

초신성 잔해 HB3와 인접 분자운의 다파장 전파관측
MULTI-FREQUENCY RADIO OBSERVATIONS OF MOLECULAR CLOUDS
IN THE IMMEDIATE VICINITIES OF HB3

김광태¹, 이창원²

¹충남대학교 천문우주과학과

²하버드 스미소니언 천체물리 센터

KIM, KWANG-TAE¹, LEE, CHANG-WON²

¹Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University

²Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics

(Received November 20, 1998; Accepted December 11, 1998)

ABSTRACT

The structure and environments of the molecular clouds near the SNR HB3(G132.7+1.3) are studied. The molecular complex which is located at the southern rim of HB3 was proposed by former investigators as the one interacting with HB3. This complex region of $2^\circ \times 2^\circ$ at $l = 133^\circ$ has been observed at ^{12}CO , ^{13}CO , $J = 1 - 0$ at a $1'$ resolution with the 14-m radio telescope at Taeduk Radio Astronomy Observatory. We have reached to the following four conclusions. The possibility that these molecular complex and HB3 are interacting with each other cannot be supported with any of our data. The morphologies of the two show no similarities. Neither particular features for the interaction are found in the CO lines. The hypothetical "Molecular wall" which was expected to exist on the northwestern rim of HB3 as a cause for the noncircular morphology of HB3 is turned out to be nonexistent in CO. The molecular complex which resembles a "bar" at a low resolution is now resolved into a U-shaped shell. It seems that the U-shape is consist of two independent components. No peculiarities, such as unseen masses or bright stars capable of forming HII regions, are found within the U-shape region. The total mass included in the complex is estimated to be $M_{\text{total}} = 2.9 \sim 8.4 \times 10^5 M_\odot$, which is in good agreement with previous observations within errors. Considering about 12 clumps distinguishable within the complex, the total mass implies that masses of each of clumps are on the order of $10^4 M_\odot$, which makes these good objects for further studies in relation to star-formation. Especially the clumps associated with W3 are worthy for more high resolution observations for better understanding of astrophysical phenomenon ongoing in them.

I. 서 론

본 논문에서는 초신성 잔해 (SNR) HB3(G132.7+1.3)에 인접한 분자운에 과연 이 SNR이 어떤 영향이 미치고 있는가를 분자선 관측을 통해서 연구하였다. HB3은 잘 알려진 비열적 전파원이기 때문에 그동안 이루어진 대부분 연구는 비열적 연속전파 관측을 통해서 수행되었다. 이에 비해 분자선 방출은 약하고 또 국부적인 영역에 한정되었기 때문에 분자선 관측 연구는 그동안 상대적으로 미흡한 상태에 그쳤다. 본 연구를 시작했던 시점에서 볼 때 CO 분자선 관측으로는 콜롬비아대학교의 8' .7 보다 좋은 분해능으로 관측된 바 없었다(Lada et al. 1978; Huang & Thaddeus 1986).

그 동안의 관측 결과를 요약하면 다음과 같다. HB3은 90' × 123' 의 크기를 가진 대형 천체에 속하며 22 - 2695 MHz에 걸친 spectrum은 그 지수가 $\alpha = 0.6 \pm 0.04$ 로서 전형적인 비열적 천체이다(Green 1988). 이는 고위도에 위치한 천체로서 (적경 02^h 16^m 30^s, 적위 62° 10' 0") 전파간섭계 관측의 용이함 때문에 오랜 동안 주목을 받아왔다. 거리는 2.2 ± 0.2 kpc에 위치하였고, 팽창속도는 $10 - 20$ km s⁻¹ 정도로서 $5 - 7.5 \times 10^5$ 년 정도의 나이를 가진 것으로 알려져 있다(Landecker et al. 1987). X-ray를 통해 본 이 SNR의 모습은 또한 이색적이다. 약 30 pc 반경의 작은 ring이 있고 밖에는 전파로 관측되는 HB3의 영역에까지 희미한 강도의 X-ray가 연속적으로 방출된다. 온도는 중심부가 가장 뜨겁고 바깥으로 갈수록 식어서 HB3가 아직 adiabatic phase에 있는 것이 아닌가라는 추측을 일으킨다. 나이는 물론 30,000-40,000년으로 adiabatic phase에 있다고 보기에는 매우 늦었다. 여기서 중성자성은 아직 발견되지 않았다(Venkatesen et al. 1984, Leahy et al. 1985, Seward 1990). 연속파로 관측된 HB3의 모양은 고구마 형태로 길쭉하다. 전형적인 SNR가 원형이라고 볼 때, 형태는 주변의 성간운과의 상호작용을 암시해 주는 것으로 추측된다 (Routledge et al. 1991).

이 SNR의 특별한 점은 주변에 인접한 분자운이 존재하여 초신성 잔해와 작용할 가능성이 있는 몇 안되는 좋은 천체 중의 하나라는 점이다. 초신성 잔해뿐 아니라 HII 영역, 그에 따른 주변 물질과의 작용 등으로 근처의 분자운은 인접 영역과의 상호 관계를 연구하기에는 좋은 표본이다. HB3의 주변은 약 7° × 3° 에 걸쳐 별탄생, HII 영역, 분자운, 최근에는 "galactic chimney" 현상이 발견된 곳이기도 해서 (Normandeau, Taylor & Dewdney 1996) 은하 평면 중 발견되는 다양하고도 강한 활동성을 보여주는 영역 중의 하나이다. 이 영역에는 여러 개의 거대 분자운들이 위치해 있는데 이들과 더불어 밝은 HII 영역인 W3, W4, W5와 산개성단인 OCL 352, OCL 364 등의 다양한 천체들이 있어 이 분자운들에 다양한 천체물리학적 환경을 드러내 주고 있다 (van den Bergh et al. 1973, Fesen & Gull 1983; Huang & Thaddeus 1986).

HB3 인근주변에 펼쳐진 분자운의 관한 이해는 비교적 복잡하다. HB3와 가장 가까운 분자운은 W3를 포함하는 것으로서 기존 관측에서는 (Huang & Thaddeus 1986) 약 2° × 2° 에 걸쳐 위치하며 velocity gradient가 8 km s⁻¹ 정도 나타나는 것으로 보아 회전하는 것이 아닌가 추측되고 있다. 특별히 W3는 IRAS를 통해서 연구한 결과 grain이 상당량 deplete되어 있고 여러 개의 작은 IRAS 천체가 발견된다. W3 자체에서는 H₂O 가 발견되었으며 CH₃OH 도 발견되었다. 또한 HB3의 filaments와 H_α의 상관성 연구에서는 CO의 속도와 H_α의 속도가 같게 나오는 것으로 미루어 분자운은 HB3와 실제 연관되어 있다는 심증을 굳혀 준다. 실제로 HB3와 W3가

같은 거리에 있고 HB3는 분자운의 먼쪽, 말하자면 뒷쪽에서 터져서 팽창하는 것으로 보는 것이 일반적인 연구의 결과이다 (Landecker et al. 1987; 이 논문에 제시된 모형을 참조).

이런 가능성에도 불구하고 HB3가 주변의 분자운과 작용하고 있다는 뚜렷한 증거는 아직까지는 얻어진 바 없다. 그러는 가운데 최근에는 다른 SNR과는 달리 HB3는 그 주변의 여러 가지 HII 영역과 분자운과의 상호작용으로 말미암아 매우 복잡한 구조를 가지고 있으며 인접 분자운과 상호작용하고 있다는 관측 결과가 발표됨으로서 보다 자세한 연구, 특별히 분자선 관측이 요구되게 되었다 (Routledge et al. 1991).

이에 따라 본 논문은 HB3와 상호작용하고 있다고 여겨지는 $l = 133^\circ$ complex의 약 $2^\circ \times 2^\circ$ 정도의 영역에 대하여 기존의 관측보다 분해능이 좋은 ^{12}CO 과 ^{13}CO 분자선 관측을 수행하여 분자운의 자세한 morphology 및 상호작용의 증거를 연구하였다. 특히 HB3의 incomplete circle 모양이 주변의 분자운과의 상호작용의 결과인지를, 특히 원형이 되지 못한 북쪽 부분에 분자운의 존재 여부를 CO 관측을 통해서 밝혀 보았다.

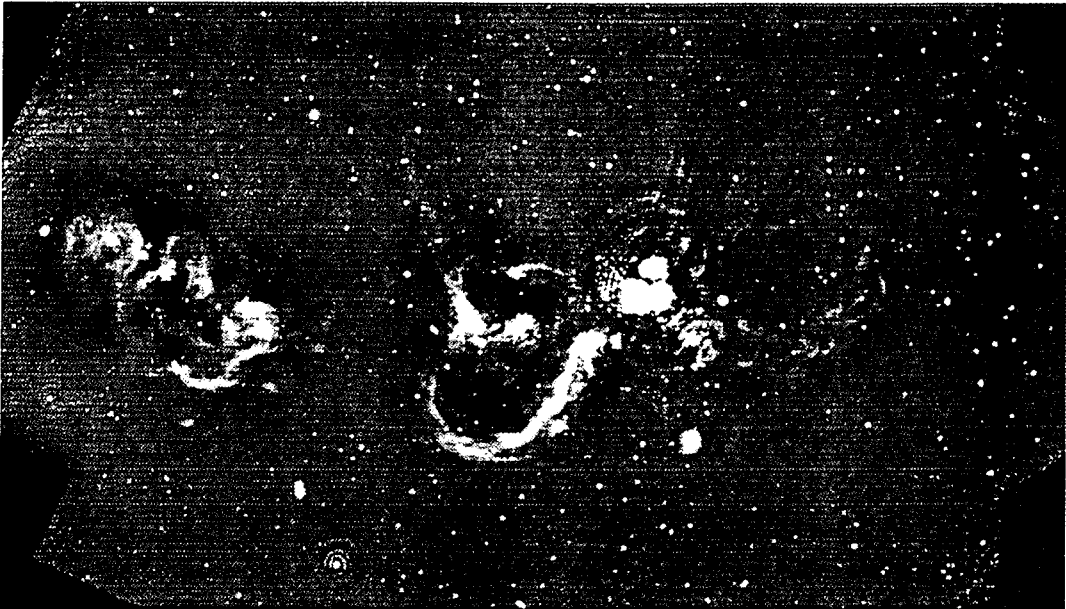


그림 1. 캐나다 DRAO의 1' 분해능 간섭계로 1420 MHz에서 관측된 HB3와 그 인접 영역의 모습이다 (Normandeau et al. 1993). 그림에 나타난 영역은 $8^\circ \times 4.5^\circ$ 의 크기이고, map 중심은 $l \approx 135^\circ$ 이다. 여기서 HB3는 맨 오른쪽의 회미하게 보이는 shell인데, 거기서부터 좌측으로 W3, W4, W5가 보인다. W3를 중심으로 해서 볼 때 W4와 HB3는 마치 나비 벡타이 같이 보인다. HB3는 회미하게만 보인다. 본 논문에서는 W3를 중심으로 $2^\circ \times 2^\circ$ 영역을 ^{13}CO 에서 $53''$ 의 분해능으로 대덕전파천문대의 14-m 전파망원경을 사용하여 mapping 하였다.

II. 관측과 데이터

1. 관측

본 연구에서 관측한 천체는 HB3 하단에 위치한 인접 분자운 ($l \sim 133^\circ$ complex)이다. 관측은 1995년 10월 23일부터 11월 18일까지 ^{13}CO $J = 1 - 0$ 선에 대하여 $2'$ 격자로 대덕전파천문대 (TRAO)에서 관측하였다. 그중 1997년 11월 10일부터 6일 사이에는 표본 영역으로 ^{13}CO $J = 1 - 0$ 가 강하게 방출되는 도합 89개의 위치를 선정하여, 이에 대하여 ^{12}CO $J = 1 - 0$ 선 관측을 수행하였다. 이 data는 ^{13}CO 의 optical depth를 산출하는 데에 사용하였다. 이제부터 $J = 1 - 0$ 는 생략한다.

최근 FCRAO (Five College Radio Astronomy Observatory)에서는 본 영역을 포함하여 $l \sim 104^\circ \sim 140^\circ$, $b \approx -3^\circ \sim 5^\circ$ 에 걸친 방대한 영역을 ^{12}CO 에서 Query 방식을 사용하여 $1'$ grid 관측을 완료하였다(Heyer 1998). 따라서 이 영역에 대한 ^{12}CO data는 FCRAO data를 사용하여 충분한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 1에는 관측 천체를 포함한 보다 넓은 영역을 캐나다 DRAO의 간섭계로 관측된 연속전파 map 으로 보였다. 그림 2에 보인 것은 FCRAO에서 관측된 ^{12}CO 광역 survey의 전체 모습이다.

당시의 기상은 전체적으로 양호했으며 사용하였던 SIS 수신기 및 기기도 안정되어 데이터에 오류라든가 다른 문제는 없었다. 특히 ^{12}CO 관측시 수신기 상태는 더욱 양호하였다.

대덕전파망원경은 ^{12}CO 와 ^{13}CO 에서 beam size가 각각 $53''$ 과 $55''$ 이며, beam efficiency는 각각 0.46, 0.47이다. 그 밖의 자세한 관측 제원은 표 1에 요약하였다.

2. 데이터

관측해서 얻는 데이터는 통상 사용하는 SPA (Single Dish Data Reduction Program)을 사용하여 reduction 처리하였다. 이 자료를 천체물리학적으로 분석할 때에는 대부분 AIPS(Astronomical Image Processing System)와 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility)를 사용하였다.

관측된 spectrum의 평균 noise level은 ^{12}CO 와 ^{13}CO 에서 각각 0.2 K, 0.1 K이다.

III. 관측 결과

1. Line Intensity Maps

그림 3a에는 $-55 \leq V_{\text{LSR}} \leq -33 \text{ km s}^{-1}$ 속도 범위에 포함된 ^{13}CO line intensity 값들을 누적하여 관측 영역에 해당하는 integrated intensity map을 그려 보였다. 그림에 표시된 아라비아 숫자는 편이상 독립된 개개의 덩어리로 볼 수 있는 성분들로 인정되는 것들로서 은위가 높은 것에서 낮아지는 순서에 따라 번호를 매긴 것이다. 번호를 가진 덩어리는 모두 12 개다. 이들이

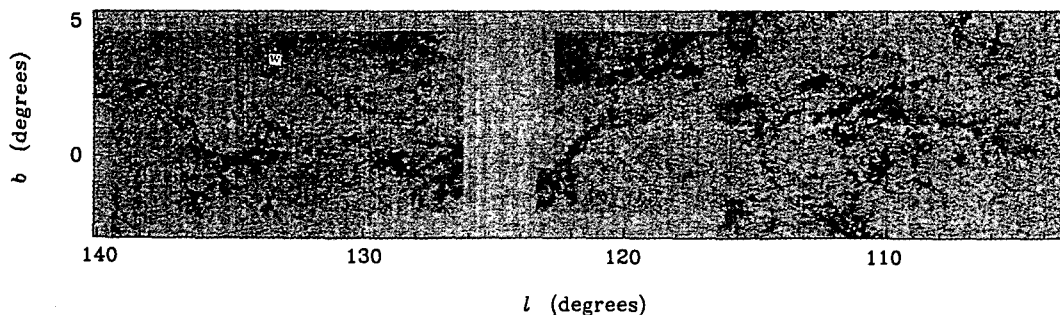


그림 2. 미국 FCRAO의 14-m 전파망원경의 다중 beam Quarry를 사용하여 ^{12}CO 에서 1' 분해능으로 관측된 $l \approx 104^\circ \sim 140^\circ$, $b \approx -3^\circ \sim 5^\circ$ 방대한 영역의 모습이다(Heyer 1998). 본 관측 영역은 ^{12}CO 에서 마치 한자 “문”자를 옆으로 비스듬이 누운 모습으로 보인다. 특히 “molecular wall”로 기대되었던 영역에는 (w로 표시) 미약한 ^{12}CO 의 띠가 보이긴 하지만 그 방향은 기대하는 것과는 전혀 일치하지 않는다.

표 1. The Observation Parameters of the TRAO 4-m Telescope

Item	Specifications
Observing Date	October 23th ~ November 18th 1995 ^{13}CO November 10th ~ November 16th 1995 ^{12}CO
Lines	^{13}CO J = 1 - 0 ^{12}CO J = 1 - 0
Receiver	SIS
T_{sys}	380 ~ 500 K
Resolution	55" at ^{13}CO 53" at ^{12}CO
Beam Efficiency	0.47 at ^{13}CO 0.46 at ^{12}CO
Spectrograph	256 channels \times 250 KHz
Velocity Resolution	0.7 km s $^{-1}$
Sampling rate	2' \times 2' grid
RMS Temperature	~ 0.1 K

만드는 전체적인 형태가 흥미롭게도 말굽형태의 shell인 것은 쉽게 알아볼 수 있다. 그림 3b에는 peak intensity를 그려 보였다. 전체 구조는 중국글자 “문 (door)”을 비스듬히 놓은 듯하다.

표 2에는 12 개 분자운 성분에 대한 위치 (은경, 은위와 RA와 Dec)와 T_A^* , 선폭 ΔV , 그리고 속도 V_{LSR} 들을 종합하여 기재했다.

이들의 선폭은 $1 - 4 \text{ km s}^{-1}$ 정도로 비교적 넓은 것들이다. 특별히 번호 3과 4 덩어리들은 W3에 연관된 CO 성분으로서 W3의 활동성을 대변하듯이 비교적 넓은 선폭을 보여 준다. 선폭이 4 km s^{-1} 정도가 되는데 상당한 질량이 내포되었음을 시사하고 있다.

2. Channel Maps

그림 4에 그려 보인 것은 channel map이다. 전체 속도 구간은 $-55.3 \leq V_{LSR} \leq -32.9 \text{ km s}^{-1}$ 이었으며 이를 2.1 km/s 간격으로 누적하여 11 개의 구간으로 나누어 전체적인 윤곽이 잘 보이도록 전체 적분한 grey scale 위에 contour level로 그렸다. Channel map 맨 처음 그림에 층층해 놓은 contour map은 독일 Max Planck 연구소의 Effelsberg 전파망원경으로 2695. MHz에서 관측된 연속전파 (continuum radiation) map이다 (Fürst et al 1991). 허와 같은 모양으로 우하단으로 길게 빠져 나온 continuum 성분의 최외각 contour를 몇 개의 channel map에 중첩하여 보였다.

이 연속전파 성분이 과연 horse-shoe shaped shell과 어떤 연관성이 있는가? 연속전파는 속도 정보가 없기 때문에 공간적으로 같은 위치에 있는지는 확인할 수 없다. 그러나 이들은 많은 별의 탄생과 산개성단의 복합체인 W3에서 발생하는 연속전파일 가능성이 가장 짙다. 이 때문에

표 2. The Observed Properties of 12 CO Clumps

Comp. No.	l	b	RA (h, m, s)	Dec ($^{\circ}$, $'$, $''$)	T_A^* (K)	ΔV (km s^{-1})	V_{LSR} (km s^{-1})
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
1	133.73	1.32	02 22 22	61 57 56	3.9	3.2	-41.1
2	133.43	1.23	02 19 38	61 59 25	1.8	2.2	-40.4
3	133.70	1.20	02 21 43	61 51 48	3.5	4.8	-40.2
4	133.93	1.07	02 23 09	61 38 54	3.9	4.6	-46.8
5	133.47	1.00	02 19 17	61 45 22	2.6	3.7	-42.8
6	133.20	1.00	02 17 10	61 50 46	2.2	1.7	-42.4
7	133.00	0.80	02 15 02	61 43 17	2.5	2.3	-42.4
8	134.20	0.77	02 24 22	61 16 52	4.9	2.9	-49.3
9	134.03	0.73	02 22 58	61 18 33	3.0	1.9	-47.6
10	134.00	0.43	02 21 43	61 01 54	2.0	2.6	-47.7
11	133.33	0.37	02 16 36	61 12 18	1.8	3.6	-51.9
12	133.63	0.13	02 18 15	60 52 32	2.7	1.9	-49.6

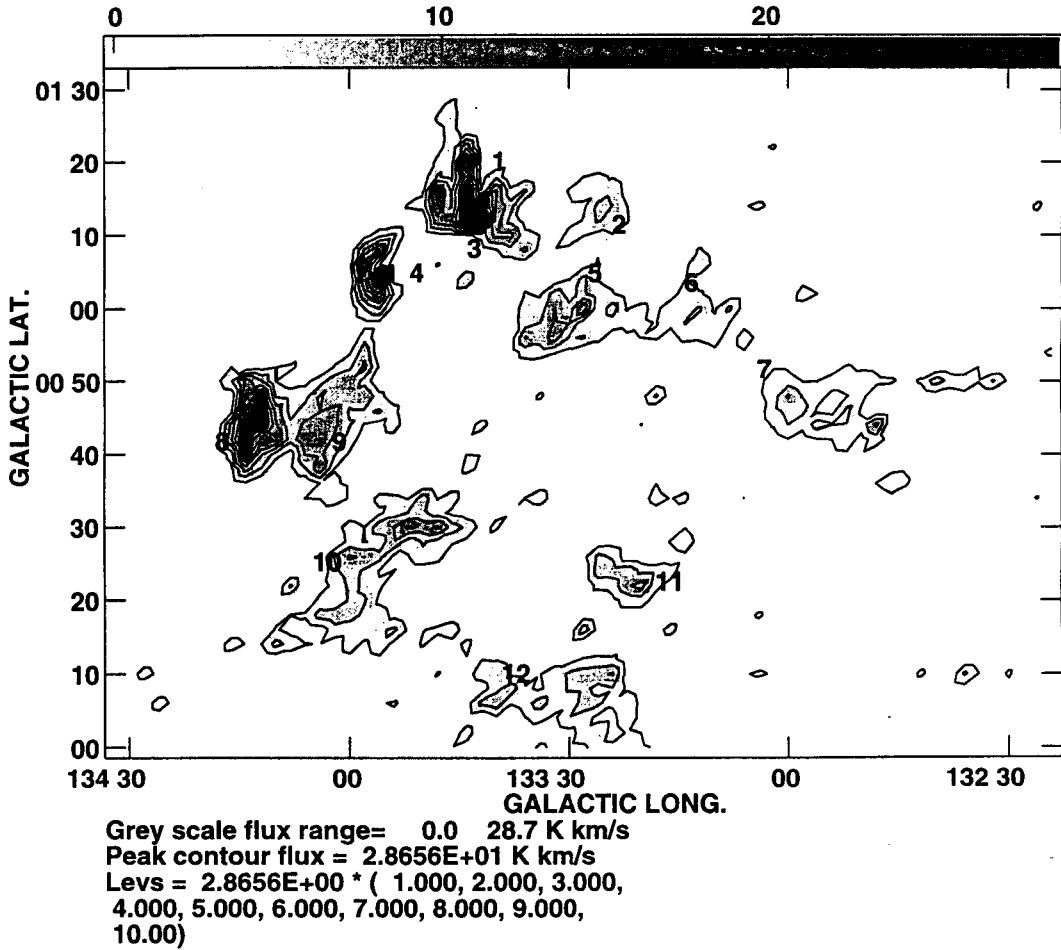


그림 3a. 속도범위 $-55 \leq V_{LSR} \leq -33 \text{ km s}^{-1}$ 에 포함된 ^{13}CO 의 integrated intensity map이다. 표시된 아라비아 숫자는 독립된 개개의 덩어리로 볼 수 있는 성분들로서 은위가 높은 것에서 낮아지는 순서에 따라 번호를 매겼으며 모두 12 개이다. 이들이 만드는 전체적인 형태는 Routledge et al (1991)이 가정했던 것과 같은 “bar”가 아니라 흥미롭게도 shell인 것은 볼 수 있다.

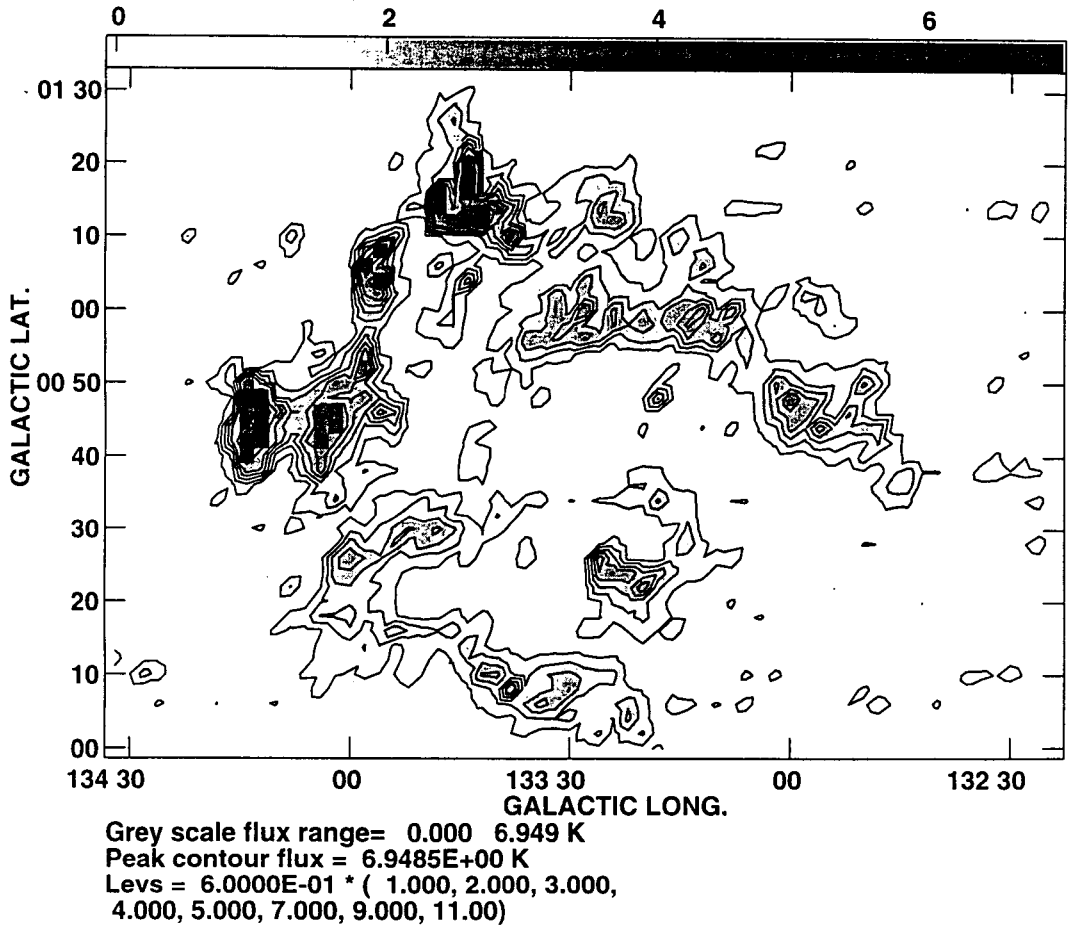
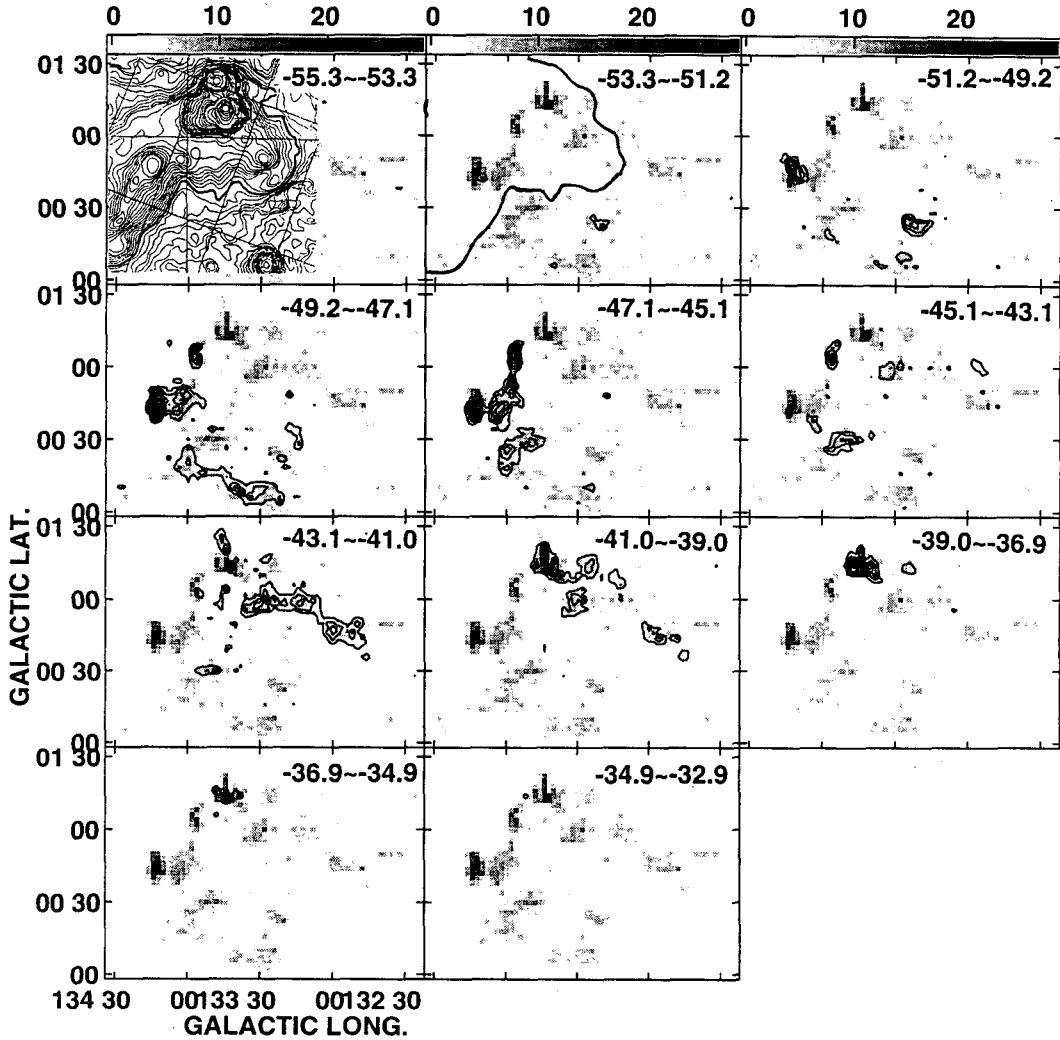
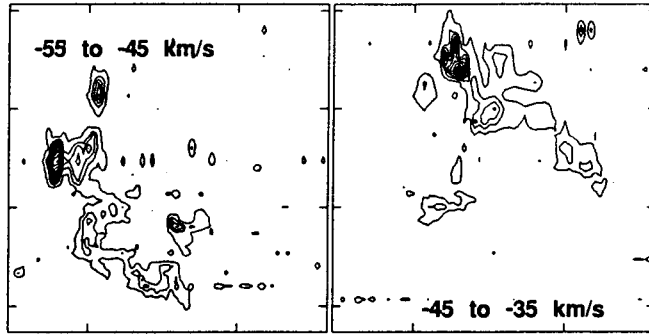


그림 3b. 같은 영역을 peak intensity에 대하여 그려 보였다. 전체 구조는 FCRAO의 ^{12}CO 와 같이 중국글자 “(door)”을 비스듬히 놓은 듯하다.



Cont peak flux = 1.9590E+01 K
 Levs = 1.9590E+00 * (1.000, 2.000, 3.000,
 4.000, 5.000, 6.000, 7.000, 8.000, 9.000,
 10.00)

그림 4a. ^{13}CO 의 channel map이다. 전체 속도 구간은 $-55.3 \leq V_{\text{LSR}} \leq -32.9 \text{ km s}^{-1}$ 이며 이를 2.1 km s^{-1} 간격으로 누적하여 11 개의 구간으로 나누어 전체적인 윤곽이 잘보이도록 grey scale과 contour level을 사용해서 이중으로 그렸다. 이 그림 위에 중첩해서 보여준 contour map은 독일 Max Planck Effelsberg 전파망원경으로 2695 MHz에서 관측된 것이다 (Fürst et al. 1990). 허와 같은 모양으로 우하단으로 길게 빠져나온 continuum 성분의 최외각 contour를 channel map에 중첩하여 보였다. Shell 구조의 내부와 허 같은 전파 복사가 어떤 연관성을 가질지는 불투명하다. Huang & Theddeus (1986)의 저분해능 ^{12}CO 관측에서 bar 형태의 구조로 알려진 덩어리는 $-55 \sim -45 \text{ km s}^{-1}$ 의 성분과 $-45 \sim -35 \text{ km s}^{-1}$ 의 성분으로 구성된 커다란 shell 구조로 분해된다.



$$\text{Levs} = 2.5889\text{E}+00 * (.700, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, 6.000, 7.000, 8.000, 9.000, 10.00)$$

그림 4b. 모든 성분을 두 개의 큰 성분으로 나누었다. 성분 I은 $-55 \leq V_{\text{LSR}} \leq -45 \text{ km s}^{-1}$ 이며, 성분 II는 $-45 \leq V_{\text{LSR}} \leq -33 \text{ km s}^{-1}$ 이다. 이 모델을 취하면 성분 I과 II가 상호 연관될 필요가 없으므로 그에 따른 무리한 가능성을 요구할 필요도 없게 된다.

W3에서 허처럼 나온 전파는 분자운과 같은 위치에 있어 영향력을 행사하고 있을 수도 있다. 더 자세한 언급은 논의에 기록하였다.

첫 속도 구간은 $-55.3 \leq V_{\text{LSR}} \leq -53.3 \text{ km s}^{-1}$ 으로서 우리에게 가장 가까운 영역이며, 속도가 양의 방향으로 증가하는 것은 점점 멀어지는 방향이다. 말굽형의 shell 전체가 같은 속도 구간에 나타나지 않는다는 것은 shell이 우리에게서 약간 기울어져 한쪽은 가깝고 다른 한쪽은 먼 곳에 위치하고 있다는 것으로 해석된다. 하단부가 상단부 보다 가깝다.

3. Velocity Gradient

그림 5와 6에는 cube data에서 속도-은위, 속도-은경에 대하여 그림을 그려 보였다. 전체적으로 완만한 속도 gradient를 볼 수 있다. 그와 함께 특정한 곳에 나타나는 구조도 엿볼 수 있다.

흥미로운 특징으로는 속도-은경에는 세 개의 속도 성분으로 나뉜다는 점이다. 하나는 전 속도 구역에 거의 연속적으로 나타나는 성분이 있는데 이것은 은위가 133.8도 근처에서 시작해서 134도를 넘어 이어진다. 나머지 두 개의 성분은 서로 분리된 성분인데, 그중 하나는 -50 km s^{-1} 근처에 나타나고 다른 하나는 -40 km s^{-1} 근처에 나타난다. 이것을 CO 영역의 전체 모양이 은경 방향으로 열린 말굽 형태를 가졌기 때문인데, U자 형태 말굽의 이어진 부분 (U의 바닥)은

W3와 관련된 것이며 말굽의 양 날개에 해당하는 부분, 즉 U 자의 약 기둥에 해당하는 성분은 약 10 km s^{-1} 정도의 속도 간격으로 분리되어 있다.

이렇게 가스 성분들이 10 km s^{-1} 정도 간격으로 분리되어 있는 경우, 이것을 하나의 거대한 덩어리의 전후 양측 성분으로 해석하면 몇 가지 곤란한 문제들이 발생하게 된다.

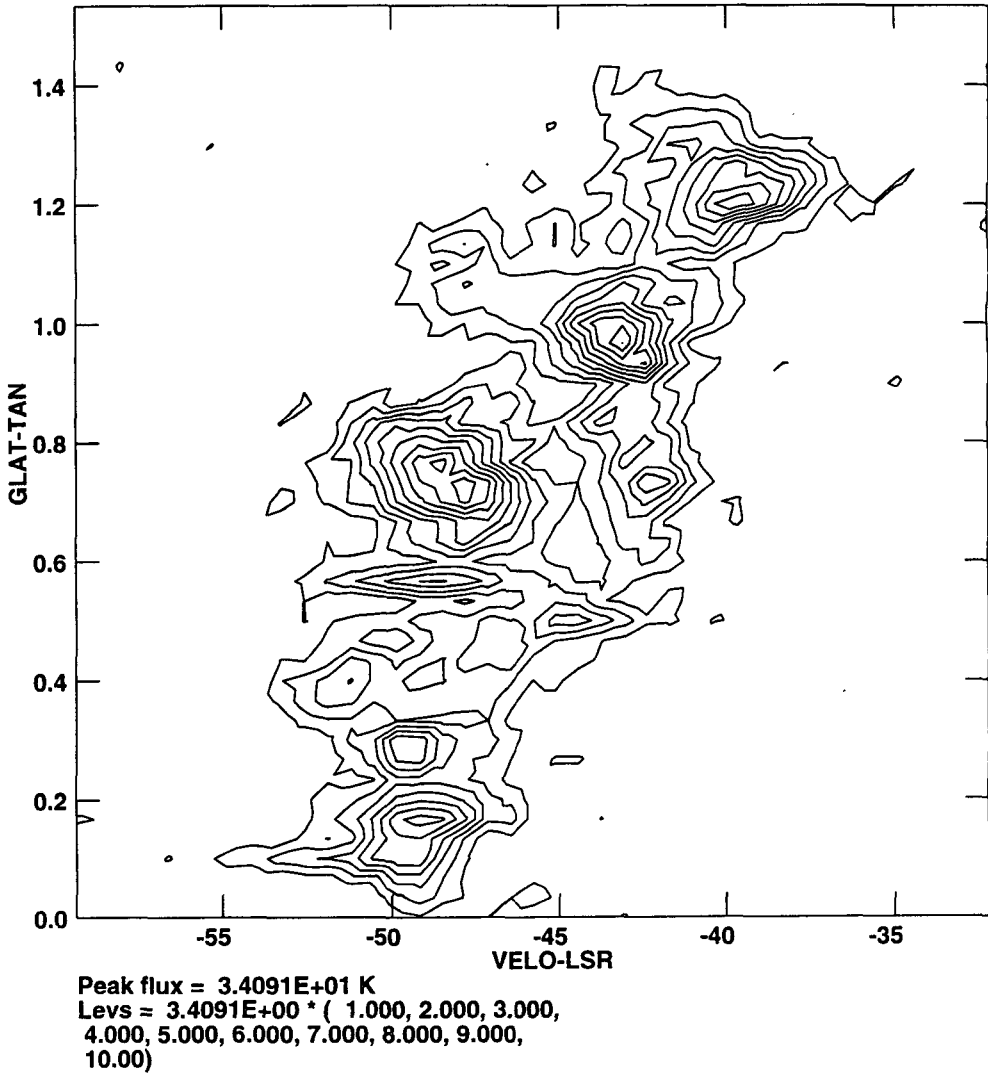


그림 5. 속도 - 은위에 대한 그림이다. 전체적으로 완만한 속도 gradient를 볼 수 있다. 그와 함께 특정한 곳에 나타나는 구조도 엿볼 수 있다.

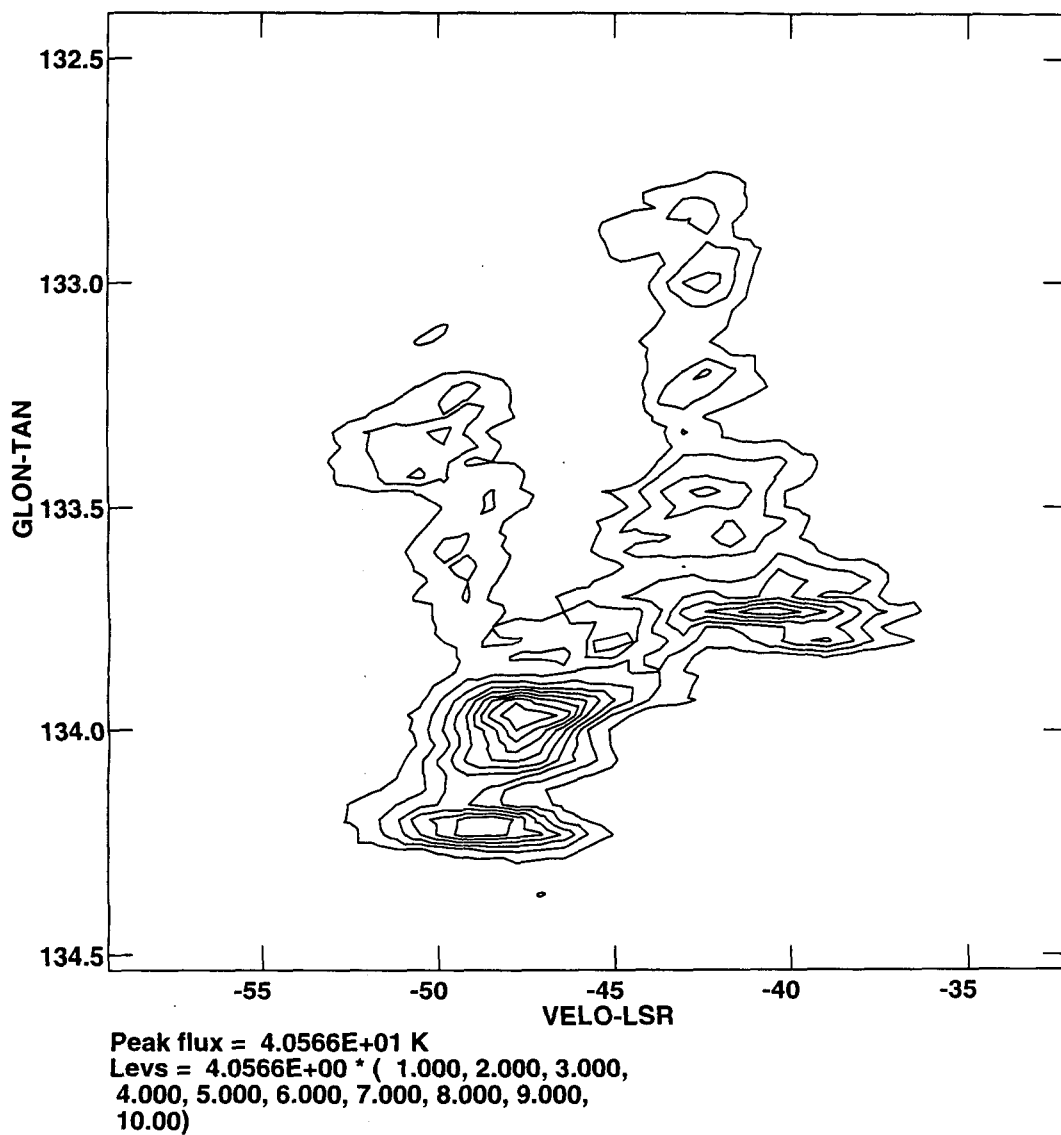


그림 6. 속도 - 은경의 그림이다. 완만한 속도 gradient와 함께 U자 형태의 특별한 구조도 엿볼 수 있다.

첫째는 전체 질량이 매우 거대해진다. 천체의 각크기 (angular size)에서 실제 크기를 추정해서 그 만한 거리로 격한 두 개의 성분이 서로 약 10 km s^{-1} 정도의 속도로 분리되어 상호 반대 방향으로 팽창한다고 가정하게 되는데 그렇게 되면 이 경우 shell 안에 막대한 질량이 요구된다. 둘째, 두 성분이 발굽 형태를 이룬데 대하여 특별한 가설이 필요하게 된다. 가운데 부분이 일반적으로 더 높은 밀도를 가지는 것이 자연스럽고 그러므로 가운데에서 더 강한 CO 복사가 기대되지만 아무것도 방출되지 않는 이유는 무엇인가? 그럴듯한 대안으로 별탄생이나 다른 어떤 종류의 heating으로 내부에 분자가 해체되어 겨우 남은 부분이 공교롭게도 발굽 형태의 CO 구조를 보인다고 보는 것이 된다. 물론 그럴 가능성이 아주 없는 것은 아니겠지만 이런 가설을 뒷받침하려면 상당한 노력은 물론 이거니와 우연도 필요할 것이다.

가장 단순한 해법은 이들을 여러 개의 작은 상호 연관성 없는 분자운의 모임으로 보는 것이다. 물론 W3 근처의 분자운은 그 자체가 W3와 연관된 CO 분자운임에 틀림없으며 이들 몇 개 성분, 위에서 첫째 성분에 포함된 몇 개의 성분들은 나름대로 독자적인 구조를 가진 복합체로 볼 수 있으며, 그럴 가능성이 높다. 그러나 U자형에서 양 기둥에 해당되는 두 bar 성분들은 상호 연관성 없는 것들이며 공간적으로도 상당한 거리에 격해있는 것으로 볼 수 있다. 다만 이들은 거대한 영역에 걸쳐 CO가 풍성한 영역에 발달된 분자운들이었으나 별탄생, 별의 종말, 초신성 등과 같은 주변의 격변하는 에너지 출입으로 말미암아 오랜 동안 영향받아 복잡한 운동을 보이는 것으로 해석될 수 있다.

보다 자세한 계산과 그에 따른 해설은 뒤에 더 자세히 논의되었다.

IV. PHYSICAL PARAMETERS와 물리적 특성

1. Sizes

이들 복합체까지의 거리는 $2.2 \pm 0.2 \text{ kpc}$ 로 추정되었고, 여기서는 이 값을 채택하였다. (Landecker et al. 1987). 이 경우 $1' = 0.64 \text{ pc}$ 에 해당된다. 발굽형의 복합체는 대략 40 - 50 pc 규모의 천체가 되며 표 1에 기재된 각각의 크기는 작은 것은 1 pc 정도에서 큰 것은 10 pc 규모의 것들이다. 표 2에는 이들의 크기를 가능한데로 gaussian으로 fitting 한 값을 기록했다.

각 성분들은 어느 하나 gaussian으로 완전히 fitting 되는 것은 없었다. 그러므로 이들의 크기는 gaussian으로 무리없이 fitting 되는 것들은 gaussian 값을, 그렇지 않는 것들은 map noise의 3σ level 위에 있는 크기를 가지고 Full Width Half Maximum (FWHM)을 계산하여 그것으로 크기를 삼았다. 그 값들과 성분들의 위치는 표 2에 기록되었다.

2. Masses

질량을 계산하는 데에는 Dickman (1978)의 방법을 사용하였다. 이 경우에는 cloud가 LTE 조건을 만족하는 것으로 가정하고 ^{12}CO 와 ^{13}CO 에서 동일한 excitation temperature (T_{ex})를 가진다고 보고, ^{12}CO 은 optically thick한 것을 처리했다. 이 경우에 사용되는 T_{ex} , τ (optical depth of ^{13}CO), $N(^{13}\text{CO})$ (column density)의 공식은 통상 사용하는 것과 같이 Dickmann (1978)에 있

는 것을 사용하였다.

우리가 관측한 ^{13}CO 영역에 대하여 특별히 optical depth를 위하여 도합 89 위치에서 ^{12}CO 를 관측했는데 이런 위치에 대해서 각각의 line에 대하여 gaussian fitting를 적용하였다. 그렇게 해서 산출된 line의 peaks, widths 등의 자료를 가지고 T_{ex} 와 τ 를 산출하였다.

여기서 계산된 평균 T_{ex} , τ 은 $T_{\text{ex}} = 16.1 \pm 4.6 \text{ K}$, $\tau = 0.39 \pm 0.19$ 이다.

본 영역에 포함된 덩어리들은 여러 가지 속도 성분을 보여준다. Routledge et al (1991)의 결과를 따라 여기서는 $V_{\text{lsr}} = -36 \sim -44 \text{ km s}^{-1}$ 와 $V_{\text{lsr}} = -45 \sim -55 \text{ km s}^{-1}$ 를 HB3와 연관된 속도 성분으로 가정하여 이 속도 성분에 포함된 것만 질량 계산에 사용하였다.

여기서 HB3의 거리를 2.2 kpc로 가정하고 (Routledge et al 1991), Dickman (1978)의 수치를 따라서 $\frac{N(\text{H}_2)}{N(^{13}\text{CO})} = 6 \times 10^5 N(\text{H}_2)$ 으로 하고 H_2 의 질량을 전체의 10 %로 하고 $T_{\text{ex}} = 16.1 \text{ K}$, $\tau = 0.39$ 를 사용하면 우리가 관측한 전 영역의 질량은 $M_{\text{total}} = 5.3 \times 10^5 M_{\odot}$ 가 된다.

만약 T_{ex} 에 1σ 의 오차를 감안하면 결과는 $M_{\text{total}} = 2.9 \sim 8.4 \times 10^5 M_{\odot}$ 가 된다. 이 값 Huang & Thaddeus (1986)이 제시한 질량 $M_{\text{total}} = 2.9 \times 10^5 M_{\odot}$ 와 일치하는 값이 된다.

질량으로만 보면 이 구름은 giant molecular cloud로 분류되어야 할 것이다. 물론 위 계산에 포함시키지 않은 속도 성분을 포함시킨다면 약 10 % 정도의 질량이 증가될 것이다.

3. Molecular Wall의 존재 유무

HB3는 형태학적으로 흥미로운 모습을 하고 있다. Morphology는 HB3의 북서쪽 부분, 은하좌표계로 보면 $l \sim 132^\circ$ 를 따라 $b \approx 1^\circ \sim 3^\circ$ 에 걸친 부분이 마치 팽창하지 못해서 incomplete circle을 이룬 듯한 길쭉한 반원형 고구마 형태를 보인다 (Routledge et al. 1991). CO 분자운이 위치한 쪽으로는 원형에 가까운 contour를 보이는데, 이런 특징 또한 CO 분자운과 작용하는 결과이겠는냐는 의문을 일으켜 흥미롭다. 본 논문에서는 북서단의 이그러진 모양이 혹시 SNR이 팽창하는 과정에서 북서단에 있을 수 있는 가상적인 "molecular wall"을 만나 팽창이 저지된 결과가 아닌가라는 가능성을 가지고 이 영역을 관측하였다.

관측은 ^{13}CO 에서 주관측이 있었던 1995년 10월 23일부터 11월 18일 기간동안에 표본 영역을 산발적으로 관측하였다. 그 결과 "wall"이 있으리라고 추정되는 영역에서 ^{13}CO 는 전혀 측정되지 않았다.

한편 Meyer (1998)의 FCRAO의 방대한 data에는 ^{12}CO 에서 길게 발달된 wall과 유사한 구조가 $l \approx 131^\circ \sim 133^\circ$ 과 $b \approx 1.5^\circ \sim 3^\circ$ 에 걸쳐서 발달되어 있다(그림 2). 그러나 유감스럽게도 이 길다란 영역도 wall이 있으리라고 여겨지는 위치와는 상당한 불일치를 보인다. 자세히 말하면, "molecular wall"은 은경을 따라 $l \sim 132^\circ$ 에 발달된 것으로 기대된 것에 반해 이것은 그림 2에 보는 것과 같이 $b \sim 3^\circ$ 을 따라 은위 방향으로 발달된 것으로 보인다.

이상의 두 가지 증거를 가지고 다음과 같은 결론을 지었다. 즉, "molecular wall"은 CO cloud의 형태로 존재하지 않는다. 그러므로 "molecular wall"이 있다면 다른 가스의 형태로 존재하거나 아니면 SNR의 모양이 이런 wall의 영향으로 발생한 것이 아닐 것이다.

V. 토 의

1. 분자운의 흥미로운 점들

HB3에 인접한 거대 분자운은 다음 두 가지 점에서 흥미로운 천체이다. 첫째, 이 분자운은 인접한 산개성단인 OCL2와, 강한 HII 영역인 W3, W4 등에서 나오는 충격파 및 ionizing radiation 등의 영향으로 (Routledge et al. 1991) 모종의 상호 작용이 있으리라고 여겨지는 천체이다. 분자운에 포함된 총 질량은 수 $10^5 M_{\odot}$ 로서 작용이 가해지면 이 분자운 내에 별 탄생의 가능성을 충분히 기대할 수 있는 천체이다.

둘째는 이 분자운은 SNR에 직접적인 영향을 받고 있다고 믿어지고 있는 몇 개 되지 않는 천체 중의 하나로 지목되었다는 점에서 흥미를 끄는 천체이다. Lozinskaya & Sitnik (1980)은 분자운의 CO line 속도와 SNR의 H α line 속도의 일치를 이들간의 상호 관련성의 증거로 제시한 바 있으며, Routledge et al. (1991)은 이 분자운과 HB3와의 상호 관련성을 HI와 CO의 관련성에 입각해서 제시했다. 특별히 중성수소 HI의 -43 km s^{-1} 성분과 HB3의 SNR 연속전파의 모습과의 일치성과 중성수소의 -30 km s^{-1} 성분이 흥미롭게도 HB3의 거의 전체적인 구조를 그려내고 있다는 점 등으로 HB3는 실제로 주위의 가스에 의해 영향을 받고 있다는 주장을 하고 있다. 이 보다 몇 년 앞서서 Landecker et al. (1987)은 Huang & Thaddeus (1986)의 CO 자료와 가시광 관측자료, 그리고 X-선 관측자료들의 상호 비교로부터, HB3에서 적위 약 62° 남쪽 근처 분자운이 있는 위치에서 X-선은 물론 가시영역의 빛이 거의 검출되지 않음을 밝힐 수 있었는데 이는 HB3 전방에 분자운이 위치하고 있으며, 이들이 가시영역과 X-선 영역의 광자를 흡수함으로써 나타나는 현상이라고 해석하였다. 이런 연구와 연결해서 이들은 수년 후 Routledge et al. (1991)에서 HB3 주위 CO 분자운의 북부와 남부 가장자리, 즉 외관상으로 HB3와 맞닿고 있으리라 짐작되는 지점에서의 408 MHz의 연속전파가 비교적 강하게 방출되는 이유를 HB3에서 나온 충격파가 분자운과의 상호작용으로 자기장이 증폭되어 발생하는 것으로 해석함으로써 HB3와 인접 분자운 또는 가스와의 상호 작용을 주장하였다. 이렇듯 최근 일련의 연구들은 HB3와 주변 분자운들이 상호 관련성을 갖고 있다는 점에 공히 동의를 표시하고 있는 상황이다.

이런 관점에서 볼 때, 본 분자운이 과연 어떤 상태에 있는가? 분자운이 특별히 말굽 형태를 가졌다는 점이 기존의 모델, 즉 주변 환경과 작용하고 있다는 모형에 어떤 영향을 미칠 수 있나?

2. 두 성분 모델 (Two Components Model)

말굽 형태를 연관된 것으로 보면 증명하기 어려운 문제에 봉착한다. 하나의 거대한 분자운이 있어서 말굽 형태의 구조들이 중력적으로 상호 관련을 맺고 있다고 한다면 말굽의 안쪽 영역은 특별한 공간이 된다. 우리가 관측한 12개의 분자운 덩어리들이 얼마나 강하게 중력적으로 묶여 있는지에 상관없이, 말굽 안쪽에는 우선 상당량의 질량이 요구된다. 과연 이 공간에 질량이 존재한다는 증거를 찾을 수 있는가?

그동안 어떤 관측을 통해서도 말굽 구조 안에 어떤 많은 질량이 있다는 아무런 반증을 얻을 수 없다는 데에 난점이 있다. 특별한 천체도 관측된 바 없다. 가령, IRAS map을 보아도 이 영역에 산재한 dust 분포가 다른 영역과 비교하여 특별한 많거나 (강한 소광), 특별히 희박해서 반대로 많은 별들이 관측된다든가 하는 특이성이 없다. 연속전파의 입장에서 보아도 이 영역이 HII 영역과 같이 특별히 뜨거워서 전파가 방출되거나 X-선이 방출되는 영역도 아니다. 그림 4a에는 말굽 구조 안쪽으로 허와 같은 모양으로 연속전파가 들어오는 것과 같은 모습을 볼 수 있다. 만약 이 전파 복사가 HII 영역에서 방출되는 열적 복사라면 shell 형태의 CO 분자운 구조를 설명할 수 있는가? 결정적인 단서는 이 영역에는 HII 영역을 형성할 만한 젊은 별이나 또는 산개성단을 찾아 보기 어렵다는 것이다. 그 때문에 이곳에 충분히 뜨거운 가스를 있어서 그로 말미암아 분자운이 shell 형태로 팽창하고 있다고 보기도 어렵다.

이런 여러 가지 점을 미루어 볼 때 이 영역에 여타의 질량이 과다하게 밀집되어 있다는 아무런 증거를 찾을 수 없다. 불가불 거기에는 오직 한 가지 결론 밖에는 없다. 이 영역은 말굽 구조의 구심력을 제공할 아무런 특이성을 가지지 못한 평범한 영역에 불과하다는 것이다. 다른 대안이 없는 이상 이는 피할 수 없는 결론이다.

전체가 연관된 구조를 이루고 있지 않으므로, 대안으로 가능성을 가진 모형은 두 성분 모형이다. 즉, 전체가 한 덩어리가 아니라 두 개의 서로 구별되는 두 개의 성분으로 나뉜다. 그림 4b에 구별된 것과 같이 모든 성분들을 두 개의 큰 성분으로 나눌 수 있다. 즉, 성분 I은 $-55 \leq V_{LSR} \leq -45 \text{ km s}^{-1}$ 이며, 성분 II는 $-45 \leq V_{LSR} \leq -33 \text{ km s}^{-1}$ 이다. 이렇게 나누면 성분 I과 II가 상호 연관될 필요가 없으므로 거대한 분자운을 고려할 필요도 없게 된다.

이렇게 보면 거기에는 흥미로운 점이 나타난다. 그림 7에 보인 것과 같이 SNR의 contour, 특별히 분자운과 접촉하고 있다고 여겨진 부분은 실제로 말굽 구조의 내부가 된다. 말하자면 분자운의 분포가 SNR의 contour를 따라가지 않는다. 특히 작용한다고 여겨진 성분은 $V_{LSR} \sim -45 \text{ km s}^{-1}$ 인데 (성분 II) HB3의 경계가 이들과 일치되는 것 같지는 않다. 물론 SNR의 측면이 분자운과 작용할 가능성은 있다. 돌이켜 보면 Huang & Thaddeus (1986)의 CO data에는 이 모든 shell 구조가 하나의 bar로 한 덩어리가 되어 나타나므로 HB3의 경계가 CO 분자운의 어디에선가 접촉하고 있다고 생각한 것은 당연하다. 그러나 이제 bar가 shell로 분해된 이상 HB3와의 상호 작용설이 더 이상 강하게 지지받을 수는 없게 되었다.

실제로 우리가 관측한 그 어떤 CO line data에도 넓은 선포폭과 같은 여타의 shock feature를 발견할 수는 없었다. 이런 점에서 본 분자운 관측은 HB3가 분자운과 직접 상호작용하고 있다는 가능성을 배제한다. HB3는 공간 깊이에 있어서 CO 분자운과는 다른 깊이에 위치해 있으며, 거기서 주변의 가스와 상호작용하고 있다고 보는 것이 더 설득력있는 모형이라고 여겨진다.

VI. 결 론

- (1) HB3와 인접한 CO 분자운이 상호 작용하고 있다는 가능성이 희박하다. 분자운의 morphology와 SNR HB3의 모양에는 아무런 연관성이 없으며 CO line에도 상호작용을 증명할 만한 특이성은 관측되지 않았다.
- (2) HB3 북서부에 있으리라고 기대되었던 "molecular wall"의 존재는 CO 관측 결과 부정적인

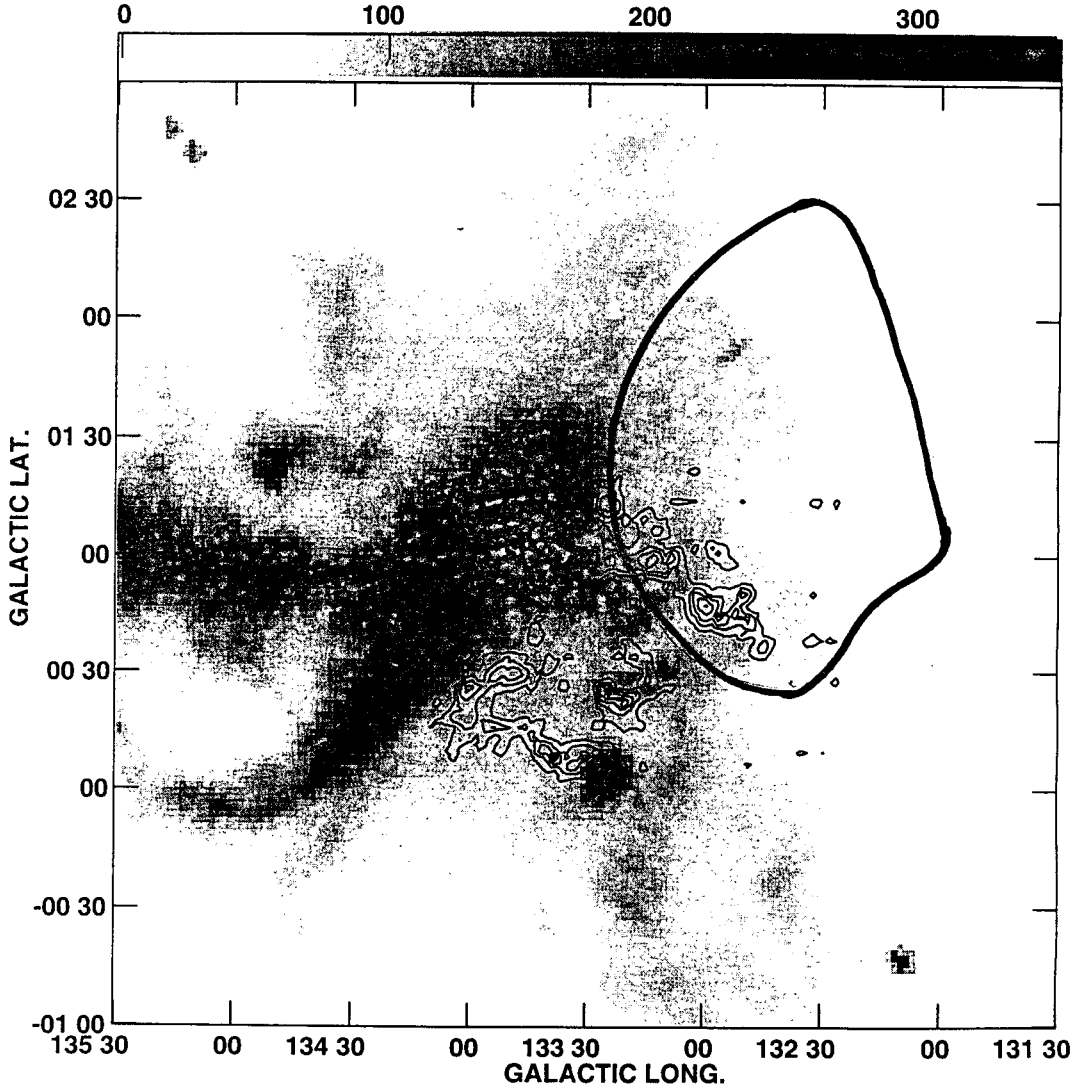


그림 7. CO가 관측된 영역 (contour)에 IRAS의 $100 \mu\text{m}$ IR map (grey)과 함께 검은 실선으로 HB3의 연속전파의 모습을 스케취 하였다. IR이 매우 강하게 방출되는 영역이 W3이다. HB3의 남단 경계부분은 Routledge et al. (1991)에 의해서 CO 분자운과 상호작용하는 곳으로 제시된 곳이다.

것으로 판명되었다.

(3) 기존 관측에서 하나의 덩어리로 보았던 CO complex는 말굽형태의 구조를 가진 것으로 드러났으며, 이는 상호 아무런 관련성 없는 두 개의 성분이 연결된 듯한 모습으로 투영되어 관측된 것으로 해석된다. Shell 구조의 내부는 평범한 공간으로서 거기에는 "숨겨진 질량"이 있다는 아무런 특이성을 발견할 수 없기 때문이다.

(4) 본 관측을 통해서 추정된 총 질량은 $M_{\text{total}} = 2.9 \sim 8.4 \times 10^5 M_{\odot}$ 로서 기존의 관측 결과와 다르지 않다. 이것은 개개의 성분들이 $10^4 M_{\odot}$ 정도의 질량을 가짐을 의미하며 이는 별탄생과 연관되어 자세히 연구될 가치가 있음을 시사한다.

(5) W3와 연관된 몇 개의 성분들은 특별히 고분해능 분자선 관측을 통해 거기서 일어나는 자세한 물리적 현상을 연구할 훌륭한 천체로서, 앞으로 이 천체를 보다 자세히 연구할 충분한 가치가 있다.

저자들은 천문대의 이영웅 박사와 조세형 박사 두 분의 유익한 조언과 도움에 대해 감사드린다. 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Dickmann, R. L. 1978, *ApJS*, 37, 407.
 Fesen, R. A., Gull, T. R. 1983, *PASP*, 95, 196.
 Fürst, E., Reich, W., Reich, P., Reif, K. 1990, *A&AS*, 85, 691.
 Green, D. 1988, *Astrophys. Sp. Sci.* 148, 3.
 Heyer, M. 1998, private communication
 Huang, Y.-L., Thaddeus, P. 1986, *ApJ*, 309, 804.
 Lada, C. J., Elmergreen, B. G., Cong, H.-I., Thaddeus, P. 1978, *ApJ*, 226, L39.
 Landecker, T. L., Vaneldik, J. F., Dewdney, P. E., Routledge, D. 1987, *AJ*, 94, 111.
 Leahy, D. A., Venkatesan, D., Long, K. S., Naranan, S. 1985, *ApJ*, 294, 183.
 Lozinskaya T.A. & Sitnik T.G. 1980, *SvA*, 24, 572.
 Mezger et al. 1986, *A&A*, 167, 145.
 Normandeau, M., Taylor, A. R., Dewdney, P. E. 1996, *Nat*, 380, 687
 Routledge, D., Dewdney, P. E., Landecker, T. L., Vaneldik, J. F. 1991, *A&A*, 247, 529.
 Seward, F. D. 1990, *ApJS*, 73, 781.
 van den Bergh, S., Marscher, A. P., Terzian, Y., 1973, *ApJS*, 26, 19.
 Venkatesan, D., Leahy, D. A., Galas, C. M., Naranan, S., Long, K. S. 1984, *MNRAS*, 208, 25.