

85~115 GHz 전파망원경용 컬러게이트 급전 혼 제작

Fabrication of the Corrugated Feed Horn for 85~115 GHz Radio Telescope System

손 태 호 · 한 석 태*

Taeho Son · Seog-Tae Han*

요 약

밀리미터파 대역에서 동작하는 컬러게이트 혼 안테나의 설계법을 나타낸다. 컬러게이트 혼 설계에 있어서 가장 중요한 하이브리드 조건을 계산한다. 본 논문에서는 파장이 짧은 밀리미터파에서 평형 하이브리드 모드의 변환과 제작이 가능한 크기의 컬러게이트 프로파일을 구한다. 모드 이론을 적용하여 혼 내부 및 컬러게이트 내 전자계를 유도한다. 혼의 전파 특성은 모드 임피던스 정합과 경계 조건으로부터 계산하고, 혼 개구면 전자계로부터 Kirchhoff-Hyugen 원리를 적용하여 방사 전자계를 구한다. 85~115 GHz 대역에서 동작하는 밀리미터파 컬러게이트 혼 안테나를 설계하고, 전기 포밍 방식으로 제작한다. 측정 결과, 동작 주파수 대역에서 1.3:1 이하의 VSWR과 주파수 85, 100 및 110 GHz에서 각각 9.2, 9.16 및 9.02도의 반치각이 측정됨으로써 이론적 결과와 잘 부합되고 있음을 보인다.

Abstract

Design procedure of corrugated horn antenna for the mm-wave frequency range is presented, and hybrid condition in horn is calculated. In this paper, corrugate profiles of horn which satisfy both transition to balanced hybrid condition and fabrication possibility under the mm-wave short wavelength are obtained. Electromagnetic fields inside horn and corrugation are derived by the cylindrical mode theory. Propagation characteristics in the horn are calculated by the mode impedance matching method with boundary conditions, and radiation fields are obtained by the Kirchhoff-Hyugen principle to the horn aperture fields. A mm-wave corrugated horn antenna which operates on 85~115 GHz is fabricated by electric forming method. Measurements show that VSWR is under 1.3:1 over whole band and the half power beamwidth on radiation pattern 9.2, 9.16 and 9.02 degree on 85, 100 and 110 GHz are agree well with theoretical calculation.

Key words : Corrugated Horn, Millimeter Wave Horn, Hybrid Condition, Cylindrical Mode Theory

I. 서 론

혼 안테나는 측정용 표준 안테나로 사용될 뿐만 아니라 패러볼라(parabola), 카세그레인(cassegrain), 그레고리언(gregorian) 등 각종 반사판 안테나의 급전 혼으로 널리 적용되고 있다. 혼 안테나의 적용이

반사판 안테나의 급전부로 사용되기 때문에 대부분 반사판 안테나 시스템의 대역 특성은 급전 혼에 의해 좌우된다. 특히, 이중 대역을 사용하는 위성 통신용이나 광 대역 특성을 요하는 전파천문용 안테나의 경우, 대역 특성이 좁고 부엽이 큰 일반 혼으로는 특성을 만족할 수 없다. 따라서 이러한 시스

순천향대학교 정보통신공학과(Dept. of Information and Communication Eng., Soonchunhyang University)

*한국천문연구원 전파천문연구부(Radio Astronomy Division, Korean Astronomy and Space Science Institute)

· 논문 번호 : 20080324-040

· 수정완료일자 : 2008년 5월 14일

템에는 컬러게이트 혼 안테나를 적용하여 오고 있다^{[1],[2]}.

컬러게이트 혼 안테나는 거의 1 octave 영역에 이르는 대역에서 평탄한 이득, 낮은 축비(axial ratio)와 교차 편파(cross polarization) 성분 및 부엽(side lobe) 특성을 가지고 있다. 컬러게이트 혼에 관한 연구는 1962년에 미국의 Kay에 의해서 시작되었고, 이후 ring loaded 등과 같은 효율적인 모드 변환부에 관한 연구가 진행되었다^{[3]~[7]}.

이동 통신 및 위성 통신에서 밀리미터파 대역 사용에 따른 안테나용 혹은 전파천문용 안테나의 급전용으로 컬러게이트 혼 안테나의 수요가 매우 필요할 실정이다. 국내에서는 천문우주연구원을 주축으로 전파망원경에 소요되는 급전 혼에 대한 연구가 진행되고 있다^[8]. 밀리미터파 대역은 파장이 매우 짧기 때문에 원추형 컬러게이트 혼의 경우, 기본 모드인 TE_{11} 모드에서 하이브리드 모드인 HE_{11} 로의 완전한 모드 변환이 쉽지 않다. 이는 완전 평형 하이브리드 조건에 부합하는 컬러게이트 크기는 제작하기가 불가능할 정도로 작은 치수로 되기 때문이다. 따라서 밀리미터파 영역에서는 제작성을 고려하기 위해 평형 하이브리드 조건과 제작 가능한 크기의 치수와 trade off하면서 설계를 하여야 한다.

이 연구에서는 밀리미터파 대역에서 동작하는 컬러게이트 혼 안테나를 설계한다. 모드 이론과 임피던스 정합 이론을 통하여 혼 내 전파 특성 관계식을 유도한다. 유도된 관계식으로부터 컬러게이트 치수별 하이브리드 조건을 얻음으로써 성능의 열화가 최소이면서도 제작이 가능한 크기를 얻는다. 또한, 방사 특성을 위해 등가원리와 포텐셜 이론을 적용하여 방사 전자계를 구하여 주편파 및 교차 편파 특성을 구한다. 전파천문용 85~115 GHz 컬러게이트 혼 안테나를 설계하고, 이를 제작 측정함으로써 이론치와 비교하고 이를 고찰한다.

II. 혼 내부 전자계 방정식

2-1 컬러게이트 혼의 구조

위성 통신이나 전파 천문 망원경용 시스템은 원형편파를 적용하고 있다. 따라서 급전 혼은 원형 편파의 전파가 가능한 원추형(conical) 컬러게이트 혼

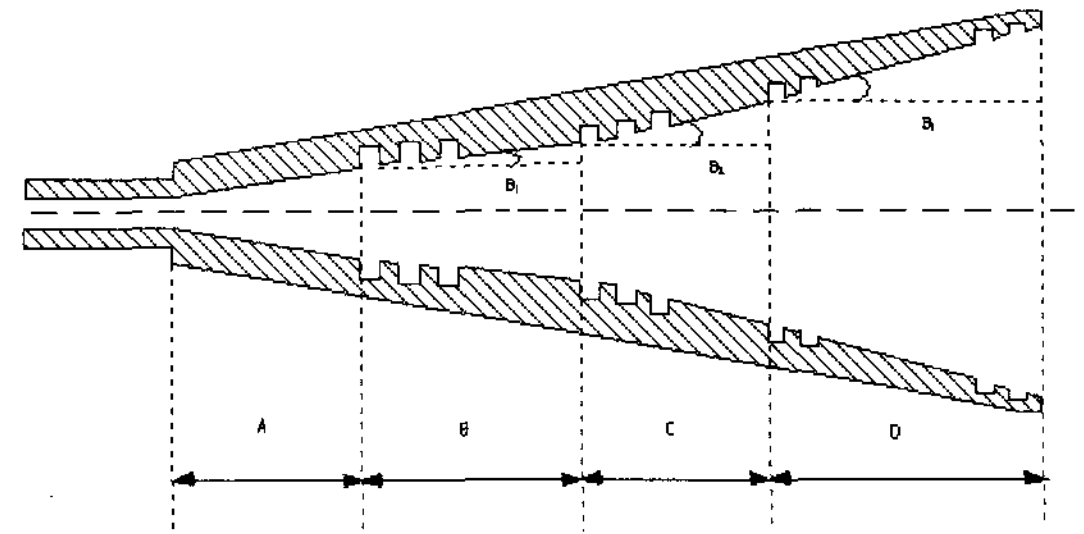


그림 1. 원추형 컬러게이트 혼의 단면도

Fig. 1. Section view of the corrugated conical horn.

이 사용된다.

원추형 컬러게이트 혼 안테나는 원통 도파관에 연결되어 있고, 내부 면이 주름 관으로 이루어져 있다. 이 안테나의 구조는 그림 1과 같으며, 좌측으로부터 input taper(A), mode converter(B), transition(C) 및 output flare(D) 영역으로 나눈다.

Input taper 영역은 뒷부분인 mode converter에서 발생하는 교차 hybrid 모드의 역 전달을 막아주는 역할을 하여 정재파 특성이 결정되어지는 영역이다. Mode converter 영역은 원통 도파관의 기본 모드인 TE_{11} 모드를 하이브리드 모드로 바꾸어 주는 부분이다. 이때 가급적 하이브리드 조건에 맞추어 HE_{11} 모드만 존재하도록 설계한다. Transition 영역은 output flare 영역과 mode converter section을 연결해 주기 위한 부분으로 교차 하이브리드 모드의 발생을 억제시키는 부분이기도 하다^{[1],[5]}. 혼 길이의 대부분에 해당하는 output flare 영역은 혼 빔 패턴과 이득 및 초점 거리 등의 특성이 결정되는 영역이다^[2].

2-2 혼 내부 전자계 방정식

혼 내부 전자계 방정식은 그림 2와 같은 컬러게이트 원통 도파관을 해석함으로써 구할 수 있다. 파동 방정식을 만족하는 TE, TM 모드 스칼라 함수를 원통 좌표계 파동방정식으로부터 유도한 다음 컬러게이트 밖인 $\rho < r_1$ 영역에서의 전자계와 컬러게이트 내부 영역인 $r_1 < \rho < r_0$ 에서의 전자계를 계산한다^{[1],[5],[6]}.

$\rho < r_1$ 영역에서 $\rho = r_1$ 에서의 어드미턴스를 계산하면

$$\frac{H_\phi}{E_z} \Big|_{\rho=r_1} = \frac{-jk}{K} y_0 \frac{1}{x_1} \{ m \overline{\beta \Lambda} + F_m(x_1) \} \quad (1)$$

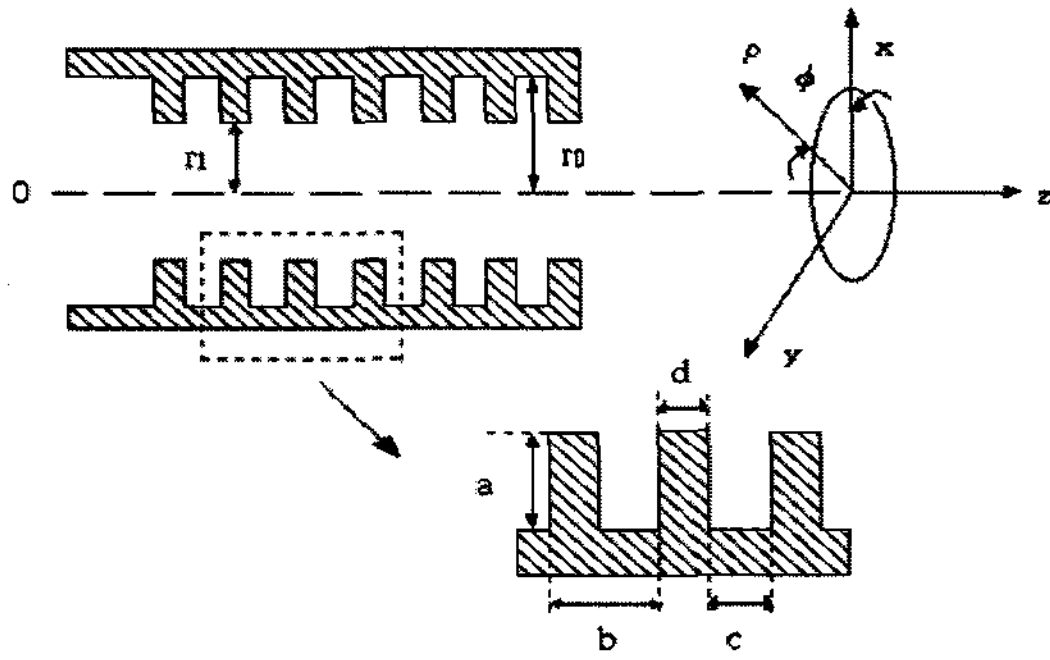


그림 2. 컬러게이트 도파관 구조
Fig. 2. Structure of the corrugated waveguide.

가 된다. 여기서 $x = K\rho$, $K^2 = k^2 - \beta^2$, $k^2 = \omega^2 \cdot \epsilon_0 \mu_0$, $k\bar{\beta} = \beta - jy_0$, $\bar{A} = \frac{H_z}{E_z}$, $y_0 = \left(\frac{\epsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2}$, $F_m(x) = x \frac{J_m'(x)}{J_m(x)}$ 이다.

$r_1 < \rho < r_0$ 영역에서 $\rho = r_1$ 에서의 어드미턴스를 계산하면 m 차 1종 및 2종 Bessel 함수의 식인 다음과 같은

$$\frac{H_\phi}{E_z} \Big|_{\rho=r_1} = \frac{J_m'(x_1')Y_m(x_0') - J_m(x_0')Y_m'(x_1')}{J_m(x_1')Y_m(x_0') - J_m(x_0')Y_m(x_1')} \quad (2)$$

식으로 된다. 여기서 x_1', x_0' 은 각각 Kr_1, Kr_0 이다. 이 두 어드미턴스는 $\rho = r_1$ 에서 정합되어야 하므로 정합 조건으로부터 다음과 같은 항등식을 얻을 수 있다.

$$F_m(x_1) - \frac{(m\bar{\beta})^2}{F_m(x_1)} = \left(\frac{K}{k}\right)^2 S_m(x_1', x_0') \quad (3)$$

위 식에서 우측 항에서

$$S_m(x, y) = x \frac{J_m'(x)Y_m(y) - J_m(y)Y_m'(x)}{J_m(x)Y_m(y) - J_m(y)Y_m(x)} \quad (4)$$

이다. 식 (4)=0을 만족하는 조건은 전계 E_z 의 크기와 자계 H_z 의 크기가 같아지는 평형 하이브리드 조건이다. 식 (3)에 $\bar{\beta}^2 = 1 - \left(\frac{K}{k}\right)^2$ 관계를 적용하고 Bessel 함수 내부 변수에서 $Kr_1 = a$ 로 놓으면 컬러게이트 도파관 내 전파 상수는

$$\beta = k\bar{\beta} = \left[k^2 - \left(\frac{a}{r_1}\right)^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

와 같이 된다.

III. 방사 전자계

컬러게이트 혼 안테나의 개구면 전자계는 먼저 컬러게이트 도파관 개구면 전자계에 기하광학법에 의한 개구면 위상오차 항을 첨가함으로써 구할 수 있다^[5].

개구면에서의 전자계가 계산되면 방사 전자계는 Kirchhoff-Hyugen 원리에 따라 구할 수 있다. 즉, 개구면 전자계를 등가 원리(equivalent principle)에 따라 전류원 및 자류원으로 바꾼 뒤 포텐셜 적분식을 이용하여 풀어 전계 및 자계 벡터 포텐셜(F, A)을 계산한다. 방사전계를 계산할 때 근거리 영역 항인 $\frac{1}{r^2}$ 과 $\frac{1}{r^3}$ 항을 무시하고, $\frac{1}{r}$ 항만 고려하면 근사 계산에 의해 다음과 같이 된다.

$$E_\theta \cong -jkF_\phi - jk\eta A_\theta = -jk\eta \cos \phi (1 + \cos \theta) A_x \quad (6)$$

$$E_\phi \cong jkF_\theta - jk\eta A_\phi = jk\eta \sin \phi (\cos \theta + 1) A_x \quad (7)$$

여기서 η 는 자유공간의 특성 임피던스로 $120 \pi [\Omega]$ 이다. 혼 개구면의 전계가 x 방향으로 편파될 경우, 방사전계의 주 편파 성분 E_{co-pol} 과 교차 편파 성분 E_{x-pol} 은 다음 식으로부터 구할 수 있다.

$$E_{co-pol} = E_\theta \cos \phi - E_\phi \sin \phi$$

$$E_{x-pol} = E_\theta \sin \phi + E_\phi \cos \phi \quad (8)$$

IV. 혼 안테나의 설계

주파수 85~115 GHz에서 동작하는 밀리미터파용 컬러게이트 혼 안테나 입력은 사각형(rectangular) 도파관이므로 원통 도파관과는 transition이 필요하다. 입력 도파관은 크기 2.32×1.02 mm의 WR-10 사각형 표준 도파관이고 변환된 원통의 반지름은 1.36 mm, transition 길이는 16.32 mm이다. 이는 사각형 도파관의 기본 모드인 TE_{10} 모드와 원통 도파관의 기본 모드인 TE_{11} 모드의 전파 특성을 같게 함으로써 transition 치수를 구할 수 있다.

컬러게이트의 mode converter 영역 부분의 설계는 컬러게이트 치수별 하이브리드 조건 값을 해석하여

표 1. 컬러게이트 치수별 혼 내부 특성
Table 1. Propagation characteristics of horn versus corrugation dimensions.

No. of pitch	Slot / pitch	Cut off (TE) [GHz]	Dimension [mm]		Hybrid condition $ \Delta $ vs. GHz		
			Pitch	Ridge	85	100	115
2	0.55	209	1.30	0.59	0.995	1.05	1.10
3	0.65	265	0.87	0.30	0.996	1.04	1.09
4	0.75	307	0.65	0.16	0.996	1.04	1.08
5	0.85	338	0.52	0.08	0.997	1.03	1.07

야 한다^{[8],[9]}. 그림 2에서 컬러게이트 간격(b+d)을 pitch, 홈(c)을 slot, 요철부(d)를 ridge라 하고, 식 (1)~(5)의 전자계 해석 결과를 컴퓨터 프로그래밍하여 계산하고, 이를 나타내면 표 1과 같다. 표 1은 계산된 세부적인 자세한 데이터 중 논문 지면상 대표적인 치수에 대해서만 나타낸 표이다. 계산을 위해 사용된 언어는 FORTRAN이다.

표 1에서 No. of pitch는 파장 당 피치의 수를 나타낸 것이고, cut off(TE)은 컬러게이트 내 차단되는 TE 모드의 차단 주파수를 나타낸 것이다. 표 우측에 나타낸 하이브리드 조건은 3가지 주파수에서 혼 내부에 존재하는 HE_{11} 모드의 평형 상태를 계산한 것으로 1이 되면 완전 평형 하이브리드 모드가 존재한다. 표에서 보듯이 피치의 수가 증가할수록 평형 하이브리드 조건에 가까워짐을 알 수 있다. 하지만 피치의 수가 증가하거나 슬롯 폭이 증가하면 ridge가 작아져서 제작이 불가해진다. 그러므로 파장 당 피치의 수와 슬롯의 간격을 조절하여 제작이 가능한 크기이면서도 하이브리드 조건이 1에 가장 가까운 치수를 trade off하여 설계하여야 한다.

이를 다시 나타내면

- 1) 파장 당 pitch의 수와 slot: ridge의 비를 변수로 하여
- 2) 앞에서 구한 혼 내부 전자계 식에 대입하고
- 3) 주파수별 하이브리드 조건을 산출한다.
- 4) 하이브리드 특성과 제작 가능성을 함께 고려한 컬러게이트 치수를 선택하여 설계한다.
- 5) 설계된 혼 치수를 해석 식에 대입함으로써 혼 내 전파 특성 및 방사 특성 등의 이론적 결과를 구한다.

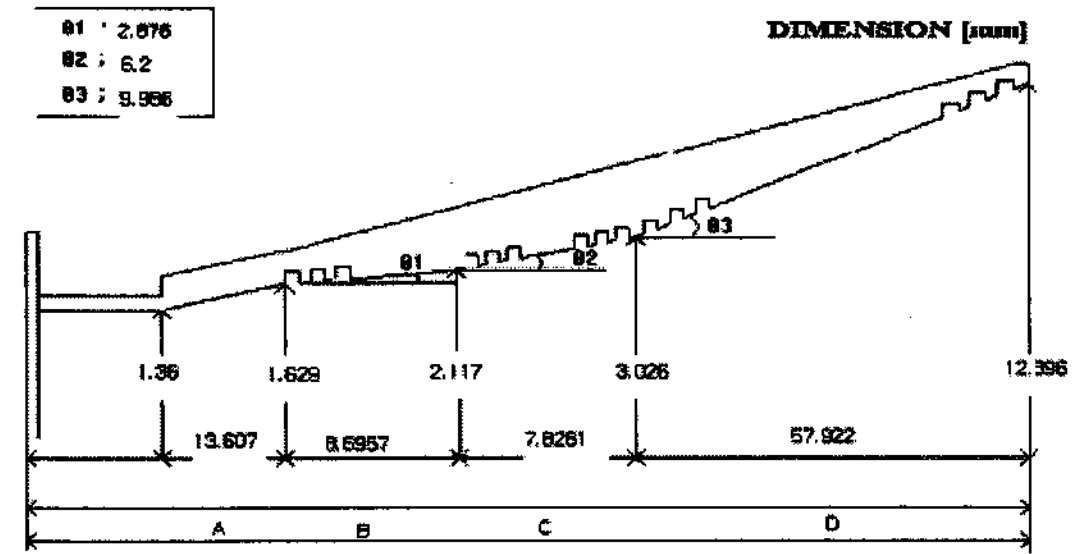


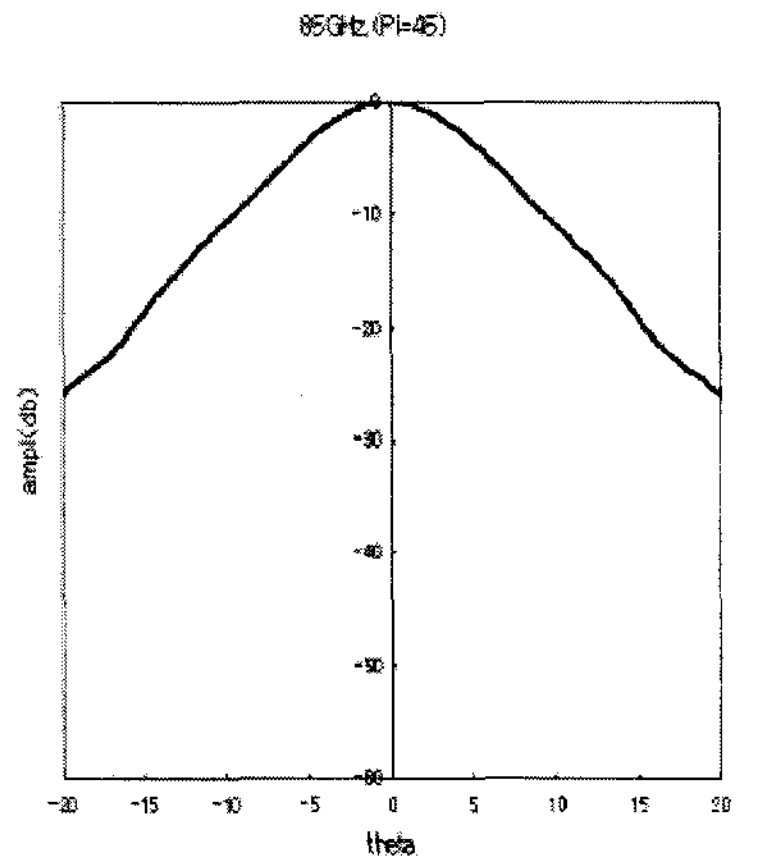
그림 3. 설계된 컬러게이트 혼의 치수
Fig. 3. Dimension of the corrugated horn.

표 1은 대표적으로 몇 개의 치수만 나타낸 것이다. 치수별 혼 내부 특성 데이터에 따라 평형 하이브리드 조건에 근접하면서도 제작이 가능한 치수를 결정하여 설계한 결과는 그림 3과 같다.

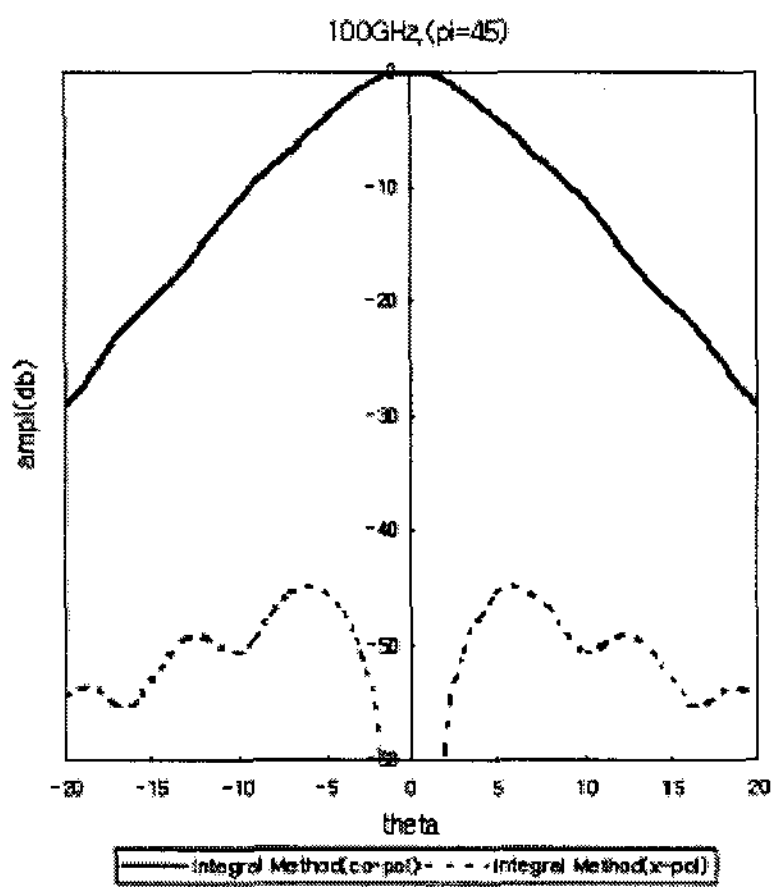
그림 3에서 혼의 내부 반경은 12.896 mm, transition 길이는 27.2, 혼 길이는 87.051이다. Input taper 영역은 시작점 반경은 1.360이고, 끝점 반경은 1.629 mm로 tapering 되어 있다. Mode converter 영역의 슬롯의 개수는 10개이며, pitch 길이는 0.87 mm, slot width는 0.57 및 ridge width는 0.3 mm이다. 이 정도 width는 전기 포밍 방식으로 충분히 제작할 수 있다. 이 영역의 semi flare 각도는 2.88도이며, 컬러게이트 슬롯의 깊이는 첫 번째 깊이는 1.013이고, 최종 10번째 깊이는 0.986 mm이다. 7.826 mm 길이를 갖는 transition 영역은 9개의 슬롯이 존재하며, 6.2도의 semi flare 각도를 갖는다. 9.98도의 flare 각도를 갖는 마지막 output flare 영역은 65개의 슬롯으로 구성되고 첫 번째 깊이는 0.95 mm이고, 마지막 슬롯의 깊이는 0.898 mm이다.

그림 4(a)는 주파수 85 GHz에서의 이론적인 주편파 및 교차 편파 패턴이고, (b)는 주파수 100 GHz, (c)는 주파수 115 GHz에서의 패턴이다. 패턴은 $\phi=45$ 도에서의 패턴을 나타낸 것이며, 실선은 주편파, 점선은 교차 편파 패턴이다.

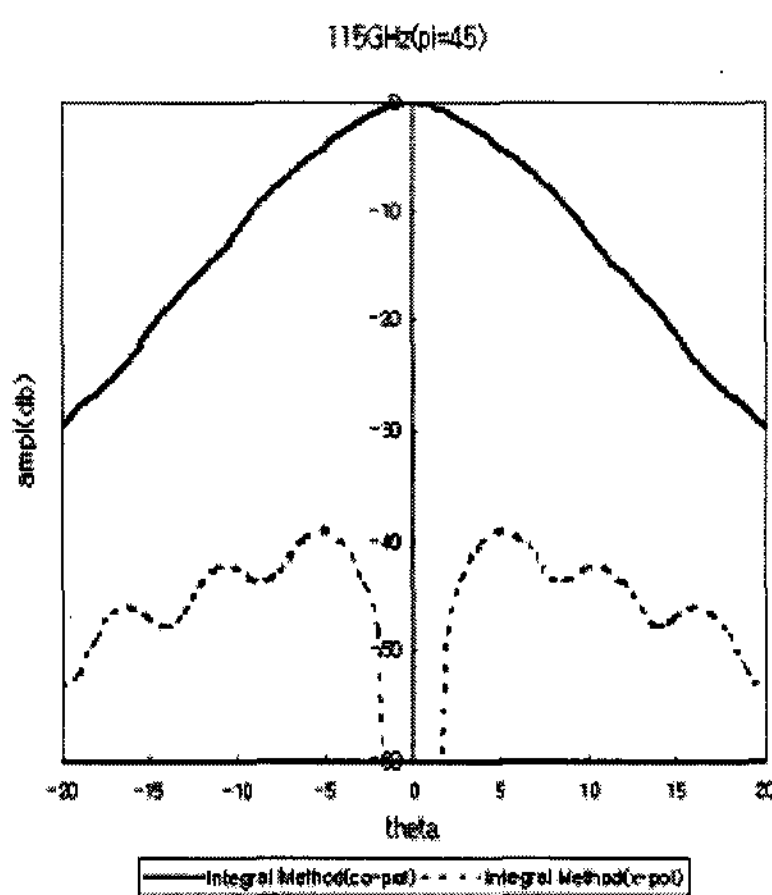
그림 4에서 85 GHz 패턴인 (a)에 교차 편파 특성이 나타나지 않는 것은 최대치가 7도에서 -64.46 dB로 나타나기 때문에 나타나지 못하고 있지만, 작게나마 교차 편파 성분이 나타나고는 있다. 이론적인 3 dB 빔 폭은 85, 100 및 115 GHz에서 각각 9.17도, 9.14도 및 9.0도로 계산되었다.



(a) 85 GHz



(b) 100 GHz



(c) 115 GHz

그림 4. 계산된 혼 안테나의 주 편파 및 교차 편파 방사 패턴

Fig. 4. Calculated co and cross-polarized patterns of the horn.

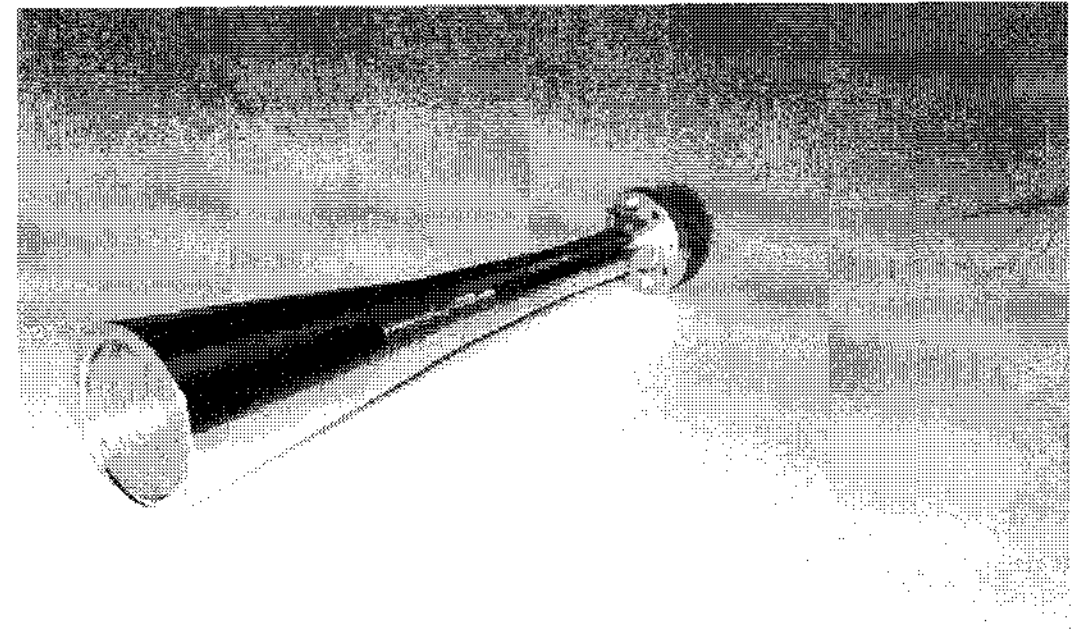


그림 5. 제작된 원추형 켈러게이트 혼
Fig. 5. Fabricated corrugated conical horn.

V. 제작 및 측정 결과

설계된 그림 3의 밀리미터파 켈러게이트 혼 안테나를 전기 포밍(electric forming)법으로 의해 제작하였다. 안테나를 포함하여 수백 GHz대 밀리미터파 부품은 일반적으로 밀링 등과 같은 가공법으로는 내부의 제작이 불가능하다. 전기 포밍법은 먼저 원하는 안테나의 내부를 알루미늄 등과 같은 재질로 가공한 다음, 동 혹은 금으로 전기 도금시켜 내부에 있는 알루미늄을 녹여내는 방법이다. 제작된 안테나의 그림은 그림 5와 같다. 제작을 위해 허용한 공차는 $10 \mu\text{m}$ 이다.

측정은 천문연구원 전파천문연구부에서 측정하였다. 그림 6은 HP8510으로 측정된 혼 안테나의 VSWR 특성이다. 그림에서 보듯이 85~110 GHz 전 대역에서 정재파비 1.3:1 이하로 우수한 반사 특성을 보이고 있다.

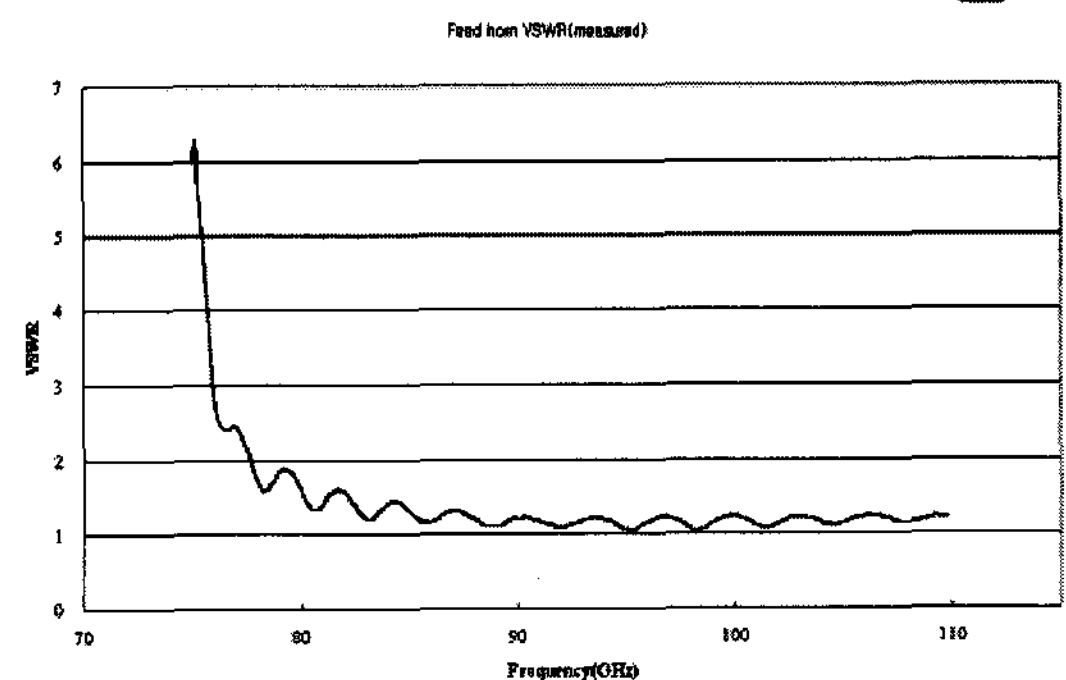


그림 6. 측정된 VSWR
Fig. 6. Measured VSWR.

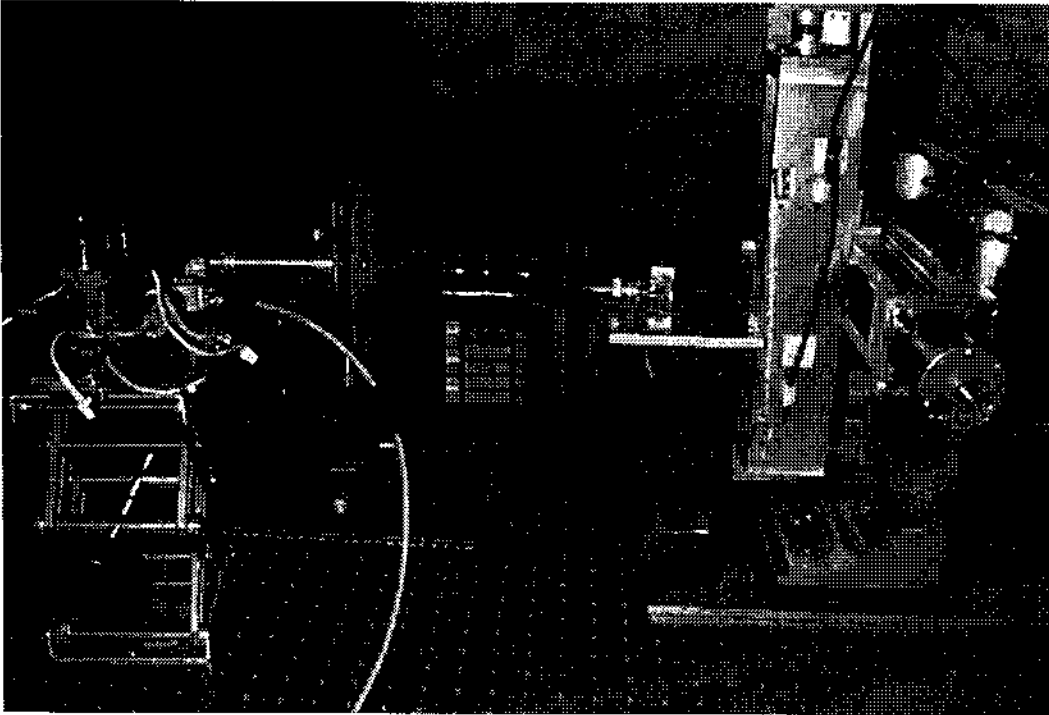


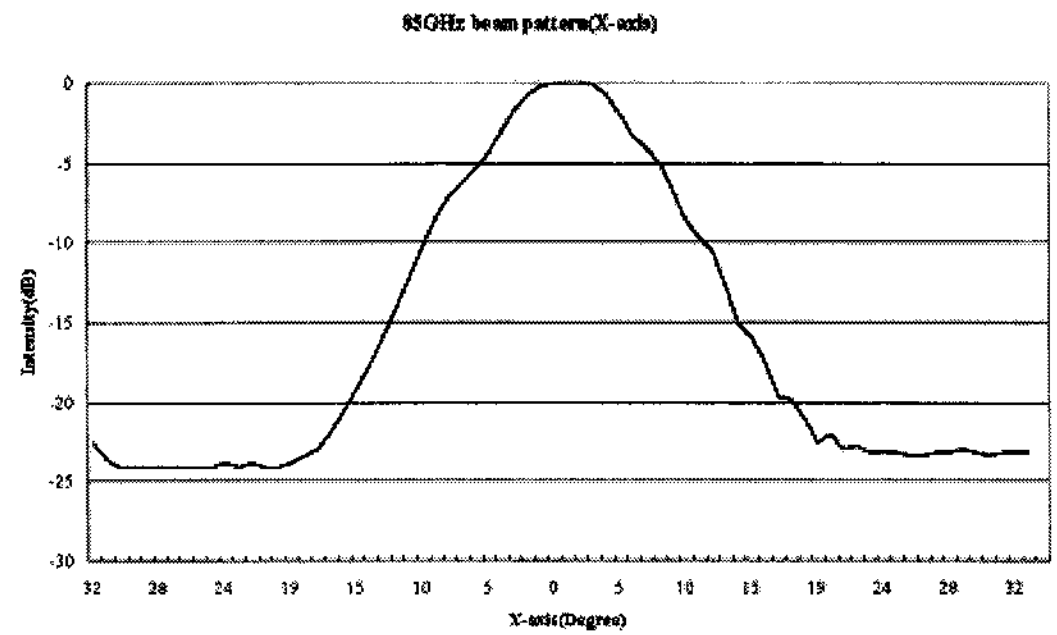
그림 7. mm파 방사 패턴 측정을 위한 gaussian optics 장치
 Fig. 7. Gaussian optics apparatus for the mm wave radiation pattern measurement.

그림 8은 측정된 방사 패턴이다. 방사 패턴의 측정은 그림 7과 같은 gaussian optics 장치를 이용하였다. 이는 등거리 면이 아닌 평면에서의 전력을 수신한 다음 소프트웨어로 변환한 측정 패턴이다. 그림 8에서 (a)는 주파수 85 GHz, (b)는 100 GHz 및 (c)는 110 GHz에서의 패턴이다.

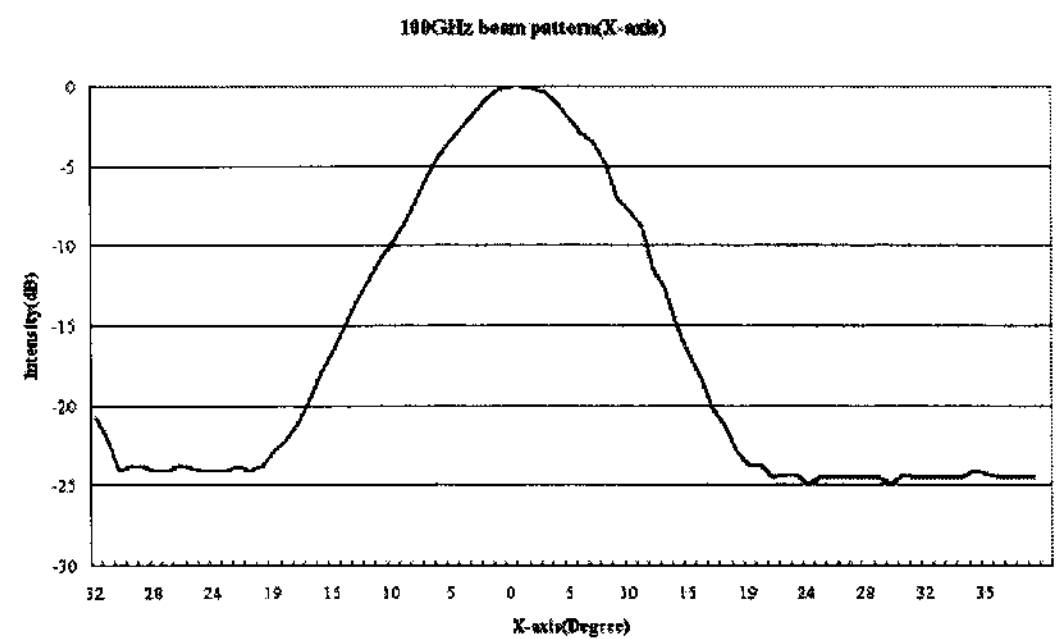
VSWR 및 방사 패턴 측정 주파수 범위는 설계 주파수보다 5 GHz 작은 85~110 GHz이다. 이는 그림 7의 장치가 측정 가능한 범위가 최고 110 GHz이기 때문이다. 측정된 그림 8은 적분법에 의해 계산된 이론적인 패턴인 그림 4와 비교하면 85, 100, 115 GHz에서 이론치와 실측치가 각각 9.17도 대비 9.2도, 9.14도 대비 9.16도 및 9.0도 대비 9.02도로 0.02~0.03도의 오차로 나타나 서로 매우 잘 부합되고 있음을 볼 수 있어, 본 연구의 타당성을 뒷받침해 주고 있다. 본 연구에서 나타낸 그림 4의 교차 편파 특성은 측정하지 않았다. 이는 적용 시스템인 전파망원경의 시스템은 위성 통신과는 달리 교차 편파 특성을 중요시하지 않기 때문이며, 동시에 매우 작은 신호이므로 보유하고 있는 측정 시설의 동적 범위(dynamic range)를 벗어나기 때문이다.

VI. 결 론

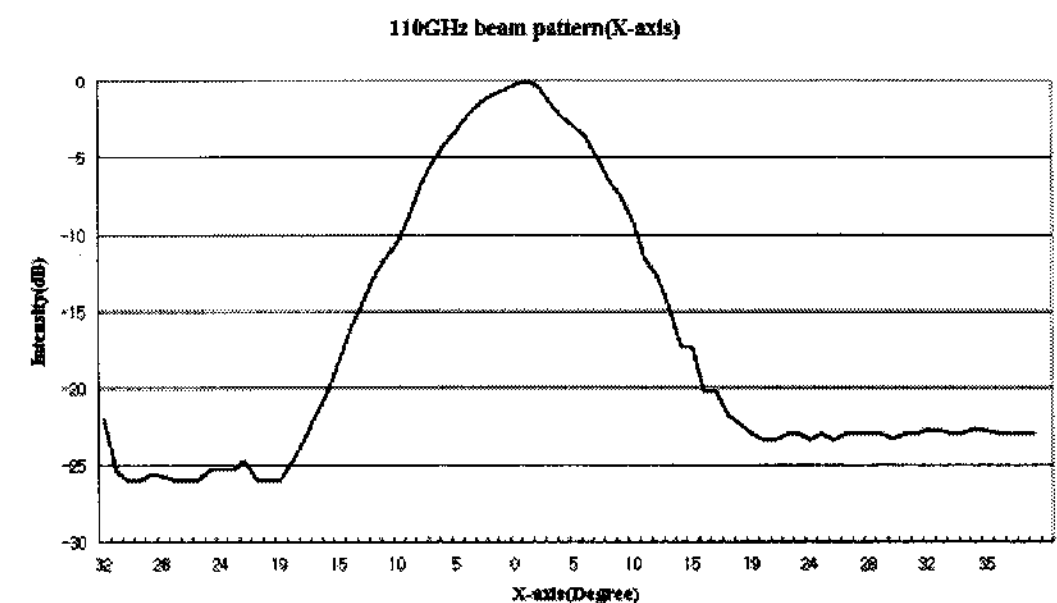
밀리미터파 컬러게이트 혼 안테나를 해석하는 모드 이론을 나타내었다. 해석을 이용하여 전파망원경에 적용될 주파수 85~115 GHz 대역용 혼 안테나를 설계하였다. 설계는 제작이 가능한 크기이면서도 평



(a) 85 GHz



(b) 100 GHz



(c) 110 GHz

그림 8. 측정된 방사 패턴
 Fig. 8. Measured radiation pattern.

형 하이브리드 조건을 근사하게 만족하도록 컬러게이트 치수별 혼 내부 특성을 비교하는 방식으로 설계하였다.

전기 포밍 방법으로 제작한 혼 안테나를 측정된 결과, 주파수 85~110 GHz 대역에서 VSWR 1.3:1 이하의 우수한 반사 특성을 보였다. 또한, 3개 주파수 대역에서 측정된 방사 패턴은 주파수 85, 100 및 110 GHz에서 각각 반치각 9.2, 9.16 및 9.02도로써 이론치와 매우 잘 부합되었다.

본 연구 결과에 의해 설계 제작된 컬러게이트 혼

안테나는 mm파 전파망원경 수신기 시스템에 적용되고 있다.

참 고 문 헌

[1] P. J. B. Clarricoats, A. D. Olver, *Corrugated Horn for Microwave Antennas*, Peter Peregrinus Ltd., London, 1984.
 [2] Thoma A. Milligan, *Modern Antenna Design*, McGraw-Hill, 1985.
 [3] A. F. Kay, "The Scalar Feed", AFCRL Rep. 64-347, AD601-609, May 1964.
 [4] H. C. Minnett, B. M. Thomas, "A method of synthesizing radiation pattern with axial symmetry", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. AP-14, pp. 654-656, Sep. 1966.
 [5] P. J. B. Clarricoats, P. K. Saha, "Propagation and radiation behaviour of corrugated feeds", *Proc. Inst.*

Elec. Eng., vol. 118A, pp. 1167-1186, Sep. 1971.
 [6] G. L. James, " TE_{11} -to- HE_{11} mode converters for small angle corrugated horns", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. AP-30, no. 6, Nov. 1982.
 [7] G. L. James, B. M. Thomas, " TE_{11} to HE_{11} cylindrical waveguide mode converters using ring-loaded slots", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-30, no. 3, pp. 278-285, Mar. 1982.
 [8] 강상규, 손태호, "전파망원경용 240 GHz 컬러게이트 급전 혼 안테나 설계", *마이크로파 및 전파 학술대회 논문집*, 25(2), pp. 281-284, 2002년.
 [9] B. M. Thomas, G. L. James, and K. J. Greene, "Design of wide-band corrugated conical horn for cassegrain antenna", *IEEE Trans*, vol. AP-34, pp. 750-757, Jun. 1986.

손 태 호



1979년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1986년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 1990년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)
 1980년~1981년: 영국 Ferranti사 연구원

1978년~1987년: LG넥스원 연구소 근무
 1992년~1994년: 천문우주연구원 객원연구원
 1999년~2000년: University of Illinois 연구교수
 2000년~2003년: (주)넷시텔레콤 위촉 연구소장
 2002년~2006년: (주)에스비텔레콤 기술고문
 2005년~2007년: (주)하이트랙스 기술고문
 2006년~현재: (주)동원 위촉 연구소장
 2007년~현재: (주)스카이크로스 기술고문
 1990년~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 교수
 [주 관심분야] 위성 통신, 휴대폰, RFID용 안테나 설계, 자동차용 전장품 개발 등

한 석 태



1979년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
 1986년 8월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 1996년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
 1987년 3월~1989년 3월: 미국 메사추세츠 주립대학교 천문학과 객원연구원

1986년~현재: 한국천문연구원 전파천문연구부 책임연구원
 [주 관심분야] 밀리미터파 부품 및 수신기 시스템 개발, 밀리미터파 대역 안테나 개발 등