

# 광대역 위성 통신/방송용 삼중 대역 이동형 안테나 시스템 설계에 관한 연구

## A Study on Mobile Antenna System Design with Tri-band Operation for Broadband Satellite Communications and DBS Reception

엄순영 · 정영배 · 손성호\* · 윤재승 · 전순익

Soon-Young Eom · Young-Bae Jung · Seong-Ho Son · Jae-Seung Yun · Soon-lck Jeon

### 요 약

본 논문은 Ka/K 통신 대역 및 Ku 방송 대역에서 동작하는 무궁화 3호 정지 궤도 위성을 이용하여 화상 전화, 인터넷과 같은 위성 멀티미디어 및 방송 서비스를 제공하는 이동체 탑재형 안테나 시스템 설계에 관한 것이다.

양각 방향으로 팬 빔 특성을 갖는 안테나 시스템의 방사부는 준-오프셋 이중 성형 반사판과 삼중 대역 급전기로 구성된다. 또한, 삼중 대역 급전기는 돌출 유전체 막대를 이용한 Ka/K 이중 대역 급전기 및 원형 편파기, 직교 모드 변환기 그리고 Ku 대역 원형 편파 급전 배열로 구성된다. 특히, Ka/K 이중 대역 원형 편파기는 제작이 용이한 comb 구조를 사용하여 구현되었다. Ku 대역 급전 배열은 이동시 위성을 고속으로 추적하기 위하여 전자 빔을 형성할 수 있는 2x2 능동 위상 배열 구조를 갖는다. 그리고, 급전 배열에서 90° 하이브리드 결합기를 이용하여 원형 편파를 생성하는 4개의 방사 소자들을 90°씩 회전하여 배열함으로써 원형 편파 특성을 개선하였다. Ku 대역 전자 빔을 생성하는 4개의 빔 성형 채널은 출력에서 주 빔 채널 및 추적 빔 채널로 구분되며, 각 채널의 내부 구성 유니트들의 잡음 온도 기여도를 바탕으로 채널 잡음 온도 특성을 분석하였다.

제작된 안테나 시스템으로부터 측정된 Ka 송신 채널의  $P_{1dBc}$  출력은 34.1 dBm 이상, K/Ku 수신 채널의 잡음 지수는 각각 2.4 dB 및 1.5 dB 이하의 전기적인 성능들을 보여주었다.

안테나 시스템은 근접 전계 측정 방법을 사용하여 삼중 대역에서의 주 편파 및 교차 편파 방사 패턴들을 측정하였다. 특히, Ku 대역의 방사 패턴 측정은 급전 배열들의 독립 여기에 의한 부분 방사 패턴들을 측정하여 각 능동 채널들의 초기 위상들을 보정한 후 이루어졌다. 안테나 시스템의 Ka/K/Ku 대역에서 측정된 안테나 이득은 각각 39.6 dBi, 37.5 dBi, 29.6 dBi 이상이었으며, 그리고 Ka 대역 송신 EIRP는 43.7 dBW 이상, K/Ku 대역 수신 감도 G/T는 각각 13.2 dB/K와 7.12 dB/K 이상의 우수한 시스템 성능들을 보여주었다.

### Abstract

In this paper, it is described about the tri-band mobile antenna system design to provide broadband multimedia and direct broadcasting services using geo-stationary Koreasat 3, simultaneously operated in Ka/K/Ku band.

The radiating part of the antenna system with a fan beam characteristic in the elevation plane is composed of the quasi-offset dual shaped reflector and the tri-band feeder. The tri-band feeder is also composed of the Ka/K dual band feeder with the protruding dielectric rod, the circular polarizer, the ortho-mode transducer and the circular-polarized Ku band feed array. Especially, the Ka/K dual band circular polarizer was realized firstly using the comb-type structure. For fast satellite-tracking on the movement, the Ku band feed array has the structure of the 2x2 active phased array which can make electrical beams. And, the circular-polarized characteristic in the feed array was improved by 90° ro-

한국전자통신연구원 안테나기술연구팀(Antenna Technology Research Team, Electronics and Telecommunications Research Institute)

\*포항공과대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

· 논문 번호 : 20060403-034

· 수정완료일자 : 2006년 5월 10일

tating arrangement of four radiating elements polarized circularly by a 90° hybrid coupler, respectively. Four beam forming channels to make electrical beams at Ku band are divided into the main beam channel and the tracking beam channel in the output, and noise temperature characteristics of each channel were analyzed on the basis of the contributions of internal sub\_units.

From the fabricated antenna system, the output power at  $P_{1dBc}$  of Ka\_Tx channel was measured more than 34.1 dBm and the measured noise figures of K/Ku\_Rx channels were less than 2.4 dB and 1.5 dB, respectively, over the operating band.

The radiation patterns with co- and cross-polarization in the tri-band were measured using a near-field measurement in the anechoic chamber. Especially, Ku radiation patterns were measured after correcting each initial phase of active channels with partial radiation patterns obtained from the independent excitation of each channel.

The antenna gains measured in Ka/K/Ku band of the antenna system were more than 39.6 dBi, 37.5 dBi, 29.6 dBi, respectively. And, the antenna system showed good system performances such as Ka\_Tx EIRP more than 43.7 dBW and K/Ku\_Rx G/T more than 13.2 dB/K and 7.12 dB/K, respectively.

Key words : Mobile Antenna, Tri-band Feeder, Satellite Tracking, Dual Shaped Reflector, Radiating Active Channel Module, Beam Forming Module, Active Phased Array

## I. 서 론

현대의 무선 통신 서비스의 요구 추세는 고정형 협대역 서비스에서 이동형 광대역 서비스로 점차 진화되고 있다. 유럽, 미국, 일본 등 해외 선진국에서도 Ka/Ku 대역 정지 궤도 위성을 이용하여 승용차, 버스, 열차, 선박, 항공기와 같은 이동체에서 이동 무선 인터넷 서비스, 무선 LAN 및 멀티미디어 서비스 그리고 고화질의 방송 서비스를 동시에 제공할 수 있는 이동형 안테나 시스템 개발이 활발히 진행되고 있다<sup>[1]~[9]</sup>.

이동체 탑재형 안테나 시스템을 설계 개발하는데 있어서 핵심적으로 가장 중요한 해결 과제는 현 상용화 시장에서 요구하는 사항들 즉, 이동체 안테나 시스템의 가격을 낮추고, 낮은 외형도의 반사판 구조로 설계하여 안테나 시스템의 전체 높이를 낮추는 것이다<sup>[11]~[6]</sup>. 또한, 통신 및 방송 서비스를 동시에 제공하기 위해서는 안테나가 삼중 대역(Ka/K/Ku 대역)에서 동작하여야 한다는 것이다. 그러므로, ETRI는 국내에서 이러한 광대역 위성 통신 및 방송 서비스를 사용자에게 제공하기 위하여 무궁화 3호(Ka 통신 및 Ku 방송 중계기 보유) 위성을 이용하여 이동하는 승합차, 선박, 기차, 항공기 등 탑재하여 광대역 위성 멀티미디어 및 방송 서비스를 제공할 수 있는 이동형 안테나 시스템을 세계 최초로

개발하였다.

무궁화 3호 위성을 이용한 링크 설계 결과에 따르면 포워드 링크(forward link) 10 Mbps 수신 및 리턴 링크(return link) 1 Mbps를 송신하기 위한 삼중 대역 안테나 시스템의 요구 설계 규격은 표 1과 같이 주어진다.

본 논문에서의 삼중 대역 안테나 시스템은 크게

표 1. 삼중 대역 안테나 시스템의 설계 규격  
Table 1. Design specification of tri-band antenna system.

| 항 목        | 규 격   |
|------------|---|
| RF 동작 주파수  | 송신: 30.085~30.885 GHz<br>수신 1: 20.355~21.155 GHz<br>수신 2: 11.7~12.0 GHz |
| 송신 EIRP    | 43 dBW 이상   |
| 수신 G/T     | 수신 1: 13.0 dB/K 이상<br>수신 2: 7.5 dB/K 이상                                 |
| 안테나 이득     | 송신: 39.0 dBi 이상<br>수신 1: 37.0 dBi 이상<br>수신 2: 29.5 dBi 이상               |
| 편파 특성      | 송신: RHCP, 수신 1: LHCP<br>수신 2: LHCP                                      |
| 사이드 로브 특성  | ITU R S.465-5 만족(송신)  |
| 추적 빔 틸트 각  | 양각: ±2°,<br>방위각: ±0.85°   |
| 추적손실(추적오차) | 0.5 dB 이하(±0.2° 이하)   |

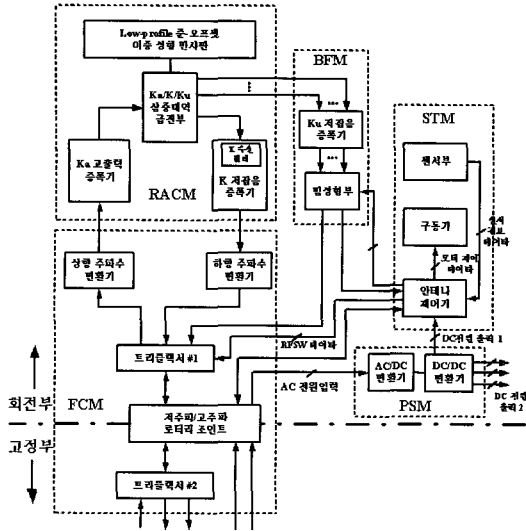


그림 1. 삼중 대역 안테나 시스템의 내부 블록 구성도  
Fig. 1. Internal block diagram of tri-band antenna system.

방사 능동 채널 모듈(Radiating Active Channel Module: RACM), 빔 성형 모듈(Beam Forming Module: BFM), 주파수 변환 모듈(Frequency Converter Module: FCM), 위성 추적 모듈(Satellite Tracking Module: STM) 그리고 전원 공급 모듈(Power Supply Module: PSM)로 구성된다. 그러나, 본 논문에서는 안테나 시스템에서 가장 핵심적이고 중요한 모듈인 방사 능동 채널 모듈과 빔 성형 모듈 설계에 대해서만 상세히 기술하기로 한다.

II. 삼중 대역 안테나 시스템 설계

삼중 대역 안테나 시스템의 내부 블록 구성도는 그림 1과 같이 주어진다.

안테나 시스템은 크게 위성 방향을 추적하는 회전부와 이동체에 고정된 고정부로 나눌 수 있으며, 고정부는 옥내 장치인 셋톱 단말의 감시 및 제어부와 송수신 IF 신호 인터페이스 및 감시 제어 신호 인터페이스를 갖는다. 회전부와 고정부의 송수신 IF 신호, 교류 전원 그리고 감시 제어 신호 인터페이스는 단일 채널 로터리 조인트를 통해 이루어진다.

2-1 송수신 방사 능동 채널 모듈

방사 능동 채널 모듈은 그림 1에서와 같이 낮은

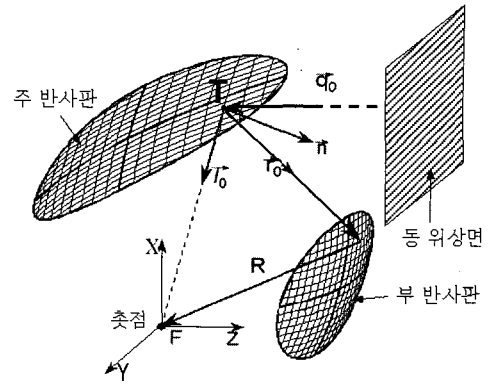


그림 2. 이중 반사판 안테나 구조  
Fig. 2. Dual reflector antenna structure.

외형의 준-오프셋 이중 성형 반사판과 삼중 대역 급전기, Ka 대역 고출력 증폭기, K 대역 수신 필터를 내재한 K 대역 저잡음 증폭기로 구성된다.

그림 2는 낮은 외형의 이중 반사판 안테나 구조를 보여준다. 이러한 구조의 안테나는 방위각 방향으로 좁고 각 방향으로 넓은 팬 빔(fan beam) 형태의 방사 패턴을 제공한다.

일반적으로, 안테나 개구면에서의 위상이 균일한 면을 제공하도록 반사판 표면들은 임의적으로 성형화될 수 있다. 그러나, 낮은 외형의 안테나 구조를 위해 장축과 단축의 길이 비가 큰 경우에는 주 반사판의 표면을 아래 식 (1)과 같이 타원 포물면으로 선택하는 것이 바람직하며, 이러한 경우에 원 형태의 부 반사판 설계가 가능하다.

$$Z = \frac{X^2}{4F_x} + \frac{Y^2}{4F_y} \tag{1}$$

그림 2의 이중 반사판 안테나 구조에서 주 반사판의 표면이 주어지면, 부 반사판의 표면은 입사 평면파가 주 반사판으로부터 반사된 후 타원체의 한 초점을 지나서 형성되는 면으로 구성된다. 그리고 급전기는 타원체의 또 다른 초점 위치에 놓이게 된다. 부 반사판의 표면은 아래 식 (2)~(4)에 의해 결정될 수 있다.

$$R(T) = \frac{P(T)}{1 - e(T)(\hat{r}_o(T), \hat{r}_o(T))} \tag{2}$$

$$P(T) = \frac{(S_0 - S(T))^2 + I(T)^2}{2(S_0 - S(T))} \tag{3}$$

$$\vec{r}_0(T) = \vec{a}_0 - 2(\vec{n}(T), \vec{a}_0) \vec{n}(T) \quad (4)$$

여기서,  $T$ : 주 반사판 상의 한 점,  $P(T)$ : 타원체의 초점 변수,  $\vec{n}$ : 주 반사판 표면에 대한 수직 단위 벡터,  $\vec{a}_0$ : 동일 위상면으로부터 주 반사판 상의 T점으로 입사하는 빔의 벡터 성분,  $\vec{i}_0$ : 주 반사판으로부터 초점으로 향하는 벡터 성분,  $\vec{r}_0$ : 주 반사판으로부터 반사된 빔의 벡터 성분,  $S_0$ : 안테나의 초점으로부터 동일 위상 면까지의 광학 길이,  $S(T)$ : 주 반사판의 한 점으로부터 동일 위상 면까지의 광학 길이를 나타낸다.

오프셋 안테나 성능은 초점 거리  $F_x, F_y$ , 주 반사판의 치수  $D_x, D_y$ , 급전기의 위치(두 번째 초점 위치) 그리고 첫 번째 초점으로부터 동위상의 평면 파가 형성되는 면까지의 광학 길이 등에 의해 결정된다.

이중 성형 반사판의 기하 구조는 안테나 송신 패턴의 ITU-R S.465-5의 국제 방사 규정<sup>[10]</sup>을 만족하며, 요구 설계 이득을 만족하기 위해 그림 3에서 보는 바와 같이 가로, 세로의 축 길이 비가 3.25:1인 낮은 외형의 준-오프셋 이중 성형 반사판 구조로 최적화 되었다. 최종 설계된 주 반사판의 크기는 장축 650 mm(최대 깊이 130 mm), 단축 200 mm(최대 깊이 15 mm)이며, 부 반사판은 개구면 직경 116 mm 인 원형으로 최대 깊이가 각각 약 21 mm(세로 축)과 44 mm(가로 축)이다. 그리고, 삼중 대역 급전기의 위치는 부 반사판의 중심으로부터 약 100 mm 떨어진 곳에 위치한다.

그림 3의 이중 반사판 안테나가 고속의 이동 환경 조건에서 정상적으로 동작하기 위해서는 고속의 전자 빔을 이용한 위성 추적 기능을 가져야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 Ku 대역 위성 방송 신호를 위성 추적 신호로 고려하였는데 이것은 위성 방송 신호는 지상에 항상 존재하는 신호이며, 상대적으로 신호 레벨도 크기 때문이다. 그러므로, 본 논문에서는 이러한 요구 조건들을 고려하여 이중 반사판을 공용하는 삼중 대역 급전기 구조를 그림 4와 같이 독창적인 구조로 제안하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 삼중 대역 급전기는 최적의 배열 간격을 갖는 Ku 대역 2x2 급전 배열과 돌출 유전체 막대를 이용하여 요구 빔 폭을 얻는 Ka/K 이중 대

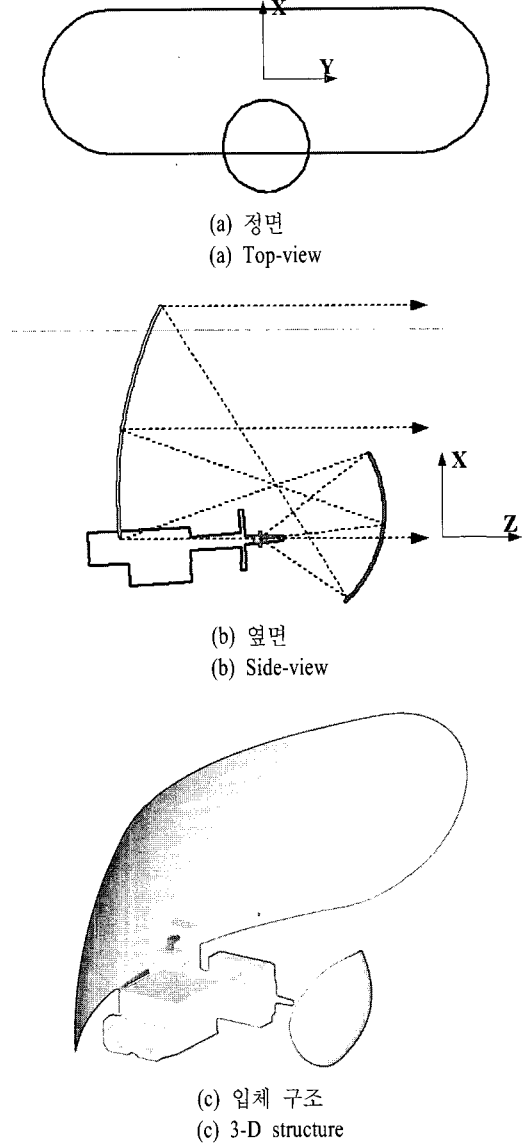


그림 3. 이중 성형 반사판의 기하 구조  
Fig. 3. Geometrical structure of dual shaped reflectors.

역 급전기, Ka/K 이중 대역 원형 편파기, Ka/K 직교 모드 변환기(그림 4에는 명시 안 됨)로 구성된다. 일반적으로, Ka/K 이중 대역 급전기로는 스칼라 혼으로 설계하는 것이 가장 효율적이거나 이 경우에는 Ku 대역 급전 배열 간격이 너무 커서 현실적으로 삼중 대역 급전기 구현이 불가능하기 때문에 돌출 유전체 막대가 사용된 것이다.

4개의 Ku 대역 급전 배열 소자들은 이중 반사판으로부터 Ku 대역 방송 신호 수신과 위성 추적을

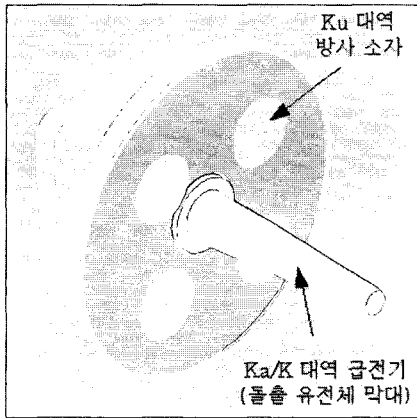
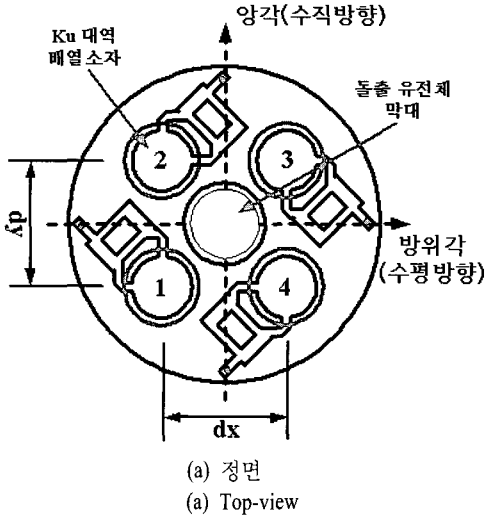


그림 4. 삼중 대역 급전기  
Fig. 4. Tri-band feeder.

위한 스캔트 전자빔 형성 기능을 제공하기 위해 그림 4에서 보는 바와 같이 x-y 축으로부터 45° 오프셋되어 배열된다.

급전 배열의 방사 소자는 동작 대역폭을 고려하여 마이크로스트립 적층형 구조가 사용되었으며, 구동 소자는 직경 9.6 mm로 테프론(유전율  $\epsilon_r = 2.17$ , 유전체 두께  $H=0.508$  mm) 기판상에 구현되었다. 구동 소자로부터 2 mm 위에 놓여지는 기생 소자는 직경 11.0 mm의 도체 디스크를 사용하여 제작되었으며, 두 소자의 중심부를 관통하는 도체 지지대를 사용하여 고정되었다. 이것은 능동 및 수동 소자의 중심부는 중심 주파수에서 전류는 최대, 전압

은 최소가 되는 단락점(short point)이 되므로 방사 패턴을 포함한 전기적인 특성에는 영향을 주지 않기 때문이다. 또한, 좌현 편파를 형성하기 위해 90° 브랜치라인 하이브리드 결합기 소자를 사용하였으며, 이때 50 Ω 격리 저항 없이 두 출력 단자에 90°의 위상차를 갖도록 설계되었다. 또한, 교차 편파 특성을 개선하기 위하여 4개의 배열 소자들은 90° 주기로 회전 배치되었다.

소자간 배열 간격은 방사 소자의 이득을 바탕으로 결정되며, 각 방사 소자들간의 상호 결합이 최소한 -20 dB 이하로 하여야 한다. 또한, 소자간 간격을 너무 멀리하여 사이드 로브 특성을 열화시키지 않도록 하여야 한다. 이러한 사항들을 고려하여 본 설계에서는  $dx = dy = 0.8 \lambda_0$ 로 선택되었다.

위성 추적 방향을 알기 위해서는 방위각 방향의 좌우 빔과 양각 방향의 상하 빔의 크기를 비교하여야 하는데, 좌우 빔은 각각 배열 소자 1, 2 그리고 배열 소자 3, 4를 통해 형성되며, 상하 빔은 각각 배열 소자 2, 3 그리고 배열 소자 1, 4로 통해 형성된다. 선택 배열 소자에 따른 시뮬레이션 성능들은 표 2에 보여진다.

돌출 유전체 막대는 효율적인 Ka/K 대역 신호를 여기하기 위해 직경 10.67 mm인 원형 도파관 내에 삽입된다. 설계된 돌출 유전체 막대는 유전율 2.05의 테프론 재질로 만들었으며, 돌출된 유전체의 길이는 35 mm로 그 끝의 직경은 4 mm로 테이퍼링된다. 또한, 원형 도파관 내부에 삽입되는 부분은 임피던스 정합을 위해 다단의 계단 형태를 갖는다.

Ka/K 이중 대역 원형 편파기는 그림 5에서와 같

표 2. 선택 배열 소자에 따른 시뮬레이션 성능  
Table 2. Simulation performances by selected array elements.

| 선택 배열 소자 | 빔 오프셋 각 [deg] |      | 이득 [dBi] |        |           |
|----------|---------------|------|----------|--------|-----------|
|          | 방위각           | 양각   | 안테나 정방향  | 추적빔 방향 | 상대적 이득 감소 |
| 소자 1, 2  | +0.85         | 0.0  | 27.3     | 29.3   | -2.0      |
| 소자 2, 3  | 0.0           | -1.8 | 27.3     | 28.2   | -0.9      |
| 소자 3, 4  | -0.85         | 0.0  | 27.2     | 29.2   | -2.0      |
| 소자 1, 4  | 0.0           | +2.2 | 27.2     | 28.3   | -1.1      |

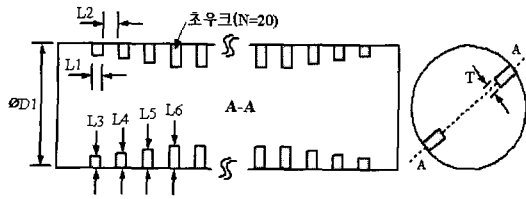


그림 5. Comb 형태의 초우크로 구현된 이중 대역 원형 편파기

Fig. 5. Dual band circular polarizer realized by comb-type chokes.

이 직경 10.67 mm인 원형 도파관 내에 comb 구조의 cog 도체들을 사용하여 설계되었다. 이러한 comb 구조는 본 논문에서 최초로 제안한 구조로서, 종래의 아이리스 구조와 비교하여 밀리미터파 대역에서 유사한 전기적 특성을 보여주나 상대적으로 제작이 용이한 커다란 장점을 보여준다. 위상 지연을 위해 내부에 사용된 cog의 수  $N$ 은 20개이며, comb 도체판의 두께는 0.9 mm로 설계 및 제작되었다. 측정된 이중 대역 원형 편파기의 전기적인 특성은 표 3에 요약하여 제시하였다.

Ka/K 대역 직교 모드 변환기는 Ka/K 대역 송수신 신호를 선형 직교 편파 형태로 분리 또는 결합하는 기능을 제공하며, 송수신 입출력 임피던스 정합을 위해 내부에 단단의 스텝 구조를 갖는다. 직교 모드 변환기의 Ka 및 K 대역 입출력 VSWR 측정값은 각각 1.05, 1.18 이하, 삽입 손실은 0.08 dB, 0.05 dB 이하 그리고 송수신 단자간 격리 특성은 42 dB 이상으로 우수한 전기적인 특성들을 보여주었다.

Ka 대역 고효율 증폭기는 송신 신호의 고효율 증폭, 송신 출력 전력 검출, 고가의 고효율 RF FET 소

표 3. 이중 대역 원형 편파기의 측정 결과

Table 3. Measured performances of dual band circular polarizer.

| 측정 항목     | K 대역       | Ka 대역      |
|-----------|------------|------------|
| VSWR(수평)  | 1.26 이하    | 1.1 이하     |
| VSWR(수직)  | 1.18 이하    | 1.1 이하     |
| 삽입 손실(수평) | 0.06 dB 이하 | 0.06 dB 이하 |
| 삽입 손실(수직) | 0.08 dB 이하 | 0.06 dB 이하 |
| 편파 특성     | 22.9 dB 이상 | 30.0 dB 이상 |

자 보호를 위한 직류 안정화 공급, 냉각 장치에 의한 열 방출 기능 등을 제공하며, 요구 송신 EIRP를 만족하기 위해 송신 안테나 이득을 고려하여 2.5 W 이상의  $P_{1dBc}$  출력 전력을 제공하도록 설계되었다. 이를 위해 최종 출력단에 Triquint사의 TGA4905 4W 소자(선형 이득 22 dB)를 사용하였으며, 출력에는 송신 신호 감시를 위해 20 dB 이상의 신호 결합 검출 회로가 삽입되었다. 측정된 Ka 대역 고효율 증폭기의  $P_{1dBc}$  출력 특성은 동작 대역폭 내에서 34.1 dBm 이상이었으며,  $P_{1dBc}$  동작점에서의 검출 전압은 약 2.0 V임을 보여 주었다.

K 대역 저잡음 증폭기는 수신 대역 대역 통과 필터링 및 송신 대역 억압, 수신 신호의 저잡음 증폭, 고가의 저잡음 RF FET 소자 보호를 위한 직류 안정화 공급 기능 등을 제공하며, 요구 수신 G/T 특성을 만족하기 위해 수신 안테나 이득을 고려하여 2.5 dB 이하의 증폭기 잡음 지수를 갖도록 설계되었다. 이를 위해 초단에 UMS사의 CHA2090 소자(잡음 지수 2.0 dB, 선형 이득 23 dB)를 사용하였으며, 입력단에 수신 대역 통과 필터링 및 송신 대역 억압을 위해 사용된 마이크로스트립 스템 형태의 필터에 의해 약 0.3 dB 정도의 잡음 특성이 열화된다. 측정된 K 대역 저잡음 증폭기의 잡음 지수는 동작 대역폭 내에서 2.4 dB 이하 그리고 선형 이득은 34.9 dB 이상의 특성을 보여주었다.

그림 6은 제작 조립된 삼중 대역 급전기 시제품의 사진들을 보여준다.

전자파 무 반사실에서 측정된 삼중 대역 급전기의 방사 패턴 특성은 그림 7에 제시하였다.

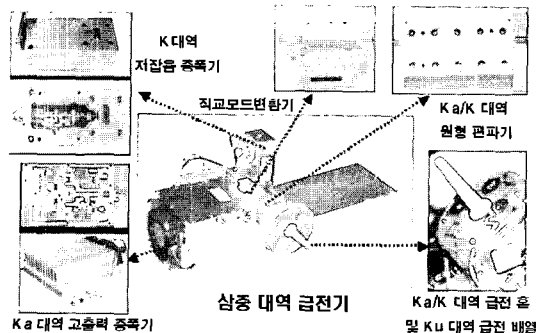
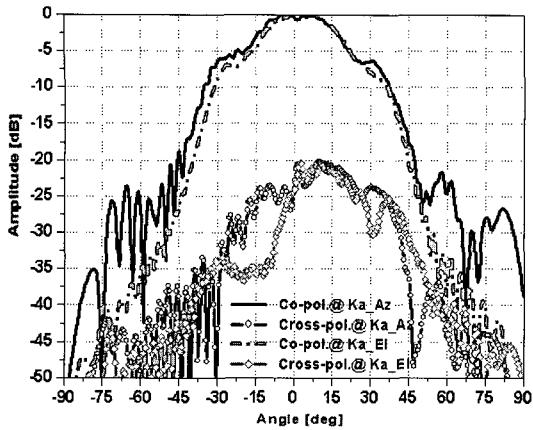
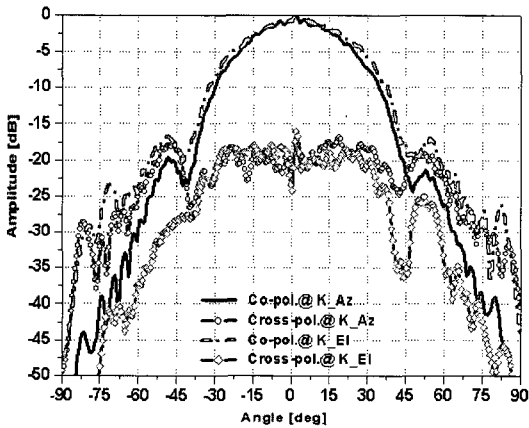


그림 6. 삼중 대역 급전기 시제품의 사진

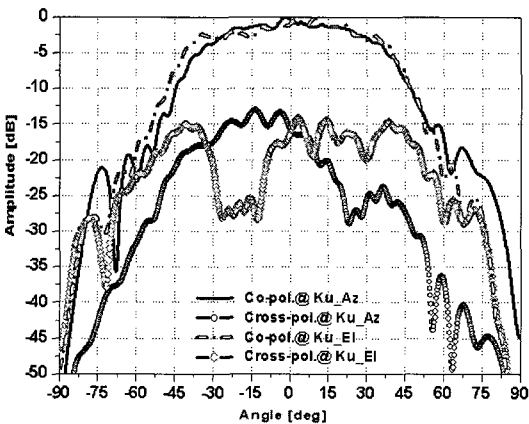
Fig. 6. Photos of tri-band feeder breadboard.



(a) Ka 대역( $f=30.485$  GHz)  
(a) Ka band( $f=30.485$  GHz)



(b) K 대역( $f=20.755$  GHz)  
(b) K band( $f=20.755$  GHz)



(c) Ku 대역( $f=11.85$  GHz)  
(c) Ku band( $f=11.85$  GHz)

그림 7. 삼중 대역 급전기의 측정 방사 패턴  
Fig. 7. Measured radiation patterns of tri-band feeder.

삼중 대역 급전기의 측정된 방사 패턴을 살펴보면, 돌출 유전체 막대의 의해 빔 패턴은 Ka 대역에서  $5.9^\circ$  그리고 K 대역에서  $1.8^\circ$  만큼 오프셋 되었음을 알 수 있다.

## 2-2 빔 성형 모듈

빔 성형 모듈은 삼중 대역 급전기로부터 4개의 수신 신호를 입력 받아 위성을 추적, 수신 전자빔을 형성하는 기능을 갖는다. 빔 성형 모듈은 4 채널 Ku 대역 저장음 증폭기, 빔 성형 블럭으로 구성되며, Ku 대역 위성방송 신호(11.7~12.0 GHz)를 삼중 대역 급전기의 Ku 대역  $2 \times 2$  급전 배열로부터 입력 받아 저장음 증폭시킨 후 상하 좌우의 전자 빔 스위칭을 통해 위성을 추적하는 기능을 제공한다. 빔 성형 모듈의 내부 블럭 구성도는 그림 8과 같다.

4채널 저장음 증폭기에는 NEC사의 저장음 증폭

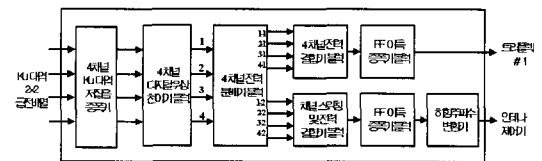


그림 8. 빔 성형 모듈의 내부 블럭 구성도  
Fig. 8. Internal block diagram of beam forming module.

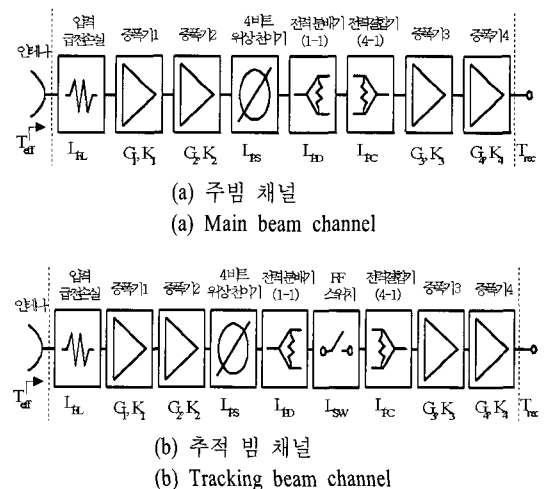


그림 9. 빔 성형 모듈의 잡음 특성 분석을 위한 등가 블럭도  
Fig. 9. Equivalent block diagrams for analyzing noise characteristic of beam forming module.

소자인 NEC3210S01이 사용되었으며, 4비트 디지털 위상 천이기 소자는 텔트론사의 TP002 MMIC 소자가 사용되었다. 또한, 스위칭 유닛은 90° 브랜지 라인 하이브리드 소자와 Alpha사의 DSG6405 편 다이오드를 사용하여 설계되었다.

Ku 대역 수신 시스템의 전체 잡음 특성은 빔 성형 모듈의 내부 잡음 특성을 분석하면 쉽게 예측할 수 있다. 빔 성형 모듈의 내부 잡음 온도 특성 분석을 위한 등가 블록도는 그림 9와 같으며, 식 (5)와 식 (6)에 의해 계산될 수 있다<sup>[11]~[13]</sup>.

$$T = T_a + T_{eff} \tag{5}$$

$$T_{eff} = \frac{T_{rec}}{G} \tag{6}$$

where,  $G = \frac{G_1 G_2 G_3 G_4}{L_{FL} L_{PS} L_{PD} L_{SW} L_{PC}}$

$$T_{rec} = T_o \left\{ \left[ \frac{(L_{FL}-1)G_1 G_2 G_3 G_4}{L_{FL} L_{PS} L_{PD} L_{SW} L_{PC}} \right] + \left[ \frac{(K_1-1)G_1 G_2 G_3 G_4}{L_{PS} L_{PD} L_{SW} L_{PC}} \right] + \left[ \frac{(K_2-1)G_2 G_3 G_4}{L_{PS} L_{PD} L_{SW} L_{PC}} \right] + \left[ \frac{(L_{PS}-1)G_3 G_4}{L_{PS} L_{PD} L_{SW} L_{PC}} \right] + \left[ \frac{(L_{PD}-1)G_3 G_4}{L_{PD} L_{SW} L_{PC}} \right] + \left[ \frac{(L_{SW}-1)G_3 G_4}{L_{SW} L_{PC}} \right] + \left[ \frac{(L_{PD}-1)G_3 G_4}{L_{PC}} \right] + [(K_3-1)G_3 G_4] + [(K_4-1)G_4] \right\}$$

여기서,  $T_a$ 는 안테나로부터 입력되는 등가 잡음 온도이고,  $T_{eff}$ 는 입력단에서의 유효 등가 잡음 온도 그리고  $T_{rec}$ 는 출력단에서의 등가 잡음 온도를 나타낸다.  $G_i$ 와  $L_i$ 는 해당 유닛의 이득 및 삽입 손실을 의미하며, 각 첨자  $i$ 는 해당 유닛의 정보를 나타낸다. 안테나 잡음 온도 특성은 안테나의 방사 패턴 및 지상으로부터의 양각에 의해 결정된다.

유효 시스템 잡음 온도( $T_{eff}$ ) 특성 관점에서, 4개의 모든 채널씩을 동작시켰을 경우의 주 빔 채널의 예측되는 각 유닛의 잡음 기여도는 표 4와 같다.

상하 좌우의 추적 빔들은 4개의 채널 중에 2 채널만 동작시켜 형성되므로, 4개의 채널 중에 2 채널씩만 동작시켰을 경우의 추적 빔 채널의 예측되는 각 유닛의 잡음 기여도는 표 5와 같다.

표 4. 주 빔 채널의 예측되는 각 유닛의 잡음 기여도

Table 4. Noise contributions estimated from each unit of main beam channel.

| 유닛 명   | 변수 명     | 전기적 성능[dB] | 기여도 @ $T_{eff}$ [K] |
|--------|----------|------------|---------------------|
| 입력 케이블 | $L_{FL}$ | 0.3        | 20.74               |
| 증폭기 1  | $G_1$    | 12.0       | 46.04               |
|        | $K_1$    | 0.6        |                     |
| 증폭기 2  | $G_2$    | 12.0       | 2.90                |
|        | $K_2$    | 0.6        |                     |
| 위상 천이기 | $L_{PS}$ | 6.0        | 3.69                |
| 전력 분배기 | $L_{PD}$ | 3.5        | 6.10                |
| 전력 결합기 | $L_{PC}$ | 1.0        | 2.85                |
| 증폭기 3  | $G_3$    | 10.0       | 0.71                |
|        | $K_3$    | 0.8        |                     |
| 증폭기 4  | $G_4$    | 10.0       | 0.07                |
|        | $K_4$    | 0.8        |                     |

표 5. 추적 빔 채널의 예측되는 각 유닛의 잡음 기여도

Table 5. Noise contributions estimated from each unit of tracking beam channel.

| 유닛 명   | 변수 명     | 전기적 성능[dB] | 기여도 @ $T_{eff}$ [K] |
|--------|----------|------------|---------------------|
| 입력 케이블 | $L_{FL}$ | 0.3        | 20.74               |
| 증폭기 1  | $G_1$    | 12.0       | 46.04               |
|        | $K_1$    | 0.6        |                     |
| 증폭기 2  | $G_2$    | 12.0       | 2.90                |
|        | $K_2$    | 0.6        |                     |
| 위상 천이기 | $L_{PS}$ | 6.0        | 3.69                |
| 전력 분배기 | $L_{PD}$ | 3.5        | 6.10                |
| RF 스위치 | $L_{SW}$ | 5.0        | 23.84               |
| 전력 결합기 | $L_{PC}$ | 4.0        | 52.71               |
| 증폭기 3  | $G_3$    | 10.0       | 17.71               |
|        | $K_3$    | 0.8        |                     |
| 증폭기 4  | $G_4$    | 10.0       | 1.77                |
|        | $K_4$    | 0.8        |                     |

표 4와 표 5의 분석 결과로부터 알 수 있듯이, 주 빔 및 추적 빔 채널의 전체 유효 등가 잡음 온도는 각각 83.10 K와 175.51 K임을 알 수 있다. 주 빔



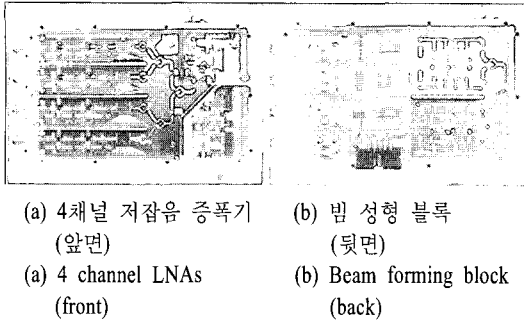


그림 10. Ku 대역 빔 성형 모듈의 시제품 사진  
Fig. 10. Photos of Ku band beam forming module breadboard.

채널의 경우 입력 케이블 및 차단 증폭기 1의 전기적인 특성에 의해 전체 유효 등가 잡음 온도 특성이 좌우됨을 알 수 있는 반면에, 추적 빔 채널의 경우에는 RF 스위치, 전력 결합기 및 이득 증폭기 3 까지도 전체 잡음 특성에 영향을 줌을 알 수 있다<sup>[12],[13]</sup>. 이러한 후자의 경우 전체 잡음 특성에 영향을 주지 않기 위해서는 RF 스위치 앞 부분의 이득 특성을 향상시키거나 RF 스위치의 삽입 손실을 최소화 시켜야 한다.

그림 10은 제작된 Ku 대역 빔 성형 모듈(저잡음 증폭기 및 빔 성형 블록) 시제품 사진을 보여준다. 제작된 Ku 대역 빔 성형 모듈의 주 빔 및 추적 빔 채널 이득은 동작 대역폭 내에서 각각 24.5 dB, 19.0 dB 이상을 보여 주었으며, 채널 스위칭 격리 특성은 30 dB 이상을 보여 주었다.

### III. 안테나 시스템의 성능 측정

그림 11은 제작 조립된 안테나 시스템의 방사 능동 채널 모듈 및 빔 성형 모듈이 조립된 시제품 사진을 보여준다. 조립된 안테나의 방사 패턴 시험은 그림 12와 같이 측정 지그를 사용하여 전자파 무반사실 안에 설치된 근접 전계 측정 시스템을 이용하여 이루어졌다.

Ka/K 대역 시스템은 각각 단일 능동 채널을 가지므로 측정 좌표 보정 후 각 동작 주파수 대역에서 방사 패턴 측정이 이루어졌다. Ka/K 대역 중심 주파수에서 측정된 주 편파 및 교차 편파 방사 패턴들은 각각 그림 13과 그림 14에 제시하였다.

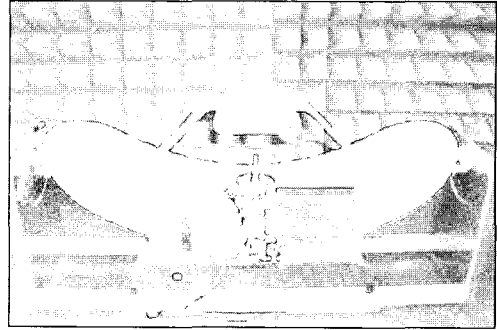


그림 11. 조립된 방사 능동 채널 모듈 및 빔 성형 모듈 시제품 사진  
Fig. 11. Photo of assembled RACM and BFM breadboard.

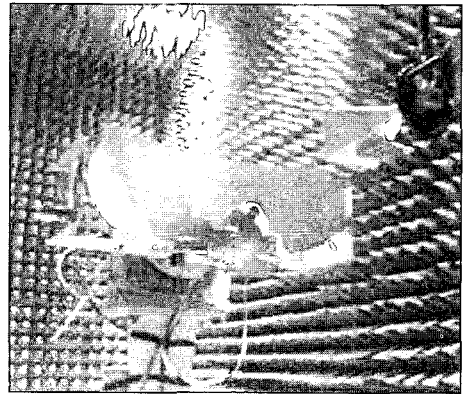


그림 12. 전자파 무 반사실에 설치된 안테나 사진  
Fig. 12. Photo of antenna installed in anechoic chamber.

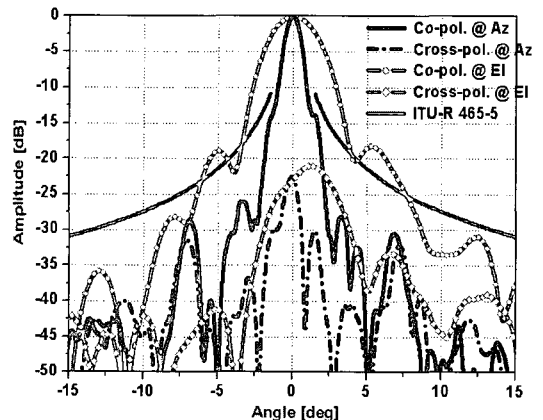


그림 13. Ka 대역( $f=30.485$  GHz)에서 측정된 방사 패턴  
Fig. 13. Radiation patterns measured at Ka band( $f=30.485$  GHz).

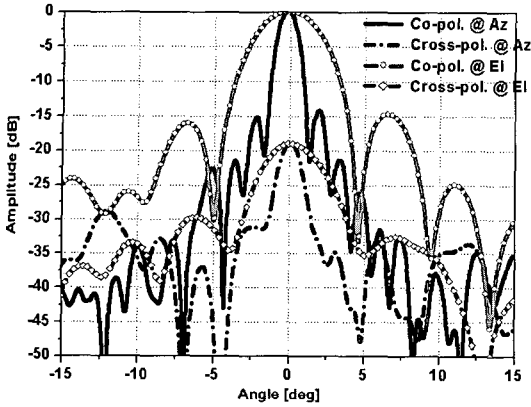
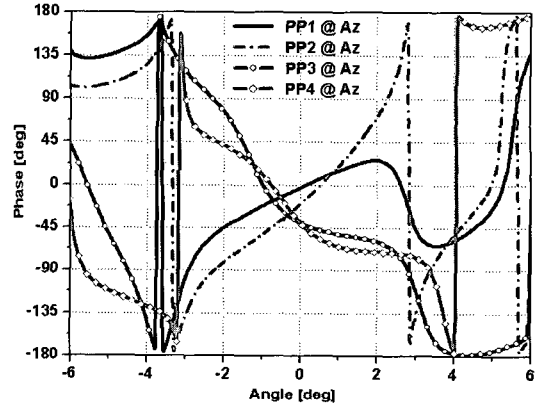


그림 14. K 대역( $f=20.755$  GHz)에서 측정된 방사 패턴  
Fig. 14. Radiation patterns measured at K band( $f=20.755$  GHz).

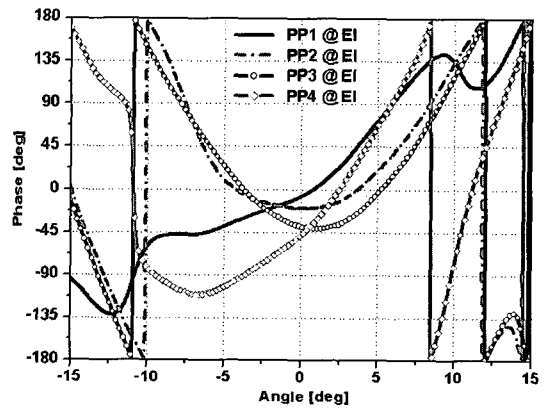
송수신 원형 편파를 사용하는 안테나 시스템에서 Ka/K 이중 대역 급전기의 입력 VSWR은 교차 편파 특성을 좌우하는 아주 중요한 변수이다. 급전기와 원형 편파기 사이의 1차 임피던스 부정합과 원형 편파기와 직교 모드 변환기의 2차 임피던스 부정합에 의해 반대 원형 편파가 급전기로 여기되어 교차 편파 특성을 열화시킨다. 그러므로, 선형 편파를 사용하는 송수신 안테나 시스템의 교차 편파 특성은 30 dB 이상으로 양호한 반면에 원형 편파를 사용하는 송수신 안테나 시스템의 교차 편파 특성은 그림 13과 그림 14를 보면 알 수 있듯이 실제적으로 25 dB 이상 구현하기가 어렵다.

Ka/K 대역과는 달리, Ku 대역은 4개의 능동 채널로 구성되므로 4개의 능동 채널의 초기 위상 보정이 요구된다. 그러므로, 4개의 채널 중에 한 개의 채널만 동작시키고, 나머지 채널들은 전원을 차단하여 격리시킴으로써 단일 채널에 의한 부분 패턴(partial pattern)들을 측정하였다. 이러한 방법으로 측정된 단위 능동 채널의 부분 위상 패턴들을 그림 15에 제시하였다. 측정된 4개의 부분 진폭 패턴들의 최대점은 좌우 상하 대칭적으로 약간 오프셋되어 나타나게 되며, 그림 15의 부분 위상 패턴들의 정방향( $0^\circ$  방향)에서의 위상 값들이 동위상이 되도록 능동 채널부의 위상 천이기를 제어하여 보정해 주어야 한다.

위상 보정 후 측정된 Ku 대역의 주 빔 및 추적



(a) 방위각 방향에서의 부분 위상 패턴  
(a) Partial phase patterns at azimuth plane



(b) 양각 방향에서의 부분 위상 패턴  
(b) Partial phase patterns at elevation plane

그림 15. 단일 배열 소자 여기에 의한 부분 위상 패턴  
Fig. 15. Partial phase patterns by excitation of each array element.

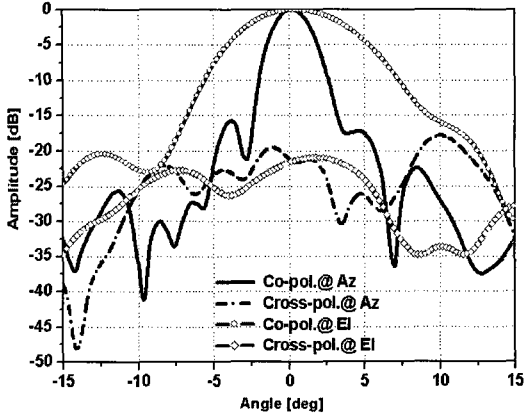
표 6. 측정된 삼중 대역 방사 패턴의 주요 전기적 성능

Table 6. Main electrical performances of measured tri-band radiation patterns.

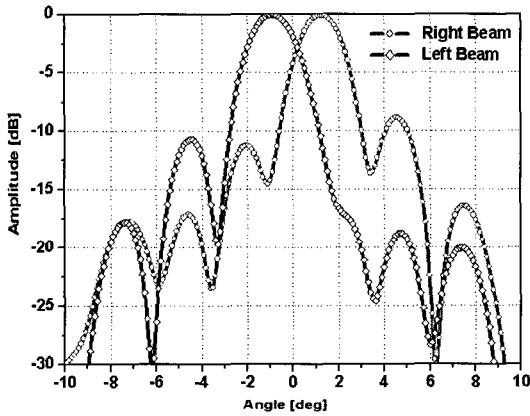
| 주파수 대역 | 이득       | 빔폭                           | 사이드 로브 레벨 | 교차 편파 특성 @ $0^\circ$ |
|--------|----------|------------------------------|-----------|----------------------|
| Ka 대역  | 39.6 dBi | $1.0^\circ \times 3.3^\circ$ | 13.9 dBc  | 22.6 dBc             |
| K 대역   | 37.5 dBi | $1.3^\circ \times 4.0^\circ$ | 14.1 dBc  | 18.9 dBc             |
| Ku 대역  | 29.6 dBi | $2.6^\circ \times 6.4^\circ$ | 15.8 dBc  | 21.4 dBc             |

빔 방사 패턴들은 그림 16에 제시하였다.

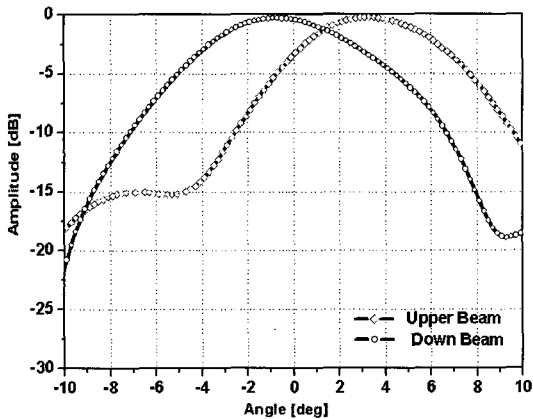
그림 13, 그림 14 그리고 그림 16의 삼중 대역 방사 패턴의 주요 전기적 성능들을 표 6에 요약하여



(a) 주 빔 패턴  
(a) Main beam patterns



(b) 좌우 추적 빔 패턴  
(b) Left and right beam patterns



(c) 상하 추적 빔 패턴  
(c) Upper and down beam patterns

그림 16. Ku 대역( $f=11.85$  GHz)에서 측정된 방사 패턴  
Fig. 16. Radiation patterns measured at Ku band( $f=11.85$  GHz).

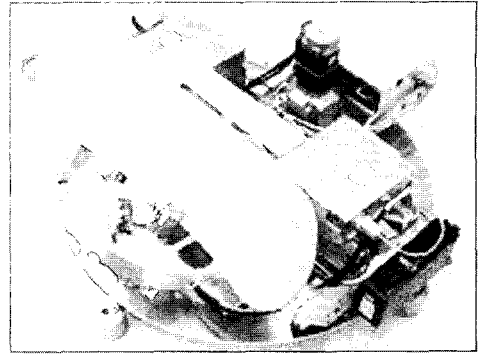


그림 17. 조립된 전체 안테나 시스템 사진  
Fig. 17. Photo of assembled overall antenna system.

정리하였다.

방사 패턴 시험이 완료된 후 나머지 모듈들과 조립된 전체 안테나 시스템 사진은 그림 17에 보여진다.

그림 18은 이동체 운동 시뮬레이터 위에 탑재된 안테나 시스템의 위성 링크 시험 구성도를 보여준다.

안테나 시스템의 수신 감도인 G/T 측정은 무궁화 3호 위성의 K 대역 통신(수신)용 TDM 신호와 Ku 대역 방송용 신호를 이용하여 이루어지며, 표준 G/T 특성을 알고 있는 표준 파라볼라 안테나가 사용된다. G/T 값을 알고 있는 기준 안테나를 사용하여 위성으로부터 오는 수신 신호의 C/N을 측정하고 또한 고려하는 안테나 시스템의 수신 C/N을 측정하여 식 (7)에 의해 계산적으로 상대적인 G/T를 측정한다.

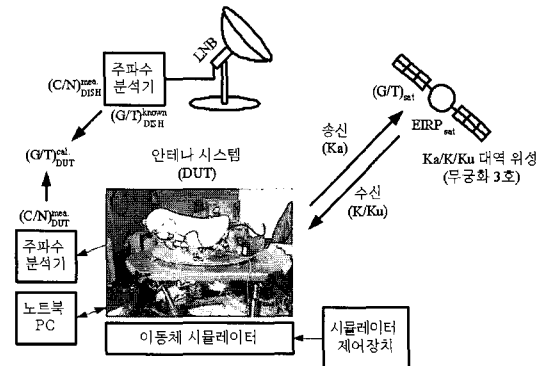


그림 18. 이동체 운동 시뮬레이터 위에 탑재된 안테나 시스템의 위성 링크 시험 구성도  
Fig. 18. Satellite link test configuration of antenna system installed on mobile simulator.

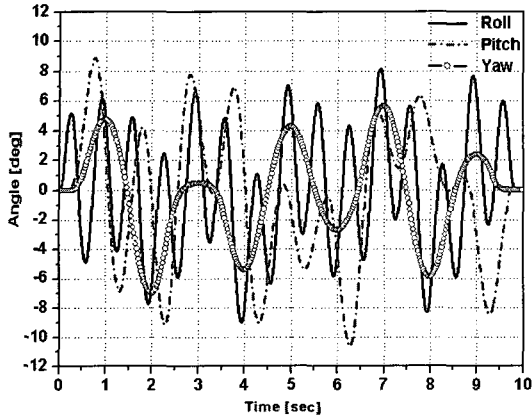


그림 19. 운동 시뮬레이터에서의 선박 시험 조건  
Fig. 19. Shipboard test conditions of mobile simulator.

$$\left(\frac{G}{T}\right)_{DUT}^{cal.} = \left(\frac{C}{N}\right)_{DUT}^{mea.} - \left(\frac{C}{N}\right)_{DISH}^{mea.} + \left(\frac{C}{N}\right)_{DISH}^{known.} \quad (7)$$

측정 결과는 K 수신 대역 내에서 13.2 dB/K 이상 그리고 Ku 수신 대역 내에서 7.12 dB/K 이상을 보여 주었다.

안테나 시스템의 송신 EIRP 성능 시험 및 위성 추적 성능 시험은 안테나 시스템을 이동체 운동 시뮬레이터 위에 탑재하여 임차한 실제 무궁화 3호 위성을 이용하여 수행되었다. 송신 최대 EIRP 측정도 수신 G/T 측정 방법과 유사한 방법으로 송신 EIRP 값을 알고 있는 기준 고정 송신 단말 안테나를 이용하여 상대적으로 이루어졌으며, 측정된 최대 송신 EIRP 값은 30.085 GHz에서 43.7 dBW임을 보여 주었다.

위성 추적 성능 시험은 이동체 운동 시뮬레이터에 탑재되어 무궁화 위성 3호와 직접 링크 접속을 통해 이루어졌다. 그림 19의 이동체 운동 시뮬레이터의 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)의 선박 운동 시험 조건 하에서, 위성 추적 성능은 ±0.2°의 위성 추적 오차 범위 내에서 0.8 dB 이하의 추적 손실을 보여 주었다.

#### IV. 안테나 시스템의 위성 링크 시험

다음은 안테나 시스템을 이동체에 탑재하여 실제 무궁화 3호 위성을 이용한 시험으로 이동체는 한국해양대 소속 3,000톤급 선박 및 ETRI의 시험용

승합 차량을 이용하였다.

먼저, 선박에 설치된 안테나 시스템의 사진은 그림 20에 보여지며, 위성 링크 해상 시험 결과는 그림 21에 제시하였다. 실험 결과로부터 알 수 있듯이 해상에서는 위성과 항상 Line Of Sight 환경 제공이 가능하므로 신호 블록킹 현상이 없음을 알 수 있다.

안테나 시스템을 차량에 장착한 사진은 그림 22

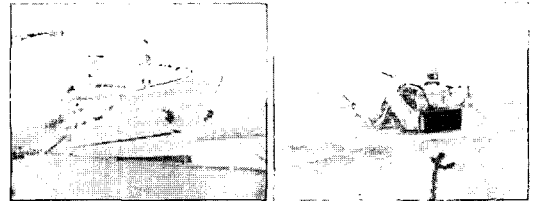


그림 20. 선박(3,000 톤급)에 탑재된 안테나 시스템 사진  
Fig. 20. Photos of antenna system installed on the ship(3,000 ton class).

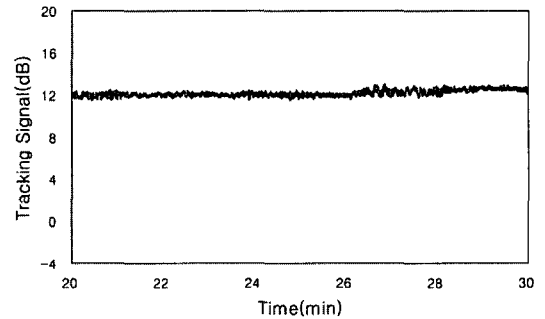


그림 21. 선박 위성 링크 시험 결과  
Fig. 21. Satellite link test result in the ship.

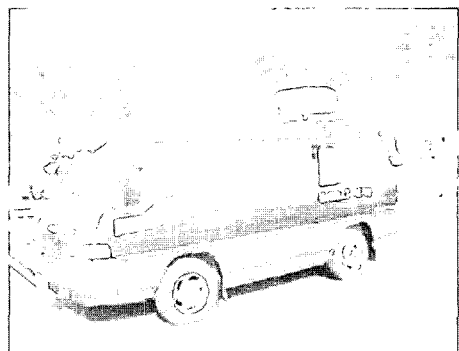


그림 22. 차량에 탑재된 안테나 시스템 사진  
Fig. 22. Photo of antenna system installed on the vehicle.

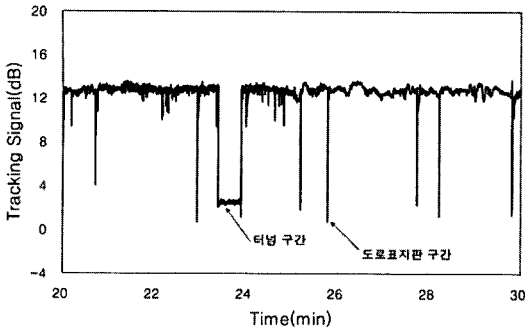


그림 23. 차량(고속 도로) 위성 링크 시험 결과  
Fig. 23. Satellite link test result in the vehicle(ex-pressway).

와 같으며, 육상 고속 도로 시험 결과는 그림 23에 제시하였다.

그림 23의 시험 결과로부터 알 수 있듯이 육상(고속 도로) 시험은 나무, 교통 표지판, 건물 등 짧은 블로킹 영역에 의해 위성 신호가 자주 블로킹됨을 알 수 있으나 곧 복원됨을 알 수 있다. 또한, 터널 구간과 같이 비교적 긴 블로킹 구간에서도 터널을 빠져 나온 후 바로 위성을 추적함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

## V. 결 론

삼중 대역(Ka/K/Ku 대역)에서 동작하는 무궁화 3호 정지 궤도 위성을 이용하여 위성 멀티미디어 및 방송 서비스를 제공하는 이동체 탑재형 삼중 대역 안테나 시스템을 설계하고 안테나 시제품을 제작 및 실험하였다. 또한, 안테나 시스템을 운동 시뮬레이터 위에 탑재한 후 해당 이동체 운동 조건 하에서, 무궁화 3호 위성과 접속하여 송신 EIRP 시험, 수신 G/T 시험, 위성 추적 성능 시험들을 수행하였다.

본 논문에서 설계된 삼중 대역 안테나는 외형을 낮추기 위해 양각 방향으로 팬 빔 특성을 갖는 준-오프셋 이중 성형 반사판과 삼중 대역 급전기로 구성하였으며, 특히 Ku 대역 2×2 능동 급전 배열은 위성을 고속으로 추적하기 위하여 고속의 전자 빔을 제공하도록 설계하였다. 제작된 안테나 시스템의 Ka 송신 EIRP는 43.7 dBW 이상 그리고 K/Ku 대역 수신 감도 G/T는 각각 13.2 dB/K, 7.12 dB/K 이

상의 측정 결과를 보여주었다. 이러한 측정 결과는 무궁화 3호 위성을 이용하여 포워드 링크 10 Mbps 데이터를 수신하고 그리고 리턴 링크 1 Mbps 데이터를 송신할 수 있음을 위성 링크 실험을 통해 확인하였다.

본 논문에서 제안하는 삼중 대역 안테나 시스템 설계 기술은 이동체에서의 초고속 양 방향 인터넷 접속, 화상 통신, VOD 서비스, 고화질의 위성 방송 서비스 등과 같이 다양한 광대역 서비스를 제공할 수 있으므로 향후 위성 망과 무선망을 연계하는 차세대 유비쿼터스 망의 핵심 인프라 기술로 발전할 수 있을 것으로 전망된다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. Schena, F. Ceprani, "FIFTH project solutions demonstrating new satellite broadband communication system for high speed train", *Vehicular Technology Conference*, pp. 2831-2835, vol. 5, May 2004.
- [2] P. Conforto, G. Losquadro, "Fast internet for fast train hosts: The FIFTH project", *Proc. of 8<sup>th</sup> Ka-band Utilization Conference*, Sep. 2002.
- [3] A. Monk et al., "Ultra-low profile airborne reflector antenna subsystem for broadband satellite communications", *21<sup>st</sup> AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit*, AIAA 2003-2316, Apr. 2003.
- [4] A. Densmore, V. Jamnejad, "A satellite-tracking K- and Ka-band mobile vehicle antenna system", *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, vol. 42, no. 4, Nov. 1993.
- [5] W. H. Jones, M. L. Chapelle, "Connexion by Boeing<sup>SM</sup> - Broadband satellite communication system for mobile platforms", *2001 IEEE Military Communications Conference, MILCOM 2001*, pp. 755-758, Oct. 2001.
- [6] E. Laase, "Aeronautical internet services via satellite-Present and planned system", *21<sup>st</sup> AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibit Colloquium: "Satellite internet:*

- Latest technologies, systems and services*", Apr. 2003.
- [7] H. Wakana et al., "COMETS for Ka-band and millimeter-wave advanced mobile satellite communications and 21 GHz advanced satellite broadcasting experiments", *IEEE International Conference on Communications*, pp. 79-83, vol. 1, Jun. 1998.
- [8] A. Miura et al., "Ka-band aeronautical satellite communications experiments using COMETS", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1153-1164, vol. 51, Sep. 2002.
- [9] O. Chiharu et al., "Mobile and personal satellite communications experiments with Japan's Experimental Satellite COMETS", *Proceedings of the Second European Workshop on Mobile/Personal Satcoms(EMPS'96)*, pp. 195-202, Oct. 1996.
- [10] Recommendation ITU-R S.465-5, Reference Earth-station Radiation Pattern for Use in Coordination and Interference Assessment in The Frequency Range From 2 to about 30 GHz.
- [11] J. J. Lee, "G/T and noise figure of active array antennas", *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 2, pp. 241-244, Feb. 1993.
- [12] S. Y. Eom et al., "Design and test of RACM in Ku-band vehicular APAA system for DBS reception", *Proceedings of the Inter. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applications*, pp. 215-218, Sep. 1999.
- [13] S. Y. Eom et al., "RACB design of Ku-band APAA system for mobile DBS reception", *29th European Microwave Conference*, pp. 83-86, Oct. 1999.

엄 순 영



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)  
 1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2003년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)  
 1990년 2월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

1991년 8월~1993년 7월: 이탈리아 Alenia Spazio사와 VSAT(DAMA-SCPC) 시스템 국제공동개발  
 [주 관심분야] 초고주파 수동/능동 부품 및 시스템, 안테나 시스템, 위성/이동 통신 RF 시스템 등

정 영 배



1999년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)  
 2001년 2월: 한국정보통신대학원 전자공학부 (공학석사)  
 2001년 2월~현재: 한국전자통신연구원 선임연구원  
 [주 관심분야] RF 수동/능동 회로,

위성통신 안테나

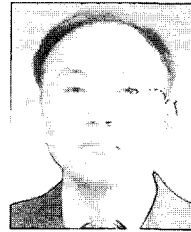
손 성 호



1997년 2월: 부산대학교 제어기계공학과 (공학사)  
1999년 2월: 포항공과대학교 기계공학과 (공학석사)  
1999년 3월~2001년 3월: 대우자동차 기술연구소 연구원  
2001년 3월~2006년 3월: 한국전자

통신연구원 선임연구원(휴직)  
2006년 3월~현재: 포항공과대학교 기계공학과 박사과정  
[주 관심분야] 위성통신 안테나, 제어 시스템, 컨포멀 위상 배열 안테나

전 순 익



1984년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)  
1996년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)  
2003년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)  
1990년 9월~현재: 한국전자통신연구원 안테나기술연구팀 팀장 책임연구원

[주 관심분야] 초고주파 수동/능동 부품 및 시스템, 안테나 시스템, CR 시스템 등

윤 재 승



1999년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)  
2001년 2월: 포항공과대학교 전자컴퓨터공학과 (공학석사)  
2001년 2월~2006년 3월: 한국전자통신연구원 연구원

[주 관심분야] 위성통신 안테나, 배열 안테나, 초고주파 수동 회로