

Sgr A 분자운의 열적 SiO 천이선 관측연구 OBSERVATIONS OF THERMAL TRANSITIONS OF SiO TOWARD THE SGR A MOLECULAR CLOUD

민영철¹, 노덕규¹, 김상준², M. OHISHI³

¹한국천문연구원, ²경희대학교 우주과학과, ³일본 국립천문대

Y. C. MINH¹, D.-G. ROH¹, S. J. KIM², AND M. OHISHI³

¹Korea Astronomy Observatory, Yusong, Daejeon 305-348

²KyungHee University, Dept. of Space Science, Yongin, Gyeonggi-do 449-701

³National Astronomical Observatory of Japan, Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

E-mail: minh@rao.re.kr, dgroh@rao.re.kr, sjkim1@khu.ac.kr, ohishi@nro.nao.ac.jp

Received 2001 Nov. 22; Accepted 2001 Dec. 16

ABSTRACT

We observed the thermal transitions of SiO ($J=1-0$, $2-1$) and ^{29}SiO ($J=1-0$) toward the Sgr A molecular clouds. The distribution and the velocity structure of SiO are very similar to previous results for “quiet” interstellar molecules. We think that the SiO has been well mixed with other molecules such as H₂ which may indicate that the formation of Sgr A molecular clouds was affected by the activities, such as shock waves or energetic photons, from the Galactic center in large scales. The total column density of SiO is about $4.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ and the fractional abundance SiO/H₂ appears to be about 10 times larger than those of other clouds in the central region of our galaxy. The derived values are thought to be lower limits since the optical depths of the observed SiO lines are not very thin. The formation of SiO has been known to be critically related to shocks, and our results provide informative data on the environment of our Galactic center.

Keywords: Galaxy: abundances – Galaxy: center – ISM: abundances – ISM: individual (Sgr A) – ISM: molecules

I. 서 론

Sgr A 분자운은 우리 은하중심에 매우 가까이 위치하고 있으며 ($\leq 150 \text{ pc}$), 우리 은하중심과 관련하여 많은 연구의 대상이었다 (리뷰논문 예: Brown & Liszt 1984; Liszt 1988). 이 분자운은 매우 복잡한 구조를 보여주고 있으며, 질량이 각각 $\sim 10^5 M_\odot$ 인 여러 개의 커다란 가스 덩어리로 이루어져 있다 (Gusten 등 1981; Armstrong & Barrett 1985). 그리고 이들 덩어리들은 은하중심 지역 근처에서 마이너스의 은경으로부터 플러스 쪽으로 급격한 속도 기울기 ($V_{\text{lsr}} \sim 10 \rightarrow 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$)를 보여주고 있는데 이러한 사실이 상대적인 덩어리들의 위치 차이로부터인지 아니면 회전과 같은 역학적이유인지 확실하지는 않다.

우리은하의 중심지역은 블랙홀 후보인 Sgr A*, 거대한 O, B 별들의 집단인 IRS16, 그리고 초신성 잔해인 Sgr A East 등의 매우 격렬한 활동이 진행되고 있는 지역이다 (참고: Liszt 1988). 따라서 충격파나 자외선 혹은 활동적인 입자들에 의한 영향이 매우 큰 지역으로, 근접하여 위치하고 있는 Sgr A와 같은 분자운은 이들의 영향으로 매우 특이하고 풍

부한 성간분자들이 존재하는 것으로 알려졌다 (예: Minh 등, 1991, 1992). Sgr A 근처에 위치하고 있으나 보다 멀리 떨어진(각 거리 약 50 arcmin) 거대 분자운(GMC)인 Sgr B2는 우리 은하게 최대의 GMC로 높은 시선밀도로 인하여 상대적으로 많은 관측 및 모델연구가 되어왔지만, 우리은하 중심에 보다 가까이 위치한 Sgr A의 물리 화학적인 특성은 아직도 많은 의문점과 함께 집중적인 연구가 필요한 흥미로운 천체이다.

이번 연구에서는 Sgr A 분자운에 대한 일산화규소(SiO) 분자의 열적 천이선들을 관측하여 이 지역의 화학적 특성과 SiO로 추적되는 지역적 활동성에 대한 연구를 하였다. 대부분의 SiO에 대한 연구는, 주로 이 분자로부터 방출되는 메이저 천이선에 대한 연구이었다. 메이저 천이선들은 주로 만기형별과 같이 강력한 에너지원이 존재하는 근처의 주변 가스구름(circumstellar envelope)에서 관측되고 있다. 중심의 에너지원에서 방출되는 광자에 의한 펌핑으로 여기(excite)되는 진동-회전천이선들이 관측되고 있다. 이러한 메이저선들은 위치나 역학적 특성을 밝히는데는 커다란 역할을 하지만 SiO 자체의 함량이나 분포특성 등에 대하여는 거의 정

보를 제공하여 주지 않는다. 이에 비하여 열적천이선들은 그 강도는 메이저선들보다 약하지만 이를 방출하는 가스구름의 성분과 화학적 특성들에 대한 중요한 정보들을 제공하여 준다.

SiO 분자는 화학적으로 매우 흥미로운 현상을 암시하여 주는 특이한 성간분자이다. SiO는 규소(Si)와 산소(O_2 혹은 O)의 빠른 결합으로 가스 상태에서 생성된다 (Herbst & Leung 1989; Langer & Glassgold 1990). 그러나 이 분자는 밀도가 높은 조용한 분자운에서는 전혀 관측이 되지 않고 있다. 예를 들면, 전형적인 암흑성운인 TMC-1에서 SiO 함량은 $n(\text{SiO})/n(\text{H}_2) < 3 \times 10^{-12}$ 으로 거의 가스상태로는 존재하지 않는다는 것을 뜻한다. 또한 이것은 가스상태의 Si의 상대적 함량이 $n(\text{Si})/n(\text{H}) < 10^{-7}$ 이라는 것을 의미한다 (Ziurys & Friberg 1987; Ziurys 등 1989). 이렇게 SiO가 가스상태에서 거의 존재하지 않는 이유는, 아마도 대부분의 Si가 성간먼지에 달라붙어 가스상태에는 거의 존재하지 않기 때문으로 추정된다.

그러나 이와는 달리 충격파가 존재하는 지역인 저밀도성운, 분자 가스 고속방출 지역, 혹은 초신성잔해 지역들에서는 함량이 크게 증가하는 것으로 관측된다 (Bachiller 등 1991; Sofia 등 1993; van Dishoeck 등 1993). 별탄생 지역의 고속분자방출영역에 대한 관측으로부터 계산된 SiO의 함량은 분자방출의 강도와 잘 일치하며, 또한 SiO 방출의 위치-속도 관계를 보면 이들이 충격파 발생지역에서 형성되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 지역에서의 SiO의 증가는 아마도 충격파가 성간먼지의 표면에 붙어있는 Si를 가스상태로 되돌리는 역할을 하기 때문일 것으로 추정된다 (Pineau des Forets & Flower 1997). 고속분자방출에서는 가스상태에 있는 규소의 약 3%가 SiO의 형태에 포함되어 있는 것으로 나타난다 (Martin-Pintado 등 1992). 그러나 충격파가 지나고 나면 SiO는 가스상태에서 다시 사라지게 되는데 그것은 SiO와 OH의 반응에 의하여 SiO_2 로 변환되기 때문인 것으로 생각된다. SiO 방출은 충격파의 활동을 추적하는 매우 좋은 추적자임에 틀림없다.

우리 은하게 중심에 대한 SiO 관련 연구로는 Minh 외 (1991), Martin-Pintado 외 (1997), Huttemeister 외 (1998), Peng 외 (1995) 등이 있으며, 우리 은하게 중심에서의 충격파의 중요성과 SiO 함량 등을 구하였다. 이번 연구에서는 SiO 분자들의 열적방출선인 $v=0 J=1-0, 2-1$ 선을 관측하여 이 SiO 분자의 분포와 화학적 특성들에 대하여 연구하였다.

II. 관측

SiO 2-1, 1-0 천이선들과 ^{29}SiO 1-0 천이선의 관측은 1993년 4월 일본 노베야마 전파관측소의 45미터 전파망원경으로 이루어졌다. 관측된 주파수에서의 이 망원경의 HPBW와 범-효율은 표 1에 있다. 앞단수신기는 SIS 수신기를 사용하였고 이들의 대표적인 잡음온도는 표 1에 있다. 백-엔드는 고-분해능 (37 kHz)의 음향광학분광기 (acoustic-optical spectrometer) 가 사용되었으며 안테나와 대기손실은 통상적

표 1. 관측된 천이선 및 안테나 파라메터들

분자	천이선	주파수 ¹ (MHz)	HPBW ² (arcsec)	η_B^3	Tsys (K)
SiO	$v=0 J=2-1$	86846.9	19	0.50	800
	$v=0 J=1-0$	43423.8	38	0.85	410
^{29}SiO	$v=0 J=1-0$	42879.9	38	0.85	410

¹정지주파수 (참고문헌 Lovas 1986, 노베야마 관측소 리스트 1987).

²반치빔크기 (Half-Power Beam-Width).

³빔-효율 (Beam efficiency).

인 초퍼-휠 방법으로 보정되었다. SiO의 분포가 비교적 분자운 코어에 집중되어 있기 때문에 관측 비교를 위한 참조지점(reference point)을 방위각 0.5° 떨어진 위치로 하여 위치변환 관측으로 수행되었다. 안테나의 지향정밀도는 매 2시간마다 VX Sgr 천체에 대하여 SiO $v=1 J=1-0$ 선을 이용하여 점검되었다. 관측 첫날은 기상상태가 좋지 않아서 지향정밀도 역시 좋지 않았으며 관측을 중단하였으나 그 이후로는 대략 빔크기의 10% 정도이내에서 유지되었다.

Sgr A는 여러 개의 가스덩어리로 이루어져 있다 (참조: Armstrong & Barrett 1985). 이를 대부분을 포함하는 전체 지역에 대하여 SiO $J=1-0$ 천이선을 이용하여 매핑관측이 이루어 졌다. 그림 1은 이 관측결과를 보여주며 (a)는 관측된 선의 최대강도 지도, (b) 총 적분 강도이며 관측된 위치들은 그림 1(a)에 점으로 표시되어 있다. 매핑 간격은 중심부근에서는 $20''$ 간격으로 나머지 부분에서는 $40''$ 간격으로 이루어졌다.

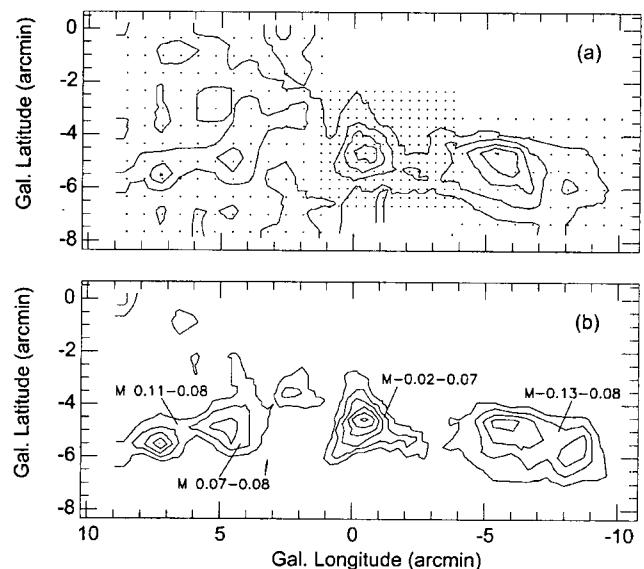


그림 1. SiO $J=1-0$ 천이선의 매핑관측 결과. (a) 관측된 선들의 안테나 온도지도. 제일 낮은 등고선의 세기는 0.5 K 이며, 0.5 K 씩 증가함. 점들로 표시된 것은 관측지점들. (b) 관측된 선의 속도적분된 값의 등고선 지도. 최저 세기의 등고선은 $20\text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 이며 $10\text{ K} \cdot \text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 씩 증가함.

표 2. 그림 2의 관측선들의 파라메터들

관측위치 ¹ <i>l, b</i>	관측된 천이선	T_A^* [K]	$\int T_A^* dv$ [K · km · s ⁻¹]	V_{LSR} [km · s ⁻¹]	<i>rms</i> [K]
-1.02, -3.43	SiO 2-1	1.1	33.4	56.0	0.007
	1-0	1.4	38.6	48.6	0.018
-1.02, -4.10	²⁹ SiO 1-0	0.2	5.4	57.8	0.004
	SiO 2-1	1.7	53.0	44.3	0.006
-1.02, -4.77	1-0	2.6	74.6	48.6	0.023
	²⁹ SiO 1-0	0.4	7.0	49.8	0.005
-1.69, -4.10	SiO 2-1	0.9	32.2	41.7	0.006
	1-0	1.7	43.4	48.6	0.018
-0.36, -4.10	²⁹ SiO 1-0	0.2	5.1	39.3	0.005
	SiO 2-1	1.4	36.3	43.0	0.006
-6.02, -3.43	1-0	1.7	47.4	31.8	0.019
	²⁹ SiO 1-0	0.3	4.9	49.8	0.005
-6.02, -4.10	SiO 2-1	1.0	26.3	43.0	0.007
	1-0	1.9	49.1	48.6	0.015
-6.02, -4.77	²⁹ SiO 1-0	0.2	3.3	50.7	0.005
	SiO 2-1	1.2	15.5	5.2	0.024
-5.35, -4.10	1-0	1.0	22.6	1.1	0.020
	²⁹ SiO 1-0	0.2	4.2	1.6	0.005
-6.69, -4.10	SiO 2-1	2.4	38.0	16.9	0.022
	1-0	2.7	55.6	18.7	0.023
-6.69, -4.77	²⁹ SiO 1-0	0.3	4.3	23.0	0.005
	SiO 2-1	1.3	29.7	26.5	0.022
-5.35, -4.10	1-0	2.0	43.0	17.8	0.017
	²⁹ SiO 1-0	0.2	2.1	18.6	0.006
-6.69, -4.10	SiO 2-1	1.2	13.3	30.4	0.023
	1-0	2.0	32.5	17.8	0.016
-6.69, -4.77	²⁹ SiO 1-0	0.2	2.4	23.0	0.004
	SiO 2-1	1.6	23.2	16.5	0.018
-6.69, -4.10	1-0	2.5	55.3	15.2	0.018
	²⁹ SiO 1-0	0.3	5.9	13.2	0.004

¹은경, 은위 (단위 arcmin)

보다 정확한 물리 파라메터들을 구하기 위하여 가장 가스 질량이 높은 가스구름인 M-0.13-0.08과 M-0.02-0.07의 몇 부분에 대하여, 매핑 관측과는 별개로, 관측모드 "FIVE"를 이용하여 SiO J=1-0, 2-1과 ²⁹SiO J=1-0 천이선들을 관측하였다. 관측된 스펙트럼은 그림 2에 있으며 이들의 관측선 파라메터들은 표 2에 요약되어 있다.

III. 결과와 토의

(a) SiO J=1-0 천이선의 강도 분포

SiO의 방출선들은 일반적인 분자운에서 넓게 확장된 지역에서 강하게 나타나지 않는다. 그러나 은하중심 지역의 Sgr A 분자운에서는, 그림 1(a)와 (b)에서 보듯이 SiO J=1-0 선의 강도 분포는 대체로 잘 경계가 지워지는 가스구름 덩어리들에서 뚜렷하게 확장된 모습을 보여준다. 이들 가스구름의 분포는 NH₃, H₂CO, HNCO, C₃H₂ 등의 기존의 분자선

들이 보여주는 분포 (Minh 등 1991; Lee 등 1993; 포함된 참고문헌)와 크게는 비슷하다는 점에서, SiO 분자들이 각 분자운의 가스와 잘 혼합되어 있다는 것을 뜻한다. 이러한 사실은 조용한 분자운에서 Si 디플리션에 의하여 SiO가 가스상태로 거의 존재하지 않는다는 사실과 충격파나 히팅원의 존재에 의하여만 SiO가 형성된다는 것을 감안하면, Sgr A 전 분자운에 걸쳐 우리은하계 중심으로부터의 매우 활발한 활동에 크게 영향받고 있다는 증거일 것이다. SiO가 전체 가스의 분포와 비슷한 분포를 보인다는 것은 특정 히팅원의 존재보다는 충격파나 은하계 중심에서의 활동성에 의하여 SiO가 생성되었을 것이라는 것을 생각할 수 있으며 이러한 사실은 전체 Sgr A 분자운의 형성도 같은 과정 속에서 이루어졌을 것이라고 추정할 수 있다.

앞선 연구결과는 그림 1의 분자운 덩어리들 중에서 가장 오른쪽의 20 km · s⁻¹ 분자운인 M-0.13-0.08의 경우가 가장 질량이 크고 그리고 왼쪽 끝 쪽의 M 0.07-0.08, M 0.11-0.08의 경우는 상대적으로 적은 질량을 보인다 (참조: 표 3). 지

역의 활동성과 비교적 관련이 적고 전체 가스의 시선밀도에 비례할 것으로 보이는 H_2CO 나 C_3H_2 등의 분자들은 분자운인 $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 분자운인 M-0.13-0.08에서 강한 반면, 이번 SiO 관측결과는 우리 은하중심방향인 Sgr A^* 에 보다 가까운, 실질적인 절대 위치는 확실치 않지만, M-0.02-0.07 분자운에서 가장 강한 분포를 보이며, 원쪽의 두 분자운 M 0.07-0.08과 M 0.11-0.08의 경우도 비교적 강한 방출선을 보이고 있다. M 0.11-0.08과 같은 분자운들은 아마도 그 옆에 100 pc 정도 떨어져 존재하는 스파(Spar), 연속과 관측에서 뚜렷이 나타나고 Sgr B1 과 B2 로의 다리 역할을 할 것으로 추정되는, 와 매우 밀접하게 연관되어 있을 것으로 추정되고 있는데 (Liszt 1987) 역시 다른 가스덩어리보다는 더 활동성이 강한 주변의 영향을 받는 것이 아닌가 생각된다.

따라서 SiO 세기의 분포가 활동성과 비례한다면 밀도가 비교적 작은 지역이 보다 큰 활동성과 연관되어 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 열적 SiO 방출선들이 그 지역의 활동성을 가늠할 수 있는 좋은 척도가 된다는 것을 뜻한다.

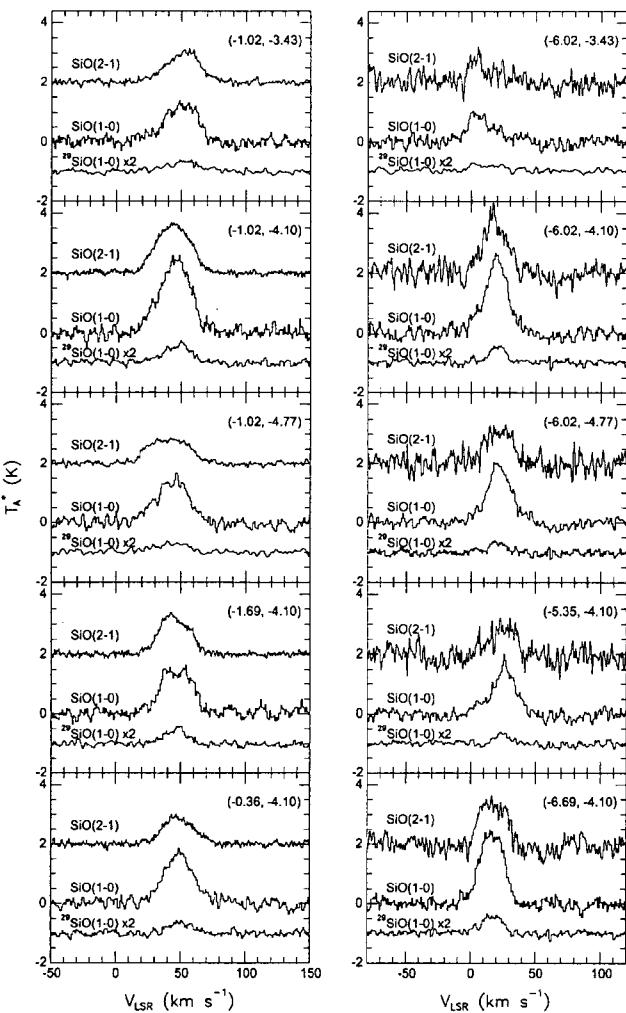


그림 2. $\text{SiO J}=1-0$ 천이선의 매핑관측 결과에 대한 속도-위치 지도. 은하위도 $-4.75'$ 위치(a)와 $-5.75'$ 위치(b)에서 은하 경도에 따른 스펙트럼선의 모습. 제일 강도가 낮은 선의 세기는 0.5 K 이며 증가크기도 0.5 K/Km 임.

이러한 결과를 활용하면 분자운에 대한 별탄생 효율과 물리화학적 특성 그리고 활동성 정도와 연계한 연구들은 성간분자운의 진화와 관련된 흥미로운 주제가 될 수 있을 것이다. 함량의 비교는 아래의 섹션 III(c)에서 다시 논의한다.

(b) $\text{SiO J}=1-0$ 천이선의 속도 분포

그림 2는 그림 1의 매핑관측 결과 중에서 특정 은하위도에 대한 속도-위치 지도로 x축에 표시되어 있는 은하경도에 따라 관측된 스펙트럼의 모습이다. 가스덩어리들의 속도(v_{lsr})는 $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 분자운인 M-0.13-0.08으로부터 은경이 증가함에 따라 같이 증가하다가 M-0.02-0.07과 만나는 지역에서 증가율이 점차로 줄어들어 약 $50-60 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 일정한 속도를 유지한다. 이러한 관측결과도 기존의 다른 성간분자에 대한 결과와 일치한다. 전체적인 모습뿐만 아니라 속도구조도 거의 비슷하다는 점에서 SiO 가 전체적인 가스와 잘 혼합되어 있다는 것을 뜻할 것이다.

또한 속도 기울기의 크기도 은경 $-10'$ 에서 $-5'$ 사이에서 $\Delta V \sim 5.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ pc}^{-1}$ 로 약 $2.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{ pc}^{-1}$ 정도로 앞서 구한 값과 비슷한 것으로 나타난다 (Lee 등 1993). 이러한 크기는 우리 은하계의 성간분자운들의 대표적인 값의 약 2배 정도로 하나의 단일 분자운 시스템에서 예상되는 속도 기울기보다 훨씬 큰 값으로 이들 덩어리들은 서로 분리되어 있으며 은하계의 중심에서 상대적인 위치가 아마도 다르기 때문에 비롯될 것으로 추정된다. 그러나 각 덩어리들의 상대적 위치와 물리적 특성의 차이는 아직 잘 밝혀지지 않고 있다.

(c) SiO 함량 추정값 및 화학적 특성

SiO 의 보다 정확한 함량을 구하기 위하여 필요한 회전들뜸온도 (rotational excitation temperature)를 구하기 위하여 $\text{SiO J}=1-0$ 과 2-1의 천이선을 동시에 관측하였고 또한 ^{29}SiO

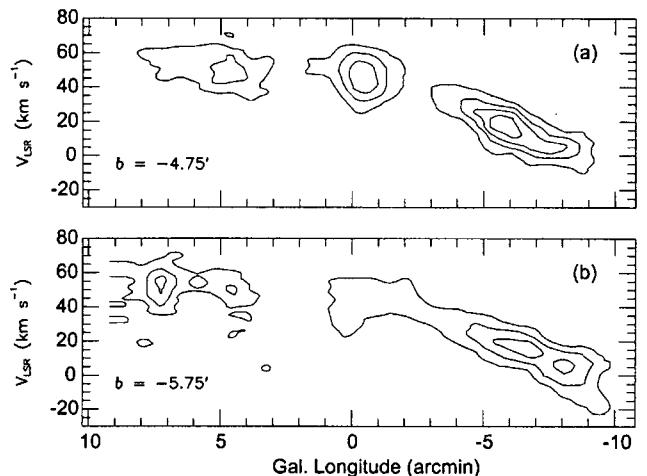


그림 3. 관측모드 “FIVE”로 관측된 $\text{SiO J}=1-0, 2-1$ 과 $^{29}\text{SiO J}=1-0$ 천이선들의 스펙트럼 모습. 관측된 위치는 각 패널의 오른쪽 위쪽에 표시되어 있으며, 이 선들의 관측파라미터는 표 2에 요약되어 있음.

표 3. 각 가스 덩어리들의 질량과 SiO 함량

분자운	총 질량 ¹ [M _⊙]	N(H ₂) ² [cm ⁻²]	N(SiO) ³ [cm ⁻²]	[SiO]/[H ₂]
M-0.13-0.08	4.0×10 ⁵	2.2×10 ²³	(4.1±0.7)×10 ¹⁴	1.9×10 ⁻⁹
M-0.02-0.07	3.1×10 ⁵	8.8×10 ²²	(3.0±0.5)×10 ¹⁴	3.4×10 ⁻⁹
M 0.07-0.08	0.9×10 ⁵	9.0×10 ²²	(4.9±0.8)×10 ¹⁴	5.4×10 ⁻⁹
M 0.11-0.08	2.1×10 ⁵	4.9×10 ²²	(3.6±0.6)×10 ¹⁴	7.3×10 ⁻⁹

¹ Armstrong & Barrett (1985)² CO 자료와 변환상수를 사용하여 구한 값 (Lee 외. 1993).³ 총 SiO 시선밀도 값. 오차범위는 T_{rot}=10과 15 K에 의한 차이.

J=1-0 선을 관측하여 광학적 깊이를 추정하였다. 이 관측된 스펙트럼들은 그림 3에 있다. 이 관측결과와 그림 1의 총 적 분강도 분포로부터 SiO의 함량을 구하였다.

SiO의 J=1-0와 2-1 천이선을 비교하여 이 분자의 회전온도는 T_{ex}=10-15 K 정도임을 구하였다. 그러나 이 회전온도는 두 천이선 간의 전파망원경 공간 분해능의 차이와 관측 결과가 범평균된 값이라는 점에서 한계를 지닌다. 이 값은 다른 분자들의 관측에서 추정된 경우와 비슷하고, 또한 우리 은하게 내에 존재하는 일반적인, 조용하지만 온도가 높은 고밀도 분자운(GMC)의 경우와 비슷한 것으로 나타난다 (Irvine 등 1987). 어느 정도의 오차는 있겠지만 이 범위의 회전온도를 적용하는 것에 의한 오차는 비교적 적은 것으로 생각된다. 왜냐하면 함량 계산에 필요한 분배함수(partition function)를 구하는데 서로 상쇄되는 항이 있기 때문이다. 결과적으로 SiO 분자의 전체 회전온도 Trot 이 10 K와 15 K

사이에 있을 것으로 추정하고 구한 총 시선밀도 값의 차이는 불과 20% 이내로 추정된다 (참조 표 3).

그리고 SiO 함량을 구하기 위하여 사용한 SiO 1-0 선의 광학적 깊이를 추정하기 위하여 SiO 1-0 선과 ²⁹SiO 1-0 선을 비교하여 광학적 깊이를 추정하였다. 광학적 깊이는 여러 가지 단순화된 가정을 적용하여 대체적인 값을 계산하였다. 예를 들면 서로 다른 두 동위원소를 방출하는 지역이 일치할 것이라는 점이나 혹은 같은 회전온도를 가지고 있을 것이라는 등의 가정을 적용하였다. 이렇게 그림 3에 있는 10곳에 대하여 각 스펙트럼의 속도에 따라 구한 광학적 깊이는 그림 4에 있다. 여기서 오차-바는 관측된 선의 잡음크기 (1σ)에 의한 것이다. M-0.13-0.08의 (-6.02, -3.43) 위치를 제외하고는 $\pi(\text{SiO } 1-0)$ 의 크기는 대략 0.3 이내로 나타났다. 이러한 값은 여전히 광학적 깊이가 상당한 것으로 표 3에 구한 SiO의 함량은 SiO 1-0 선이 광학적 깊이가 작다는 가정으로 구한 것이기 때문에 실질적으로는 그 이상일 것이며 최저값으로 생각하여야 될 것이다.

다른 여러 분자운들은 가장 질량이 큰 M-0.13-0.08의 중심에서 가장 큰 함량을 갖는데 (참조: Minh 등 1991과 인용된 다른 논문들), SiO의 경우는 이러한 경향을 따르지 않는다. 이것은 SiO가 전체 질량의 크기보다는 활동성에 영향을 받아 생성되기 때문일 것이다. SiO 분자의 총 시선밀도는 Sgr A의 분자운들의 중심에서 대략 $4\times10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 를 갖는다. SiO/H₂의 함량비는 M-0.02-0.07에서는 약 2×10^{-9} , 그리고 M 0.11-0.08에서는 약 7×10^{-9} 으로 이 값은 우리 은하게 중심의 다른 지역에서의 값 (1×10^{-9})이나 우리 은하게의 거대 분자운 (GMC)에서의 값 ($<1\times10^{-10}$) 보다 훨씬 큰 값이다 (Peng 등 1995; Martin-Pintado 등 1997; Huttemeister 등 1998).

SiO에 대한 앞선 연구에서 지적되었듯이 (Downes 등 1982; Ziurys & Friberg 1987) SiO는 충격파의 영향을 보여주는 확실한 추적자이다. 규소(Si)는 성간먼지가 충격파에 영향을 받아야만 가스로 환원되기 때문에 이 분자의 존재 자체는 이미 충분한 충격파의 영향을 암시하고 있다. 충격파의 영향을 받은 뜨거운 가스에서의 SiO의 총 시선밀도는, 유도과정에서 여러 가지 인수의 커다란 오차를 피할 수 없는 한계를 지니고 있다고 하더라도, 고속 분자ガ스방출에서 보다 10배 이상 높은 값을 보인다 (Pineau des Forets & Flower 1997).

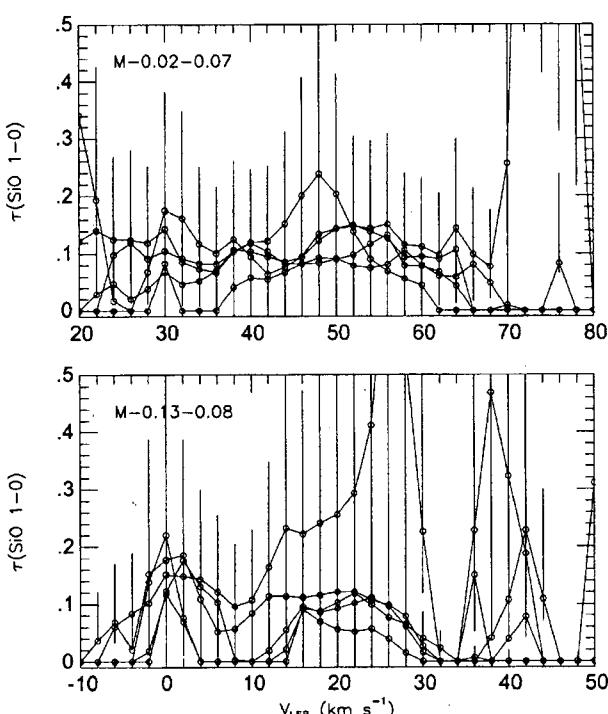


그림 4. 두 분자운 M-0.13-0.08과 M-0.02-0.07에서 추가로 관측된 10곳(그림 3)에 대한 SiO 1-0의 속도에 따른 광학적 깊이 계산 결과. 오차-바는 관측자료(T_A^*)의 1σ 값.

특히 우리은하계의 GMC들의 경우에는 SiO 천이선들은 별탄생이 이루어지고 있고 고속가스방출이나 플래토 등의 일부 제한된 지역에서만 강한 방출을 보이고 있으며, 암흑 성운에서는 거의 검출이 되지 않고 있다는 사실을 감안하면 (Irvine 등 1987; Ziurys & Friberg 1987) 이 은하중심에 있는 분자운들의 확장된 SiO 방출선들은 은하중심의 강한 활동성을 나타내는 뚜렷한 증거이다.

또한 은하중심에서의 SiO 함량의 커다란 증가는 앞선 HCO_2^+ 의 연구와 비교될 수 있다 (Minh 등 1991, 1997). 이 분자는 우리 은하중심에서만 관측되며 그것도 매우 강한 천이선과 넓은 지역에 퍼져 분포한다. 이 분자는 아마도 성간 먼지의 표면에 있던 이산화탄소가 충격파에 의하여 증발하여 생성되는 것으로 추정된다. 은하중심에서 함량의 크게 증가하는 이러한 분자들의 존재는, 우리 은하계의 중심 지역이 다른 지역에 있는 거대분자운의 환경과는 달리, 충격파나 에너지가 높은 광자들, 그리고 자외선 등에 의하여 형성된 유기분자를 맨틀에 다양으로 포함하고 있는 성간먼지 등과 함께 매우 흥미롭고 특이한 화학적 환경을 갖는 지역이기 때문이라고 생각된다.

IV. 결 론

이번 SiO 분자의 천이선들에 대한 관측으로부터 Sgr A 분자운들은 매우 넓게 퍼져있는, 일반적인 다른 성간분자들의 분포와 비슷한 모습을 보인다. 또한 속도 구조도 기존의 연구결과와 비슷한 모습을 보인다. 따라서 SiO 분자들은 분자운을 형성하는 주요 성분인 H_2 분자와 잘 혼합되어 있다고 생각된다. Sgr A 분자운에서 SiO 분자의 분포는, 특정 별탄생 지역이나 별 근처에 국한되어 있지 않고, 전체적으로 일반적인 가스 밀도 분포를 따라간다는 점은 앞으로 많은 연구 대상이다. 아마도 Sgr A의 가스 덩어리들이 보다 작은 덩어리의 집합체이어서 큰 스케일의 충격파가 분자운 내부까지 영향을 미치는 것으로 생각될 수도 있을 것이고, 예상되는 초신성 폭발이나 대규모적인 분자운-분자운 충돌 등의 여러 상황이 점검될 필요가 있으며, SiO 관측결과들은 이에 대한 실마리를 제공할 수 있을 것이다. 하여튼 이번 관측결과는 Sgr A 지역의 분자운들의 생성과정이, 전체적인 스케일에서, 은하게 중심의 활동성에 크게 영향받고 있다는 증거를 보여주고 있다.

이번 관측결과에서 구한 SiO의 함량은 대략 $4.1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 으로 상대적인 함량 SiO/H_2 함량 비는 은하게 중심의 다른 지역과의 비교에서도 대략 10배정도 높은 값을 보이며, 우리은하계의 일반적인 GMC와는 그 값이나 분포크기에서 비교할 수 없을 정도로 많은 양이다. 그러나 관측된 선들의 광학적 깊이가 크다는 점을 감안하면 ^{29}SiO 천이선을 이용한 보다 정밀한 관측이 필요하며 실질적인 총 함량은 더욱 높아질 수 있을 것으로 생각된다.

이번 관측 결과는, SiO가 충격파의 영향을 추적하는 매우 좋은 추적자라는 사실을 감안할 때, 충격파 등의 활동성 정도가 어느 정도인지를 예측할 수 있는 정량적 자료를 제공하고 있다.

SiO 분자의 생성과정과 화학적 특성에 대한 연구는 많은 흥미로운 점이 있으나 아직 SiO 방출강도와 충격파 영향지역과의 구체적인 관계에 대하여 많은 논쟁이 남아있다. 우리 은하게 중심지역은 분자운의 특성에 대한 연구뿐만 아니라 우리은하게 중심의 활동성과 연계하여 많은 특징들이 연구되어야 할 것이며 이러한 과정에서 SiO는 중요한 역할을 할 것으로 생각된다.

연구자 중에서 민영철, 노덕규는 한국천문연구원의 지원(2001-1-401)으로, 김상준, 민영철의 연구의 일부는 한국과학재단 목적기초연구(R01-1999-00022)지원으로 수행되었습니다. 그리고 이 관측을 지원하여 주신 노베야마의 나카이 박사에게 커다란 감사를 드립니다.

참고문헌

- Armstrong, J. T. & Barrett, A. H. 1985, ApJS, 57, 535
- Bachiller, R., Martin-Pintado, J., & Fuente, A. 1991, A&A, 243, L21
- Brown, R. L. & Liszt, H. S. 1984, ARAA, 22, 223
- Downes, D., Genzel, R., Hjalmarson, A., Nyman, J. A., & Ronnang, B. 1982, ApJ, 252, L29
- Gusten, R., Walmsley, C. M., & Pauls, T. 1981, A&A, 103, 197
- Herbst, E. & Leung, C. M. 1989, ApJS, 69, 271
- Huttermeister, S., Dahmen, G., Mauersberger, R., Henkel, C., Wilson, T. L., & Martin-Pintado, J. 1998, A&A, 334, 646
- Irvine, W. M., Goldsmith, P. F. & Hjalmarson, A. 1987, in Interstellar Process, ed. D. J. Hollenbach, H. A. Thronson, Jr., 561
- Langer, W. D. & Glassgold, A. E. 1990, ApJ, 352, 123
- Lee, C. W., Minh, Y. C., & Irvine, W. M. 1993, JKAS, 26, 73
- Liszt, H. S. 1988, in Gal. Extra. R. Astron., eds. G. L. Verschuur & K. I. Kellermann (New York: Springer), 359
- Lovas, F. J. 1986, J. Phy. Chem., Ref. Data, 15, 251
- Martin-Pintado, J., De Vicente, P., Fuente, A., & Planesas, P. 1997, ApJ, 482, L45
- Minh, Y. C., Brewer, M. K., Irvine, W. M., Friberg, P., & Johansson, L. E. B. 1991, A&A, 244, 470
- Minh, Y. C., Irvine, W. M., & Friberg, P. 1992, A&A, 258, 489
- Peng, Y., Vogel, A. N., & Carlstrom, J. E. 1995, ApJ, 455, 223
- Pineau des Forets, G. & Flower, D. R. 1997, in Molecules in Astrophysics, ed. E. F. van Dishoeck (Dordrecht: Kluwer), 113
- Sofia, U. J., Savage, B. D., & Cardelli, J. A. 1993, ApJ, 423, 251
- van Dishoeck, E. F., Jansen, D. J., & Phillips, T. G. 1993, A&A, 279, 541
- Ziurys, L. M. & Friberg, P. 1987, ApJ, 314, L49
- Ziurys, L. M., Friberg, P., Irvine, W. M. 1989, ApJ, 343, 201