

대덕전파천문대와 FCRAO의 외은하탐사 비교관측연구
OBSERVATIONAL TEST STUDY OF TRAO OUTER GALAXY SURVEY
COMPARING TO FCRAO OUTER GALAXY SURVEY

이영웅, 정재훈, 강현우, 이창훈, 김현구, 임인성, 김봉규

한국천문연구원

Y. LEE, J. H. JUNG, H. W. KANG, C. H. LEE, H. G. KIM, I. S. YIM, AND B. G. KIM

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

E-mail: yulee@kasi.re.kr

(Received December 21, 2009; Accepted March 08, 2010)

ABSTRACT

We present results of a test-study of the large-scale survey using the multi-beam receiver system recently installed on the 14 m telescope at Taeduk Radio Astronomy Observatory (TRAO). We have tested several modes of mapping, and found suitable (time-saving) mapping parameters of 'ON-SOURCE' = 8, 'OFF-SOURCE' = 1 when using 'RPT' = 3 as a position-switching mode. We observed 504 spectra towards the NGC 7538, a star forming molecular cloud in the transition of $J = 1 - 0$ of ^{12}CO . From the Outer Galaxy Survey database (Heyer et al., 1998) we obtained 504 spectra for the same region. We compared integrated intensities, line profiles of two databases, and found that they are consistent to each other. From the intensity ratio of these two databases we also found that the value of forward spillover scattering of the TRAO telescope system is 0.58.

key words: survey, molecular cloud, interstellar medium, multi-beam receiver

1. 서론

모든 별 및 행성계의 생성모태가 되는 성간분자운을 비롯한 각종 특이분자운의 형성과 고밀도 분자운핵의 형성, 별 탄생 및 모태 분자운에 대한 영향 등의 종합적인 연구는 바로 은하면에 널리 분포하는 성간분자운과 고밀도 분자운핵의 포괄적인 연구로 시작된다. 국내외적으로 볼 때 이에 관한 저분해능 연구는 많이 진전되어 있으나, 넓은 영역에 대한 고분해능 연구는 부분적으로 수행되고 있다. 관측자료의 대형화로 인해 신속하고 효과적인 자료처리와 분석기술을 개발 및 보완하는 것도 또한 필연적이다. 다행히 한국천문연구원의 대덕전파천문대(이하 TRAO)도 급변하는 세계적 추세에 부응하고, 구경 14 m 전파망원경의 효율도를 극대화하여 특히, 은하면 광대역 성간분자운의 탐사관측연구를 효과적으로 수행하고자 미국의 Five College Radio Astronomy Observatory(FCRAO: University of Massachusetts 소재 5개 대학 전파천문대)로부터 다중빔 수신기를 인수하여 최근 설치하였으며, 단일빔 수신기보다 12배(내년도에는 15배 예정) 이상 빠른 관측 속도로 본 연구팀이 추진하는 탐사관측연구를 획기적으로 비약시키는 계기로 기대하고 있다.

1970년대 성간분자운의 추적분자인 일산화탄소(CO) 2.6 mm 회전전이선이 처음 관측된 이후 CO분자선을 이

용한 은하면 탐색연구는 은하의 구조, 운동역학적 상태 및 별탄생·진화에 대한 이해를 높이는데 매우 중요한 역할을 해왔다. FCRAO와 콜롬비아대학(후에 하버드-스미소니언 천체물리연구소로 연구팀이 옮김)을 중심으로 ^{12}CO 분자선 탐사연구가 진행되어 왔으나 FCRAO의 연구는 은하면 제1상한에 국한되었고(Sanders et al., 1986; Clemens et al., 1986), 하버드-스미소니언 천체물리연구소 연구팀의 탐색영역은 전 은하면을 포함하나 공간분해능이 9분으로 대국적인 분포 및 구조는 알 수 있으나 미세구조연구는 불가능하다(Dame et al., 2001). 나고야대학 연구팀(Fukui et al., 1999)은 2대의 4 m 망원경으로 북반구에서는 ^{13}CO , 남반구에서는 ^{12}CO 분자선을 주로 관측하여 성간분자운의 대국적인 분포를 연구하고 있으나 분해능이 약 4 - 8분으로 크기 때문에 미세연구는 구경이 더 큰 망원경에 의지하고 있다. 최근 보스턴대학과 FCRAO의 공동연구팀이 은하면의 1/6(molecular ring)을 50초의 분해능으로 ^{13}CO 분자선으로 관측연구를 수행하였다(Jackson et al., 2006). 이와 같은 광대역 탐사연구는 은하구조 연구 뿐 아니라 은하면에 위치한 별탄생 영역을 포함한 거대 분자성운에 대한 통계적 연구의 초석이 되었고, 거대 분자성운의 고밀도 핵 등을 중심으로 한 국부적 미세구조 연구를 비롯하여 많은 별탄생, 진화에 관한 연

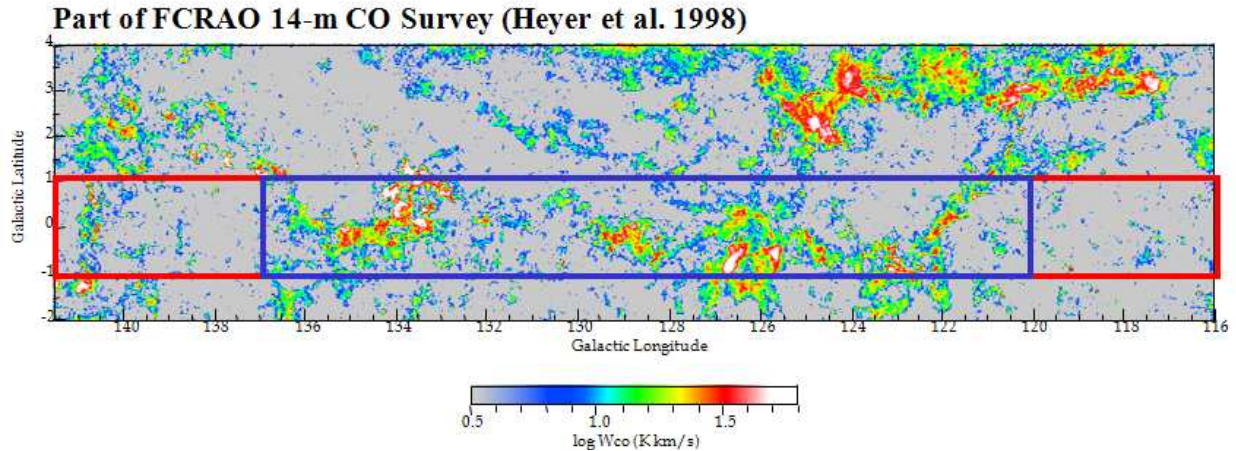


그림 1. Heyer et al. (1998)의 외은하지역 ^{12}CO 탐사영역의 적분지도의 일부. 푸른선으로 표시된 곳이 본 연구팀이 1차적으로 관측할 영역이다. 빨간선 영역은 제2차 영역이며 궁극적으로 관측 가능한 전은하면으로 확대할 계획이다.

구의 촉매 역할을 하게 되었다. 그러나, 은하 내·외부의 서로 다른 환경에서(예, 다른 성간 복사장) 불균일하게 퍼져있는 별탄생영역과 이와 관련된 분자성운에 대한 비교연구는 많은 논란의 여지를 남겨놓고 있다. 또한, 특이한 환경 하에 있는 여러 가지 분자운의 물리적 상태와 별탄생으로 이어지는 진화과정을 비교 연구하는 일은 아직 미진하고 논란의 여지가 많아 연구가 활발히 계속되고 있다. 이 분야의 연구를 관측적으로 진전시키기 위해 대덕전파천문대는 은하면 제2상환의 일부를 관측대상으로 정하여 광대역 및 특이 분자성운에 대한 $^{13}\text{CO}(1-0)$ 관측(이하 ^{13}CO 로 표시함)으로 독자적 데이터베이스를 구축하고, 은하 내·외부의 국지적 또는 대국적 환경이 성간 분자운의 제반 물리량에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하는 것을 목표로 광역 관측을 시작하였다. 대덕전파천문대 ^{13}CO 외은하면탐사연구(TRAO Outer Galaxy Survey, TOGS)의 목표영역은 UMass/FCRAO의 ^{12}CO 외은하지역탐사연구영역(^{12}CO Outer Galaxy Survey, 일명 OGS; Heyer et al., 1998)과 일치 한다. 이미 $^{12}\text{CO}(1-0)$ 관측자료(이하 ^{12}CO 로 표시함)는 준비되어 있는 셈이다. 본 논문의 목표는 본격적인 ^{13}CO 관측에 앞서 면적을 가진 천체(extended source)의 격자관측모드에서 안테나효율(전방산란계수)측정과 이와 관련된 FCRAO의 ^{12}CO 관측자료와 TRAО의 ^{12}CO 관측자료의 합일성을 점검하며, 또한 광역관측을 좀 더 효율적으로 하는 방법을 제시하는 것을 목표로 한다. 이는 후에 두 자료를 이용하여 각종 물리량을 구하는데 선결적으로 점검되어야 할 꼭 필요한 과정이다.

2. 관측 및 격자관측모드 점검

현재 TRAО 다중빔 수신기는 FCRAO에서 도입할 당시 15개의 혼과 믹서로 이루어진 3×5 어레이형태로 되어 있으나 현재 2개의 믹서가 정상작동하지 않아 13개의 어레이 빔(또는 픽셀이라고도 함)만 정상작동중이다. 광역관측 격자관측모드에서는 최종적으로 3×4 의 12개 빔의 관측자료만 사용하게 된다. 다중빔 수신기에 관한 내용은 FCRAO의 보고서(김봉규 등, 2008) 등에 소개되어 있으나, 주경효율 등을 포함 자세한 설명은 대덕전파천문대에서 조만간 따로 보고할 계획으로 있다(정재훈, 2009). 분광기는 상관기에 4개의 분해능(31 kHz, 63 kHz, 234.4 kHz, 859.4 kHz) 선택을 할 수 있으나 2009년 현재 234.4 kHz와 859.4 kHz만이 준비되어 있으며 2010년도 초에 고분해능도 사용할 수 있게 된다. TOGS 연구에는 234.4 kHz만을 사용하는데, ^{13}CO 에서 속도분해능은 0.638 km s^{-1} 이고 ^{12}CO 에서는 0.609 km s^{-1} 이다. 이는 FCRAO의 ^{12}CO OGS의 0.813 km s^{-1} 보다 25%이상 높은 분해능이고, TOGS 자료를 이 OGS 자료와 비교연구를 할 때는 0.813 km s^{-1} 로 속도분해능을 변환하여 비교할 예정이다. TOGS의 관측영역은 은경 109도에서 112도, 120도에서 137도, 은위는 -1도에서 +1도의 은하면을 우선적으로 한다. 은경 112도에서 120사이에는 ^{12}CO 방출선이 매우 희박한 지역이라 일단 제외하였다(그림 1). 기존 ^{13}CO 의 은하면 연구(Lee et al., 2001)의 연장선상에 있는 연구이며, 궁극적으로는 TRAО에서 관측이 가능한 전은하면으로 확장할 계획이다.

앞서 언급한 바와 같이 TOGS는 ^{12}CO OGS 자료를 이용하는 것이 중요하므로 TRAО에서 새로이 관측한 ^{12}CO

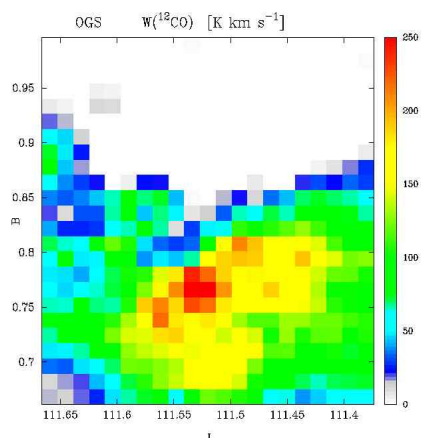


그림 2. OGS로부터 추출한 자료로부터 만든 CO 적분도. 적분속도범위는 -70 km s^{-1} 에서 -40 km s^{-1} 임.

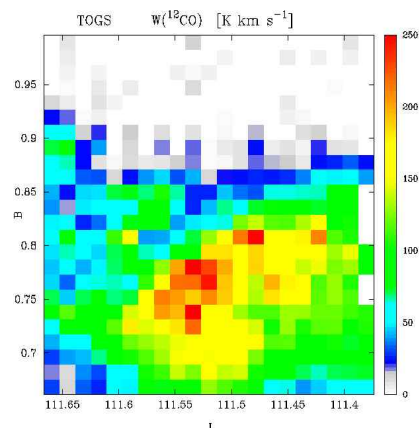


그림 4. TRAO 14 m 망원경과 다중빔 수신기를 사용하여 얻은 적분도. 적분범위는 그림 2와 같다.

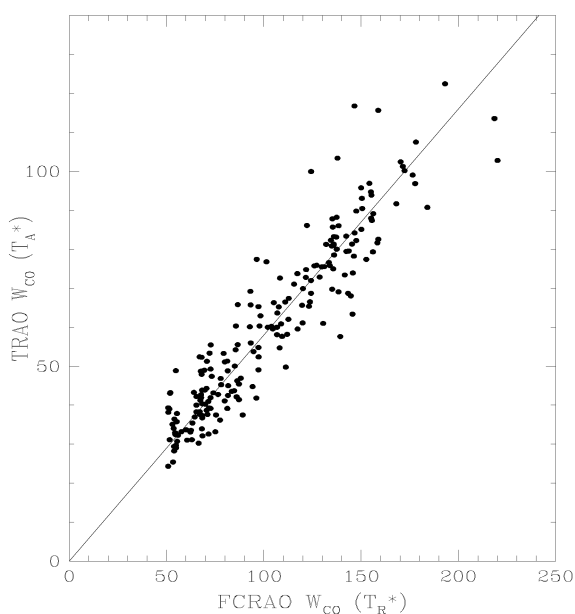


그림 3. TOGS와 OGS의 각 픽셀당 적분값의 비교 그림. TOGS는 빔 효율을 적용하지 않은 T_A^* 의 값을 사용하였고, OGS는 T_R^* 의 값을 적분한 것이다. 실선은 기점을 0으로 하여 fitting한 것을 표시하였다. 기울기는 0.58이다.

관측자료와의 합일성을 점검하고 동시에 안테나온도를 T_R^* 단위로 변화하기 위한 전방산란계수를 비교하고 추정하고자 한다. 시험관측영역은 NGC 7538 지역 중 은하좌표 $(l, b) = (111.52^\circ, 0.78^\circ)$ 을 중심으로 하였고, VLSR(

velocity of local standard of the rest) = -50 km s^{-1} 로 600개의 스펙트럼(20 ‘footprint’, 아래 참조)을 얻었다. 이중 미서가 정상 작동하여 의미 있는 스펙트럼의 개수는 504개이다. $^{12}\text{CO}(1-0)$ 의 관측파장은 115.271003 GHz 이고 $EL = 45^\circ$ 근처에서 시스템온도는 약 900 K 로 측정되었다. 참고로 동일 고도에서 ^{13}CO 에서의 시스템온도는 약 500 K 정도이다.

관측방법은 은하좌표관측모드(KMAP = 5), 격자는 빔간격모드(GRID = 3), ‘ON-SOURCE’ = 8, ‘OFF-SOURCE’ = 1, calibration 빈도는 8(NBRE = 8, NCAL = 8)을 일정수준 도달하기 위해 반복관측은 3회(RPT = 3) 등으로 정하였다. 관측모드에 대한 설명은 대덕전파천문대 사용자지침서를 참조하였다. ON-SOURCE의 값을 2와 4 등을 사용해 점검하였고, 8의 값까지도 기저선의 상태가 양호함을 확인하였다. 두 점 관측이 1 footprint를 이루며 배드-픽셀 4개를 포함 30개의 스펙트럼으로 구성되나 실제 격자관측은 앞서 언급한 바와 같이 $4 \times 6 = 24$ 개의 스펙트럼만을 사용하게 된다. 하나의 footprint당 적분관측시간은 $270 \text{ 초} \times 2 = 540 \text{ 초}$ 이나 ON-SOURCE를 8, OFF-SOURCE를 1로 하는 모드이기 때문에 1 footprint 관측점당 평균관측시간은 현저히 줄어든다. 그러나 망원경의 추적시간, 자료전송시간을 포함한 실제 걸린 시간은 위치에 따라 약간 다르나 footprint당 약 6분정도였다. 이러한 관측모드는 많은 시행착오와 시험관측(여러번의 RPT, ON-SOURCE 변환 등)을 거치면서 얻은 TOGS를 수행하기 위한 적절한 격자관측모드로 생각된다. 격자관측의 최적방법은 얻고자하는 감도와 기상조건 등에 따라 다를 수 있으므로 그에 따라 격자관측변수를 정해야 한다. 최종 얻어진 감도에 해당하는 root mean square(rms) 잡음온도는 1채널(0.609 km s^{-1})당 0.35 K

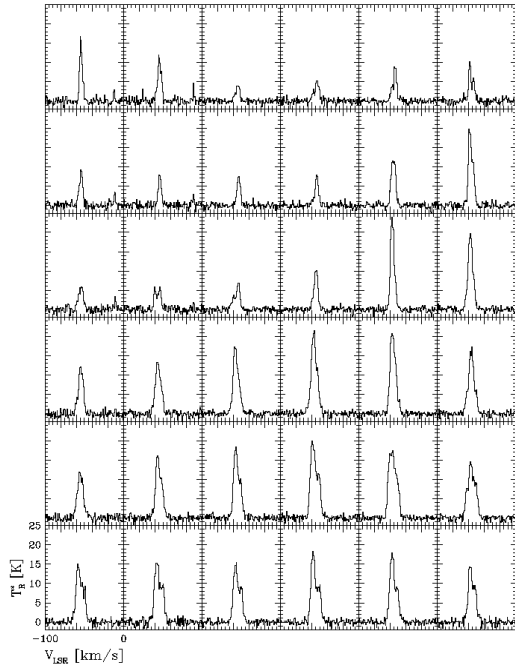


그림 5. OGS의 자료로부터 (l, b) = (111.5°, 0.78°)을 중심으로 얻은 36개의 스펙트럼.

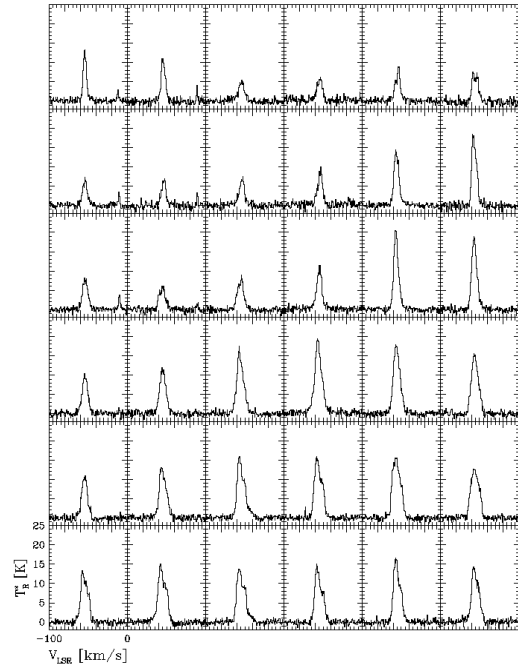


그림 6. 그림 5와 같은 위치에서의 TRAO 14 m 망원경과 다중빔 수신기를 사용하여 얻은 TOGS지역의 스펙트럼들.

으로 측정되었고 기저선의 상태는 매우 양호한 것으로 판단된다(아래 스펙트럼 참조). 한편, 다중빔 수신기 광학계의 sideband 조절이상으로 빔 간격이 현재 이상적인 값인 50초가 아니고 65초 또는 35초로 되어있다. 즉, 2번째와 4번째 열이 1번째와 3번째에 15초가량 치우쳐져 있다. 이를 간격의 제곱가중치를 적용하여 균일한 간격으로 배열하였다(re-gridding). 점광원이 아닌 성간분자운과 같이 면적이 있는 경우 수정전후의 차이는 거의 없음을 확인하였다. 또한, FCRAO의 보고서에 의하면 15개의 빔 효율이 8% 내지 10% 정도의 차이가 있는 것으로 알려져 있다. 대덕전파천문대에서는 아직 이를 측정하기 위한 관측을 직접 시행하지 않았으며, 2010년에 시행할 계획이다. 이 논문에서는 수신기 각 픽셀의 효율이 동일하다고 가정하였다.

3. 관측결과 비교

우선 OGS 자료중 은하좌표(111.52°, 0.78°)을 중심으로 21 x 24 = 504개의 스펙트럼을 추출하여 속도범위 -70 km s⁻¹에서 -40 km s⁻¹까지의 적분한 적분도를 만들었다(그림 2). 이 지역은 별탄생영역 NGC 7538로 잘 알려져

있다. TOGS 시험관측에서 얻어진 자료를 같은 크기 같은 영역을 3차원 자료 형태로 만들어 적분값을 구한 결과를 각 픽셀 별로 비교한 것을 그림 3에 표시하였다. 적분값이 50 K km s⁻¹ 이상인 것만을 대상으로 하였다. OGS의 적분값의 최대치는 약 230 K km s⁻¹ 정도이고, 적분값에 관계없이 일정한 분산형태를 보이고 있다. 이는 날씨와 관측고도, 빔의 크기와 형태 등 내외부의 복합적인 원인에 의해 생길 수 있는 분산형태로 생각된다. 0을 기점으로 기울기를 fitting한 결과 0.58 ± 0.04 이었다. 관측범위내의 정점온도는 OGS에서 23.87 K(T_R^{*})이고 TOGS는 11.9 K(T_A^{*})로 단순비교하면 TOGS의 관측정점온도는 50% 정도이다. 이는 점광원이 아닌 면적이 있는 천체의 경우에 자주 사용하는, 즉 안테나온도(T_A^{*})를 밝기온도(T_R^{*})로 변환하여 사용하는 효율계수인 전방산란 계수를 정하는데 척도가 될 수 있는 것들이다. 이 경우 정점온도보다는 적분값을 사용하는 것이 보통이며, FCRAO의 전방산란계수 0.65(Heyer et al., 1998)와 비교할 때, TRAO의 그 값은 0.58인 것을 의미하고 있다. 이는 TRAO의 추정치 0.6과 매우 유사한 값이다(정재훈, 2009). 추정 계산된 전방산란계수를 사용하여 TOGS의 적분도를 만든 결과는 그림 4에 나타내었다. 당

연한 결과이지만 그림 2와 4는 매우 유사한 형태를 보이고 있다. 다만 그림 3의 윗부분의 TOGS 적분도의 잡음 정도는 날씨관계로 잡음온도가 약간 높아진 이유 때문이다.

그림 5와 그림 6은 $(l, b) = (111.5^\circ, 0.78^\circ)$ 을 중심으로 한 36개의 스펙트럼을 한꺼번에 그린 것이다. 관측된 속도범위는 -157 km s^{-1} 부터 $+100 \text{ km s}^{-1}$ 까지 이나 라인프로파일을 자세히 보이기 위해 -100 km s^{-1} 부터 $+0 \text{ km s}^{-1}$ 까지만 표시하였다. 두 그림의 왼쪽 귀퉁이 4개의 패널에는 속도 $\text{VLSR} = -10 \text{ km s}^{-1}$ 에 국부성간분자운이 존재한다는 것을 확인하였다. 라인프로파일의 모습도 대체로 비슷하게 확인되었다. 앞서 언급한바와 같이 그림 5의 속도분해능은 0.813 km s^{-1} 이고 그림 6의 속도분해능은 0.609 km s^{-1} 이므로 약간 잡음정도가 많은 듯이 보인다.

4. 토의 및 결론

본 시험관측 연구에서는 OGS와 TOGS의 관측자료를 동시에 이용하기 위한 합일성을 점검하는 것을 목표로 하였고, 이에 앞서 TOGS의 적절한 관측모드를 정하기 위해 여러 격자관측모드를 점검하였다. TOGS의 관측모드는 은하좌표 격자관측모드(KMAP = 5), 그리드는 빔 샘플링(GRID = 3)이며, 기상조건이 좋을 때에는 ON-SOURCE = 8, OFF-SOURCE = 1, calibration 빈도는 8 (NBRE = 8, NCAL = 8), 감도를 일정수준 도달하기 위해 반복관측은 3회(RPT = 3) 등으로 하는 것이 적절한 것으로 판단되었다. 이는 현재 주어진 'position-switching' 모드를 사용한 격자관측모드 중 가장 적절하다고 판단된다. 반복관측횟수는 원하는 감도를 위해 늘릴 수 있다.

TOGS와 OGS의 관측자료로 3차원 자료를 만들고, 라인프로파일비교, 적분도비교 등을 수행하였고, 현 상황에서의 최종적인 전방산란계수는 0.58인 것으로 추정하였다. 이 값은 현 TRA0의 상황에서 격자관측시, 또는 전방산란계수를 사용하여할 시 척도로 될 수 있는 결과로 생각된다. 0.58이라는 값이 FCRA0의 0.65보다 다소 낮은 것은 여러 원인이 있을 수 있으나, 가장 큰 것은 지난 수년간 주경조절을 하지 않은 점과 광학계의 총체적인 점검이 미진한 이유로 빔이 간결하고 곧은 원형이 아닐 수 있다(정재훈, 2009)는 점이다. 그림 5와 6의 정점온도를 가진 스펙트럼(특히 왼쪽 위부터 17번째 패널)을 비교하면 약간의 차이를 알 수 있으며, 이는 TRA0 주빔(main beam)이 퍼진 형태일 수 있으며 강한 점광원일 경우 또는 점광원을 포함한 경우 최대정점온도의 감소형태(dilution effect)로 나타날 수 있다는 점을 암시하고 있다. 그림 3에서의 최대 적분값을 갖는 두 개의 픽셀에서 TOGS의 적분값이 상대적으로 적은 값을 보인다. 차년도에는 주경조절을 포함한 광학계의 미세조절로 빔 효율을 높이고 간결하고 곧은 원형빔 구축 작업이 절실히 요구된다.

한편, 격자관측모드에서 ON-SOURCE값을 8까지 늘

려 잡아도 안정된 기저선을 보였기 때문에 수신기 자체는 매우 안정적이라고 할 수 있겠다. 다만, 자기상관기의 특성상, 적분시간(t_{int})에 비해 rms 감도(sensitivity)가 효과적으로 떨어지지 않는 점이 있다. 이는

$$\begin{aligned} \text{sensitivity} &= e \times T_{\text{sys}}/\sqrt{(\text{bandwidth} \times t_{\text{int}})} \\ &= e \times 900/\sqrt{(234,400 \times 270)} \end{aligned}$$

의 식에서 계산한 효율계수 $e \sim 3$ 으로 계산되어 이상적인 예상치인 2.3보다 큰 값으로 확인되었다. 여기서 T_{sys} 는 잡음온도이다. 현시점에서 상관기의 특성을 당장 개량할 수는 없지만, 관측시간효율을 높이기 위해 미래에는 꼭 개선해야할 점이다. 한편, 현재 TRA0 망원경 지향정밀도는 10" 정도이고 자동 최적 초점 조절장치가 되어 있기 때문에 매우 고무적이고, 앞서 언급한 효율 개선을 위한 추가적인 작업이 이루어지면 광역 격자관측을 위한 최적의 환경이 조성되리라 사료된다.

참고 문헌

- 김봉규, 정재훈, 임인성, 김현구, 이창훈, 이영웅, 김광동, 김효령, 2008, 대덕전파천문대 운영보고서, 한국천문연구원
- 정재훈, 2009, private communication
- Clemens, D. P., Sanders, D. B., Scoville, N. Z., & Solomon, P. M., 1986, Massachusetts-Stony Brook Galactic Plane CO Survey. II - (I, V) Maps of the First Galactic Quadrant, *ApJS*, 60, 297
- Dame, T. M., Hartmann, D., & Thaddeus, P., 2001, The Milky Way in Molecular Clouds: A New Complete CO Survey, *ApJ*, 547, 792
- Fukui, Y., Mizuno, N., Yamaguchi, R., et al., 1999, First Results of a CO Survey of the Large Magellanic Cloud with NANTEN; Giant Molecular Clouds as Formation Sites of Populous Clusters, *PASJ*, 51, 745
- Heyer, M. H., Brunt, C., Snell, R. L., Howe, J. E., Schloerb, F. P., & Caronterm J. M., 1998, The Five College Radio Astronomy Observatory CO Survey of the Outer Galaxy, *ApJS*, 115, 241
- Jackson, J. M., Rathborne, J. M., Shah, R. Y., Simon, R., Bania, T. M., Clemens, D. P., Chambers, E. T., Johnson, A. M., Dormody, M., Lavoie, R., & Heyer, M. H., 2006, The Boston University-Five College Radio Astronomy Observatory Galactic Ring Survey, *ApJS*, 163, 145
- Lee, Y., Stark, A. A., Kim, H. G., & Moon, D. -S., 2001, The Bell Laboratories ^{13}CO Survey: Longitude-Velocity Maps, *ApJS*, 136, 137
- Sanders, D. B., Clemens, D. P., Scoville, N. Z., & Solomon, P. M., 1986, Massachusetts-Stony Brook

Galactic Plane CO Survey. I - (b, V) Maps of the
First Galactic Quadrant, ApJS, 60, 1