

초기형 별 방향 성간운의 CO 와 H₂ 비율 계산

박재우^{1,2†}, 이대희², 민경욱¹
¹한국과학기술원 물리학과
²한국천문연구원 우주과학연구부

CO TO H₂ RATIO OF INTERSTELLAR MOLECULAR CLOUDS IN THE DIRECTIONS OF EARLY TYPE STARS

Jae-Woo Park^{1,2†}, Dae-hee Lee², and Kyoung-Wook Min¹

¹Dept. of physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

²Space Science Division, Korea Astronomy Observatory, Daejeon 305-348, Korea

E-mail: yharock9@space.kaist.ac.kr

(Received October 20, 2004; Accepted November 30, 2004)

요 약

FUSE(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer)를 이용해 7개의 초기형 별 방향에 존재하는 CO 흡수선을 관측했다. BEFS(Berkeley Extreme and Far-ultraviolet Spectrometer)로 관측한 54개의 초기형 별들 중에서 이번 논문에서는 시선방향으로 1개의 성간운만 존재하는 7개의 별(HD 37903, HD 97991, HD 149881, HD 156110, HD 164794, HD214080, HD 219188)들을 선택해서 분석했다. CO 분자의 분석을 위해 자외선 영역에서 수소분자의 흡수선에 의해 가려지지 않는 E-X(0-0)(1076Å) 흡수선이 있는지 확인했으며 그 결과 3개의 별 방향에 존재하는 성간운에 대해서 CO 흡수선이 있는 것을 발견했다. 그 흡수선의 분석을 통해 성간운에 존재하는 CO의 기동밀도를 구했고, 이번 논문에서의 결과와 이전에 구했던 수소분자의 기동밀도로부터 CO분자와 수소분자 사이의 비율(CO to H₂ ratio)을 계산할 수 있었다.

ABSTRACT

We present measurements of interstellar CO absorption lines in the spectra of 7 early-type stars that were observed with the FUSE(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer). Among 54 early-type target stars in the Galactic disk and halo observed with the BEFS(Berkeley Extreme and Far-ultraviolet Spectrometer), we choose 7 program stars (HD 37903, HD 97991, HD 149881, HD 156110, HD 164794, HD 214080 and HD 219188) which have only a single velocity component in the high-resolution optical measurements, in order to avoid line blending. To analyze the CO molecule, we select the E-X (0-0) band at 1076 Å, which has a large oscillator strength and is not blended with other interstellar absorption lines. We detect the CO absorption lines in three (HD 37903, HD 164794, and HD 214080) out of seven targets, and derive CO column densities for those targets. We also estimated the CO to H₂ ratios toward the three stars, based on the previously estimated H₂ column densities.

Keywords: ultraviolet astronomical observations, molecular clouds, H₂ clouds

[†]corresponding author

1. 서 론

우주에 존재하는 성간운의 대부분은 중성 수소원자나 수소분자가 차지하고 있다. 21cm 전파를 방출하여 관측이 용이한 수소원자에 비해 수소분자는 뜨겁고 짙은 별에서 방출되는 자외선에 의해 만들어지는 광해리지역(PDR; Photo-Dissociation Region)에서의 형광 방출을 제외하면 흡수선 관측만이 가능하다. 하지만 성간운내의 물리적 특성을 밝히는 데는 분광학적 특성상 수소분자의 관측이 필수적이다.

한편 CO는 성간운에서 수소분자 다음으로 많이 존재하는 분자이며, 전파영역에서의 다양한 관측이 이미 수행되어 왔다. 지금까지의 연구들은 동일한 영역에 대해 CO와 수소분자선을 동시에 관측한 경우가 드물었고, 특히 자외선 영역에서의 연구는 활발하지 못했다. 그러나 van Dishoeck & Black(1988)이 제시한 CO의 원자외선의 흡수선 스펙트럼을 보면, 913에서 1077Å 사이의 총 33개의 밴드 중에서 마지막 33번째 밴드(1076.079Å)가 수소 원자와 분자의 흡수선 사이에서도 관측이 가능한 것처럼 보인다. Richter et al.(1999)은 이 흡수선들 중 1088Å의 C-X band를 LMC(Large Magellanic Cloud)내의 목표물에서 관측하였으나 단지 CO의 최대 한계값만을 설정해주었다. 이후 자외선 영역에서의 성간운 연구를 통해 몇몇 성간운의 CO 기동밀도나 물리적 특성을 연구하는 일들이 늘어났지만(Sonnentrucker et al. 2003), 아직까지도 하늘에 존재하는 모든 성간운에 대한 자외선 관측과 CO 흡수선에 대한 분석은 미결과제로 남아있다.

이 연구에서는 밝고 짙은 7개의 별의 관측을 통해 그 시선방향에 존재하는 성간운에 대해 CO(E-X band: 1076Å) 흡수선이 있는지 분석하였다. CO 흡수선 분석을 위해 FUSE(Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) 위성의 archive 자료를 이용하였고, 7개의 별들에 대해 스펙트럼을 분석한 결과 그 중 3개의 별(HD37903, HD164794, HD214080)에 대해 CO 흡수선이 있는 것을 확인했다. 이 흡수선의 분석을 통해 CO의 기동밀도(column density)를 구했고 이로부터 직접적인 CO와 H₂의 비(CO to H₂ ratio) 값을 얻었다.

2. 관측 대상

강한 UV의 방출선은 짙고 뜨거운 O, B형별로부터 방출되며 수소의 분자선을 관측하려면 이런 짙은 별들이 수소분자운의 뒤에 존재해야 한다. Copernicus 위성을 통해 비교적 가까운 별들의 수소 분자선 관측이 이루어졌고(Savage et al. 1977), 보다 멀리 있는 별들에 대한 관측이 ORFEUS를 통해 수행되었다(Hurwitz & Bowyer 1995). ORFEUS가 관측한 56개의 뜨겁고 짙은 O, B형별들 중에서 시선 방향으로 한 개의 성간운 성분만 존재하는 별들을 선정하였고(Walborn 1982), 선정된 별의 특성을 표 1에 요약했다. 이 별들을 선정한 이유는 이 별들의 시선방향에 한 개의 성간운만 존재하여(Walborn 1982) 몇 개의 요소로 구성된 성간운보다 분석이 쉽고, 자외선 영역에서의 해당 성간운에 대한 수소분자선의 분석결과를 가지고 있어 이전의 연구결과와 비교가 가능하기 때문이다(Lee et al. 2001).

3. 분석 과정

FUSE는 2개의 검출기를 갖고 있으며 각각의 검출기는 2개의 영역으로 나누어져 있다(Moss et al. 2000). 각 영역에 따라 관측할 수 있는 파장대역이 다르며 CO(1076Å) 흡수선의 관측을 위해 1aLiF

표 1. 선정된 별의 물리적 특성 요약.

Star	l (deg)	b (deg)	Spectral Type	E(B-V)	d (pc)	Log N(H I)(cm ⁻²)	Reference*
HD37903	206.85	-16.54	B1.5V	0.35	470	21.20	DS94
HD97991	262.34	+51.73	B2.0V	0.01	824	20.64	A83,DS94
HD149881	31.38	+36.23	B0.5III	0.07	2139	20.62	DS94,SF95
HD156110	70.99	+35.71	B3Vn	0.03	567	<20.68	F94
HD164794	6.01	-1.20	O4V((f))	0.35	1585	21.29	DS94,H97
HD214080	44.80	-56.92	B1.0Ib	0.05	3381	20.61	DS94,H97
HD219188	83.03	-50.17	B0.5III	0.08	2379	20.75	F94,KDM82

* A83- Albert(1983); DS94- Diplas & Savage(1994); F94- Fruscione et al.(1994);

H97- Howarth et al.(1997); KDM82- Keenan et al.(1982); SF95- Spitzer & Fitzpatrick(1995)

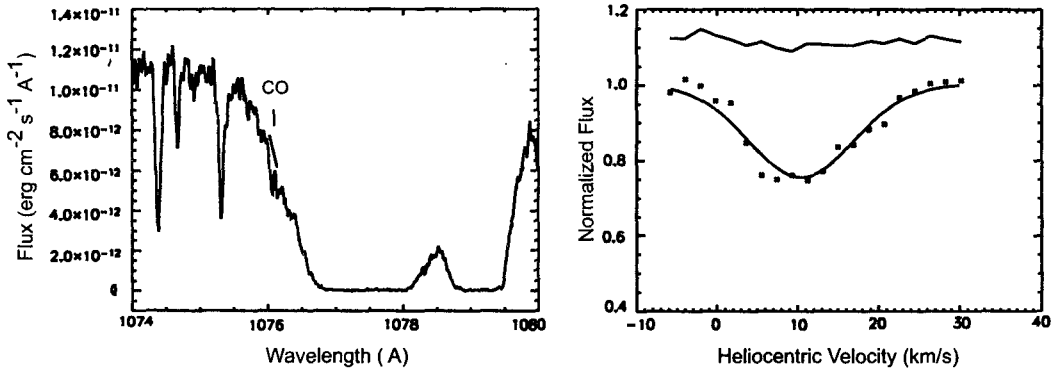


그림 1. CO 흡수선이 관측된 것 중 HD37903방향 성간운의 스펙트럼(좌)과 CO(1076Å) 흡수선(우)에서의 도플러 속도 분포. 우측 그림은 흡수선분석을 위해 규격화과정을 거친 것으로 성간운내의 CO 성분의 적색편이를 확인할 수 있다.

로 끝나는 FITS(Flexible Image Transport System) 파일들을 선택했다. a는 segment A를 1aLiF는 segment A 중 LiF1인 것을 의미하며, 1aLiF의 파장역역은 987.1 ~ 1082.3Å으로서 CO(1076Å) 흡수선 영역을 포함한다.

이렇게 선택한 FITS 파일들을 읽어보면 파장, 세기, 표준편차 등의 정보를 얻을 수 있다. 대개 동일한 방향에 대해 3번에서 4번 정도 관측되었다. FUSE 데이터의 경우 대략적인 파장의 눈금조정이 이미 되어있지만, 미세한 오차를 여전히 포함하고 있다. 따라서 여러 번의 관측결과를 함께 분석하려면 하나의 관측 자료를 기준으로 다른 관측 자료들의 파장을 정밀하게 보정해 주어야한다. 이를 위해 correlation 방법을 사용하여 흡수선의 중앙값이 일치하도록 하였다. 그 후 각각의 관측시간에 해당하는 factor를 곱하여 여러 번의 관측을 통합한 하나의 스펙트럼을 만들었고, 이로부터 CO(1076Å) 흡수선 근방의 스펙트럼을 얻었다(그림 1).

연속스펙트럼 설정을 위해서 보통 Lee et al.(2001)과 같이 분광형이 비슷한 다른 별의 스펙트럼을 사용하지만, CO 흡수선의 경우 H₂ 흡수선 영역에 묻혀 있기 때문에 이런 방법을 사용하기 힘들

표 2. 등가폭 및 CO와 H₂의 비.

Star	Log N(H ₂)	W(CO) mÅ	Log N(CO)	N(CO)/N(H ₂)
HD37903	20.89 ± 0.03	13.5 ± 8.9	14.0 ± 0.2	0.1 ± 10 ⁻⁶
HD164794	20.01 ± 0.01	10.01 ± 7.8	13.9 ± 0.2	0.8 ± 10 ⁻⁶
HD214080	18.38 ± 0.02	3.3 ± 2.8	13.4 ± 0.3	10.5 ± 10 ⁻⁶

다. CO 흡수선(1076Å) 근방의 1074.4 ~ 1078.0Å 영역에는 CO와 수소분자의 흡수선 외에 다른 성간 흡수선들은 존재하지 않는다(van Dishoeck & Black 1988). 수소흡수선이 해당영역의 스펙트럼에 가장 많은 기여를 하기 때문에 수소흡수선을 연속스펙트럼의 기준으로 설정하였다. 그림 1에서는 대표적으로 HD37903의 스펙트럼과 CO흡수선 주변의 연속스펙트럼 설정과정을 보여준다. 수소흡수선의 전체 연속스펙트럼중 CO흡수선 근처만을 그렸다. 표준편차도 마찬가지로 각각의 FITS 파일의 표준편차를 이용하여 총 표준편차를 계산하였고, 흡수선분석을 위해 CO(1076Å) 흡수선을 연속스펙트럼으로 나누는 것으로 규격화 과정을 수행하였다.

이렇게 규격화된 스펙트럼을 통해 CO의 기동밀도(N(CO))를 구해야 하는데, 일반적으로 자주 사용하는 방법인 χ^2 최소화방법을 시도 했으나, fitting 과정에서 어려움이 있었고 대신 등가폭(equivalent width)이 기동밀도에 비례한다는 사실을 이용하였고, 이때 비례계수는 Sonnentrucker et al.(2003)을 참고하였다.

4. 분석 결과

이렇게 해서 얻은 등가폭과 CO의 기동밀도를 정리한 것이 표 2에 나와 있다. H₂의 기동밀도는 동일한 관측천체에 대해 구해진 ORFEUS 분석 결과를 이용하였다(Lee et al. 2001). 표 2에서 W(CO)는 CO 흡수선의 등가폭을 의미한다.

이번 연구의 결과를 Copernicus 관측을 통해 얻어진 Federman et al.(1980)의 결과와 비교하기 위해, 이들의 결과와 이번 연구의 결과를 함께 그려보았다(그림 2). 그림 2에서 볼 수 있듯이 HD37903의 경우 일반적인 경향성을 약간 벗어나 예측 값 보다 작은 것을 보인다.

5. 결 론

이상에서 성간운을 이루고 있는 가장 대표적인 두 가지 분자인 수소와 일산화탄소의 흡수선 분석을 통해 그 양이 얼마나 되는지를 계산했고 이를 통해 CO와 H₂간의 비를 구하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 자외선 영역에 흡수 및 방출선이 모두 존재하는 수소분자 연구의 경우 자외선 관측의 어려움으로 인해 상당부분 추측이나 간접적인 방법에 머물러 있었다.

또한 일산화탄소의 경우 전파영역에서는 그 연구가 활발하였으나 자외선 영역에서는 수소분자선에 묻혀 관측이 어려웠으나 CO(1076Å) 흡수선을 통해 수소분자선과의 직접적인 비교가 가능했다. 일산화탄소의 양은 수소분자의 양에 크게 영향을 받는다는 것이 알려졌고, 이 논문에서도 수소분자의 양이 증가하면 CO분자의 양도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 좀 더 정확히 이야기하면 CO의 기동밀도는 대략적으로 수소분자의 기동밀도의 제곱에 비례한다(Federman et al. 1980). 또

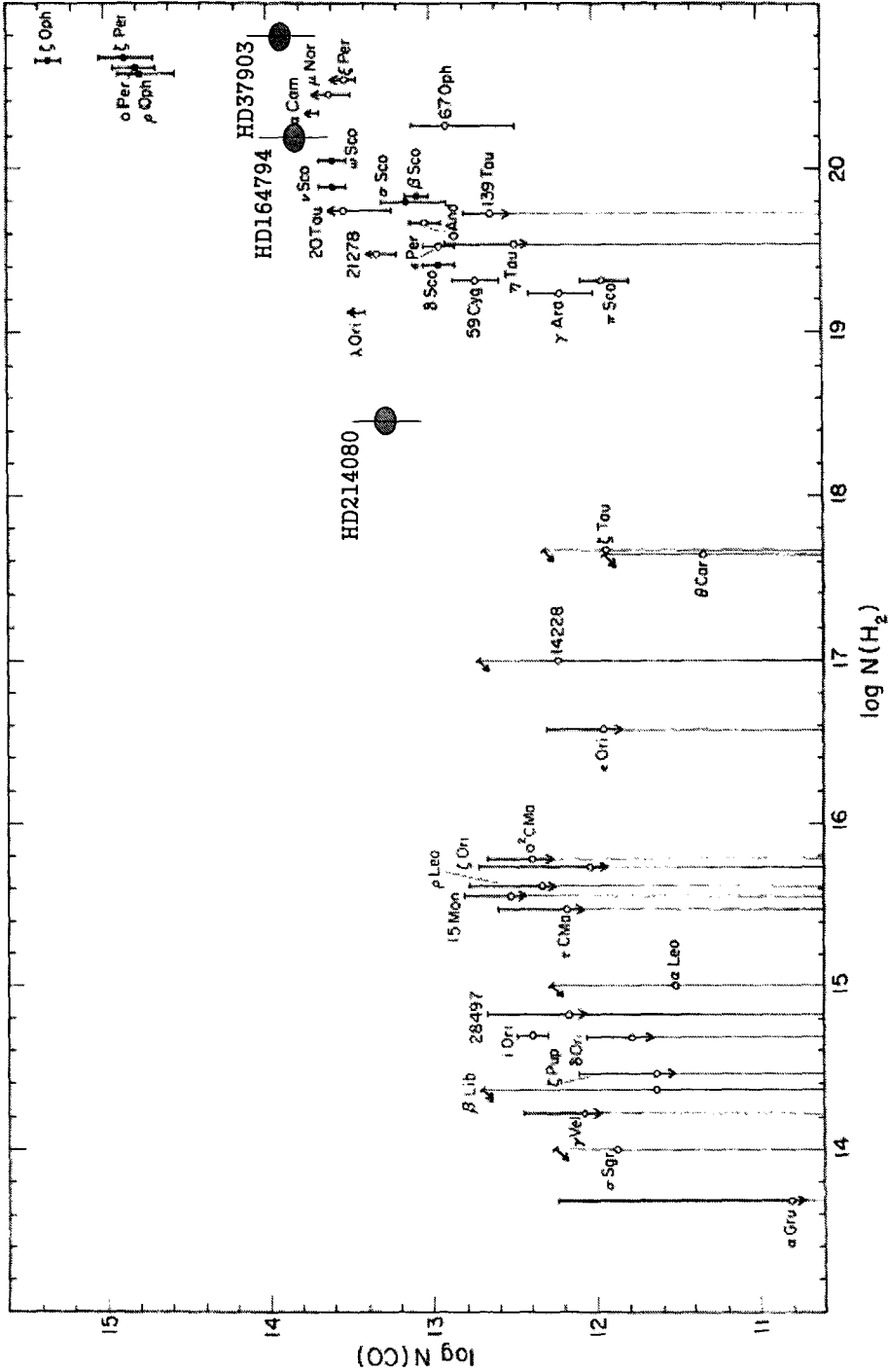


그림 2. 이번 연구의 결과와 Ferderman et al.(1980)의 결과 비교. 작은 원이나 큰 원으로 표시한 것이 Ferderman et al.(1980)의 결과이며 우측 상단의 별 모양으로 표시한 것이 이 연구를 통해 측정된 값이다. 세로선들은 오차를 표시하며 우측의 실선은 Ferderman et al.(1980)의 결과 값들이 가지는 대략적인 경향성을 그려본 것이다.

한 Ferdermal et al.(1980)에 의하면 일반적으로 수소분자의 기둥밀도가 10^{19}cm^{-2} 이상일 때 CO는 거의 예외 없이 관측된다고 했다. 이 논문에서 선정한 별의 경우 HD164794와 HD37903은 예측대로 CO흡수선이 관측되었으나, HD156110과 HD219188의 경우는 수소분자의 기둥밀도가 10^{19}cm^{-2} 이상임에도 불구하고 CO가 관측되지 않았다. 관측한 CO나 수소분자의 기둥밀도에 영향을 주는 다른 요소로는 성간운 뒤에 놓인 별빛의 세기, 성간운의 온도, 그리고 성간운내의 먼지의 양을 대변하는 색지수 등이 있으며 이들과의 관련성도 조사를 해야 한다. 실제로 수소분자의 양이 같음에도 불구하고, CO의 양이 다른 경우를 이론적인 계산으로서 확인 가능하다(Sakamoto 1996).

이 논문에서는 그러한 구체적인 연구에 앞서 몇몇 성간운의 CO와 H₂의 비를 직접적으로 구했으며 그 자체로 많은 의미를 가진다고 하겠다. 앞으로 보다 많은 성간운의 CO와 H₂의 비율 계산을 통해 둘 사이의 상관계수를 보다 구체적으로 구해내야하며 성간운 특성의 보다 정밀한 분석을 위해 앞서 이야기한 값들 서로간의 상호관계 또한 분석할 예정이다.

감사의 글: 이 논문의 수정과 편집에 도움을 주신 심사위원들께 감사를 드립니다.

참고문헌

- Albert, C. E. 1983, *ApJ*, 272, 509
- Diplas, A., & Savage, B. D. 1994, *ApJS*, 93, 211
- Ferderman, S. R., Glassgold, A. E., Jenkins, E. B., & Shaya, E. J. 1980, *ApJ*, 242, 545
- Fruscione, A., Hawkins, I., Jelinsky, P., & Wiercigroch, A. 1994, *ApJS*, 94, 127
- Howarth, I. D., Siebert, K. W., Hussain, G. A., & Prinja, R. K. 1997, *MNRAS*, 284, 265
- Hurwitz, M., & Bowyer, S. 1995, *ApJ*, 446, 812
- Keenan, F. P., Dufton, P. L. & McKeith, C. D. 1882, *MNRAS*, 200, 673
- Lee, D. H., Min, K. W., Federman, S. R., Ruy, K. S., Han, W. Y., Nam, U. W., Chung, H. S.,
Dixon, W. V., & Hurwitz, M. 2002, *ApJ*, 575, 234
- Moos, H. W. et al. 2000, *ApJL*, 538, L1
- Richter, P., Boer, K. S., Bomans, D. J., Chin, Y. N., Heithausen, A., & Koornneef, J. 1999, *ApJ*,
351, 323
- Sakamoto, S. 1996, *ApJ*, 462, 215
- Savage, B. D., Bohlin, R. C., Drake, J. F., & Budich, W. 1997, *ApJ*, 216, 291
- Sonnentrucker, P., Friedman, S. D., Welty, D. E., York, D. G., & Snow, T. P. 2003, *ApJ*, 596, 350
- Spitzer, L., & Fitzpatrick, E. L. 1995, *ApJ*, 445, 196
- van Dishoeck, E. F., & Black, J. H. 1988, *ApJ*, 334, 771
- Walborn, N. R. 1982, *ApJS*, 48, 145