

## 타원은하 NGC 4649의 종족합성

천문석<sup>1†</sup>, 김문환<sup>1</sup>, 손영중<sup>2</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 천문우주학과

<sup>2</sup>연세대학교 자외선우주망원경연구단

### STELLAR POPULATION SYNTHESIS OF THE ELLIPTICAL GALAXY NGC 4649

Chun, Mun-Suk<sup>1†</sup>, Gim, Moon-Whan<sup>1</sup>, and Sohn, Young-Jong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Center for Space Astrophysics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

E-mail: mschun@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received September 2, 2001; Accepted September 30, 2001)

#### 요 약

적정화 종족합성의 선형화 계획을 통하여 자외선 방출이 강한 타원은하 NGC 4649의 광도 계급과 분광형에 따른 항성 분포를 알아보았다. 종족합성을 위한 항성군을 만들기 위해 3160Å에서 10800Å까지의 파장영역에서 여러 항성종족에 대한 스펙트럼 자료 (Gunn & Stryker 1983)를 사용하였다. NGC 4649의 누적 스펙트럼은 Bertola et al. (1982)의 자료를 이용하였다. 주계열 전향점을 이루는 항성종족에 따른 4개의 모형에 대한 종족합성을 수행한 결과 G8-K0V 군을 전향점 종족으로 하는 모형이 NGC 4649의 누적 스펙트럼과 가장 잘 맞음을 확인하였고, 장파장 영역에서의 흡수선은 초중원소 K 거성에 의해 큰 영향을 받는다는 사실을 확인하였다. 종족합성으로부터 구한 NGC 4649의 질량대 광도비 ( $M/L \sim 20$ )는 역학적으로 구한 값과 비슷함을 알 수 있었으며, 은하의 중심거리에 대한 항성 종족의 분포 특성이 비슷함을 알 수 있었다.

#### ABSTRACT

We investigated population of the elliptical galaxy NGC 4649 using the spectral synthesis technique based on the linear program in the spectral regions between 3160Å to 10800Å. We used the spectral data of stars obtained by Gunn & Stryker (1983), and the integrated spectrum of NGC 4649 observed by Bertola et al. (1982). Among four models with different main sequence turn-off points, G8-K0V main sequence turn-off model is best fitted to the integrated spectrum of NGC 4649. We also found that super metal rich K giants are needed to describe the absorption lines in the long wavelength regions of integrated spectrum of NGC 4649. The mass to absolute light ratio obtained from the spectral synthesis is  $\sim 20$  similar to those calculated dynamically.

*Keywords:* population synthesis, elliptical galaxy, NGC 4649

---

<sup>†</sup>corresponding author

## 1. 서 론

우리은하의 경우 별들의 색-광도 관계로부터 별들의 분류와 진화, 그리고 종족개념에 대한 많은 정보를 직접적으로 얻을 수 있으나, 거리가 먼 외부은하들의 경우에는 개개 별들의 관측이 어렵기 때문에 은하내 항성 종족 분포에 대한 정보를 얻는 것이 쉬운 일은 아니다. 그러한 어려움에도 불구하고 외부은하의 누적 스펙트럼으로부터 은하의 항성분포를 알고자 하는 노력은 Morgan & Mayall (1957)에 의해 처음 시도된 이후 지속적으로 이루어지고 있다. 관측기와 컴퓨터의 발전으로 관측 자료의 질이 좋아지고 있으며 별들의 스펙트럼을 합성하여 만든 모델 은하와 관측된 은하의 누적 스펙트럼을 비교하는 종족합성 방법도 발전하였다.

종족합성 방법은 크게 진화론적 종족합성 방법 (Gunn & Stryker 1983)과 적정화 종족합성 (O'Connell 1976, 1980, 1983, Pickles 1985, Gregg 1989) 으로 나누어진다. 진화론적 종족합성은 관측으로부터 얻은 색등급도와 진화 이론에 의해 인위적인 스펙트럼 에너지 분포를 만들어 은하와 같이 구성별들이 분해되지 않는 대상의 스펙트럼과 비교하는 방법이다. 적정화 종족합성 방법은 색등급도에 있는 별들의 스펙트럼을 시행착오로 합성하여 은하의 스펙트럼을 맞추는 방법으로, O'Connell (1986) 등에 의해 여러 항성군의 종족 변수와 파장 영역을 동시에 풀 수 있는 적정화 알고리즘이 개발되었다. 진화론적 종족 합성 방법이 적정화 종족 합성 방법에 비해 좀더 많은 정보를 얻을 수 있으나 항성 진화 이론이 정확해야 하고 진화 이론의 차이가 종족 합성의 결과에 영향을 미치므로 어려움이 많다. O'Connell (1986)에 의하면 진화론적 종족합성 방법과 적정화 종족 합성 방법은 세가지 중요한 제약점을 갖는다. 첫째, 별에 대한 진화 이론의 불안정한 이해로 종족 합성 결과에 큰 변수로 작용한다. 그러나 적정화 종족 합성 방법은 그 영향이 훨씬 적다. 둘째, 불안정한 항성군의 문제이다. 즉, 거대 타원은하 연구에 필요한 항성은 1 ~ 20Gyr의 나이와 0.1 ~ 10 $Z_{\odot}$ 의 중금속 함량을 포함하여야 하지만 그러한 항성군을 종족합성에 일관성 있게 형성한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 마지막으로 누적 스펙트럼에 미치는 나이와 함량의 상호 연관성을 구별해 낼 수 없다는 제약이 있다.

이 연구에서는 적정화 종족합성 방법을 통하여 타원 은하 NGC 4649의 광도 계급과 분광형에 따르는 항성 분포를 알아보고자 한다. 그리고 주계열 상에서 전향점 이전과 이후의 항성군들의 영향을 조사해 보고 이와 연관하여 NGC 4649의 질량대 광도비를 얻어 역학적으로 얻은 값과 비교하였다. 또한 타원은하에서 중금속 함량으로 인한 흡수선의 원인을 초중원소 거성과 보통 거성들의 기여도로 알아본다.

NGC 4649는 처녀자리 은하단에 있는 E2형 은하이다. Illingworth(1977)는 이 은하가 일반적인 타원은하들과 같이 삼축타원체의 특성을 보이고 있음을 보였고, King(1978)도 표면 측광으로부터 측광학적 특이성이 없는 은하로 규정하였다. 그러나 OAO(Orbiting Astronomical Observatory)를 이용한 자외선 관측 결과로부터 Code & Welch (1979)는 2500Å보다 짧은 파장대에서 강한 자외선 복사가 나타나는 현상을 확인하였다. Bertola et al. (1982)은 IUE 관측에서 NGC 4649의 자외선 초과 현상을 다시 한번 확인하였고, Kormendy (1986)는 X선 cooling flow를 관측하기도 하였다.

## 2. 종족합성 모델을 위한 자료

종족합성을 위해 필요한 기본 관측 자료는 우리 은하에서 관측된 별들의 스펙트럼과 연구 대상인 은하의 누적 스펙트럼이다. 별들의 스펙트럼은 Gunn & Stryker (1983)의 자료를 이용하였다. 관

표 1. 종족합성에 사용된 항성군의 물리적 변수

No.	분광형	별의수 ( $V-R$ )	$M(V)$	$\Delta M(V)$	$M/M_{\odot}$	No.	분광형	별의수 ( $V-R$ )	$M(V)$	$\Delta M(V)$	$M/M_{\odot}$	
주계열성						준거성						
1	O5-8	3	-0.39	-5.3	1.65	40.0	19	G2-6	5	0.22	-	1.2
2	B1-2	3	-0.36	-2.8	2.05	11.0	20	G8-K0	4	0.45	-	1.2
3	B3-4	3	-0.32	-1.5	0.85	7.0	21	K1	1	0.61	-	1.2
4	B6-7	2	-0.25	-0.75	0.95	4.85	22	G5-8SMR	4	0.36	-	1.2
5	B9-A0	4	-0.19	0.35	1.15	3.3	거성					
6	A2-5	3	-0.11	1.6	1.25	2.3	23	K0-2	3	0.44	0.6	1.2
7	A9-F2	3	-0.14	3.0	1.35	1.5	24	K3	3	0.47	0.3	1.2
8	F4-6	4	0.08	3.65	0.35	1.3	25	K4-5	2	0.66	-0.1	1.2
9	F8-G0	5	0.18	4.2	0.7	1.1	26	M0	2	0.79	-0.4	1.2
10	G2-5	2	0.24	4.9	0.75	0.9	27	M2-3	4	1.40	-0.6	1.2
11	G8-K0	5	0.29	5.7	0.85	0.83	28	M5	2	1.85	-0.3	1.2
12	K2-4	3	0.42	6.7	1.05	0.76	29	M6-7	3	2.80	-1.0	1.2
13	K5-7	4	0.74	7.75	1.25	0.60	30	G8-K0SMR	3	0.37	0.75	1.2
14	M0	3	0.88	8.8	0.9	0.51	31	K1SMR	2	0.41	0.6	1.2
15	M2	1	1.06	9.9	1.12	0.4	32	K2SMR	1	0.52	0.5	1.2
16	M4	1	1.23	11.3	1.93	0.3	33	K3SMR	2	0.78	0.3	1.2
17	M6	1	1.46	13.5	2.35	0.13						
18	M8	1	1.67	16.0	1.25	0.06						

측한 파장영역은 3130Å에서 10800Å이며 5740Å까지는 20Å, 그보다 긴 파장 영역은 40Å의 분해능을 갖는다. 또한 스펙트럼으로부터 결정된 색지수 ( $U-B$ ,  $B-V$ ,  $V-R$ ,  $R-I$ )들은 측광 관측으로부터 얻은 색들과 비교되어 있다. 이들이 관측한 별들은 색등급도에서 거의 모든 광도계급과 분광형의 별들을 포함하고 있는 장점이 있다.

Pickles(1985)는 스펙트럼으로부터 측정된 ( $V-R$ ) 색지수가 좋은 온도 지시자가 된다고 제시하였다. 이와 같은 이유로 이 연구에서도 항성군을 구분하는 지시자로 ( $V-R$ ) 색을 사용하였다. 총 33개의 항성군을 종족합성의 기본 자료로 구성하였으며, 각 항성군들의 기본적인 물리량들을 표 1에 나타내었다. 표 1은 각 항성군을 형성한 별들의 수와 항성군의 ( $V-R$ ) 값, 절대 등급, 등급 범위, 그리고 질량을 나타내고 있다. 절대등급과 질량 그리고 등급범위의 자료는 Schmidt-Kaler (1982)의 자료를 이용하였다. 종족합성의 입력 자료는 항성군의 다양한 구성도 중요하지만, 파장의 선택도 중요하다. 흡수선과 연속선의 파장을 중복없이 선택하여 계산 시간을 절약해야 하고 종족합성의 해로부터 끌어낼 수 있는 파장에 따른 변화의 해석에도 지장이 없도록 해야한다. 이 연구에서는 대상 은하인 NGC 4649에 대한 분광자료의 제약으로 O'Connell (1973)이 선택한 파장에 가까운 연속선들을 중심으로 53개 파장을 선택하였다. 이렇게 선택한 파장과 각 파장들의 표준오차는 표 2에 나타내었다. 그리고 각 항성군에 대한 규격화된 스펙트럼 에너지 분포는 그림 1에 나타내었다.

NGC 4649의 누적 스펙트럼은 Bertola et al. (1982)의 자료를 이용하였는데, 이 자료는 3200Å에서 5800Å까지는 40Å, 5800Å에서 10760Å까지는 80Å의 간격으로 Paloma 천문대 Hale 망원경으로 관측된 것이다. NGC 4649의 5040Å에 규격화 된 스펙트럼 에너지 분포는 그림 2와 같다. 각 파장에 대한 표준 오차는 위에서 제시한 표 2와 같으며, 종족합성 과정에서 가장 낮은 표준오차를 갖는 파장대에 1의 가중치를 두고 표준오차에 반비례하여 가중치를 주었다.

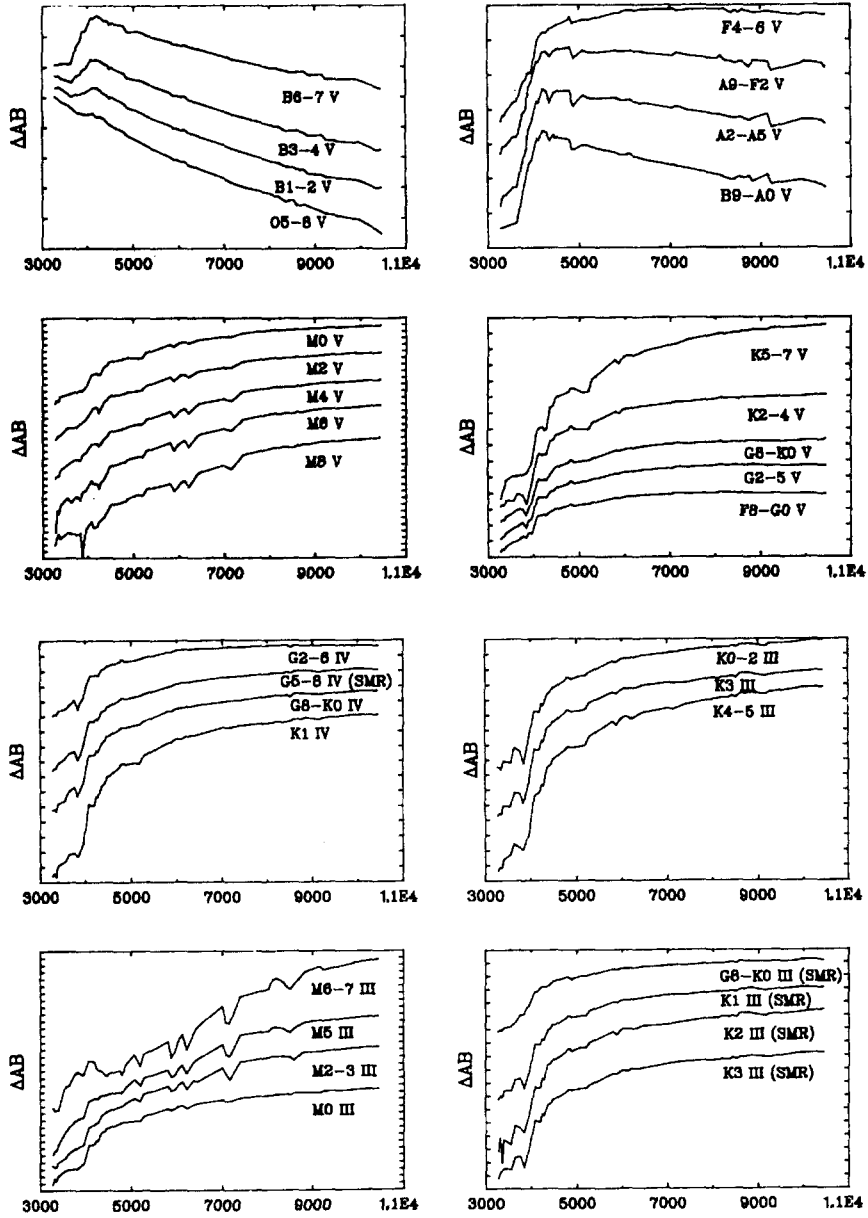


그림 1. 각 항성군의 5040Å에 규격화된 세기. 가로축은 파장으로 Å단위이고 세로축은 5040Å에서의 플럭스에 대해 규격화된 각 파장별 등급이다. 세로축의 간격은 임의로 0.5 mag.이다.

표 2. 종족 합성에 사용된 스펙트럼의 선택 과정과 표준 오차(Bertola et al. 1986). 표준오차의 단위는 mag. 이다.

$\lambda(\text{\AA})$	sd	$\lambda(\text{\AA})$	sd	$\lambda(\text{\AA})$	sd	$\lambda(\text{\AA})$	sd	$\lambda(\text{\AA})$	sd	$\lambda(\text{\AA})$	sd
3280	0.05	3960	0.01	4520	0.01	5880	0.01	7160	0.01	8760	0.02
3320	0.04	4080	0.01	4760	0.01	5960	0.01	7400	0.01	8840	0.02
3360	0.03	4120	0.01	4800	0.01	6040	0.01	8040	0.01	9160	0.02
3400	0.02	4200	0.01	4840	0.01	6120	0.01	8120	0.01	9240	0.02
3560	0.02	4240	0.01	4880	0.01	6200	0.01	8200	0.01	9880	0.02
3640	0.02	4280	0.01	5080	0.01	6360	0.01	8360	0.01	9960	0.02
3760	0.01	4360	0.01	5200	0.01	6440	0.01	8440	0.01	10360	0.02
3840	0.01	4440	0.01	5280	0.01	7000	0.01	8520	0.01	10440	0.02
3880	0.01	4480	0.01	5800	0.01	7080	0.01	8600	0.01	-	-

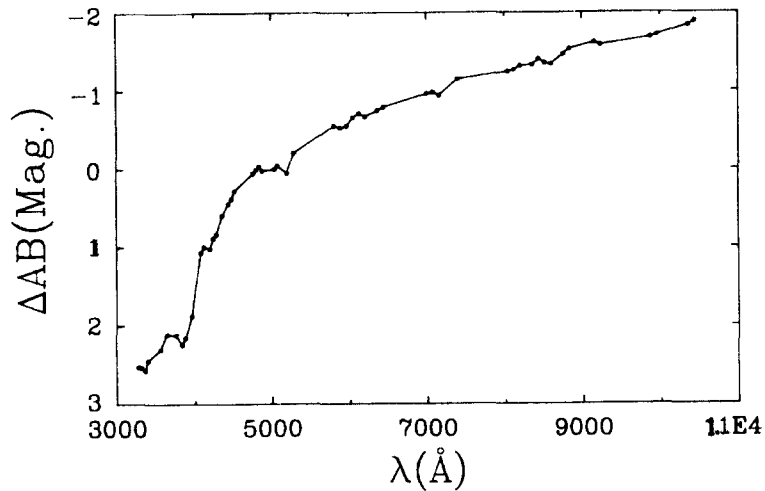


그림 2. NGC 4649의 에너지 분포. 가로축은 파장으로 Å단위이고 세로축은 5040Å에서의 플럭스에 대해 규격화된 각 파장별 단파장 등급이다.

### 3. 종족합성 방법

항성군의 파장에 따른 표준 스펙트럼 에너지 분포가 주어지고 항성군의 스펙트럼을 합성하여 만든 모델 은하의 스펙트럼과 실제 은하의 스펙트럼의 차이를 최소화 시키는 것이 적정화 종족합성 방법이다. 선택한 각 파장마다 각 항성군의 기준 파장에 대한 기여도를 미지수로 한 등식 방정식을 만들 수 있는데, 이러한 방정식을 수학적으로 해결하는 방법에는 선형화 계획(O'Connell 1976, Pickles 1985)과 4차 (quadratic) 계획 (Faber 1972, Pritchett 1977)의 방법이 있다. 이 연구의 종족합성에서는 해의 신뢰성과 문제 해결의 효율성이 보다 좋은 (cf. Turnrose 1976) 선형화 계획 방법을 이용하였다. 한편, 관측한 각 파장은 관측 오차를 포함하고 있어 해의 불확실성이 항상 포함되는데, 천문학적 제한조건을 가하므로 천문학적 해석이 가능한 해를 얻을 수 있다.

#### 3.1 선형화 계획

(n-1)개의 파장에서 m개의 항성군과 은하에 대한 스펙트럼의 자료가 있을 때  $Z_i$ 를  $\lambda_i$ 에서 단위

진동수 당 규격화 된 세기라 하고  $F_{ij}$ 를  $\lambda_i$ 파장에서  $j$ 번째 항성군의 규격화된 세기라고 하자. 그리고  $\lambda_n$ 을 규격화의 기준파장이라 할 때  $X_j$ 를  $\lambda_n$ 에  $j$ 항성군이 기여하는 정도를 나타낸다고 하면 항성군이 합성된 모델 은하의 세기는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$Y_i = \sum_{j=1}^m F_{ij} X_j \quad (i = 1, \dots, n-1) \quad (1)$$

그리고 각 파장에서 모델 은하와 실제 은하와의 스펙트럼 세기의 차이는 식 (2)와 같다.

$$R_i = |1 - Y_i/Z_i| \quad (i = 1, 2, \dots, n-1) \quad (2)$$

은하의 관측오차에 따라 각 파장에 가중치를 준 새로운 변수  $Q$ 를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$Q = \sum_{i=1}^{n-1} W_i R_i \quad (3)$$

여기서  $W_i$ 는  $\lambda_i$ 에 대한 가중치이다. 이때, 종속함성의 선형화 계획은 식 (4), (5), (6)과 같은 부수 방정식을 만족하고  $Q$ 를 최소화하는 미지수  $R_i$ 를 구하는 것이다.

$$\sum_{j=1}^m \frac{F_{ij}}{Z_i} X_j + R_i \geq 1.0$$

$$\sum_{j=1}^m \frac{F_{ij}}{Z_i} X_j - R_i \leq 1.0 \quad (i = 1, \dots, n-1) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^m X_j = 1.0 \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^m C_{ij} X_j \leq B_i \quad (i = 1, \dots, k) \quad (6)$$

식 (4)에서  $R_i$ 는 모델은하와 실제은하의 절대세기 차이를 나타내고 식 (5)는  $\lambda_n$  파장에 대한 각 항성군의 기여도의 합을 1로 규격화함을 나타낸다. 식 (6)은 천문학적 제한 조건으로 제 3-2절에서 설명한다. 선형화 계획은 목적 방정식의  $Q$ 값이  $2n-1+k$ 개의 제한범위 안에서 최소값을 갖는 해를 구한다. 위 식들 중 (4)와 (5)를 본원 제한조건이라 하고 이것 만을 만족시키는 것을 비제한 모델이라 한다. 그리고 천문학적 제한조건인 식 (6)까지 만족시키는 것을 제한모델이라 한다.

위의 선형화 계획으로 해가 구해지면  $j$ 항성군의 별의 수는  $N_j = X_j/L_j$ 로 주어진다. 여기서  $L_j$ 는 기준파장  $\lambda_n$ 에서  $j$ 항성군의 단위 진동수당 절대세기이다. 기준파장이 5040Å일 때,  $L_j$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$L_j = \text{dex}(-0.4M_j/F_{*,j}) \quad (7)$$

식 (7)에서  $M_j$ 는  $j$ 항성군이 갖는 가시(V) 파장 영역의 절대 등급이고  $F_{*,j}$ 는  $j$ 항성군의 5500Å에서의 단위 진동수 당의 규격화된 절대세기이다. 이는 5280Å과 5800Å사이에서 내삽된 값이다. 선형화 계획의 실제적인 계산은 IMSL(International Mathematical and Statistic Library)의 ZXOLP의 부 프로그램을 이용하여 만든 Hwang(1987)의 Code를 개인 컴퓨터에서 사용할 수 있도록 고쳐 사용하였다.

### 3.2 천문학적 제한 조건

종족합성의 해가 천문학적인 근거를 갖기 위해서는 모델 은하와 실제 은하의 스펙트럼만을 선형화 계획으로 단순히 맞추어서는 안된다. 즉, 본원 제한 조건 외에 천문학적인 제한 조건을 가함으로써 실제 은하의 본 모습을 들여다 볼 수 있다. 이러한 천문학적 제한조건 중 중요한 것은 태양 근처의 별에 대한 HR도상에서 볼 수 있는 것처럼 주계열상의 어두운 별일수록 그들의 수가 많아진다는 것이다. 이러한 조건은 타원 은하에도 똑같이 적용될 수 있다. 또 다른 제한 조건은 진화된 별들의 갯수비(number ratio)이다.

천문학적 제한조건을 설정함에 있어서 Pritchett(1977)과 O'Connell(1973, 1976) 등은 태양 주변에서 관측된 별들의 분포를 그대로 적용하거나 타원은하의 중금속량을 설명하기 위해서 초중원소(super metal rich) 거성의 기여도를 많이 주는 등 강한 제한조건을 가하였다. 반면에 Turnrose(1976)와 Hwang(1987) 등은 선형화 계획의 특성을 살려서 느슨한 제한(loose constraint)를 가하였다. 이것은 타원 은하의 구성별들이 태양 주위의 별들과 똑같은 특성을 가질 이유가 없다는 생각에 근거한다. 특히 Hwang(1987)은 O'Connell(1976)과 같은 항성군의 자료와 은하 자료에 느슨한 제한 조건을 가해 종족합성을 하였는데, 초중원소 거성과 보통 거성의 기여비에 대한 O'Connell(1976)의 결과와 다른 결과를 제시함으로써, 강한 천문학적 제한조건을 가해 인위적으로 종족 합성의 결과를 유도하는 방법을 반박했다.

이 연구에서는 가능한한 천문학적 제한조건을 느슨하게 가하였다. 첫째, 주계열상의 별들에 대해서는 등급의 증가에 따른 광도함수의 단순증가를 제한으로 가하였다. 종족 합성에서는 개개의 별 대신에 항성군을 사용함으로써 광도함수는 그 항성군이 갖는 전체 수를 항성군간의 등급차로 나눈 값을 사용한다. 그리고 주계열상에서 항성군간의 갑작스런 증가를 방지하기 위해서 연속조건을 가한다. 이러한 조건들은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \Phi(M_{vj}) &\leq \Phi(M_{vj+1}) \\ \Phi(M_{vj+1})/\Phi(M_{vj}) &\leq UL \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $\Phi(M_{vj})$ 와  $\Phi(M_{vj+1})$ 는  $j$ 군과  $j+1$ 군의 광도함수이고,  $M_j$ 와  $M_{j+1}$ 은  $j$ 군과  $j+1$ 군의 가시 영역 절대등급이다. 연속 제한조건인 상한값(UL)은 O'Connell(1976)의 값을 이용하였다. 모델에서 UL를 진화점 이후 항성군에서 K5-7 항성군까지는 3으로 정하고 M0군에서 M6까지는 5를 택했으며 M6군과 M8군 사이의 광도함수비는 8로 제한하였다. 주계열상의 광도함수비의 상한값은 Salpeter(1955)의 초기 질량함수를 이용하였다. 둘째로 준거성과 거성들의 갯수비는 가능한 한 느슨한 제한조건을 가하였다. 즉, Hwang(1987)이 Iben(1967)과 Tinsley(1972)의 진화이론을 근거로 제시한 제한조건을 주로 이용하였다. 이렇게 선택한 준거성과 거성들간의 제한조건을 표 3에 실었다.

준거성과 거성들의 갯수비는 각각 G8-K0 IV와 K0-2III에 규격화 시켰다. 특히 거성에서 초중원소 거성과 보통의 거성들과의 구별없이 같은 분광형들은 함께 제한하였다. 초중원소 거성의 영향을 알아보기 위해 제한모델에서 초중원소 거성을 모두 제외한 항성군들만 종족 합성을 하여 비교하였다.

표 3. 준거성과 거성들에 대한 갯수비 (number ratio) 제한조건. 하한값과 상한값은 (A 항성군의 수) / (B 항성군의 수)로 나타낸 수비이다. N은 항성군을 나타내며, 하첨자는 표 2에 나타낸 항성군의 분류번호이다.

	A 항성군	B 항성군	하한값	상한값
준거성				
	N <sub>19</sub>	N <sub>20</sub>	0.5	1.5
	N <sub>21</sub>	N <sub>20</sub>	0.5	1.5
	N <sub>22</sub>	N <sub>20</sub>	0.5	1.5
거성				
	N <sub>30</sub>	N <sub>31</sub> +N <sub>32</sub>	0.3	1.4
	N <sub>24</sub> +N <sub>33</sub>	N <sub>23</sub> +N <sub>31</sub> +N <sub>32</sub>	0.5	1.5
	N <sub>33</sub>	N <sub>31</sub> +N <sub>32</sub>	0.5	1.5
	N <sub>25</sub>	N <sub>23</sub>	0.03	0.17
	N <sub>26</sub>	N <sub>23</sub> +N <sub>31</sub> +N <sub>32</sub>	0.025	0.075
	N <sub>27</sub>	N <sub>23</sub> +N <sub>31</sub> +N <sub>32</sub>	0.025	0.075
준거성과 거성 연결조건				
	N <sub>23</sub> +N <sub>31</sub> +N <sub>32</sub>	N <sub>20</sub>	0.5	1.5

#### 4. NGC 4649의 항성분포

제 2절에서 만든 항성군의 모음과 제 3절에서 설명한 종족합성 방법을 NGC 4649 은하에 적용하여 분광형과 광도 계급에 따르는 항성 분포를 알아보았다. 우선 선택한 항성군의 완전성과 관측 오차, 그리고 가중치의 영향을 알아보기 위해 본원 제한 조건만 가한 비제한 모델을 세운다. 그리고 전향점의 변화에 따라 4가지의 모형을 세우고 각 모형에 제 3절에서 정한 천문학적 제한 조건을 가해 제한 모델 결과를 분석한다.

##### 4.1 비제한 모델

제 3절에서 서술한 선형화된 계획의 방법중, 본원 제한 조건만을 만족시키는 비제한 모델의 해는 천문학적 근거가 없는 단순한 수학적 연립 방정식의 적정화된 해이다. 그러나 비제한 모델의 해로부터 선택한 항성군들의 모음이 적당한 것인가를 알 수 있다. 또한 관측오차를 고려한 가중치와 관측 오차가 종족합성의 해에 주는 영향을 알 수 있다. 비제한 모델로부터 모델 은하와 실제 은하의 스펙트럼을 맞출 수 없다면 선택한 항성군에 없는 다른 복사원이 있다는 것을 뜻한다.

이 연구에서의 비제한 모델은 타원은하의 과다한 자외선 방출의 근원이 되는 항성종족들 중에서 주계열의 젊은 별만을 포함하고 있기 때문에 NGC 4649의 강한 자외선 방출의 원인을 구체적으로 논하기는 어렵다. 또한 종족 II의 구상성단에 대한 자료도 포함하고 있지 않으므로 항성군의 완전성 문제에 약점이 있다. 그러나 NGC 4649의 종족합성에서 젊고 질량이 큰 항성군의 전체적인 기여도와 NGC 4649의 스펙트럼에 가장 큰 영향을 가지고 있는 항성군이 어느 것인가는 알 수 있다.

표 4는 기준 파장이 5040Å일 때의 비제한 모델에 대한 결과이다. 이 결과에서 종족 합성의 정밀도를 가려주는 적정도( $\epsilon$ )는 식 (9)와 같이 정의한다.

$$\epsilon = \frac{Q}{\sum_{i=1}^{n-1} W_i} \tag{9}$$

여기서 Q는 제 3절에서 정의한 바와 같이  $Q = \sum_i R_i$ 이다. NGC 4649의 각 파장별 표준 오차에 의해서 구해지는 관측적 적정도는 표 2의 각 파장별 표준 오차로부터  $\epsilon = 0.015$ 로 계산되었다. O'Connell (1976)에 의하면 종족 합성의 받아들일 만한 결과를 얻기 위해서는 관측적으로 주어지는 적정도 값



표 4. 비제한 종족합성 모델의 결과

변수	초중원소 거성을 포함한 경우	초중원소 거성을 제외한 경우
100 <sup>c</sup>	2.67	2.70
M/L(V)	14.2	6.68
짧은별(F4-6이전) 이 기여하는 백분율	0.54	0.31
기여도가 큰 항성군	G8-L0V K1 IV K3 III	G8-K0 V K1 IV K3 III
초중원소 거성의 기여도	16.23	-

의 50% 보다는 작아야 항성군의 완전성을 얻을 수 있고 이로부터 나온 결과가 항성군의 스펙트럼에만 의존하는 것으로 믿을 수 있다고 지적하였다. 이 연구에서 사용한 항성군으로부터 얻은 비제한 모델의 이론적 적정도는  $\epsilon = 0.0269$ 로서 신뢰성의 범위인 0.0225보다 조금 큰 값을 보인다. 그러므로 항성군의 형성에 약간의 문제성이 있으나, 모형은하와 실제은하의 스펙트럼에서 나타나는 각 파장 대별 단파장 등급의 차이인 Residue의 체계적인 변화가 없고 가중치나 관측오차의 영향에 비제한 모델의 결과가 큰 영향을 받지 않기 때문에 이 연구에서 이론 항성군을 종족 합성의 자료로 삼는 데는 큰 지장이 없다.

비제한 모델의 결과는 단지 수학적인 것이므로 실제 은하의 모습을 알 수는 없으나 제한 모델을 세우는데 근간이 될 수 있다. 표 4의 결과에서 보는 바와 같이 주계열 상에서 G8-K0V의 항성군이 가장 기여도가 크다. 이러한 비제한 모델의 결과는 NGC 4649의 전향점 항성군을 예시하고 있고, 이는 제 4-2절에서 논의될 제한 모델에서 확인할 수 있다. 비제한 모델의 결과에서 초중원소 거성 특성을 검토하기 위해 초중원소 거성을 항성군에서 제외 시킨 비제한 모델을 세워보았다. 표 4에서 보는 바와 같이 적정도에서 초중원소 거성들을 포함했을 경우와 차이가 크지 않고, 이들의 영향은 보통의 K형 거성들이 보완해 주고 있다.

선택한 각 파장에 가한 부적절한 가중치는 결과에 영향을 끼칠 수 있으므로, 각기 다른 가중치를 준 비제한 모델을 구성하여 그 영향을 알아보았다. 각 파장에 꼭 같은 가중치를 준 경우와 임의의 가중치를 준 경우, 그리고 관측된 표준오차에 반비례하여 가중치를 준 경우에 대한 비제한 모델의 결과를 그림 3의 a, b, c에 각 파장 별로 나타내었는데, 파장에 따른 Residue의 변화가 주어진 가중치에 의해 큰 차이를 보이지 않는다. 그림 3의 d에는 관측오차 범위 안에서 은하의 규격화 된 최대 세기와 최소 세기를 교대로 각 파장에 가한 비제한 모델의 결과이고 그림 3의 e는 각 파장에 대하여 최대의 세기를 가한 비제한 모델의 결과이다. 이 경우 적정도의 값이 다른 경우에 비해 비교적 크지만 종족합성의 결과에 큰 영향을 미칠 정도는 아니다. 이로써 이 연구에서 선택한 항성군으로 이론 종족합성의 결과는 가중치나 관측오차에는 의존하지 않고 항성군의 스펙트럼에만 의존한다는 사실을 알 수 있다.

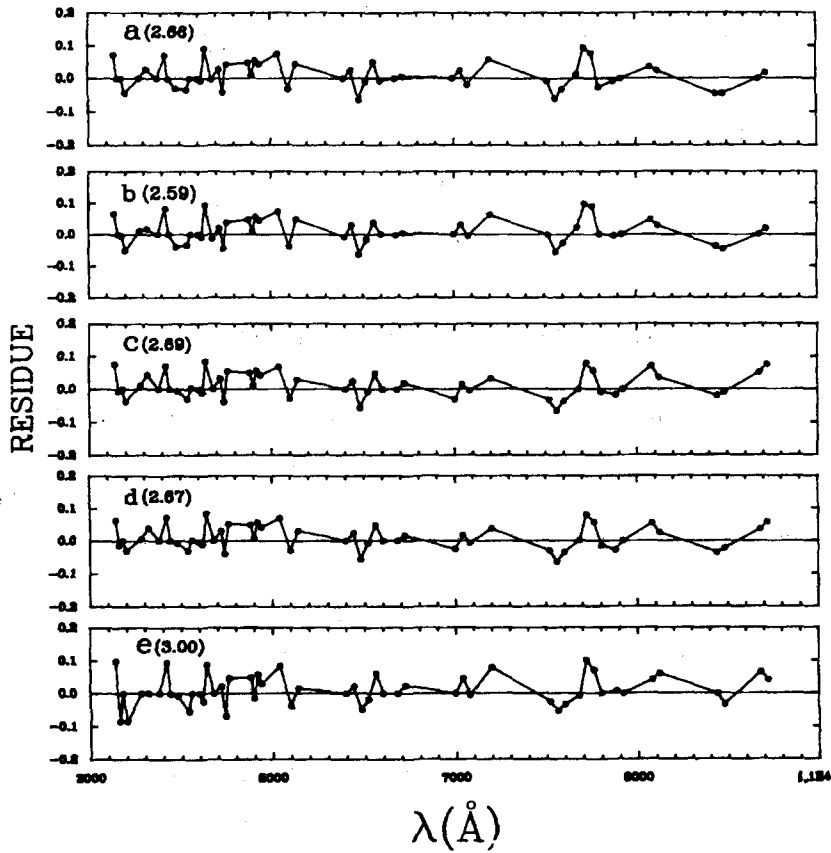


그림 3. 비제한 모델에서 가중치와 관측 오차의 영향을 조사하기 위한 과정에 따르는 Residue의 변화. 가로축은 파장이고 세로축은 Residue로서 모형은하와 실제 은하의 스펙트럼에서 나타나는 각 파장대별 단파장 등급의 차이이다. 괄호 안의 수는 적정도 ( $100^\circ$ )이다.

#### 4.2 제한 모델

종족합성의 문제에서 천문학적으로 해석이 가능한 해를 얻기 위하여 비제한 모델에서 사용한 본원 제한 조건외의 천문학적 제한 조건이 필수적이다. 이 연구에서 사용한 천문학적 제한 조건은 제 3-2절에서 이미 설명하였다. 주계열과 준거성 그리고 거성에 가한 제한 조건 이외에 종족 합성의 문제에서 고려하여야 할 것은 은하의 내부 적색화이지만, 타원 은하의 경우 내부 적색화의 영향이 거의 없다고 생각할 수 있으므로 이 연구의 종족합성 결과에는 영향이 없는 것으로 가정하였다.

전향점 항성군에 따라 4개의 모형을 세우고 표 5에 각 모형들에 대한 기본 변수를 나타내었다. 각 모형에 따른 나이와 준거성의 절대 등급은  $Y=0.23$ 과  $Z=0.02$ 에 해당하는 Yale isochrone (Green et al. 1987)에서 택하였다. O'Connell (1976)과 Hwang(1987)의 M 31에 대한 연구에서 G0-5V의 항성군의 전향점 군으로 결정한 것이지만 제 4-1절의 비제한 모델에서 G8-K0V 주위의 항성군이 중요하

표 5. 제한 모델 종족 합성에서 선택한 모형의 기본 변수

모형	나이( $\times 10^9$ yrs)	전항점 항성군	M(V)
A	3	F4-6	2.77
B	5	F8-G0	3.27
C	7	G2-5	3.60
D	13	G8-K0	4.43

표 6. 제한 모델 종족 합성으로 부터 계산된 기준 파장 5040Å에 대한 항성군의 기여도. A, B, C, D는 표 5에서 제시된 서로 다른 모형들을 나타낸다.

No.	분광형	A	B	C	D	No.	분광형	A	B	C	D
주계열성						준거성					
1	O5-8	0.61	0.70	0.86	0.79	19	G2-6	1.25	1.34	2.12	0.00
2	B1-2	0.00	0.00	0.00	0.00	20	G8-K0	2.26	2.42	3.81	1.67
3	B3-4	0.00	0.00	0.00	0.00	21	K1	3.08	1.89	1.73	0.76
4	B6-7	0.00	0.00	0.00	0.00	22	G5-8SMR	3.66	3.92	6.17	1.13
5	B9-A0	0.00	0.00	0.00	0.00	거성					
6	A2-5	0.00	0.00	0.00	0.00	23	K0-2	17.02	16.58	18.12	2.57
7	A9-F2	0.00	0.00	0.00	0.00	24	K3	24.89	30.18	21.72	24.98
8	F4-6	0.83	0.00	0.00	0.00	25	K4-5	0.79	0.77	0.84	0.12
9	F8-G0	2.81	2.98	0.00	1.14	26	M0	0.84	2.45	1.01	1.51
10	G2-5	4.57	4.85	4.56	0.00	27	M2-3	1.85	1.41	1.75	1.19
11	G8-K0	7.30	7.74	7.28	18.05	28	M5	0.00	0.00	0.00	0.00
12	K2-4	9.26	9.83	9.25	7.64	29	M6-7	0.12	0.13	0.12	0.15
13	K5-7	8.65	8.87	8.99	8.00	30	G8-K0SMR	0.00	0.00	0.72	0.00
14	M0	2.26	2.32	2.35	2.09	31	K1SMR	0.00	0.00	2.29	15.73
15	M2	0.99	1.01	1.03	0.91	32	K2SMR	0.00	0.00	0.00	0.00
16	M4	0.48	0.49	0.50	0.45	33	K3SMR	6.40	0.00	4.67	10.67
17	M6	0.07	0.07	0.07	0.31						
18	M8	0.03	0.03	0.03	0.13						

계 나타난 것으로 보아 이 연구에서 F4형과 K0형 사이에 NGC 4649의 전항점이 존재하리라는 생각은 타당하게 여겨진다.

표 6의 결과는 제한 모델의 각 모형 은하들에서 항성군들이 5040Å의 기준 파장에 기여하는 기여도를 백분율로 나타낸 것이고, 표 7의 결과는 각 항성군들이 갖는 별의 수이다. 그리고 그림 4는 각 모형의 파장에 따른 Residue의 변화를 나타내고 있다. 표 8에 각 모형들에 대해 제한 모델 종족 합성법으로 계산된 적정도와 모델 은하의 총 질량, 그리고 질량대 광도비를 나타내었다. 서로 다른 전항점 항성군을 갖는 각 모형들중 NGC 4649의 경우에 가장 잘 맞는 경우는 적정도를 비교하여 결정된다. 표 8에 나타난 적정도의 비교에서 뿐만 아니라, 그림 4에 나타난 파장에 따른 Residue의 변화에서 볼 때 G8-K0V의 전항점 항성군을 갖는 모델 D의 경우가 NGC 4649의 가장 적절한 모형으로 나타남을 알 수 있다. 모델 D의 경우 M6V나 M8V의 항성군과 초중원소 KIII 항성군이 다른 모델의 경우 보다 기여정도가 크다는 사실을 볼 수 있다.

제한 모델 종족 합성에서 초중원소 거성들의 기여도를 조사해 보았는데, 적정도가 가장 좋은 모형 D에 대해서 초중원소 거성들을 제외시키고 종족 합성을 한 결과 비제한 모델의 결과와 매우 비슷함을 알 수 있었다. 표 8의 결과에서 보여주는 바와 같이 초중원소 K거성의 26.4% 기여 정도는 초중원소 거성들을 제외 시켰을 때 K0-2 거성이 보완해 주는 반면, 파장에 따르는 Residue의 변화는 그

표 7. 제한 모델 종족 합성으로 부터 계산된 항성군 내의 별들의 개수. A, B, C, D는 표 5에서 제시된 서로 다른 모형들을 나타낸다.

No.	분광형	A	B	C	D
주계열성					
1	O5-8	3.86E+04	4.45E+04	5.45E+04	5.02E+04
2	B1-2	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
3	B3-4	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
4	B6-7	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
5	B9-A0	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
6	A2-5	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
7	A9-F2	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
8	F4-6	2.45E+08	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
9	F8-G0	1.47E+09	1.55E+09	0.00E-01	5.97E+08
10	G2-5	4.73E+09	4.99E+09	4.71E+09	0.00E-01
11	G8-K0	1.60E+10	1.69E+10	1.60E+10	3.96E+10
12	K2-4	5.96E+10	6.29E+10	5.94E+10	4.89E+10
13	K5-7	1.86E+11	1.90E+11	1.93E+11	1.71E+11
14	M0	1.33E+11	1.36E+11	1.39E+11	1.23E+11
15	M2	1.66E+11	1.70E+11	1.73E+11	1.53E+11
16	M4	2.87E+11	2.93E+11	2.98E+11	2.64E+11
17	M6	3.49E+11	3.57E+11	3.63E+11	1.61E+12
18	M8	1.48E+12	1.52E+12	1.54E+12	6.85E+12
준거성					
19	G2-6	1.86E+08	3.14E+08	6.74E+08	0.00E-01
20	G8-K0	3.72E+08	6.28E+08	1.34E+09	1.26E+09
21	K1	5.58E+08	5.41E+08	6.74E+08	6.30E+08
22	G5-8SMR	5.58E+08	9.43E+08	2.02E+09	7.92E+08
거성					
23	K0-2	3.72E+08	3.61E+08	3.96E+08	5.58E+07
24	K3	4.48E+08	5.41E+08	3.91E+08	4.48E+08
25	K4-5	1.11E+07	1.08E+07	1.18E+07	1.67E+06
26	M0	9.30E+06	2.70E+07	1.12E+07	1.67E+07
27	M2-3	2.04E+07	1.55E+07	1.93E+07	1.31E+07
28	M5	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
29	M6-7	1.27E+06	1.35E+06	1.29E+06	1.57E+06
30	G8-K0SMR	0.00E-01	6.81E-06	1.60E+07	0.00E-01
31	K1SMR	5.84E-06	1.20E-05	5.33E+07	3.64E+08
32	K2SMR	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01	0.00E-01
33	K3SMR	1.09E+08	3.88E-05	8.00E+07	1.82E+08

표 8. 제한 모델 종족 합성의 일반적 결과

변수	A	B	C	D
나이( $10^9$ yrs)	3	5	7	13
100	2.94	2.94	2.93	2.85
M/L(V)	4.62	4.74	4.80	8.65
총질량( $10^{11} M_{\odot}$ )	5.36	5.50	5.56	10.03
5400Å에 대한 광 기여도				
주계열성	37.86	38.89	34.92	39.51
준거성	10.25	9.57	13.83	3.56
KIII	41.91	46.76	39.84	27.55
MIII	3.60	3.99	2.88	2.85
초중원소 KIII	6.40	-	7.68	26.40

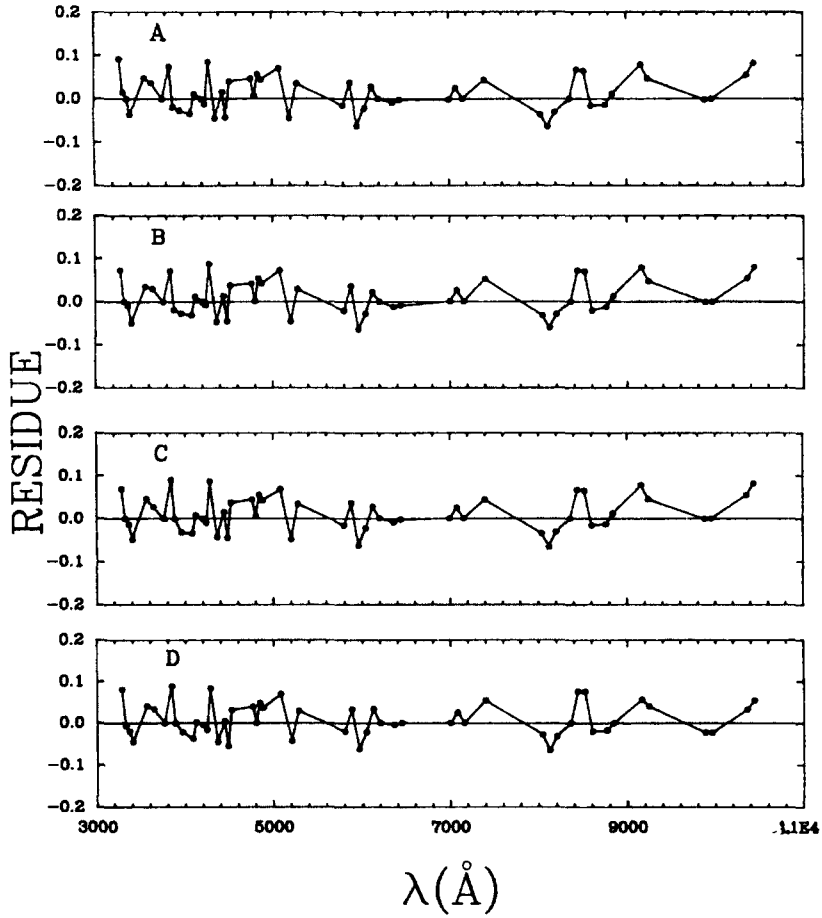


그림 4. 제한 모델 종족 합성에서 각 모형들의 파장에 따르는 Residue의 변화. 여기서 Residue는 모형은하와 실제 은하의 스펙트럼에서 나타나는 각 파장대별 단파장 등급의 차이이다.

림 5에 나타난 바와 같이 장파장 영역에서 모형은하의 플럭스가 실제 은하보다 전반적으로 크게 나타난다. 적정도값에는 큰 차이가 없지만 초중원소 거성이 있을 때 장파장 영역에서 더 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 그림 5에서 O'Connell (1976)과 같은 방법으로 보통 K형 거성들을 제외시키고 종족합성을 해 본 결과 파장에 따른 Residue의 변화는 보통 거성과 초중원소 거성을 포함한 종족합성의 결과와 비슷하지만 적정도에서 0.0292로 더 크게 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 장파장 쪽의 스펙트럼에는 보통 거성보다는 초중원소 거성의 기여가 크다는 사실을 알 수 있다.

그림 6의 결과는 8040Å을 기준 파장으로 한 제한 모델 종족 합성 모형들에 대한 광도 함수이다. 모든 모형에서 전향점 이후 광도 함수의 일정한 증가를 보이지만 모형 A, B에서는 K2형 이후의 광도 함수가 일정하고 모형 C, D에서는 K5형 이후의 광도 함수가 일정함을 볼 수 있다.

표 9에 NGC 4647의 질량대 광도비 (M/L)를 나타내었다. M/L(B) 값은 NGC 4649의 절대등급

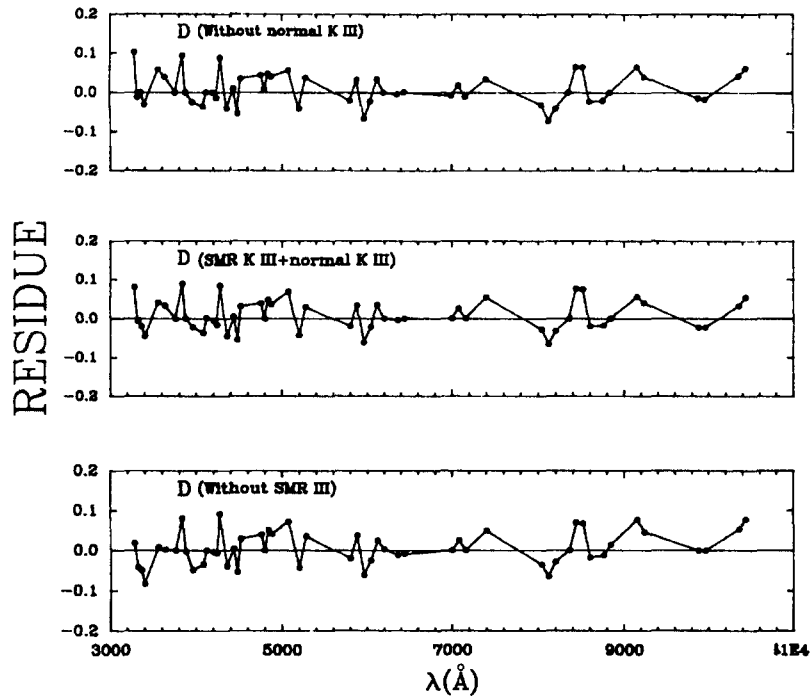


그림 5. 제한 모델 종족 합성의 모형 D에서 초중원소 거성의 영향을 알아보기 위한 파장에 따르는 Residue의 변화. SMR은 초중원소 (super metal rich)를 나타낸다.

표 9. NGC 4649의 질량대 광도비.

중심거리	M/L(B)	
260 pc	19	Lauer (1985)
550 pc	20.04	이 연구
20.1 Kpc	24	Forman et al. (1985)

을  $M(B) = 21.87$  (Sandage & Tammann 1981) 이라고 했을 때, 모형 D의  $M/L(V)$  값을 변환시켜 얻은 값이다. 그리고 이 연구에서 사용한 NGC 4649의 누적 스펙트럼 자료 (Bertola et al. 1982)는 14 arcsec 각지름으로 관측된 것이므로 이 은하의 거리를 16.8 Mpc (Tully 1988)로 채택하면 중심에서 550 pc을 반경으로 하는 지역의 누적 스펙트럼에 해당한다. 표 9의 260 pc과 20.1 kpc 까지의 거리에 대한  $M/L(B)$  값은 역학적으로 구한 값들인데 (Lauer 1985, Forman et al. 1985). 종족합성으로 구한 값과 매우 유사할 뿐만 아니라 은하 중심으로부터 거리에 대한 질량대 광도비 값이 큰 변화가 없음을 알 수 있어, NGC 4649의 중심거리에 대한 항성종족의 분포 특성이 비슷하다는 사실을 유추할 수 있다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 적정화 종족합성의 선형화 계획을 통하여 광도 계급과 분광형에 따른 타원은하

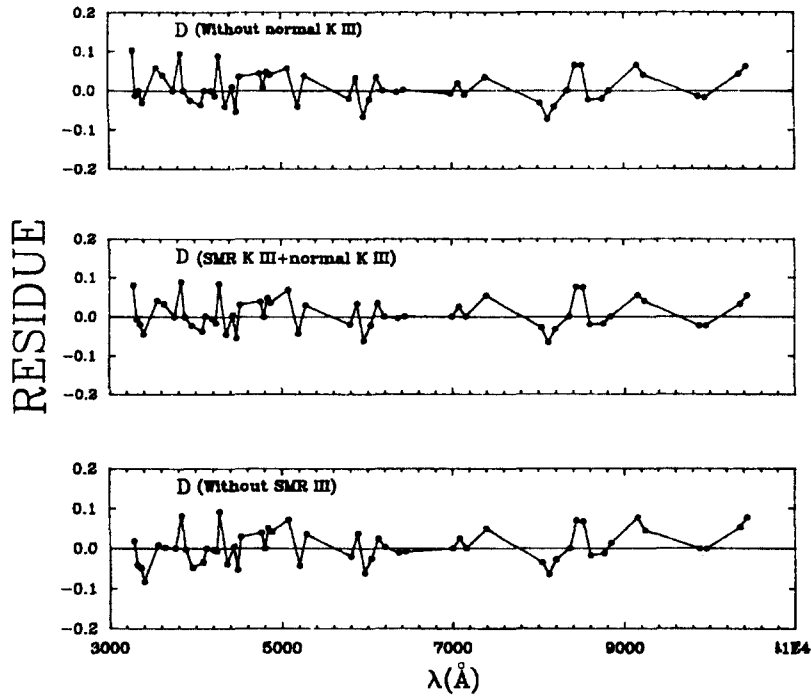


그림 6. 제한 모델 종족 합성의 모형들에 대해 8040Å에 규격화된 광도함수.

NGC 4649의 항성분포를 알아보았다. 느슨한 천문학적 제한 조건을 가함으로써 선형화 계획의 자체 맞춤 (self-adjustment)의 특성을 살렸다.  $V - R$  색지수를 지시자로 하여 33개의 항성군을 구성한 후 비제한 모델을 이용하여 이들 항성군의 완전성을 확인하였다. 다른 전향점을 가지는 4개의 모형을 Yale isochrone (Green et al. 1987)을 사용하여 이루어 제한 모델로부터 종족 합성을 시도하였다.

4개의 모형중 전향점 항성군이 G8-K0V인 모형이 가장 적정도가 좋았다. Yale isochrone으로부터 정한 나이는 130억년이었고 질량은  $1.0 \times 10^{12} M_{\odot}$  이었다. 파장 5040Å에 대한 각 항성군의 광기여도는 주계열성이 39.5%, 보통 K형 거성이 27.6%, 그리고 초중원소 K형 거성이 26.4%로 다른 모형들에 비해 초중원소 거성의 비율이 높았다.

초중원소 거성에 대한 보통 거성의 비율은 모형 A, B, C에서는 적었지만, 모형 D에서는 거의 비슷함을 알 수 있었다. 그러나 초중원소 거성을 항성군에서 제외시켰을 때 장파장 영역에서 잘 맞지 않았고 보통 K형 거성을 항성군에서 제외 시켰을 때는 Residue의 변화 양상은 비슷하지만 적정도가 떨어졌다. 그러므로 초중원소 거성이 장파장 영역에서 흡수선을 만든다고 할 수 있다.

모형 D의 광도 함수는 전향점 이후 증가를 보이다가 K5-7V 항성군 이후 거의 일정하였다. 이 연구에서 사용한 NGC 4649의 누적 스펙트럼은 14 arcsec 영역으로 거의 중심부 (550pc)에 해당된다. 종족합성으로부터 얻어진 질량대 광도비는 역학적으로 구한 값들과 비슷하게 나왔으며, 중심거리에 대한 변화도 거의 일정함을 보여, NGC 4649의 중심거리에 대한 항성종족의 분포 특성이 비슷하다는 사실을 유추할 수 있다.

한편, 서론에서 지적한 바와 같이 NGC 4649는 자외선 방출이 다른 타원은하들에 비해 훨씬 강한 특이성을 가지고 있다. 따라서 이 현상을 종족 합성법으로 연구하기 위해서는 자외선 영역을 포함한 스펙트럼 자료와 보다 많은 균질의 항성군에 대한 정밀 스펙트럼 자료모음이 필요하다.

### 참고문헌

- Bertola, F., Capaccioli, M., & Oke, J. B. 1982, *ApJ*, 254, 494  
Code, A. D., & Welch, G. A. 1979, *ApJ*, 228, 95  
Faber, S. M. 1972, *AA*, 20, 361  
Forman, W., Jones, C., & Tucker, W. 1985, *ApJ*, 293, 102  
Green, E. M., Demarque, P., & King, C. R. 1987, *Revised Yale Isochron*  
Gregg, M. D. 1989, *ApJ*, 337, 45  
Gunn, J. E., & Stryker, L. L. 1983, *ApJS*, 52, 121  
Hwang, Y. O. 1987, MS Thesis (Seoul National University)  
Iben, I. 1967, *ApJ*, 178, 319  
Illingworth, G. 1977, *ApJ*, 218, L43  
King, I. 1978, *ApJ*, 222, 1  
Kormendy, J. 1986, *Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*, ed. T. De Zeeuw (Dordrecht: Reidel), 17  
Lauer, T. R. 1985, *ApJ*, 292, 104  
Morgan, W. W., & Mayall, N. U. 1957, *PASP*, 69, 291  
O'Connell, R. W. 1973, *AJ*, 78, 1074  
O'Connell, R. W. 1976, *AJ*, 206, 370  
O'Connell, R. W. 1980, *AJ*, 236, 430  
O'Connell, R. W. 1983, *AJ*, 267, 80  
O'Connell, R. W. 1986, *Spectral Evolution of Galaxies*, ed. C. Chiosi & A. Renzini (Dordrecht: Reidel), 167  
Pickles, A. J. 1985, *ApJS*, 59, 33  
Pritchett, C. 1977, *ApJS*, 35, 397  
Salpeter, E. E. 1955, *ApJ*, 121, 161  
Sandage, A. & Tammann, G. A. 1981, *A Revised Shapley-Ames Catalog of Bright Galaxies* (Washington, D. C.: Carnegie Institute), 48  
Schmidt-Kaler, J. 1982, *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology Group IV*, ed. K. Schaifers and H. H. Vogt (Berlin: Springer-Verlag), 14  
Tinsley, B. M. 1972, *ApJ*, 178, 319  
Tully, R. B. 1988, *Nearby Galaxies Catalog* (Cambridge: Cambridge Univ.), 117  
Turnrose, B. E. 1976, *ApJ*, 210, 33