

OMC-1의 ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O 의 관측

천문석^{1†}, 송혜정¹, 손영종²
¹연세대학교 천문우주학과
²연세대학교 자외선우주망원경연구단

^{12}CO , ^{13}CO , AND C^{18}O OBSERVATIONS TOWARD OMC-1

Mun-Suk Chun^{1†}, Hye-Jeong Song¹, Young-Jong Sohn²
¹Dept. of Astronomy, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
²Center for Space Astrophysics, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea
E-mail: mschun@galaxy.yonsei.ac.kr

(Received September 2, 2001; Accepted September 30, 2001)

요 약

대덕전파천문대의 구경 13.7m 전파망원경으로 오리온 분자운 OMC-1에 대한 CO 동위원소 관측을 실시하였다. 관측 중심은 적경(1950) $5^{\text{h}}32^{\text{m}}47^{\text{s}}$, 적위(1950) $-5^{\circ}24'23''$ 이고, 이 지역을 중심으로 전체 $11' \times 11'$ 영역에 대한 mapping을 수행하였다. 관측 결과 각 지점에서의 속도, 정점 온도, 적분 온도 등을 얻었고 이 값들을 이용하여 ^{13}CO 와 C^{18}O 의 광학적 깊이와 기동밀도를 계산하였다. ^{13}CO 의 광학적 두께는 0.1~0.4, C^{18}O 의 경우 0.01~0.03의 값을 나타내었다. 계산된 ^{13}CO 와 C^{18}O 의 기동밀도로부터 ^{12}C 와 ^{13}C 의 존재비를 결정하여 약 2~60사이의 값을 가짐을 알 수 있었고, OMC-1 내에서 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 중심거리에 대한 변화는 뚜렷한 경향을 보이지 않음을 볼 수 있었다.

ABSTRACT

Interstellar carbon monoxide and its isotopes were observed with the 13.7m radio telescope of the Daeduk Radio Astronomy Observatory toward Orion Molecular Cloud-1 (OMC-1). We derive the excitation temperature, optical depth, column density, and isotopic abundance ratios from the observed lines of ^{12}CO , ^{13}CO , and C^{18}O inside of the region of $11' \times 11'$. The optical depths of ^{13}CO were obtained to be 0.1~0.4, while those of C^{18}O to be 0.01~0.03. The isotopic ratios $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ were also estimated to be 2~60. We could not find the radial isotopic ratio $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ gradient in the OMC-1.

Keywords: radio observation, molecular cloud, OMC-1

[†]corresponding author

1. 서 론

전파 영역에서의 성간 분자의 발견은 1963년 OH가 처음이다(Weinreb et al. 1963). 1950년대 중반 분자선들이 성간에서 발견될 것임이 예견되었으나, 성간에서의 분자 형성의 속도는 은하내의 자외선에 의한 분자 파괴보다 느리게 일어나리라는 생각 때문에 OH의 발견에도 불구하고 성간 물질에서 보편적인 분자상태의 존재에 대해서는 지속적으로 의문이 제기되어왔다(Turner & Ziurys 1988). 그러나 1960년대 중반 HII 영역에서 강한 OH Maser가 관측되고, 또한 H₂O와 NH₃가 발견된 이후 성간 기체에는 최소한 자외선에 의한 파괴를 견딜수 있을 정도의 높은 밀도의 분자 상태가 존재할 수 있음이 밝혀졌으며, 1990년대 초반에 이르기까지 약 90여 종의 성간 분자의 존재가 확인되었다(Irvine 1991). 성간 물질에서의 동위원소의 존재는 1970년대에 이르러 관측이 되었으며, 그 중 CO 동위원소가 가장 먼저 발견되었다. 지금까지 동위원소의 연구는 상호 동위원소량의 비교로부터 보다 정확한 광학적 두께, 즉, 분자량의 보다 정확한 추정과 은하내에서의 동위원소 비의 변화가 전체 화학적 진화 또는 지역적 특성에 따라 어떻게 변화하는가에 많은 관심이 집중되어져 왔다(Langer & Penzias 1990).

은하의 화학적 진화에서 중요한 것은 제1, 제2 원자핵 합성(nucleosynthesis)의 양을 결정하는 것이다. 탄소는 이러한 연구시 유용한 원소인데 ¹²CO와 ¹³CO가 각각 제1, 제2 원자핵 합성원소로 여겨지기 때문이다(Rolfs 1977). 시간에 따라서 ¹³CO/¹²CO의 비가 증가해야하는데 그 이유는 질량이 큰 별, 적색 거성, 신성 초신성 등에서 성간물질로 탄소가 유출되는 과정에서 제2 합성원소의 양이 증가되기 때문이다(Langer & Penzias 1990). 한편, 우리 은하에서의 탄소와 산소에 대한 동위원소의 분포에 대한 관측적 결과에 의하면, ¹³CO/¹²CO 또는 ¹⁸O/¹⁶O의 값들이 은하 외곽부 또는 태양 근처 보다 은하 중심부에서 더욱 큰 값을 갖는 것으로 알려졌다(Wannier 1989). 이러한 사실은 탄소와 산소에 대한 동위원소들의 공간 분포에 대한 관측적 연구 결과가 은하의 화학적 진화에 중요한 제한 조건을 줄 수 있음을 의미한다.

이 연구에서는 오리온 분자운 OMC-1내에서 광학적 깊이가 비교적 비슷한 분자로 알려진 ¹³CO와 C¹⁸O(Wannier 1989)를 선택해서 관측을 수행하여 관측 결과를 보고함과 더불어 광학적 깊이와 기동밀도등을 계산하였다. 또한 계산된 ¹³CO와 C¹⁸O의 기동 밀도로부터 ¹²C와 ¹³C의 존재비를 결정하여 OMC-1의 중심 거리에 대한 ¹³C와 ¹²C 분포에 대해 알아본다. 이 연구에서 제시하는 자료는 성간 분자운의 특성과 형성에 관한 더욱 구체적인 이후의 연구에 사용될 수 있을 것이다.

한편, 오리온 분자운은 $l = 208^{\circ}99''$, $b = -19^{\circ}38'$, 태양과의 거리는 470 pc, 그리고 은하 평면에서 150 pc 남쪽으로 아래에 위치하고 있다(Castets et al. 1990). 오리온 분자운은 Ori A, Ori B로 구성되어 있으며, Ori A 안에 위치하는 거대 분자운 OMC-1은 H II 영역과 분자운이 결합되어 있는 대표적인 예로 많은 연구가 되어지는 지역이다.

2. 관측과 결과

OMC-1 지역의 ¹²CO, ¹³CO, 그리고 C¹⁸O에 대한 관측은 대덕전파 천문대 13.7m 전파망원경으로 실시되었다. 관측 당시 수신기와 측정기의 기본 특성은 Song(1991)이 자세히 설명하였다. 관측 주파수는 ¹²CO($J = 1 - 0$)에 대해 115.271GHz, ¹³CO($J = 1 - 0$)에 대해 110.201GHz, 그리고 C¹⁸O($J = 1 - 0$)에 대해 109.782GHz이다.

C¹⁸O의 경우 관측기간은 1990년 10월 중순부터 1991년 2월 초순 동안 총 10일간 이루어졌으며, 총 누적 관측시간은 69.5시간이다. ¹²CO와 ¹³CO 관측은 1991년 2월 4일과 1월 2일 각각 하루씩 실시되었으며, 총 누적 관측시간은 각각 5시간, 8.5시간이다. 한 스펙트럼 당 적분 시간은 ¹²CO의 경우 120초 ¹³CO의 경우 160초이다. C¹⁸O의 경우는 적분 시간을 60초씩 주어 한 스펙트럼을 5~15번 관측하여 평균값을 취하였다. 그 이유는 C¹⁸O 분자선이 약하여 적분 시간을 많이 필요로 하기 때문에 망원경에 무리를 주지않으며 대기 변화에 따른 융통성 있는 관측을 수행하기 위함이다.

MAP 모드 관측 방법을 이용하여 적경 5^h32^m47^s, 적위 -5°24'23"에 두고 전체 11' × 11' 영역을 관측하였다. 태양과의 거리를 470 pc으로 잡으면 이때 각거리 1 arcmin은 실제 거리 0.13 pc에 해당되므로 1.43 pc × 1.43 pc 지역을 관측한 것이 된다. 관측점은 ¹²CO에 대해 121점, ¹³CO에 대해 111점, 그리고 C¹⁸O에 대해 93점이다.

OMC-1 지역의 ¹²CO, ¹³CO, 그리고 C¹⁸O에 대한 관측 결과를 표 1에 나타내었다. 자료는 순서대로 중심에 대한 상대적 위치, 방출선의 FWHM, 속도, 정점온도 (T_A^{*}), 적분 온도, 그리고 잡음 온도이다.

3. ¹²CO, ¹³CO, 그리고 C¹⁸O의 공간 분포

3.1 광학적 두께(τ)와 기둥밀도(column density)

광학적 두께(τ)와 기둥밀도(column density, N)는 Dickman(1976), Taylor(1989)의 방법을 이용하였으며, 다음과 같은 가정을 두었다. 즉, (a) 시선 방향에 따라서 여기온도 T_{ex}는 일정한 값을 갖는다. (b) ¹²CO의 광학적 두께는 매우 크다 ($\tau(^{12}\text{CO}) \equiv \tau_{12} \gg 1$). (c) 운동학적 온도 T_K와 함께 ¹²CO, ¹³CO, 그리고 C¹⁸O의 모든 전이는 국부적 열평형상태에 있다.

우선 ¹²CO에 대한 결과로부터 T_{ex}를 구한다. 식 (1)은 복사 전달 방정식을 나타낸다.

$$T_R = T_o [f(T_{ex}) - f(T_{BB})] (1 - e^{-\tau_o}) \quad (1)$$

여기서 $f(Z) = (e - 1)^{-1}$, T_R는 복사 온도, T_o = h ν / κ , T_{BB}는 2.7K 배경복사 온도이다.

¹²CO의 광학적 두께가 1보다 크다는 위 가정 (b)로부터 오른쪽 지수항이 제거되며, ¹²CO인 경우 T_R을 T_R¹²라고 식 (1)은 식 (2)와 같이 간단히 표현된다.

$$T_R^{12} = T_o^{12} [f(T_{ex}^{12}) - f(2.7)] \quad (2)$$

대덕전과 망원경의 경우 T_R = T_A^{*}/0.6으로 두며, ¹²CO인 경우 T_o¹² = 5.269이다. 따라서 여기온도는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_{ex}^{12} = \frac{5.269}{\ln(1 + (T_A^*/3.1614 + 0.166))} \quad (3)$$

식 (3)과 위 가정 (a)와 (c)를 적용하여 ¹³CO 그리고 C¹⁸O의 광학적 깊이 (τ_{13} , τ_{18})를 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\tau_o^{13} = -\ln [1 + 0.315 T_{A13}^* ((\exp(5.289/T_{ex}) - 1)^{-1} - 0.164)^{-1}] \quad (4)$$

$$\tau_o^{18} = -\ln [1 + 0.315 T_{A18}^* ((\exp(5.532/T_{ex}) - 1)^{-1} - 0.148)^{-1}] \quad (5)$$

표 1. 계속

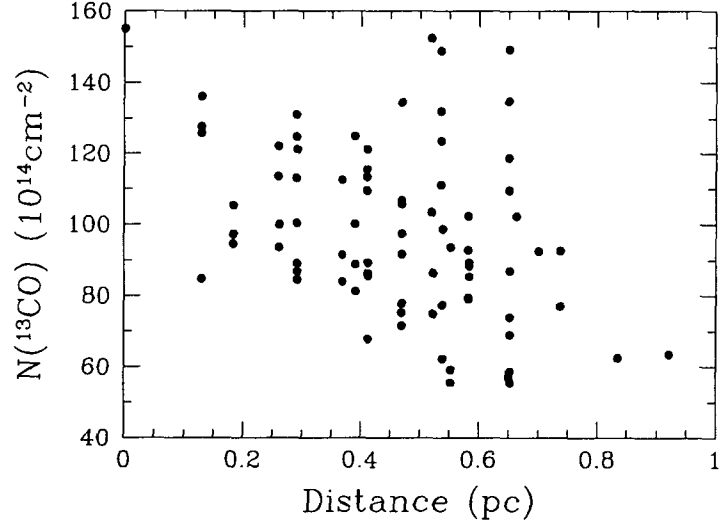
RA	DEC	¹² CO					¹³ CO					C ¹⁸ O				
		FWHM	VLSR	TA*	JTA*dv	(TA*)	FWHM	VLSR	TA*	JTA*dv	(TA*)	FWHM	VLSR	TA*	JTA*dv	(TA*)
-2.01	-5	5.10	9.70	19.82	100.61	0.46	4.50	9.90	4.19	18.75	0.28	-	-	-	-	-
-2.01	-4	5.40	9.70	20.74	111.62	0.52	2.60	11.30	4.09	10.50	0.33	1.80	11.70	0.42	0.77	0.09
-2.01	-3	4.80	8.40	25.66	124.08	0.53	2.30	11.30	4.09	9.45	0.33	4.40	9.00	0.67	2.91	0.15
-2.01	-2	4.90	8.40	26.82	130.60	0.73	3.10	8.60	4.27	13.31	0.34	0.80	9.00	0.61	0.48	0.11
-2.01	-1	4.40	8.40	25.88	113.93	0.61	3.90	8.60	4.11	15.95	0.30	3.00	8.30	0.38	1.16	0.08
-2.01	0	3.90	9.70	26.26	102.45	0.62	3.80	8.60	5.02	18.99	0.32	3.40	7.60	0.37	1.27	0.07
-2.01	1	3.80	9.70	23.77	91.51	0.58	4.20	9.00	5.85	24.43	0.32	6.20	9.70	0.41	2.54	0.11
-2.01	2	4.00	9.70	20.39	80.91	0.52	4.00	9.00	5.50	22.06	0.29	4.00	9.70	0.45	1.80	0.08
-2.01	3	4.10	9.70	19.16	77.66	0.45	3.50	9.00	5.70	20.17	0.32	4.30	9.70	0.45	1.94	0.07
-2.01	4	3.90	9.70	19.09	74.08	0.53	3.40	9.70	5.42	18.55	0.30	1.60	9.70	0.48	0.78	0.09
-2.01	5	3.90	9.70	17.54	68.38	0.43	-	-	-	-	-	4.70	9.70	0.40	1.88	0.12
-1.00	-5	5.40	9.00	28.57	154.73	0.69	3.80	9.90	5.55	20.95	0.38	-	-	-	-	-
-1.00	-4	5.70	9.00	29.86	169.20	0.65	3.90	9.90	5.36	20.77	0.33	3.10	11.00	0.55	1.72	0.09
-1.00	-3	5.80	8.40	30.76	177.48	0.70	4.30	9.90	4.76	20.32	0.36	4.50	7.60	0.55	2.50	0.07
-1.00	-2	6.00	8.40	34.33	204.67	0.54	5.50	8.60	5.01	27.55	0.34	2.20	7.60	0.74	1.65	0.09
-1.00	-1	5.40	8.40	34.57	185.03	0.47	4.10	8.60	4.47	18.23	0.37	4.40	6.20	0.59	2.59	0.14
-1.00	0	5.70	9.00	29.70	169.49	0.54	5.20	8.60	5.00	26.10	0.36	4.90	8.30	0.78	3.84	0.13
-1.00	1	4.80	9.70	27.28	131.47	0.50	3.20	9.00	6.22	20.08	0.27	2.60	9.00	0.48	1.21	0.11
-1.00	2	4.60	9.70	23.48	108.22	0.46	3.50	9.70	6.98	24.71	0.30	6.10	9.70	0.35	2.12	0.09
-1.00	3	4.10	9.70	21.59	89.48	0.43	3.50	9.70	6.77	23.74	0.39	3.70	9.00	0.78	2.92	0.07
-1.00	4	4.00	9.70	18.84	74.61	0.48	3.90	9.70	8.11	31.37	0.43	1.10	9.00	0.62	0.66	0.11
-1.00	5	3.70	10.30	19.02	70.79	0.45	-	-	-	-	-	3.10	9.70	0.67	2.08	0.09
0.00	-5	4.70	9.00	35.71	166.89	0.52	4.00	9.30	6.89	27.87	0.21	3.90	10.30	0.67	2.57	0.11
0.00	-4	4.80	9.00	34.78	168.58	0.60	3.50	9.30	9.33	32.76	0.23	2.20	9.00	0.65	1.40	0.11
0.00	-3	5.40	8.40	37.66	202.74	0.51	3.60	9.30	7.04	25.16	0.23	3.40	8.30	0.49	1.65	0.9
0.00	-2	5.20	9.00	39.28	206.04	0.59	4.20	8.60	5.94	25.08	0.26	6.30	6.90	0.43	2.75	0.10
0.00	-1	7.40	9.00	41.24	304.29	1.12	4.40	9.30	6.37	28.25	0.22	4.70	9.00	0.61	2.85	0.07
0.00	0	5.90	9.70	37.04	217.50	0.52	4.50	9.30	7.51	33.47	0.25	3.10	9.00	0.65	2.04	0.10
0.00	1	5.10	9.70	33.48	171.44	0.48	3.50	9.90	7.28	25.31	0.24	3.00	9.70	1.02	3.02	0.09
0.00	2	4.40	9.70	30.81	134.24	0.45	3.20	9.90	6.77	21.42	0.28	3.10	9.00	0.79	2.48	0.09
0.00	3	4.20	9.70	26.56	110.74	0.51	2.50	9.30	7.38	18.33	0.29	3.70	9.00	0.80	2.77	0.10
0.00	4	4.40	9.70	23.31	102.25	0.43	2.70	9.90	6.79	18.64	0.27	3.10	9.70	0.90	2.92	0.10
0.00	5	4.10	9.70	22.58	92.85	0.41	3.50	9.90	6.53	22.87	0.29	4.70	9.70	0.68	3.20	0.09

표 1. 계속

RA (OFFSET)	DEC (arcmin)	¹² CO				¹³ CO				¹⁸ O						
		FWHM	VLSR	TA*	JTA*dv	FWHM	VLSR	TA*	JTA*dv	FWHM	VLSR	TA*	JTA*dv			
1.00	-5	4.80	9.70	31.17	150.48	0.55	5.30	9.90	4.67	24.59	0.24	-	-	-		
1.00	-4	4.70	9.70	36.50	171.90	0.53	4.40	9.90	5.46	24.19	0.23	2.40	10.30	0.65	1.56	0.11
1.00	-3	4.70	9.00	33.22	157.38	0.60	3.50	9.90	6.27	21.97	0.25	1.60	9.70	0.49	0.79	0.06
1.00	-2	4.70	9.00	30.34	141.38	0.49	4.90	9.90	4.36	21.29	0.24	3.90	10.30	0.50	1.99	0.07
1.00	-1	5.30	9.70	33.21	175.31	0.51	4.30	9.90	3.97	16.96	0.23	3.50	4.90	0.22	0.78	0.09
1.00	0	4.30	9.70	36.89	158.69	0.62	3.70	9.90	3.64	13.47	0.24	6.40	9.70	0.33	2.09	0.08
1.00	1	4.40	9.70	34.31	151.72	0.48	2.60	9.90	6.28	16.19	0.27	1.60	13.80	0.56	0.89	0.17
1.00	2	4.20	9.70	33.95	142.37	0.44	2.80	9.90	6.40	17.80	0.26	4.30	9.70	0.73	3.15	0.09
1.00	3	4.50	9.70	28.11	125.34	0.43	3.00	9.30	7.36	21.99	0.27	3.10	9.70	1.08	3.32	0.11
1.00	4	4.00	9.70	27.52	110.27	0.43	3.10	9.90	8.61	26.51	0.25	3.10	9.70	0.76	2.33	0.12
1.00	5	4.10	10.30	23.00	94.21	0.39	2.80	9.90	6.55	18.33	0.33	2.30	10.30	0.69	1.55	0.09
2.01	-5	4.70	9.70	25.85	122.70	0.42	3.70	9.90	3.81	14.02	0.23	-	-	-	-	-
2.01	-4	4.50	9.70	35.00	155.96	0.51	4.40	9.30	4.35	18.94	0.23	3.20	9.70	0.39	1.26	0.09
2.01	-3	4.20	9.70	29.86	124.62	0.47	2.90	9.90	5.89	16.99	0.25	2.60	9.70	0.47	1.24	0.06
2.01	-2	4.50	9.70	29.69	133.19	0.40	2.90	10.60	5.09	14.65	0.24	3.40	19.90	0.25	0.84	0.09
2.01	-1	4.40	9.70	32.00	142.27	0.50	3.30	9.90	4.04	13.45	0.24	0.10	4.90	0.23	0.02	0.12
2.01	0	4.20	9.70	34.85	145.67	0.40	3.70	9.90	4.29	15.92	0.22	3.20	9.00	0.31	1.02	0.09
2.01	1	3.70	9.70	34.10	126.88	0.47	3.70	9.90	3.80	14.04	0.25	4.50	10.30	0.46	2.10	0.13
2.01	2	3.90	9.00	32.45	126.85	0.47	3.70	9.90	3.63	13.27	0.27	2.00	9.70	0.70	1.42	0.13
2.01	3	4.00	9.70	30.24	121.21	0.60	4.20	9.30	4.83	20.15	0.26	1.70	9.00	0.64	1.09	0.07
2.01	4	4.10	9.00	26.44	108.68	0.46	3.20	9.30	5.15	16.31	0.26	1.60	9.70	0.43	0.67	0.15
2.01	5	4.20	9.70	24.95	104.68	0.50	2.70	9.90	5.83	15.61	0.30	3.20	9.70	0.60	1.93	0.09
3.01	-5	4.00	9.70	24.57	98.01	0.51	4.00	10.60	2.91	11.67	0.22	-	-	-	-	-
3.01	-4	4.10	9.70	30.32	125.48	0.39	1.60	10.60	3.08	5.07	0.20	3.20	13.80	0.33	1.05	0.09
3.01	-3	3.80	9.70	35.15	133.30	0.54	3.70	10.60	4.08	15.23	0.21	1.10	10.30	0.69	0.78	0.09
3.01	-2	4.20	9.70	25.57	106.20	0.53	2.00	10.60	5.55	10.86	0.23	4.40	10.30	0.47	2.06	0.13
3.01	-1	4.50	9.70	31.68	142.56	0.75	3.60	9.90	4.05	14.70	0.24	4.10	10.30	0.44	1.82	0.12
3.01	0	4.00	9.70	28.64	114.78	0.57	3.90	9.90	3.75	14.60	0.22	2.50	11.00	0.47	1.17	0.10
3.01	1	4.70	9.70	21.02	98.98	0.59	3.20	9.90	2.76	8.80	0.22	5.30	7.60	0.27	1.44	0.11
3.01	2	4.40	8.40	21.13	93.93	0.54	5.30	6.50	2.48	13.25	0.22	3.40	1.50	0.27	0.92	0.12
3.01	3	4.10	9.00	17.09	70.73	0.57	2.60	9.30	2.36	6.02	0.20	3.00	10.30	0.36	1.08	0.09
3.01	4	3.60	9.70	20.77	75.55	0.45	2.50	9.90	2.42	5.95	0.24	8.50	6.90	0.28	2.41	0.12
3.01	5	3.80	9.70	21.16	80.77	0.48	2.10	9.90	2.10	4.43	0.19	1.10	10.30	0.27	0.29	0.08

표 1. 계속

RA (OFFSET)	DEC (arcmin)	¹² CO				¹³ CO				¹⁸ O					
		FWHM	VLSR	TA*	∫TA*dv	FWHM	VLSR	TA*	∫TA*dv	FWHM	VLSR	TA*	∫TA*dv		
4.02	-5	4.40	9.70	19.08	83.53	0.51	4.30	10.60	2.03	8.79	0.21	-	-	-	-
4.02	-4	4.10	9.70	24.21	98.22	0.58	3.80	10.60	2.83	10.63	0.25	0.70	11.70	0.25	0.18
4.02	-3	3.90	9.70	26.66	104.83	0.57	2.30	10.60	3.61	8.43	0.24	4.40	9.70	0.46	2.02
4.02	-2	4.00	9.70	25.63	102.20	0.73	3.00	10.60	4.63	13.75	0.22	5.00	10.30	0.52	2.61
4.02	-1	3.90	9.70	26.66	102.88	1.16	1.80	10.60	3.58	6.58	0.23	1.20	11.00	0.25	0.30
4.02	0	4.00	9.70	25.53	103.32	0.82	3.90	10.60	2.61	10.06	0.26	5.10	1.30	0.29	1.46
4.02	1	5.90	8.40	19.84	116.36	0.58	4.70	9.90	2.43	11.43	0.21	4.60	7.60	0.46	2.14
4.02	2	4.80	8.40	19.88	94.93	0.61	4.30	7.20	3.79	16.34	0.24	4.20	9.70	0.49	2.08
4.02	3	4.70	9.00	13.39	62.62	0.49	4.20	7.20	2.15	8.97	0.22	4.20	9.00	0.27	1.10
4.02	4	0.30	9.70	12.03	53.50	0.48	4.60	9.90	1.88	8.72	0.25	-	-	-	-
4.02	5	3.80	9.70	14.15	54.35	0.45	3.70	9.90	1.98	7.34	0.24	2.90	10.30	0.31	0.92
5.02	-5	5.10	9.70	13.64	70.15	0.50	5.40	9.90	1.40	7.63	0.20	2.70	10.30	0.18	0.49
5.02	-4	-	-	-	-	-	2.40	11.30	1.99	4.83	0.26	-	-	-	-
5.02	-3	4.10	9.70	21.16	87.46	0.73	1.50	10.60	2.26	3.43	0.28	-	-	-	-
5.02	-2	4.30	9.70	21.52	91.66	0.61	4.00	10.60	3.88	15.51	0.29	-	-	-	-
5.02	-1	5.10	9.70	21.61	110.92	0.55	2.60	10.60	3.65	9.47	0.25	-	-	-	-
5.02	0	5.30	9.70	19.16	102.22	0.54	4.30	10.60	2.98	12.76	0.25	3.00	18.50	0.33	0.98
5.02	1	5.10	8.40	19.57	99.09	0.49	4.30	7.20	2.90	12.32	0.24	-	-	-	-
5.02	2	4.50	7.70	17.44	78.57	0.44	6.60	7.20	2.41	15.89	0.25	-	-	-	-
5.02	3	3.90	9.00	14.07	55.30	0.46	5.70	7.90	2.01	11.35	0.22	-	-	-	-
5.02	4	4.20	9.70	18.59	78.97	0.57	4.80	9.30	1.98	9.55	0.24	-	-	-	-
5.02	5	4.10	9.70	9.80	40.13	0.45	3.60	9.90	2.22	7.97	0.22	-	-	-	-

그림 1. OMC-1의 중심거리에 대한 $N(^{13}\text{CO})$ 의 분포.

그러면, 이 τ_{13} 와 τ_{18} 을 적분하여 기둥밀도를 ^{13}CO 그리고 C^{18}O 에 대해 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 각각 (N_{13} , N_{18}) 구할 수 있다.

$$N_{13} = \frac{3h\Delta V}{8\pi^3\mu^2} \frac{2T_{ex}^{13}}{T_0^{13}} \tau_0^{13} \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{T_0}{T_{ex}}\right)} \quad (6)$$

$$N_{18} = \frac{3h\Delta V}{8\pi^3\mu^2} \frac{2T_{ex}^{18}}{T_0^{18}} \tau_0^{18} \frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{T_0}{T_{ex}}\right)} \quad (7)$$

한편, 광학적 두께와 기둥밀도에 대한 오차는 Talyor(1989)의 방법에 따라 구하였다. 표 2에 관측된 각 위치에 대한 여기 온도, 광학적 깊이를 나타내었으며, 표 3은 관측된 각 위치에 대해 계산된 기둥밀도 값을 보여준다. ^{13}CO 의 광학적 두께는 0.1 ~ 0.4, 기둥밀도는 $5.5 \times 10^{15} \sim 1.5 \times 10^{16} (/cm^2)$ 의 값을 나타내었다. C^{18}O 의 경우, 광학적 두께는 0.01 ~ 0.03, 기둥밀도는 $1.0 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15} (/cm^2)$ 의 값을 가지는 것으로 계산되었다.

3.2 OMC-1의 중심거리에 대한 ^{12}CO , ^{13}CO , 그리고 C^{18}O 의 분포

OMC-1의 중심거리에 대한 ^{13}CO , 그리고 C^{18}O 의 계산된 기둥밀도 분포를 그림 1, 그림 2에 나타내었다. 그리고 그림 3에 ^{13}CO 와 C^{18}O 의 계산된 기둥밀도비를 중심거리에 대해 나타내었다.

OMC-1내에서 중심으로 갈수록 ^{13}CO 가 ^{12}CO 에 대해 어떠한 분포 차이가 있는지 알아보기 위해서 관측으로부터 유도된 ^{13}CO 와 C^{18}O 의 계산된 기둥밀도비에서 $[^{12}\text{CO}]/[^{13}\text{CO}]$ 의 값을 결정하였다. 즉, 관측에서 유도된 기둥밀도비 $N(^{13}\text{CO})/N(\text{C}^{18}\text{O})$ 의 역수는 $[^{12}\text{C}][^{18}\text{O}]/[^{13}\text{C}][^{16}\text{O}]$ 와 같이 표현되며, 지구에서 결정되는 $[^{18}\text{O}]/[^{16}\text{O}]$ 값 1/490을 적용하면 식 (8)과 같은 등식이 성립된다.

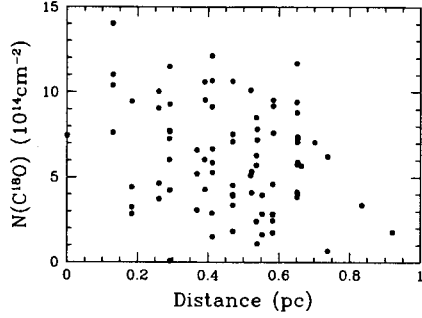
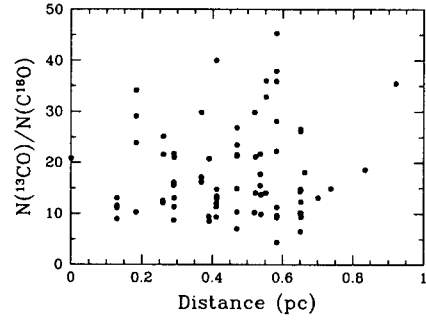
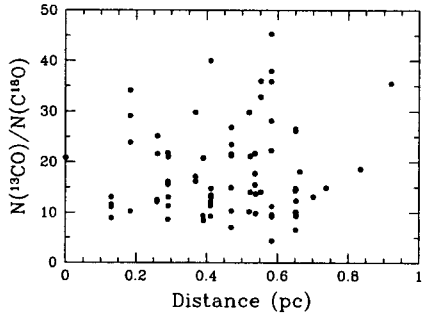
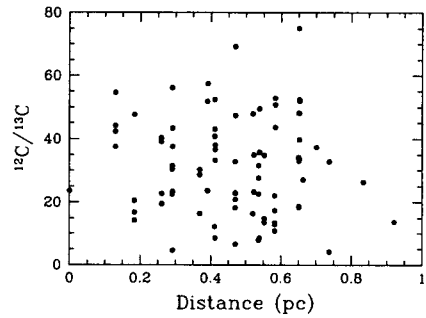
표 2. ^{13}CO 그리고 C^{18}O 의 여기온도와 광학적 두께.

RA	Dec	T_{ex}	τ_{13}	τ_{18}	τ_{13}	τ_{18}	RA	Dec	T_{ex}	τ_{13}	τ_{18}	τ_{13}	τ_{18}
OFFSET	OFFSET	(K)	ERROR				OFFSET	OFFSET	(K)	ERROR			
(arcmin)	(arcmin)						(arcmin)	(arcmin)					
-5.02	0	19.45	0.18	0.01	0.02	0.05	0.00	3	30.06	0.34	0.03	0.01	0.09
-4.02	-3	18.02	0.20	0.02	0.02	0.05	0.00	4	26.80	0.26	0.03	0.01	0.09
-4.02	-2	18.37	0.24	0.04	0.02	0.12	0.00	5	26.06	0.36	0.03	0.02	0.07
-4.02	0	23.54	0.22	0.02	0.01	0.54	1.00	-4	40.02	0.55	0.01	0.01	0.15
-4.02	1	22.16	0.43	0.03	0.03	0.09	1.00	-3	36.73	0.31	0.01	0.01	0.07
-4.02	2	19.85	0.38	0.03	0.03	0.09	1.00	-2	33.85	0.21	0.01	0.01	0.08
-4.02	3	18.26	0.27	0.02	0.03	0.05	1.00	-1	36.72	0.18	0.00	0.01	0.11
-4.02	4	17.90	0.33	0.02	0.04	0.06	1.00	0	40.41	0.16	0.01	0.01	0.11
-3.01	-4	19.01	0.40	0.02	0.02	0.06	1.00	1	37.83	0.41	0.01	0.01	0.21
-3.01	-2	24.14	0.38	0.01	0.02	0.05	1.00	2	37.46	0.32	0.02	0.01	0.12
-3.01	-1	25.41	0.17	0.01	0.01	0.06	1.00	3	31.61	0.33	0.04	0.01	0.12
-3.01	0	24.79	0.29	0.02	0.02	0.07	1.00	4	31.02	0.30	0.03	0.01	0.12
-3.01	1	25.01	0.35	0.02	0.02	0.06	1.00	5	26.49	0.22	0.03	0.02	0.08
-3.01	2	23.46	0.36	0.02	0.02	0.06	2.01	-4	38.52	0.22	0.01	0.01	0.11
-3.01	3	19.80	0.43	0.01	0.03	0.06	2.01	-3	33.37	0.40	0.01	0.01	0.07
-3.01	4	17.84	0.39	0.03	0.04	0.06	2.01	-2	33.20	0.33	0.01	0.01	0.10
-2.01	-4	24.22	0.25	0.01	0.02	0.07	2.01	-1	35.51	0.18	0.00	0.01	0.13
-2.01	-3	29.16	0.11	0.02	0.01	0.14	2.01	0	38.37	0.18	0.01	0.01	0.11
-2.01	-4	30.32	0.22	0.02	0.02	0.11	2.01	1	37.61	0.16	0.01	0.01	0.16
-2.01	-1	29.38	0.22	0.01	0.01	0.08	2.01	2	35.96	0.12	0.01	0.01	0.16
-2.01	0	29.76	0.24	0.01	0.02	0.06	2.01	3	33.74	0.26	0.02	0.01	0.08
-2.01	1	27.26	0.47	0.02	0.02	0.09	2.01	4	29.94	0.42	0.01	0.01	0.14
-2.01	2	23.87	0.48	0.02	0.02	0.06	2.01	5	28.45	0.10	0.02	0.01	0.08
-2.01	3	22.63	0.52	0.02	0.03	0.05	3.01	-4	33.83	0.10	0.01	0.01	0.10
-2.01	4	22.56	0.64	0.02	0.03	0.07	3.01	-3	38.67	0.17	0.01	0.01	0.12
-1.00	-4	33.36	0.31	0.02	0.01	0.10	3.01	-2	29.07	0.27	0.00	0.01	0.08
-1.00	-3	34.27	0.20	0.02	0.01	0.08	3.01	-1	35.19	0.15	0.01	0.01	0.14
-1.00	-2	37.85	0.35	0.01	0.01	0.12	3.01	0	32.14	0.17	0.01	0.01	0.11
-1.00	-1	38.09	0.24	0.01	0.01	0.17	3.01	1	24.50	0.15	0.01	0.01	0.08
-1.00	0	33.20	0.40	0.02	0.02	0.14	3.01	2	24.61	0.11	0.01	0.01	0.10
-1.00	1	30.78	0.65	0.01	0.02	0.11	3.01	3	20.55	0.17	0.01	0.01	0.05
-1.00	2	26.97	0.45	0.01	0.02	0.07	3.01	4	24.25	0.13	0.01	0.01	0.08
-1.00	3	25.08	0.39	0.04	0.03	0.05	4.02	-4	27.70	0.09	0.01	0.01	0.08
-1.00	4	22.31	0.32	0.03	0.03	0.08	4.02	-3	30.16	0.13	0.01	0.01	0.10
0.00	-5	39.23	0.24	0.01	0.01	0.14	4.02	-2	29.13	0.17	0.01	0.01	0.10
0.00	-4	38.30	0.27	0.02	0.01	0.14	4.02	-1	30.16	0.14	0.00	0.01	0.09
0.00	-3	41.18	0.20	0.02	0.01	0.12	4.02	0	29.03	0.11	0.01	0.01	0.08
0.00	-2	42.80	0.18	0.01	0.01	0.14	4.02	1	23.31	0.09	0.02	0.01	0.07
0.00	-1	44.77	0.17	0.02	0.01	0.11	4.02	2	23.36	0.23	0.01	0.01	0.10
0.00	0	40.56	0.25	0.02	0.01	0.14	4.02	3	16.82	0.15	0.02	0.02	0.03
0.00	1	37.00	0.34	0.03	0.01	0.12	4.02	5	17.59	0.12	0.01	0.02	0.04
0.00	2	34.32	0.23	0.02	0.01	0.10	5.02	-5	17.08	0.09	0.01	0.02	0.03

표 3. ^{13}CO 그리고 C^{18}O 의 기동밀도와 기동밀도 비.

RA	Dec	$N(^{13}\text{CO})$	$N(\text{C}^{18}\text{O})$	$N(^{13}\text{CO})$	$N(\text{C}^{18}\text{O})$	*	RA	Dec	$N(^{13}\text{CO})$	$N(\text{C}^{18}\text{O})$	$N(^{13}\text{CO})$	$N(\text{C}^{18}\text{O})$	*
OFFSET				ERROR			OFFSET				ERROR		
(arcmin)		(10^{14}cm^{-2})		(10^{14}cm^{-2})			(arcmin)		(10^{14}cm^{-2})		(10^{14}cm^{-2})		
-5.02	0	55.46	5.88	7.87	0.61	9.43	0.00	3	100.16	10.59	3.80	0.79	9.45
-4.02	-3	86.86	7.05	3.33	1.05	12.32	0.00	4	103.46	10.12	3.04	1.01	10.22
-4.02	-2	88.38	9.17	3.01	2.22	9.64	0.00	5	118.79	11.69	4.96	1.11	10.16
-4.02	0	86.35	4.09	2.57	8.80	21.10	1.00	-4	123.58	5.70	1.98	1.83	21.69
-4.02	1	98.71	7.20	5.08	1.49	13.72	1.00	-3	115.53	2.89	1.46	0.77	40.03
-4.02	2	89.21	20.42	11.82	1.95	4.37	1.00	-2	113.06	7.27	3.46	1.26	15.55
-4.02	3	73.95	7.27	7.77	1.26	10.17	1.00	-1	97.37	2.85	2.99	1.43	34.17
-4.02	4	92.58	6.21	8.82	1.82	14.91	1.00	0	84.72	7.63	5.49	1.10	11.10
-3.01	-4	149.3	5.74	2.99	2.35	26.14	1.00	1	94.58	3.25	1.55	1.61	29.09
-3.01	-2	134.42	1.83	1.65	1.35	73.59	1.00	2	100.41	11.51	4.03	0.96	8.73
-3.01	-1	85.51	1.50	1.45	0.81	57.10	1.00	3	113.43	12.13	2.95	1.20	9.35
-3.01	0	81.20	9.53	4.44	1.07	8.52	1.00	4	131.99	8.51	2.75	1.32	15.51
-3.01	1	86.24	5.84	3.80	0.83	14.75	1.00	5	102.33	5.66	2.67	0.96	18.07
-3.01	2	91.68	3.91	3.49	0.91	23.45	2.01	-4	102.37	4.60	2.68	1.39	22.24
-3.01	3	59.16	1.64	1.79	1.32	35.99	2.01	-3	97.48	4.53	2.35	0.67	21.52
-3.01	4	109.62	4.13	3.80	1.58	26.56	2.01	-2	91.53	3.07	2.95	0.96	29.83
-2.01	-4	79.03	2.81	2.21	0.83	28.09	2.01	-1	84.46	0.08	0.09	1.40	105.28
-2.01	-3	75.22	10.63	5.17	1.29	7.08	2.01	0	93.60	3.73	2.62	1.22	25.12
-2.01	-4	79.42	1.75	0.96	1.23	45.30	2.01	1	86.78	7.67	4.03	1.75	11.31
-2.01	-1	88.99	4.24	3.26	1.17	21.00	2.01	2	83.99	5.19	1.97	1.75	16.19
-2.01	0	100.01	4.64	4.02	0.92	21.56	2.01	3	106.76	3.98	1.64	1.11	26.81
-2.01	1	121.18	9.28	7.06	1.63	13.06	2.01	4	92.84	2.45	1.48	1.71	37.93
-2.01	2	112.59	6.58	4.15	1.22	17.12	2.01	5	92.47	7.05	3.45	0.84	13.12
-2.01	3	105.74	7.09	5.04	0.86	14.92	3.01	-4	56.80	3.84	2.37	0.54	14.81
-2.01	4	102.41	2.85	1.75	1.16	35.94	3.01	-3	93.63	2.85	0.88	1.23	32.86
-1.00	-4	111.18	6.28	3.74	1.30	17.69	3.01	-2	77.79	7.53	3.64	0.60	10.34
-1.00	-3	109.55	9.13	5.93	1.07	12.00	3.01	-1	89.18	6.65	3.61	1.64	13.41
-1.00	-2	131.04	6.03	2.78	1.86	21.74	3.01	0	88.81	4.27	2.02	1.48	20.78
-1.00	-1	97.26	9.46	5.89	2.01	10.28	3.01	1	67.79	5.26	4.21	1.22	12.89
-1.00	0	125.79	14.03	6.31	2.44	8.97	3.01	2	71.59	3.36	2.66	2.42	21.30
-1.00	1	105.41	4.42	2.46	1.29	23.85	3.01	3	55.54	3.95	2.12	0.81	14.08
-1.00	2	124.74	7.74	6.69	1.12	16.11	3.01	4	57.46	8.80	7.55	0.89	6.53
-1.00	3	121.22	10.67	5.26	0.87	11.36	4.02	-4	76.96	0.66	0.66	1.31	117.04
-1.00	4	148.88	2.41	1.67	1.61	61.75	4.02	-3	68.98	7.38	3.77	0.86	9.35
0.00	-5	134.74	9.39	2.97	1.60	14.35	4.02	-2	88.27	9.53	3.97	1.13	9.26
0.00	-4	152.47	5.11	1.84	1.44	29.81	4.02	-1	62.28	1.10	0.97	0.61	56.83
0.00	-3	124.92	6.03	2.79	1.15	20.72	4.02	0	74.89	5.33	4.71	1.27	14.04
0.00	-2	122.09	10.05	5.89	1.49	12.15	4.02	1	77.32	7.82	3.49	1.68	9.89
0.00	-1	136.12	10.41	3.74	1.20	13.07	4.02	2	85.33	7.60	3.63	2.14	11.23
0.00	0	155.04	7.45	2.85	1.65	20.80	4.02	3	58.62	4.02	3.31	1.08	14.59
0.00	1	127.64	11.03	2.54	1.18	11.57	4.02	5	62.50	3.36	2.58	1.11	18.60
0.00	2	113.54	9.06	3.14	1.04	12.53	5.02	-5	63.55	1.79	1.97	1.32	35.50

* $N(^{13}\text{CO})/N(\text{C}^{18}\text{O})$

그림 2. OMC-1의 중심거리에 대한 $N(\text{C}^{18}\text{O})$ 의 분포.그림 3. OMC-1의 중심거리에 대한 $N(\text{C}^{18}\text{O})$ 의 분포.그림 4. OMC-1에서의 여기 온도(T_{ex})에 따른 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 변화.그림 5. OMC-1 내에서의 중심거리에 대한 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 변화.

$$^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 490 (\text{관측에서 유도된 기동밀도비}, N(^{13}\text{CO})/N(\text{C}^{18}\text{O}))^{-1} \quad (8)$$

OMC-1에 대해 관측된 기동밀도비로부터 계산된 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 는 2 ~ 60사이의 값을 나타내었다. 그림 4는 계산된 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 와 관측 지점의 여기 온도 T_{ex} 에 대한 관계를 보여준다. 여기 온도 10K에서 50K 범위에서 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 온도에 따르는 변화는 거의 나타나지 않음을 볼 수 있으므로, OMC-1 내에서의 온도의 변화는 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 분포에 크게 영향을 미치지 않는 듯이 보인다. 그림 5에 관측된 지점들의 OMC-1내의 중심거리에 대한 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 분포를 나타내었다. 중심 거리에 대한 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 변화의 뚜렷한 기울기는 나타나지 않는다. 한편, 이러한 중심 거리에 대한 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 분포는, 그림 4에서 여기 온도의 변화에 대한 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 의 종속성이 없다는 결과에 따라, 온도와 무관한 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 실제 존재량의 비일 것으로 여겨진다.

4. 요약

대덕전파 천문대 13.7m 전파망원경을 이용하여 오리온 분자운 OMC-1에 대해 $11' \times 11'$ 영역의 ^{12}CO , ^{13}CO , 그리고 C^{18}O 에 대한 관측을 MAP 모드로 실시하였다. ^{13}CO 로부터 여기 온도 T_{ex} 를 구

하고, ^{13}CO 와 C^{18}O 의 광학적 두께와 기둥밀도를 계산하였다. ^{13}CO 의 광학적 두께는 0.1 ~ 0.4, 기둥 밀도는 $5.5 \times 10^{15} \sim 1.5 \times 10^{16} (/cm^2)$ 의 값을 나타내었으며, C^{18}O 의 경우, 광학적 두께는 0.01 ~ 0.03, 기둥밀도는 $1.0 \times 10^{14} \sim 2 \times 10^{15} (/cm^2)$ 의 값을 가지는 것으로 계산되었다. ^{13}CO 와 C^{18}O 의 존재량 비를 통해 ^{12}C 와 ^{13}C 의 존재량 비를 계산하였다. $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 는 OMC-1 내의 온도의 변화에 따른 차이가 나타나지 않음을 볼 수 있었으며, 또한 OMC-1의 중심거리에 대한 뚜렷한 변화도 보이지 않았다.

참고문헌

- Castets, A., Duvert, G., Dutrey, A., Bally, J., Langer, W. D., & Wilson, R. W. 1990, AA, 234, 469
 Dickman, R. L. 1976, ApJS, 37, 407
 Irvine, W. M. 1991, in Chemistry in Space, eds. J. M. Greenberg and V. Pirronello (Dordrecht: Kluwer), 1
 Langer, W. D., & Penzias, A.A. 1990, ApJS, 69, 241
 Rolfs, C. 1977, in CNO Isotope in Astrophysics, ed. J. Audouze (Dordrecht: Reidel), 133
 Song, H. J. 1991, MSc Thesis, Yonsei University
 Taylor, D. K. 1989, PhD Thesis (University of Massachusetts)
 Turner, B. E., & Ziurys, L. M. 1988, in Galactic and Extragalactic Radio Astronomy, ed. G. L. Verschuur and K. I. Kellermann (New York: Springer-Verlag), 1
 Wannier, P. G. 1989, in IAU Symposium 136, ed. M. Morris (Dordrecht: Kluwer), 107
 Weinreb, S., Barrett, A. H., Meeks, M. L., & Henry, J. C. 1963, Nature, 200, 829