# GMT/GMACS를 이용한 원시은하단 분광탐사

이종철¹, 김재우², 황호성³, Raphael Gobat³, Veronica Strazzullo⁴, 박창범³,
 Benjamin L'Huillier³, 심현진⁵, 고종완¹, 임명신², 이성국², 이광호², 손주비², 현민희²
 한국천문연구원¹, 서울대학교², 고등과학원³, Ludwig-Maximilians-University⁴, 경북대학교⁵

## 초록

본 연구팀은 적색이동이 3보다 클 것으로 예상되는 원시은하단 후보를 골라서 체계적인 분광탐사를 수행하여 은하단과 그 구성 은하의 형성과 진화를 이해하는 데에 기여하고자 한다. 깊은 측광 자료가 다파장에서 존재하는 특정 영역을 선택하여 그 안에 존재하는 은하들 전체의 적색이동을 측광학적인 방법을 통해추정, 원시은하단 후보를 다수 확보하여 GMT/GMACS를 이용한 분광관측을 수행할 것이다. 분광자료로부터 은하들의 실제 적색이동을 측정하고 은하단에 소속된 은하를 골라내어 속도 분산을 비롯한 각 은하단의 물리량을 얻으면 우주모형과 직접 비교할 수 있다. 또한 라이만 알파선을 근거로 별 생성이 활발한 은하들이 어떤 은하단 어느 영역에 분포하는지 조사함으로써 환경적인 요인이 은하단 은하의 초기 진화에 얼마나 영향을 미쳤는지 알 수 있다.

## 1. 과학 목적 및 요약

본 연구팀은 적색이동이 3보다 클 것으로 예상되는 원시은하단 후보를 골라서 체계적인 분광탐사를 수행, 은하단과 그 구성 은하의 형성과 진화를 이해하는 데 에 기여하고자 한다

현대 우주론에서는 우주 초기의 고밀도 영역에서 지금의 은하단 구조가 만들어지기 시작한 것으로 생각하고 있다. 밀도 요동이 점차 자라서 은하단이 만들어지는 일련의 과정은 밀도 요동의 초기 조건에 큰 영향을 받으므로 우주 초기에얼마나 많은 은하단이 존재했는지 조사하는 것은 우주론 모형을 구체화하는 데 매우 중요하다

원시은하단의 구성 은하들은 가스를 다량 갖고 있는 상태에서 잦은 상호작용 과 병합을 겪으면서 보다 활발하게 별을 생성했을 것으로 예상된다. 다양한 원시은하단에서 구성 은하들의 특성을 비교 분석하면 지금의 은하단들 안에 별 생성을 거의 마친 은하들이 주로 분포하게 된 과정을 알 수 있을 것이다. 하지만 지금까지 알려진 원시은하단은 그 수가 매우 적어 이러한 연구들이 제한적으로 이뤄져왔다.

본 연구팀은 깊은 측광 자료가 다파장에서 존재하는 특정 영역을 선택하여 그 안에 존재하는 은하들 전체의 적색이동을 (측광학적인 방법을 통해) 추정, 원시은 하단 후보를 다수 확보하여 GMT/GMACS를 이용한 분광관측을 수행하고자 한다. 분광자료로부터 은하들의 실제 적색이동을 측정하고 은하단에 소속된 은하를 골라내어 속도 분산을 비롯한 각 은하단의 물리량을 얻고자 한다. 이러한 관측 결과는 우주모형과 직접적인 비교가 가능하므로 관련 연구 분야에 핵심적인자료가 될 것이다. 또한 (라이만 알파선을 근거로) 별 생성이 활발한 은하들이 어떤은하단 어느 영역에 분포하는지 조사함으로써 환경적인 요인이 은하단 은하의초기 진화에 얼마나 영향을 미쳤는지 알 수 있다.

## 2. 연구 필요성, 배경 및 동향

#### 1) 연구의 배경 및 필요성

은하단은 우주에서 중력적으로 안정된 가장 큰 천체로서 대개 1-2Mpc 범위 안에 중력으로 묶여 있는 수백에서 수천 개의 은하를 갖고 있다. 그러나 은하는 은하단 전체 질량(10<sup>12</sup>-10<sup>15</sup>Mo)의 2% 정도를 차지할 뿐 은하단의 대부분은 뜨거운 가스(~14%)와 암흑물질(~84%)로 이뤄져 있는 것으로 생각된다 (Sarazin 2008). 계층적 우주 구조 형성 모델에서는 지금의 은하단이 초기 밀도 요동의 정점에서 생겨나 지속적인 병합 과정을 통해서 성장한 것으로 보고 있다 (Boylan-Kolchin et al. 2009; 그림 1). 따라서 은하단의 형성은 밀도 요동의 초기 조건에 밀접하게 연관되어 있으며 원시은하단의 분포와 진화를 조사하는 것은 이론적인 모형을 테스트하는 데 매우 중요하다(Grossi et al. 2007; Peacoak et al. 2010; 그림 2). 은하단의 개수를 그 질량과 적색이동에 따른 함수로 구현하는 것이 관측과 이론을 직접 비교할 수 있는 수단이 되며 이를 통해 구체적으로는 초기 밀도 요동의 규모(Gs)와 정규 분포에서 벗어난 정도

(non-Gaussianity) 등을 구할 수 있다.

가까운 은하단 안쪽에 존재하는 은하들의 평균적인 특성은 밀도가 낮은 외곽 혹은 은하단 바깥쪽에 위치하는 은하들과는 여러 가지 측면에서 다른 것으로 알려져 있다. 즉, 은하단 안쪽 은하들이 상대적으로 더 무겁고 붉으며 타원은하의 형태를 갖는다(Park & Hwang 2009). 이것은 은하단 안쪽이 초기 밀도 요동의 정점에 해당되므로 안쪽 은하들의 진화가 보다 빨라서 별생성이 조기에 끝났기 때문일 수 있다.이 밖에도 은하단 내 뜨거운 가스나 중력 퍼텐셜과의 상호작용에 의한 효과등 은하와 주변 환경과의 관계를 이해

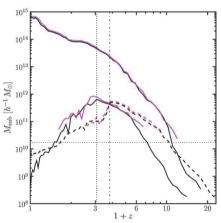


그림 1. 밀레니엄 시뮬레이션 내에서 가장 무거운 은하 단의 적색이동에 따른 질량 누적 과정(Boylan-Kolchin et al. 2009). 위에 실선이 해당 은하단의 중심 헤일로에 대한 질량 누적 과정을 나타내며 아래 실선과 파선은 그에 병합된 두 개의 하부 구조를 예로 보여주고 있다. 검은색 선과 보라색 선은 다른 조건에서 수행된 시뮬레이션들의 두 가지 결과를 표현한 것이고, 세로선은 두하부 구조가 병합된 시점, 가로선은 보라색에 해당되는 시뮬레이션의 질량 분해능을 의미한다.

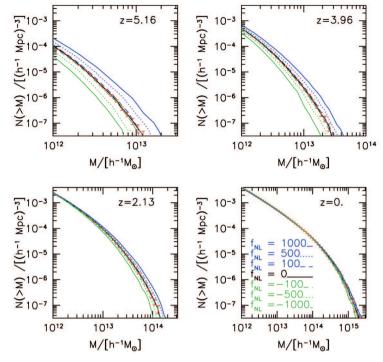


그림 2. N-체 모의실험 결과 나타난 (은하단) 헤일로의 질량에 따른 누적 개수 분포 (Grossi et al. 2007). 파선과 점선, 실선이 우주의 초기 밀도 요동이 정규 분포에서 벗어난 정도에 따른 차이를 보여주고 있다(많이 벗어날수록 f≥ 절대값이 커짐). 고적색이동에서 이러한 차이가 두드러져 관측으로 검증이 가능하다.

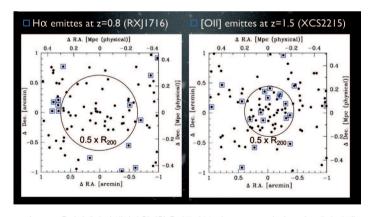


그림 3. 두 은하단에서 별 생성이 활발한 은하들의 분포(Tadaki K.의 발표 자료에서 발췌). 상대적으로 가까이 있는 은하단(왼쪽 패널)에서는 (사각형으로 표시된) 별 생성 은하들이 은하단 바깥쪽에 소수 있는 반면 멀리 있는 은하단(오른쪽 패널)에서는 오히려 안쪽에 다수 존재한다. 은하와 환경 사이 관계를 대비해서 보여주는 좋은 예이다.

하기 위한 다양한 설명이 존재한다. 그런데 고적색이동에서는 이러한 관계가 역전된 것처럼 보이는 현상이 최근 보고되어 흥미를 더하고 있다(Elbaz et al. 2007; Brodwin et al. 2013; 그림 3). 하지만 상관관계의 역전이 고적색이동에서의 보편적 현상인지 정확히 언제가 과도기인지 등 조사되어야 할 부분이 아직 많다. 이러한 부분들이 채워져야 환경이 은하의 진화에 미치는 영향을 보다 근본적으로이해할 수 있을 것이다.

#### 2) GMT의 필요성

고적색이동 은하들에 대한 분광관측은 망원경의 집광력에 의해 크게 좌우되기 때문에 구경이 큰 망원경들로만 시도되어왔다. 하지만 현존하는 가장 큰 8-10m급 망원경으로도 10~20시간가량의 긴 노출이 필요했다. 거울 4장을 장착하는 초기의 GMT는 기존 망원경에 비해 집광력이 4배이므로 같은 천체를 1/4의 노출시간으로 관측할 수 있다. 즉, GMT를 이용하면 고적색이동 은하들에 대한 양질의 분광자료를 하룻밤 안에 얻을 수 있어 보다 효율적인 원시은하단 탐사가가능해진다.

원시은하단 후보를 고르는 데 핵심이 되고, 넓고 깊은 측광 자료를 제공하게 될 광학망원경 LSST와 원시은하단 은하 내 성간물질에 대한 조사까지 가능케 하는 강력한 전파망원경 ALMA 등 주요 차세대 망원경들이 남반구 하늘을 본다. 남 반구에 설치되는 GMT를 이용한 탐사, 그 후속 연구에는 이러한 망원경들을 적 극 활용할 수 있다.

GMACS는 그 시야가 비교적 넓어(6각분은 적색이동 3에서 공변 거리 7.8h <sup>1</sup>Mpc에 해당) 원시은하단 전 영역을 충분히 포함하며 한 번에 100개에 가까운 은하를 동시에 관측할 수 있어 타깃의 밀도가 높은 본 연구에 매우 적합한 기기이다. 만약 GMACS의 파장 대역이 근적외선까지(1.3μm) 확장된다면 라이만 알파 방출선뿐만 아니라 자외선 대역의 젊은 별과 관련된 여러 흡수선들이 분광 대역에 들어오므로 원시은하단 은하의 별 생성에 대해 보다 자세히 분석할 수 있다.

#### 3) 국내외 연구 동향

다수의 고적색이동 은하들을 분광관측하는 것은 매우 어렵기 때문에 기존에 는 고적색이동 은하단을 찾기 위해서 은하단 내 뜨거운 가스가 내는 엑스선을 추

표 1. 고적색이동 은하단 목록

이름	적색 이동	찾은 방법	X-ray 밝기 Lx(10 <sup>44</sup> erg s <sup>-1</sup> )	질량 M₂∞(10 <sup>14</sup> M⊚)	문헌
CL J1449+0856	2.07	MIR	0.9	0.7	Gobat+11
XMMU J1053+5723	1.75	X-ray	0.5	0.6	Henry+10
IDCS J1426-3508	1.75	MIR	16	4.1	Stanford + 12
XCL J0218-0510	1.62	MIR	0.4	0.7	Tanaka + 10
XDCP J0044.0-2033	1.58	X-ray	6.1	3.0	Santos+11
XDCP J1007.3+1237	1.56	X-ray	2.1	1,7	Fassbender+11
XDCP J0338.8+0021	1.49	X-ray	1,1	1,2	Nastasi+11
ISCS J1432.4+3250	1.49	MIR	3.5	2.5	Brodwin+10
XCS J2215.9-1738	1.46	X-ray	2.2	2.0	Hilton + 10
ISCS J1438.1+3414	1.46	MIR	2.2	2.2	Brodwin + 10

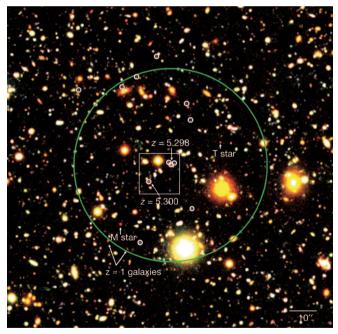


그림 4. 적색이동 5.3 근처에 있는 원시은하단 후보의 중심 영역 이미지(Capak et al. 2011). 은하단에 소속된 것으로 여겨지는 은하들은 작은 원으로, 분광관측으로 확인된 은하는 그 적색이동이 추가로 표시되었다. 초록색 대원의 반경은 공변 거리 2Mpc에 해당된다.

적하거나 은하단 중심부에 많이 존재하는 cD 은하 혹은 전파 은하 주변을 조사하거나 광학/적외선 측광관측으로부터 얻은 색을 기준으로 특정 은하들을 뽑는 등의 선행 작업이 필요했다(Kang & Im 2009). 후속 분광관측으로 확인된, 지금까지 알려진 고적색이동 은하단 목록이 표 1에 제시되어 있는데, 아직 개수도 적고 적색이동 2 근처가 한계라서 이론적인 예측과 비교하기에는 부족한 상황이다. 게다가 이러한 방법으로 찾아진 고적색이동 은하단은 (가령, 역학적으로 안정되어 있는 무거운 은하단 쪽으로) 편향되었을 가능성이 높기 때문에 이들을 고적색이동 은하단의 표본으로 삼을 수 없다

적색이동이 2보다 큰 몇 개의 원시은하단 후보가 보고된 바 있으나 분광관측으로 확인되지 않았거나 극히 일부의 은하만이 분광관측되어(Capak et al. 2011; Cucciati et al. 2014; 그림 4) 은하단에 대한 자세한 연구를 진행하기에는 미흡한경우가 대다수다.

## 3. 연구의 내용 및 방법

## 1) 연구 대상

본 연구는 적색이동이 3보다 큰 원시은하단을 대상으로 한다. 먼저 다파장의 깊은 측광 자료가 존재하는 영역을 골라서 각 은하들의 에너지 분포를 구성, 종 족합성 모델과의 비교를 통해 측광학적 적색이동을 추정할 것이다. 이것을 바탕으로 하면 기존의 방법에서 문제가 되었던 (특정한 은하단만을 선택하게 되는) 편 향성을 최소화시켜서 원시은하단 후보를 체계적으로 찾을 수 있다. 이러한 측광학적 방법론은 계속 개선되고 있으며(Catignani et al. 2014) 실제로 GOODS나 COSMOS 영역에 적용되어 (기존에 알려진 은하단을 포함한) 다수의 은하단 후보를 찾아내는 등 고무적인 결과들을 도출하였다. 수년 내로 관측이 완료되는 ESO Public Surveys(UltraVISTA, KiDS)와 같이 깊으면서도 넓은 측광 자료를 이용하면 (추후에는 LSST나 Euclid 등도) 충분한 숫자의 원시은하단 후보를 확보할 수 있을 것으로 기대한다.

### 2) 사용 GMT 기기 및 관측 전략

본 탐사에서는 시야가 넓고 다중분광관측이 가능한 GMACS를 사용하고자한다. GMACS의 시야(4각분×8각분)는 적색이동 3 이상에서 원시은하단의 전체영역 이상을 포함한다. 은하단의 역학적 상태와 질량을 추정하기 위해서 필요한최소한의 구성원 은하가 50개, 측광학적인 방법으로 고른 구성원 은하가 실제로그 은하단에 소속된 것으로 판명될 가능성이 절반이라고 가정한다면 100개 가까운 슬릿이 확보되어 있는 GMACS를 이용하여한 번의 노출로 하나의 은하단을 관측할 수 있다.

GMACS의 노출시간 계산기에 따르면 원시은하단 은하의 (I≤25) 연속선 스펙트럼을 픽셀당 신호대잡음비 10 이상으로 얻기 위해서는 약 5시간의 노출이 필요하다. 별을 활발히 생성하고 있는 은하들의 경우 이 시간 내에 훨씬 더 좋은 질의 스펙트럼을 얻을 수 있으리라 기대된다. 탐사에 소요되는 총시간 규모는 최종확보된 원시은하단 숫자에 따라서 결정될 것이다(10개 은하단이라면 50시간).

본 연구에서는 라이만 알파선이 가장 중요한 적색이동 식별자다. 적색이동 이 3보다 커지면 이 선이 GMACS의 분광 대역에 들어오기 시작하는데 깊이의 한 계와 관측 효율성 측면을 고려하여 적색이동 구간 3과 5 사이의 (원시은하단 소속) 은하들이 관측 타깃이 될 것이다. GMACS의 분광 대역이 1.3μm까지 늘어난 다면 라이만 알파 방출선뿐만 아니라 근자외선 대역의 여러 흡수선들 또한 적색이동 식별자로 활용, 관련 오차를 줄일 수 있다. 한편 GMACS의 분광분해능 R=1500~2000은 원시은하단의 속도 분산(수백 km s<sup>-1</sup>)을 측정하기에 충분한 것으로 판단되다

## 4. 연구 결과의 기대 성과

본 연구의 기본 목표는 원시은하단 다수를 선정하여 그 구성원 은하를 확인하고 적색이동을 정밀하게 측정, 은하단의 속도 분산과 질량을 추정함에 있다. 원시은하단에 대한 체계적인 분광탐사는 아직 이뤄진 바가 없기 때문에 이 분야에 독보적이고 핵심적인 관측 자료를 제공할 수 있으며 이로부터 도출된 결과는 이론적 예측과 직접 비교가 가능하기 때문에 우주거대구조의 형성 과정을 이해하

는 데 중요한 기여를 할 것이다.

더불어 (정지 좌표계에서의) 자외선 스펙트럼을 통해 각 은하의 자외선 기울기 나 별 생성률 등을 조사할 수 있다. 여러 원시은하단 내에서 반경에 따라 (또한 그 바깥쪽까지) 은하들의 특성을 비교해보면 원시은하단에서는 환경 효과가 지금과 는 다른 방향으로 작동했는지, 원시은하단 내 은하들이 어떤 과정을 거쳐서 현재 의 은하단 은하들과 같이 변해왔는지 등 은하의 진화와 관련된 다양한 연구도 진 행할 수 있다.

## 5. 인용문헌

Boylan-Kolchin, M. et al. 2009, MNRAS, 398, 1150
Brodwin, M. et al. 2013, ApJ, 779, 138
Castignani, G. et al. 2014, ApJ, accepted (arXiv:1405,7973)
Capak, P. L. et al. 2011, Nature, 470, 233
Cucciati, O. et al. 2014, A&A, submitted (arXiv:1403,3691)
Elbaz, D. et al. 2007, A&A, 468, 33
Grossi, M. et al. 2007, MNRAS, 382, 1261
Kang, E. & Im, M. 2009, ApJ, 691, L33
Park, C. & Hwang, H. S. 2009, ApJ, 699, 1595
Peacock, M. B. et al. 2010, MNRAS, 402, 803