

## 13.7m 우주전파 관측용 안테나의 지향정도 확립과 효율 측정

### (Pointing Accuracy Establishment and Efficiency Measurement of 13.7m Antenna for Observing Cosmic Radio Wave)

趙世衡\*, 鄭在勳\*, 李英雄\*\*, 金顯求\*, 盧德圭\*, 朴鏞善\*, 金奉奎\*, 吳昞烈\*, 李昌勳\*, 任仁誠\*

(Se Hyung Cho, Jae Hoon Jung, Young Ung Lee, Hyun Goo Kim, Duk Gyoo Roh,  
Yong Sun Park, Bong Gyu Kim, Byung Ryul Auh, Chang Hoon Lee and In Sung Yim)

#### 要 約

본 논문에서는 설치후 초기단계에 있는 우주전파 관측용 13.7m 안테나의 지향정도 확립과 효율측정에 대하여 기술하였다. 지향성 모델은 처음 단계인 모델 1,2에서는 태양과 달 같은 시직경이 크고 전파강도가 센 천체를 관측하여 설정되었고, 이를 이용한 모델 3,4에서 전 하늘에 걸친 SiO 메이저원인 점 전파원을 관측하여 방위각 오차 3.8" 고도각 오차 10.5"의 실용성 있는 범위로 확립되었다. 구경 효율과 비임효율은 밝기온도가 잘 알려진 연속파 전파원인 금성을 관측하여 측정되었는데 보정된 효율은 86 GHz대에서 각각 35%, 50%로 나타났다.

#### Abstract

In this paper, we describe a pointing accuracy establishment and efficiency measurement of 13.7 m antenna for observing cosmic radio wave which is in the first stage just after finishing its installation.

The initial stage of pointing model, 1 and 2 were set up with the observational data of Sun and Moon which are large in visual diameter and also strong in radio intensity. Based on this model, model 3 and 4 were established within the available operational range, i.e., 3.8" in azimuth deviation, 10.5" in elevation deviation, with the observational data of SiO maser source which is a point source and distributed in overall sky. Both aperture efficiency and beam efficiency were measured by observing Venus whose brightness temperature is well-known. The resulting corrected efficiencies were 35% and 50% respectively.

#### I. 서 론

현대 천문학의 가장 활발한 연구영역의 하나인 밀리미터파 전파천문학은 대형 정밀안테나 기술 및 새로운 수신기 제작 기술에 의한 감도향상으로 천문학적 신발견을 더해주고 있다. 그렇지만 지상에서 사용하는 인공적인 전파와는 달리  $10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$  (= 1 Jansky) 안팎의 극히 미약한 우주전파를 신뢰성 있게 수신하는 데는 여러가지 기술적인 어려움이 요구

\*正會員, 天文宇宙科學研究所

(Institute of Space Science and Astronomy)

\*\*正會員, 메사추세츠 州立大學 物理天文學科

(Dept. of Astronomy., Univ. of Massachusetts, U. S. A)

接受日字: 1988年 8月 4日

(※ 본 연구는 1987년 과학기술처 특정연구 사업의 일환으로 수행되었음.)

된다.

따라서 외국에서는 전파망원경의 집광력 및 분해능을 높이기 위해서 보다 큰 구경의 표면 정밀도가 높은 안테나를 제작하여 밀리미터와 수신용으로 45m 구경까지 운용되고 있으며, 또한 전파간섭계 및 대륙간 초장기선 전파간섭계가 운용되고 있다.

뿐만아니라 10m급 안테나에는 표면정밀도가 50 $\mu$ m까지 실현되고 지향정도가 5"이내에 도달하여 서브 밀리미터와 영역까지 관측 연구를 개척하고 있다.

수신기 부문에서도 종래의 GaAs 다이오드 믹서 수신기의 개선과 아울러 새로운 형태의 초전도 소자를 이용한 믹서 및 HEMT 앰프 수신기가 실용화 되어 그 감도가 획기적으로 개선되고 있다.

이러한 단계에서 1986년 천문우주과학연구소에 설치 완료된 13.7m 전파망원경(그림 1)은 고도각, 방위각 방식의 80-115 GHz 수신영역을 갖는 GaAs 믹서 수신기를 장비하고 있다. 그런데 갖 설치된 초기 단계의 전파망원경으로서 우선 안테나계에서는 전파원의 위치와 flux의 정확한 측정을 위한 지향정도 확립과 얼마나 짧은 파장의 미약한 신호까지 관측할 수 있는가에 관계된 개개 주경관별의 표면정도를 포함한 안테나 효율의 지속적인 개선이 요구된다.



그림 1. 국내 유일의 대덕전파천문대 13.7m 전파망원경

Fig. 1. 13.7m radio telescope of daeduk radio astronomy observatory.

본 논문에서는 1986년 설치 완료된 13.7m 전파망원경의 표준전파원 관측에 의한 지향정도 확립과 RF 비임축과 촛점 조정후의 구경효율 및 비임효율, 비임패턴 측정방법과 결과에 대하여 기술하였다.

서론에 이어 제Ⅱ장에서는 지향성(pointing) 모델의 설정과 관측수행 및 결과를 제시하고, 제Ⅲ장에서는 구경 및 비임효율의 측정결과를 제시한다. 그리고 마지막 제Ⅳ장에서는 결론을 제시하였다.

## Ⅱ. 지향정도의 확립

이상적인 안테나라면 컴퓨터에 의하여 지시된 목표의 위치에 정확히 이동하고 추적하겠지만 실제의 경우 지시된 목표와 안테나가 가리키는 방향 사이에는 오차가 생기게 된다. 이러한 지향오차는 그 물리적 근원에 따라 설계 및 제작에 기인하는 오차, 조립 및 설치시의 안테나 수평과 회전축의 어긋남에 따른 오차, 중력에 의한 구조물의 변형에 따른 오차등으로 나눌 수 있다. 그러므로 이들 오차는 그 안테나 특성에 해당하는 것으로 우선 근원에 따라서 수식화된 모델을 만들고 관측에 의하여 하늘 전방향에 대한 지향 오차를 측정하여 이를 기반으로 모델의 계수를 결정하게 된다. 그러면 결정된 모델로 부터 방위각 고도각에 따른 오차를 계산하여 이를 컴퓨터의 지시된 목표좌표에 부가하여 안테나를 실제목표에 향하도록 보정하게 된다. 초기단계 시스템인 13.7m 안테나는 이러한 과정을 다음과 같이 4차에 걸쳐 단계적으로 수행하였다.

### 1. 지향성 모델의 설정

일반적인 alt-azimuth 구동방식의 안테나에 따른 지향오차의 원인은

- 1) 방위축 (azimuth axis)의 천정에 대한 기울기 (tilt)
- 2) 고도축 (elevation axis)의 방위축에 대한 사교 (non-orthogonality)
- 3) 전자기적축에 대한 기계적축의 편이, 즉 안테나의 방위축에 대한 안테나 비임축의 편이(non-collimation)
- 4) 안테나의 중력변형 (gravitational deformation)
- 5) 대기굴절

등으로 나눌 수 있다.

지향성 모델은 천문대에 따라 각기 다른 모델을 택하며, 이러한 오차의 원인을 고려해 주는 항도 다양하나, 당 천문대 13.7m 안테나는 미국 5개대학 전파천문대의 안테나와 구조가 거의 같으므로 관측자료가 없는 초기단계에서는 5개대학 전파천문대의 모

델과 같은 방위각, 고도각에 따른 14개의 항으로 설정하였다.

따라서 지향오차의 수식적 표현은

$$\begin{aligned} \Delta AZ &= AZ(\text{계산값}) - AZ(\text{실제값}) \\ &= A_0 + \{C + N \sin(EL) + T_A \sin(EL) \\ &\quad \sin(AZ - a_A)\} / \cos(EL) \\ &\quad + W_A \sin\{2(AZ - a_A)\} \sin(EL) / \cos(EL) \\ &\quad + AZ. \text{Digiswitch Offset} / \cos(EL) \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta EL &= EL(\text{계산값}) - EL(\text{실제값}) \\ &= E_0 + R \cot(EL) + G \cos(EL) \\ &\quad + T_E \cos(AZ - a_E) + W_E \cos\{2(AZ - a_E)\} \\ &\quad + EL. \text{Digiswitch Offset} \quad (2) \end{aligned}$$

이다.<sup>1)</sup> 여기서

$\Delta AZ$  : 방위각의 보정값

$\Delta EL$  : 고도각의 보정값

$AZ$  : 천체의 방위각

$EL$  : 천체의 고도각

$A_0$  : 방위각의 encorder offset

$E_0$  : 고도각의 encorder offset

$C$  : non-collimation

$N$  : non-orthogonality

$T_A, T_E$  : 방위축의 천정에 대한 기울기

$a_A, a_E$  : 망원경 방위축이 기울어진 방향

$W_A, W_E$  : 방위축과 고도축 bearing의 Wobble

$R$  : 대기의 굴절 상수

$G$  : 중력변형상수

Digiswitch Offset : 지향오차를 manual로 보정한 이다.

## 2. 관측의 수행 및 결과

### 1) 관측

앞 절에서 나타난 지향성 모델의 계수를 구하기 위해서는 전 방향의 안테나 움직임 특성에 관계된 컴퓨터의 계산값에 의한 안테나 위치와 실제 천체의 위치 사이의 차이  $\Delta AZ$ ,  $\Delta EL$ 을 하늘 전 방향에 대하여 천체관측을 수행해서 측정하여야 한다. 이러한 관측을 위해서는 관측대상 천체를 위치가 정확히 알려져 있고 점전파원으로 전파강도가 세며 전 하늘에 걸쳐 골고루 분포되도록 택하여야 한다. 그러나 설치 후 초기단계 관측에서는 지향오차가 상대적으로 크기 때문에 전파강도가 특히 세고 시직경이 커서 찾기가 용이한 태양 및 달을 관측대상으로 선정하여 잠정적인 초기단계의 모델계수를 결정한다. 그후 지향정도가 좋아지면 관측대상을 행성 및 SiO 메이저원들의 점전파원으로 택하여 다음 단계의 개선된 모

델을 구한다.

본 관측에서는 1차, 2차에 태양과 달의 연속과 전파를 관측하여 잠정적 모델을 정한 다음 3차에는 주로 남쪽하늘 천체로 4차에는 북쪽하늘 천체까지 포함한 점전파원으로 강한 SiO 메이저원을 택하여 모델을 확립하였다. 이러한 대상천체의 제원은 표 1에 나타나 있다.

관측의 수행은 1987년 3월에서 10월 사이 4차에 걸쳐 수행하였으며 1, 2차 관측에서는 manual mode로 지구대기층의 투과율이 좋은 95 GHz의 연속파 전파를 택하여 chart recorder 또는 digital voltmeter로 측정하였고, 3, 4차 관측에서는 computer mode로 주로 SiO 메이저선의 진동에너지 준위  $v=1$ 이고 회전에너지 준위  $J$ 가  $J=2-1$  천이인 86.243350 GHz를 택하여 수행하였다. 이때 front end는 80 GHz-115 GHz 대역의 초냉각 저잡음 수신기를, back end로는 250KHz 분해능의 filter bank를 사용하였고 시스템 온도는 600K-1600K였다. 관측방법은 5점법을 사용하였는데 이는 천체의 중심 관측치와 중심에서 방위각, 고도각 방향으로 각각 일정한 간격만큼 떨어진 4곳의 관측치를 비교하여 중심을 찾는 방법이다. 여기서 그 간격으로 1, 2차 관측에서는 태양과 달의 시반경인 15' 정도를 잡았고 3, 4차 점전파원의 관측시에는 86 GHz에 대한 주비임 반치폭인 25" 정도를 잡았다.

### 2) 결과와 고찰

5점 관측법에 의하여 각 천체의 방위각, 고도각에 따라 K번 관측하면 AZ, EL에 따른 관측치(AZ, EL,  $\Delta AZ$ ,  $\Delta EL$ )을 K개 얻게 된다. 따라서 이 관측치를 (1), (2)식에 대입하여 최소 자승법에 의하여 지향성 모델의 상수를 구하며, 그 결과는 표 2 및 표 3과 같다.

표 2에서 모델 1, 2는 처음 단계로 주로 태양의 관측치만을 사용하였기 때문에 방위각, 고도각에 따라 큰 오차를 보인다. 표 3에서 모델 1, 2사이의 AZ encorder offset 차이는 encorder의 원점설정에서 +2.7°만큼 변화시킨 결과이다.

모델 3은 표 2에 나타나 있듯이 mean residual이  $\Delta AZ = -3.24''$ ,  $\Delta EL = 81''$ 가 편향되었고 fitting된 정도는  $\Delta AZ_{rms} = 4.7''$ ,  $\Delta EL_{rms} = 59.4''$ 로 아직 관측의 지향정도에는 미흡하다. 특히 AZ는 안정된 반면에 EL은 그림 2에서와 같이 북쪽하늘에 대하여 큰 오차를 보이는데 이는 모델 3의 관측치가 주로 남쪽하늘의 천체를 대상으로 얻어졌기 때문이다.

모델 4는 모델 3에 사용한 남쪽하늘의 천체 외에 북쪽하늘의 천체까지 포함하여 실시하였다. 그림 3의

표 1. 지향성 모델에 사용한 천체  
Table 1. Celestial objects used in the pointing model construction.

천체	R. A. (1950) h m s	DEC. (1950) ° ' "	$V_{LSR}$ (km/s)	비고
연속파 전파원				
태양	Ephemeris <sup>9)</sup>	Ephemeris <sup>9)</sup>		모델 1, 2, 3, 4
달	"	"		모델 1
목성	"	"		모델 3, 4
SiO Sources (J=2-1, v=1)				
IK Tau	03 50 43.63	11 15 32.20	34	모델 3, 4
TX Cam	04 56 41.32	56 06 30.02	7	모델 4
ORION KL	05 32 47.00	- 5 24 23.0	7	모델 3, 4
W Hya	13 46 12.22	-28 07 06.51	40	모델 3, 4
RU Her	16 08 08.40	25 12 0.0	-12	모델 3, 4
VX Sgr	18 05 02.97	-22 13 54.2	6	모델 4
$\chi$ Cyg	19 48 38.48	32 47 11.79	9	모델 4
R Cas	23 55 51.68	51 06 36.38	25	모델 4

표 2. 지향성 모델의 자료  
Table 2. Summary of 4 pointing models.

모델	일시(월) (1987년)	관측점	주파수	Mean AZ. Residual [mdeg]	Mean EL. Residual [mdeg]	AZ <sub>rms</sub> [mdeg]	EL <sub>rms</sub> [mdeg]
모델 1	3, 4	110	95 GHz 연속파			~100 (~360")	~100 (~360")
모델 2	5	70	95 GHz 연속파	-6.05 (-21.8")	31.14 (112.1")	62.73 (226.0")	26.23 (94.4")
모델 3	6	152	86.2 GHz 연속파	-0.86 (-3.1")	22.52 (81.1")	1.30 (4.7")	16.45 (59.2")
모델 4	7~10	362	86.2 GHz 연속파 및 선전파	0 (0")	0 (0")	1.01 (3.6")	2.92 (10.5")

관측천체의 분포도에 나타나 있듯이 전하늘에 걸쳐 362점의 관측자료를 얻었으므로 이는 충분히 지향오차를 대표할 수 있다. 표 2에서 모델 4는 방위각 및 고도각의 mean residual이 0으로 방향의 편이가 없고 그 지향오차도  $\Delta AZ_{rms}=3.8''$ ,  $\Delta EL_{rms}=10.5''$ 로 86 GHz 대해서의 주비임 반치폭(HPBW)의 1/5범위에 들어와 있다.

모델 4 결과에 대한 방위각 및 고도각에 대한 의존도를 살펴보기 위하여 그림 4, 5, 6, 7에 방위각(AZ) 및 고도각(EL)에 대한 AZ와 EL residual을 나타내었다. AZ residual 및 EL residual은 방위각에 대하여 기울기는 없으나 약간의 진동을 보인다. 그림 5에서 AZ residual은 고도각에 대하여 거의 일정한 분산을 보이는데 반하여 그림 7의 EL residual

표 3. 지향성 모델의 계수

Table 3. pointing coefficients derived from 4 pointing models.

물리적 의미	함 수	계 수			
		모 델 1	모 델 2	모 델 3	모 델 4
<b>AZIMUTH</b>					
Collimation	1	180.56	-53.63	-20.41	-13.23
Non-orthog.	sin(EL)	-21.58	222.79	7.08	2.25
Encoder-off.	cos(EL)	-2800.33	0.33	54.01	49.39
Tilt	sin(AZ) sin(EL)	0.51	107.12	0.64	0.93
Tilt	cos(AZ) sin(EL)	149.72	167.97	6.42	6.17
Wobble	sin(2AZ) sin(EL)	0.40	57.13	0.02	-0.61
Wobble	cos(2AZ) sin(EL)	29.78	9.65	1.49	0.21
<b>ELEVATION</b>					
Encoder-off.	1	-29.74	-92.01	-60.97	-27.68
Refraction	cot(EL)	-5.54	-14.29	-3.11	2.80
Grav. Distort.	cos(EL)	13.43	118.08	56.74	28.86
Tilt	cos(AZ)	23.44	49.89	-19.66	-0.11
Tilt	sin(AZ)	-1.44	-2.85	-1.59	-4.56
Wobble	sin(2AZ)	1.25	0.81	3.29	0.04
Wobble	cos(2AZ)	0.21	-5.08	-9.44	-0.37

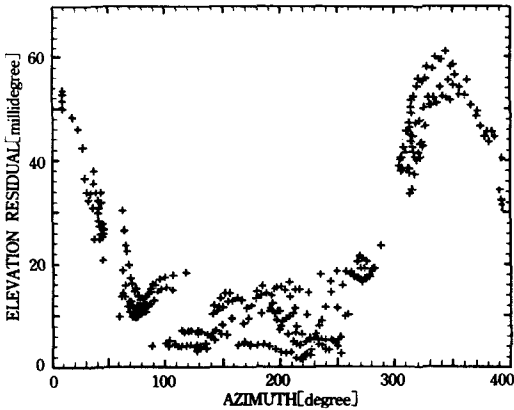


그림 2. 모델 3에서 방위각에 따른 고도각 residual의 분포도

Fig. 2. Elevation residuals versus azimuth in model 3.

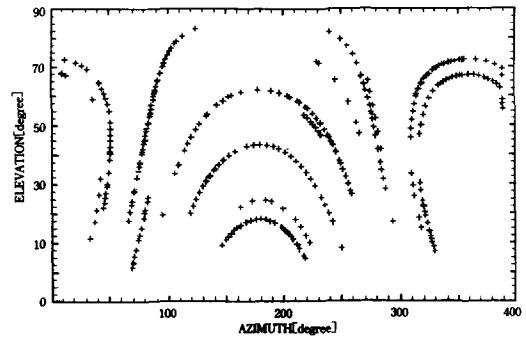


그림 3. 모델 4에 사용된 관측 천체들의 천구상의 분포도

Fig. 3. Distribution of observed positions in the celestial sphere.

은 고도각이 30° 이하에서 분산이 큰 것을 볼 수 있다. 이것은 부경의 위치가 고도에 따라 변하는데 반해 지향성 관측시에는 부경의 위치를 고도 60°에서의 최적치로 고정하여서 관측하였기 때문에 부경의

고도각에 대한 변위가 특히 낮은 고도각에서 현저하게 나타난 것으로 여겨진다. 이러한 부경의 고도각 변위패턴을 이번 지향성 모델에는 고려치 않았기 때문에 그림 8에서 볼 수 있듯이 EL residual이 AZ residual보다 상당히 크게 나타난 주요인으로 추정된다.

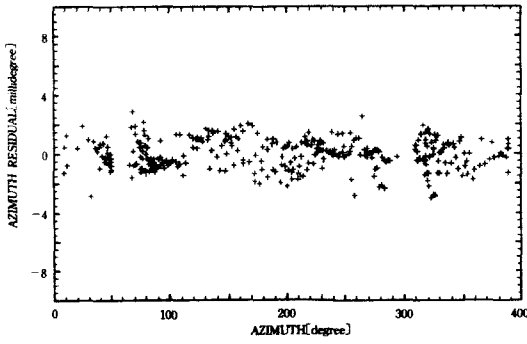


그림 4. 모델 4에서 방위각에 대한 방위각 residual의 분포도  
**Fig. 4.** Azimuth residuals versus azimuth in model 4.

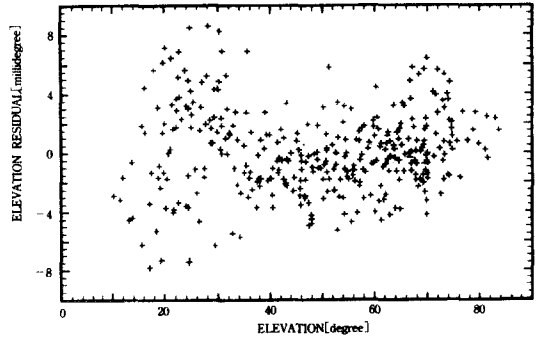


그림 7. 모델 4에서 고도각에 따른 고도각 residual의 분포도  
**Fig. 7.** Elevation residuals versus elevation in model 4.

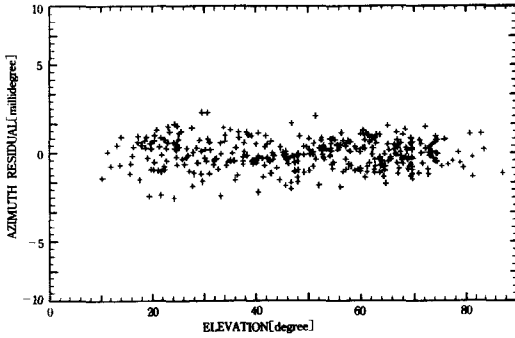


그림 5. 모델 4에서 고도에 따른 방위각 residual의 분포도  
**Fig. 5.** Azimuth residuals versus elevation in model 4.

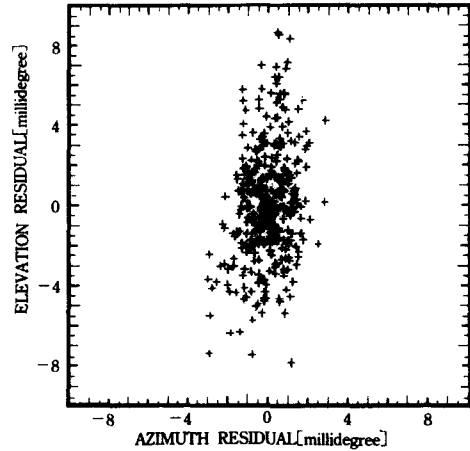


그림 8. 모델 4에서 방위각 residual과 고도각 residual의 분포도  
**Fig. 8.** Elevation residuals versus azimuth residuals in model 4.

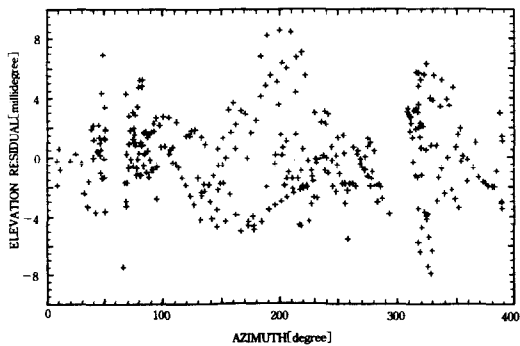


그림 6. 모델 4에서 방위각에 따른 고도각 residual의 분포도  
**Fig. 6.** Elevation residuals versus azimuth in model 4.

13.7m 안테나의 관측된 지향오차의 요인을 분석해 보면 다음과 같이 크게 세가지로 나눌 수 있을 것이다.

첫번째가 천구의 움직임을 계산하는데 가장 기본이 되는 시각의 컴퓨터 수동입력에서 오는 오차이다. 이제까지 매 관측시마다 시보를 수동으로 입력시켰기 때문에 관측시간이 경과함에 따른 평균오차는 시간으로  $\pm 0.3$ 초로서 천구상의 위치로는  $\pm 4''$  정도의 오차를 유발시키리라 판단된다.

두번째는 앞서서도 언급하였듯이 쏜점조정시 고도

각이 60°의 한 각도에서만 관측된 부경의 4축에 대한 최적치로 고정시켜 다른 고도각에서도 관측하였기 때문에 그에 따른 부경의 위치변화가 특히 고도각 지향성 오차의 요인이 되었다고 판단된다. 이는 그림 7에 나타나 있듯이 낮은 고도에서 더 크게 나타나고 있다.

세번째는 관측을 수행하는 동안 레이돔 내부온도의 수직변화에 기인한 주경면의 변형 및 레이돔 안팎의 온도, 습도, 기압 등 기상요소의 미보정으로 인한 오차를 들 수 있다.

따라서 위의 첫째 요인은 표준시보를 수신하여 컴퓨터에 자동입력시키는 시스템 clock을 설치함으로써, 둘째 요인은 부경의 고도각에 따른 패턴을 측정하여 소프트웨어적으로 보정해 줌으로서, 셋째 요인은 기상장치를 설치하여 기상요소를 보정하여 줌으로써 제거하려 한다. 그러면 지향정도는 물리적 근원에 따라 고도각, 방위각의 14항으로 설정된 현재의 모델로 5°이내에 도달하는 것이 가능하리라 여겨진다. 그러나 지향성 요인은 여러가지 요소가 복합되어 나타나므로 지속적인 점검을 통한 모델의 개선이 필요하다.

### Ⅲ. 안테나 효율의 측정

안테나의 성능을 판단하는데 중요한 양으로서 구경효율과 비임효율을 들 수 있다. 이들은 전파원의 비임에 대한 상대적 크기에 따라 각각 실제로 관측되는 안테나 온도와 비례한다.

구경효율은 실제 안테나면을 얼마나 유효하게 이용할 수 있는가 하는 척도로서 점전파원의 천체를 관측하는데 관계되며 물리적 구경면적을  $A_p$ , 유효 구경면적을  $A_e$ 라 할 때 구경효율  $\eta_A$ 는

$$\eta_A = \frac{A_e}{A_p} \quad (3)$$

로 정의된다.<sup>1)</sup>

비임효율은 주비임 입체각의 전체 비임 입체각에 대한 비로써 정의되어 확장된 천체를 관측하는데 관계되며 이는 구경효율과 직접 비례관계가 된다. 그런데 이들은 모두 천체관측에 의하여 측정되어야 하는 양으로 천체에서 방출되는 전파가 주경에 반사된 후 최종적으로 수신기 혼에서 감지되는 경로까지 안테나에 전체가 영향을 주고 있으므로 단계적으로 나눠 종합적으로 평가해야 한다.

따라서 초기단계 안테나 시스템에서는 그 효율을 측정하기 앞서 우선 주경, 부경, 수신기 front end계에 이르는 alignment (RF 비임축)의 측정, 조정과

축점의 조정이 선행되어야 한다. 이러한 요소가 벗어나 있으면 전파의 손실에 의한 효율의 감소를 가져와 전파강도가 떨어짐은 물론 대칭적인 비임패턴을 얻기 어렵다.

#### 1. RF 비임축 및 축점의 조정

##### 1) RF 비임축의 조정

전파망원경의 초기설치시 부경을 collimation 방법에 의하여 주경의 RF 비임축에 설치하고 수신기 front end계를 부경의 cassegrain 축점에 일치시켜 그 수평 및 중심축을 맞추었으나<sup>2)</sup> 이는 상당한 오차를 가지고 있으므로 실제 측정에 의하여 미세조정을 행하여야 한다. 이 방법으로서 부경의 illumination pattern 측정법이 있는데 이는 안테나 고도를 0°로 두고 액체질소를 넣은 absorber를 부경의 중앙에 설치한 후 방위각, 고도각 방향으로 일정한 grid를 설정하여 방위각 방향으로 scan하는 방법을 이용한다. 즉 hot sky (~300K)에 대한 cold absorber (77K)를 관측하여 그 결과를 등고선도로 작성하여 pattern을 얻는 방법이다. 방위각 방향의 scan간격과 고도각의 grid는 부경의 전면적이 cold absorber target를 스쳐가도록 설정하였다.

이와같이 illumination pattern을 얻어 그 중심 및 대칭성이 좋지 않으면 그것을 보상하여 주는 방향으로 수신기 front end계의 level 및 중심을 조정하여 초기단계의 alignment 및 focusing을 행한다.

3차에 걸쳐 측정 및 조정을 수행한 결과 얻은 illumination pattern은 그림 9에 나타나 있다. 그림 9에 나타나 있는 수치는 상대적 intensity를 나타낸다. 그림 9는 약간의 astigmatism을 보여주나 비교적 대칭적인 pattern으로 부경중심에서 feed horn에 이르는 RF 비임축에 잘 맞아 있음을 보여준다. 다음 단계의 미세조정은 실제 전파원을 관측하여 수행한다.

##### 2) 축점의 미세조정

점전파원으로서 전파강도가 센 SiO 메이저원인 R Cas를 관측하여 그 강도변화와 적분강도의 분포도를 얻어 축점의 미세조정을 수행하였다. 즉, 부경의 4축을 미세조정하여 축점거리와 AZ 및 EL의 기울기를 변화시키므로써 전파강도가 최대가 되고 대칭성 좋은 적분강도 분포도가 얻어지도록 하였다. 고도각 60°에서 최적치로 얻어진 부경의 위치는 설치된 위치<sup>3)</sup>에서 horn으로 부터 멀어지는 방향으로 0.5mm 이동되었으며, EL방향 기울기는 EL이 감소하는 방향으로 12.5mdeg였고, AZ방향 기울기는 변화가 없었다.

#### 2. 구경효율의 측정

##### 1) 관측

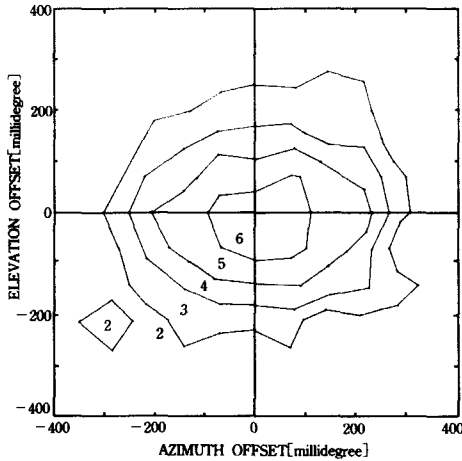


그림 9. 부경의 illumination pattern  
Fig. 9. Measured illumination pattern of subreflector.

밝기온도가 잘 알려진 금성에 대하여 86 GHz의 연속파 영역에서 beam switching mode로 관측하였다. 관측의 제원은 표 3. 4에 있다.

2) 구경효율의 계산

식 (3)에서 정의된 구경효율은 물리적 구경이  $A_p$ 인 안테나를 사용하여 밝기온도가  $T_b$ , 유효입체각이  $\Omega'_s$ 인 천체를  $\lambda$ 라는 파장으로 관측하여 보정된 안테나 온도로서  $T_A^*$ 를 얻었다면 구경효율  $\eta_A$ 은

$$\eta_A = \frac{\lambda^2 T_A^*}{A_p T_b \Omega'_s} \quad (4)$$

로 나타난다.<sup>(4)</sup>

여기서 천체가 시직경이 D인 행성과 같은 disk 형태인 경우 유효입체각  $\Omega'_s$ 는

$$\Omega'_s(\text{disk}) = \Omega_M(1 - \exp(-\ln 2(D/\theta)^2)) \quad (5)$$

로 주어지고 주비입 입체각  $\Omega_M$ 과 주비입의 반치폭

표 4. 구경효율 관측의 제원  
Table 4. Summary of the aperture efficiency measurements.

관측 일시	1987년 9월 28일
관측 주파수	86 GHz의 연속파
관측 천체	금 성
부경의 위치	축점거리 : -0.5mm AZ tilt : 0° EL tilt : -0.0125°
Back End	Lock-in Amp. to Chart Recorder
시스템 온도	800 K

(HPBW)  $\theta$  사이에는  $\Omega_M = 1.133\theta^2$ 의 관계가 있다. 그러므로 구경효율  $\eta_A$ 는 관측된 금성의 안테나 온도  $T_A^* = 2.1K$ 와 이 때의 시직경  $D = 9.9''$ , 86GHz에서 밝기온도  $T_b$ 로 357.5K<sup>(5)</sup>를 사용하여 계산하면 26%의 값을 얻게 된다.

한편 실제 관측되는 전파는 안테나 경면 불균일에 의한 손실뿐만 아니라 레이돔에 의한 흡수 및 산란, 부경과 부경지지대에 의한 차단, 안테나의 Ohmic loss, Spillover 등에 의하여 손실이 나타난다. 대덕 전파망원경의 경우 레이돔에 의한 흡수가 3%, 레이돔에 의한 반사가 3.6%(86GHz), 레이돔 frame에 의한 흡수 및 차단이 9%, 부경과 부경의 지지대에 의한 차단이 4%, Ohmic loss가 2%, spillover가 6%이다. 따라서 이들에 의한 총손실은 25%가 되므로 이를 보정한 구경효율  $\eta_A^* (= \eta_A / (1 - 0.25))$ 는 35%가 된다.

3. 비임패턴 및 비임효율의 측정

1) 관측

SiO 메이저원으로서 그 스펙트럼이 하나의 성분만을 갖는 미라형 만기 변광성 R Cas를 택하여 5점 관측법으로 비임패턴을 구하였다. 사용한 선은 SiO,  $J=2-1, v=1$ 의 85.243350 GHz로서 back end는 250 KHz의 분해능을 갖는 256 channel filter bank를 사용하였다. 관측의 제원은 표 5에 나타나 있다.

표 5. 비임패턴 관측의 제원  
Table 5. Summary of the beam pattern measurements.

관측 일시	1987년 12월 24일
관측 천체 및 관측 주파수	R Cas : SiO, $J=2-1, v=1$ 86.243350 GHz의 선 전파
부경의 위치	축점거리 : -0.5mm AZ tilt : 0° EL tilt : -0.0125°
Back End	250 KHz resolution의 256 channel filter bank
시스템 온도	700 K

2) 비임패턴 및 비임효율

관측결과 R Cas 중심의 스펙트럼은 그림 10과 같았고 비임패턴은 그림 11과 같이 나타났다. 그림 10의 가로축은 태양 주위 별들의 평균속도에 대한 관측천체의 상대속도를 나타내며, 세로축은 보정된 안테나 온도  $T_A^*$ 를 나타낸다. 그림 11에 나타난 수치는 보정된 안테나 온도  $T_A^*$ 를 VLSR에 대해 적분한 값이다. 그



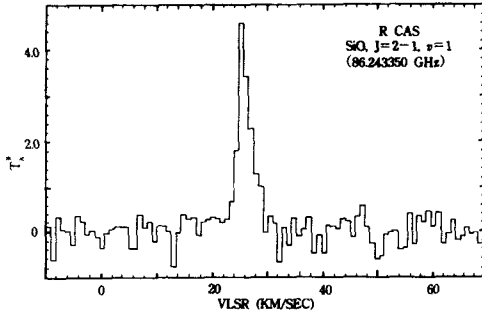


그림10. R Cas에 대한 86.243350 GHz SiO (J=2-1, v=1) 메이저선 관측에 의한 비임패턴  
 Fig. 10. SiO (v=1, J=2-1) maser spectrum of R Cas. at 86.243350 GHz.

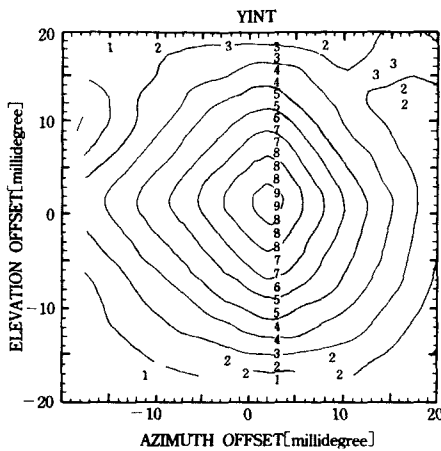


그림11. R Cas 중심에 대한 86.243350 GHz SiO (J=2-1, v=1) 메이저선 스펙트럼  
 Fig. 11. Beam pattern measured by SiO (v=1, J=2-1) maser spectrum of R Cas. at 86.243350 GHz.

림11에서 알 수 있는 것처럼 대체로 둥근 모양의 대칭형 비임패턴을 볼 수 있다. 여기서 주비임의 반치폭(HPBW)은 방위각 방향은 50"로 이론적인 값인  $\lambda/D=53"$ 와 거의 같으나 고도각 방향은 80"로 이론치보다 크다. 이는 고도각 방향에 따른 부경의 변위가 아직 보정되지 않는데 기인되는 것으로 여긴다.

비임효율의 계산은 구경효율 측정시 관측결과  $\eta_A$ 를 이용하여 비임효율  $\eta_B$ 의 정의식

$$\eta_B = \frac{\Omega_M}{\Omega_A} = \frac{\eta_A A_P \Omega_M}{\lambda^2} \quad (6)$$

에 의하여  $\eta_B=30\%$ , 구경효율과 같이 안테나 경면 효과 이외의 손실(25%)을 보정해 주면 보정된 비임효율은 50%이다.

4. 결과에 대한 고찰

구경효율은 13.7m와 같은 cassegrain 안테나에서 방사계 각 부분으로부터의 복합된 기여로 표시할 수 있으나,<sup>[6]</sup> 그 주요인자는 주경면의 요철에 의한 전파 산란에 따른 것으로 주경면 오차의 rms 값을  $\epsilon$  이라고 하면 구경효율  $\eta_A^*$ 는

$$\eta_A^* \propto \exp[-(4\pi\epsilon/\lambda)^2] \quad (7)$$

로 나타난다.<sup>[7]</sup> 즉 주경면 오차  $\epsilon$ 이  $\eta_A^*$ 에 지수함수적으로 영향을 미쳐 그 개선이 효율 향상의 가장 중요한 문제의 하나이다.

이 식을 이용하여 측정된 구경효율  $\eta_A^*=0.35$ 가 모두 주경면 오차에 따른 것이라고 가정하면  $\epsilon=280 \mu m$ 가 되어 주경판넬 설치시 theodolite에 의한 광학적인 측정치 250 $\mu m$ <sup>[8]</sup>에 근사되어 있음을 볼 수 있다. 초기단계 시스템에서 0.35의 구경효율은 좋은 편이라 할 수 있겠으나 보다 효율 좋은 관측을 위해서는 주경면 판넬을 재조정하여 86 GHz대에서 40% 이상의 효율이 요구된다.

IV. 결 론

초기단계에 있는 13.7m 우주전파 관측용 안테나의 지향성 모델이 4차에 걸친 천체의 관측에 의하여 방위각의 rms 지향오차가 3".8, 고도각의 rms 지향오차가 10".5로 86 GHz대역의 안테나 주비임 반치폭(HPBW)의 1/5로 확립되었다.

지향오차의 고도각 residual은 부경의 고도각에 따른 변화패턴이 고려되지 않는 관측으로 방위각 residual보다 크게 나타났고 특히 부경의 변화가 많은 30" 이하의 고도각에서 그 분산이 컸다. 그리고 측정된 지향오차의 주요인은 부경의 고도각 미보정을 포함하여 시각의 수동입력, 기상요소들의 미보정으로 여겨지며 이들을 보정하면 현재의 고도각, 방위각 14항의 지향성 모델로도 전방향 5"이내로 도달할 수 있으리라 예측된다.

안테나 구경효율은 86 GHz대에서 35%로 측정되어 주경면 오차로 환산하면 표면rms오차는 280 $\mu m$ 로 나타난다. 또한 비임효율은 50%로 측정되었으며 비임패턴은 부경의 고도각 변위 미보정으로 인한 고도각 방향의 팽창이 보이나 대체로 둥근형태의 대칭형을 나타낸다.

參 考 文 獻

[1] Young J.S., Lord S.D. and Kinzel W., "Pointing of the 14 m FCRAO telescope," *FCRAO Report #261*, 1985.

[2] Kraus J.D., "Radio astronomy," pp. 158-159, *McGraw-Hill Book Company*, New York, NY., 1966.

[3] 오병렬, 조세형, 정재훈, 이영웅, 김현구, 노덕규, "전파망원경에 의한 관측기술 개발(1차년도)", 과학기술처 특정연구 개발사업 보고서 N8511-F, pp. 82-88, 1986.

[4] Schloerb F.P., Snell R.L., "Calibration of FCRAO antenna: evaluation of chopper wheel calibration method and the performance of the telescope," *FCRAO Report #150*, 1980.

[5] Ulich B.L., Davis J.H., Rhodes P.J. and Hollis J.M., *IEEE Trans. Antenna Propagat.* vol. AP-28, p. 367, 1980.

[6] Kraus J.D., "Radio astronomy," pp. 212-223, *McGraw-Hill Book Company*, New York, NY., 1966.

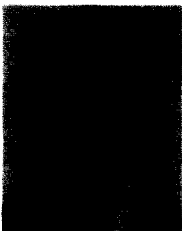
宮憲一 監修, "衛星通信技術," 電子通信學會編, p. 137, 1980.

[7] Ruze, J. "Physical limitations on antennas," *Mass. Inst. Technol. Res. Lab. Electron. Tech. Rept.* 248, Oct. 30, 1952.

[8] 오병렬, 조세형, 정재훈, 이영웅, 김현구, 노덕규, "전파망원경에 의한 관측기술 개발(1차년도)", 과학기술처 특정연구 사업개발 연구보고서 N8511-F, pp. 74-81, 1986.

[9] "The Astronomical Almanac," *U.S. Naval Obs. Press*, 1987. \*

著 者 紹 介



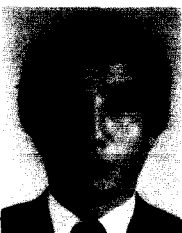
趙 世 衡 (正會員)

1952年 2月 15日生. 1975年 2月 서울대학교 천문기상학과 졸업. 1977年 서울대학교 대학원 천문학과 졸업 이학석사. 1985年 4月 일본 동경대학교 천문학과 이학박사 학위 취득. 현재 천문우주과학연구소

대덕전파천문대장. 주관심분야는 전파망원경 시스템 및 우주전파분광학 등임.

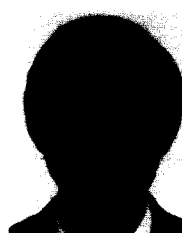
李 英 雄 (正會員)

1954年 12月 11日生. 1978年 2月 서울대학교 천문학과 졸업. 1984년 서울대학교 대학원 천문학과 이학석사. 현재 미국 Massachusetts 대학 천문학과 박사과정 재학중. 주관심분야는 전파천문학 등임.



鄭 在 勳 (正會員)

1954年 9月 25日生. 1976年 서울대학교 지구과학교육과 졸업. 1983年 2월 서울대학교 대학원 천문학과 이학석사. 현재 천문우주과학연구소 선임연구원. 주관심분야는 전파천문학 등임.



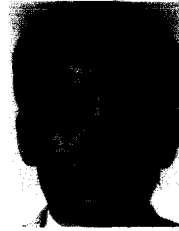
金 顯 求 (正會員)

1958年 3月 27日生. 1981年 서울대학교 천문학과 졸업. 1983년 2월 서울대학교 대학원 천문학과 졸업 이학석사. 독일 MPIfR 연수. 현재 천문우주과학연구소 연구원. 주관심분야는 전파천문학 등임.



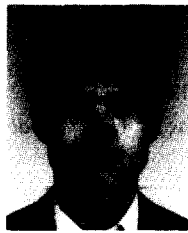
盧 德 圭(正會員)

1962年 10月 24日生. 1985年 서울대학교 천문학과 졸업. 현재 천문우주과학연구소 연구원. 주관심분야는 전파천문학 등임.



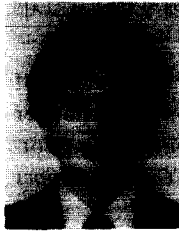
吳 鬯 烈(正會員)

1936年 3月 21日生. 1965年 서울대학교 천문학과 졸업. 국립천문대소백산 관측소장. 한국천문학회장 역임. 현재 천문우주과학연구소 책임연구원. 주관심분야는 전파천문학 등임.



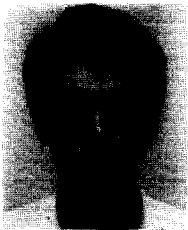
朴 鏞 善(正會員)

1960年 9月 18日生. 1984年 서울대학교 천문학과 졸업. 1986年 2月 서울대학교 대학원 천문학과 졸업 이학석사. 현재 천문우주과학연구소 연구원. 주관심분야는 전파천문학 등임.



李 昌 勳(正會員)

1957年 1月 4日生. 1979年 충남대학교 전기공학과 졸업. 1981年 2月 고려대학교 대학원 졸업 공학석사. 1987年 고려대학교 대학원 공학박사 학위 취득. 현재 천문우주과학연구소 선임연구원. 주관심분야는 대규모 계통의 제어이론, 전파천문학, 마이크로웨이브 공학 등임.



金 奉 奎(正會員)

1959年 3月 27日生. 1983年 경북대학교 물리학과 졸업. 1987年 8月 서울대학교 대학원 천문학과 이학석사. 현재 천문우주과학연구소 연구원. 주관심분야는 전파천문학 등임.



任 仁 誠(正會員)

1956年 4月 15日生. 1979年 충남대학교 공업교육과 졸업. 1986年 2月 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업 공학석사. 현재 천문우주과학연구소 선임연구원. 주관심분야는 Digital Control, 전파천문학 등임.