

HII 영역 분광자료를 통한 M31과 M33의 화학원소 결정 CHEMICAL ABUNDANCE ANALYSIS OF M31 AND M33 BASED ON THE SPECTRUM OF HII REGIONS

한수련¹, 형식², 박홍서¹, 이우백²

¹한국교원대학교 지구과학교육과

²한국천문연구원

SOO RYEON HAN¹, SIEK HYUNG², HONG-SUH PARK¹, AND WOO-BAIK LEE²

¹Earth Science Education, Korea National University of Education, Chung-Buk, Korea

²Korea Astronomy Observatory, Hwaam-dong, Yusong-Ku, Taejon 305-348, Korea

(Received Mar. 12, 2001; Accepted Apr. 6, 2001)

ABSTRACT

Chemical evolution of galaxies can be understood by studying the spatial distribution of heavy elements. We selected two nearby galaxies, M31 and M33 and investigated spectrum of their HII regions: a) the electron densities have been derived from the [S II] 6717/6731 ratio along with the most recent atomic constants (Hyung & Aller 1996); b) the electron temperatures were determined from the Pagel's empirical method. Nebula Model (Hyung 1994) has been employed to predict the spectral line intensities which gives the proper chemical abundances. The model would predict the line intensities correctly only when various input parameters such as the effective central star temperatures, gravity log g, model atmosphere as well as the geometry and the nebula physical condition are appropriate. Thus, the determination of chemical abundances of O, S, N of the two nearby galaxies M31 and M33 has been done, which shows a radial dependence of O/H and N/H: decrease with the distance, or increasing electron temperature due to the elemental deficiency. Abundances of M31 appear to be enhanced than those of M33.

Key words: M31, M33: HII regions: abundances: photoionization models

I. 서 론

여러 화학원소들의 핵융합은 질량이 다른 별들에서 진행되므로, 나선은하의 원반에서 원소 함량에 관한 연구는 이들 은하들에서 별형성과 진화를 이해하는 중요한 방법이다. 성간매질의 원소함량은 행성상 성운 (planetary nebulae, PNe) 또는 전리수소영역 (HII region)들과 같은 이온화된 성운들의 스펙트럼을 이용해 추정될 수 있다. 은하내에서 화학성분의 공간적인 기울기 (gradient)의 존재는 Searle (1971)에 의해 시도된 이래 많이 알려져 왔다. 그런데 현재 외부은하의 성간물질의 중원소 함량비를 항성 분광관측으로 구한다는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 반면에, HII 영역은 은하의 나선팔을 따라서 은하면상에 널리 분포되어 있고, 또 그 표면 밝기가 비교적 높은 편이어서 외부 은하들에서도 분광관측이 용이하다. 한편 현재 성간매질의 함량을 추정할 때, 행성상 성운의 이온화 가스는 중심별에 의해 만들어진 자체 기여에 의해 영향을 받기 때문에, 행성상 성운보다 HII 영역을 통

한 함량분석법이 더욱 선호된다.

지난 수 십 년동안 진보된 디지털 검출기와 개선된 성운 이온화 구조의 결과로 외부은하 HII 영역들의 화학성분에 대한 연구가 진척되었다. 이들 연구의 주목적은 나선은하의 원반을 가로지르는 화학원소함량 기울기 (radial abundance gradient)를 확립하는데 있다. 많은 가까운 밝은 은하들이 자세히 조사되었는데, M101 (Searle 1971; Smith 1975; Shields & Searle 1978; Rayo et al. 1982), M33 (Kwitter & Aller 1981), M83 (Dufour et al. 1980), M51 (Smith 1975) 등 많은 나선은하들에서 원소 함량의 기울기의 실재가 확립되었다.

본 연구에서는 가까운 외부은하 (nearby galaxy) M31, M33의 HII 영역들의 분광자료를 조사하고, 이를 이용해 최신의 원자상수 (atomic constants)를 적용한 diagnostics (Hyung & Aller 1996) 분석법을 통해 그 천체들의 전자온도와 전자밀도를 결정하고, 항성대기 모델을 통해 중심별의 에너지 스펙트럼 분포를 구해 Nebula Model (Hyung 1994)로 화학적 성분을 결정하고자 한다.

II. 선행 연구 및 연구 배경

화학원소는 은하의 진화에 중요한 단서를 제공한다. 이온화 성운 (ionized nebulae)들은 화학원소 측정에 중요한 수단 중의 하나인데, 특히 외부은하인 경우 아주 결정적인 역할을 한다. 지금까지 많은 연구들에서 나선은하와 불규칙 은하에서 원소 함량의 패턴을 조사해 왔으며 (Dinerstein 1990; Shields 1990), 이러한 연구 결과 더 밝은 외부 은하들에서 높은 원소함량을 보인다는 것을 알았다 (Garnett & Shields 1987). 또한 나선은하들의 원반을 가로질러 은하중심으로부터 거리에 따른 원소함량의 기울기(radial abundance gradient)를 보인다 (Shields 1971; Smith 1974). 이것은 곧 화학원소가 은하의 환경에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

많은 경우 가까운 나선은하들의 원소함량 기울기가 HII 영역과 행성상 성운으로부터 결정되었으나, M31의 경우는 시선에 대한 작은 기울어짐과 크고 밝은 HII 영역의 부족으로 그 연구 결과가 부족했었다. Rubin & Ford (1970)는 은하의 Kinematics 연구를 위해 M31의 전체 광학 영역에 걸쳐 53개의 방출선 영역의 영상관 (image tube) 분광관측을 얻었고, Rubin et al. (1972)은 이들 데이터를 가지고 어떤 선들의 비가 은하 반경에 따라 체계적으로 변하는 경향이 있음을 보였다. 그러나 이들 데이터는 선 세기가 정확하다고 볼 수는 없었다. 그 이후로, Dennefeld & Kunth (1981)는 원소함량 기울기 연구를 위해 M31에서 6개의 SNR과 8개의 HII 영역을 관측했으며, Blair et al. (1982)은 SNR과 비교하고자 11개의 HII 영역의 분광자료를 얻어 Pagel et al. (1979)의 경험적 방법에 의해 HII 영역에 대한 전자온도와 화학적 함량을 결정했다. 또한 Jacoby & Ciardullo (1999), Richer et al. (1999)은 M31과 M32의 행성상 성운들에 대한 분광관측을 통해 정확한 전자온도를 결정하고, 관측된 O⁺와 O⁺⁺ 선들과 쉽게 관측되는 He 선들을 이용해 (Kingsburgh & Barlow 1994) 산소함량을 결정했다.

M33의 경우 Kwitter & Aller (1981)는 HII 영역의 분광관측을 통해 전자온도를 결정하고, 화학성분 (S, Cl, Ar 등)에 대한 이온화 수정값 (ionization correction factor, ICF)을 확립하기 위한 내삽 방법으로 이론적인 모델을 적용하여 화학성분을 결정했으며, Vilchez et al. (1988)은 HII 영역들의 선세기비를 이용해 전자온도와 전자밀도를 구하고, ICF를 적용하여 O, N, S의 함량을 결정하였다.

이 연구에서는 외부은하 안에 있는 성간 물질의 중원소 함량비 결정에 HII 영역의 분광관측자료를 분석하고, 이를 토대로 숙주 또는 모체 은하의 화학적 진화를 연구하는 것이 이 연구의 목적이다. 우리는 HII 영역이 존재하는 성간 공간과 그 공간을 채우는 성간 매질, 특히 그 중에서 기체성운들에 대한 성질을 광 이온화 모델 (photoionization model)을 통해 분석하고, 그 결과를 모체 은하의 화학성분을 추정하는데 적용하려 한다.

III. M31 및 M33의 HII 영역의 분광관측자료 분석

(a) 두 은하내의 HII 영역 관측자료

본 연구에서는 가까운 은하인 M31, M33을 연구 대상으로, 그 은하에 위치한 밝은 HII 영역들을 선정하여 화학적 원소함량을 결정하였다. 그들에 대한 특징을 살펴보면, M31, 즉 안드로메다 은하 (Andromeda galaxy)는 우리와 가장 가까운 SC형 나선은하로, M32와 M110을 동반 은하로 갖는다. Meyssonier et al. (1993)은 대물 프리즘 탐사를 통해 M31의 방출선 천체들을 동정했는데, 1200개 이상의 행성상 성운과 67개 정도의 HII 영역들을 발견했다. SC형의 만기형 나선은하인 M33은 다른 은하에 비해 상당히 작고 젊은 별들의 구름에 의해 푸르게 보이고, HII 영역들은 상당히 붉게 보인다. M33은 HII 영역이 풍부한데, Hodge et al. (1999)은 1272개의 새로운 방출선 영역들을 동정했다. 그래서 지금까지 알려진 방출선 영역은 총 2338개이다. 또한 Margini et al. (2000)에 의해 134개의 행성상 성운이 동정되었다.

이 연구에서는 M31의 11개의 HII 영역과 M33의 12개의 HII 영역들의 분광자료를 분석하였다. M31의 HII 영역들은 은하 중심으로부터 거리 5~23 kpc에 위치한 밝은 것으로, 명칭들은 Baade & Arp (1964, BA)의 emission region catalog로부터 인용하였다. 그리고 M33의 HII 영역들은 은하 중심으로부터 거리 1~6 kpc에 위치한 밝은 것으로, 표 1은 M31과 M33의 HII 영역들에 관한 특성을 나타낸다. MA라는 명칭은 Mayall & Aller (1942)의 list에 있는 것이다.

i) M31의 HII 영역의 분광관측 자료

분광관측자료는 Blair, Kirshner, & Chevalier (1982, hereafter BKC)에 의해 관측된 자료를 활용했다. 11개의 HII 영역들은 은하중심으로부터의 거리 5~23 kpc에 위치하는 크고 밝은 것들로 선택했다. 관측은 1980~1981년에 걸쳐 McGraw-Hill 천문대의 Reticon scanner와 1.3 m 망원경으로 이루어졌다. 슬릿 크기는 4×10" 이고, 파장 분해능은 12 Å이며, 스펙트럼 범위는 3700 Å ~ 7400 Å이다. 적색화 보정은 Brocklehurst (1971)가 제시한 전자온도 10⁴ K와 전자밀도 10³ cm⁻³에 대한 recombination value인 I(Hα)/I(Hβ)=2.8에 대해 이루어졌다. 부록에 제시된 선의 세기는 I(Hβ)=100에 대한 상대적인 세기이다.

ii) M33의 HII 영역의 분광 관측 자료

분광관측자료는 Kwitter & Aller (1981)에 의해 관측된 자료를 활용했다. 12개의 HII 영역들은 은하중심으로부터의 거리 1~6 kpc에 위치하는 크고 밝은 것들로 선택했다. 관측은 Lick 천문대의 3 m Shane 망원경과 Robinson-Wampler Image Tube Scanner로 이루어졌다. 슬릿 크기는 2"×2"이고, 스펙트럼 범위는 3700 Å ~ 7600 Å이다. 적색

화 보정은 Brocklehurst (1971)가 제시한 전자온도 10^4 K와 전자밀도 10^3 cm^{-3} 에 대한 recombination value인 $I(H\alpha)/I(H\beta)=2.8$ 의 이론적 값에 대해 이루어졌다. 제시된 선의 세기는 $I(H\beta)=100$ 에 대한 상대적인 세기이다.

(b) 플라즈마 diagnostics

이 연구에 이용된 분광관측자료는 부록 - 모델 예측 결과 (표 1, 2)에 실려 있다

i) HII 영역의 플라즈마 diagnostics

화학적 성분을 결정하기 위해서는 먼저 플라즈마 성운의 diagnostics (Hyung & Aller 1996)를 통해 성운의 전자온도와 전자밀도를 결정하고, 이 결과가 암시하는 물리적 조건을 모델을 만들어야 한다. 그 과정을 간단히 기술하

면 다음과 같다.

전자온도 구하기 관측된 파장 영역에서 발생하는 상당히 다른 들뜸 에너지를 갖는 두 개의 다른 상위 준위로부터 방출선을 내는 에너지-준위 구조를 갖는 가장 좋은 예가 [O III], [N II]이다. 충돌에 의한 방출선 중에서 [O III]의 $\lambda 4363$ 은 $\lambda 4959$ 와 $\lambda 5007$ 에 비해서 높은 에너지 준위로 천이 하는데, 충돌 여기는 자유전자가스의 열운동 (즉, 온도)과 밀접한 관계가 있으므로, 충돌에 의한 1S_0 과 1D_2 준위에 위치한 이온들의 상대적인 비를 이용해 온도를 구할 수 있다 (Pagel et al. 1979, Fig. 7 참조). 또한 [N II]의 ($\lambda 6548 \text{ \AA} + \lambda 6584 \text{ \AA} / \lambda 5755 \text{ \AA}$)의 방출선 세기비도 온도에 따라 변화하므로 전자온도를 구하는데 참고하였다. 낮은 온도영역에서는 $\lambda 4363$ 이 관측되지 않으므로 전자온도와 O 함량을 결정하는 Pagel et al. (1979)의 경험적인 방법을 사용하였다 (Pagel et al. 1979, Fig. 7 & 8 참조).

표 1. M31, M33의 HII 영역*

Object (M31)	Galactocentric Distance (kpc)	Measured Size (pc)	Object (M33)	Galactocentric Distance (kpc)	Measured Size (pc)
BA 75	5.3	26	MA 11	0.98	45 × 27
BA 423	5.4	40	IC 142	1.28	99 × 81
BA 289	7.1	98 × 80	NGC 595	1.57	189 × 117
BA 1/2	10.5	48	MA 2	2.22	135 × 117
BA 577	10.9	51 × 22	MA 3	2.83	-
BA 379	13.6	48 × 32	NGC 604	3.06	351 × 243
BA 668	14.2	48 × 29	IC 131	3.83	99 × 45
BA 676	14.3	55	MA 9	4.73	81 × 45
BA 684	18.9	26	IC 133	4.90	45 × 27
BA 487/8	19.7	113 × 51	NGC 588	5.03	117 × 90
BA 381	22.7	47	IC 132	5.68	120 × 99
			MA 1	6.24	-

*Blair et al. 1982; de Vaucouleurs 1964.

표 2. M31, M33의 HII 영역들의 전자온도와 전자밀도*

Object (M31)	$^a\text{Ne (SII)}$	$^b\text{Ne (SII)}$	$^c\langle t \rangle$ (K)	Object (M33)	$^b\text{Ne (S II)}$	$^b\text{Te (O III)}$	$^c\langle t \rangle$ (K)
BA 75	200	340	5500	MA 11	16	-	7500
BA 423	≤ 50	-	5300	IC 142	16	-	7400
BA 289	350	320	4800	NGC 595	16	-	7900
BA 1/2	≤ 50	-	7300	MA 2	16	-	7200
BA 577	140	140	7200	MA 3	100	9400	9700
BA 379	100	80	8600	NGC 604	100	11000	8300
BA 668	50	50	7400	IC 131	40	11700	7900
BA 676	≤ 50	30	5900	MA 9	100	-	8500
BA 684	≤ 100	-	5600	IC 133	-	-	10400
BA 487/8	330:	250	8200	NGC 588	100	13100	10300
BA 381	730:	560	8900	IC 132	100	12600	10600
				MA 1	447	-	8800

* a 는 Blair et al. (1982)이 제시한 값, b 는 diagnostics에 의한 계산값이며, c 는 Pagel et al. (1979)의 경험적 방법을 적용하여 계산된 평균 전자온도

전자밀도 구하기 한 성운에서 평균 전자밀도는 충돌에 의한 퇴기라앉음(de-excitation)의 효과를 관찰함으로써 추정될 수 있다. 이것은 거의 같은 들뜸 에너지를 갖는 다른 준위에 의해 방출되는, 같은 이온의 두 개의 선의 비를 비교함으로써 이루어지므로, 두 개의 준위에서 상대적인 들뜸율은 충돌 강도의 비에만 의존한다. 만약 두 준위가 다른 복사 천이 확률을 갖거나 다른 충돌 퇴기라앉음을 갖는다면, 두 준위에서의 상대적인 분포는 밀도에만 의존할 것이고, 그들이 방출하는 선 세기의 비는 마찬가지로 밀도에 의존할 것이다. 우리는 전자밀도를 거의 같은 에너지 준위를 갖는 [OII] $\lambda 3729/\lambda 3726$, [SII] $\lambda 6717/\lambda 6731$ 을 이용할 수 있는데, 관측된 분광자료에서는 [OII] $\lambda 3726$, 3729를 구분할 수 없다. 따라서 [SII]를 이용하였다.

ii) M31, M33의 HII 영역들의 전자온도와 전자밀도

M31의 11개의 HII 영역들에서 주로 관측된 분광선들은 He I $\lambda 5876$, [N II] $\lambda 6548$, 6584, [O I] $\lambda \lambda 6300$, 6363, [O III] $\lambda \lambda 4959$, 5007, $H\alpha$, [N eIII] $\lambda \lambda 3869$, 3967, [S II] $\lambda \lambda 6717$, 6731, [Ar III] $\lambda 7136$ 등의 방출선들이다. 그런데 전자온도를 결정하는 [O III] $\lambda 4363$ 이 관측되지 않아 diagnostics로 전자온도를 결정할 수 없어, Pagel et al. (1979)의 경험적 방법에 의해 $([O II]+[O III])/H\beta$ 로부터 평균 전자온도 $\langle T \rangle$ 를 결정하였는데, 온도 범위는 4800 K ~ 8900 K 이다. 그리고 전자밀도는 [S II]로부터 결정을 하였다. 밀도 범위는 100 cm^{-3} 이하가 1/2이고 $160 \sim 180 \text{ cm}^{-3}$ 사이가 1/2정도로 볼 수 있는데, 예외적으로 BA 381은 상당히 큰 360 cm^{-3} 정도의 값을 나타냈다. 우리가 결정한 밀도 값이 선행 연구자의 값과는 다소 차이가 있었는데, 원인은 diagnostics 그림으로 [O III] 선을 그릴 수 없어, 밀도를 결정할 때 [S II]에 의해 그려진 곡선의 중간 정도의 값을 잡았기 때문이라고 생각된다.

M33의 12개의 HII 영역들에서 주로 관측된 분광선들은 HeI $\lambda \lambda 5876$, 6678, [N II] $\lambda \lambda 6548$, 6584, [O I] $\lambda \lambda 6300$, 6363, [O III] $\lambda \lambda 4363$, 4959, 5007, $H\alpha$, [Ne III] $\lambda \lambda 3869$, 3967, [S II] $\lambda \lambda 6717$, 6731, [Ar III] $\lambda 7136$ 등의 방출선들이다. 그런데 전자온도를 결정하는 [O III] $\lambda 4363$ 은 5개의 HII 영역들에서만 관측되어 나머지는 Pagel et al. (1979)의 경험적 방법에 의해 평균 전자온도를 결정하였다. 평균 전자온도의 범위는 7200 K ~ 10600 K 정도인데, Te([O III])를 구한 5개 중 4개의 경우 평균 전자온도와 3000 K 정도의 차이를 나타냈다. 또한 [S II]를 이용해 구한 전자밀도는 M31의 HII 영역들보다 훨씬 작은 값을 나타내었다. 1/2는 $20 \text{ cm}^{-3} \sim 40 \text{ cm}^{-3}$ 이고 나머지 1/2는 100 cm^{-3} 의 값을 보였는데, MA1의 경우는 450 cm^{-3} 의 큰 값을 보였다. 표 2는 M31과 M33의 HII 영역에 대한 diagnostics 결과로 전자온도와 전자밀도를 제시하는데, $\langle T \rangle$ 는 Pagel et al. (1979)의 경험적 방법으로 결정한 평균 전자온도이다. M31의 경우 전자밀도 값이 두 가지인데, 제 2열에는 BKC에 의해 구해진 밀도이고, 제 3열은 우리가 구한 전자밀도이다.

IV. 화학원소의 결정

(a) 이론적 모델

이론적 모델을 완성하는 것은 만들어진 모델의 예측결과가 관측된 선 세기에 맞추어져, 모델에 사용된 화학원소함량이 곧 구하려는 화학원소인지를 확인하면서 무수한 조정-반복 과정을 요하는 작업이다. 행성상 성운이든 HII 영역이든 적당한 매개변수들을 주어, 처음에 모델을 실행하여 나온 선 세기에서부터 모델링이 시작된다. 보통 기체성운의 광학영역에서 가장 강하게 나타나는 분광선이 [O III] $\lambda \lambda 4959$, 5007이다. 행성상 성운의 경우는 일반적으로 [O II] $\lambda \lambda 3726/3729$ 의 doublet보다 [O III] $\lambda \lambda 4959$, 5007의 선 세기가 더 크고, 대부분의 HII 영역에서는 [OII] $\lambda \lambda 3726/3729$ 의 doublet이 [O III] $\lambda \lambda 4959$, 5007보다 선 세기가 더 크게 나타난다. 그래서 모델링 과정에서 일단은 [O II] $\lambda \lambda 3726/3729$ 와 [O III] $\lambda \lambda 4959$, 5007의 선 세기들의 상대적인 비를 맞추게 되는데, HII 영역들의 경우는 shell의 안쪽 반경을 늘려 가면 [O III] $\lambda \lambda 4959$, 5007의 선 세기가 줄어든다. 그렇게 [O II]와 [O III]의 상대적인 비를 맞추고 나면, 화학조성을 조정하면서 다른 분광선들 [N II] $\lambda \lambda 6584$, 6548과 [Ne III] $\lambda \lambda 3868$, 3969와 [S II] $\lambda \lambda 6717$, 6731 등의 선 세기를 맞추게 되는데, 원소들간에 서로 상당히 큰 영향을 주기 때문에 한 가지 원소만을 조정해도 다른 모든 원소들의 선 세기가 변하게 된다. 예를 들어, 산소의 함량을 줄이면 다른 원소들의 선 세기가 대부분 증가하게 되고, 질소나 황의 함량을 늘리면 산소와 네온의 분광선들의 세기가 줄어든다. 특히 산소와 네온을 함께 증가시키면 처음에는 선 세기가 증가하다가 어느 정도 한계를 넘어서면 전자온도가 줄어들면서 선 세기도 감소하게 되는데, 선 세기와 전자온도가 줄어드는 효과는 있지만, 간혹 산소와 네온의 함량이 지나치게 커지는 경우가 생긴다.

또한 일반적으로 [Ne III] $\lambda 3868$ 의 선 세기가 [Ne III] $\lambda 3969$ 보다 더 크게 나타나는데, M33의 HII 영역들 중 IC142, NGC595, MA3, NGC604와 IC131 등의 경우는 [Ne III] $\lambda 3868$ 이 [Ne III] $\lambda 3969$ 보다 선 세기가 더 낮게 관측되어, 전자온도와 다른 선 세기를 맞추는데 이로인한 쪽으로 [Ne III] $\lambda 3868$ 과 [Ne III] $\lambda 3969$ 의 선 세기 둘 중 하나를 선택하여 세기를 맞추었다. 특히 BA381의 경우는 다른 선 세기와 전자온도를 고려하다 보니, [Ne III] $\lambda \lambda 3868$, 3969의 선 세기가 심하게 맞지 않아서 BA381의 화학조성 결정에도 오차가 클 것으로 생각된다.

모델링 과정에서 선 세기를 맞추면서 전자온도도 고려하게 되는데, M31의 HII 영역들의 경우는 모델링과 Pagel et al. (1979)의 경험적인 방법으로 구한 전자온도가 거의 일치하는 결과를 보였으나, M33의 HII 영역들 중 MA3, NGC604, IC131, NGC588, 그리고 IC132는 [O III] $\lambda 4363$ 선이 관측되어 diagnostics로 전자온도를 결정했는데, Pagel et al. (1979)의 경험적 방법으로 결정한 평균전

자온도 $\langle t \rangle$와 큰 차이를 보였다. 그리고 M33의 HII 영역들의 경우는 모델링 과정에서 [O III] $\lambda 4363$ 의 선 세기를 맞추지 못했으므로, 모델링을 통해 구한 전자온도와 Pagel et al. (1979)의 경험적 방법으로 구한 전자온도를 비교해 볼 때, 전체적으로 모델링으로 결정된 전자온도가 약 1000 K 정도 낮게 나타났다. 많은 시행착오를 거쳐 나온 결과가 부록에 모델 예측 결과 (표 1, 2)로 제시하였는데, 관측된 선 세기, 모델 예측치, 사용된 매개변수가 제시되었다. 모델링 과정을 통해 얻어진 화학원소함량을 천체별로 정리 표-3과 표-4에 정리하였다.

(b) M31의 HII 영역들의 화학원소함량

표 3에 모델작업 결과로 얻은 M31의 HII 영역들의 화학원소함량과 BKC (1982)에 의해 결정된 O, N, S의 함량을 제시하였다. 먼저 산소 함량의 경우는 대체로 우리가 구한 값과 BKC가 제시한 값이 2배 이내의 범위에서 일치하였는데, BA423의 경우는 차이가 크다. 모델링 과정에서 BA423의 경우는 [O I] $\lambda \lambda 6300, 6363$ 의 선 세기를 맞

추기가 어려웠고, He I $\lambda 5876$ 의 세기도 크게 계산되어, 모델링에 의한 전자온도와 경험적으로 구한 평균전자온도 $\langle t \rangle$와 차이가 700 K 정도였다. 물론 모델링으로 구한 산소 함량이 다소 적게 나타났다. 다른 것과 비교하면 M32-PNe나 Galactic PNe의 평균값보다 다소 큰 산소 함량을 보이는데, 전체적으로는 은하중심으로부터의 거리가 증가할수록 산소 함량은 줄어드는 것으로 나타났다.

질소 함량의 경우는 BKC가 제시한 값과 다소 차이를 보이는데, 특히 BA75, BA289, BA676, 그리고 BA684의 경우는 모델링으로 구한 값이 거의 2배 정도 크게 나타났다. 이것은 전자온도를 맞추기 위해 산소와 네온의 함량을 증가시키다보니 [N II]과 [S II]의 선 세기가 약해지고 결국 선 세기를 맞추기 위해 질소와 황의 함량을 증가시키게 되는데 그 원인이 있다고 추정된다. 나머지 M31의 HII 영역들의 질소 함량은 BKC가 제시한 값과 거의 일치했다. 물론 전체적으로 보면, 은하중심에서 멀어질수록 질소의 함량이 줄어드는 것은 확연하게 볼 수 있었다. 이처럼 중원소인 산소와 질소의 함량이 은하중심쪽으로 갈수록 증가한다는 것은 은하중심쪽으로 갈수록 성간 물질의

표 3. M31의 HII 영역들의 화학조성*

Object	O(BKC)	N(BKC)	S(BKC)	He	C	N	O	Ne	S	Ar
BA75	1.03E-03	6.2E-05	1.4E-05	8.00E-02	9.50E-04	1.09E-04	1.14E-03	1.20E-03	1.13E-05	1.36E-06
BA423	1.33E-03	1.1E-04	3.5E-05	8.50E-02	7.65E-04	1.24E-04	8.10E-04	7.50E-04	1.97E-05	3.09E-06
BA289	1.43E-03	6.5E-05	1.4E-05	8.60E-02	1.60E-03	1.80E-04	2.30E-03	7.85E-04	2.15E-05	2.17E-06
BA1/2	6.4E-04	5.4E-05	1.5E-05	8.70E-02	7.06E-04	5.63E-05	6.60E-04	6.70E-04	7.16E-06	8.20E-07
BA577	6.4E-04	3.9E-05	1.1E-05	8.50E-02	7.00E-04	4.25E-05	6.45E-04	8.15E-04	5.02E-06	1.02E-06
BA379	3.0E-04	2.1E-05	5.8E-06	1.00E-01	4.50E-04	3.15E-05	4.72E-04	2.90E-04	4.12E-06	7.00E-07
BA668	4.6E-04	2.5E-05	8.2E-06	7.50E-02	5.50E-04	3.82E-05	5.81E-04	4.30E-04	6.00E-06	1.29E-06
BA684	7.2E-04	2.9E-05	1.6E-05	8.50E-02	6.50E-04	7.30E-05	8.82E-04	6.90E-04	1.87E-05	3.90E-06
BA487/8	4.1E-04	1.5E-05	8.6E-06	1.10E-01	9.00E-04	1.66E-05	4.09E-04	4.16E-04	6.65E-06	2.00E-06
BA381	3.4E-04	1.3E-05	4.4E-06	1.10E-01	8.50E-04	1.59E-05	3.80E-04	3.05E-04	2.47E-06	1.00E-06

*O, N, S (BKC): Blair, Kirshner, & Chevalier (1982).

표 4. M33의 HII 영역들의 화학조성*

Object	O(KA)	N(KA)	S(KA)	He	C	N	O	Ne	S	Ar
MA11	3.98E-04	1.78E-05	1.29E-05	6.97E-02	7.40E-05	3.29E-05	8.80E-04	5.70E-04	8.67E-06	1.43E-06
IC142	3.72E-04	2.45E-05	6.02E-06	5.42E-02	3.88E-04	3.88E-05	6.65E-04	3.61E-04	1.06E-05	3.00E-07
NGC595	2.09E-04	1.29E-05	1.02E-05	7.42E-02	4.02E-04	3.47E-05	8.72E-04	2.81E-04	6.99E-06	2.04E-06
MA2	2.40E-04	1.29E-05	6.02E-06	8.39E-02	6.15E-04	2.40E-05	8.77E-04	1.73E-04	9.75E-06	2.04E-07
MA3	2.82E-04	1.26E-05	5.62E-06	7.67E-02	2.60E-04	2.37E-05	6.98E-04	7.18E-05	8.70E-06	1.81E-06
NGC604	2.00E-04	9.33E-06	5.01E-06	7.00E-02	2.63E-04	2.65E-05	7.73E-04	1.65E-04	1.07E-05	1.78E-06
IC131	1.45E-04	6.31E-06	4.68E-06	8.07E-02	1.61E-04	1.62E-05	5.67E-04	2.89E-04	7.39E-06	4.89E-07
MA9	1.91E-04	9.33E-06	1.26E-05	1.13E-01	3.00E-05	2.53E-05	9.26E-04	2.25E-04	9.60E-06	1.00E-07
IC133	2.29E-04	9.12E-06	6.31E-06	7.15E-02	5.40E-05	1.39E-05	3.80E-04	5.17E-05	8.35E-06	1.24E-06
NGC588	1.0E-04	6.92E-06	4.79E-06	8.66E-02	2.20E-05	1.49E-05	3.19E-04	5.59E-05	9.72E-06	7.18E-07
IC132	1.15E-04	5.25E-06	5.01E-06	9.46E-02	2.00E-05	1.04E-05	3.43E-04	6.37E-05	9.72E-06	9.69E-07
MA1	-	-	-	8.18E-02	1.09E-05	1.00E-07	5.70E-04	1.00E-07	4.04E-05	1.00E-07

*O, N, S (KA): Kwitter & Aller (1981).

밀도가 높아 별의 생성이 활발했던 은하의 진화에 기인한다고 볼 수 있다. 그런데 중원소인 산소와 질소는 중요한 냉각제 구실을 하기 때문에 은하중심쪽으로 갈수록 전자의 온도가 낮아질 수밖에 없다.

He I의 경우 관측된 선 세기가 전체적으로 너무 낮아, He I의 선 세기는 거의 맞출 수가 없었다. 모델링에서 He/H 함량 비는 최하 한계를 7.5×10^{-2} 로 두고 He I $\lambda 5876$ 의 선 세기를 12~13 정도에 맞추었다. 그래서 헬륨의 함량을 논의하기에는 부족함이 많을 것이다.

결국 HII 영역들의 경우는 은하 중심으로부터의 거리에 따라 중원소의 함량이 변하는데, 대체로 질소, 산소의 함량이 은하 중심부에 더 풍부하고 반대로 전자온도는 바깥 쪽이 더 높은 결과를 얻었다 (그림 1).

(c) M33의 HII 영역들의 화학원소함량

표 4에 모델 작업 결과 얻은 M33의 HII 영역들의 화학원소함량과 KW가 계산한 O, N, S 함량을 제시하였다. 전체적으로 모델 작업 과정에서 관측된 선 세기에 다소 무리하게 맞추다 보니, 얻어진 전자온도가 경험적으로 얻어진 평균전자온도 (Pagel et al. 1979) $\langle t \rangle$ 보다 훨씬 낮았다 ($\langle \Delta T \rangle = 1300$ K). 결과적으로 질소 함량은 KA의 값보다 2배 정도 높게 나타났으나, 산소 함량이 KA가 제시한 값들보다 전체적으로 상당히 크게 나타났다. 그리고 황 함량의 경우는 KA의 값과는 다소 큰 차이를 보였다.

[Ne III] $\lambda \lambda 3868, 3969$ 의 경우, 보통 분광선 $\lambda 3868$ 의 세기가 더 큰 편인데, 이용한 관측자료에서는 선이 관측된 천체의 1/2이 $\lambda 3868$ 의 세기가 더 낮게 관측되어, 모델링 과정은 $\lambda 3868$ 과 $\lambda 3969$ 중 전자온도와 다른 분광선들의 세기를 맞추는데 더 적절한 선을 선택하여 맞추었다. 그러므로 이 자료로 네온의 함량을 논의하기에는 무리가 있다고 생각된다.

M33의 HII 영역들에서도 관측된 He I의 선 세기가 낮아서, 무리하게 선 세기를 맞추다보니, 헬륨 함량이 8.50×10^{-2} 정도로 낮게 나타났는데, 원시화학조성을 고려하여 최저 한계를 7.00×10^{-2} 로 정했다. 전체적으로 볼 때, M31의 경우처럼, M33의 HII 영역들에서도 은하중심으로부터 멀어질수록 전자온도는 높아졌으며, 산소와 질소 함량은 은하 안쪽에서 대체로 높게 나타났다 (그림 2). MA1의 경우, 관측된 분광선의 수가 적고, 선 세기의 정확도가 떨어지는 경향을 보여 (예를 들어, [OI] $\lambda 6300$ 과 [SIII] $\lambda 6312$ 의 세기가 같고, [SII] $\lambda \lambda 6717, 6731$ 의 세기가 같은 값을 갖는다), 모델링으로 결정된 원소함량에 오차가 클 것으로 생각된다.

(d) 다른 천체와의 비교

우리은하의 오리온 성운인 M42의 경우 O, N, S의 함량을 살펴보면, 각각 3.3×10^{-4} , 3.7×10^{-5} , 1.5×10^{-5} 이며 (Peimbert & Torres-Peimbert 1977), M101-S5 model

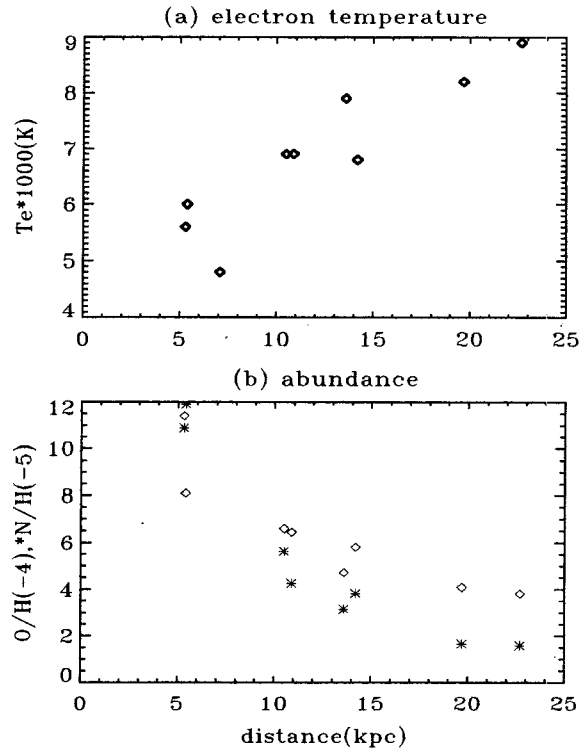


그림 1. M31 HII regions. (a) 은하중심으로부터 거리에 따른 M31의 HII 영역들의 전자온도 변화 ($\Delta T \leq 500$ K, error bars를 표시하지 않음); (b) M31에서 은하중심으로부터 거리에 따른 O/H와 N/H의 함량변화 (관측오차에서 비롯된 화학 원소 값의 오차는 약 0.2 dex임).

(Shields & Searle 1978)의 O, N, S의 함량들은 각각 13.0×10^{-4} , 20.8×10^{-5} , 4.0×10^{-5} 이다.

M31, M33의 HII 영역들의 경우는 평균값이 큰 의미가 있다고 생각하지는 않지만, 비교를 위해 O, N, S의 평균원소함량을 구하면, M31의 HII 영역들의 경우는 각각 8.43×10^{-4} , 6.94×10^{-5} , 1.04×10^{-5} 이고, M33의 HII 영역들의 경우는 각각 6.64×10^{-4} , 2.38×10^{-5} , 9.11×10^{-6} 을 나타낸다.

M31의 HII 영역의 경우 M33의 것보다 O, N, S의 평균원소함량들이 더 크게 나타났으나, 우리은하의 M42의 것과 비교해서는 황 함량은 비슷하고 산소와 질소의 함량은 M31의 경우가 더 높게 나타났다. 그런데, M101-S5의 경우는 M31이나 M33의 HII 영역들보다 O, N, S의 함량이 훨씬 높게 나타났다.

V. 결 론

M31은 두 위성은하 M32, NGC 205를 가지고 있는데, 위성은하와 M31과의 tidal debris 연구 등이 최근 비교적 활발하게 진행되고 있으며, M33의 경우 은하까지의 거리가 비교적 가깝고(840 kpc), 은하의 경사면이 face-on (원반위)일 뿐 만 아니라, 성간 소광 계수가 비교적 적으므로 연구에 비교적 용이하여 분광대상으로서 많은 관심을 가지게 한다. 우리는 위의 외부은하 M31, M33의 전리

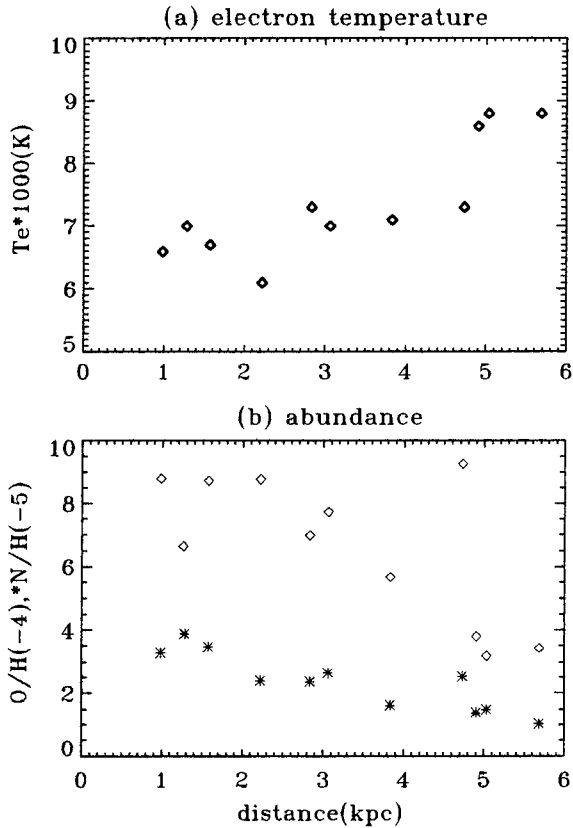


그림 2. M33의 HII regions. (a) 은하중심으로부터 거리에 따른 M33의 HII 영역들의 전자온도 변화 ($\Delta T \leq 700$ K, error bars를 표시하지 않음); (b) M33에서 은하중심으로부터 거리에 따른 O/H와 N/H의 함량변화 (관측오차에서 비롯된 화학 원소값의 오차는 약 0.2 dex임).

수소(H II) 영역의 분광 관측자료를 분석하고, 이론적인 모델을 통해 화학원소함량을 결정하였다. 우리가 연구한 M31, M33의 경우 M31이 M33보다 밝은데, 이들의 중원소 함량비 O/H+N/H도 M31이 M33보다 크게 나타났다. 그리고 M31과 M33의 HII 영역들에서 원소함량의 기울기는 다르지만, 두 경우 모두 O/H와 N/H가 은하중심으로부터 멀어질수록 줄어들었고, 반대로 전자온도는 은하중심에서 바깥으로 갈수록 증가했다. 이처럼 산소와 질소의 함량이 은하중심 쪽으로 갈수록 증가한다는 것은 은하중심 쪽으로 갈수록 성간 물질의 밀도가 높아 별의 생성이 활발했던 은하의 진화에 기인한 것으로 추정된다. 그리고 중원소인 산소와 질소는 중요한 냉각제 구실을 하기 때문에 은하중심 쪽으로 갈수록 전자의 온도가 낮아질 수밖에 없는 것으로 결론지을 수 있다.

우리의 연구는 Blair 등의 O 원소 함량 연구 (1982), Brewer et al.의 C-/M-별의 상대적 비 연구 (1996, 1995), Dessart (1999)와 Drissen 등(1999)의 WR 별의 연구에서 얻은 결과와 유사한 중원소 기울기 (metallicity profile)를 보여주고 있다. M33은 중심에서 밖으로 갈수록 $2 Z_{\text{sun}}$ 에서 $0.4 Z_{\text{sun}}$ 에 이르는 원소값의 기울기가 존재하는 것으로 알려져 별과 은하의 진화연구에 중 원소 존재가 어떠한 영

향을 주는지에 중요한 단서를 제공하는 것으로 여겨져 왔다. 우리의 연구에서 산소의 경우, 중심에서 밖으로 갈수록 4×10^{-4} 에서 1×10^{-4} 로의 감소를 하므로, 위의 중 원소 함량과 같은 기울기를 보이고 있는 반면, 질소의 경우는 1×10^{-4} 에서 0.3×10^{-4} 으로 다소 완만한 기울기임을 알 수 있다. 이 연구는 Blair 등의 연구에 비해, 상대적으로 많은 자료를 포함하고 있고, 연구에 이론적인 모델을 이용함으로써 좀 더 조리가 있는 분석을 진행하였지만, 정량적인 결과와 해석은 위의 두 은하에서 관측된 행성상성운의 관측 자료와 같이 분석한 후로 미루고자 한다.

최근 가스가 풍부한 왜소은하의 N, O와 He의 화학원소의 진화를 이해하기 위해서 HII 영역의 진화와 연관시켜 초신성 폭발 잔해와 혼합되는 과정에 대한 연구를 하고 있다. 특히 Pagel(2000)은 3×10^7 yr 정도의 시간 간격을 주어 폭발적 별 탄생(star burst formation)을 가정한 수치 모델을 진행하고 있다. 이러한 연구에 의하면 N/O-O/H 등의 관계가 은하에 체계적으로 존재하며, 가스 물질의 은하중심으로의 유입(inflow) 또는 이탈(outflow)이 중요한 역할을 함을 시사하고 있다. 이러한 연구에 나선 은하내에 존재하는 HII 영역 및 행성상 성운은 우리은하와 외부 은하의 화학원소결정에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 생각된다.

이 연구를 지원해주신 과학재단 (Star 2000-2-500-00, KOSEF 2000-1-113-001-5)과 학술진흥재단 (KRF 2000-015-DP0445)에 감사를 드립니다.

참고문헌

이시우, 현정준, 홍승수, 윤홍식, 1995. 은하계의 형성과 화학적 진화, pp. 43-72, pp. 175-262
 최승언, 1986, 銀河系, 보진재, pp 135-169
 형식, Aller, L. H., 김강민, 2000, 광학천문학 워크샵, 15, 61
 Aller, L. H. 1984, Physics of Thermal Gaseous Nebulae (D. Reidel), pp. 255-290
 Baade, W., & Arp, H. 1964, ApJ, 139, 1027
 Blair, W. P., Kirshner, R. P., & Chevalier, R. A. 1982, ApJ, 254, 50
 Brewer, J. P., Richer, H. B., & Crabtree, D. R. 1995, AJ, 109, 2480
 Brewer, J. P., Richer, H. B. & Crabtree, D. R. 1996, AJ, 112, 491
 Brocklehurst, M. 1971, MNRAS, 153, 471
 Dennefeld, M. & Kunth, D. 1981, AJ, 86, 989
 Dessart, L., Willis, A. J., Crowther, P. A., Morris, P. W., & Hillier, D. J. 1999, IAUS, 193,233
 Dinerstein, H. L. 1990, ism, conf, 257
 Drissen, L., Roy, J., Moffat, A. J., & Shara, M. M. 1999, AJ, 117, 1249
 Dufour, R. J., Talbort, R. J., Jensen, E. B., & Shields, G. A. 1980, ApJ, 236, 119
 Garnett, D. R., & Shields, G. A. 1987, ApJ, 317, 82
 Hodge, P. W., Balsley, J., Wyder, T. K., & Skelton, B. P. 1999, PASP, 111, 685

- Hubeny, I. 1988, *Computer Phys. Comm.*, 52, 103
- Hyung, S. 1994, *ApJS*, 90, 119
- Hyung, S., & Aller, L. H. 1996, *MNRAS*, 278, 551
- Jacoby, G. H., & Ciardullo, R. 1999, *ApJ*, 515, 169
- Kingsburgh, R. L. & Barlow, M. J. 1994, *MNRAS*, 271, 257
- Kwitter, K. B. & Aller, L. H. 1981, *MNRAS*, 195, 939
- Magrini, L., Corradi, R. L. M., Mampaso, A., & Perinotto, M. 2000, *A&A*, 355, 713
- Mayall, N. U. & Aller, L. H. 1942, *ApJ*, 95, 5
- Meyssonier, N., Lequeux, J., & Azzopardi, M. 1993, *A&AS*, 102, 251
- Pagel, B. E. J., Edmunds, M. G. & Smith, G. 1980, *MNRAS*, 193, 219
- Pagel, B. E. J., Edmunds, M. G., Blackwell, D. E., & Smith, G. 1979, *MNRAS*, 189, 95
- Peimbert, M. & Torres-Peimbert, S. 1977, *MNRAS*, 179, 21
- Rayo, J. F., Peimbert, M., & Torres-Peimbert, S. 1982, *ApJ*, 255, 1
- Richer, M. G., Stasinska, G., & McCall, M. L. 1999, *A&AS*, 135, 203
- Rubin, V. C. & Ford, W. K. 1970, *ApJ*, 159, 379
- Rubin, V. C., Kirshner, K. C., & Ford, W. K. 1972, *ApJ*, 177, 31
- Searle, L. 1971, *ApJ*, 168, 327
- Shields, G. A. 1990, *ARA&A*, 28, 525
- Shields, G. A. & Searle, L. 1978, *ApJ*, 222, 821
- Smith, H. E. 1975, *ApJ*, 199, 591
- Stasinska, G. 1990, *A&AS*, 83, 501
- Vilchez, J. M., Pagel, B. E. J., Diaz, A. I., Terlevich, E., & Edmunds, M. G. 1988, *MNRAS*, 235, 633

부 록

모델 예측 결과

표 1-1. Model predictions for HII regions in M31

Element	Wave	$I_{obs}(BA75)$	I_{call}	$I_{obs}(BA423)$	I_{call}	$I_{obs}(BA289)$	I_{call}
He I	5876	8.3	12.71	6.2	13.17	6.7	13.76
	6678	6.2	3.66	<4.5	3.77	2	4.08
N II	6584	93.0	92.71	120	162.13	92.9	92.96
	6548	31.4	32.00	40.2	-	31.2	32.09
O I	6300	6.3	10.57	9.0	7.61	7.1	7.83
	6363	2.6	3.38	4.1	2.44	2.3	2.50
O II	3726/29	186	185.60	159	159.10	148	171.14
O III	4959	9.2	12.05	10.1	10.62	8.9	13.75
	5007	34.9	34.71	30.4	30.58	25.2	39.60
Ne III	3868	-	-	46.5	45.05	<15	14.77
	3969	<16.6	16.46	<15	13.43	<15	4.41
S II	6717	22.8	22.79	48.4	48.29	21.9	21.87
	6731	21.2	18.13	27.8	34.72	19.4	17.88
Ar III	7136	<3	2.98	7.5	7.50	3	2.98
BKC	<t>	5500		5300		4800	
	N_e	200		≤ 50		350	
OUR	N_e	180				180	
Central Star	$R_{\star}(R_{\odot})$		6		5		5.8
Star	$T_{\star}(K)$		38000		38000		41000
	log g		4.5		4.5		3.5
Shell(pc)	R_{in}		3.01		5.035		3.30
	R_{out}		3.076		5.276		3.381
Prediction	T_e		5600		6000		4800
	N_e		180		50		200

표 1-2. Model predictions for HII regions in M31

Element	Wave	$I_{obs}(BA1/2)$	I_{call}	$I_{obs}(BA577)$	I_{call}	$I_{obs}(BA379)$	I_{call}
He I	5876	11.0	12.61	6.6	12.45	5.7	13.70
	6678	-	-	<3	3.55	4.7	3.90
N II	6584	90.7	90.69	67.2	67.61	47.8	47.22
	6548	30.4	31.31	22.6	23.34	16.1	16.30
O I	6300	<2	6.75	<5	7.32	<2.5	1.86
O II	3726/29	281	289.05	275	276.74	244	256.03
O III	4959	20.2	20.64	18.5	18.70	82.9	85.65
	5007	60.8	59.45	53.1	53.85	254	246.70
Ne III	3868	<22	70.12	<19	85.26	<30	83.78
	3969	20.6	20.91	10.0	25.43	24.9	24.99
S II	6717	25.3	25.30	17.8	17.27	12.0	11.97
	6731	17.3	18.26	14.2	12.99	8.9	8.83

표 1-2. Continued.

Element	Wave	$I_{obs}(BA1/2)$	I_{call}	$I_{obs}(BA577)$	I_{call}	$I_{obs}(BA379)$	I_{call}
Ar III	7136	3.3	3.24	4	3.99	—	—
BKC	<t>	7300		7200		8600	
	N_e	≤ 50		140		100	
OUR	N_e			100		50	
Central Star	$R_{\star}(R_{\odot})$		7		6.5		5.8
	$T_{\star}(K)$		37000		36000		37000
	log g		3.8		3.8		3.8
Shell(pc)	R_{in}		6.90		4.03		2.09
	R_{out}		7.210		4.175		3.070
Prediction	T_e		6900		6900		7900
	N_e		50		100		70

표 1-3. Model predictions for HII regions in M31

Element	Wave	$I_{obs}(BA668)$	I_{call}	$I_{obs}(BA676)$	I_{call}	$I_{obs}(BA684)$	I_{call}
He I	5876	9.3	11.30	<9.5	13.44	12.5	13.66
N II	6584	41.3	41.65	60.4	60.34	51.5	51.66
	6548	13.8	14.38	20.1	20.83	17.3	17.82
O I	6300	<3.5	5.20	6.1	6.91	4.0	5.94
O II	3726/29	205	205.18	171	174.19	147	146.93
O III	4959	38.2	45.24	21.4	18.99	18.1	23.14
	5007	129	130.29	54.1	54.69	66.4	66.64
Ne III	3868	7.8	69.20	<23	49.22	—	—
	3969	13.2	20.64	13.3	14.68	<16.7	15.86
S II	6717	12.9	12.89	20.5	20.32	44.9	47.61
	6731	9.3	9.52	14.4	15.00	—	—
Ar III	7136	5.0	5.01	8.0	7.97	<12.5	8.81
BKC	<t>	7400		5900		5600	
	N_e	50		≤ 50		≤ 100	
OUR	N_e	50		30			
Central Star	$R_{\star}(R_{\odot})$		6.5		7.2		5.7
	$T_{\star}(K)$		33000		40000		40000
Shell(pc)	log g		3.8		4.0		4.4
	R_{in}		1.280		5.05		2.83
Prediction	R_{out}		1.865		5.325		3.175
	T_e		6800		5700		5500
	N_e		80		80		90

표 1-4. Model predictions for HII regions in M31

Element	Wave	$I_{obs}(BA487/8)$	I_{call}	$I_{obs}(BA381)$	I_{call}
He I	5876	<16.5	13.97	<20.2	13.70
N II	6584	40.8	40.65	50.8	50.75
	6548	13.7	14.03	16.9	17.52
O I	6300	—	—	<19	3.19
O II	3726/29	357	358.23	479	481.29

표 1-4. Continued.

Element	Wave	$I_{obs}(BA487/8)$	I_{cal1}	$I_{obs}(BA381)$	I_{cal1}
O III	4959	43.6	35.83	54.2	44.73
	5007	103	103.21	129	128.83
Ne III	3868	—	—	44.7	97.62
	3969	—	—	—	—
S II	6717	30.9	30.82	14.1	14.42
	6731	26.3	24.48	14.1	
BKC	<t>	8200		8900	
	Ne	330		730	
OUR	Ne	160		360	
Central Star	$R_{\star} (R_{\odot})$		5		7.5
	$T_{\star} (K)$		35000		35000
	log g		3.6		3.8
Shell(pc)	R_{in}		2.045		2.185
	R_{out}		2.200		2.254
Prediction	T_e		8200		8900
	N_e		160		350

표 2-1. Model predictions for HII regions in M33

Element	Wave	$I_{obs}(MA11)$	I_{cal1}	I_{cal2}	$I_{obs}(IC142)$	I_{cal1}
He I	5876	7.76	7.76	12.71	7.94	7.94
	6678	3.63	2.22	3.63	3.24	2.26
	4471	5.25	2.63	4.36	2.95	2.73
N II	6584	42.66	42.77	42.71	52.48	52.46
	6548	17.78	14.76	14.74	19.05	18.11
O I	6300	—	—	—	1.38	2.72
	6363	—	—	—	.41	.87
O II	3726/29	316.22	316.89	314.01	275.42	279.92
O III	4959	24.55	24.57	24.62	30.90	33.94
	5007	70.79	70.77	70.90	97.72	97.75
Ne III	3868	—	—	—	2.00	37.93
	3969	13.80	13.93	13.79	11.20	11.31
S II	4068/76	—	—	—	3.98	2.16
	6717	20.89	20.92	20.89	20.89	20.85
	6731	14.45	14.65	14.61	14.45	15.75
S III	6312	—	—	—	.58	.59
Ar III	7136	5.01	5.01	5.03	—	—
OUR	<t>	7500			7400	
	N_e	20			20	
Central Star	$R_{\star} (R_{\odot})$		6.5	6.5		7
	$T_{\star} (K)$		34000	34000		31000
	log g		3.0	3.5		3.0
Shell(pc)	R_{in}		8.5	8.3		2.0
	R_{out}		9.72	9.08		2.29
Prediction	T_e		6500	6700		7000
	N_e		20	20		100

표 2-2. Model predictions for HII regions in M33

Element	Wave	$I_{obs}(NGC595)$	I_{cal1}	$I_{obs}(MA2)$	I_{cal1}	$I_{obs}(MA3)$	I_{cal1}
He I	5876	8.32	11.07	12.59	12.59	11.22	11.22
	6678	3.16	3.16	3.02	3.60	2.63	3.19
	4471	3.39	3.77	–	–	3.55	3.88
N II	6584	38.02	38.09	13.8	13.87	16.98	16.84
	6548	13.18	13.15	4.57	4.79	5.75	5.81
O I	6300	1.38	2.64	12.59	.27	1.91	.58
O II	3726/29	288.40	291.58	114.82	114.94	173.78	180.05
	7321	5.25	1.60	–	–	2.69	1.33
O III	4363	–	–	–	–	2.19	.93
	4959	52.48	52.49	64.57	67.61	154.88	145.27
	5007	151.36	151.18	194.99	194.73	416.87	418.41
Ne III	3868	9.55	35.75	–	–	19.50	19.50
	3969	10.72	10.66	–	–	25.12	5.81
S II	6717	11.75	11.73	6.92	6.98	7.41	7.36
	6731	8.13	8.22	4.37	4.87	5.75	5.59
S III	6312	1.74	.33	–	–	–	–
Ar III	7136	7.76	7.76	–	–	8.32	8.31
	7751	–	–	–	–	2.29	2.01
OUR	$\langle \triangleright$	7900		7200		9700	
	T_e					9400	
	N_e	20		20		100	
Central Star	$R_{\star}(R_{\odot})$		6.8		7		8
	$T_{\star}(K)$		36500		37000		37000
	log g		3.7		3.8		3.8
Shell(pc)	R_{in}		6.5		7.98		1.5
	R_{out}		8.4		8.88		2.5
Prediction	T_e		6700		6100		7300
	N_e		20		20		100

표 2-3. Model predictions for HII regions in M33

Element	Wave	$I_{obs}(NGC604)$	I_{cal1}	I_{cal2}	$I_{obs}(IC131)$	I_{cal1}	I_{cal2}
He I	5876	8.13	10.42	10.26	10.23	10.26	13.34
	6678	2.75	2.97	2.92	3.80	2.92	3.80
	4471	3.80	3.55	3.54	–	–	–
N II	6584	28.18	28.15	28.11	16.60	16.67	16.61
	6548	9.33	9.72	9.70	7.08	5.76	5.73
O I	6300	1.05	1.27	2.01	–	–	–
	6363	.50	.41	.64	–	–	–
O II	3726/29	263.03	262.99	263.09	199.53	199.51	199.44
	7321	3.16	1.60	1.88	1.78	1.29	1.23
O III	4363	1.82	.32	.41	2.23	.45	.42
	4959	67.61	72.42	72.47	70.79	74.18	74.11
	5007	208.93	208.60	208.71	213.80	213.65	213.45
Ne III	3868	9.12	9.14	56.90	6.76	56.93	56.95

표 2-3. Continued.

Element	Wave	$I_{obs}(NGC604)$	I_{cal1}	I_{cal2}	$I_{obs}(IC131)$	I_{cal1}	I_{cal2}
	3969	16.98	2.73	16.97	16.98	16.98	16.98
S II	4068/76	1.86	1.53	1.70	–	–	–
	6717	15.14	15.16	15.14	10.0	10.0	10.00
	6731	10.0	11.49	11.47	7.24	7.19	7.19
S III	6312	.98	.65	.58	–	–	–
Ar III	7136	7.59	7.60	7.56	2.24	–2.24	2.24
	7751	1.70	1.83	1.83	–	–	–
OUR	<t>	8300			7900		
	T_e	11000			11700		
	N_e	100			40		
Central Star	$R_{\star} (R_{\odot})$		7	7		6	6
	$T_{\star}(K)$		32000	33000		34000	34000
	log g		3.4	4.0		3.7	3.7
Shell(pc)	R_{in}		1.25	1.41		1.92	1.7
	R_{out}		1.70	1.77		3.00	3.0
Prediction	T_e		6700	7200		7100	7100
	N_e		100	20		40	40

표 2-4. Model predictions for HII regions in M33

Element	Wave	$I_{obs}(MA9)$	I_{cal1}	$I_{obs}(IC133)$	I_{cal1}	$I_{obs}(NGC588)$	I_{cal1}
He I	5876	13.80	13.80	10.00	10.00	12.02	12.03
	6678	7.76	3.93	2.57	2.84	2.57	3.41
	4471	–	–	–	–	4.27	4.28
N II	6584	33.88	33.71	11.48	11.53	8.51	8.53
	6548	11.48	11.64	3.80	3.98	2.82	2.94
O I	6300	–	–	2.09	.09	–	–
O II	3726/29	354.81	354.62	144.54	145.19	87.10	88.17
	7321	–	–	3.09	1.25	–	–
O III	4363	–	–	–	–	8.94	2.73
	4959	63.10	58.85	177.84	182.17	190.55	195.22
	5007	169.82	169.50	524.81	524.70	562.34	562.29
Ne III	3868	21.38	21.32	32.36	32.48	43.65	43.65
	3969	–	–	22.39	9.69	19.50	13.02
S II	6717	22.91	22.82	6.76	6.76	5.25	5.24
	6731	17.78	17.28	4.17	5.14	4.37	3.99
S III	6312	–	–	1.35	1.50	–	–
Ar III	7136	–	–	9.77	9.74	5.50	5.50
	7751	–	–	3.47	2.35	–	–
OUR	<t>	8500		10400		10300	
	Te					13100	
	Ne	100				100	
Central Star	$R_{\star} (R_{\odot})$		7.5		7.5		7
	$T_{\star}(K)$		32000		40000		42000
	log g		3.4		3.7		3.9
Shell(pc)	R_{in}		1.81		3.15		3.0

표 2-4. Continued.

Element	Wave	$I_{obs}(MA9)$	I_{call}	$I_{obs}(IC133)$	I_{call}	$I_{obs}(NGC588)$	I_{call}
	R_{out}		2.209		3.64		3.5
Prediction	T_e		7300		8600		8800
	N_e		100		100		100

표 2-5. Model predictions for HII regions in M33

Element	Wave	$I_{obs}(IC132)$	I_{call}	$I_{obs}(MA1)$	I_{call}
He I	5876	13.18	13.18	12.02	12.02
N II	6584	7.08	7.06	—	—
	6548	2.34	2.44	—	—
O I	6300	—	—	60.26	4.90
O II	3726/29	107.16	107.51	—	—
O III	4363	7.24	2.61	—	—
	4959	194.98	195.24	186.21	199.43
	5007	562.34	562.35	575.44	574.44
Ne III	3868	46.77	46.75	—	—
	3969	22.39	13.94	—	—
S II	6717	6.46	6.45	70.79	70.94
	6731	5.13	4.91	70.79	64.78
S III	6312	—	—	60.26	4.01
Ar III	7136	6.92	6.89	—	—
OUR	<t>	10600		8800	
	T_e	12600			
	N_e	100		450	
Central Star	$R_{\star} (R_{\odot})$		7		5.8
	$T_{\star} (K)$		39500		46000
	log g		3.8		7.5
Shell(pc)	R_{in}		1.6		1.0
	R_{out}		2.78		1.3
Prediction	T_e		8800		8100
	N_e		100		450