

## 가까운 폭발적 항성생성은하의 분광 관측

이철희 · 심현진\*

경북대학교 지구과학교육과, 41566, 대구광역시 북구 대학로 80

## Spectroscopy of Local Starburst Galaxies

Cheolhui Lee and Hyunjin Shim\*

Department of Earth Science Education, Kyungpook National University,  
80 Daehakro, Bukgu, Daegu 41566, Korea

**Abstract:** We investigate the star formation rate, stellar mass, and gas-phase metallicity of local starburst galaxies with different star formation time scales based on their optical spectra. The observation is made using the longslit spectrograph attached to the 4K CCD on the Bohyunsan Optical Astronomy Observatory 1.8m telescope, targeting 21 Wolf-Rayet galaxies as young starbursts and 13 UV excess galaxies as slightly older starbursts. A Baldwin-Phillips-Terlevich diagram analysis shows that 50% of the observed targets are pure star-forming galaxies while only 15% are classified as Active Galactic Nuclei. Fraction of galaxies that reside in composite region is higher in UV excess galaxies than in Wolf-Rayet galaxies, suggesting that the AGN development requires extra time after the onset of the star formation. Most of the observed starburst galaxies have stellar masses of  $10^{9-11} M_{\odot}$  and stellar formation rates of  $0.01-100 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ , and their star formation rates are consistent with that of the SDSS star forming main sequence galaxies of similar stellar mass. There is no significant difference between Wolf-Rayet galaxies and UV excess galaxies in terms of the stellar mass and star formation rate. We also see a mass-metallicity relation for local starbursts with slightly lower metallicity for a given stellar mass, which implies the existence of a strong feedback activity due to the star formation in these galaxies.

**Keywords:** galaxy, starburst, spectroscopy, star formation rate, metallicity

**요약:** 가까운 은하에서 폭발적 항성생성은하의 분광 관측을 수행하여 별생성률이 높은 은하에서 별생성이 일어나는 시간 규모에 따라 방출선의 방출 기작, 별생성률, 항성질량, 금속함량 등의 물리량 혹은 물리량 상호 간의 관계가 어떻게 다른지를 살펴보았다. 관측 대상은 별생성 나이가 매우 어린 울프-레이에 은하 21개와 상대적으로 긴 시간 규모의 별생성이 진행 중인 자외선 초과복사 은하 13개로 보현산 천문대의 1.8 m 망원경과 4K CCD, 긴 슬릿 분광기를 이용해 광학 영역에서의 스펙트럼을 얻었다. BPT 분석도표를 그려 관측된 은하들에서 기체를 이온화시키는 원인을 살펴보면 전체적으로는 별생성(약 50%)이 비항성적 요소인 활동은하핵(약 15%)에 비해 훨씬 높았다. 별생성과 활동은하핵이 모두 기여하는 경우도 전체의 35%였는데, 이러한 경우에 속하는 은하는 대부분 상대적으로 나이가 많을 것으로 추정되는 자외선 초과복사 은하였다. 관측된 은하의 항성질량 범위는 대부분  $10^{9-11} M_{\odot}$ 이고 별생성률은  $0.01-100 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ 로, SDSS에서 관측된 은하들로 구성된 별생성 주계열에 위치한다. 울프-레이에 은하와 자외선 초과복사 은하들의 항성질량, 별생성률에서 큰 차이는 없었다. 또한 폭발적 항성생성은하는 질량-금속함량 관계를 보이며, 비슷한 항성질량을 가진 SDSS 은하와 비교했을 때 금속함량이 낮게 나타났다. 이는 이 은하들에서 별생성으로 인한 강한 피드백이 일어나고 있음을 보여준다.

**주요어:** 은하, 폭발적 항성생성은하, 분광, 별생성률, 금속함량

\*Corresponding author: hjshim@knu.ac.kr  
Tel: +82-53-950-5921  
Fax: +82-53-950-5946

## 서론

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은하에서의 별생성은 은하의 진화 과정을 구성하는 가장 기본적인 물리적 과정이다. 어떤 은하에서 현재 별생성이 진행 중인지 여부는 생성된 지 얼마 되지 않은 별에서 방출하는 복사로부터 확인할 수 있는데,

이러한 복사에는 자외선 연속복사, 수소재결합선, 적외선복사 등이 있다(Kennicutt, 1998). 유독 별생성률이 높은 은하의 경우 젊고 무거운, 고온의 O/B형 항성의 영향으로 강한 자외선복사나 광학 필터에서의 푸른 색지수, 광학 스펙트럼에서의 강한 방출선 등의 특징이 있으며, 이러한 은하를 폭발적 항성생성은하(starburst galaxies)로 정의할 수 있다(Veilleux and Osterbrock, 1987). 별생성이 지배적인 기작인 ‘HII 은하(HII-like galaxies; French, 1980)’ 외에도 활동은하핵(Active Galactic Nuclei; AGNs)의 영향이 큰 은하 역시 유사한 관측적인 특징을 보인다. 별생성과 활동은하핵이 각각 어느 정도 은하의 복사에 기여하는지 여부를 확인하려면 광학 영역에서의 스펙트럼을 얻을 필요가 있다. 스펙트럼선의 선속은 이 외에도 정량적인 별생성률, 은하의 금속함량 등에 대한 정보를 유추하기 위한 필수적인 재료이다.

초기 우주의 다과장 연구가 활발해지면서 은하에서의 별생성률이 어떻게 변화해 왔는지에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 적색이동에 따라 은하의 별생성률과 은하의 항성질량 등을 추적해 봤을 때 현재 우주에서의 별생성밀도(star formation rate density)는 적색이동  $z=1-2$ , 즉 우주의 나이가 지금의 약 20-50% 일 때의 약 10분의 1에 불과하다는 것이 알려졌다(Madau and Dickinson, 2014). 그리고 특정 시기에 별생성이 가장 활발하게 이루어지는 은하의 질량이 시간이 지남에 따라 달라졌는데, 과거의 우주에서는 상대적으로 무거운 은하가 많은 별을 만들어냈다면 현재로 오면서는 주된 별생성 장소가 상대적으로 가벼운 은하로 옮겨왔다는 ‘우주적 축소(cosmic downsizing)’의 증거들이 다수 발견되었다(Juneau et al., 2005; Fontanot et al., 2009; Moustakas et al., 2013). 이 때문에 가까운 우주에서의 은하 연구가 먼 은하 연구보다 수월함에도 불구하고, 멀리 있는 고적색이동 은하 중에서는 별생성률이 높은 은하가 많은 데 반해 가까이 있는 별생성률이 높은 은하는 그 개수가 많지 않은 편이다. 이러한 드문 은하들의 연구는 이들이 가까이 있기 때문에 별생성과 성간물질과의 상호작용, 환경적 영향을 분석하는 등 자세한 별생성에 관련된 물리적 기작을 연구하는 데에도 도움이 되고, 이들을 이해함으로써 멀리 있는 은하, 즉 초기 우주에서의 은하 생성과 진화 연구를 하기 위한 비교군으로도 활용될 수 있어(Brinchmann et al., 2008; Shim and Chary, 2013) 더욱 중요하다.

가까운 우주에서 별생성률이 특이할 정도로 높은 은하를 연구하기 위해서는 폭발적 항성생성은하를 포함하거나 주로 폭발적 항성생성은하로 구성되었을 것으로 생각되는 은하의 목록에 주목할 필요가 있다. 이 연구에서는 크게 두 종류의 그러한 은하 목록을 사용하여 관측대상을 선별하였다. 하나는 울프-레이에 은하(Wolf-Rayet galaxies; Conti, 1991)라는 이름이 붙여진 특이한 은하이며, 나머지 하나는 자외선에서의 초과복사(UV excess)가 나타나는 은하이다.

우선 울프-레이에 은하는 울프-레이에 별의 특징인 4680 Å 부근의 돌출부(blue WR bump)와 5808 Å 부근 돌출부(red WR bump), HeII 4686 Å 방출선을 비롯한 기타 고이온화 방출선 등이 스펙트럼에서 관측되는 은하이다(López-Sánchez and Esteban, 2008). 돌출부와 고이온화 방출선 등 울프-레이에 은하의 스펙트럼 상의 특징은 울프-레이에 별의 강한 항성풍으로 인한 것이다(Vacca and Conti, 1992). 울프-레이에 단계로 진화할 수 있는 항성은 매우 무겁고(질량  $25 M_{\odot}$  이상) 광도가 크며( $10^5-10^6 L_{\odot}$ ) 뜨거운( $\sim 50,000$  K) O형 항성으로, 은하의 금속함량에 따라 다소 차이는 있으나 일반적으로 울프-레이에 상태는 1-5Myr 가량의 매우 짧은 시간 동안만 지속된다고 알려져 있다(Meynet and Maeder, 2005). 따라서 울프-레이에 별이 다량 존재하는 울프-레이에 은하의 경우 극히 최근에 별생성이 일어난 은하로, 폭발적 항성생성은하 중에서도 나이가 어린 은하일 것이라고 추론할 수 있다. 따라서 이러한 은하에서의 별생성을 울프-레이에 특징이 없으나 별생성률이 높은 은하의 별생성과 비교함으로써 폭발적 항성생성은하의 나이에 따른 진화를 이해할 수 있다. 이외에도 울프-레이에 별 자체만 놓고 보면 이러한 별이 태양보다 훨씬 강한 항성풍으로 성간물질에 영향을 주고 있으며(Crowther, 2007; Pérez-Montero et al., 2013) 유형 Ib/Ic 초신성 폭발의 원형 별일 가능성이 있기 때문에(Gal-Yam et al., 2014) 울프-레이에 은하의 연구는 성간물질과 별의 상호작용 연구, 초신성 모은하 연구로의 확장 가능성이 있다.

한편 자외선에서의 초과복사가 나타나는 은하는 역시 고온의 O/B형 항성에 의한 자외선복사의 기여가 높은 은하이다. 울프-레이에 은하와 비교했을 때 자외선복사는 O형 항성 외에도 B형 항성을 포함한 수명이 비교적 더 긴 항성에 기인하므로, 이렇게 선택된 폭발적 항성생성은하는 폭발적 항성생성은하 중에

서도 조금 더 긴 시간규모의 별생성이 있었음을 추론할 수 있다. 자외선 초과복사가 나타나는 은하를 모은 목록에는 여러 가지가 있으며 그 중 가장 널리 알려진 목록 중 하나는 마카리언은하(Markarian galaxy)이다(이하 Mrk 은하; Markarian, 1967). Mrk 은하는 대개 그 중심부에 자외선복사가 강하고 색이 매우 푸른 밀집된 핵을 가지고 있으며, 이들의 스펙트럼은 전리수소 영역의 스펙트럼과 유사한 경우가 많고(Huchra, 1977) 약 10%의 Mrk 은하들은 세이퍼트 은하로 분류된다. 활동은하핵과 별생성이 모두 푸른색의 복사를 유도할 수 있기 때문에 이를 구별하기 위해서는 분광관측이 필수적이다.

우리는 이 연구에서 가까운 우주에 존재하는 폭발적 항성생성은하를 보다 잘 이해하기 위해 이들에 대한 분광관측을 수행하고, 스펙트럼의 특징을 분석하였다. 울프-레이에 은하와 자외선 초과복사 은하를 이용하여 별생성의 시간 규모, 즉 폭발적 항성생성은하의 나이에 따라 별생성률을 비롯한 별생성 특성이 어떻게 달라지는지 살펴보는 것을 주된 목표로 하였다. 광학 영역에서 스펙트럼을 얻어  $H\beta$ , [OIII],  $H\alpha$ , [NII], [SII] 등 주요 방출선의 선속과 광도, 등가폭 등을 측정하였고, 이 자료를 기초로 폭발적 항성생성은하에서 방출선이 발생하는 주된 기작을 파악하여 비항성 기작(활동은하핵)의 영향이 어느 정도인지, 그 비율이 폭발적 항성생성은하의 나이에 따라 어떻게 다른지를 탐구하였다. 그리고 폭발적 항성생성은하의 나이에 따라 별생성률이나 금속함량 등이 어떻게 다른지와 여러 물리량 간의 상관관계를 알아보았다.

## 관측 및 자료 처리

폭발적 항성생성은하를 비롯한 방출선 은하의 스펙트럼 관측은 2014년 11월 19-20일(2일간), 2015년 3월 21-25일(5일간)에 걸쳐 보현산 천문대의 1.8m 망원경과 4K CCD, 긴 슬릿 분광기를 이용해 수행하였다. 긴 슬릿 분광기의 중심 파장은 5000 Å으로 설정하였고, 격자는 300V, 슬릿의 폭은 250  $\mu\text{m}$ 으로 설정하였다. 이러한 설정으로 최종 데이터에서 얻은 파장 분해능은 5000 Å에서 약 2.6 Åpixel<sup>-1</sup>이다. 긴 슬릿의 길이는 약 3.6 arcmin으로, 가급적 관측대상의 장축을 따라 슬릿이 위치하며 여러 개의 별생성덩어리(star

forming clump)를 지날 수 있도록 슬릿의 위치각을 조절하여 관측하였다. 그러나 기상 조건이 가장 좋은 편이었던 2014년의 하루를 제외하고는 기상 조건의 빠른 변화와 망원경의 노후화로 인한 추적 성능 약화로 관측된 폭발적 항성생성은하의 2차원 스펙트럼을 개별 별생성덩어리별로 따로 추출하는 것이 불가능했다. 따라서 공간적인 분해가 불가능하다고 판단되는 대부분의 경우 은하의 중심부에 슬릿의 중심이 오도록 하여 스펙트럼을 얻었다.

관측 대상을 선정할 때는 울프-레이에 은하의 경우 Schaerer et al.(1999)의 울프-레이에 은하 목록을 이용하였다. 목록의 은하 중 슬론 디지털 천천 탐사(Sloan Digital Sky Survey; SDSS)에서 관측되지 않은 것, 기존 연구(López-Sánchez, 2010; Karthick et al., 2014)에서 관측되지 않은 것, 디지털 검출기로 얻은 광학 스펙트럼이 없는 것을 선정하였고, 충분히 밝거나 광학 외의 다파장 데이터(전파, 자외선, 적외선)가 존재하는 대상을 우선순위로 하였다. 자외선 초과복사 은하의 경우 Markarian et al.(1989) 목록을 활용하여 같은 기준으로 선정했다. 2015년 3월에 관측한 대상들은 해당 시기의 기기 성능을 고려하여(추적 기능 약화) 가급적 밀집도가 높고 밝은 대상을 선택하였다. 2014년, 2015년에 고르게 관측 대상이 된 울프-레이에 은하와 다르게 자외선 초과복사 은하는 대부분 2015년에 관측하였는데, 2015년 관측 대상을 선택할 때 밀집도 기준을 추가 적용하였다는 것은 상대적으로 울프-레이에 은하에 비해 Mrk 은하 관측 대상에 크기가 작은, 활동은하핵에 가까운 천체가 포함될 확률이 높았다는 것이기도 하다. Table 1에 실제로 관측된 대상의 목록과 기본적인 데이터를 포함한 관측 기록을 정리하였다. 기재된 B, V밴드 겉보기 등급( $m_V$ ,  $m_B$ )은 NED (NASA/IPAC Extragalactic Database)<sup>1)</sup> 데이터베이스에서 가져왔으며 적색이동( $z$ )과 광도거리( $D_L$ )는 관측된 스펙트럼에서 직접 측정하여 계산하였다. 노출시간은 대상의 총 노출 시간을 의미하며, 실제로는 기기 상태에 따라 300-600초의 노출을 여러 번 준 다음 이를 합하여 사용하였다. 대상의 밝기와 기상 변화를 고려하여 대상별 노출 시간을 조절하였으며 일부 대상의 경우 관측 도중에 기상 조건이 악화되어 목표하던 노출 시간에 도달하지 못한 경우도 있다.

1) <https://ned.ipac.caltech.edu>

관측으로 얻어진 2차원 스펙트럼 영상은 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)를 이용하여 전처리를 수행하고, 스펙트럼 추출과 파장 동정, 플릭스 보정을 실시하였다. 사용한 꾸러미는 ccdproc과 onedspec이다. 관측 시 촬영한 할로겐램프 스펙트럼 (HCL)을 바닥고르기(flat) 영상으로 사용하여 영점 영상 보정과 바닥고르기 영상 보정을 수행하고, cosmicray 명령어를 사용하여 우주선의 영향을 제거하였다. 2차원 스펙트럼으로부터 1차원 스펙트럼을 추출할 때는 명령어 apextract의 apall을 사용하였고,

추출에 사용한 구경의 크기는 대상에 따라 조금씩 다르지만 일반적으로 공간 방향으로 약 15arcsec 정도였다. 추출 구경의 크기는 스펙트럼의 밝기 분포를 가우스 함수로 근사하여 결정하였으며 대개의 경우 은하의 유효 반경보다 약간 작았다.

추출된 1차원 스펙트럼은 주요 방출선을 찾아내고 방출선의 플릭스와 등가폭을 측정하기 이전에 파장 동정(identify 명령어 사용)과 플릭스 보정(calibrate 명령어 사용)의 단계를 거쳤다. 파장 동정을 위해서는 관측 대상의 스펙트럼 촬영 전후에 촬영한

Table 1. Observation summary

obs. date	target	R.A. (J2000)	Decl. (J2000)	$z^1$	$D_L$ (Mpc) <sup>2)</sup>	$m_V$ (mag)	$m_B$ (mag)	exp. time (s)	class
2014 (Nov 19-20)	Mrk 545	00 09 53.41	+25 55 25.46	0.01459	62.28	11.90	12.60	1800	UV excess
	NGC 1569	04 30 49.19	+64 50 52.52	-0.00034	1.40	11.30	11.70	3600	WR
	II Zw 40	05 55 42.65	+03 23 32.23	0.00232	9.68	11.46	11.68	3600	WR
	Mrk 1199	07 23 43.46	+33 26 31.22	0.01325	55.21	13.13	13.70	3600	WR
	Mrk 8	07 29 27.02	+72 07 52.48	0.01158	48.24	...	14.00	3600	WR
	Mrk 702	08 45 33.66	+16 05 46.88	0.05276	219.85	...	15.70	3600	WR
	NGC 3395	10 50 24.76	+32 55 19.38	0.00578	24.07	12.10	12.10	1800	WR
	NGC 3738	11 35 48.98	+54 31 24.70	0.00125	5.21	12.04	12.12	1800	WR
	Mrk 315	23 04 02.67	+22 37 27.25	0.03913	163.02	14.78	15.60	3600	WR
	Mrk 332	23 20 03.20	+26 12 57.00	0.00791	32.96	12.37	12.97	3600	UV excess
	III Zw 107	23 30 09.70	+25 31 56.00	0.01906	79.44	...	15.00	3600	WR
	NGC 7714	23 36 14.10	+02 09 18.07	0.00910	37.91	14.36	14.91	3600	WR
	2015 (Mar 21-25)	Mrk 620	06 51 31.10	+60 49 22.44	0.00753	31.38	13.54	14.50	1800
Mrk 701		06 55 16.21	+77 26 15.94	0.01980	82.50	...	14.80	1800	UV excess
Mrk 374		07 00 59.00	+54 10 32.63	0.04420	184.16	14.61	15.31	1800	UV excess
IRAS 07164+5301		07 21 39.46	+52 53 34.98	0.04196	174.82	...	...	1800	WR
Mrk 1210		08 04 55.16	+05 04 57.40	0.01096	45.66	13.70	14.55	1800	WR
Mrk 404		09 43 40.55	+31 46 08.62	0.00632	26.34	11.40	12.00	1800	UV excess
Mrk 712		09 57 43.96	+15 36 11.34	0.01560	64.99	...	14.30	1200	WR
Mrk 33		10 33 27.86	+54 19 24.92	0.00576	24.00	13.13	13.66	1800	WR
NGC 3396		10 50 32.06	+32 55 12.68	0.00422	17.57	12.20	12.60	1800	WR
Mrk 171		11 29 09.85	+58 32 46.97	0.01349	56.20	12.86	13.19	1800	WR
Mrk 188		11 48 29.56	+55 52 49.80	0.00867	36.11	12.30	12.80	1800	UV excess
Mrk 759		12 11 33.58	+15 59 18.74	0.00798	33.27	13.35	14.00	1800	UV excess
Mrk 201		12 14 59.14	+54 26 34.69	0.01071	44.63	13.30	13.79	1800	UV excess
NGC 4214		12 16 00.34	+36 15 30.53	0.00057	2.36	9.93	10.30	1800	WR
Mrk 209		12 26 34.51	+48 24 07.67	0.00138	5.76	...	15.30	1800	WR
Mrk 213		12 32 10.90	+57 52 20.96	0.01248	52.02	12.60	13.20	1800	UV excess
NGC 4532		12 35 02.26	+06 22 47.60	0.00524	21.84	11.70	12.30	1800	WR
NGC 4861		12 59 49.09	+34 45 57.28	0.00293	12.21	12.32	12.90	700	WR
Mrk 1341		13 01 47.68	+00 04 24.31	0.00482	20.08	12.30	12.80	1800	UV excess
Mrk 1363	13 54 49.14	-07 58 44.44	0.00984	41.01	12.10	12.90	1800	UV excess	
NGC 5430	14 00 54.36	+59 03 07.56	0.01224	50.98	12.10	12.70	1800	WR	
Mrk 477	14 41 07.15	+53 25 52.61	0.03882	161.75	15.03	16.05	1800	UV excess	

<sup>1)</sup>Redshift of each target is derived from the shift of the observed H $\alpha$  emission line.

<sup>2)</sup>Luminosity distance  $D_L$  is calculated using lumdist.pro in IDL. Cosmological parameters used are  $\Omega_M=0.7$ ,  $\Omega_m=0.3$ ,  $H_0=72$  km/s/Mpc.

**Table 2.** Line fluxes of several significant emission lines

target	flux [ $10^{16}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ ]						$-W_{obs}$ (H $\alpha$ ) [Å]
	H $\beta$ [4861Å]	[OIII] [5007Å]	H $\alpha$ [6563Å]	[NII] [6583Å]	[SII] [6716Å]	[SII] [6731Å]	
Mrk 545	346	247	3143	1951	819	597	30.6
NGC 1569	1160	7693	8163	94	274	240	321.0
II Zw 40	463	3322	2993	81	91	63	3520
Mrk 1199	712	256	3336	1520	403	493	126.3
Mrk 8	290	119	1849	302	382	353	373.2
Mrk 702	230	739	1444	358	223	123	168.3
NGC 3395	1869	2943	9654	909	1790	1511	181.7
NGC 3738	123	374	122	53	29	13	176.0
Mrk 315	198	464	1241	860	634	190	48.8
Mrk 332	30	15	275	196	67	40	17.6
III Zw 107	380	1403	1796	198	197	200	282.7
NGC 7714	1823	2686	7908	281	918	930	157.3
Mrk 620	356	2074	2491	2174	702	715	19.9
Mrk 701	334	36	912	451	335	277	46.3
Mrk 374	2777	2471	9864	407	252	82	88.9
IRAS 07164+5301	283	350	998	327	192	129	77.8
Mrk 1210	972	9753	3749	2067	608	682	90.0
Mrk 404	573	427	2305	1302	438	395	23.8
Mrk 712	369	1113	1319	238	157	118	137.8
Mrk 33	3351	6632	10639	2168	1342	1133	124.2
NGC 3396	1912	3555	6951	1344	821	630	162.4
Mrk 171	3187	4026	13814	4993	1904	1668	294.0
Mrk 188	117	115	1338	591	128	194	13.0
Mrk 759	149	186	580	286	132	286	20.8
Mrk 201	6807	7678	29484	14346	5254	5016	94.9
NGC 4214	9195	26985	31982	3018	3978	2988	761.9
Mrk 209	2716	15179	6920	74	383	175	1992
Mrk 213	2321	4484	9531	4672	1798	1482	48.1
NGC 4532	613	892	5800	2397	782	793	55.4
NGC 4861	2283	13859	7548	183	158	70	1048
Mrk 1341	1314	579	5095	3493	1324	2498	30.7
Mrk 1363	128	58	1089	528	113	94	20.0
NGC 5430	82	14	458	316	152	135	18.9
Mrk 477	1184	12033	3514	1328	489	473	101.3

FeNeArHe 램프의 스펙트럼을 사용하였다. 플럭스 보정을 위해 분광측광표준성인 Hiltner 600, Feige 66, Feige 34를 관측하였지만, 자료 처리 이후 처리된 자료의 질을 고려하여 가장 질이 우수한 Hiltner 600의 스펙트럼을 플럭스 보정의 기준으로 사용하였다. 단, 2014년 11월 20일 관측의 경우 Hiltner 600을 관측하지 않았으며, 대신 관측된 Hiltner 102의 스펙트럼을 표준성 스펙트럼으로 활용하였다.

최종적으로 처리된 스펙트럼에서 눈으로 주요 방출선을 구별하고, IRAF 프로그램 내 longslit 꾸러미에 속한 명령어 splot을 활용하여 각 은하에서 방출선의

선속(emission line flux)과 등가폭(equivalent width)을 측정하였다. 방출선의 선속은 가우스 함수로 근사하였고, 방출선 외의 연속 스펙트럼 부분은 방출선 전후로 지정하여 측정하였다. H $\alpha$  방출선의 중심 위치로부터 각 은하의 적색이동(redshift)을 구했고, 이를 고려하여 관측된 선속은 은하의 정지좌표계(rest-frame)에서의 값으로 보정해주었다. 총 47개의 관측 대상 중 신호 대 잡음비가 너무 낮아 2차원 스펙트럼에서 방출선이 보이지 않거나, 전처리를 거친 자료에서 대기 분자의 방출선이나 우주선의 영향으로 생긴 인공적인 흔적과 방출선을 구별해 내기 어려운

13개 은하의 스펙트럼을 제외한 34개의 은하에 대한 주요 방출선의 선속, 등가폭 측정 결과를 표로 정리하면 Table 2와 같다.

### 스펙트럼 분석

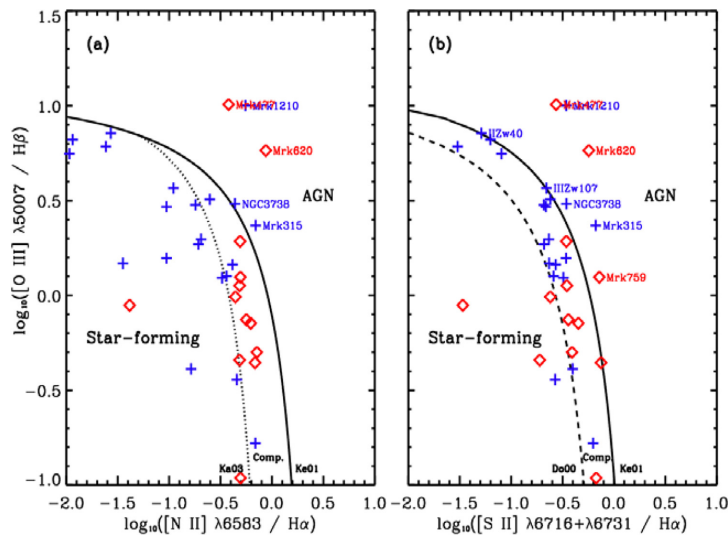
#### 방출선 기작 분류

은하의 스펙트럼에서 관측되는 방출선의 기원이 되는 전리된 기체의 물리적 특성을 알아보기 위해 Baldwin et al.(1981)에서 고안한 진단 도표인 BPT 모델을 사용하였다. 이는 강도가 강하고 검출이 쉬운 주요 방출선을 사용하여 각 방출선의 선속 비를 축으로 하는 그래프를 그린 뒤, 그래프에서의 위치에 따라 해당 은하에서 방출선이 생성되는 기작으로 어떤 것이 더 중요하게 작용하는지를 분류하는 방법으로 많은 은하 연구에 이용된다(e.g., Bang and Ann, 2009; Eom and Shim, 2013). 이온의 금지선과 수소 재결합선의 비를 축으로 사용한 그래프로부터 기체를 전리하는 원인이 별의 생성인지(HII) 혹은 비항성적 요소인지(활동은하핵) 구별할 수 있다(Veilleux and Osterbrock, 1987). 우리는 Kewley et al.(2001), Dopita et al.(2000), Kauffmann et al.(2003)에서 제시된 모델을 사용하여 양 축을  $[OIII]\lambda 5007/H\beta$ 와  $[NII]\lambda 6583/H\alpha$

$H\alpha$ ,  $[OIII]\lambda 5007/H\beta$ 와  $[SII]\lambda\lambda 6716,6731/H\alpha$ 로 설정한 그래프를 그려보았다. 결과는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1a에 추가된 실선과 점선은 각각 Kewley et al.(2001), Kauffmann et al.(2003)에서 제시한 별생성 은하(Star-forming)와 활동은하핵(AGN)을 구별하는 경계이며, 두 선의 사이는 두 기작이 혼재하는 합성 영역(composite)으로, 이 영역에 위치하는 은하는 별생성과 활동은하핵 두 기작의 영향이 모두 나타난다고 할 수 있다. Fig. 1b의 실선과 파선은 Kewley et al. (2001), Dopita et al.(2000)에서 제시한 경계이다.

그래프에서의 위치에 따라 개별 은하를 별생성, 합성, 활동은하핵으로 분류하였다. 동일한 은하가 Fig. 1a과 Fig. 1b에서 다른 영역에 위치하는 경우가 일부 있었는데, 이는 해당 은하의 선속을 계산하기 위한 연속스펙트럼 부분의 잡음이 커서 선속비의 오차가 크기( $\sim 0.3dex$ ) 때문으로 추정된다. 특히  $[SII]$  선속을 측정할 때는 붉은 파장 쪽이기 때문에 완전히 제거되지 않은 대기 스펙트럼선의 영향이 있었고,  $[NII]$  선속을 측정할 때는 스펙트럼의 분해능이 크게 높지 않은 상황에서  $H\alpha$  방출선의 세기가 워낙 강해 연속스펙트럼의 높이에 영향을 주었기 때문에 오차가 증가하였다. 두 그림에서 분류가 다른 경우는 개별 스펙트럼을 살펴보고, 최종적으로는  $[NII]$ 를 사용한



**Fig. 1.**  $[OIII]/H\beta$  vs.  $[NII]/H\alpha$  diagram (Left:a) and  $[OIII]/H\beta$  vs.  $[SII]/H\alpha$  diagram (Right:b) for 34 galaxies where  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $[OIII]$ ,  $[NII]$  and  $[SII]$  emission lines are detected with  $S/N > 3$ . Dotted, solid, and dashed lines are criteria that divide Star-forming and AGN-dominated source from Kauffmann et al. (2003; Ka03), Kewley et al. (2001; Ke01), and Dopita et al. (2000; Do00) respectively. In both panels, blue crosses represent WR galaxies and red diamonds represent UV excess galaxies. For classification of WR and UV excess, see Table 1.

Fig. 1a를 사용해 분류하였다.

그 결과, 모든 방출선의 신호 대 잡음비가 3 이상으로 관측된 34개의 관측대상 중 전체의 47%인 16개가 별생성이 주된 이온화 기작인 것으로 나타나 그 비중이 가장 컸다. 활동은하핵으로 분류된 은하는 5개로 전체의 15%, 합성 영역에 위치한 은하는 13개로 전체의 38%였다. 활동은하핵의 영향이 거의 없이 순수하게 폭발적 항성생성은하로 분류할 수 있는 은하들이 전체의 절반 정도인 것을 확인할 수 있었다. 스펙트럼의 추출에 사용한 구경이 은하의 유효 반경보다 약간 작은 경향이 있고, 슬릿 위치가 대부분 은하 중심을 지나기 때문에 추정된 활동은하핵의 비율은 최대치라 할 수 있다. 별생성의 시간 규모에 따라 울프-레이에 은하(시간 규모가 짧다), 자외선 초과복사 은하(시간 규모가 길다)로 구별했을 때 두 그룹의 구성에는 약간의 차이가 있었다. 울프-레이에 은하는 21개 중 별생성이 14개, 합성 4개, 활동은하핵 3개로 전체의 2/3 이상이 별생성 기작이 두드러지는 것으로 분류되었다. 반면 자외선 초과복사 은하는 13개 중 별생성 2개, 합성 9개, 활동은하핵 2개로 거의 대부분이 별생성과 활동은하핵 기작의 기여를 동시에 받고 있었다. 이를 단순히 해석하면 별생성이 시작된 직후에는 활동은하핵의 영향이 미약하지만 별생성의 시간 규모가 길어지면서 활동은하핵이 성장하여 복사에 많은 기여를 하게 된다고 할 수 있겠다.

그러나 관측 대상의 선정 과정에서 이미 언급하였듯이, 2015년 관측에서는 기기의 노후화 때문에 밀집도가 높은 대상에 관측 우선순위를 주었는데 이때 관측된 자외선 초과복사 은하의 개수가 2014년에 비해 훨씬 많은 것으로 보아 자외선 초과복사 은하 중에 활동은하핵이 구조적으로 더 많이 포함되었을 가능성 또한 존재한다. 물론 2014, 2015년 두 번의 관측에서 관측된 울프-레이에 은하의 개수는 비등하고 분류 결과 역시 크게 다르지 않으므로 울프-레이에 은하 샘플에서 활동은하핵이 주된 작용을 하는 대상을 부족하게 선별했다고는 할 수 없다. 따라서 별생성의 시간 규모에 따라 방출선 기작이 중요하게 작용하는 빈도가 차이가 있다고는 보이나, 그 차이는 관측 대상 선정의 구조적 영향일 수 있다는 점도 염두에 두어야 한다.

### 별생성률과 항성질량

폭발적 항성생성은하의 두드러진 특징은 젊고 무거

운 별 주변에 형성된 전리수소 영역에서 방출되는 강한 수소재결합 방출선이다. 수소재결합선의 세기는 젊은 별의 개수와 비례하므로 이온화 광자의 개수와 방출 계수를 포함한 이론적 모델과 경험적 관측 자료를 바탕으로 수소재결합선의 선속으로부터 별생성률을 추정할 수 있다. 이 연구에서는 Kennicutt (1998)에서 제시한 관계식을 이용하여 H $\alpha$ 방출선의 광도(L $_{H\alpha}$ )를 별생성률(star formation rate; SFR)으로 변환하였다. 이 관계식은 초기질량함수를 Salpeter 질량함수(Salpeter, 1955)로 가정하였을 때의 결과이며, 다음과 같이 표현된다.

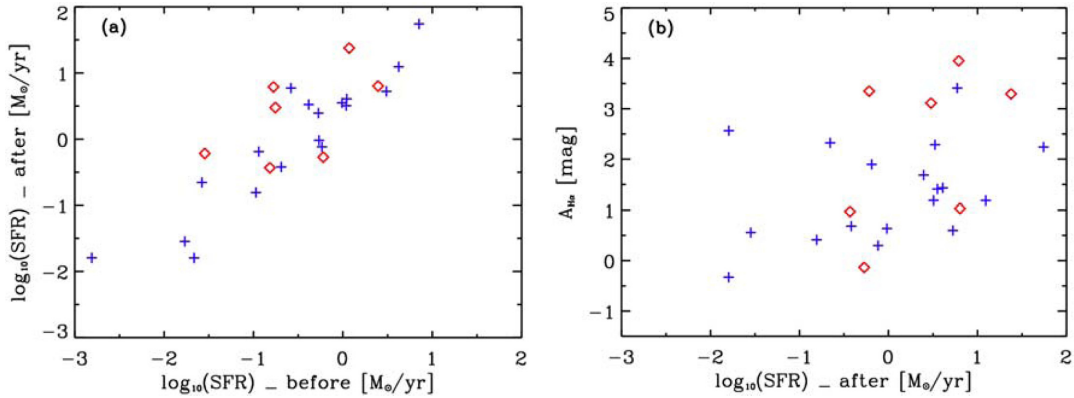
$$SFR(M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = 7.9 \times 10^{-42} L_{H\alpha}(\text{erg s}^{-1}) \quad (1)$$

한편 성간소광의 존재로 인해 관측된 방출선의 선속은 실제 선속보다 적게 추정되는데, 이를 보정하기 위해 관측된 발머 계열 수소선의 비(H $\alpha$ /H $\beta$ )를 소광이 없을 때의 비와 비교함으로써 소광량 A $_{H\alpha}$ 를 구하고 이에 따라 H $\alpha$ 방출선의 광도를 보정해 주었다. 소광량을 표현하는 식은 다음과 같다(Domínguez et al., 2013; Calzetti et al., 2000).

$$A_{H\alpha} = (3.33 \pm 0.80) \times 1.97 \log_{10} \left[ \frac{(H\alpha/H\beta)_{\text{obs}}}{2.86} \right] \quad (2)$$

앞서 Fig. 1의 BPT 모델을 이용하여 활동은하핵으로 분류되었거나(Mrk 477, Mrk 1210, Mrk 620, Mrk 315, Mrk 759, NGC 3738), NED (NASA/IPAC Extragalactic Database) 목록에서 활동은하핵으로 분류된 은하(Mrk 201, Mrk1341, Mrk 374)는 제외하고 25개의 은하에 대해 식 (1)과 식 (2)를 이용해 별생성률을 추정하였다. 관측된 은하들의 별생성률 범위는 0.01-100 M $_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 이며, 평균 소광량은 A $_{H\alpha} \approx 1.5 \text{ mag}$ 이다. 별생성 은하로 분류된 자외선 초과복사 은하의 개수가 울프-레이에 은하에 비해 절반 정도로 적긴 하지만, Fig. 2b는 별생성 시간 규모가 다른 두 그룹에서 별생성률과 소광량이 그다지 차이가 없음을 보여준다.

가까운 우주로부터 먼 우주까지, 은하의 분광 관측 및 측광 결과는 별생성률과 항성질량 그림에서 많은 은하들이 분포하는 ‘주계열’(star-forming galaxy main sequence)이 존재한다는 것을 보여주었다(Brinchmann et al. 2004; Noeske et al. 2007). 별생성률을 항성질량으로 나누면 기존에 생성된 별의 양에 비해 현재 별생성이 얼마나 활발한지를 알려주는 지표인 항성질



**Fig. 2.** (a) Comparison between star formation rate after the extinction correction and before the extinction correction. (b)  $A_{H\alpha}$  vs. star formation rate. In both panels, blue crosses represent WR galaxies and red diamonds represent UV excess galaxies like the case of Fig. 1.

량 대비 별생성률(specific star formation rate, sSFR;  $\text{SFR}/M_{\odot}$ )를 얻게 되는데(Shim 2013), 이 지표는 은하가 현재의 두 배로 커지기 위해 필요한 시간의 역수이기도 하다. 우리가 관측한 폭발적 항성생성 은하들이 별생성 주계열 은하들과 비교할 만하지, 또 별생성률 대 항성질량 비가 별생성 시간 규모에 따라 다른지 알아보기 위해 관측대상 은하의 항성질량을 추정하였다. Wilkins et al.(2013)에 제시된 은하의 색과 질량 대 광도 비의 관계를 이용하여 B-V 색으로부터 다음과 같이 질량 대 광도비를 추정하였다.

$$\log_{10} \left[ \frac{(M/M_{\odot})}{(L/L_{\odot})} \right] = 1.1 \times (B-V) - 0.5 \quad (3)$$

태양의 복사 절대 등급 4.8등급을 대입하면 관측 대상의 항성질량은  $10^{9-11} M_{\odot}$  범위에서 다양하게 추정된다. 추정된 항성질량은 별생성률과 함께 Table 3에 정리하였다. B등급 혹은 V등급 정보가 없어 (B-V) 색을 이용하지 못하는 경우에는 관측된 은하들의 평균값인  $\langle(B-V)\rangle = 0.56$ 을 사용하여 항성질량을 추정하였다. NGC 1569, NGC 4214 등 질량이  $10^8 M_{\odot}$ 보다 작은, 가까운 왜소은하가 두 개 포함되어 있으며 절반은 항성질량이  $10^{10} M_{\odot}$  이상, 절반은  $10^{10} M_{\odot}$  이하이다. 울프-레이에 은하의 항성질량 분포가 다양한 반면 자외선 초과복사 은하는 대부분  $10^{10-11} M_{\odot}$ 으로 그 범위가 좁다. 관측대상 선정에서의 편향이 존재하지 않는다면 이 결과를 설명하기 위해 다음의 가설을 제시할 수 있다. 울프-레이에 은하를 관측할 때에는 다양한 질량의 은하에서 별생성이 시작되는 초기 상

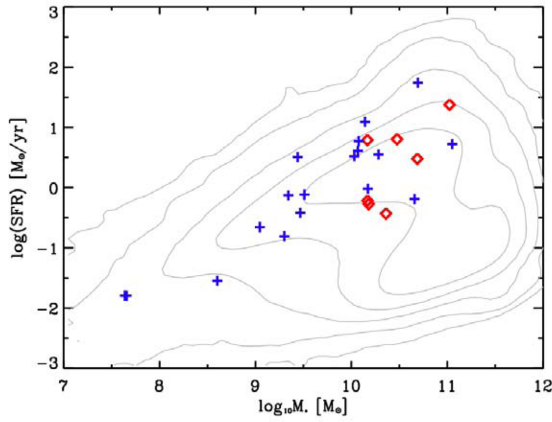
황을 보게 되므로 작은 은하가 포함되며,  $10^{10} M_{\odot}$  이하의 질량을 가진 작은 은하의 질량은 이후 수십-수백 Myr의 별생성 기간 동안 빠르게 증가하여 자외선 초과복사로만 선택될 때는  $10^{10} M_{\odot}$  이상의 질량을 가질 만큼 충분히 무거워진다는 것이다. Fig. 3에서 보여주듯이 질량이 작은 은하의 항성질량 대비 별생성률이 질량이 큰 은하의 항성질량 대비 별생성률에 비해 크다는 사실은 작은 은하가 빠르게 질량을 축적했을 가능성을 뒷받침해 준다. 그러나 실제로는 관측된 질량이 작은 ( $<10^{10} M_{\odot}$ ) 울프-레이에 은하의 항성질량 대비 별생성률이  $s\text{SFR} \approx 10^{-(9-10)} \text{yr}^{-1}$ 으로 이들의 질량이  $10^{10} M_{\odot}$  이상이 되기에는 1Gyr 이상의 시간이 필요하므로 이 가설로는 관측된 자외선 초과복사 은하들의 질량을 설명하기 어렵다. 따라서 별생성 시간 규모가 다른 두 그룹에 속한 대상들의 항성질량 차이는 은하의 성장 관점이 아니라 관측 대상의 개수 부족 때문으로 해석해야 할 것이다.

항성질량이  $10^{9-11} M_{\odot}$  범위에 속한 모든 폭발적 항성생성 은하들은 별생성률과 항성질량의 측면에서 봤을 때 SDSS에서 분광관측한 은하의 항성질량-별생성률 분포에서 보이는 별생성 주계열 위에 존재한다(Fig. 3). 즉, 관측된 폭발적 항성생성 은하들은 항성질량이 클수록 별생성률이 크다. 별생성률과 항성질량의 상대적 비율은 울프-레이에 은하와 자외선 초과복사 은하가 크게 다르지 않다.

#### 금속함량

별이 진화 과정을 거치면서 별의 내부에서는 수소





**Fig. 3.** Star formation rate vs. stellar mass of the observed galaxies. Like in Figs. 1 and 2, blue crosses represent WR galaxies and red diamonds represent UV excess galaxies. Overplotted contours show the star formation rate vs. stellar mass relation for the spectroscopically observed galaxies from SDSS Data Release 8. The contours are constructed using the MPA-JHU SDSS galaxy value-added catalog (Brinchmann et al. 2004; Kauffmann et al. 2003; Tremonti et al. 2004; [http://www.sdss.org/dr13/spectro/galaxy\\_mpa\\_jhu/](http://www.sdss.org/dr13/spectro/galaxy_mpa_jhu/)).

와 헬륨보다 무거운 원소가 합성된다. 은하 내에서 별 폭발이 일어나고 무거운 별들이 일생을 끝내며 성간물질을 화학적으로 농축시키는 과정을 반복함에 따라 시간이 지나면 은하 전체의 금속함량은 증가하게 된다. 항성 대기에서 형성된 흡수선이 뚜렷이 관측되는 은하에서는 흡수선을 이용해 금속함량을 측정할 수 있지만, 연속스펙트럼이 약하고 방출선이 강한 은하에서는 산소 방출선의 세기를 이용해 산소 함량 (oxygen abundance), 즉 기체상의 금속함량 (gas-phase metallicity;  $12 + \log_{10}[\text{O}/\text{H}]$ )을 추정함으로써 은하의 화학적 진화 정도를 확인할 수 있다. 산소의 세 가지 이온화 단계( $\text{O}^0$ ,  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{++}$ )는 모두 강한 방출선을 형성하며, 다른 원소의 경우와 달리 각 단계별 비가 일정하여 이온화 보정 상수 없이도 특정 이온에 의해 형성된 방출선의 세기로부터 산소의 총량을 계산할 수 있다 (Vacca and Conti, 1992). 많이 사용되는 방법 중 하나는 산소 이온의 금지선과 수소재결합 허용선의 플럭스 비를 이용하는  $R_3$  방법 (Vacca and Conti, 1992; López-Sánchez and Esteban, 2010)으로,  $R_3$ 의 정의와 이를 이용한 금속함량을 추정하는 방법은 다음과 같다. 이 경험식은  $R_3$ 의 범위가  $-0.6 \leq \log R_3 \leq 1.0$ 일 때 유효하다.

$$R_3 = \frac{I([\text{OIII}]\lambda 4959) + I([\text{OIII}]\lambda 5007)}{I(\text{H}\beta)} \quad (4)$$

$$\log(\text{O}/\text{H}) = -0.69 \times \log R_3 - 3.24 \quad (5)$$

이렇게 금속함량을 추정된 결과는 Table 3에 기재되어 있으며 금속함량과 항성질량, 금속함량과 별생성률의 관계는 Fig. 4와 같다. 추정된 금속함량 값의 오차는 평균적으로  $\pm 0.2 \text{dex}$  정도이다.

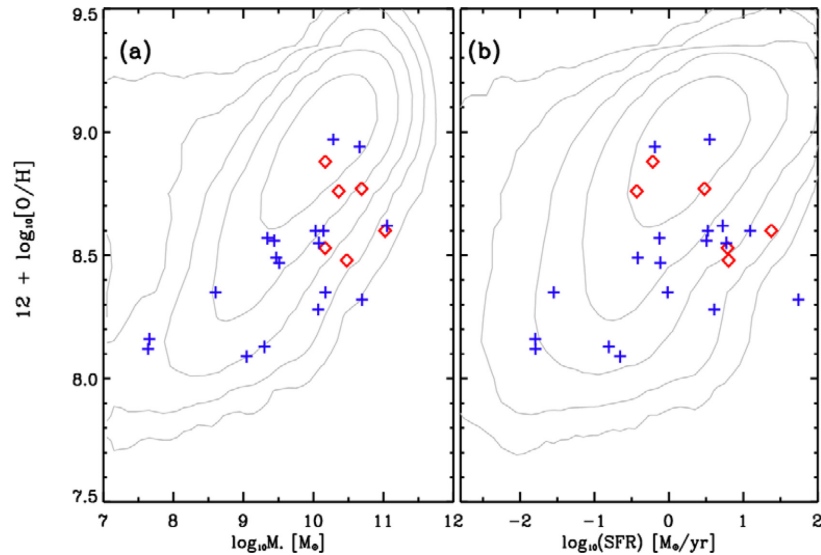
가까운 은하들의 금속함량과 항성질량 사이의 관계를 살펴본 기존 연구들은 무거운 은하일수록 금속함량이 더 큰 질량-금속함량 관계 (mass-metallicity relation; Tremonti et al. 2004)가 존재함을 밝혀냈다. Fig. 4a가 보여주는 바에 따르면, 관측대상인 폭발적 항성생성은하들의 경우 역시 이러한 질량-금속함량 관계가 존재한다. SDSS에서 분광 관측된 은하들의 질량-금속함량 관계와 비교해 볼 때, 같은 항성질량을 가진 은하에 비해 폭발적 항성생성은하들이 약간 금속함량이 낮은 경향이 있는 것으로 보인다. 이들이 별생성 주계열을 따르므로 항성질량이 아니라 별생성률에 따라서도 금속함량의 변화가 있을 것으로 예상되며, Fig. 4b는 미약하나마 별생성률이 큰 은하가 금속함량이 크다는 것을 보여준다. 하지만 상관관계는 항성질량의 경우보다 훨씬 약하다. 앞에서 살펴보았던 별생성률, 소광량, 항성질량과 마찬가지로 질량-금속함량, 별생성률-금속함량 등 금속함량을 포함한 그림에서 울프-레이에 은하와 자외선 초과복사 은하 그룹이 크게 구별되지는 않았다.

질량-금속함량 관계의 원인은 별생성으로 인한 피드백, 별생성의 원료 공급, 별생성 효율의 차이 등으로 생각되고 있다. 거의 대부분의 별생성이 활발한 은하에서는 별이 만들어지면서 촉발된 은하 규모의 기체 방출 (starburst-induced gas outflow)이 관측되는데, 이러한 금속함량의 기체들을 방출하기에는 얇은 포텐셜을 가진 질량이 작은 은하들이 더 유리하다. 따라서 질량이 작은 은하일수록 금속함량이 낮게 관측된다는 것이다. 혹은 별생성의 원료가 되는 금속함량이 낮은 기체가 은하 외부로부터 유입되면서 별생성이 상대적으로 늦게까지 지속되는 질량이 작은 은하의 금속함량이 낮게 관측된다는 설명을 하기도 한다. 한편 분자선 관측 등으로 기체의 양을 직접 측정 한 연구에서는 질량이 작은 은하의 별생성 효율이 질량이 큰 은하에 비해 많이 낮기 때문에 금속함량을 증가시키는 농축과정이 일어나기 힘들었다는 설명을 제시하였다 (Huang et al. 2012).

**Table 3.** (B-V) color, luminosity, stellar mass, star formation rate and metallicity of the observed starburst galaxies

target	(B-V)	$\log\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)$	$\log\left(\frac{M_{*}}{M_{\odot}}\right)$	$\log(\text{SFR})$ [ $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ]	$\log(R_3)$	$12+\log[\text{O}/\text{H}]$
Mrk 545	0.70	10.754	11.024	1.377	0.23	8.60
NGC 1569	0.40	7.698	7.638	-1.794	0.92	8.12
II Zw 40	0.22	9.304	9.046	-0.656	0.98	8.09
Mrk 1199	0.57	10.156	10.283	0.549	-0.31	8.97
Mrk 8	0.56	9.914	10.030	0.523	0.24	8.60
Mrk 702	0.56	10.578	10.694	1.741	0.63	8.32
NGC 3395	0.00	9.843	9.343	0.394	0.37	8.50
Mrk 332	0.60	10.009	10.169	-0.217	-0.17	8.88
III Zw 107	0.56	9.952	10.068	0.610	0.70	8.28
NGC 7714	0.55	9.335	9.440	0.507	0.29	8.56
Mrk 701	0.56	10.065	10.181	-0.273	-0.80	... <sup>1)</sup>
IRAS 07164+5301	0.56	10.936	11.052	0.723	0.21	8.62
Mrk 404	0.60	10.201	10.361	-0.432	0.00	8.76
Mrk 712	0.56	10.056	10.172	-0.017	0.60	8.35
Mrk 33	0.53	9.428	9.511	-0.116	0.42	8.47
NGC 3396	0.40	9.528	9.468	-0.419	0.39	8.49
Mrk 171	0.33	10.280	10.143	1.093	0.23	8.60
Mrk 188	0.50	10.117	10.167	0.789	0.33	8.53
NGC 4214	0.37	8.695	8.602	-1.547	0.59	8.35
Mrk 209	0.56	7.540	7.656	-1.795	0.87	8.16
Mrk 213	0.60	10.316	10.476	0.803	0.41	8.48
NGC 4532	0.60	9.917	10.077	0.772	0.31	8.55
NGC 4861	0.58	9.163	9.301	-0.808	0.92	8.13
Mrk 1363	0.80	10.308	10.688	0.478	-0.01	8.77
NGC 5430	0.60	10.499	10.659	-0.189	-0.26	8.94

<sup>1)</sup> $\log R_3$ 의 값이 식 (5)가 유효한 범위를 벗어났기 때문에 제외하였다.



**Fig. 4.** (a) oxygen abundance vs. stellar mass of the observed galaxies (b) oxygen abundance vs. star formation rate of the observed galaxies. Again, blue crosses represent WR galaxies and red diamonds represent UV excess galaxies. Overplotted contours show the distribution of the spectroscopically observed galaxies from SDSS Data Release 8.

관측된 폭발적 항성생성은하에서 질량-금속함량 관계가 존재한다는 사실은 이들 은하에서도 별생성과 관련된 피드백 기작이 활발하다는 것을 보여준다. 그리고 관측된 폭발적 항성생성은하들의 금속함량이 같은 항성질량의 은하에 비해 다소 적은 편이라는 결과는 이 은하들에서 별생성으로 인한 농축된 기체 방출이 매우 강하거나, 혹은 이 은하들이 오염되지 않은 차가운 분자 기체 저장고를 많이 가지고 있을 가능성이 높음을 시사한다.

## 결과 및 요약

우리는 울프-레이에 은하, 자외선 초과복사 은하 등 폭발적 항성생성은하로 분류되는 은하를 관측하여 총 34개 은하에 대한 스펙트럼 자료를 얻었다. 스펙트럼 자료로부터 주요 방출선의 선속을 측정하였고, 이 자료를 기초로 방출선이 발생하는 주된 기작을 파악하였다. 수소재결합 방출선의 세기로부터는 별생성률을, 산소 방출선과 수소재결합선의 비로부터는 기체 상태의 금속함량을 추정하였으며 이를 은하의 색으로부터 추정된 항성질량과 결합하여 기존에 알려진 별생성 주계열, 질량-금속함량 관계를 확인하였다.

우주의 역사를 통틀어 별생성 은하의 진화를 살펴볼 때, 적색이동에 따라 해당 적색이동에서의 별생성을 담당할 은하들을 수소재결합 방출선, 자외선 연속복사 등 별생성률 지시자를 기준으로 선별하게 된다. 그런데 이런 다양한 선별 과정을 거쳐 선택된 은하 샘플이 과연 공통적인 물리적 특성을 가지고 있는지, 얼마나 겹치는지 등은 여전히 많은 연구의 대상이 되고 있다. 서로 다른 별생성률 지시자로 인해 다른 종류의 은하를 선별하게 되는 이유는 이들이 별생성 과정에서 다른 시간 규모에 민감하기 때문이다. 이온화된 기체를 추적하는 수소재결합 방출선은 짧은 시간 동안 일어나는 별생성에 민감하고, 자외선 연속복사는 상대적으로 긴 시간 동안의 별생성을 추적한다 (Calzetti, 2013). 따라서 별생성 시간규모의 변화에 따라 상대적으로 나이가 어린 폭발적 항성생성은하와 나이가 많은 폭발적 항성생성은하의 특성을 비교함으로써 서로 다른 기준으로 선택된 별생성 은하들을 이용해 우주의 별생성 역사를 기술할 때 필요한 근거를 제공할 수 있다.

이 연구에서 관측한 34개의 가까운 폭발적 항성생성은하는 21개의 울프-레이에 은하, 13개의 자외선 초

과복사 은하로 분류된다. 일부 울프-레이에 은하는 원래 자외선 초과복사 은하로 구성된 카탈로그(Mrk 은하)에 제시되었으나 이후 강한 항성풍의 흔적 등 관측을 통해 울프-레이에 은하로서의 특성을 가졌다고 분류된 대상들이다. 매우 무겁고 고온의 O형 항성이 지배적인 울프-레이에 은하는 여타 폭발적 항성생성은하에 비해서도 나이가 어린 편이라고 할 수 있기 때문에 울프-레이에 은하와 자외선 초과복사 은하의 비교는 적어도 가까운 우주에서 별생성의 시간 규모가 다를 때의 은하 특성 차이에 대한 정보를 준다.

연구 결과, 먼저 방출선의 방출 기작에서는 울프-레이에 은하의 경우 별생성이 67%, 활동성은하핵이 14%, 두 기작의 합성이 19%로 나타났다. 반면 자외선 초과복사 은하는 별생성과 활동성은하핵이 각각 15%, 두 기작의 합성이 70%로 가장 높은 비율을 보여주었다. 관측 당시의 기기 노후화로 인한 관측 대상 선정의 편향성 문제가 있기 때문에 조심스럽게 판단할 필요가 있으나, 상대적으로 나이가 많을 것으로 보이는 은하 샘플에서 BPT 모델의 합성 영역에 위치한 은하 비중이 늘어났다고 판단된다.

또한 별생성률과 항성질량을 보았을 때는 울프-레이에 은하 샘플과 자외선 초과복사 은하 샘플이 큰 차이를 보여주지 않았다. 이들은 모두 SDSS 분광 관측 은하들이 보여주는 별생성 은하의 주계열에 위치했으며, 항성질량이 큰 은하일수록 별생성률이 컸다. 금속함량과 항성질량 사이에도 항성질량이 큰 은하들이 금속 함량이 높은 질량-금속함량 관계가 나타났다. 같은 항성질량을 가진 SDSS 은하들에 비해 폭발적 항성생성은하들은 별생성 시간규모에 관계없이 금속함량이 다소 낮았다. 이를 고려할 때 폭발적 항성생성 은하들에서 별생성으로 인한 피드백은 매우 중요한 과정이며, 금속이 농축된 기체의 방출이 활발하거나 원시 기체 저장고가 근처에서 유입되고 있을 가능성이 높다. 자외선에서 금속 흡수선을 관측하거나, 전파 관측을 통해 기체의 분포를 살펴보는 후속 연구가 진행된다면 이들이 상대적으로 낮은 금속함량을 보이는 이유를 이해할 수 있을 것이다.

## 사 사

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입(No.2014R1A1A1038088).

## References

- Baldwin, J.A., Phillips, M.M., and Terlevich, R., 1981, Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 93(551), 5-19.
- Bang, J. and Ann, H.B., 2009, Star formation rate and AGN in barred galaxies, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 30(1), 69-80.
- Brinchmann, J., Charlot, S., White, S.D.M., et al., 2004, The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 351(4), 1151-1179.
- Brinchmann, J., Pettini, M., and Charlot, S., 2008, New insights into the stellar content and physical conditions of star-forming galaxies at  $z=2-3$  from spectral modelling, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 385(2), 769-782.
- Calzetti, D., 2013, Star Formation Rate Indicators, In Falcon-Barroso, J. and Knapen, J. H. (eds.), *Secular evolution of galaxies*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 419-459.
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R.C., et al., 2000, The dust content and opacity of actively star-forming galaxies, *The Astrophysical Journal*, 533(2), 682-695.
- Conti, P.S., 1991, Wolf-Rayet galaxies-an introduction and a catalog, *The Astrophysical Journal*, 377, 115-125.
- Crowther, P.A., 2007, Physical properties of Wolf-Rayet stars, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 45, 177-219.
- Domínguez, A., Siana, B., Henry, A.L., et al., 2013, Dust extinction from Balmer decrements of star-forming galaxies at  $0.75 \leq z \leq 1.5$  with Hubble space telescope/wide-field-camera 3 spectroscopy from the WFC3 infrared spectroscopic parallel survey, *The Astrophysical Journal*, 763(2), 145-154.
- Dopita, M.A., Kewley, L.J., Heisler, C.A., and Sutherland, R.S., 2000, A theoretical recalibration of the extragalactic HII region sequence, *The Astrophysical Journal*, 542(1), 224-234.
- Eom, H. and Shim, H., 2015, Properties of brightest cluster galaxies as a function of cluster classification type, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 36(5), 427-436.
- Fontatot, F., Lucia, G.D., Monaco, P., Somerville, R.S., and Santini, P., 2009, The many manifestations of downsizing: hierarchical galaxy formation models confront observations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 397(4), 1776-1790.
- French, H.B., 1980, Galaxies with the spectra of giant HII regions, *The Astrophysical Journal*, 240, 41-59.
- Gal-Yam, A., Arcavi, I., Ofek, E.O., et al., 2014, A Wolf-Rayet-like progenitor of SN2013cu from spectral observations of a stellar wind, *Nature*, 509(7501), 471-474.
- Huang, S., Haynes, M. P., Giovanelli, R., and Brinchmann, J., 2012, The Arecibo Legacy Fast ALFA survey: The galaxy population detected by ALFALFA, *The Astrophysical Journal*, 756, 113-141.
- Huchra, J.P., 1977, The nature of Markarian galaxies, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 35, 171-195.
- Juneau, S., Glazebrook, K., Crampton, D., et al., 2005, Cosmic star formation history and its dependence on galaxy stellar mass, *The Astrophysical Journal Letters*, 619(2), L135-L138.
- Karthick, M.C., López-Sánchez, Á.R., Sahu, D.K., Sanwal, B.B., and Bisht, S., 2014, Photometric and spectroscopic studies of star-forming regions within Wolf-Rayet galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 439(1), 157-178.
- Kauffmann, G., Heckman, T.M., White, S.D., et al., 2003, Stellar masses and star formation histories for  $10^5$  galaxies from the Sloan digital sky survey, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341(1), 33-53.
- Kennicutt, R.C., 1998, Star formation in galaxies along the Hubble sequence, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 36(1), 189-231.
- Kewley, L.J., Dopita, M.A., Sutherland, R.S., Heisler, C.A., and Trevena, J., 2001, Theoretical modeling of starburst galaxies, *The Astrophysical Journal*, 556(1), 121-140.
- López-Sánchez, Á.R. and Esteban, C., 2008, Massive star formation in Wolf-Rayet galaxies I. Optical and NIR photometric results, *Astronomy and Astrophysics*, 491(1), 131-156.
- López-Sánchez, Á.R. and Esteban, C., 2010, Massive star formation in Wolf-Rayet galaxies IV. Colours, chemical-composition analysis and metallicity-luminosity relations, *Astronomy and Astrophysics*, 517, A85-A112.
- López-Sánchez, Á.R., 2010, Massive star formation in Wolf-Rayet galaxies V. Star-formation rates, masses and the importance of galaxy interactions, *Astronomy and Astrophysics*, 521, A63-A93.
- Madau, P. and Dickinson, M., 2014, Cosmic star-formation history, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 52, 415-486.
- Markarian, B.E., 1967, Galaxies with an ultraviolet continuum, *Astrophysics*, 3(1), 24-38.
- Markarian, B.E., Lipovetsky, V.A., Stepanian, J.A., Erastova, L.K., and Shapovalova, A.I., 1989, The first Byurakan survey-a catalogue of galaxies with ultraviolet continuum, *Soobshcheniya Spetsial'noj Astrofizicheskoy Observatorii*, 62, 5
- Meynet, G. and Maeder, A., 2005, Stellar evolution with rotation XI. Wolf-Rayet star populations at different metallicities, *Astronomy and Astrophysics*, 429(2), 581-

- 598.
- Moustakas, J., Coil, A.L., Aird, J., et al., 2013, PRIMUS: Constraints on star formation quenching and galaxy merging, and the evolution of the stellar mass function from  $z=0-1$ , *The Astrophysical Journal*, 767(1), 50-83.
- Noeske, K.G., Weiner, B.J., Faber, S.M., et al., 2007, Star formation in AEGIS field galaxies since  $z=1.1$ : The dominance of gradually declining star formation, and the main sequence of star-forming galaxies, *The Astrophysical Journal Letters*, 660(1), L43-L46.
- Pérez-Montero, E., Contini, T., Lamareille, F., et al., 2013, The cosmic evolution of oxygen and nitrogen abundances in star-forming galaxies over the past 10Gyr, *Astronomy and Astrophysics*, 549, A25-A38.
- Salpeter, E.E., 1955, The luminosity function and stellar evolution, *The Astrophysical Journal*, 121, 161-167.
- Schaerer, D., Contini, T., and Pindao, M., 1999, New catalogue of Wolf-Rayet galaxies and high-excitation extra-galactic HII regions, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, 136(1), 35-52.
- Shim, H., 2013, Global star formation efficiency of local galaxies, *Journal of the Korean Earth Science Society*, 34(5), 407-414.
- Shim, H. and Chary, R. R., 2013, Dissection of  $H\alpha$  emitters: Low- $z$  analogs of  $z>4$  star-forming galaxies, *The Astrophysical Journal*, 765(1), 26-36.
- Tremonti, C.A., Heckman, T.M., Kauffmann, G., et al., 2004, The origin of the mass-metallicity relation: insights from 53,000 star-forming galaxies in the Sloan digital sky survey. *The Astrophysical Journal*, 613(2), 898-913.
- Vacca, W.D. and Conti, P.S., 1992, Optical spectrophotometry of Wolf-Rayet galaxies, *The Astrophysical Journal*, 401, 543-558.
- Veilleux, S. and Osterbrock, D. E., 1987, Spectral classification of emission-line galaxies, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 63, 295-310.
- Wilkins, S.M., Gonzalez-Perez, V., Baugh, C.M., et al., 2013, Single-colour diagnostics of the mass-to-light ratio I. Predictions from galaxy formation models. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 431(1), 430-439.

---

Manuscript received: March 22, 2017

Revised manuscript received: May 28, 2017

Manuscript accepted: June 8, 2017