만기형 은하의 표면광도와 금속함량 기울기의 상관관계를 이용한 만기형 은하의 생성 기작 연구

● 김지훈[1], Stacy S. McGaugh[2], Rachel Kuzio de Naray[3]

서울대학교[1], Case Western Reserve University[2], Georgia State University[3]

1. 과학 목적 및 요약

표준 은하 형성 이론에서 만기형 은하들은 원시 기체가 가지는 초기 밀도 분포의 성장으로부터 천천히 성장한다. 이때 단위 각운동량을 보존하게 되는데 이때 갖게 되는 각운동량에 따라 만기형 은하들의 은하 원반의 구조가 다르게 성장하게 된다[1, 2]. 이때 갖게 되는 각운동량의 크기는 만기형 은하들의 암흑물질의 각운동량과 같다고 믿어진다. 만기형 은하들 중에서 낮은 중심표면광도를 갖는 만기형 은하를 저표면광도은하(lowsurface brightenss galaxy)라고 부르는데 이 저표면광도은하들의 생성 기작은 무척 흥미롭지만 제대로 연구되어 있지 않다. 각기 다른 표면광도를 지닌 만기 은하들의 형성과 진화는 아직까지 제대로 연구되어 있지 않으나 우주 초기에 초기 밀도 분포 성장 시, 단위 각운동량이 큰 만기형 은하들이 저표면광도은하들로 성장하게 된다는 이론이 가장 설득력을 지닌 가설

로 받아들여지고 있다.

저표면광도은하들의 형성과 진화는 최근 들어 여러모로 주목을 받아왔는데 이는 이 은하들의 독특한 성질에 기인한다. 이 은하들은, 별 생성을 마친 일반적인 은하들이 점차 어두워지고 난 흔적들일 것이라는 최초의 예상과는 달리 매우 푸른 편이다. 이를 설명하는 시나리오들은 다양한데, 별들의 어린 나이, 적은 양의 먼지, 낮은 금속원소함량, 심지어는 변화하는 별 질량초기함수(stellar initial mass function; IMF) 등이 있다. 하지만 이러한 시나리오들 중 어느 것이 정답인지를 알아내는 것은 말할 것도 없고, 가장 가능성이 적은 것들을 가려내는 것조차 굉장히 정밀한 관측을 통하여 충분한 정보를 수집해야만 하는 난제로 남아 있다.

하지만 저표면광도은하들의 특징 중 무엇보다 독특한 특징은 암흑물질의 함량이 높고, 또한 암흑물질의 분포가 다른 만기형 은하들과는 달리 중심부에 크게 집중되어 있지 않다는 점이다. 따라서 이러한 저표면광도은하들의 환경 요인 물리량과 더불어서 이들의 진화 과정을 살펴 다른 만기형 은하들과 비교한다면 이는 만기형 은하들의 형성 및 진화를 알아내는 데 있어서 굉장히 중요한 요인들을 살피게 되는 것이다.

2. 연구 필요성, 배경 및 동향

1) 연구의 필요성

현대 천문학계에서는 다양한 파장대(자외선, 가시광, 근적외선, 원적외선 및 전파)를 이용한 대규모 탐사(survey) 연구가 외부은하 연구를 수행하는 데 있어서 주류를 이루고 있다고 해도 과언이 아니다. 특히 외부은하들의 형성 및 진화에 있어서 은하들의 별 질량(stellar mass), 별 생성량(star formation rate), 구조(structure) 등이 은하가 지니고 있는 기체(gas), 혹은 성간물질(interstellar medium)의 질량이나 표면 밀도(surface density)와의 상관관계에 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀지면서, 더욱더 은하가 지니고 있는 별들을 대표한다고 할 수 있는 가시광이나 근적외선 파장대에서의 관측과 더불어 기체나 성간물질의 성질을 보여주는 전파 영역에서의 관측을 함께 수행하기 위해 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.

한국 천문학계는 여러 가지 여건상 세계 천문학계가 벌이고 있는 관측 탐사

를 직접 수행하고 있지는 못하지만, 그간 다른 방법으로 세계 수준의 연구 결과를 내놓기 위해 많은 노력을 기울여왔다. 슬로언 디지털 전천 탐사(Sloan Digital Sky Survey; 이하 SDSS)에 참가하여 많은 연구 결과를 내놓은 것이 그 좋은 예라고 할 수 있다. 그러나 한국 천문학계의 노력은 이에 그치지 않는다. 그 노력 중 가장 두드러진 성과라 할 수 있는 것이 고등과학원의 박창범 교수와 그 연구진이 발표한 KIAS Value Added Galaxy Catalog(이하 KVAGC)이다 [3]. 이 catalog는 SDSS를 기본으로 하여 정밀하게 측정된 은하들의 성질이 추가되어 천문학계에서 널리 쓰이고 있는 NYU-VAGC를 이용하여 은하들의 환경 요인을 연구할 수 있는 적색이동량(red shift)과 한층 더 정밀하게 측정된 은하들의 구조 인자(structure parameter)들이 추가된 굉장히 뛰어난 catalog이다. 그러나 천문학계에서 널리 쓰이고 있는 NYU-VAGC에 비하여 상대적으로 훨씬 덜 알려져 있고 심지어는 국내 천문학계에서도 활용되는 경우가 적다. 이뿐만 아니라 한국 천문학계는 SDSS3, 그리고 향후에는 LSST 프로젝트에도 참여하여 은하 환경을 연구할 다양한 프로젝트에 참여할 예정이다. 따라서 이러한 은하 목록을 바탕으로 한 은하 환경, 그리고 이를 통해 얻은 새로운 은하들에 대한 후속 연구 과제 개발은 한국 천문학계의 발전을 위한 여러 가지 시도로써 의미가 있다고 하겠다.

3. 연구의 내용 및 방법

1) 연구 대상

은하가 내는 여러 파장의 에너지의 차이라 할 수 있는 은하의 색(color)은 가장 대표적으로 그 은하가 지니고 있는 별종족(stellar population)의 나이, 혹은 금속원소함량(metallicity)의 차이로부터 기인한다. 은하의 색이 별종족의 나이와 금속원소함량, 두 특성으로부터 동시에 영향을 받는 것을 age-metallicity degeneracy라 부르는데 이는 그간 은하 연구에 있어서 은하의 색을 통하여 은하의 정확한 특성, 특히 은하의 별 생성 역사(star formation history)를 연구하는 것을 방해해온 가장 큰 요인이라 할 수 있다 [5].

이 age-metallicity degeneracy는 가시광 파장과 근적외선 파장의 특정 필터를 함께 이용하여 색지수를 구성하였을 때 피할 수 있는 것으로 알려져 있다.

de Jong(1996) [6]은 그의 박사학위 논문과 그를 기반으로 한 여러 논문에서 전통적으로 쓰이는 B-V, 혹은 B-I 색지수 대신에 B-K나, V-K를 통하여 별종족의 나이와 금속원소함량의 영향을 구별해낼 수 있다는 것을 보여주었고, 이를 기반으로 Bell et al.(2000) [7]은 저표면광도은하(low surface brightness galaxy; 이하 저표면광도은하)들의 별 생성 역사(star formation history)를 분석하였다.

이처럼 가시광 파장 자료와 근적외선 파장 자료를 함께 이용하여 은하의 색을 분석하는 방법은 은하의 나이, 혹은 별 생성 역사를 연구하는 데 중요한 역할을 함에도 불구하고 비교적 알려진 지 얼마 되지 않았다는 이유와 또한 정확한 분석을 위해서 굉장히 깊은 근적외선 자료가 필요하다는 이유로 그다지 많이 활용되지 못한 것이 사실이다.

이러한 문제는 은하들의 색 기울기(color gradient)에 대해서 더욱 심화된다. 은하의 종류를 막론하고 은하 중심으로부터의 거리와 색이 갖는 기울기는 은하의 형성과 진화에 있어서 많은 정보를 지니고 있다. 만기형 은하들의 경우에도 예외는 아니다. 단조 붕괴에 의한 형성 후, inside-out growth가 진행되는 경우에는 은하의 팽대부성분(bulge component)은 굉장히 큰 metallicity gradient와 함께 별종족의 나이는 점차 증가하는 경향을 지닐 것으로 예상된다 [7]. 또한 bulge가 병합에 의하여 형성된다고 할 때, 굉장히 오래전에 병합이 일어난 경우에는 단조 붕괴에 의하여 형성된 경우와 큰 차이를 보이지 않겠지만, 최근에 일어난 병합에 의하여 형성된 bulge의 경우에는 metallicity gradient가 그리 크지 않고, 또한 굉장히 많은 양의 젊은 별들이 존재할 것이다 [8]. 또 만일 bulge가 형성되는 주요한 기작이 병합이 아닌 영년진화(secular evolution)라면 bulge와 원반성분(은하 원반 component)는 비슷한 나이와 metallicity의 경향성을 보일 것이다. 한편, 은하들이 계속해서 기체와 성간물질들을 주변 환경으로부터 유입하는 경우에도 그 주요 기작에 따라 은하 원반은 다른 형태의 색 기울기를 가질 것으로 예상된다. 만약 기체가 굉장히 늦게 유입되었거나 현재에도 계속해서 유입되고 있다면 기체가 유입되는 지점에 따라 굉장히 강한 색 기울기를 지니거나 혹은 반대로 평평한 색 기울기를 가질 것이다.

최근 많은 연구들이 만기형 은하들의 색 기울기를 분석하면서 negative한 색 기울기를 갖는 연구 결과를 내놓고 있다 [10, 11, 12, 13]. 이는 바깥쪽으로 갈수록 나이가 젊거나 혹은 metallicity가 적은 값을 보여주고 있는데, 흥미로운 점

은 이것이 단지 bulge가 없는 만기형 은하뿐 아니라 bulge가 꽤 큰 만기형 은하의 경우에도 해당된다는 점이다. 이러한 결과는 허블 우주망원경(Hubble space telescope)를 이용하여 낱별(resolved stellar population)들을 직접 관측하여 분석한 연구에서도 마찬가지인 것으로 드러났다 [14].

하지만 이런 선행 연구들의 경우에는 몇 가지 약점이 있다. 대체로 이 연구들은 적색이동량이 없거나 너무 가까운 은하들만을 대상으로 하여 은하들의 환경 요인을 함께 연구하기에 적당하지 않거나 혹은 가시광에만 의존하고 있기에 age-metallicity degeneracy를 피해가기에 자료가 부족하다고 할 수 있다. 현재까지 이루어진 많은 색 기울기에 관한 연구들은 주로 근적외선 파장의 자료들의 한계로 많은 어려움을 겪어왔다. 근적외선을 이용한 탐사 자료 중 가장 널리 쓰이고 있는 2MASS 자료는 그 깊이가 부족한 것으로 유명하다. 또한 낱은하들에 대한 근적외선 관측 자료들도 충분히 깊지 못하여 은하의 색 및 색 기울기를 가시광 자료들과 함께 분석하는 경우 인위적으로 은하의 바깥쪽으로 갈수록 푸른 색 기울기를 갖는 결과가 나오곤 했다.

따라서 본 연구 제안서는 만기형 은하들의 환경 요인이 은하들의 형성과 진화에 끼치는 영향을 연구를 위하여 기존의 SDSS나 2MASS보다 깊은 은하 목록들을 활용하여 얻은 은하들의 환경 요인 물리량들과 구조 인자들을 바탕으로 하여, 각 만기형 은하들의 별들과 기체들의 금속함량 및 그 기울기를 비교하는 연구를 제안한다.

중점적으로 행해질 분석은 외떨어진(isolated) 만기형 은하들이 그렇지 않은 만기형 은하들과 비교하여 금속함량 기울기의 차이점을 갖는지, 그리고 그 차이의 유무와 차이의 정도가 별 질량이나 별생 성량, 혹은 중성수소의 양과 상관관계를 갖는지이다. 또한 별 생성량을 별 질량으로 나누어준 값인 specific star formation rate와 기체의 양을 기체의 양과 별 질량으로 나누어준 값인 기체비(gas mass fraction)와의 상관관계 역시 분석되어진다. 기체비가 높은 만기형 은하들이 그렇지 못한 은하들에 비해 높은 specific star formation rate를 갖고 있다 [12]. 이는 어떤 기작을 통해서든 아직까지 가지고 있는 기체, 혹은 성간물질들을 별로 변환시키지 못한 은하들은 최근 들어 갑작스러운 별 생성 과정을 거치고 있다는 것을 보여준다. 이러한 은하들이 많은 성간물질들을 별로 변환시키지 못한 기작은 아직 밝혀지지 않고 있는데 그 후보들로는 초기물질로부터의 늦은

붕괴(late collapse from primordial density fluctuation)로 인한 늦은 은하 형성(late galaxy formation epoch)이나 높은 단위각운동량(specific angular momentum)으로 인한 성간물질들의 연기된 유입(late gas infall)들이 있다. 만일 늦은 은하 형성이 원인이라면 높은 specific star formation rate를 갖는 은하들은 은하 전반에 걸쳐 금속함량 기울기가 평평하겠지만, 그에 반해 어떤 이유로든 성간물질들이 계속해서 유입되고 있다면 은하들은 현재 별이 생성되고 있는 위치에 따라서 굉장히 큰 금속함량 기울기를 보일 것이다.

또한 언급된 것처럼 단위각운동량이 연기된 성간물질 유입의 원인이라면 은하의 표면광도분석을 통하여 얻은 은하 원반의 중심표면광도(central surface brightness)에 따라서 색 기울기의 정도가 다르게 나타날 것이다. 다시 말하자면 낮은 중심표면광도를 갖는 만기형 은하일수록 큰 specific star formation rate을 갖고 또한 큰 금속함량 기울기를 가질 것으로 예상된다.

한편 이렇게 낮은 중심표면광도를 갖는 만기형 은하를 저표면광도은하(low surface brightenss galaxy; 이하 저표면광도은하)라고 부르는데 이 저표면광도은하들은 그 특수성 때문에 최근 천문학계의 관심을 받아왔다. 중심표면광도가 B 필터에서 23mag/arcsec^{2}보다 어두운 은하들로 정의되는 이 저표면광도은하들은 한때 은하 원반이 굉장히 어둡다는 특성 때문에 일반적인 만기형 은하들이 별 생성을 마친 후 점차 늙고 어두워지고 있는 상태라고 여겨졌으나, 여러 관측 결과 가시광과 근적외선 파장에서의 색이 굉장히 푸르다는 사실이 밝혀짐으로써 오히려 아직까지 점근거성가지(asymptotic giant branch; 이하 AGB)가 생성되지 않은 젊은 은하들로 드러났다. 또한 낮은 metallicity와 함께 적은 먼지의 양을 이 은하들은 상대적으로 높은 기체비를 지님으로써 앞서 언급한 것처럼 초기우주에서 만기형 은하들이 형성되던 초기의 모습을 현재 지니고 있을 가능성이 거론되고 있다. 더군다나 일반적인 만기형 은하들에 비하여 상대적으로 굉장히 작은 회전종속도(terminal rotational velocity)와 중심부의 낮은 속도기울기(velocity gradient)를 지니고 있기에 굉장히 많은 양의 암흑물질(dark matter)을 지니고 있을 것으로 예상되는 이 저표면광도은하들은 암흑물질 헤일로(halo) 중심부의 물질밀도가 굉장히 높은지 아니면 그렇지 않은지의 문제(cusp versus core problem)를 해결하는 데 있어서 중요한 천체로 간주되어왔다.

이처럼 은하 형성과 진화의 이론을 뒷받침하는 데 있어 중요하게 여겨지는 천

체임에도 불구하고 저표면광도은하의 관측 및 그 분석은 상대적으로 무척 느린 속도로 이루어져왔는데, 이는 이 은하들이 굉장히 발견하기가 어렵기 때문이었다. 또한 저표면광도은하의 정의 자체가 단순히 그 광도나 평균적인 표면광도로 주어진 것이 아니라 표면광도 분석을 통한 은하 원반의 중심표면광도로 주어지기에 매우 깊은 대규모 탐사 자료에서도 그 검출을 자동화하는 것에 한계가 있어 왔다. 그럼에도 불구하고 저표면광도은하들의 자동화 검출은 은하 형성 이론의 검증에 굉장히 중요한 역할을 차지하기에 차세대 대규모 탐사 과제인 Large Synoptic Survey Telescope(LSST)와 Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System(Pan-STARRS), 모두 저표면광도은하의 자동화 검출을 이들 탐사의 중요한 연구 과제로 삼고 있는 상황이다 [15, 16].

따라서 차후 LSST 및 PAN-STARRS 등에 의한 은하 목록을 바탕으로 한 만기형 은하들의 목록이 생성되면 이를 이용하여 은하들의 환경 인자들과 만기형 은하들의 성장 간의 상관관계를 금속함량 기울기를 통하여 연구할 수 있게 된다.

2) 8m급 천문대를 이용한 선행 연구

만기형 은하들의 금속함량 기울기 연구는 상대적으로 굉장히 밝은 만기형 은하들의 경우에도 8~10m급 대형망원경을 이용해야 하는 연구이다. 보통 평균적인 별 생성량을 보이는 만기형 은하의 경우에도 그 별 성분 및 기체 성분의 금속함량을 측정하기 위하여 1시간 이상의 관측 시간을 요구하게 된다.

상대적으로 훨씬 어두운 저표면광도은하의 경우 별 성분 및 기체 성분의 금속함량을 측정하기 위해서라면 대형망원경에서도 4시간 이상의 오랜 관측 시간을 요구하게 된다. 그러나 이렇게 긴 관측 시간을 요구함에도 불구하고 만기형 은하 진화 연구에 금속함량 측정이 가진 중요성으로 인하여 꽤 많은 시간이 투자되어 관측이 이루어지곤 한다.

아직 8~10급 대형망원경에서 저표면광도은하의 금속함량 측정 연구 및 관측이 이루어진 적은 없지만, 앞으로의 연구에 앞선 선행 연구로서 시간과 노력을 투자할 필요가 있다고 하겠다.

4. 인용문헌

[1] White & Reese, 1978
[2] Fall & Efstathiou 1980
[3] Choi et al. JKAS, Vol.43, 2010
[4] Hewett et al. MNRAS, Vol. 367, 2006
[5] Worthey, ApJS, Vol. 95, 1994
[6] de Jong, A&AS, Vol. 118, 1996
[7] Bell et al. MNRAS, Vol. 312, 2000
[8] Kauffmann MNRAS, Vol. 281, 1996
[9] Courteau et al. ApJL, Vol. 457, 1996
[10] MacArthur et al. ApJS, Vol. 152, 2004
[11] Bell & Bower MNRAS, Vol. 319, 2000
[12] Wang et al. MNRAS, Vol. 412, 2011
[14] Dalcanton et al. ApJS, Vol. 183, 2009
[15] www.lsst.org/lsst/science/overview
[16] pan-starrs.ifa.hawaii.edu/ public/science-goals/galaxies-cosmol ogy.html