나오는 물질이 동반성으로 전이되어 응집 원반을 형성하게 될 때, 응집되는 물질의 비율이 변하면서 생기는 폭발과 나) 반성 표면에서의 핵융합 반응으로 일어나는 폭발이 있다. 이 두 가지 원인에 의해 생기는 관측적 특징을 기준으로 공생별은 Recurrent Novae, Classical Symbiotic Stars, Symbiotic Novae로 나뉘어 진다.

### 1.2.1. Recurrent Novae

폭발의 모습이 신성(Novae)과 비슷하지만, 특이한 점은 첫 번째 폭발에 이어 몇 달 이내에 다시 두 번째 폭발이 이어진다는 것이다. 이것은 신성에서는 볼 수 없는 모습으로, 이 특징으로 인해 보통의 신성과 구분된다. 지금까지의 관측에 의해 분류된 Recurrent Novae로는 T CrB, TS Oph, V1017 Sgr, V SCr, V3890 Sgr, 45 Sco, T Pysidis, V404 Cyg, V394 CrA, RX Pup가 있다.

폭발은 발생한지 몇 달 이내로 빠르게 사라지고, 폭발의 감소시기에 응집 원반의 신호로 간주되는 감박거름이 지속적으로 유지된다. 침체기의 만기형 흡수선 모양과 HI, HeI의 방출선 모습은 낮게 여기된 보통의 공생별(low excitation symbiotic star)과 다를 바 없으나, 활동기에는 큰 폭발과 작은 폭발이 연달아 일어난다. 예를 들어 T CrB는 그 간격이 약 4달 이내이다.

폭발의 원인은 동반성에 응집되는 물질의 응집 비율의 변화에서 온다고 추정된다.

### 1.2.2. Classical Symbiotic Stars

Classical Symbiotic Star로 분류되는 천체로는 CI Cyg, YY Her, Z And, AX Per, BF Cyg, V443 Her, RW Hya, SY Mus, AR Pav가 있다.

10-15년마다 광도가 2-3등급 올라가는 폭발이 있다. 폭발시의 분광학적 특징으로는 H $\beta$ 의 플럭스가 증가하는 모습이며, 약한 shell flash가 symbiotic novae와 비슷한 진화를 보이나 발생에서부터 소멸까지 시간이 짧다. 폭발의 원인은 recurrent novae와 본질적으로 동일한 응집 비율의 변화라고 추정되며, 폭발시 증가하는 H $\beta$  플럭스의 절대량 때문에 핵융합 폭발은 그 원인에서 배제된다. 만일 수소의

핵융합으로 일어나는 폭발이라면 수소의 이온화 광자수는 증가하고 온도는 내려간다. 그러나 H $\beta$ 가 증가하였다는 것은 단순히 물질의 흐름이 증가되었을 뿐, 핵융합은 일어나지 않았다는 것을 의미한다.

### 1.2.3. Symbiotic Novae

Symbiotic novae는 폭발 당시의 가시광 영역에서의 분광학적 외형에 따라 두 가지로 다시 분류된다. 행성상 성운을 닮은 천체들은 약한 껍질 연소에서 비롯되고 A-F형 초거성을 닮은 천체는 강한 껍질 연소에서 비롯된다. 이들은 다시 Mira 변광성을 포함하고 있는 천체와 보통의 거성을 포함하고 있는 천체로 분류할 수 있다. 폭발의 모습은 novae와 같으나, 이전의 관측자료에서 거성의 존재가 확인되었기 때문에 symbiotic novae로 분류된다. 약한 shell flash와 강한 shell flash가 보이며, 그 원인으로는 응집 중인 백색왜성 표면에서 일어나는 핵융합 연소를 원인으로 추정한다.

### 1.2.4. S형과 D형

공생별의 다른 분류기준인 IR-Excess에 따라서는 S형과 D형으로 분류한다.

S형은 M형 거성과 초거성의 전형적인 모습을 보이는데, 가) 작은 IR-Excess와 나) 2500-3000K의 흑체를 닮은 적외선 연속선이 특징이고, 궤도 주기는 약 1-3년으로 공생별 주기로는 단주기에 속한다. 전자수밀도는 대략적으로  $10^9/cm^3$  정도이다.

D형은 H $_2$ O, CO 흡수선대를 보여주고, 주성의 85%정도가 Mira 변광성으로 관측되며, 궤도 주기는 10년 이상의 장주기로, 전자수밀도는 S형보다 상대적으로 작은  $10^6/cm^3$ 에서  $10^7/cm^3$ 까지의 값을 갖는다.

## 2. 자료

### 2.1. IUE 위성 자료

IUE 위성이 작동하던 1978년 1월에서 1996년 9월까지 총 18년 8개월간의 관측자료를 17개의 공생별(AG Dra, AR Pav, BF Cyg, BX Mon, CH Cyg, CI Cyg, CL Sco, R Aqr, RX Pup, RW Hya, SY Mus, T CrB, TX CVn, V1016 Cyg, V443 Her, YY Her, Z And)에 대하여 수집하였다.

#### 2.1.1. IUE 위성 자료 소개

17개 천체에 대한 자료 파일 수는 약 1500여 개에 이르며, 카메라의 종류(파장 범위)에 따라 다시 세 가지 종류로 나뉜다. 또한 분산 정도에 따라 저분산과 고분산으로 나뉜다. 표.1에서 이들에 대한 정보를 간단히 정리해 보았다.

표 1. IUE 위성자료 정보

Parameter	LWP	LWR	SWP
파장범위	1808 3359	1810 3465	1097 2097
Image Scale	36.4	36.4	35.7
FWHM	5.2	5.3	4.6
파일종류	MXLO/HI	MXLO/HI	MXLO/HI

표 2. 관측을 위한 기기 설정

Grating	300gr/mm
Camera focal length	150mm
Slit width	1'.9
Spectra range	3500 8000A
Dispersion	224A/mm

표 3. BOAO 중분산 분광관측

관측 공생별	노출시간(초)
Z And	240,120,100,80
AX Per	600,120,60,50
V741 Per	240
V443 Her	60,240
BF Cyg	180,60
CH Cyg	30,10,1
PU Vul	20
V1016 Cyg	300,40,20
He2-467	120,50,20
V1329 Cyg	300,120,40,20
V407 Cyg	600,300,60
AG Peg	120,60,20
EG And	15,10

2.1.2. 자료처리

IUERDAF(IUE Regional Data Analysis Facility)를 사용하여 처리하였다. 기본적으로 IDL을 바탕으로 이루어진 프로그램이므로, IDL이 설치되어 있어야 사용 가능하다. 자료의 처리는 자료가 저분산인지 고분산인지에 따라 다르다.

저분산 파일은 READMX, FEATURE를 사용하여 플럭스를 측정하였다. 고분산 파일도 역시 READMX, FEATURE를 사용하여 측정하지만, 파일을 읽어들이기 전에 처리할 파장 영역을 정해주어야 한다.

2.2. BOAO 중분산 분광기 자료

2.2.1. 중분산 분광 관측

1999년 10월 27일과 10월 28일 이틀간 보현산의 중분산 분광기로 관측을 시행했다. 모두 16개의 공생별(AG Peg, UV Aur, BF Cyg, CH Cyg, He2-467, NSV 03313, PU Vul, CI Cyg, V407 Cyg, V443 Her, V1329 Cyg, Z And, AX Per, EG And, V741 Per)을 관측했다. 표 2.는 관측을 위한 기기의 설정을 나타낸 것이다. 대상 천체의 선정은 이제까지 알려진 모든 천체였으나, 날씨 관계로 더 많은 표본을 얻을 수 없었다. 관측기기의 설정은 이틀간 그대로 유지되었다.

2.2.2. 가시광 자료 처리 과정

IRAF를 사용하였다. 관측 image는 3500Å에서 5500Å까지와 5500Å에서 8500Å의 범위로 나누어 처리하였다. 처리 과정에서 IRAF의 알수 없는 프로그램상의 문제(calibration 이미지의 파장 동정시 파장 범위가 1000 - 5500Å으로 정의되어 방출선이 이미지의 한쪽으로 몰려서 나오는 문제)로 앞부분의 자료는 처리할 수 없었다. 또한 DARK가 초당 1ADU에 이르는 큰 값이 나와 DARK의 처

리 과정이 생략되었다. 표 3.은 BOAO 중분산 분광관측으로 자료가 얻어진 공생별과 노출시간을 정리한 것이다.

CCD의 잡음 제거 Bias는 CCD자체의 기기적인 원인에 의해 발생하는 오차로, 노출이 없는 상태에서 얻어진다. 즉 CCD의 readout시 생기는 잡음으로, CCD위에 기록된 분광자료를 취하기 위해서는 없애 주어야만 한다. Bias는 두 가지 형태로 나뉘는데, 1) 모든 image마다 CCD의 한쪽 구석에 저장되는 overscan과 2) 관측 도중에 찍어 두는 bias image이다. 이들을 제거하기 위해서 bias image를 zerocombine을 사용하여 합성한 뒤, ccdproc으로 bias image를 제외한 모든 image에 적용하였다. 또한 overscan의 영역을 정한 뒤, ccdproc를 사용하여 모든 image에서 제거하였다.

Flat field와 illumination Correction 빛에 반응하는 CCD 각 소자의 효율이 각각 다르므로 이를 파장 방향으로 보정해 주기 위해 flatcombine을 사용하였고, 다시 공간방향으로 normalize시켜주기위해 response를 사용하여 ccdproc로 모든 이미지에 적용시켰다.

보현산의 중분산 분광기 안에는 Tungsten Halogen Flat Lamp가 내재되어 있다. Flat image는 Lamp를 사용하여 얻어졌다.

뒤틀린 분광선 보정 실제 관측된 분광선은 정확히 공간축과 분산축에 수직이 아니라 약간 뒤틀려서 있는 상태이다. 이것은 파장축에 수직으로 돌려주기 위해 calibration image로 확인해 본 뒤 회전시켜 사용하였다.

표 4. 연구 대상이 된 공생별의 목록

IUE 위성 자료	BOAO 중분산 분광 자료
AG Dra, AR Pav	AG Peg, BF Cyg
BF Cyg, BX Mon	CH Cyg, CI Cyg
CH Cyg, CI Cyg	He2-467, NSV 03313
CL Sco, R Aqr	PU Vul, UV Aur
RX Pup, RW Hya	V407 Cyg, V443 Her
SY Mus, T CrB	V1016 Cyg, V1329 Cyg
TX CVn, V1016 Cyg	Z And, AX Per
V443 Her, YY Her	EG And, V741 Per
Z And	

**과장 동정** 아직 image의 x축이 과장으로 정의되어 있지 않으므로, 과장을 정의해 주는 과정이다. identify를 사용하여, calibration image의 일부분을 표본으로 뽑아 공간축을 과장으로 정의해 준다. calibration image는 천체의 노출 시간이 길 경우, 망원경의 pointing과 천체의 움직임 고려하여, 노출 시작전과 노출이 끝난 뒤 각각 한 번씩 촬영한다. 이렇게 한 부분을 정의한 image의 전체에 대해 과장을 정의하기 위해 reidentify를 사용하여 분산축(y축에 해당)을 따라가며 과장을 정의해 준다. 이때 만들어진 data를 fitcoord를 사용하여 함수에 fitting하고, transform을 사용하여 다른 image에 적용하였다.

**표준별 1차원 spectrum 뽑기** APALL을 사용하여, 기하학적으로 보정이 끝난 image를 1차원으로 만든 뒤, 절대 플럭스가 알려져 있는 표준별 관측으로부터 기기등급과 절대 등급과의 관계를 알아내기 위해 STAND를 사용한다. STAND에서 구한 값을 공생별에 적용시키기 위해 SENSFUNCION을 사용하여 함수를 구했다.

**공생별의 spectrum 결정** 공생별의 플럭스 결정에 앞서 대기 소광 계수로 자료를 보정해 준다. 이를 위해서 calibrate를 사용한다. Apall로 공생별의 1차원 스펙트럼을 뽑아낸다.

### 2.3. 관측천체 목록

표 4.는 IUE 위성자료에서 얻은 공생별과, BOAO의 중분산 분광기로 관측한 공생별들의 목록이다. 총 23개의 목록 중 6개의 공생별이 BOAO의 관측 대상과 IUE 위성 자료 대상에 같이 포함되어 있다.

## 3. IUE 위성자료 분석 및 결과

### 3.1. IUE 자료

#### 3.1.1. 각 천체별 방출선 측정

플럭스를 시간의 함수로 나타내기 위해 천체별로 방출선을 측정하여 각각 개개의 log파일을 생성하였다. 이들을 통합하여 하나의 자료 파일로 만든 뒤 플랏팅하였다.

#### 3.1.2. 각 천체별 자료 파일과 플럭스 분포

플럭스 분포는 두 가지 기준에 의해 그 모습을 살펴보았다. 가) 위성이 관측을 시작한 1977년에서부터 1995년까지 18년간의 시간에 따른 배열(0번째 주기는 관측이 시작된 시점)을 해 보았고, 나) 한 주기를 1로 환산한 뒤, 모든 분광선의 플럭스를 방출선 별로 한 주기 안에 나타내어 보았다.

표 5.는 IUE자료로 얻은 17개의 천체와 BOAO의 중분산 분광기로 얻은 16개의 천체들 중 지금까지 그 주기가 정확히 관측된 천체들의 ephemeris를 조사하여 나열한 것이다.

모든 자료가 관측이 성공적으로 수행된 것이 아니므로, 플럭스의 분포를 잘 보기 위해서는 일부 자료를 제거하는 수밖에 없었다. 제거되는 대상은, 가) 아주 미약하여 전체적인 플럭스의 흐름에 오차를 제공할 수 있는 경우와, 나) 한 공생별에 대해 관측된 수가 너무 적어서 플럭스의 흐름 자체를 볼 수 없는 경우였다. 다) 관측된 측정치가 saturation되었다고 판단되는 경우와 라) 관측이 꾸준히 연결되지 않아 중간에 흐름을 볼 수 없었던 경우도 역시 제거하였다.

플럭스 분포를 살펴보는데 있어서 어려운 점은 SWP파일의 수가 LWP 혹은 LWR파일과 동일한 개수로 관측이 이루어지지 않았고, 관측된 시기의 기간도 각기 다르다는 것이다. 이런 이유로 플럭스의 분포를 살펴 보는데는 주로 SWP파일의 범위 내에 있는 방출선들이 대부분 이용되었다. 표 6.은 각 천체에 대응되는 자료 파일의 갯수를 파일 종류별로 나타낸 것이다.

나쁜 자료를 제거하고 나서, 플럭스 분포를 볼 수 있을 정도의 충분한 자료의 양이 있는 공생별들의 플럭스 분포를 살펴보고, 각각의 공생별들에 대해서는 전체적으로 고른 분포를 가진 방출선들을 골라 플랏팅을 했다. 전자수 밀도를 측정하기 위해서는 고분산의 자료가 필요하고, 충분한 양의 자료를 가지고 있었던 공생별은 모두 11개(AG Dra, BF Cyg, CH Cyg, CI Cyg, R Aqr, RX Pup, RW Hya, SY Mus, T CrB, V1016 Cyg, Z And)였다.

**시간에 따른 플럭스 분포** 18년간의 플럭스의 진화 모습, 즉 변화 모습을 보기 위해, 시간을 x축, 플럭스의 양을 y축으로 놓고 살펴보았다. 이때 플럭스는  $10^{-13} \text{erg/cm}^2/\text{sec}$ 의 단위이다. 전체적으로 보았을 때, 공

표 5. 각 천체들의 Ephemeris

Object	ephemeris	발견자
AG Dra	Max(U)=JD2438900+554*E	Meinunger(1979)
AR Pav	Min(V)=JD2420330+604.6*E	Andrews(1974)
BF Cyg	Min(pg)=JD2415065+757.3*E	Pucinskas(1970)
BX Mon	Max(pg)=JD2430345+1374*E	Kukarkin et al.(1951)
CH Cyg	T0=JD2440023+5750*E	Yamashita, Maehara(1979)
CI Cyg	Min(V)=JD2411902+855.25*E	Aller(1954)
CL Sco	Min(pg)=JD2427020+524.7*E	Kenyon, Webbink(1984)
R Aqr	Max(V)=JD2382893.3+386.30*E	Willson, Garnavich and Mattei(1981)
RW Hya	Max(pg)=JD2421519.2+372.45*E	Kenyon and Webbink(1984)
RX Pup	Max(K)=JD2442810+580*E	Kenyon, Webbink(1984)
SY Mus	Min(V)=JD2435175.7+627.0*E	Kenyon, Bateson(1984)
T CrB	Conj=JD2433687+227.5*E	Paczynski(1965)
TX Cvn	T0=JD2443635+70.8*E	Fried(1980b)
V1016 Cyg	Max(K)=JD2444101+472*E	Kenyon and Webbink(1984)
UV Aur	Max(pg) = JD2415016+395.2*E	Zakarv(1951)
AX Per	Min(pg)=JD2436679+681.6*E	Kenyon(1982)
V1329 Cyg	Min(V)=JD2424870+950*E	Graygar et al.(1979)
AG Peg	Min(B)=JD2428250+827.0*E	Meinunger(1981)
Z And	Min(pv)=JD2421298+756.85*E	Kenyon Webbink (1984)

표 6. IUE 위성 자료 파일 분포

공생별	저분산		고분산	
	SWP	LWP(R)	SWP	LWP(R)
-				
AG Dra	62	57	45	25
AR Pav	38	30	1	2
BF Cyg	46	39	4	8
BX Mon	7	6	0	0
CH Cyg	89	65	37	39
CI Cyg	65	58	15	6
CL Sco	2	1	0	1
R Aqr	57	37	7	0
RX Pup	13	10	4	3
RW Hya	20	26	18	6
SY Mus	71	59	7	1
T CrB	37	33	6	4
TX CVn	3	2	0	0
V1016 Cyg	61	58	45	36
V443 Her	3	3	0	0
YY Her	3	2	0	1
Z And	87	75	39	15

통된 모습은 갑작스런 플럭스의 증가가 일어난다는 것이다. 한 천체에 대해서만 살펴본다면, 폭발이 일어난 시기의 간격은 규칙적이지 않으나 한 방출선의 급작스런 플럭스 증가가 일어나면, 다른 방출선에서도 그 시기에 플럭스의 증가가 있는 공생별이 있고, 그렇지 않은 공생별로 나뉘어 짐을 확인하였다.

폭발 시기의 플럭스 분포를 설명하기 위해 현재 가) 주성인 거성에서 응집 원반을 경유하여 동반성으로 전이되는 물질의 응집 비율변화에서 오는 폭발과 나) 백색왜성인 동반성의 표면에서 일어나는 핵융합 연소에 의해 일어나는 폭발이 원인으로 제시되었다. 응집 비율의 변화에서 오는 폭발은 한 천체가 보여주는 각 방출선의 분광학적 진화 모습이 동일하며, 핵융합 연소에 의한 폭발은 각 방출선의 진화 모습이 다르다는 것이 특징이다.

각 방출선 플럭스가 비슷한 증가와 감소의 분포를 보이는 천체로는 AG Dra, AR Pav, BF Cyg, CH Cyg, CI Cyg, RX Pup, R Aqr, SY Mus, T CrB, V443 Her, Z And가 있었으며, 각 방출선 플럭스가 각기 다른 시기에 다른 비율로 증가를 보인 천체로는 V1016 Cyg가 있다.

방출선마다 비슷한 플럭스 변화를 보이는 경우 다음 그림 1.은 Z And의 대표적인 방출선의 시간에 따른 플럭스량의 변화 모습이다.

각 방출선의 시간에 따른 플럭스량의 증감 모습이 모두

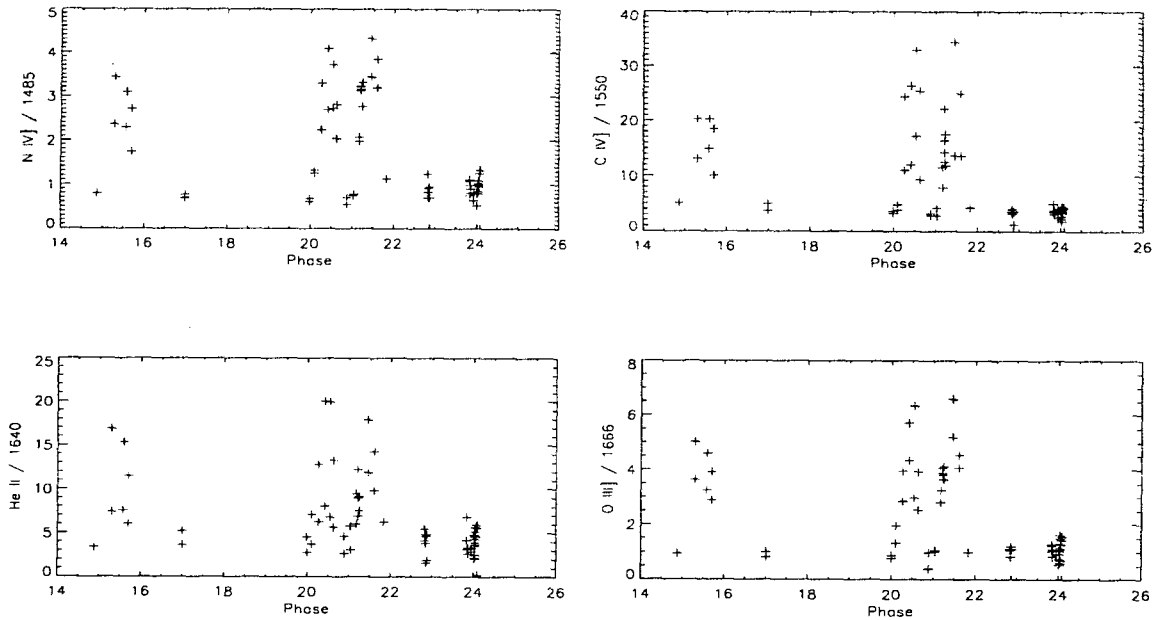


그림 1.— Z And의 시간에 따른 방출선 플럭스의 변화모습

비슷해 보이는 것을 볼 수 있다. 각 방출선의 상대적인 비율이 거의 변하지 않는다는 것은, 폭발은 있었으나 에너지의 재분배가 일어나지 않았다는 것을 의미하다. 폭발의 원인은 거성인 주성에서 반성으로 유입되는 물질의 응집 비율 변화에서 온다고 추정할 수 있다.

방출선마다 다른 플럭스 변화를 보이는 경우 각 방출선이 시간이 지나면서 각기 다른 시기에 일정하지 않은 비율로 플럭스의 증감이 있었음을 보여준다. 온도의 변화가 있었으며, 그로 인해 에너지의 재분배가 일어났다고 볼 수 있다. 폭발의 원인은 반성 표면에서의 핵융합이라고 생각된다. 그림 2.는 대표적인 V1016 Cyg의 시간에 따른 변화 모습이다.

**한 위상(phase)동안 누적된 플럭스 분포** 공생별의 궤도 운동 영향을 알아보기 위해 플럭스를 한 위상동안 누적시켜 보았다. 이들은 1) 일정한 phase에서 플럭스량이 변하는 공생별과 2) 위상과 상관없이 무작위적인 플럭스의 모습을 보이는 공생별들로 나뉘어 진다.

일정한 phase에서 플럭스량이 변하는 모습을 확실히 볼 수 있었던 공생별은 CI Cyg와 SY Mus였고, Meier et al.(1994)를 통해 이들에게 궤도 주기의 영향이 있음을 확인하였다. 이 두 공생별을 제외한 나머지 공생별에서는 궤도 운동의 영향을 볼 수 없었다.

**궤도 주기의 영향이 있는 경우** 그림 3.은 CI Cyg에서 측정된 플럭스를 한 주기를 1로 놓고 계속 누적시킨 결과이다. 모든 방출선이 주기가 시작되는 곳과 끝나는 곳에서 아주 또렷하게 비슷한 최소값으로 플럭스 값이 떨어진다. 이것은 식현상이 일어나고 있음을 뜻하며, 방출 지역이 뜨거운 요소 주변임을 암시한다.

**궤도 주기의 영향이 없는 경우** 그림 4.는 AG Dra의 한 주기를 1로 놓고 플럭스를 계속 누적시킨 모습이다. 최대기와 최소기는 볼 수 없으며, 전반적으로 플럭스의 분포가 평평한 모습이다. 궤도 주기의 영향이 없다고 볼 수 있다.

#### 4. IUE 위성 자료의 플럭스의 변화에서 나타난 공생별의 물리적 특성

공생별에는 다른 시스템과는 확연히 구분되는 특징이 존재한다. 하나는 폭발현상이고 다른 하나는 HII 지역이나, 보통의 행성상 성운보다 월등히 높은 밀도를 보인다. 공생별에서 일어나는 폭발 현상은 흡사 격변광성과 비슷하지만, 그 시간 간격이 격변광성보다 길고, 신성과 비슷하기도 하나 역시 그 시간 간격이 다르다.

밀도는 공생별의 두드러진 특징이다. 보통 S형이  $10^9/cm^3$ 의 높은 밀도를 가지고 있으며, D형은 그보다 더 낮은  $10^6/cm^3$ 의 값을 가지고 있다고 알려져 있다. 전자수밀도와 성운의 반경상의 관계로 추론해 보면 D형은 S형보다 약 100배 정도 큰 성운을 가지고 있으며, 이는 전

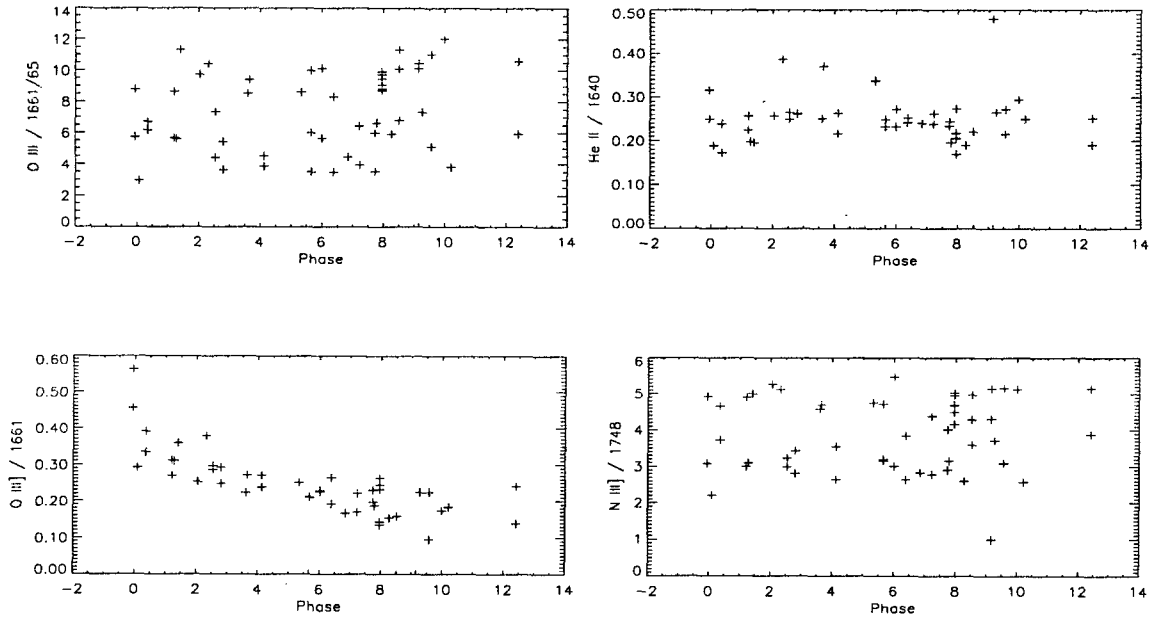


그림 2.— V1016 Cyg의 시간에 따른 방출선 플럭스의 변화모습

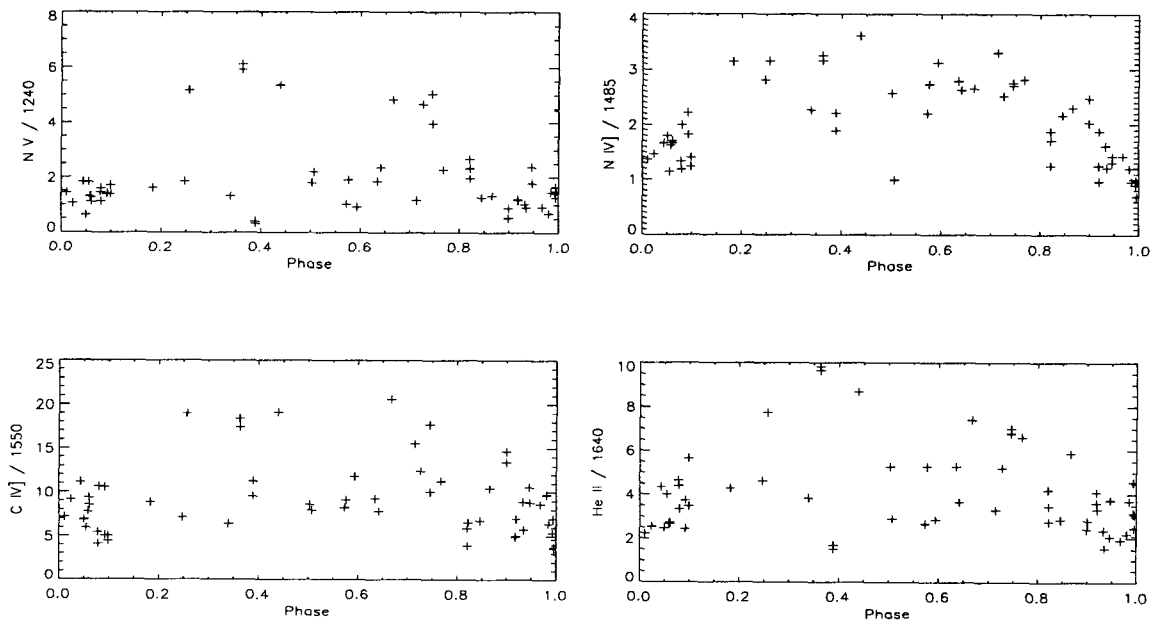


그림 3.— CI Cyg의 한 위상(phase)동안 누적시킨 플럭스의 모습

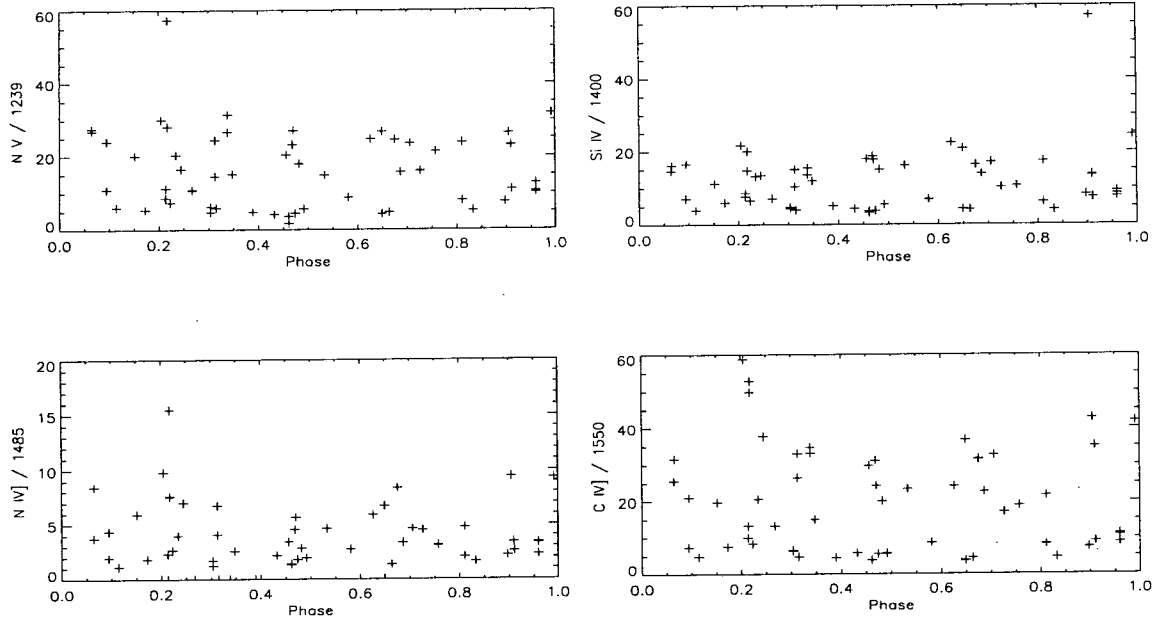


그림 4.— AG Dra의 한 위상(phase)동안 모든 플럭스를 겹쳐 본 모습

파 관측을 통해 입증되어 왔다.

IUE 위성 자료의 플럭스 변화에서 살펴본 공생별의 물리적 특성을 분석해 보고, 플럭스를 이용한 각 공생별들의 밀도와 상대적인 방출지역의 성운 크기를 추정해 보았다. 또한 이것으로 D형과 S형의 분류가 가능한지 알아보았다.

#### 4.1. 폭발 현상과 식 현상

폭발 현상은 불규칙적으로 일어나며 그 원인이 응집 비율의 변화 또는 핵융합 연소이나에 따라 전체적인 플럭스의 분포 모양이 달라졌다. 응집 비율의 변화에서 비롯된 폭발일 때에는 에너지가 재분배 되지 않으므로 광도의 변화만을 가져온다. 따라서, 한 천체에 대한 각 방출선들은 상대적인 플럭스량의 비율을 유지하면서, 전체적인 플럭스의 증가만을 보여 주었다. 핵융합 연소가 원인일 때는 온도의 변화로 인한 에너지의 재분배 현상이 일어난다. 즉, 각 방출선들의 플럭스량이 증가하는 시기가 일치하지 않았고, 증가 비율도 각기 달랐다. 표 7.은 폭발 현상에 나타난 플럭스량의 변화 모습으로 공생별을 분류해 본 것이다.

궤도 주기의 영향은 폭발 시기에도 영향을 미치므로, 궤도 주기의 영향을 받는 공생 별들은 전체적인 플럭스의 증감 모습 외에 플럭스의 분포를 한 주기로 끊어서 누적시켜 보았을 때, 식 현상이 일어난다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 공생별계가 쌍성계임을 보여주는 단편적인 증거이며, CI Cyg와 SY Mus에서 확실하게 볼 수 있었다. 또한 특별한 phase에서 플럭스의 증가가 일어나는 경우는 궤도가 원 궤도가 아닌 타원 궤도이기 때문에 periastron passage 효과가 있음을 알 수 있다.

#### 4.2. 전자수밀도

성운에서의 평균 전자수밀도는 보통 doublet이 일어나는 두 방출선의 플럭스 비율을 관찰하여 얻을 수 있다. 즉 거의 비슷한 들뜸을 가진 다른 준위에 의해 방출되는 같은 이온의 두 방출선의 세기를 비교하여 측정 할 수 있다. 만일 두 준위가 다른 복사 전이 가능성(radiative transition probabilities)이나 혹은 다른 collisional de-excitation rates를 가졌다면, 두 준위의 상대적인 population들은 밀도에 의존할 것이고, 그들이 방출하는 방출선의 세기의 비는 마찬가지로 밀도에 의존한다는 개념에 의해 전자수밀도를 결정 할 수 있다 (Osterbrock, 1984).

전자수밀도 측정에 주로 사용되는 방출선들은 O IV] $\lambda\lambda$ 1401.16, 1404.81, 1407.39, N III] $\lambda\lambda$ 7146.8, 1748.7, 1749.7, 1752.2, 1754.0, Si III] $\lambda\lambda$ 1882.7, 1892.3, C III] $\lambda\lambda$ 1906.7, 1908.7가 있다.

전자수밀도 분석을 위해서는 고분산의 자료들이 쓰인다. 공생별들의 고분산 자료에서 공통적으로 두드러지는 방출선은 Si III] $\lambda$ 1892 방출선과 C III] $\lambda$ 1908 방출선이다. 전통적으로 사용되는 doublet의 선들은 모든 대상천체에서 오차를 무시할 만큼의 상대적인 비율을 가진 플럭스를 얻을 수 없었다. Felbeman과 Aller(1987)는 이 두 방출선의 비율이 행성상 성운과 공생별과의 분류 기준이 될 수 있음을 논증하였다. Bichalitsianos와 Kafatos(1984)의 여러 편의 논문에서 공생별의 밀도를 구하는데 이미 사용되고 있다. 이 두 방출선은 flux calibration이나 성간 물질의 reddening correction error에 의한 영향이 거의 없다고 알려져 있다. 두 방출선은 기본적으로 같은 지역에서 형성된다는 것과 방출지역의 온도는 평균적인 성운의 전자 온도



표 7. 플럭스의 변화 모습을 기준으로 한 공생별들의 분류

천체	분류 기준
AG Dra	방출선들의 상대적이 세기는 변하지 않고 전체적인 만 증가한 형태 : 온도는 변하지 않고 광도만 증가할 때 나타나는 모습(한 천체에 국한해서 볼 때 )
AR Pav	
BF Cyg	
CH Cyg	
SY Mus	
V443 Her	
Z And	
R Aqr	
R Aqr	
RX Pup	
CI Cyg	1. 비슷한 시기의 플럭스양 증가 2. 비슷한 비율로 플럭스양 증가 3. 전체적인 플럭스의 진화 모습이 서로 비슷
T CrB	
V1016 Cyg	방출선들의 상대적인 세기는 물론 전체적인 플럭스양도 증가하는 형태 : 온도가 변하면서 광도가 증가하는 현상 - 방출선마다 각기 다른 플럭스의 증가시기와 비율을 보임
CL Sco	자료 부족
BX Mon	
RW Hya	
TX CVn	
YY Her	

인 10,000K라는 가정하에서 전자수밀도를 계산하였다.

먼저 Doschek et al.(1978)의 Diagnostic 을 이용하여 전자수밀도를 구해 보았다. 이것은 태양 코로나 지역의 전자수밀도를 확정하기 위해 쓰여졌던 논문으로 이것을 사용했을 때에는 diagnostic의 범위를 벗어난 값이 대부분이어서 전자수밀도를 추정하기에는 적합하지 않다고 판단하였다. 다음 표 8.은 이때 결정된 전자수밀도이다.

IUE 위성으로 관측된 17개의 공생별중 AR Pav, BX Mon, CL SCo, TX CVn, V443 Her, YY Her은 고분산 자료가 없거나 그 수가 2개 이하이므로 밀도측정에서 제외되었다.

전자수밀도는 전반적으로 무척 높은 값이 나왔다. 이 중 D형인 RX Pup나 V1016 Cyg는 D형의 전자수밀도가 약  $10^6/cm^3$ 이라는 통계적인 자료와 상반되게 다른 S형의 공생별과 구분되지 않는 범위의 값을 가졌다. RX Pup는 D형이지만, Kafatos et al(1982)에서 위의 값과 비슷한 범위에 들어오는 값을 유도해 내었다. Michalitsianons와 Kafatos(1984)역시 같은 실리콘과 카본을 사용하여 유도한 전자수밀도가  $10^{10}/cm^3$  정도의 높은 전자수밀도를 유도하였다.

표 8. 각 공생별의 전자수밀도

천체	전자수밀도
AG Dra	$10.8 \leq \log N_e \leq 13.2$
BF Cyg	$9.5 \leq \log N_e \leq 10.5$
CH Cyg	$8.4 \leq \log N_e \leq 11.3$
CI Cyg	$9.0 \leq \log N_e \leq 10.7$
R Aqr	$9.0 \leq \log N_e \leq 10.4$
RW Hya	$10.2 \leq \log N_e \leq 11.3$
RX Pup	$9.6 \leq \log N_e \leq 11.3$
SY Mus	$10.3 \leq \log N_e \leq 11.1$
T CrB	$10.8 \leq \log N_e \leq 11.5$
V1016 Cyg	$9.6 \leq \log N_e \leq 10.3$
Z And	$9.9 \leq \log N_e \leq 10.9$

표 9. 전자수밀도로 추론해 본 방출지역의 성운크기

천체	전자수밀도	$R_n$	IR-Type
AG Dra	$7.96 \times 10^{12}$	1	S
BF Cyg	$1.74 \times 10^{10}$	48	S
CH Cyg	$9.99 \times 10^{10}$	15	S
CI Cyg	$2.56 \times 10^{10}$	37	S
R Aqr	$1.31 \times 10^{10}$	58	S
RW Hya	$1.08 \times 10^{11}$	14	S
RX Pup	$1.02 \times 10^{11}$	14.5	D
SY Mus	$7.29 \times 10^{10}$	18.5	S
T CrB	$1.90 \times 10^{11}$	10	S
V1016 Cyg	$1.20 \times 10^{10}$	61.5	D
Z And	$4.37 \times 10^{10}$	26	S

#### 4.3. 성운의 반경

전자수밀도를 알면, 성운의 반경과의 관계식으로부터 그 반경을 추정해 볼 수 있다. 여기서는 밀도 이외의 다른 변수들에 대해 공통된 일반적인 값을 유도하므로, 상대적인 성운 반경만을 비교해 보았다.

성운의 반경을 계산하는 식은 다음과 같다. 여기서  $N_e$ 는  $10^9/\text{cm}^3$ 의 단위이며,  $d$ 는 kpc단위의 거리이고,  $f(H\beta)$ 는  $10^{-12}\text{erg}/\text{cm}^2/\text{sec}$  단위의  $H\beta$  플럭스이다. 계산된 전자수밀도의 중앙값과, Kenyon(The Symbiotic Star, 1984)이 대략적인 성운의 반경을 구하기 위해 사용한 전형적인 S와 D형의 거리 1kpc,  $f(H\beta)=10^{-11}\text{erg}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 의 값을 가지고 각 천체의 성운 반경을 대략적으로 추정해 보았다.

AG Dra의 전자수밀도의 중앙값으로부터 유도된 성운의 반경을 1로 놓고, 그 상대적인 크기를 비교해 보았을 때, V1016 Cyg가 가장 큰 반경을 보여주고 있으나, 현재의 자료에서는 D형과 S형을 구분할 정도의 큰 상대적 차이는 없었다. R Aqr가 S형임에도 불구하고, AG Dra의 58배에 해당하는 크기가 나왔으며, S형 자체에서도 서로 그 크기의 분포가 다양하였다. 그 결과를 표 9.에 간단히 정리해 보았다.

S형의 경우 물질은 자신의 Roche-lobe를 가득 채운 거성이 Lagrangian point를 경유하여 그의 동반성을 둘러싼 응집 원반에 물질을 건네고, 뜨거운 동반성에 의해 주변의 가스가 이온화되어 주변에 조그마한 이온화된 성운을 형성하게 된다고 추론해 볼 수 있다. 그 동안의 논문 통계에 의하면 D형에 속하는 공생별 성운의 반지름이 S형 공생별의 반지름보다 약 100정도 크며, 밀도와 성운 반지름 사이의 관계를 고려해 보면 D형이 약  $10^3$ 배 가량 작은 밀도를 가졌다는 것을 말한다. 이들은 적외선 상에서 작은 IR-Excess를 보이며, 항성풍에 의하여 물질은 거성 밖으로 내보낸다. 이들 중 극히 일부가 그들의 왜성 동반성의 중력에 붙들려 응집 원반을 형성하고, 다른 일부는 이온화되기도 한다. 항성풍에 의해 주변으로 나가는 물질은 사방으로

퍼지므로 그 성운의 크기는 클 것이다. 그러나 RX Pup에서 확인한 바와 같이, 자외선 관측에서 D형으로 정의된 천체가 S형과 대등한 밀도를 가진 경우가 위의 계산과 논문에서 확인되었다는 것은 아직 밝혀지지 않은 공생별 내부의 물리적인 현상이 있거나, 자외선 관측으로 두 가지 형태를 분류하는 것에 예외적인 경우가 발생한다고 생각할 수 있다.

#### 5. 가시광 영역의 분광자료(BOAO 중분산 분광 관측)

온도가 낮은 항성(거성) 대기의 경우 적외선 근처의 파장대에서 선이 두드러지게 강함을 보인다. 이러한 연속선으로부터 항성대기 모델을 적용하여 별 표면온도(effective temperature)를 구할 수 있다. IUE 자료로부터 뜨거운 성분이 원반(disk)인지, 백색 왜성인지, 주계열성인지 판단해야 하지만, 적외선이나 근적외선에서는 단지 거성의 물리적 상태(온도, 반경)만을 구하게 된다.

가시광에서의 분광자료에서는 거성(차가운 요소)의 존재를 확인할 수 있었다. 보통 만기형 거성의 특징적인 방출선과 연속선의 모습을 보였다. 관측된 각 천체의 방출선과 흡수선의 모습을 살펴보았다. 모두 16개의 공생별(AG Peg, UV Aur, BF Cyg, CH Cyg, He2-467, NSV 03313, PU Vul, CI Cyg, V407 Cyg, V443 Her, V1016 Cyg, V1329 Cyg, Z And, AX Per, EG And, V741 Per)에 대해 관측이 수행되었다.

가시광 영역에서도 S형과 D형의 구분이 이루어진다. O VI $\lambda$ 6830은 공생별에서만 관측되는 방출선이며, 그 중에서도 D형에서만 관측된다고 알려져 있다. O VI $\lambda$ 6830의 존재 유무를 살펴보고, D형과 S형을 다시 분류해 보았다.

가로축은 파장의 축이며, 세로축은  $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{sec}$ 단위의 플럭스양이다. 파장의 범위는 5500Å에서부터 8500Å이다.

##### 5.1. D형과 S형의 방출선

그림 5.는 D형중 V1016 Cyg의 모습이다. 파장이 길어질수록 연속선이 높아짐을 볼 수 있다. 방출선이 풍부하며 흡수선은 상대적으로 잘 보이지 않는다. 60초 노출을 주었다.

그림 6.은 S형중 대표적인 AG Peg의 모습이다. He I $\lambda$ 5876, He I $\lambda$ 6678+HeII $\lambda$ 6663)의 방출선이 보이고, TiO와 O<sub>2</sub>의 흡수선이 보인다. 역시 파장이 길어질수록 연속선은 높아진다.

##### 5.2. O VI $\lambda$ 6830이 나타난 공생별

V1016 Cyg와 V1329 Cyg에서 나타났다. V1016 Cyg는 D형이며 V1329 Cyg는 S형이다. O VI $\lambda$  6830방출선은 공생별에서만 관측되며, IR형중 D형에서만 관측된다고 알려져 있다. 그러나 작년에 관측한 중분산 분광자료에서는 S형인 V1329 Cyg에서 O VI 방출선이 관측되었다. 이것



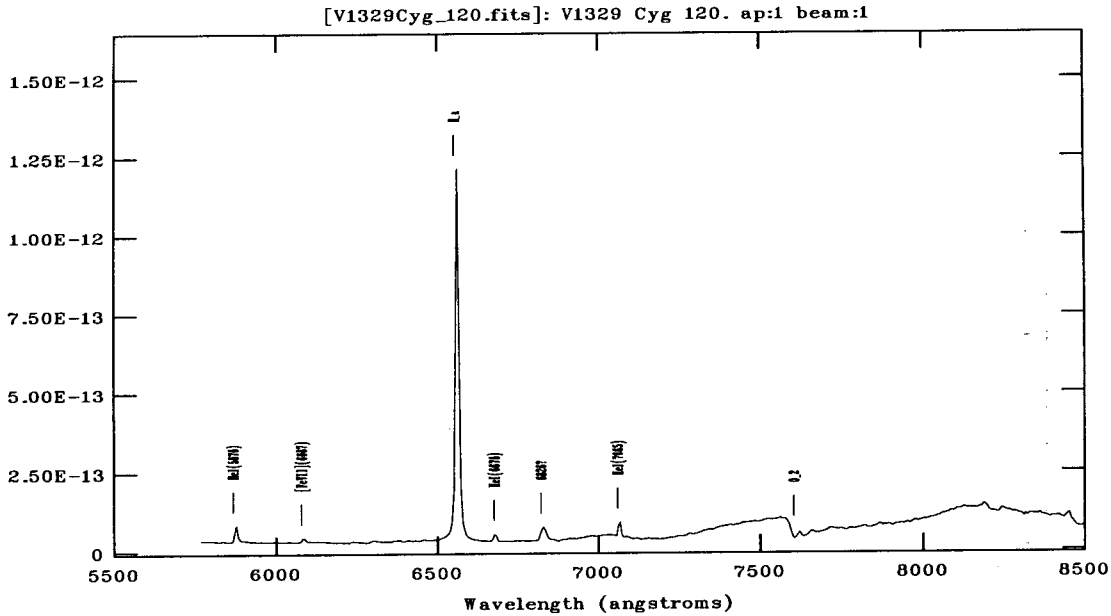


그림 7.—V1329 Cyg의 방출선 모습

은 표본으로 사용해 온 공생별들의 범위가 너무 좁았을 수도 있다는 추측을 가능하게 한다. 확실하게 V1329 Cyg(그림 7.)에서 그 모습이 보였다. 이것은 이 방출선이 공생별계에서만 관측되며, 관측되는 천체가 모두 D형에 속해 있다는 Kenyon(The Symbiotic Stars, 1984)의 관측과 어긋난다.

## 6. 결론 및 토의

강한 자외선을 가진 별이나 이온화 근원체(UV ionizing source)의 주위에 가스가 존재하는 경우, 가스가 원자 상태로 존재하고 이온화되어 방출선을 낸다. 공생별의 경우가 이러한 경우인데, 태양 채층의 경우처럼 밀도가 상대적으로 높지만, 행성상 성운에 비유되는 매우 흥미로운 연구 과제이다. 또한 한 별(거성)에서 물질이 방출되어 다른 반성으로 유입되기도 하고, 그러한 유입의 과정이 분광선에 영향을 주어 연구를 더욱 복잡하게 한다. 두 별의 상태에 따라 분광선이 광학과 UV뿐만 아니라 X선 근처에서 나타나기도 하여 중성자별을 가지고 있는 경우도 있다. 이 연구에서는 이러한 연구를 위해 우선 많이 알려진 다양한 공생별을 선택하여 IUE자료를 분석해 보았다.

IUE 위성으로부터 관측된 AG Dra, AR Pav, BF Cyg, BX Mon, CH Cyg, CI Cyg, CL Sco, R Aqr, RX Pup, RW Hya, SY Mus, T CrB, V1016 Cyg, V443 Her, YY Her, Z And 등 모두 17개의 공생별에 대한 자외선 자료를 가지고 전체적인 특징을 분석하였다.

전체적인 플럭스의 시간에 따른 진화 모습이 크게 두 가지 부류로 나뉘어짐을 볼 수 있었다. 한 공생별에 대해 각

각의 방출선을 비교하여 보았을 때, 플럭스의 갑작스런 증가 시기가 모두 비슷하며, 그 상승 비율 또한 비슷한 공생별들이 있었다. AG Dra, AR Pav, BF Cyg, CH Cyg, CI Cyg, R Aqr, RX Pup, SY Mus, T CrB, Z And가 해당 되었다. 플럭스의 진화 모습을 살펴보면, 폭발의 모습을 공통적인 모습으로 요약할 수 있다. 한 공생별 내의 방출선들은 상대적인 비율을 유지하면서, 전체적인 플럭스량만 증가한다는 것이다. 이것은 폭발시에도 에너지의 재분배 현상이 일어나지 않음을 의미하고, 또한 온도의 변화 없이 광도만 증가하였다고 해석할 수 있다. 온도의 변화가 일어나지 않으므로, 폭발의 원인은 핵융합이 아닌 뜨거운 등반성에 응집되고 있는 물질의 응집 비율의 변화라고 볼 수 있다. 이런 공생별들은 그 동안의 분류 기준으로 보았을 때, Recurrent Novae와 Classical Symbiotic Stars에 속한다. 또 다른 모습을 보여준 공생별은 V1016 Cyg 단 하나로서, 각 방출선들의 플럭스의 양적 증가가 존재하나, 그 시기가 서로 다르고, 상승 비율 또한 흡사하지 않았다. 이것은 폭발시에 에너지의 재분배가 일어나며, 광도가 증가함과 동시에 온도가 변한다는 것을 의미한다. 핵융합은 온도의 하강과 동시에 광도의 증가를 가져오는 현상이므로 이 폭발의 원인은 핵융합이라고 생각할 수 있다. 이 공생별은 Symbiotic Novae에 속한다.

한 주기에 국한시켜 살펴본 플럭스의 분포 모습에서, CI Cyg와 SY Mus가 궤도 주기의 영향을 받고 있음을 보았고, 다른 공생별들에서는 볼 수 없었다.

전자수밀도는 그 동안 IR형의 분류 기준과 많은 관계가 있다고 알려져 있다. 관측 대상중 V1016 Cyg와 RX Pup가 D형이고, 나머지 공생별들은 S형에 해당한다. 그

러나 전자수밀도를 측정해본 결과, 대상이 되는 12개 천체 모두가 크게 차이가 나는 전자수밀도값을 보이지 않았다. 전체적으로 범위는  $9.0 < \text{Log } N_e < 11.5$ 의 값을 가졌고, 유독 AG Dra만이  $10.8 < \text{Log } N_e < 13.2$ 라는 높은 값을 보였다. V1016 Cyg, RX Pup도 다른 S형과 유사한 밀도를 보였을 뿐, 분류의 근거가 될 만한 두 IR형 사이의 차이는 존재하지 않았다. RX Pup는 이전의 많은 논문에서도 높은 전자수밀도가 확인되어온 공생별이다. 이제까지 알려진 두 IR형의 밀도차가  $10^3$  정도 되므로, 성운의 반경 차이는 약 100 정도에 이른다고 볼 수 있다. 그러나 V1016 Cyg만이 상대적으로 큰 반경의 값을 보였을 뿐, S형과 D형이라고 구분되는 공생별들 사이의 뚜렷한 판별 기준은 볼 수 없었다.

가시광 영역에서도 IR형의 분류 기준이 존재한다. O VI 6830 방출선은 공생별에서만 볼 수 있으며, 특히 이제까지 관측된 D형의 85%가 O VI 방출선을 보임으로써 O VI 방출선이 보이는 공생별은 D형이라는 것이 지금까지의 이론이었다. 그러나 중분산 분광기의 대상 천체였던 16개의 천체들 중 D형은 V1016 Cyg 오직 하나였으나, O VI는 V1016 Cyg와 S형이 V1329 Cyg에서 관측되었다. 이것은 이제까지 관측을 통해 IR형을 분류해 왔으나, 대상이 되었던 표본의 적용 범위가 좁았기 때문에 생긴 문제일 수도 있을 것이다. IR형의 분류는 관측을 통해 만들어진 기준이므로, 이론적으로 생성된 값들은 좀더 많은 관측을 통해 꾸준히 연계성을 찾아야 할 것이다.

공생별은 긴 주기와 변덕스러운 광도의 변화가 있는 천체이다. 연구의 역사가 짧으나 자외선, 가시광선, 적외선 영역에서 각기 재미있는 모습을 보여주며, 아직 밝혀지지 않은 관측 현상을 감안해 보면 앞으로 연구할 가치는 높다고 생각된다. 그러나 긴 주기와, 폭발, 침체기를 고려해 장기간의 꾸준한 관측과 동시에 여러 영역에서의 관측이 같이 수행되어야만 단편적인 연구에서 벗어나 공생별 전체의 특성과 구조를 알 수 있는 연구가 실행 될 수 있을 것으로 보인다.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

이 연구는 일부 과학기술부 (Korea MOST)의 국책연구사업 (Star 99-2-500-00)과 한국과학재단 (KOSEF Grant No. 1999-1-113-001-5)의 지원으로 진행되었습니다.

#### 참고문헌

- Boyarchuk, 1969, CoKon, 65, 395  
 Chochol, D., Vittone, A., Milano, L., Rusconi, L., 1984, A&A, 140,91  
 Feibelman, W.A. and Aller, L.H., 1997, AJ, 491, 242  
 Kafatos, M., Michalitsianos, A.G., Feibelman, W.A., 1982, ApJ, 257, 204  
 Kenyon, S.J., 1984, The symbiotic stars  
 Merrill, P.N., 1919, PASP, 31, 305  
 Michalitsianos and Kafatos, 1984, MNRAS, 207, 575  
 Osterbrock, D. E. 1981, ApJ, 246, 696