

OB형 별의 라이먼 연속 복사의 광도 THE LYMAN-CONTINUUM LUMINOSITIES OF OB-TYPE STARS

선광일

한국천문연구원

KWANG-IL SEON

Korea Astronomy and Space Science Institute

E-mail: kiseon@kasi.re.kr

(Received November 30, 2007; Accepted December 7, 2007)

ABSTRACT

We are often faced with the task of having to estimate the hydrogen and helium ionizing luminosities of massive stars in the study of H II regions and the warm ionized medium (WIM). Using the results of the most complete compilation of stellar parameters (the effective temperature, stellar radius and surface gravity) and the latest Kurucz stellar atmosphere models, we calculate the ionizing photon luminosities in the H⁰ and He⁰ continua from O3 to B5 stars. We compared the theoretical Lyman-continuum luminosity with the observationally inferred luminosity of the H II region around α Vir, and found that the theoretical value is higher than the observed value in contrast to the earlier result.

Key words: stars: early-type — H II regions — ultraviolet: ISM

1. 서론

중온 이온화 매질 (Warm Ionized Medium, WIM) 또는 확산 이온화 기체 (Diffuse Ionized Gas, DIG)에 대한 광이온화(photoionization) 모델을 연구함에 있어서 라이먼 연속 복사 (Lyman continuum, Lyc)의 광도값은 매우 중요한 역할을 한다. 중온 이온화 매질은 우리 은하의 경우 약 20%의 공간을 차지하고 있는 것으로 알려져 있으며 (Reynolds 1991) 외부은하의 경우는 관측되는 전체 Hα 세기의 약 40%가 중온 이온화 매질에서 방출되는 것으로 알려져 있다 (Walterbos & Braun 1996). 중온 이온화 매질은 은하 평면의 H II 영역 중심에 있는 질량이 큰 별에서 방출된 라이먼 연속 복사가 H II 영역을 만들고 남은 빛이 새어나오면서 주변의 성간물질을 이온화시키면서 만들어진다고 알려져 있다 (Mathis 1986; Sokolowski & Bland-Hawthorn 1991; Domgörgen & Mathis 1994; Sembach et al. 2000).

그러나, 라이먼 연속 복사는 중성 수소의 기둥 밀도 (column density)가 불과 $\lesssim 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ 이기만 해도 중성 수소에 의해 완전히 흡수되기 때문에 H II 영역을 만들고 남은 라이먼 연속 복사가 은하평면으로부터 어떻게 새어나오는 지가 문제점으로 지적되곤 했다 (Reynolds 1995). 한편, Ferguson et al. (1996)에 의해 처음으로 중온 이온화 매질에서 방출되는 Hα 방출선이 주로 밝은 H II 영역 근방에 몰려있음이 정량적으로 밝혀졌다. Zurita et al. (2002)은 밝은 H II 영역에서 새

어나오는 라이먼 연속 복사가 거의 흡수되지 않는다는 가정하에 NGC 157의 중온 이온화 매질에서 방출되는 Hα의 공간적 분포를 성공적으로 설명할 수 있었다.

만약 H II 영역 중심에 있는 별의 분광형을 안다면 그 별의 분광형으로부터 이론적으로 예측되는 라이먼 연속 복사 광도와 H II 영역에서 관측되는 Hα의 광도를 비교함으로써 H II 영역에서 라이먼 연속 복사가 새어나오는지를 직접적으로 확인할 수 있다. Patel & Wilson (1995)은 처음으로 M33에 대해 H II 영역내부의 별로부터 예측되는 라이먼 연속 복사 광도값과 Hα 관측치를 비교함으로써 이론치가 관측치보다 3~7배 이상 크다는 결론을 얻었다. Oey & Kennicutt (1997)은 대마젤란성운의 H II 영역에서 관측되는 Hα 방출선 광도와 각각의 H II 영역 중심부에 있는 별에서 이론적으로 예측되는 라이먼 연속 광도를 비교함으로써 H II 영역에서 0~51%의 라이먼 연속 복사가 새어나간다는 것을 보였다.

하지만 이러한 연구를 위해서는 각각의 별의 분광형에 따른 라이먼 연속 복사 광도를 정확히 알고 있어야 한다. Panagia (1973)는 B3 부터 O4형 별에 대해 라이먼 연속 복사 광도를 계산하였으며 Vacca et al. (1996)은 새로운 관측 자료와 비교함으로써 별의 온도 및 표면 중력의 세기등을 새로이 눈금 조정하였고, Kurucz (1992)의 항성 모델을 이용하여 O3-B0.5형 별에 대한 라이먼 연속 복사 광도를 계산하였다. Vacca

et al. (1996)은 비교적 최근의 항성 모델을 사용하여 계산한 결과가 Panagia (1973)의 결과와는 많은 차이가 있음을 보였다. 특히, 최근에 Hoopes & Walterbos (2000)와 Hoopes, Walterbos, & Bothun (2001)은 외부은하에서 만기형 O형 또는 B형 별들이 중온 이온화 매질의 생성에 중요한 역할을 한다는 것을 보였다. 따라서, 중온 이온화 매질을 이온화시키는 별의 분광형을 이해하기 위해서는 만기형(late type) O형 또는 B형 별 주변의 H II 영역과 중온 이온화 매질과의 관계를 이해할 필요가 있다. 이를 위해서는 Vacca et al. (1996)에 의해 구해진 것보다 상대적인 어두운 별인 B형의 라이먼 연속 복사 광도를 아는 것이 중요하다. 따라서, 이 논문에서는 가장 최근에 계산된 Kurucz의 항성 모델 (Castelli & Kurucz 2003)을 이용하여 OB형 별에 대한 라이먼 연속 광도를 계산하였다.

2. 모델 계산

각 분광형에 따른 항성의 표면 온도 (T_{eff}), 항성 반경 (R) 및 중력의 세기(g)는 Straižys & Kuriliene (1981)에 의해 가장 광범위하게 수집되었으므로 그들의 결과를 이용하였다. 라이먼 연속 복사 광도를 계산하기 위해 태양과 동일한 중원소함량 (metallicity)을 갖는 Kurucz 모델 (Castelli & Kurucz 2003)을 이용하였으며, 이론적으로 예측되는 수소 및 헬륨을 이온화시키기 위한 광자의 플럭스 (photons cm^{-2})를 다음 방정식과 같이 계산하였다.

$$q_i = \int_0^{\lambda_{\text{lim}}^{(i)}} \frac{\pi \lambda F_{\lambda}}{hc} d\lambda. \quad (1)$$

여기서 q_0 는 $\lambda_{\text{lim}}^{(0)} = 912\text{\AA}$ 에 대응하는 수소의 이온화 플럭스이며 q_1 는 $\lambda_{\text{lim}}^{(1)} = 504\text{\AA}$ 에 대응하는 헬륨의 이온화 플럭스이다. 이때 F_{λ} 는 주어진 온도와 표면중력의 세기에 대한 파장 λ 에서의 Kurucz 모델의 플럭스 밀도이다. 각 분광형에 대한 플럭스 밀도는 Kurucz 모델 그리드(grid)로부터 로그스케일 (log scale) 공간에서 선형 내삽을 통해 구하였다. 각 분광형에 따른 총 이온화 광도 Q_i (photons s^{-1})는 이온화 광자 플럭스 q_i 를 이용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Q_i = 4\pi R^2 q_i. \quad (2)$$

이때, Q_0 는 수소를 이온화시키기 위한 라이먼 연속 복사 광도이고 Q_1 는 헬륨을 이온화시킬 수 있는 광도를 나타낸다. 별 주변에 존재하는 균일한 밀도의 수소원자 매질이 완전히 이온화되는 부피를 나타내는 Strömgren 반경은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$R_S = \left(\frac{3Q_0}{4\pi n_H^2 \alpha_B} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

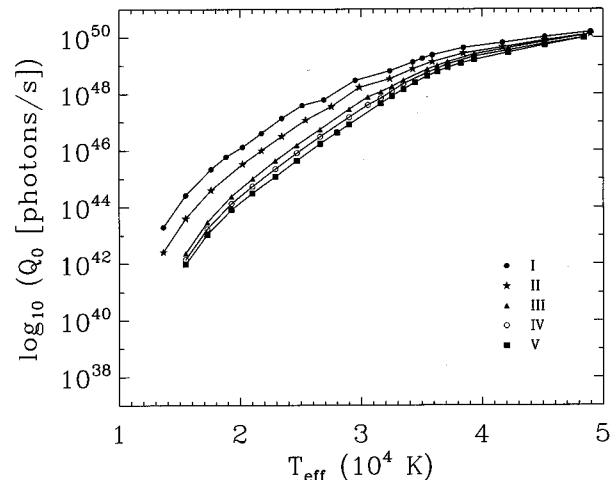


그림 1. 분광형과 광도 계급에 따른 수소원자 이온화 광도.

여기서 n_H 는 단위 부피당 수소원자의 수 밀도 (number density)이고 α_B 는 이온화된 수소가 바닥상태를 제외한 모든 에너지 레벨로 재결합(recombination)하는 반응 계수 (rate coefficient)이다 (Osterbrock & Ferland 2006). 전자의 온도가 10,000 K이고 밀도는 $n_H = (100 \text{ cm}^{-3})n_{100}$ 인 전형적인 H II 영역의 경우의 Strömgren 반경은 다음과 같다.

$$R_S = 3.16 \left(Q_0 / 10^{49} \text{ photons s}^{-1} \right)^{1/3} n_{100}^{-2/3} \text{ pc}. \quad (4)$$

위의 방법을 따라 계산된 수소 및 헬륨의 이온화 광도는 각각 그림 1과 2에서 온도 및 광도 계급 (luminosity class)에 따라 나타나었으며, 그림 3에서는 전자의 온도가 10,000 K이고 밀도가 100 cm^{-3} 인 경우에 대한 Strömgren 반경을 나타내었다. O3부터 B5까지 분광형에 대한 Q_0 , Q_1 및 R_S 에 대한 자세한 값들은 온도 순으로 표 1과 2에 나타나었다. 표 1과 2에서 항성 반경 R 은 Straižys & Kuriliene (1981)에 의해 수집된 값으로부터 얻었다.

3. 적용

3.1. 중온 이온화 매질

중온 이온화 매질을 이온화시키는 에너지원(source)에 대한 연구는 $H\alpha$ 방출선뿐만 아니라 [S II] $\lambda 6716$, [N II] $\lambda 6584$, He I $\lambda 5876$ 및 [O I] $\lambda 6300$ 등의 방출선 관측을 통하여 이루어진다. 또한 관측된 방출선들 사이의 비(emission line ratios)와 광이온화 (photoionization) 모델에서 얻어지는 방출선 사이의 비를 비교함으로써 중온 이온화 매질을 이온화시키는 주요 에너지원이 무엇인지 연구하게 된다. 특히, Reynolds & Tufts (1995)는 중온 이온화 매질의 에너지원을 연구하기 위해 He I $\lambda 6584$ 재결합 방출선 관측을 시도하였지만 발

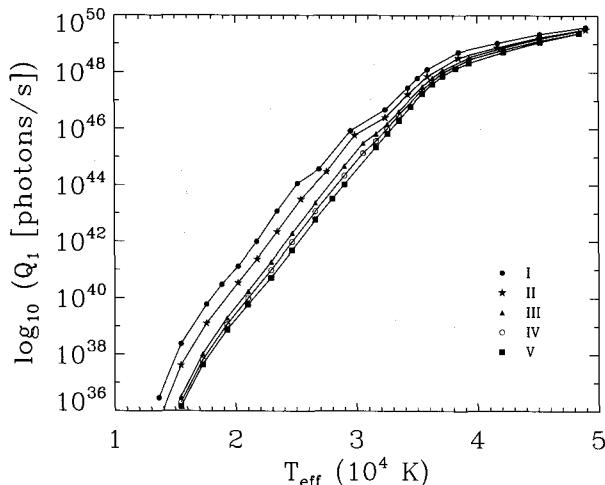


그림 2. 분광형과 광도 계급에 따른 헬륨원자 이온화 광도.

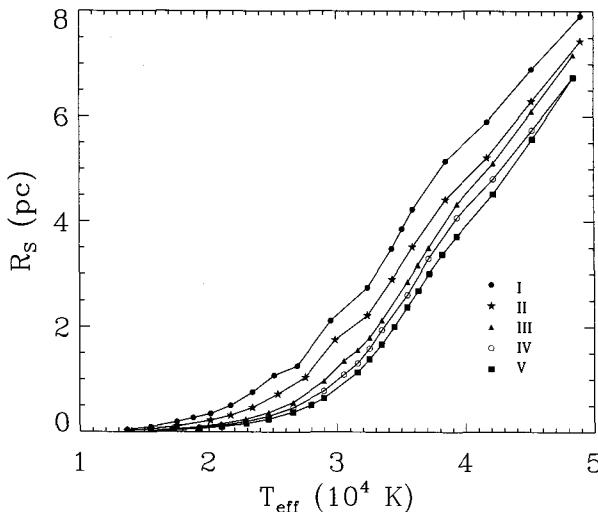


그림 3. 전자의 온도가 10,000 K이고 전자 밀도가 100 cm^{-3} 일 때 분광형과 광도 계급에 따른 Strömgren 반경의 크기.

견하지 못 했다. 이 결과로부터 그들은 중온 이온화 매질에서 헬륨은 주로 중성 상태로 존재함을 보였다. 그들은 또한 헬륨의 이온화율은 $n(\text{He}^+)/n(\text{He}_{\text{total}}) \lesssim 0.27$ 임을 보였으며 헬륨과 수소를 이온화시킬 수 있는 광자(photon)의 광도 비율은 $Q_1/Q_0 \lesssim 0.03$ 임을 보였다. 이 값으로부터 중온 이온화 매질의 에너지원이 별이라면 별의 온도를 알 수 있다. 그림 4는 별의 온도 및 분광형에 따른 Q_1/Q_0 의 변화를 보여주며 표 1과 2로부터 구체적인 값을 비교할 수 있다. 표 1과 $Q_1/Q_0 \lesssim 0.03$ 이라는 조건으로부터 우리는 에너지원의 분광형이 O8 이거나 또는 이보다 만기형의 별이어야 함을 알 수 있다. 이 값은 Reynolds & Tufte (1995)가 제시한 값과 잘 일치하며 좀 더 민감도(sensitivity)가 높은 관측결과가

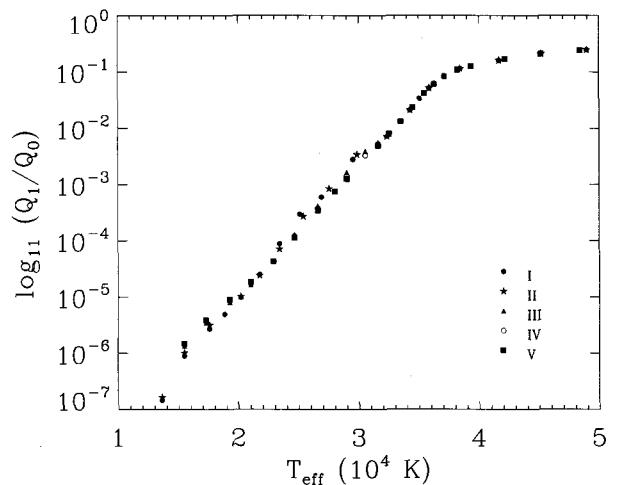


그림 4. 헬륨원자 이온화 광도와 수소원자 이온화 광도의 비.

나오게 되면 표 1과 2로부터 별의 온도를 구체적으로 결정할 수 있을 것이다.

3.2. SPICA

은하 평면에 주로 존재하는 O형 별에 의해 만들어지는 H II 영역은 상대적으로 많은 연구가 진행된 반면 B형 별 주변의 H II 영역은 많이 연구되지 않은 편이다. B형 별 주변의 H II 영역중 특히 α Virginis 에 의해 만들어진 H II 영역은 고위도에 위치하고 있으며 주변에 밝은 별이 없기 때문에 B형 별에 의한 H II 영역을 연구하기에 적합하다. Fejes (1974)은 21 cm 관측을 통해 분광형이 B1III-IV인 α Vir 근방에 H II 영역이 존재한다는 간접적인 증거를 얻었으며 York & Kinahan (1979)은 UV 흡수선 관측을 통해 α Vir 방향으로 약 7 pc 의 크기를 갖는 밀도가 낮은 ($n_e \leq 0.5 \text{ cm}^{-3}$) 이온화된 영역이 존재한다는 것을 보였다. α Vir 주변의 H II 영역에 대한 직접적인 관측 결과는 Reynolds (1985)에 의해 $H\alpha$ 관측으로부터 얻어졌다. Reynolds (1985)는 관측된 $H\alpha$ 세기로부터 case B 재결합과정을 가정하였을 때 α Vir 에서 방출되는 라이먼 연속 복사 광도가 $L_{\text{Lyc}} \sim 1.9 \pm 0.6 \times 10^{46} \text{ photons s}^{-1}$ 임을 보였다. 그는 Panagia (1973)이 계산한 B형 별에 대한 라이먼 연속 복사 광도를 이용하여 이론값이 관측값보다 2배 낮다는 결과로부터 α Vir 의 분광형이 이미 알려진 B1III-IV 보다 더 온도가 높은 조기형(early type) 별로써 B0.75 III일 것이라는 결론을 내렸다. 그러나, 표 2로부터 B1III-IV 에 대한 라이먼 연속 복사 광도가 $Q_0 = (3 - 5) \times 10^{46} \text{ photons s}^{-1}$ 임을 알 수 있고, 따라서 α Vir의 분광형이 B1보다 조기형일 필요가 없다는 것을 알 수 있다. 이 값은 관측에서 요구되는 값보다 높은 값이며 약 20 – 50%의 라이먼 연속 복사 광도는 H

H II 영역내의 성간 먼지(interstellar dust)에 흡수되었거나 H II 영역밖으로 새어나갔을 것으로 예상된다. 성간 먼지에 의해 흡수되었는지 H II 영역밖으로 새어나갔는지는 좀 더 자세한 연구가 필요하다.

4. 요약 및 결론

가장 널리 쓰이고 있는 Vacca et al. (1996)의 계산 결과는 O4부터 B0형 별까지만 라이먼 연속 복사 광도를 계산하였기 때문에 B형 별에 주변의 H II 영역을 연구하거나 B형 별이 중온 이온화 매질의 이온화에 미치는 영향을 연구하기 위해서는 완전하지 못하다. 따라서, 본 연구에서는 가장 최근의 Kurucz 항성 모델을 이용하여 O3부터 B5형까지의 별에 대한 라이먼 연속 복사 광도 및 헬륨의 이온화 광도를 계산하였다. 계산 결과로부터 우리는 α Vir 별이 Reynolds (1985)에서 결론 내린 바와 달리 B1 보다 온도가 더 높은 별일 필요가 없다는 것을 알았다.

참고문헌

- Castelli, F. & Kurucz, R. L., 2003, New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres, IAUS, 210, 20
- Domgörgen, H. & Mathis, J. S., 1994, The ionization of the diffuse ionized gas, ApJ, 428, 647
- Fejes, I., 1974, The distribution of neutral hydrogen around alpha Virginis, AJ, 79, 25
- Ferguson, A. M. N., Wyse, R. F. G., Gallagher, J. S. III, & Hunter, D. A., 1996, Diffuse Ionized Gas in Spiral Galaxies: Probing Lyman Continuum Photon Leakage From H II Regions?, AJ, 111, 2265
- Hoopes, C. G. & Walterbos, R. A. M., 2000, The Contribution of Field OB Stars to the Ionization of the Diffuse Ionized Gas in M33, ApJ, 541, 597
- Hoopes, C. G., Walterbos, R. A. M., & Bothun, G. D., 2001, Far-Ultraviolet and H α Imaging of Nearby Spiral Galaxies: The OB Stellar Population in the Diffuse Ionized Gas, ApJ, 559, 878
- Kurucz, R. L., 1992, Model Atmospheres for Population Synthesis, IAUS, 149, 225
- Leitherer, C., 1990, Observational tests for the evolution of massive stars in nearby galaxies, ApJS, 73, 1
- Mathis, J. S., 1986, The photoionization of the diffuse galactic gas , ApJ, 301, 423
- Oey, M. S. & Kennicutt, R. C. Jr., 1997, Comparison of H II region luminosities with observed stellar ionizing sources in the Large Magellanic Cloud, MNRAS, 291, 827
- Osterbrock, D. E. & Ferland, G. J., 2006, Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei, 2nd ed. (University Science Books: Sausalito)
- Patel, K. & Wilson, C. D., 1995, Are Galaxies Optically Thin to Their Own Lyman-Continuum Radiation? I. M33, ApJ, 451, 607
- Panagia, N., 1973, Some Physical parameters of early-type stars, AJ, 78, 929
- Reynolds, R. J., 1985, Detection of a large very faint emission nebula surrounding Alpha Virginis, AJ, 90, 92
- Reynolds, R. J., 1991, Ionized disk/halo gas - Insight from optical emission lines and pulsar dispersion measures, IAUS, 144, 67
- Reynolds, R. J., 1995, Diffuse Optical Emission Lines as Probes of the Interstellar and Intergalactic Ionizing Radiation, ASPC, 80, 388
- Reynolds, R. J., Tufte, A search for the He I lambda 5876 recombination line from the diffuse interstellar medium, 1995, ApJL, 439, L17
- Sembach, K. R., Howk, J. C., Ryans, R. S. I., & Keenan, F. P., 2000, Modeling the Warm Ionized Interstellar Medium and Its Impact on Elemental Abundance Studies, ApJ, 528, 310
- Sokolowski, J. & Bland-Hawthorn, J., 1991, Photoionization of high-latitude gas in NGC 891, PASP, 103, 911
- Straižys, V. & Kurilien, G., 1981, Fundamental stellar parameters derived from the evolutionary tracks, Ap&SS, 80, 353
- Vacca, W. D., Garmany, C. D., & Shull, J. M., 1996, The Lyman-Continuum Fluxes and Stellar Parameters of O and Early B-Type Stars, ApJ, 460, 914
- Walterbos, R. A. M. & Braun, R., 1996, The Cool and Warm Phases of the Interstellar Medium in Spiral Galaxies, ASPC, 106, 1
- York, D. G. & Kinahan, B. F., 1979, The interstellar medium near the sun. II - The line of sight to Alpha Virginis, ApJ, 228, 127
- Zurita, A., Beckman, J. E., Rozas, M., & Ryder, S., 2002, The origin of the ionization of the diffuse ionized gas in spirals. II. Modelling the distribution of ionizing radiation in NGC 157, A&A, 386, 801

표 1. O형 별의 수소 및 헬륨 이온화 광도

SPEC. TYPE	T_{eff} (K)	R (R_{\odot})	$\log Q_0$ (s^{-1})	$\log Q_1$ (s^{-1})	R_S (PC)
O3II	48970	19.95	50.11	49.51	7.43
O3I	48970	21.88	50.19	49.59	7.90
O3V	48410	17.78	49.99	49.37	6.74
O3IV	48410	17.78	49.99	49.37	6.74
O3III	48410	19.50	50.07	49.45	7.17
O4II	45180	19.50	49.90	49.22	6.29
O4V	45180	16.22	49.74	49.06	5.56
O4IV	45180	16.98	49.78	49.10	5.73
O4III	45180	18.62	49.86	49.18	6.10
O4I	45180	22.39	50.02	49.34	6.89
O5V	42160	14.79	49.47	48.69	4.52
O5IV	42160	16.22	49.55	48.77	4.81
O5III	42160	17.78	49.63	48.85	5.11
O5II	41680	19.05	49.65	48.85	5.21
O5I	41680	22.91	49.81	49.01	5.89
O6IV	39350	15.49	49.33	48.43	4.07
O6III	39350	16.98	49.41	48.51	4.33
O6V	39350	13.49	49.21	48.31	3.71
O6II	38450	18.62	49.44	48.49	4.41
O6I	38450	23.44	49.64	48.69	5.15
O6.5V	38230	12.74	49.09	48.13	3.38
O7V	37150	12.02	48.93	47.86	3.01
O7IV	37150	13.80	49.05	47.98	3.30
O7III	37150	15.14	49.13	48.06	3.50
O7.5V	36300	11.22	48.79	47.57	2.68
O7.5III	36300	14.45	49.01	47.79	3.17
O7I	35890	23.44	49.38	48.09	4.23
O7II	35890	17.78	49.14	47.85	3.52
O8V	35480	10.47	48.63	47.25	2.38
O8IV	35480	12.02	48.75	47.37	2.61
O8III	35480	13.80	48.87	47.49	2.86
O7.5I	35070	22.91	49.26	47.79	3.85
O8.5V	34470	9.44	48.40	46.78	2.00
O8II	34270	16.98	48.89	47.21	2.90
O8I	34270	22.39	49.13	47.45	3.48
O9V	33490	8.51	48.16	46.28	1.66
O9IV	33490	10.72	48.36	46.48	1.94
O9III	33490	12.30	48.48	46.60	2.12
O9.5V	32540	7.85	47.92	45.82	1.38
O9.5IV	32540	9.66	48.10	46.00	1.59
O9.5III	32540	11.61	48.26	46.16	1.79
O9I	32350	22.91	48.81	46.67	2.74
O9II	32350	16.60	48.53	46.39	2.21
O9.5II	29850	16.22	48.23	45.76	1.75
O9.5I	29510	23.99	48.48	45.92	2.12

표 2. B형 별의 수소 및 헬륨 이온화 광도

SPEC. TYPE	T_{eff} (K)	R (R_{\odot})	$\log Q_0$ (s^{-1})	$\log Q_1$ (s^{-1})	R_S (PC)
B0V	31620	7.24	47.66	45.35	1.13
B0IV	31620	8.71	47.84	45.56	1.30
B0III	31620	10.96	48.07	45.82	1.55
B0.2IV	30540	8.43	47.61	45.13	1.09
B0.2III	30540	10.62	47.89	45.48	1.35
B0.5V	29000	6.53	46.92	44.02	0.64
B0.5IV	29000	8.04	47.17	44.33	0.78
B0.5III	29000	10.12	47.46	44.68	0.97
B0.7V	28020	6.27	46.63	43.51	0.51
B0II	27540	15.85	47.55	44.48	1.04
B0I	26910	25.12	47.79	44.57	1.25
B1V	26600	5.89	46.23	42.77	0.38
B1IV	26600	7.41	46.49	43.06	0.46
B1III	26600	9.33	46.74	43.36	0.56
B0.5II	25400	15.85	47.07	43.50	0.72
B0.5I	25110	26.30	47.59	44.06	1.07
B1.5V	24680	5.31	45.64	41.69	0.24
B1.5IV	24680	6.84	45.91	41.98	0.29
B1.5III	24680	8.81	46.19	42.29	0.36
B1II	23440	15.85	46.50	42.35	0.46
B2V	22900	4.79	45.08	40.71	0.16
B2IV	22900	6.31	45.35	40.98	0.19
B2III	22900	8.32	45.64	41.27	0.24
B1.5I	21750	29.17	46.60	42.00	0.50
B1.5II	21750	16.03	46.00	41.38	0.31
B2.5V	21010	4.42	44.50	39.76	0.10
B2.5IV	21010	5.69	44.74	39.98	0.12
B2.5III	21010	7.50	45.01	40.23	0.15
B2I	20180	30.90	46.12	41.11	0.35
B2II	20180	16.22	45.52	40.53	0.22
B3V	19270	4.07	43.91	38.87	0.06
B3IV	19270	5.13	44.13	39.06	0.08
B3III	19270	6.76	44.39	39.29	0.09
B2.5I	18830	32.36	45.78	40.47	0.27
B3I	17570	33.88	45.34	39.77	0.19
B3II	17570	16.22	44.60	39.10	0.11
B4V	17270	3.59	43.04	37.63	0.03
B4IV	17270	4.42	43.23	37.80	0.04
B4III	17270	5.69	43.47	38.01	0.05
B4I	15480	38.90	44.42	38.37	0.09
B5V	15480	3.16	41.98	36.15	0.01
B5IV	15480	3.80	42.15	36.31	0.02
B5III	15480	4.79	42.37	36.50	0.02
B4II	15480	17.38	43.60	37.61	0.05
B5II	13640	18.62	42.41	35.63	0.02
B5I	13640	44.67	43.30	36.46	0.04