

시이펏 은하 NGC 5728의 OASIS 분광 영상

형 식^{1,*} · 손동훈² · P. Ferruit³ · 이우백⁴

¹충북대학교 지구과학교육과, 361-763 충북 청주시 개신동 12

²경희대학교 우주과학과, 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1

³CRAL-Lyon 천문대, 프랑스

⁴한국천문연구원, 305-348 대전시 유성구 화암동 61-1

OASIS Spectral Images of the Seyfert galaxy NGC 5728

Siek Hyung^{1,*}, Dong-Hoon Son², Pierre Ferruit³ and Woo-Baik Lee⁴

¹School of Science Education, Chungbuk National University, Chungbuk 361-763, Korea

²Department of Astronomy and Space Science, Kyunghee University, Gyeonggi-do 449-701, Korea

³CRAL-Observatoire de Lyon 9, avenue Charles Andre, 69561 Saint Genis Laval cedex, France

⁴Korea Astronomy and Space Science Institute, Whaamdong Yusong-gu, Daejeon 305-348, Korea

Abstract: The distribution and kinematic information of the continuum, H α , H β , [O III], & [N II] images based on spectroscopic data secured with the OASIS at the Hawaii CFHT 3.6m telescope have been analyzed to study the physical characteristics of NGC 5728. The three bright regions-northwestern knot, southeastern knot, and the nucleus-exist within a 15" \times 12" sky area which seem to indicate gas flows along the northwestern or western direction from the nucleus. We find that the center of a 10" diameter ring is at the northwestern knot, not at the galactic center. To further analyze the formation mechanism of such a ring, the kinematics of the nucleus and knot have been studied and the central structure of the Active Galactic Nuclei has been investigated by comparing various emission images.

Keywords: Seyfert Galaxy, Active Galactic Nuclei, spectroscopic observation, NGC 5728

요 약: CFHT 천문대 3.6 m 망원경에 부착된 OASIS 분광기를 사용하여 얻은 자료로부터 continuum, H α , H β , [O III], [N II] 등의 영상을 만들어 활동 은하핵 NGC 5728의 물리적 특성을 분석하였다. NGC 5728의 중심부에 NLR 영역으로 판단되는 약 15" \times 12" 범위 영역에 3개의 밝은 부분(NW knot, SE knot, nucleus)이 존재하고 있고, 이는 핵(nucleus)을 중심으로 북서방향이나 서쪽으로 물질의 흐름이 일어나고 있음을 암시한다. 우리는 직경 10"인 ring과 이의 중심에 있는 NW knot의 구조가 은하중심과 일치하지 않음을 발견하였다. 우리는 이러한 구조의 생성 원인에 대해 알아보기 위하여 핵과 knot의 운동학적 특성을 비교하여 보았고, 방출선 영상에서 보이는 차이점을 비교함으로써 활동 은하 중심부의 구조를 살펴보았다.

주요어: 시이펏 은하, 활동 은하, 분광 관측, NGC 5728

서 론

NGC 5728은 나선 막대은하 SAB(r)로 분류된 Seyfert 2 은하($m_v = 12.4$)이다(de Vaucouleurs et al., 1976). NGC 5728의 적색편이(z)는 0.009467이고 후

퇴속도가 2788 km/s이므로, 허블상수 $H = 70$ km/s/Mpc라고 가정하면 이 은하까지의 거리는 약 40.6 Mpc이 된다. 이 은하의 중심부분에는 반경 약 5" 크기의 ring이 있는데, 별이 탄생하는 영역으로 알려져 있다(Schommer et al., 1988, Wilson et al., 1993). 이 ring의 안쪽에 torus 원반에 의해 가려진 초거대 블랙홀이 활동하고, 이를 broad line region (BLR)과 narrow line region (NLR)이 감싸고 있을 것으로 추정된다. BLR과 핵은 먼지에 의해 가려져 있고, 허블

*Corresponding author: hyung@chungbuk.ac.kr

Tel: 82-43-261-2726

Fax: 82-43-271-0526

망원경 [O III]와 [N II] 필터 영상에 의하면 양극체 (bipolar cone)가 중심부에서부터 나오고 있다 (Wilson et al., 1993). 이러한 대칭적 구조는 중심에서 나오는 빛이 torus ring에 의해 가려져 비등방으로 방사될 때 예상되는 전형적인 활동은하핵(Active Galactic Nuclei, AGNs)의 구조를 가지고 있음을 말해준다. 활동은하핵 중심부에서 나오는 비열적 (nonthermal) 복사가 BLR이나 NLR의 가장 중요한 기작이라고 알려지고 있다.

NGC 5728의 중심부분 영역($r \sim 5''$)에서 얻어진 분광선이 두 개의 도플러 피크를 가진 방출선(double peaked emission lines)을 띠고 있는데, 이는 가스의 유입(inflows)이나 배출(outflows)이 맹렬한 속도로 이루어지고 있는 증거로 판단하고 있다(Schommer et al., 1988). 중심에서 좀 더 먼 영역($r \sim 10''-15''$)에서 보이는 또 다른 분광학적 특성에 대한 분석에 의하면, 청색편이는 은하 원반을 구성하는 가스의 운동학적 구조에서 비롯되고, 폭이 넓은 적색편이 성분은 가스의 소용돌이로부터 나오는 것으로 해석되어 지고 있다. 지금까지 막대나선 은하 형태의 AGN 분광연구나 영상연구에서 중심부분의 ring이나 도플러 편이 관측 자료, 운동학적 특성은 중심부분의 막대(bar)의 비대칭적인 중력퍼텐셜, 즉 ILR(inner Lindblad resonance)의 영향으로 형성되었다고 해석되어 왔다. 예를 들어 NGC 1097(Burbidge and Burbidge, 1960), NGC 1512(Hawarden et al., 1979), NGC

3351(Rubin et al., 1975), NGC 4314 (Benedict, 1980) 등도 각각 직경 1.0 kpc, 0.4 kpc, 0.5 kpc, 0.5 kpc의 ring이 관측되었으며, 이 ring들은 모두 ILR의 영향으로 생성된 것으로 알려져 있다. 은하 중심에 작은 규모의 막대(inner bar)가 있을 경우, 이를 따라 중심으로 흘러들어가는 가스들이 이온화되어, 일부는 젊고 푸른 별들을 형성하고, 이러한 가스로 이루어진 ring이 형성된 것으로 본다.

우리는 이 은하의 중심부분의 방출선에서 보이는 핵(nucleus)과 ring의 영상을 CFHT OASIS 3-D 자료를 통해 재현하여 연구하였다. 2절에서는 OASIS관측과 XOASIS등을 통해 영상을 재현하는 방법이 기술되어 있고, 3절에서는 재현된 연속선(continuum)과 방출선(lines)들에서 본 여러 영상에서 보이는 ring과 AGN활동성의 특성이 분석되었다. 마지막으로 4절에서는 NGC 5728의 중심부 구조와 활동성에 대한 결론을 제시하였다.

OASIS 분광 관측 및 자료 분석

Fig. 1은 CFHT 천문대에 3.6 m 망원경에 설치되어 사용된 OASIS 분광기의 원리를 나타내는 그림이다. OASIS에 의해 3D(적경, 적위, 파장) 분광관측이 이루어지는데, 이 분광기로 한 번의 노출로부터 면 천체의 약 1000개의 지점(α, β)에서 동시에 1000여개의 분광자료($1200 \times \lambda_1 - \lambda_2$ spectral data set)를 얻게

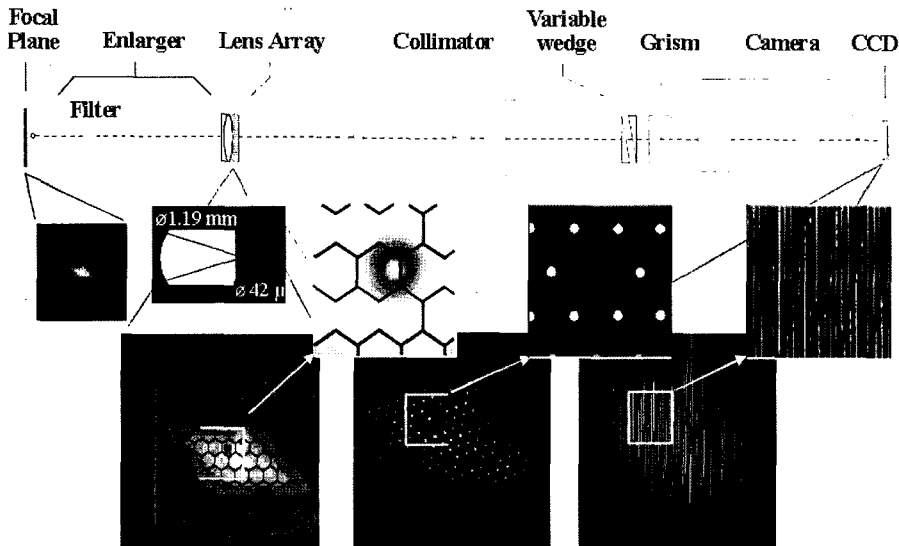


Fig. 1. OASIS layout diagram which shows the spectral data acquisition (supported by CFHT).

된다. 따라서 은하, HII 영역, 행성상 성운 같은 먼천체(extended object) 영상의 각 지점의 물리적, 운동학적 정보를 동시에 얻을 수 있게 하는 장점이 있다. 이러한 여러 지점의 운동학적 물리적 정보는 가스가 어떤 흐름, 속도, 온도를 갖는지를 알게 해주어, 중심부에 대한 모델을 설정하는데 중요한 역할을 한다. 시상이 좋은 경우는 공간분해능을 더욱 높여서, AGN의 중심부의 아주 좁은 영역을 약 1000여개의 영역으로 세분하여, 각 영역에서 1차원 분광선을 얻음으로써 가장 중심부에 존재하리라고 생각되는 블랙홀과 이를 감싼 BLR의 천체물리학적 특성을 연구할 수 있다. 따라서 OASIS기기는 일반적인 분광기와는 달리 여러 지역의 분광선을 조사하기 위해 관측을 여러 번 반복해야 하는 수고를 덜게 해준다. 이러한 관측 자료는 동시에 얻어졌으므로 관측 자료가 동일한 조건에서 얻어지고, 여러 번 노출에서 오는 관측의 오차를 크게 줄여주는 이점이 있다.

관측은 2002년 3월 15일 (UT) 행하였고, 관측당시 시상(seeing)은 약 0".9였다. OASIS 분광기의 한 렌즈(lens)는 F/8 Cassegrain 초점에서 하늘의 0".41의 영역의 빛을 분광하도록 선택하여 관측하였다(날씨가 좋은 경우 한 렌즈가 0".27를 관측할 수 있음). 따라서 2차원으로 배열된 1000개의 렌즈로 은하 중심부의 약 15"×12"의 영역을 관측하였다. OASIS는 4700-7000Å 가시광 파장영역을 관측하기 위해, 두 개의 그리즘(grism)을 이용하여 연구하려는 파장범위를 선택하였다. 우리의 관측에서는 O300과 R300의 그리즘을 사용하였는데, 전자가 MR1이고, 후자가 MR2로 명명되었고, 각기 4760-5558Å과 6210-7008Å의 파장영역 분광 자료를 얻게 해준다. 관측에 쓰인 CCD는 EEV1 2k×4.5k로 CCD의 한 화소(pixel)당 약 1.9Å 파장분해능의 자료를 얻게 한다. MR1에 의해서 Hβ4861, [O III]4959, [O III]5007 같은 방출선 자료를 얻고, MR2의 관측으로 Hα6563, [N II]6548, [N II]6584같은 방출선의 자료를 얻게 한다. MR1에 의한 관측은 2번의 1800초 노출을 하였고, MR2에 의한 관측은 1800초와, 2700초의 노출이 되어, 모두 4번의 노출을 하여 자료를 얻었는데 MR1의 두 노출과 MR2의 두 노출은 각기 합해졌다. Table 1에 OASIS의 MR1, MR2의 특성에 대한 설명이 주어졌다. Fig. 2는 MR2의 1000개의 각 lens로부터 어떻게 NGC 5728의 표면의 각 지점에 대응하는지를 보여준다. CFHT 망원경의 초점에 맺히는 NGC 5728 영상

Table 1. OASIS configuration and grims

	MR1	MR2
Sky sampling	0".41	0".41
Field	15"×12"	15"×12"
Wavelength	4760-5560Å	6210-7000Å
Dispersion(Å/pixel)	1.9	1.9
Resolving power	~1100	~1300
Exposure	1800s×2	1800s, 2700s
No. of lens	884	918

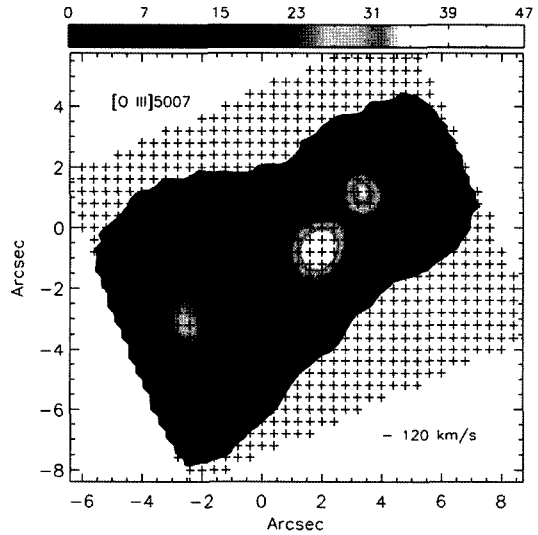


Fig. 2. MR1 lens position on the NGC 5728 image. North (N) is up and east (E) is left.

의 북쪽(N)과 동쪽(E)등의 방향이 OASIS 분광기에 배열된 lens를 통과한 후 관측영상(field image)으로 되는데, 이 영상의 윗부분이 PA = -23°.46로 향해 있으므로, 그림의 윗부분이 N을 향하도록 나타내었다.

파장확인을 위한 Ne과 Hg Lamp를, 화소의 빛에 반응도를 고르게 하기 위해 Quartz와 twilight sky를, 기기 잡음을 제거하기 위한 bias, dark 노출 자료를 얻었고, flux를 결정하기 위해 표준성으로 BD + 332642를 관측하였다. 관측 자료는 IRAF를 기본으로 하여 Lyon 천문대 연구팀이 만든 XOASIS를 통해 분석하였는데, 관측자료 분석은 bias-dark 보정, cosmic ray 보정, 파장 결정, flux 보정의 순서로 이루어 졌다.

NGC 5728의 숙주은하(host galaxy)는 PA = 33°인 NE(동북)-SW(남서)방향으로 장축이 놓인 타원 구조를 이루고 있는 막대나선은하이다. Pogge(1989)는 지상망원경을 사용하여, [O III] 영상관측을 얻어서, 크

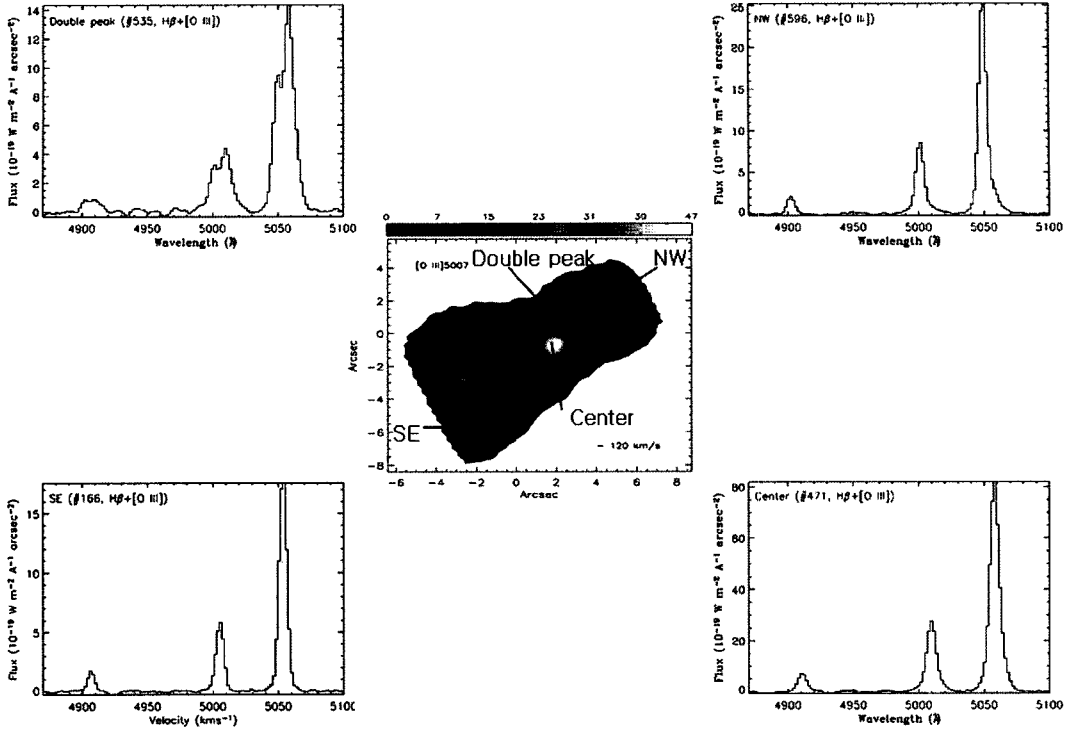


Fig. 3. [O III] 5007 image and the spectra for four positions (MR1).

기가 약 10"이며, 극축방향이 $PA = 130^\circ$ 로 배열된 쌍원뿔(bicone)의 구조를 확인하였다. Fig. 3은 OASIS의 3D 스펙트럼으로부터 $15'' \times 12''$ 의 field 영상을 얻는 과정을 보여주는 그림이다. 우리의 관측결과에서도 속주은하의 장축에 수직인 방향, 즉 $PA \approx 123-130^\circ$, NW(북서)-SE(남서) 방향으로 Pogge(1989) 등이 bicone 구조라고 지적한 구조가 활동은하핵부분에 두드러지게 보인다. Fig. 3 귀퉁이(comer)의 선유평은 활동은하핵의 4지점 즉, double peak 분광선이 나오는 지역, SE knot지역, NW knot지역, center(중심)등에서 얻은 스펙트럼이고, 중심의 [O III]5007영상은 $15'' \times 12''$ 의 하늘을 약 1000개로 나누어 각 지점에서 빛이 lens를 통과하여 얻은 1000개의 [O III] 5007Å 분광선들을 이용해 합성한 영상이다. 어떠한 절차를 통해 영상을 얻을 수 있는지에 관한 자세한 설명은 Ferruit(2002)에 기술되어있다. Bicone 구조를 보이는 것 중 NW지역은 활동은하핵 중심에서 약 2".6 떨어진 곳으로 knot이 잘 정의되어있는 반면, SE지역은 크기가 퍼져있고, 세기도 상대적으로 약한 것을 확인하였다.

Fig. 4는 관측한 전 파장 영역에서 어떠한 분광선

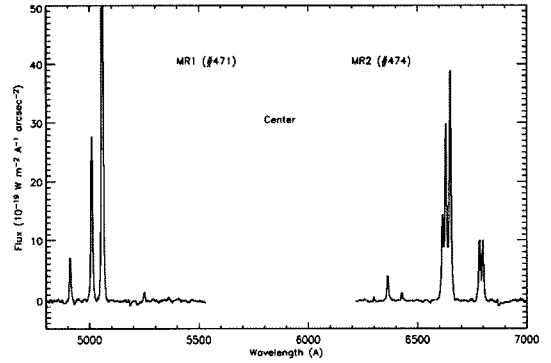


Fig. 4. MR1 and MR2 spectra for the same image position.

들이 나타나는지를 보여주기 위해 스펙트럼이 가장 강한 중심핵에서 얻은 MR1 및 MR2의 관측결과이다. MR1에 의한 NGC 5728의 관측이 있는 후, flux calibration을 위해 표준성을 관측하였고, 다시 MR2에 의해 NGC 5728의 관측이 이루어졌기 때문에 MR1은 lens#471, MR2는 lens#474로부터 얻은 결과이지만, 모두 동일한 지점의 분광선이다. MR1에서 Hβ4861, [O III]4959, [O III]5007이 강하게 나타남이 보이고, MR2의 관측에서 [N II]6548, Hα6563,

[N II]6584, [S II]6717, 6731선들이 강하게 나타나 보인다. 이러한 선들의 파장은 은하가 우리로부터 약 2788 km/s로 멀어짐으로 인해서 파장이 적색편이 되어 실험실 파장보다 긴 파장의 스펙트럼으로 나타남을 알 수 있다. 즉 H α 의 경우 6563Å이 아닌 6625Å로 관측된다. 모든 종류의 방출선이 약 1000여개의 lens 모두에 스펙트럼으로 나타나는 것이 아니고, 특정한 지역에서는 강하게 다른 지역에서는 약하게 나타난다. XOASIS를 사용해 만든 특정 방출선에서의 영상을 통해 어느 지역이 강한 방출선을 내는지, 어느 지역이 빠른 속도를 가지고 멀어지거나 팽창하는지 등의 속도장(velocity field)을 우리는 살펴보고자 한다. 이러한 것을 분석하여 활동은하핵의 물리적 운동학적 특성을 알 수 있다. 우리는 XOASIS, IRAF, IDL 등을 이용하여 영상을 세밀히 분석하였는데, 다음 절에서 보듯이 선의 세기의 변화를 나타내기 위해 false color를 사용하였다.

Continuum, H β , [O III], [N II] 방출선 영상과 활동은하 핵 구조

활동은하핵은 블랙홀 주변에 먼지와 가스로 된 torus모양의 원반을 가지고 있어 중심의 비열적복사가 양극방향으로 나와 그 주위의 가스를 이온화시켜 밝은 대칭적 bicone 구조가 형성될 것으로 여겨진다. 앞에서 언급한 Pogge(1989)는 지상망원경을 사용해, Wilson et al.(1993)은 WF/PC 1 Hubble 망원경 영상을 통해 극축방향이 PA \approx 120-130°로 배열된 크기가 약 10" 즉 약 1 kpc까지 확장되어 있는 bicone 구조를 확인하였다. 우리는 이러한 구조가 우리의 관측에서 보이는지 확인하기 위해 continuum, H α , H β , [O III], [N II]의 narrow filter영상을 복원하였으며, 이러한 영상을 면밀히 검토하여 지금까지의 선행에서 주목하지 못했던 단서가 있는지 조사하였다.

Continuum 및 H β , H α 영상

활동은하의 방출선의 주된 에너지원은 분명 초거대 블랙홀 주위에서 나오는 비열적복사일 것이다. 하지만 별의 UV 복사도 기여하고 있고, 어떤 경우에는 충격파와 같은 운동에너지가 열원이 될 수도 있다(손동훈과 형식, 2004). Bicknell et al.(1998)은 일반적으로 활동은하의 NLR 영역이 근본적으로 수명이 106년 정도인 제트(jet)의 운동량공급에 의해 생성되었을

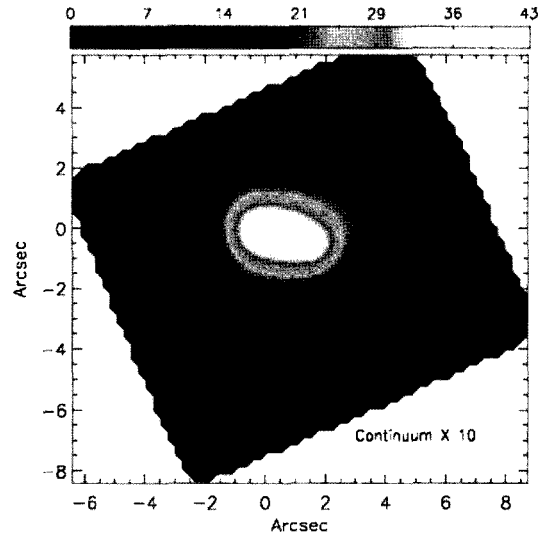


Fig. 5. OASIS continuum image (from MR1; 0".41/lens; 1"~197 pc). The (0,0) is where the continuum flux peak occurs, $(\alpha, \delta)_{1950} = (14^{\text{h}} 39^{\text{m}} 36.9^{\text{s}}, -17^{\circ} 02' 26''.2)$.

가능성을 제시하고 있다. Schommer et al.(1988)은 NGC 5728의 VLA 6cm 관측에서 중심에서 NW(서북) 방향, 즉 PA \approx 307° 방향으로 놀라운 정도로 곧게 뻗은 약 5" 길이의 제트 같은 구조의 전파원을 관측하였다. 이 전파원은 근본적으로 자유-자유전자 천이에 의해 생성되었을 것으로 해석되는데, 자유-자유전자 천이가 가시광영역에서는 continuum으로 방출된다. 우리는 제트와 유사한 구조가 있는지 알아보기 위해 가시광영역의 continuum 영상을 살펴보았다. Fig. 5는 H β 부근의 continuum의 영상으로 MR1의 자료이며, Fig. 6는 H α 부분의 continuum 영상으로 MR2자료로부터 추출된 것이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 위치가 (0, 0)인 지점은 continuum이 가장 센 지역으로 그 실지 위치는 MR2의 경우 $(\alpha, \delta)_{1950} = (14^{\text{h}} 39^{\text{m}} 36.8^{\text{s}}, -17^{\circ} 02' 26''.5: 1950)$ 이다. 가장 강한세기 지역이 노란색, 중간세기가 붉은색, 미약한 세기가 파란색으로 표기되었다. 두 영상을 비교하면, MR1에 의해 관측한 NGC 5728의 영상의 중심부근과 MR2에 의한 중심부분이 약 2" 정도 어긋나 있는데, 앞에서 설명하였듯이 flux 보정에 필요한 표준성 관측으로 인해, OASIS field위치가 약간 변해서 발생한 결과이다. H α 주위의 continuum과 H β 주위의 continuum의 모양이 비슷하지만, H α -continuum의 크기가 조금 더 크고, 최대밝기 지점이 약간 다른 것처럼 보이는

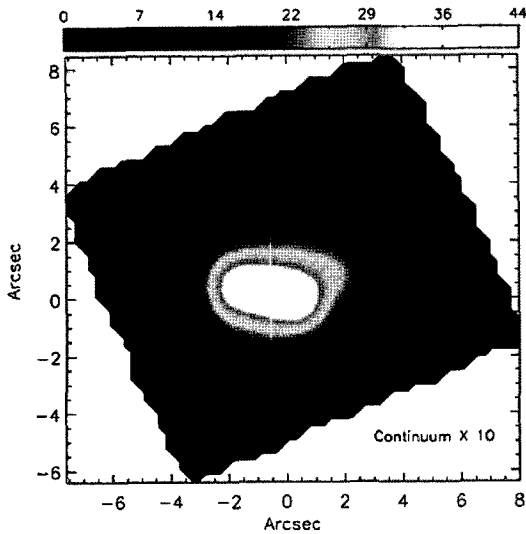


Fig. 6. OASIS continuum image around the H α line (from MR2). The peak continuum flux position (0,0) corresponds to $(\alpha, \delta)_{1950} = (14^h 39^m 36.8^s, -17^\circ 02' 25''.7)$.

데, 이는 H α 파장부근 [N II]의 방출선이 약간 섞여서 생긴 결과로 판단된다.

Continuum 영상으로 활동 은하 중심부분을 살펴보면, 중심이 구(원)대칭적이지 않고, E-W(동-서) 방향으로 길게 늘어져 있음을 알 수 있다. 특히 W(서)쪽 방향으로 jet같은 구조가 보이는데 이 방향으로 많은 가스의 흐름이 있다는 것을 암시한다. Schommer et al.(1988)의 6 cm 전파에서 지적인 제트유사 구조와는 방향이 다르다. 하지만 NW 방향으로도 미약하나마 물질의 흐름이 있음을 알 수 있는데, 전반적으로 6 cm 전파 contour map에서 보이는 NW 방향의 구조와 우리의 관측에서 보이는 W(서)방향의 구조가 연관성이 있어 보인다. 이러한 것을 볼 때, (1) 현재 제트가 존재하지만, 너무도 미약하여 측정이 어렵거나, (2) 과거에 존재하였던 제트가 가스와 충돌하여, 그 운동량과 에너지를 이미 가스로 전달하였을 가능성을 추정할 수 있다. 앞에서 지적인 비대칭적 NLR 방출선 지역의 형태가 제트가 NW나 N 방향으로 형성되었을 가능성을 시사해주고 있다. 또한 Fig. 5와 Fig. 6에서 (2, 0)과 (0.5, -1) 지점을 중심으로 장반경이 약 6" 정도의 ring(미약한 밝기로 7의 level로 표시됨)을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 H β 영상이다. Fig. 5의 MR1의 continuum 영상에서의 중심과, H β 가 강한 지점은 일치하지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 7에서도 Fig. 5과 Fig. 6

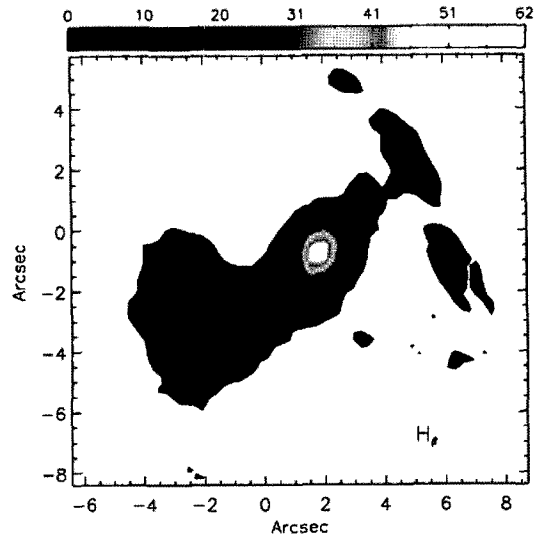


Fig. 7. H β image (MR1).

에서 보이는 타원 ring형태가 보인다. 이 ring의 중심에 H β 의 중심이 일치하는 것은 주목해야할 특이점으로 생각된다. continuum이 가장 강한 부분은 BLR 지역 또는 초거대 블랙홀이 있을 것으로 추정되는 지점을 알려주고 또한 활동은하핵의 중심점이라고 할 수 있다. 다른 선행 연구자들의 연구에서도 10" 직경의 ring의 존재를 확인하여 왔지만, 모두 ring의 중심이 continuum의 중심 또는 활동은하의 중심과 일치할 것으로 생각하여 왔다. ring의 기작으로 이 은하가 막대(bar) 나선은하이므로 bar의 중력적 섭동이 공명을 만들어, 소위 ILR(inner Lindblad resonance)에 의해 ring이 형성되고, ring에서 폭발적 별의 탄생이 있을 것으로 추정해왔다(Emsellem, 2001). 우리가 수소 재결합선들로 구성된 ring 영상의 중심이 활동은하 중심이 아닌, NW 방향으로 약 2" 어긋나 있어, ring을 중심으로 구조의 존재를 확인하거나 ring의 발생에 대한 다른 발생 기작을 필요로 하고 있다.

Fig. 8은 우리의 H α 영상과 Schommer et al. (1988)의 6 cm VLA contour 전파영상을 겹친 것이다. H α 와 H β 의 방출선은 동일한 지역에서 나오며, Fig. 7과 Fig. 8에서 H β 와 H α 방출선이 최대치를 보이고 있는 지점의 위치는 각기 (1.9, -0.3)와 (0.5, -0.8)이다. 그 지점의 실지 (적경, 적위)는 $(14^h 39^m 36.8^s, \delta = -17^\circ 02' 26''.5: 1950)$ 이다. H β 에서 지적인 NW 방향의 가스의 흐름이 VLA map에서도 보이고 있고, 많은 선행 연구자들에 의해 bicone으로 해석되어온

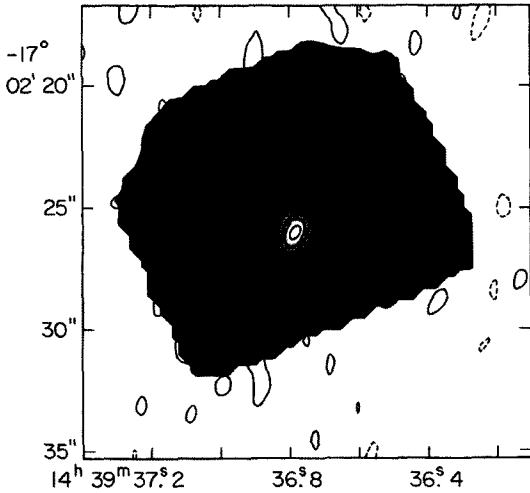


Fig. 8. VLA 6 cm + our H α image (MR1).

NW 방향의 구조는 사실 ring과 NW 방향의 가스의 흐름(outflows 또는 inflows)이 복합된 것임을 알 수 있다. 은하핵의 6 cm VLA contour가 우리의 H α 나 H β 영상과 정확히 일치하고 있다. 방출선인 H α 나 H β 가스의 중심이 continuum의 중심과 일치하지 않는 것은 어떠한 이유일까? 아마도 중심부분의 먼지의 유무일 가능성도 있다. 자세한 것은 H α , H β flux의 비를 비교하여 성간소광 값, A_v 를 얻는 작업을 통해 확인 가능하지만, 이 연구의 범위를 넘어선 어려운 작업이다. 여기서 제시한 Fig. 7과 Fig. 8의 H β , H α 영상은 이 선의 중심과장 근처 약 $\Delta\lambda = 30\text{\AA}$ 인, 즉 $\Delta v \sim 1500 \text{ km/s}$ 로 움직이는 HII(수소재결합선)가스들을 나타내는 것이다.

[O III] 영상

[O III]는 일반적으로 중간정도 들뜬($T \sim 10,000\text{K}$) 가스의 분포를 나타낸다. 앞에서 언급한 것처럼 Pogge(1989) 및 Wilson et al.(1993) 등이 확인한 크기가 약 $10''$ 이며, 극축방향이 $PA = 130^\circ$ 로 배열된 bicone 구조의 [O III] 영상을 얻었다. 우리는 분광선에서 [O III]5007 영상을 추출하여 Fig. 9에 제시하였다. 전반적으로 보면 NW-SE로 bicone의 구조가 드러나지만, 자세히 살펴보면 3.1절에서 언급하였듯이 (1) 잘 정의된 NW knot, (2) 좀 더 확장되어 있는 SE knot, (3) 핵(nucleus)의 세 부분이 명확히 보인다. 이 은하는 우리로부터 2788 km/s로 후퇴하는데, 이 은하의 운동좌표계, 즉 이 은하의 고유좌표계

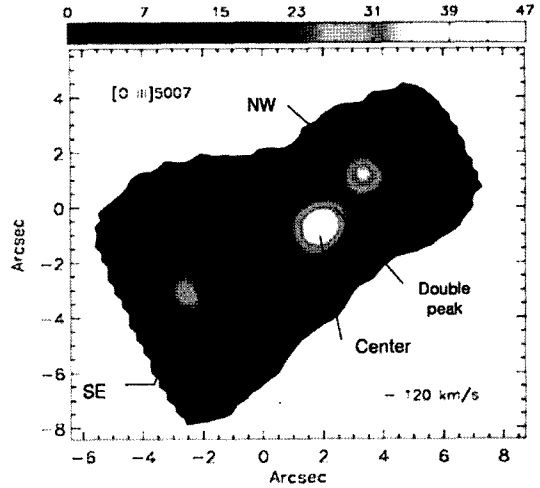


Fig. 9. [O III]5007 image within $\lambda = 5039\text{-}5076\text{\AA}$ ($V = -840 \rightarrow +1260 \text{ km/s}$).

(proper frame)의 속도를 0 km/s이라 하고, 세 지점의 운동학적 특성을 비교해보았다. 앞의 Fig. 7과 Fig. 8은 파장범위가 30\AA 인 $\Delta v \sim 1500 \text{ km/s}$ 의 가스의 분포를 나타내지만, Fig. 9의 [O III] 영상은 -120 km/s 속도로 접근해오는 가스(파장범위가 2\AA , $\Delta v = 46 \text{ km/s}$)만의 영상이다. [O III]선을 사용하여 세 지점의 운동학적 특성을 보면, (1) NW knot은 -253 km/s , (2) SE knot은 -25 km/s , (3) 중심핵은 $+253 \text{ km/s}$ 의 값을 가지고 있는데, SE knot과 중심핵이 서로 상반된 운동을 하고 있는 것을 알 수 있다. 즉 중심핵이 0 km/s가 아닌 약 250 km/s 의 속도를 가지고 있다. 이들 다른 선행연구에서, (sky-plane으로 은하를 양분할 때) 우리에게 가까이 있는 가스가 핵(nucleus)으로 유입되고 있다고 해석해 왔다. 이러한 현상은 sky plane 상에 많은 양의 먼지가 존재하여, sky-plane상의 먼 쪽에서 핵으로 유입되는 가스를 가릴 때, 먼 곳에서 유입되는 가스($\Delta\lambda = -$ 또는 blue shift)는 보이지 않는 반면, 가까운 곳에서 중심으로 흘러들어가는 가스(inflows, $\Delta\lambda = +$ 또는 red shift)는 관측되는 것이 근거한다. SE knot은 접선방향으로 즉 하늘의 평면 쪽으로 가스가 흐르는 것처럼 보인다. 만일 SE knot이 핵(nucleus)을 기준으로 NW와 상반된 운동학적 특성이 있다면 bicone이 맞지만, 운동학적인 대칭성이 없는 것을 볼 때 이러한 해석은 무리가 따른다.

$PA = 123^\circ$ 를 따라(NW와 핵을 연결하는 선상) 중심에서 약 $1''.4$ 떨어진 곳에 [O III]5007 line profile(선 윤곽)이 double peak를 보이는 지역이 존재한다.

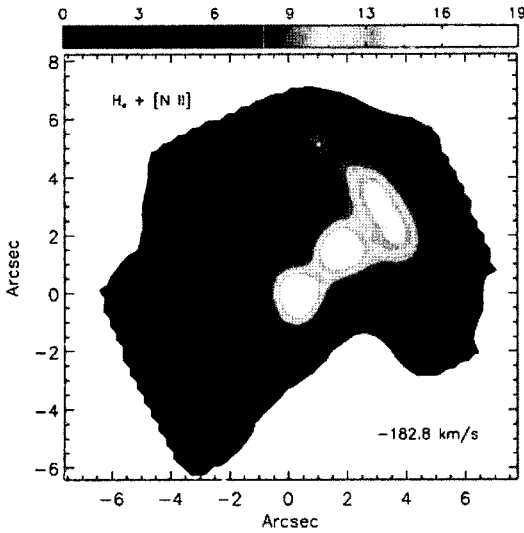


Fig. 10. [N II] (+H α) image at $\lambda = 6620\text{-}6622\text{\AA}$ (approaching gas with $V = -183\text{ km/s}$; $\Delta V = 46\text{ km/s}$).

double peak의 속도는 각기 -286.8 km/s , $+237.2\text{ km/s}$ 로 $\Delta V \approx 524\text{ km/s}$ 의 시선속도차이를 보인다. continuum에서 보이는 ring의 구조가 [O III]에서는 잘 보이지 않는다.

NW knot과 중심핵이 약 250 km/s 의 대칭되는 속도로 멀어지고 가까워지는 것이 우연일까? 아니면, 이 두 존재가 서로 중력적으로 속박된 구성체인 double core(쌍핵)이기 때문일까? 후자일 가능성을 조심스럽게 제기해본다. 또한 중심핵에서 NW 방향으로 $1''.4$ ($\sim 276\text{ pc}$)인 지점에 속도의 double peak(DP) 지점이 존재하는데, 이 DP 선에서 보이는 속도도 비슷한 대칭 값을 보인다. 이러한 속도장과 대칭성을 볼 때, 즉 core-DP의 멀어지는 성분과 DP-NW knot의 다가오는 성분은 DP 지점을 운동학적 중심(kinematical center)으로 한 중력적인 회전운동 가능성을 말한다. 자세한 운동학적 특성은 좀 더 많은 분광선들을 세밀히 분석해 봐야 확실한 알 수 있겠지만, 중심의 핵과 NW knot은, 은하가 충돌하면서 병합과정을 거치고 있는 두 초거대 블랙홀 즉 double core의 가능성으로 해석된다. 즉 ring은 inner bar의 중력적 섭동에 의해 생성된 것이 아니라, 두 은하의 충돌과정에서 생성되었을 가능성이 보인다.

[N II] 영상

온도가 낮은 가스들의 분포를 보기 위해서 [N II]

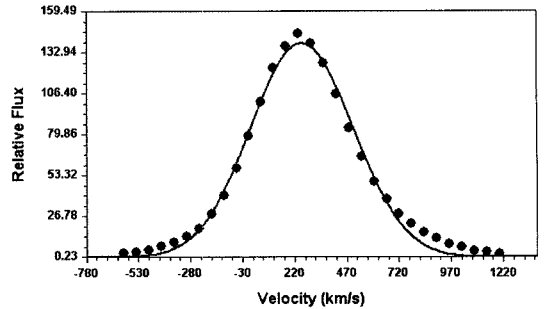


Fig. 11. [O III] line velocity profile at the Nucleus. $V = +253\text{ km/s}$, $\text{FWHM} = 579\text{ km/s}$ (relative to the galactic proper frame).

같은 낮은 온도에서 강하게 드러난 영상을 보면 알 수 있다. 앞의 [O III]와 같이, 파장을 2\AA 로 좁혀, 협역대의 [N II]가스의 분포를 Fig. 10에 제시하였다. 그런데 H α 선윤펍의 폭이 넓어, H α 방출선의 영향이 있을 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 10은 H α 가 일부 섞인 [N II]의 영상이다. [N II]의 영상에서는 앞에서 언급한, continuum, HI 영상에서 보인 ring의 구조가 더욱 분명해지며, 그 중심은 NW knot이다. 따라서 NW knot은 은하의 핵이며, ring은 중심의 핵의 중력섭동을 받아 형성된 ring으로 해석될 수 있다. Fig. 10에서 보듯이 ring과 그 중심의 NW knot은 약 200 km/s 의 속도로 우리에게 접근해오고 있는 가스이다. 단, 여기서 제시하는 속도는 은하자체의 후퇴속도를 보정한 은하 좌표(galactic proper frame)에서의 속도이다. Fig. 10의 (0, 0) 근처의 중심핵 가스로부터 나오는 [O III]의 선윤펍(line profile)을 Fig. 11에 제시하였다. 각각의 속도성분에서 나오는 [O III] 선의 세기를 점선으로 나타내었고, 이 점들을 Gaussian fitting 한 결과를 실선으로 나타내었다. 활동은하 중심부분의 가스는 3.2절에서 언급한 것처럼 $+253\text{ km/s}$ 의 속도로 우리로부터 멀어지고 있지만, 이지역의 가스의 운동학적 분포가 대단히 넓어, 즉 이선의 FWHM (Full Width at Half Maximum) $\sim 600\text{ km/s}$ 로 우리에게 다가 오는 가스도 많이 있음을 알 수 있다. 따라서 Fig. 10에서 -183 km/s 의 속도로 다가오는 가스의 분포를 추출할 때, 중심핵도 이러한 속도로 다가 오는 가스가 있음이 선명히 나타난다. 하지만 중심핵은 전반적으로 약 250 km/s 로 멀어진다고 정의될 수 있다. 또한 ring의 타원 모습이 완전하게 닫히지 않아, SE 부분이 없는 불완전한 모습이다. 이러한 이

유에 대한 가능한 설명은 (1) SE 부분의 ring이 다른 속도로 우리에게 다가 오거나 (2) 이 부분의 ring이 먼지에 의해 가려졌기 때문이라고 할 수 있다. Evans et al.(1999)이 H α /H β 비율 등 발머 선들에서 구한 이 은하핵의 성간소광은 $A_v \sim 2$ 정도인데, 비교적 많은 가스가 존재하고 있음을 추측하게 한다.

결론

Seyfert 은하인 NGC 5728은 가까이 있는 활동은하로서 분광선을 통해서만 아니라, 영상을 통해서도 중심에서 일어나는 현상을 비교적 자세히 연구할 수 있는 활동은하이다. 우리는 continuum, HI lines, [O III], [N II]의 영상을 통해 NGC 5728의 운동학적 특성과 구조를 살펴보았다. OASIS자료 중 continuum을 통해, 중심부분의 NLR이 구(원)대칭적이지 않고, E-W(동-서) 방향으로 길게 늘어서 있음을 확인하였다. 특히 W(서)쪽 방향으로 제트의 흔적 같은 구조가 보이는데 이 방향으로 많은 가스의 흐름이 있을 가능성, 즉 활동성이 일어나는 방향을 확인하였다. 은하핵의 6 cm VLA contour가 우리의 H α 나 H β 영상과 정확히 일치하고 있다. 방출선인 H α 나 H β 가스의 중심이 continuum의 중심과 일치하지 않는 것, 그리고 [O III]영상에서 보이는 핵과 일치하지 않는 것도 발견하였다. 또한 [N II]의 영상에서 NW knot과 ring이 우리에게 다가오는 것을 확인하였다. 선행 연구자들에 의해 bicone으로 해석되어온 SE-center (nucleus)-NW방향의 축대칭 구조로 해석되어 온 것은 NW knot을 중심으로 하는 ring과 NW knot의 한 구조와 중심핵 (central nucleus)로 구분되는 복합된 가스의 흐름(outflows 또는 inflows)으로 해석됨이 옳은 것으로 판단된다. 중심부 핵(nucleus)은 host galaxy와 같은 속도로 후퇴하는 것이 아니라 약 +246 km/s의 속도로 적색편이 되어 움직인다. 또한 중심에서 NW방향으로 2".6 떨어진 NW knot은 청색편이(-253 km/s)되어 있다. 그간 많은 연구자들은 직경이 10"인 ring을 가정하여 이 ring이 ILR의 영향으로 생성된 구조라고 해석하여 왔는데, 이러한 가정이 재고되어야 함을 발견하였고, 우리는 NW knot이 중심핵에 존재하는 핵에 이은 또 다른 초거대 블랙홀일 가능성을 조심스럽게 제안해 본다. 이러한 제안이 옳다면, NW knot과 이를 감싸고 있는 장반경 10"인 ring은 은하 충돌의 결과 생성되는 전형적인 ring일 가능성

이 많다. 이에 대한 결론은 분광선으로부터 얻은 운동학적 특성을 자세히 분석해야 내릴 수 있을 것으로 판단된다.

NGC 5728은 전형적인 Seyfert 2 은하로 알려져 왔다. 하지만 Pecontal et al.(1990)은 OASIS의 진단계 3D 분광기인 TIGER로 관측한 스펙트럼 분석을 통해서 BLR이 존재함을 확인하였다. 우리는 대형 지상망원경이나 HST 영상에서 발견하지 못한 몇 가지 특성을 찾아 낼 수 있었다. OASIS와 비슷한 3D 분광기가 VLT에서 사용되기 시작되고 있는데 광역대 필터(broad band filter; U, B, V)를 사용하여 얻은 자료나, 앞에서 언급한 협역대 필터(narrow band filter)를 사용하여 얻은 영상보다, 우리의 경우에서 보듯이 3D 분광선에서 직접 추출한 영상이 훨씬 더 정확한 운동학적 정보나 물리적 특성을 제공해 줌을 확인할 수 있었다. 우리는 다음 연구에서 분광선을 좀 더 세밀히 분석하여 BLR의 특성이 NW knot에도 존재하는지 확인하려한다. 이 존재가 확인되면, NW knot이 또 다른 초거대 블랙홀일 가능성을 확인해주는 셈이 되며, ring의 생성 기작에 대한 설명에 보다 직접적인 설명이 가능할 것으로 기대해본다.

감사의 글

본 연구는 2006학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었다. NGC 5728의 CFHT/OASIS 관측이 진행되도록 협조해주신 한국천문연구원 연구원들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- Benedict, G.F., 1980, UBV photometry of the center of N4314. *Astronomical Journal*, 85, 513-520.
- Bicknell, G.V., Dopita, M.A., Tsvetanov, Z.I., and Sutherland, R.S., 1998, Are Seyfert Narrow-Line Regions Powered by Radio Jets? *Astrophysical Journal*, 495, 680-690.
- Burbidge, E.M. and Burbidge, G.R., 1960, Motions in Barred Spiral Galaxies: I. The Nuclei of NGC 1097 and NGC 1365. *Astrophysical Journal*, 132, 30-36.
- de Vaucouleurs, G, de Vaucouleurs, A., and Corwin, H.G., 1976, *Second Reference Catalogue of Bright Galaxies* University of Texas Press, Austin, USA, 1 p.
- Emsellem, E., Greusard, D., Combes, F., Friedli, D., Leon, S., Pecontal, E., and Wozniak, H., 2001, Dynamics of embedded bars and the connection with AGN. *Astron-*

- omy and Astrophysics, 368, 52-63.
- Evans, I., Koratkar, A., Allen, M., Dopita, M., and Tsvet-anov, Z., 1999, The Excitation mechanism of Emission-line regions in Seyfert Galaxies. *Astrophysical Journal*, 521, 531-546.
- Ferruit, P., 2002, Evidence of Jet-ambient gas interactions in the Emission-line region of Seyfert Galaxies. *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, 13, 183-190.
- Hawarden, T.G., van Woerden, H., Mebold, U., Goss, W. M., and Peterson, B.A., 1979, An optical and HI study of the interacting galaxies NGC 1512 and 1510. *Astronomy and Astrophysics*, 76, 230-239.
- Pecontal, E., Adam, G., Bacon, R., Courtes, G., Georgelin, Y., and Monnet, G., 1990, Observation of the central region of NGC 5728 with the integral field spectrograph TIGER. *Astronomy and Astrophysics*, 232, 331-336.
- Pogge, R.W., 1989, The Circumnuclear environment of nearby, noninteracting Seyfert Galaxies. *Astrophysical Journal*, 345, 730-751.
- Rubin, V.C., Ford, W.K.Jr., and Peterson, C.J., 1975, Evidence for contraction in the nuclear ring of the barred spiral galaxy NGC 3351. *Astrophysical Journal*, 199, 39-48.
- Schommer, R.A., Caldwell, N., Wilson, A.S., Baldwin, J.A., Phillips, M.M., Williams, T.B., and Turtle, A.J., 1988, Ionized gas and Radio emission in the Barred Seyfert Galaxy NGC 5728. *Astrophysical Journal*, 324, 154-171.
- Wilson, A.S., Braatz, J.A., Heckman, T.M., Krolik, J.H., and Miley, G.K., 1993, The ionization cones in the Seyfert Galaxy NGC 5728. *Astrophysical Journal Letters*, 419, 61-64.

2006년 9월 8일 접수
2006년 9월 28일 수정원고 접수
2006년 9월 28일 채택