Jour. Korean Earth Science Society, v. 32, no. 4, p. 402–410, August 2011
http://dx.doi.org/10.5467/JKESS.2011.32.4.402

적외선원 IRAS 07280-1829와 이와 관련된 분자운의 CO분자선 관측연구

이 창 원*

한국천문연구원, 305-348, 대전광역시 유성구 대덕대로 776

CO Observations Toward IRAS 07280-1829 and Its Related Clouds

Chang Won Lee*

Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 305-348, Korea

Abstract: We present results of CO observations toward an infrared (IR) source, IRAS 07280-1829, and its possibly related molecular clouds. The physical parameters of this IR source such as its infrared slope (α=16) of the Spectral Energy Distribution and bolometric temperature (145 K) indicate that it is an embedded protostar. Its luminosity is ~$2.9\times10^4 L_\odot$, typical of a massive star. The CO profile toward IRAS 07280-1829 has broad wing components, implying a possible existence of CO outflow. The excitation temperature and mass of a molecular cloud (Cloud A) which is thought to harbor the IR source are estimated to be 9~22 K and ~180 $M_\odot$, respectively, indicating the Cloud A is a typical infrared-dark cloud. Its LTE mass is found to be much smaller than its virial mass by more than a factor of 10 which is inconsistent with the fact that a protostar recently formed exists in the Cloud A. This may suggest that the environment of the cloud where the IR source is forming is dominant of turbulence and/or magnetic filed, making its virial mass estimated unusually high.

Keywords: stars, formation-stars, individual (IRAS 07280-1829)-molecular data-ISM, clouds-ISM, kinematics and dynamics-ISM, jets and outflow

요 약: 본 논문에서는 IRAS 07280-1829 적외선원과 이를 둘러싸고 있는 분자운에 대해 수행된 ^{12}CO와 ^{13}CO 1-0 분자선 관측결과와 기존의 적외선 자료를 이용하여 이 적외선원의 생성환경에 관해 연구하였다. 관측자료로부터 얻어진 적외선원의 파장별 에너지분포의 기울기(α=1.16)와 복사온도(145 K), 그리고 광도(~$2.9\times10^4 L_\odot$)는 이 적외선 천체가 CLASS I형의 중량급원시성임을 의미한다. 이 적외선원방향에서 관측된 두 CO 분자선에서 보이는 넓은 속도 성분은 분자분출류의 존재를 암시한다. 적외선원을 감싸고 있으리라 짐작되는 분자운A에서 측정된 여기온도는 9-22 K, 질량은 약 ~180 $M_\odot$인 것으로 보아 이 분자운이 전형적인 적외선 암흑분자운(Infrared-dark clouds)의 물리적 특성을 가짐을 보았다. 이 분자운의 질량은 비리알 질량보다 10배 이상 작은 값으로 계산되었는데 이것은 여기에 어린 원시성이 이미 생성되고 있다는 관측사실에 모순된다. 이는 아마도 분자운A가 교란운동(turbulence) 혹은 강한 자기장에 의해 지배되는 환경 가운데에 중량급원시성 IRAS 07280-1829을 생성하고 있음을 의미하는 것 일수도 있는 것으로 해석하였다.

주요어: 항성, 별의 생성-항성, 개개의 별(IRAS 07280-1829)-분자선 자료-성간물질, 분자운-성간물질, 운동학과 동력학-성간물질, 제트와 물질분출류

서 론

별은 어떻게 생성되는지에 대한 물음은 우리를 뛰는 가슴으로 이에 응답하도록 연구하게 만든다. 지금까지의 수많은 천문학자의 노력에 의해 적어도 가벼운(즉, 태양 정도나 혹은 이보다 가벼운 질량의)별의 경우 관측적 사실에 바탕을 둔 별의 생성과정 시나리오를 구축 할 수 있게 되었다. 분자운의 분열과정(fragmentation)을 겪으며 작은 분자운 핵 규모로 나누어지면서 각각의 분자운 핵에서는 가스 수축운동을 겪는 전원시성핵(pre-stellar core)이 형성되고, 이 곳에서 등온(isothermal) 중력 붕괴를 겪으면서 물질 강착(accretion) 과정에 의한 에너지가 주 에너지원인 원시성 Class 0의 단계를 지나며 이때 각운동량을 배

*Corresponding author: cwl@kasi.re.kr
Tel: +82-42-865-3276
Fax: +82-42-865-2020

출하는 통로인 가스원반 및 제트 혹은 분자분출류(molecular outflow)등의 구조들이 만들어진다. 이러한 과정을 통해 원시성은 자신을 둘러싸고 있는 모(母)분자운핵의 가스를 상당량 소모하게 되면서 원시성이 갖고 있던 원반의 두께와 크기는 작아지고, 분자 분출류의 세기와 크기 역시 작아지면서 최종적으로 주계열성으로 옮아가게 된다(예, Andre et al., 2000). 가벼운 별의 생성과정은 이렇듯 간략히 기술된 많은 부분들이 관측적인 사실을 바탕으로 이해되는 상황에 있다.

그렇지만 중량급별($\geq 8\,M_{\odot}$)의 생성과정의 경우는 상황이 다르다. 중량급별들의 진화과정이 경량급별들에 비해 수십배 혹은 그 이상으로 빠르기 때문에 물질의 강착과정이 끝나기 전에 이미 별 내부에 수소 연소과정을 겪게 된다. 이는 물질 강착에 의한 에너지와 원시성 자체의 에너지를 구분하기 어렵게 만든다. 또한 중량급 별들의 대부분은 단일별로 보다는 집단으로 생성되는 특성을 지니고 있다. 이 때문에 개개의 별들의 생성 과정을 기술하기가 어렵다. 더욱이, 연구할 수 있는 무거운 천체들은 대부분 멀리 있어 연구 가능한 실질적인 연구대상이 상당히 제한되어 있으며 또한 그나마 지극히 높은 공간분해능 관측을 요하는 어려움이 수반된다. 이런 이유로 인해 중량급별의 경우 그들의 생성과정을 이해하기는 아직도 매우 어려운 상황이다(Ward-Thompson and Whitworth 2011).

본 논문은 적외선 우주망원경(Infrared Astronomical Satellite: IRAS)의 전천 관측으로부터 발견된 IRAS 07280-1729라는 이름의 적외선원의 정체와 그 주변을 감싸고 있는 분자운의 특성을 살펴봄으로써 무거운별생성 과정의 이해에 대한 도움을 주고자 함에 그 목적을 두고 있다.

IRAS 07280-1729은 IRAS 적외선 목록에서 기재된 천체로서 광학과 근적외선(JHK) 및 원적외선에 이르기까지 잘 관측되는 아주 밝은 천체이지만 이에 대한 구체적인 연구가 거의 이루어져 있지 않다. 최근 Gyulbudahgian and May(2008)의 연구에서는 이 적외선원에 대한 언급을 하고는 있지만 이의 존재에 대한 확인과정이 모호하고 또한 구체적인 물리량이 제시되지 않아서 이 천체에 대한 실질적인 정보의 제공이 부족한 상황이다.

또한 이 적외선원 방향에 대한 분자운에 대한 연구 역시 아주 제한적이다. 현재까지 May et al.(1988)에 의해 30' 분해능의 CO관측과 최근 Gyulbudahgian and May(2008)에 의한 ^{12}CO 1-0 관측에 의한 연구가 적외선원의 주변분자운에 대한 연구의 전부이다. Gyulbudahgian and May(2008)의 논문에서는 이 분자운 지역을 BBW 36으로 명명하고, ^{12}CO관측자료로부터 적외선 방향의 분자운에 2개의 작은분자운과 분자분출류의 존재 가능성을 언급하고 있는 정도이다. May et al.(1988)은 그들의 CO관측에서 이 지역에 18.9 km s^{-1}와 42 km s^{-1}의 두 개의 분자운 성분이 존재함을 제시하였으며, Russeil et al.(1995)은 그들의 연구에서 다양한 연구자들의 HII 지역의 측광학 자료의 결과를 이용하여 이 두 분자운들이 각각 2.1 kpc과 4.2 kpc의 거리에 있음을 제시하였다. 본 논문에서도 발견되는 42 km s^{-1}와 비슷한 시선속도를 갖는 분자운의 거리는 그들의 결정치인 4.2 kpc인 것으로 가정한다.

본 논문에서는 기존에 잘 연구되지 않았던 적외선원 IRAS 07280-1729의 물리적 특성을 범위에 걸친 적외선 자료를 이용하여 연구하였고, 그리고 기존에 수행되지 않았던 이 적외선천체와 주변 분자운의 넓은 영역에 걸친 ^{12}CO와 ^{13}CO 1-0의 관측을 수행하여 적외선원과 관련된 분자운의 존재를 파악하였다. 또한 천체들의 물리량을 계산함으로써 이들 상호간의 관련성과, 나아가 적외선원의 생성 환경을 논의 하였다. 이러한 논의는 중량급 천체들의 별생성환경을 이해하는 중요한 자료가 될 것이다.

관측자료

CO 분자선관측

두 개의 CO분자선, ^{12}COJ=1-0와 ^{13}COJ=1-0관측은 한국의 대덕전파천문대의 14 m 전파망원경을 이용하여 수행되었다. 관측은 2010년 1월 5일부터 2월 2일 사이에 이루어 졌으며, 이 기간 중 망원경의 시스템 온도는 ^{12}CO관측의 경우 1100-1200 K, ^{13}CO관측의 경우 540-560 K의 값의 범위에 있었다. 배경하늘의 밝기를 제거하기 위해 망원경의 위치전환 방법(position switching mode)을 이용하였다. 이 방법에서는 관측도중 망원경을 일정한 시간 간격으로 관측대상 근처 CO의 방출선이 없는 영역을 관측하고 이를 관측 대상의 밝기에서 빼줌으로서 배경하늘을 제거한다. 사용된 분광기로는 ^{12}CO 관측의 경우 비교적 넓은 범위의 속도분포의 구조를 보기위해 25 MHz 대

Table 1. Flux densities of IRAS 07280-1829. Flux densities at 12, 25, 60, and 100 micron are from IRAS point source catalog and other flux densities at 8.61 and 18.39 μm are from AKARI point source catalog. Note that flux density at 100 μm is an upper limit

Wavelength (μm)	8.61	12	18.39	25	60	100
Flux density (Jy)	23.6±0.6	25.5±1.5	102.8±0.4	205.9±8.2	504.4±35.3	992.2

역폭을 가진 자기상관 분광기(autocorrelator)를 사용하였고, ^{12}CO보다 좁은 선폭을 보이는 ^{13}CO의 경우는 12 MHz 대역폭의 자기상관기를 부착하여 관측하였다. 각각의 자기상관기는 512 채널을 갖고 있기 때문에 이를 이용한 두 분자선의 관측이 주는 속도분해능은 ^{12}CO의 경우는 0.13 km s^{-1}, ^{13}CO의 경우는 0.06 km s^{-1}이다.

사용된 수신기는 오래전 미국 FCRAO 망원경에서 사용해 오던 초점면 다중수신기(일명 QUARRY)이다. 이는 망원경의 초점면에 15개의 수신기를 배치하여 한 번의 관측에 망원경 지향점의 방향으로 15지점을 동시에 관측하여 관측의 속도를 단일 수신기의 경우보다 15배 빠른 속도의 관측을 하기 위함이다. 최근 대덕전파천문대는 이 수신기를 14 m 망원경에 부착하여 사용할 수 있도록 설치를 완료하였다. 하지만 이번 관측에서는 세 개의 수신기에 문제가 생겨 12개의 수신기만 이용하여 관측하였다. 원래 각각의 수신기가 보는 하늘의 위치는 적위방향으로는 100초 간격, 적경 방향으로는 50초 간격으로 배치되어 있었지만, 설치과정 중 적경방향의 위치가 변동되어 적경방향으로 약 33초 와 66초 간격으로 배열되게 되었다. 따라서 광역관측을 수행할 경우 적위방향으로는 50초 간격의 균일한 관측을 할 수 있었지만 적경방향으로는 33초와 66초 간격의 불균일한 관측을 수행할 수밖에 없었다. 그렇지만 비록 관측 격자가 적경방향으로는 불균일하다 하더라도 관측망원경의 천구상의 분해능 크기가 약 50초 정도이므로 본 관측과 같은 분자운의 광역 분포를 논의하는 데에는 별달리 큰 문제를 야기하지 않는다고 볼 수 있다. 본 관측에서는 IRAS 07280-1829 주변의 약 8.8'×14.2'의 범위에 걸친 광역관측을 수행하였다.

관측 기간 중 망원경의 지향 정밀도는 약 10초 이내에서 유지되었다. 망원경의 주빔효율(main beam efficiency: η_B)은 다중빔의 중심 수신기에 대해 115 GHz에서는 35%이다. 다른 빔의 경우는 달효율이 5% 이내에서 서로 비슷한 것으로 보아 다른 수신기 사이의 차이는 미미한 것으로 추정된다(정재훈, 개인교신). 따라서 본 논문에서는 115 GHz의 주파수에서 망원경의 다중빔들의 주빔 효율은 35% 이내에서 동일한 것으로 가정하였다. 관측 시작에 앞서 표준성으로 DR21 천체[(적경, 적위)$_{2000J}$=($20^h39^m01^s$, 49°19'28")]를 이용하여 시스템을 점검하였는데 관측기간 내에 관측된 ^{12}CO의 밝기(적분강도)는 약 7% 이내에서 일치하였다.

IRAS 07280-1829의 적외선 자료

IRAS07280-1829[(적경, 적위)$_{2000J}$=($07^h30^m17^s$, –18°35'55")] 적외선원의 플럭스밀도의 자료는 IRAS 점광원 목록(IPAC 2011)과 AKRI 점광원 목록(Yamauchi et al., 2011)에서 얻었다. 이러한 목록에서 얻은 12-100 μm 대역에 걸친 이 천체의 플럭스 밀도는 Table 1에 주어져 있다.

자료분석 및 결과

IRAS 07280-1829

적외선원 IRAS 07280-1829는 가시파장, JHK 근적외선, 그리고 AKARI 및 IRAS의 중・원적외선 파장 대역에 걸쳐 밝게 보이는 특이한 천체이다. Fig. 1은 이 천체의 Digital Sky Survey(DSS)의 가시영역 적색 파장대역의 모습을 보여준다. 좌측 그림은 본 연구의 CO 분자선관측이 수행된 ~8.8'×14.2' 영역의 광학 영상이며, 우측 그림은 좌측그림에서 네모로 표시한 범위의 적외선원의 주변을 확대한 모습이다. 중심의 화살표는 적외선원의 위치를 나타낸다. 주위의 점광원처럼 보이는 항성과는 달리 희미한 성운이 이 천체의 주위를 감싸고 있는 모습은 이 천체가 진화되지 않은 젊은 천체임을 암시한다. 젊은 별의 진화정도를 암시하는 등급(Class)은 전통적으로 천체의 8.6-25 μm 범위에서의 분광에너지분포(Spectral Energy Distribution)의 기울기인 $\alpha=\frac{d\log\lambda F_\lambda}{\log\lambda}$ 의 값을 통해 결정될 수 있다(Lada and Wilking, 1984, 1987). 적외선원에 대한 α값은 1.16(±0.31)으로 이 천체는 아

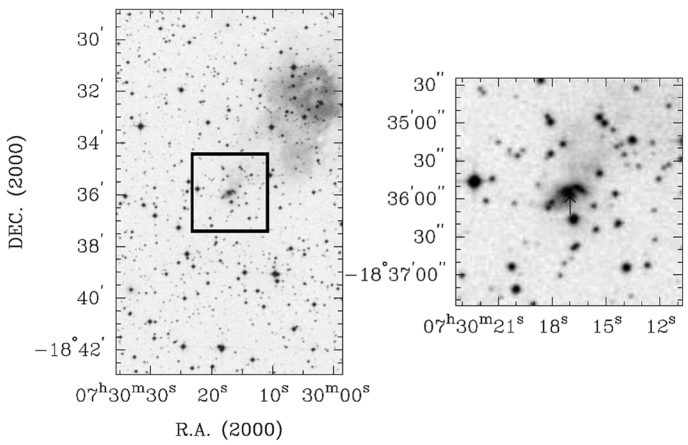

Fig. 1. Digital Sky Survey Red image toward IRAS 07280-1829. Left panel shows an entire area observed with CO lines whose center is the position of IRAS 07280-1829. Right panel is an enlarged image of 3'×3' box in the left panel. The point source with an arrow mark is IRAS 07280-1829.

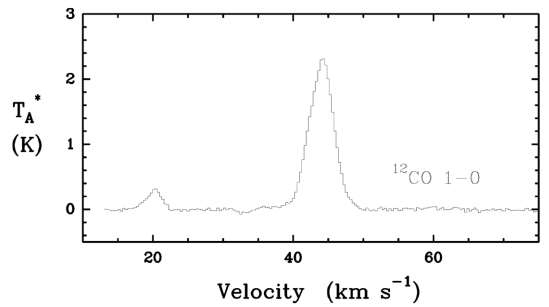

Fig. 2. Average ^{12}CO 1-0 spectrum. This is an averaged spectrum of whole CO spectra in observed area, indicating that there are two velocity components in clouds.

주 어린 원시성 단계인 Class I의 부류임을 알 수 있다. 이 천체의 복사온도(bolometric temperature*)는 145 K로서 이 또한 이 천체가 에너지분포의 기울기에서 유추된 진화등급Class I과 일치함을 보인다. 물론 100 μm 이하의 플럭스밀도 분포로서만 결정한 이 값은 이 보다 긴 장파장의 플럭스밀도 방출량을 고려하지 않은 값이기 때문에 이 적외선원의 가능한 온도의 상한치라고 할 수 있다. 이 천체의 복사광도는 $L=4\pi d^2 \int F_\nu d_\nu$으로 주어지는데, 천체의 거리 d를 4200 pc으로 채택할 때 ~$2.9\times10^4 L_\odot$으로 계산된다.

CO 분자운

분자선 스펙트럼: 분자선 스펙트럼은 분자운의 속도구조를 파악하기위한 가장 좋은 관측적 도구이다. 본 연구에서는 관측된 지역에 널리 분포된 분자운의 주요 속도성분을 보기 위해 관측영역 모든 지점에서의 ^{12}CO분자선의 평균 스펙트럼을 만들어 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림은 적외선원 주변의 분자운들이 19.6 km s^{-1}의 속도 성분과 44.7 km s^{-1} 속도성분의 두 개의 성분으로 구성되어 있음을 보여준다. 이는 이 지역에 대한 30' 공간 분해능의 관측 자료(May et al., 1988)를 이용하여 Sodrosky(1991)에 의해 밝혀진 18.9 km s^{-1}와 42 km s^{-1} 속도 성분과 비슷한데 당시의 스펙트럼 관측의 속도분해능이 1.3 km s^{-1}인 점을 고려할 때 그들이 발견한 두 개의 속도성분은 이번 관측에서 발견된 속도성분과 일치한다고 볼 수 있다. 이 두 개의 다른 속도를 갖는 성분은 각각 다른 공간상의 위치에 있는 것으로서 Russeil et al.(1995)의 연구에 의해 19.6 km s^{-1} 성분은 2100 pc의 거리에, 그리고 44.7 km s^{-1} 성분은 4200 pc에 각각 위치하는 것으로 제시 되었다.

Fig. 3은 두 개의 속도 성분에 대한 적분강도(integrated intensity) 분포를 나타낸 그림이다. 이는 두 개의 속도 성분 중 어떤 성분이 적외선원과 직접적

*천체의 복사온도는 관측된 연속파 에너지분포와 동일한 플럭스가중평균주파수 $\left(\bar{\nu}=\frac{\int \nu F\nu d\nu}{\int F\nu d\nu}\right)$를 갖는 흑체의 온도 ($T_{bol}$)로 정의되는데, $T_{bol}\simeq1.25\times10^{-11}\bar{\nu}$의 관계에서 구해진다(Myers and Ladd 1993).

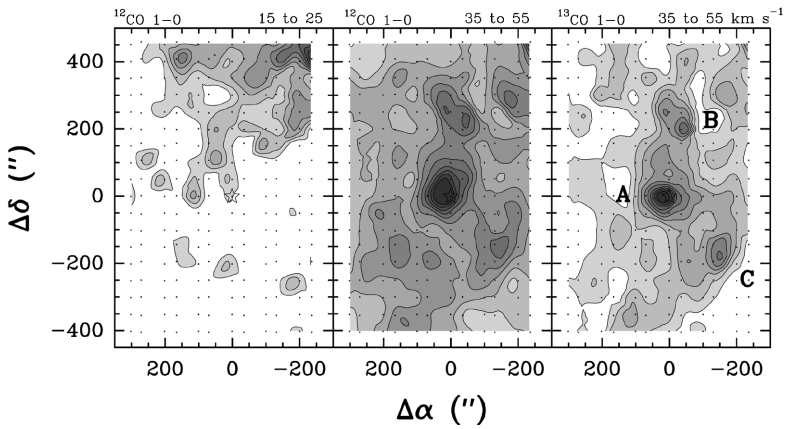

Fig. 3. Integrated intensity maps for ^{12}CO 1-0 and ^{13}CO 1-0 toward IRAS 07280-1829 . Left and middle panels indicate CO distributions in the velocity range of 15-25 and 35-55 km s^{-1} and right panel shows ^{13}CO distribution in the velocity range of 35-55 km s^{-1}. Contour levels for left and right panels are given from 0.85 to 8.5 by 0.85 K km s^{-1} in each level while contour level for the middle panel is given from 1 to 30 by 3 K km s^{-1} in each level. IRAS 07280-1829 is located at the position of (0", 0"), marked with a pentagram.

인 관련이 있는 지 파악하는 데에 유용하다. Fig. 3의 제일 왼쪽과 중간의 그림은 CO 1-0 분자선의 19.6 km s^{-1} 속도성분과 44.7 km s^{-1} 속도 성분의 분포를, 오른쪽 그림은 ^{13}CO 1-0 분자선의 44.7 km s^{-1} 속도 분자운의 분포를 보여준다. 이 그림들은 별표로 표시된 적외선원의 위치와 분자운의 가장 밝은 위치와 잘 일치하는 속도성분이 44.7 km s^{-1} 분자운임을 잘 보여준다. 막 태어난 Class I형의 어린 원시성 단계에 있는 천체는 일반적으로 모분자운을 가진다. 이러한 별생성의 기본적 원리에 따른다면 44.7 km s^{-1} 분자운 성분은 적외선원의 모분자운일 것으로 판단된다.

Fig. 4는 관측된 CO분자선중 중심지역 적외선원방향으로 관측된 44.7 km s^{-1} 분자운 성분에 대한 ^{12}CO와 ^{13}CO 분자선 스펙트럼을 자세히 보여주고 있다. 이 그림에서 나타난 적외선원 방향으로 관측된 CO 스펙트럼의 가장 큰 특징은 가스의 무작위 운동(random motion)으로부터 유추되는 가우시언 형태의 스펙트럼에서 어긋난 성분이 나타난다는 것이다. ^{12}CO 분자선을 가우시안 맞춤 한 결과는 점선으로 표시하였는데, 관측된 분자선의 양측 날개 부분에서 가우시안 윤곽과 상당히 벗어나 있는 성분이 존재함을 알 수 있다. 더욱 흥미로운 것은 ^{12}CO 분자선 보다 더욱 광학적 투과깊이가 깊은 ^{13}CO 분자선에서도 약 40-43 km s^{-1} 범위에 걸쳐 이러한 가우시안 윤곽에서 벗어난 성분이 보인다는 것이다. Gyulbudahgian and May(2008)은 이를 두 개의 다른 속도성분과 분자분출류의 존재로부터 비롯되는 것으로 해석하고 있지만, 적어도 두 개의 속도성분 존재에 대한 구체적인 증거가 모호해 그들의 해석을 당장 받아들이기는 어렵다. 다만 적외선원이 아주 어린 원시성의 부류에 속하기 때문에 이들에게서 분자분출류의 존재의 추정은 보다 자연스러울 것이다. 따라서 시선방향으로 두 개의 서로 다른 속도구조가 존재할 가능성 보다는 기둥밀도(column density)가 큰 규모의 분자분출류의 존재 가능성이 더 높다는 추정을 한다. 보다 감도 높은 ^{12}CO 분자선 관측을 통해 분자선분출류의 존재를 보다 명확히 파악하는 것과 높은 감도의 C^{18}O관측을 통해 고밀도 기둥밀도를 갖는 다른 속도 성분의 존재 가능성을 규명하는 것은 차후 이루어질 수 있는 연구주제가 될 수 있다고 생각한다*.

분자운 분포의 특성: IRAS 07280-1829 주변의 CO 분자운의 분포를 나타내는 CO의 적분강도(integrated intensity) 분포는 Fig. 3에서 잘 보인다. Fig. 3의 가장 왼쪽의 그림은 19.6 km s^{-1}의 속도 성분에 대한 그림으로 44.7 km s^{-1} 분자운(즉 적외선원)의 전방에서

*본 연구의 스펙트럼은 분자분출류의 존재를 확증하기에 충분한 S/N을 갖지 못하였다. 그러나 최근 서울대학교전파천문대(SRAO) 6 m 망원경으로 관측한 초고감도(S/N≈260) ^{12}CO2-1 분자선에서는 35-40 km s^{-1}의 범위의 청색날개성분과 47-53 km s^{-1} 범위의 적색날개성분이 뚜렷하게 검출되어 분자분출류 성분을 확인하였다(이창원 외, 준비중).

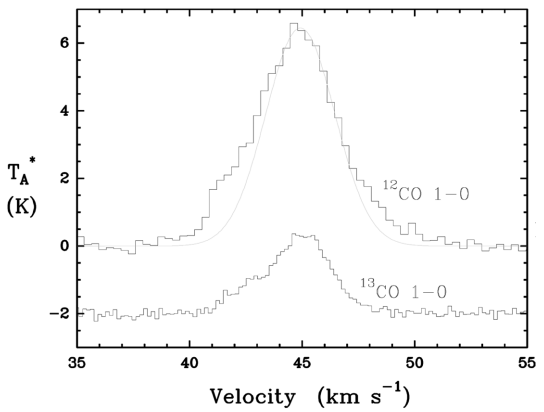

Fig. 4. CO spectra toward IRAS 07280-1829. Dotted line shows a Gaussian fit for the CO 1-0 line after masking wing parts of CO spectrum.

관측자에게 보다 가까운 분자운의 분포를 나타낸다. 중간(^{12}CO)과 우측(^{13}CO)의 그림에서는 44.7 km s^{-1} 분자운 분포가 잘 묘사되어 있는데 무엇보다도 특징적으로 보이는 것은 크게 3개의 분자운들이 보인다는 것이다. 이러한 분자운들의 분포는 Fig. 3의 가장 오른쪽의 ^{13}CO의 적분강도 그림에서 가장 선명하게 나타난다. 본 논문에서는 중심의 가장 밝은 분자운을 분자운A, 이 분자운의 북쪽에 위치한 작은 분자운을 분자운B, 그리고 남서쪽에 위치한 분자운을 분자운C로 칭한다. 여기서 주목할 사항은 적외선원의 위치와 가장 밝은 분자운A의 위치가 상호 시선방향으로 잘 일치한다는 것이다. 통상적으로 원시성은 분자운 핵에서 생성되기 때문에 이를 둘러싸고 있는 모분자운과 같이 존재한다. 이러한 관점에서 이 적외선원의 생성과 관련된 분자운은 44.7 km s^{-1} 속도성분의 분자운A라고 추정할 수 있다. 공간분해능이 보다 좋은 전파간섭계망원경으로 이 천체에서 나오는 분자분출류의 속도 성분을 측정할 수 있다면 분자운A와의 직접적인 상관성을 확증할 수 있겠지만 이는 본 연구의 영역을 벗어나는 것으로 차후의 연구 주제로 남겨둔다.

논의 및 제언: 분자운의 중력 안정성과 별생성환경

IRAS 07280-1829의 광도는 ~2.9×10^4$L_\odot$으로서 이 천체는 중량급 원시별로 여겨진다. 따라서 이 적외선 천체를 둘러싸고 있는 CO 분자운의 질량을 측정하고 이의 중력 안정성을 점검하는 것은 이 무거운 천체의 생성 환경을 이해하는 측면에서 중요하다. 이 장에서는 관측된 CO 분자운의 질량과 분자운의 비리얼 질량의 계산 과정을 소개하고 이들 값의 비교로부터 관측된 적외선원의 존재와 관련 분자운의 별생성환경을 어떻게 이해할 수 있는지에 대한 논의를 한다.

CO 분자운A의 LTE(Local Thermal Equilibrium) 질량계산

분자운의 질량을 계산하는 한 가지 방법은 광학적 투과도가 깊은 분자선을 이용하여 관측한 분자의 기둥밀도를 구하고, 관측분자와 수소분자와 함량비를 이용하여 수소분자의 기둥밀도를 계산한 뒤, 관측 영역에 걸쳐 기둥밀도를 더하는 것이다. 본 연구에서는 이 방법에 적합한 분자선으로 ^{13}CO 1-0을 선택하였다. 관측된 분자선 ^{13}CO의 기둥밀도는 ^{13}CO 1-0 천이선의 광학적 깊이가 1보다 상당히 작을 것이라는 가정과, 이 분자의 모든 에너지준위에 분포하는 준위종족(level population)의 분포가 하나의 온도 T로 기술될 수 있다는 가정 즉 국부열적평형 가정(Local Thermal Equilibrium: LTE)을 이용함으로써 아래와 같이 주어진다(Rohlfs and Wilson, 2000).

$$N(^{13}CO) = 2.6\times10^{14}\frac{T\int\tau_{13}(v)dv}{1-\exp(-T_0^{13}/T)} \quad (1)$$

여기서 $T_o^{13}=h\nu_{13}/k\simeq5.29$ K인데, 이 값은 플랑크 상수 h, ^{13}CO 1-0 분자선의 주파수 ν_{13}, 볼츠만 상수 k를 넣어 얻은 값이다. 온도 T는 여기온도 T_{ex}와 같은 것으로 가정하였고 아래의 설명처럼 ^{12}CO관측으로부터 얻어진다. 또한 여기에 $\tau_{13}(v)$은 ^{13}CO 1-0 분자선의 광학적 깊이(optical depth)를 의미하는데 이는 우주배경온도 T_{bg}=2.7 K의 배경복사속에 존재하는 분자운에서 ^{13}CO 1-0 천이선의 복사전달 과정을 기술하는 복사전달 식으로부터 아래와 같이 주어진다.

$$\tau_{13}(v)= -\ln\left[1-\frac{T_{mb}^{13}(v)}{T_o^{13}}\left(\frac{1}{\exp\left(\frac{T_o^{13}}{T_{ex}}\right)-1}-\frac{1}{\exp\left(\frac{T_o^{13}}{T_{bg}}\right)-1}\right)^{-1}\right] \quad (2)$$

여기서 $T_{mb}^{13}(v)$는 ^{13}CO 1-0 분자선에서 임의 속도 v 갖는 성분의 주빔온도(main beam temperature)로,

관측된 ^{13}CO 1-0의 아테나 온도 T_A^{*13}(v) 를 망원경의 주빔효율 η_B(=0.35)로 나뉜 값이다. T_{ex}는 여기온도이다. 본 연구에서는 ^{13}CO의 여기온도가 ^{12}CO의 여기온도와 같을 것이라는 가정 하에 ^{12}CO의 관측으로부터 여기온도를 구한다. T_{ex}는 ^{12}CO 1-0 천이선이 복사전달식에서 광학적 깊이가 충분히 크다면 아래와 같이 주어진다.

$$T_{ex}=\frac{T_o^{12}}{\ln\left(\frac{T_o^{12}}{T_{mb}^{12}+T_o^{12}A}+1\right)} \quad (3)$$

여기서 $T_o^{12}=h\nu_{12}/k\simeq5.53$ K(ν_{12}는 ^{12}CO 1-0 천이선의 주파수), $A=\frac{1}{\exp\left(\frac{T_o^{12}}{T_{bg}}\right)-1}\simeq0.152$, 그리고 T_{mb}^{12} 는 ^{12}CO 1-0의 주빔온도로서 관측된 ^{12}CO 1-0의 안테나 온도 (T_A^{*12})에 망원경의 주빔효율 η_B(=0.35)로 나눈 값이다. 본 연구에서 각 관측지점에서의 안테나 온도는 속도에 따른 스펙트럼중 가장 밝은 성분의 값으로 선택하였다.

관측된 각 지점에서 ^{12}CO 분자선 자료로부터 얻어진 T_{ex}값의 범위는 9-22 K 정도였고, 적외선원의 방향에서 최대의 여기온도(22 K)를 보여줬다. 구한 T_{ex}값을 식 (2)에 넣으면 ^{13}CO 분자선 스펙트럼의 35-55 km s^{-1}범위에 걸쳐 τ_{13}(v)를 속도에 따라 구할 수 있다. 이렇게 구한 τ_{13}(v) 대부분은 0.1 이하였다. 따라서 광학적깊이가 충분히 작은 경우에만 유효한 식 (1)을 이용하여 ^{13}CO의 기둥밀도를 구하는 방법은 타당함을 알 수 있다. 이렇게 해서 구한 τ_{13}(v)값들을 식 (1)에서 주어진 대로 ^{13}CO 분자선의 속도범위에 걸쳐 속도에 대해 적분함으로써 ^{13}CO의 기둥밀도 N(^{13}CO)를 구하게 된다.

한편, N(^{13}CO)는 N(H_2)<5×10^{21} cm^{-2}인 경우 H_2의 기둥밀도 N(H_2)와 아래와 같이 관련되는 것으로 알려져 있다 (Rohlfs and Wilson, 2000).

$$N(H_2)=4.6\times10^5N(^{13}CO) \quad (4)$$

본 연구에서는 이 관계를 이용하여 수소분자의 기둥밀도를 구하였다. 구해진 분자운A 영역에 걸친 기둥밀도는 0.3-3.2×10^{21} cm^{-2}범위에 있었다. 최대의 기둥밀도 3.2×10^{21} cm^{-2}는 적외선원이 존재하는 방향에서 구해졌다.

분자운의 질량(M_{cl})은 기본적으로 기둥밀도의 합, $M_{cl}=\sum_{i=1}^{n}N_i(H_2)ds$ (여기서 ds는 관측격자의 선형면적)으로부터 구해질 수 있다.

이러한 방식으로 분자운의 질량 계산을 위해 적경방향으로는 33초, 적위방향으로는 50초의 균일한 간격으로 이루어진 균일한 기둥밀도의 격자를 구성하였다. 적경방향으로 33초 간격에서 관측되지 않은 지점의 기둥밀도는 내삽하여 구하였다. 각각의 격자에서 구해진 기둥밀도가 격자의 크기범위 내에서는 일정하다는 가정으로부터 각 격자들의 면적과 이곳의 기둥밀도의 곱에서 각 격자의 면적 속에 포함되는 가스질량을 구하고, 분자운 내의 모든 격자에 포함된 질량을 더함으로써 최종적인 분자운의 질량을 구하였다.

이렇게 구한 관측영역의 총 분자운의 질량은 ~590 $M_\odot$ 정도였고, 특별히 관심있는 분자운A의 질량은 ~180 $M_\odot$이었다.

분자운의 비리얼 질량(Virial mass: M_v)계산

균일한 밀도를 갖는 반경 R(pc단위)의 구형의 분자운이 (일차원 선폭 V_{FWHP}으로 표현되는) 내부의 가스 운동에 대해 중력적 평형을 이루기 위한 최소 임계질량인 비리얼질량 M_v는 다음과 같이 주어진다 (Rohlfs and Wilson, 2000).

$$M_v=250\left(\frac{V_{FWHP}}{\text{km s}^{-1}}\right)^2\left(\frac{R}{\text{pc}}\right)M_\odot \quad (5)$$

여기서 V_{FWHP}은 일차원 절반세기선폭(FWHP)으로 분자선 관측으로부터 구해질 수 있다. 여기에서는 분자운A의 모든 시선방향으로 관측된 ^{13}CO 1-0분자선의 가우시안 맞춤에서 구한 V_{FWHP}를 평균하여 구하였는데 그 값은 3.14(±0.63) km s^{-1}이다. 분자운A의 반경은 ^{13}CO의 장반경과 단반경의 기하평균값으로 구하였는데, 거리 4200 pc에서 약 2 pc 정도였다. 이를 바탕으로 분자운A의 비리알 질량 M_v은 약 2467 $M_\odot$으로 계산된다.

논 의

이러한 질량계산 결과에서 직각적으로 목격되는 흥미로운 사실은 분자운핵 A의 가스질량 ~180 $M_\odot$이 분자운A의 비리알질량 2467 $M_\odot$으로 보다 ~14배 이상이나 작다는 것이다. 질량계산에서 예상되는 불확

실요인 중 가장 큰 요소인 가스의 함량비에 의한 질량 계산에 있어서 오차범위가 수배 정도임을 감안할 때, 계산된 분자운A의 실제 질량은 분자운A의 비리알 질량보다 실질적으로 상당히 작은 값을 갖는다고 할 수 있다. 이는 분자운A가 별 생성을 위한 가스붕괴운동을 하여 별을 생성하기에는 가스의 질량이 턱없이 모자라는 상황에 있다는 의미이다. 그렇지만 이는 이미 분자운A에는 어린적외선원이 생성되어 있어 이러한 질량분석에 의해 유추되는 분자운A의 물리적 상황과는 모순된다. 이를 어떻게 이해하여야 할까? 여기에 담겨져 있는 물리적 의미는 어떠한 것일까? 이 장에서는 이에 대한 물음에 논의하고자 한다.

먼저, 이러한 모순을 설명하는 한 가지로서 적외선원이 분자운A와 관계없는 시선방향의 천체일 가능성을 들 수 있다. 만약 상황이 이러하다면 분자운핵 A는 중력 수축을 하기위해 충분한 질량을 갖추지 않은 상태이며 따라서 분자운핵은 분산과정을 겪으며 사라지게 될 것이다. 그러나 실제 이런 상황에 있을 가능성은 아주 적을 것으로 생각된다. 우선 관측 영역인 8.8'×14.2' 범위에 원시성의 에너지방출 특성을 지닌 천체는 IRAS 07280-1829가 유일하다. 따라서 이 천체가 분자운A의 기둥밀도가 가장 큰 영역과 우연히 시선방향으로 일치하게 존재할 가능성은 확률적으로 아주 작다. 한편으론 원시성이 자신의 모분자운을 갖지 않고 존재한다는 것은 물리적으로도 타당하지 않다. 따라서 IRAS 07280-1829 적외선원이 분자운A와 무관한 시선방향의 천체일 가능성은 상당히 낮을 것으로 사료된다. 아마도 두 천체의 직접적인 관련성의 확인은 CARMA, SMA, 또는 ALMA 등의 전파간섭계의 관측을 통해 적외선원에서 직접 분출하는 분자 분출류와 같은 적외선원의 직접적인 성분의 속도를 측정하여 분자운의 속도와 일치성을 확인함으로써 이루어질 수 있겠지만, 이는 현재 논문의 범위를 벗어나는 일이기 때문에 차후의 연구 과제로 남겨둔다.

두 번째로 상기의 모순을 설명할 수 있는 방법은 분자운A의 비리알 질량의 계산시 고려되지 않은 다른 형태의 가스운동이 존재하여 비리알질량을 과다계산케 했을 가능성이다. 비리알질량에 대한 공식(5)에서 주어진 중요한 항인 가스운동선폭은 가스 운동속도가 가우시안의 속도분포를 따를 때의 선폭인데 만약, 여기에 외부에서 가해지는 심각한 교란 운동(turbulence) 성분이나 자기장에 의한 운동성분에 의해 지대하게 영향 받았다면, 비리알 질량은 비상식적으로 큰 값으로 계산될 수 있을 것이다. 실례로, 본 연구에서 구한 분자운핵 A의 가스질량 ~180 $M_{\odot}$에 중력적 평형을 주는 일차원적인 가스 속도폭 V_{FWHP}은 ~0.6 km s^{-1}으로서 실제 관측에서 나타난 선폭(~3.14 km s^{-1})에 비해 20%에 불과하다. 따라서 관측된 분자선의 선폭에는 상당한 외부교란운동이나 혹은 자기장에 의한 운동 성분 등의 포함 가능성을 생각하는 것은 무리가 없다.

한 가지 흥미로운 부분은 분자선의 선폭이 자기장에 의해 지배된 운동 때문이라면 자기에너지, 운동에너지, 그리고 중력에너지 사이의 평형관계를 이용하여 얻어진 아래의 식으로부터 분자운A의 자기장 세기를 간접 유추할 수 있다는 것이다(Rohlfs and Wilson, 2000).

$$\frac{B}{\mu G} = 15.2\left(\frac{V_{FWHM}}{km\ s^{-1}}\right)^2\left(\frac{R}{pc}\right) \quad (6)$$

본 관측으로부터 얻어진 V_{FWHP}=3.14 km s^{-1}, R~2 pc을 넣어 계산된 자기장은 ~300 μG이다. 물론 이 값은 분자운에 외부교란운동 성분이 없는 경우이기 때문에 분자운A가 중력에 지탱하기에 필요한 자기장의 최대치로 여겨져야 한다.

결 론

본 논문에서는 ^{12}CO와 ^{13}CO 1-0 분자선 관측을 통해 IRAS 07280-1829의 적외선원과 이를 둘러싸고 있는 분자운의 물리적환경에 대해 연구하였다. 적외선원에서 측정된 파장별 에너지 분포(α=1.16)와 복사온도(145 K)는 이 천체가 Class I형 원시성임을 제시하고 있다. 또한 이 천체가 천체의 시선방향에 위치한 44.7 km s^{-1} 속도성분 분자운과 같은 거리(4200 pc)에 있다는 가정에서 계산된 광도는 ~2.9×10^4 $L_{\odot}$으로서, 적외선원 IRAS 07280-1829은 중량급원시성임을 알 수 있다.

이 적외선원방향에서 관측된 ^{12}CO의 스펙트럼에서는 가우시안 형태에서 벗어난 큰 속도 성분이 보인다. 이는 적외선원에 분자분출류의 존재를 의미할 수 있다. 다만 ^{13}CO의 스펙트럼에서도 이와 유사한 가우시안 형태에서 벗어난 큰 속도성분이 보이기 때문에 이 속도 성분들이 가스의 기둥밀도가 큰 분자분출류의 흔적인지 혹은 단지 속도가 조금 다른 속도성분

인지는 보다 좋은 감도의 고분해능 관측에 의해 파악되어야 할 것이다.

본 연구에서는 적외선원의 주변 44.7 km s^{-1} 속도성분의 분자운은 3개의 작은 분자운들로 구성됨을 밝혔다. 특히 CO 관측자료를 이용하여 이들 분자운들의 질량을 측정한 결과, 적외선원과 직접적인 관련성이 있어 보이는 분자운A의 가스 질량은 약 ~180 $M_{\odot}$으로 계산되었다. 한 가지 주목해야 할 사실은 이러한 분자운A의 가스질량이 이 분자운의 비리알 질량보다 10배 이상 작은 값을 갖는다는 것이다. 이는 적외선원을 감싸고 있는 분자운A가 스스로 중력수축붕괴를 하기에 필요한 질량보다 훨씬 작은 질량을 갖고 있음을 의미하는 것이지만 그곳에 이제 막 생성한 적외선원 IRAS 07280-1829이 존재한다는 사실과 모순이 된다.

본 연구에서는 이 모순을 설명할 한 가지로서 CO 관측 자료에서 보이는 넓은 선폭이 외부교란 혹은 강한 자기장의 존재로 인해 과도하게 넓혀져 분자운의 비리알질량을 실제보다 큰 값으로 계산하게 만들었을 가능성을 제안하였다. 만약 이 지역이 자기장에 의해 지배되는 환경이라면 계산되는 분자운의 자기장의 세기는 ~300 μG 정도임을 보았다.

이렇듯 관측된 적외선원은 질량 ~180 $M_{\odot}$의 전형적인 적외선 분자운(Infrared-dark clouds)을 모분자운으로 삼아 강한 교란운동 혹은 자기장의 환경에서 태어나고 있는 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2010-0011605)입니다. 관측에 도움을 준 김관정, 김미랑 학형께 감사드립니다.

참고문헌

André, P., Ward-Thompson, D., and Barsony, M., 2000, From Prestellar Cores to Protostars: The Initial Conditions of Star Formation. In Mannings, V., Boss, A.P., and Russell, S.S. (ed.), Protostars and Planets IV. University of Arizona Press, AZ, USA, 59-96.

IPAC, 2011, http://irsa.ipac.caltech.edu/IRASdocs/iras.html (검색일: 2011. 6. 1)

Yamauchi, C., Fujishima, S., Ikeda, N., Inada, K., Katano, M., Kataza, H., Makiuti, S., Matsuzaki, K., Takita, S., Yamamoto, Y., and Yamamura, I., 2001, AKARI-CAS - Online Service for AKARI Infrared All-Sky Catalogues. Publications of the Astronomical Society of Japan, in press.

Lada, C.J. and Wilking, B.A., 1984, The nature of the embedded population in the Rho Ophiuchi dark cloud - Mid-infrared observations. The Astrophysical Journal, 287, 610-621.

Lada, C.J., 1987, Star formation-From OB associations to protostars. In Peimbert, M. and Jugaku, J. (ed.), Star Forming Regions. Proceedings of the 115th IAU Symposium, Reidel, Dordrecht, The Netherlands, 1-18.

Rohlfs K. and Wilson T.L., 2000, Tools of Radio Astronomy. 3rd ed., Astronomy and Astrophysics Library, Springer, 362-392.

Myers, P.C. and Ladd, E.F., 1993, Bolometric temperatures of young stellar objects. The Astrophysical Journal, 413, 47-50.

Gyulbudahgian, A.L. and May, J., 2008, Star-forming region BBW 36 in puppis. Astrophysics, 51, 394-402.

May, J., Murphy, D.C., and Thaddeus, P.A., 1988, Wide latitude CO survey of the third galactic quadrant. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 73, 51-83.

Russeil, D., Georgelin, Y.M., Georgelin, Y.P., Le Coarer, E., and Marcelin, M., 1995, Galactic HII regions at l= 234deg. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 114, 557-564.

Sodroski, T.J., 1991, The physical properties of giant molecular cloud complexes in the outer Galaxy-Implications for the ratio of H2 column density to (C-12)O intensity. The Astrophysical Journal, 366, 95-106.

Ward-Thompson, D. and Whitworth, A., 2011, An Introduction to Star Formation. Cambridge University Press, 143-172.

2011년 7월 16일 접수
2011년 8월 5일 수정원고 접수
2011년 8월 21일 채택