

반구형 커버리지를 갖는 저궤도 위성 TC&R용 원편파 도파관 안테나

Design of Circular Polarized Waveguide Antennas with Hemispherical Coverage for Low-Orbit Satellite TC&R

최동수 · 최윤선 · 이효진 · 주대근 · 이선익 · 우종명

Dong-Su Choi · Yoon-Seon Choi · Hyo-Jin Lee · Dae-Keun Ju · Sun-Ik Lee · Jong-Myung Woo

요 약

본 논문에서는 위성과 지상국의 교신을 위해 원격측정명령계(telemetry, command, ranging, 이하 TC&R)에 필요한 7.0~8.5 GHz(중심주파수: 7.2 GHz, 8.4 GHz)의 대역에서 반구형 커버리지를 갖는 저궤도 위성 TC&R용 도파관 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 도파관 내부에 septum 구조를 활용하여 원편파를 발생시키고, 축비 대역폭을 확대시켰다. 또한, 원편파를 유지하는 범위 내에서 방사 패턴의 빔 폭을 확대시키기 위해 구형 도파관의 개구부 끝 외부에서 corrugate 구조의 벽을 추가하고, offset시켰다. 그 결과, 반구형 커버리지 특성을 만족하였고, $\pm 60^\circ$ 내에서 10 dB 내외의 축비를 얻었으며, 공진주파수에서 -3 dB 빔 폭 내 모든 각도의 평균 이득이 -2.51 dBi로 저궤도 위성 TC&R용 안테나로 충분한 빔 폭 및 축비와 이득을 확보하였다.

Abstract

In this study, we suggested a waveguide antenna for low-orbit satellite TC&R with hemispherical coverage in the X-band of 7.0~8.5 GHz required for the telemetry command system (Telemetry, Command, Ranging, hereinafter TC&R) for communication between the satellite and the ground station. The proposed antenna is designed using a septum structure inside the waveguide to generate a circularly polarized wave and expand the axial bandwidth. In addition, to extend the beam width of the radiation pattern within the range of maintaining the circularly polarized wave, an outer wall of a corrugated structure was added and offset at the end of the opening of the spherical waveguide. Consequently, the hemispherical coverage characteristics were satisfied, and an axial ratio of around 10 dB was obtained at $\pm 90^\circ$. In addition, the average gain of all angles within the beam width at the resonant frequency was -2.9 dBi. Accordingly, sufficient beam width, axial ratio, and gain were secured as antennas for low-orbit satellite TC&R.

Key words: X-Band Waveguide Antenna, Circular Polarization, Hemispherical Coverage, Septum, Low Orbit Satellite

I. 서 론

일반적으로 위성의 TC&R에는 지상국과 교신을 위한 안테나가 필요하며, 특히 지구 저궤도 및 정지궤도 위성

「본 연구는 2019~2020학년도 한국항공우주연구원(KARI)이 지원하는 한국연구재단 사업의 일환으로 수행된 연구임. (No. 2019-0371-01, 저궤도 위성 TC&R 운용 주파수 확장을 위한 X-band 안테나 프로토타입 설계 연구).」

충남대학교 전파정보통신공학과(Department of Radio Science & Communication Engineering, Chungnam National University)

· Manuscript received October 13, 2021 ; Revised October 28, 2021 ; Accepted November 5, 2021. (ID No. 20211013-091)

· Corresponding Author: Jong-Myung Woo (e-mail: jmwoo@cnu.ac.kr)

의 경우, 대체적으로 반구형 커버리지를 갖는 안테나가 운용되고 있다^{[1]~[6]}. 하지만, 기존 위성 TC&R용 안테나는 S-band 주파수 자원의 부족 및 위성 간 간섭 증가 등의 문제점이 있다. 또한, 기존 상용화 안테나(RUAG社 TTC 안테나)의 경우 사용 주파수는 7.2 GHz, 8.45 GHz로 듀얼 밴드이며 100 MHz의 대역폭을 갖고, 그 크기는 125 mm × 125 mm × 200 mm이다^[7]. 이에 따라 광대역 특성을 갖고 대역폭 내 모든 주파수의 0° 방향에서 3 dB 이하의 축비를 확보하며, 위성 발사 시 안정성을 위해 기존 안테나보다 소형화할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 먼저, 7.2 GHz, 8.4 GHz 두 주파수 중심의 저궤도 위성 TC&R용 안테나를 구형 도파관 내에 septum 구조를 설치하여 축비 대역폭이 확대되도록 설계하였다. 다음으로, 개구면 외벽 설치로 반구형 커버리지 방사 패턴을 얻고자 하였으며, 이 커버리지 내에서 신호를 송수신하고자 최소 $\pm 60^\circ$ 내에서 10 dB 내외의 축비 특성과 -3 dB 빔 폭 내 모든 각도의 평균 이득 -5 dBi 이상을 목표로 하였다. 최종적으로 7.0~8.5 GHz 전 대역에서 $\pm 60^\circ$ 내에서 10 dB 내외의 축비 및 90°, 270°에서 -5 dB 이하의 특성을 얻고 또한, 이들 특성을 유지하면서 선행기술에 비해 소형화를 시키고자 하였다. 이 결과들에 대해 기술하고자 한다. 표 1에는 700 km 상공에 위치한 저궤도 위성의 송신 파워와 S/N을 고려하여 제시된 요구 조건을 나타내었다.

II. 본 론

2-1 Septum 구조를 활용한 원편파 도파관 안테나 설계

그림 1에는 원편파를 생성하기 위해 Septum 구조를 이용한 도파관 안테나를 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 기본 도파관의 높이를 2배 증가시키고, septum의 빗면을 따라 도파관 내에서 파가 회전하면서 원편파를 형

표 1. 요구 조건 (목표치)

Table 1. Requirements (objective).

Frequency range	7.0~8.5 GHz (Main frequency: 7.2 GHz, 8.4 GHz)
Axial ratio @ $\pm 60^\circ$	Around 10 dB
Gain @90°, 270°	-5 dBi or more

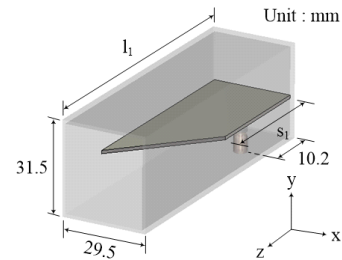
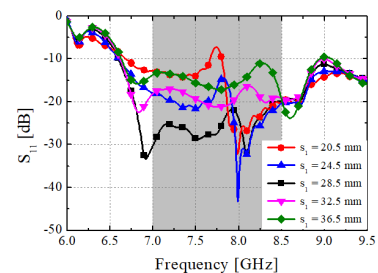


그림 1. Septum 구조를 이용한 원편파 도파관 안테나 구조도 (시뮬레이션)

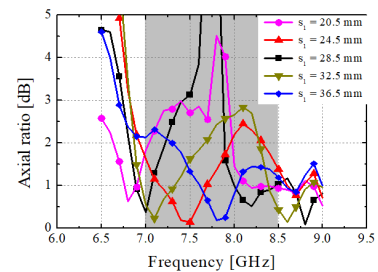
Fig. 1. Circular polarized waveguide antenna structure diagram using septum structure (simulation).

성시킨다^[8]. 원편파 안테나의 특성 확인 및 축비 대역폭 확대를 위하여 s_1 의 길이를 조절하여 septum 빗면의 기울기를 변화시키면서 안테나의 S_{11} 과 축비 특성을 확인하였다. 그 결과를 그림 2에 나타내었고, 최종적으로 도파관 길이 l_1 에 따라 변화하는 안테나의 특성을 확인하여 최적



(a) S_{11}

(a) S_{11}



(c) 축비

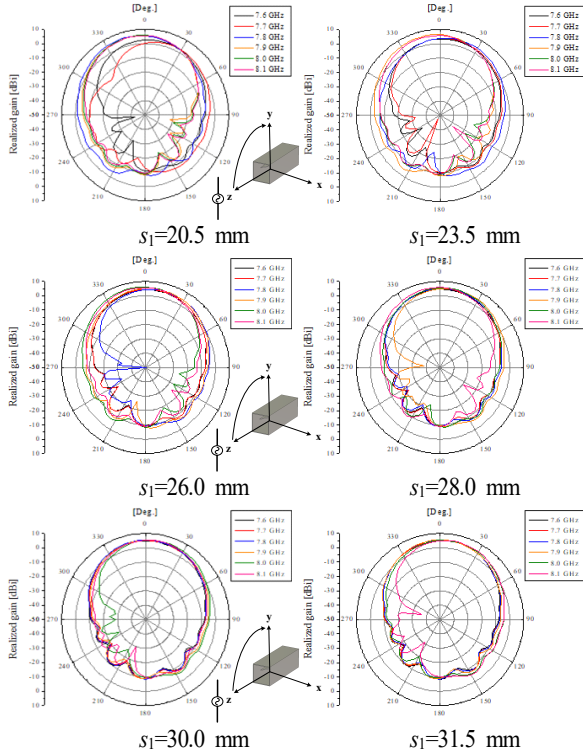
(c) Axial ratio

그림 2. Septum 구조를 이용한 원편파 도파관 안테나 S_{11} 및 축비 특성 (시뮬레이션)

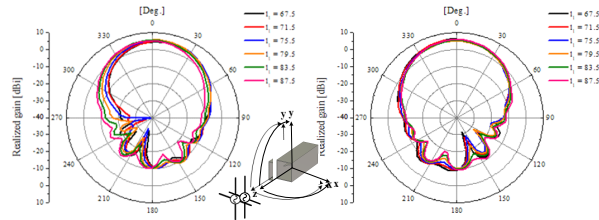
Fig. 2. Characteristic of circular polarized waveguide antenna S_{11} and axial ratio using septum structure (simulation).

화하였다.

그림 3에는 s_1 길이 변화에 따른 방사 패턴 특성 시뮬레이션 결과를 나타내었다. s_1 의 길이를 2.5 mm씩 증가시킨 결과, 일부 주파수의 270°~90°인 상반구상에서 방사가 축소되거나 null 점이 발생하였다. 이를 개선하기 위해



(a) s_1 길이 변화에 따른 방사 패턴 특성 변화
(a) Characteristic of radiation pattern according to length change



(b) 7.8 GHz 대역에서 방사 패턴 특성
(b) Characteristic of radiation patterns in 7.8 GHz

그림 3. Septum 구조를 이용한 원편파 도파관 안테나 방사 패턴 특성 (시뮬레이션)

Fig. 3. Characteristic of circular polarized waveguide radiation pattern using septum structure (simulation).

중심주파수 7.8 GHz에서 도파관 길이 l_1 을 67.5 mm(1.76λ)~87.5 mm(2.28λ) 변화시키면서 방사 특성 시뮬레이션 결과를 그림 3(b)에 나타내었다. l_1 길이 변화에 따라 270°에서의 방사 패턴의 세기 변화가 반복되며, l_1 이 87.5 mm(2.28λ)일 때 빔 폭이 최대가 됨을 확인하였다. 이는 l_1 길이 변화에 따른 S_{11} 특성 변화뿐만 아니라 septum으로부터의 회전된 편파가 안정화되는 적절한 도파관의 길이가 요구된다고 할 수 있으며, 그 결과를 표 2에 정리하였다.

표 2. s_1 및 l_1 변화에 따른 원편파 도파관 안테나 특성 (시뮬레이션)

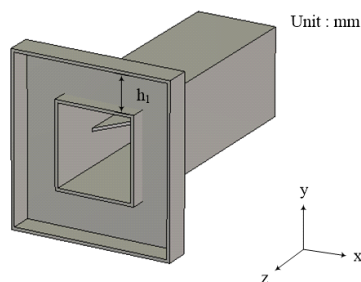
Table 2. Characteristic of circular polarized waveguide antenna according to the change in the s_1 and l_1 (simulation).

	s_1					
	20.5 mm	23.5 mm	26 mm	28 mm	30 mm	31.5 mm
Freq. [GHz]	7.8					
S_{11} [dB]	-25.53	-11.03	-14.65	-27.06	-21.09	-17.2
Axial ratio [dB]	7.87	4.51	3.32	1.37	1.79	2.42
Band width [GHz]	2.4 (30.8%)	3.32 (42.6%)	3.4 (43.6%)	3.38 (43.3%)	3.49 (44.7%)	3.53 (45.3%)
Gain [dBi]	5.81	4.32	4.75	5.04	5.31	5.37
HPBW[°] @yz-plane	80	80	70	80	85	80
	l_1					
	67.5 mm	71.5 mm	75.5 mm	79.5 mm	83.5 mm	87.5 mm
Freq. [GHz]	7.8					
S_{11} [dB]	-30.4	-24.24	-22.06	-22	-23.42	-25.42
Axial ratio [dB]	2.48	2.51	2.14	1.59	0.81	0.2
Band width [GHz]	3.15 (40.4%)	3.06 (39.2%)	2.81 (36%)	2.63 (33.7%)	2.58 (33.1%)	3.41 (43.7%)
Gain [dBi]	5.09	4.78	4.99	5.53	5.70	5.54
HPBW[°] @yz-plane	60	70	60	60	50	70

2-2 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 설계

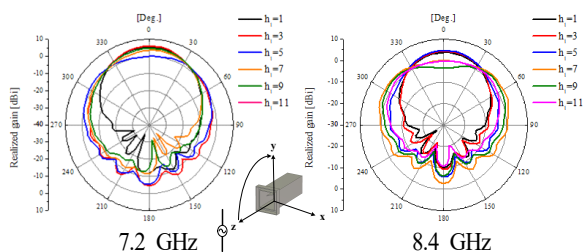
반구형 방사 패턴을 얻기 위해 먼저 개구면 외곽에 외벽을 설치하였고, 그 구조를 그림 4(a)에 나타내었다. h_1 길이를 2 mm씩 증가시키면서 방사 패턴 시뮬레이션 결과를 그림 4(b)에 나타내었다. 시뮬레이션 결과 h_1 길이가 작을수록 도파관 외벽으로 흐르는 클리핑 웨이브를 억제시키는 $\lambda/4$ 단락 스타브 역할을 함으로써 전방 빔 집중 현상이 나타났다⁹⁾. 반면, h_1 길이가 클수록 평면 반사경 역할을 함으로써 외벽 높이에 의한 반사파와의 위상차로 0° 부근에서 레벨 저하가 되어 -3 dB 빔 폭이 증가되는 현상이 나타났다.

7.2 GHz에서는 외벽의 폭 h_1 이 9 mm일 때 90° 와 270° 사이에서 빔이 대칭적이고 0° 에서의 이득이 다소 낮아지는 것을 확인할 수 있으며, 안테나의 용도에 따라 외벽의 폭 h_1 을 조절하여 h_1 이 7 mm일 때의 둥근 반원 방사 패턴



(a) 외벽의 폭에 따른 안테나 구조

(a) Antenna structure according to the width of the outer wall



(b) 7.2 GHz와 8.4 GHz에서의 yz-plane E_θ

(b) Radiation patterns of yz-plane E_θ in 7.2 GHz와 8.4 GHz

그림 4. 외벽의 폭 변화에 따른 원편파 도파관 안테나 특성 (시뮬레이션)

Fig. 4. Characteristic of circular polarized waveguide antenna according to the change in the width of the outer wall (simulation).

과 h_1 이 9 mm일 때 0° 부근에서 이득이 감소하는 방사 패턴을 사용할 수 있음을 확인하였다. 8.4 GHz에서는 폭 h_1 이 11 mm일 때 90° 와 270° 에서의 이득이 가장 대칭적으로 동등하게 나타났다(표 3).

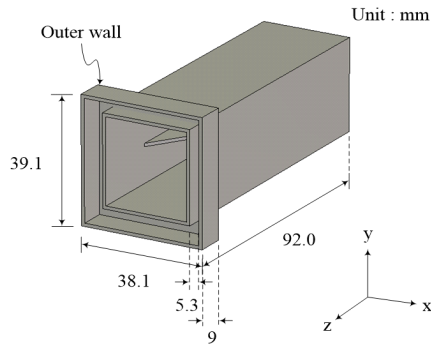
표 3 데이터를 중심으로 h_1 길이는 5.3 mm이고 외벽 높이는 9 mm, 도파관 안테나 전체 길이는 92 mm, 외곽 크기는 $38.1 \text{ mm} \times 39.1 \text{ mm}$ 로 최적화시킨 구조 및 S_{11} , 축비, 방사 패턴 시뮬레이션 결과를 그림 5에 나타내었다.

시뮬레이션 결과, S_{11} 은 요구 대역폭 7.0~8.5 GHz에서 -18 dB 이하의 특성을 얻었으며, 축비는 2 dB 이하의 특성을 얻었다. 특히 두 중심주파수 7.2 GHz와 8.4 GHz에서는 각각 1.75 dB, 1.62 dB를 확보하여 양호한 원편파 특성을 나타내었다. 그림 5(c)의 방사 패턴의 경우, 90° 와 270° 에서는 각각 -7.44 dBi, -9.21 dBi의 이득을 얻었지만, 목표치 -5 dBi를 만족하지 못하여 설계 구조를 재조정하였다.

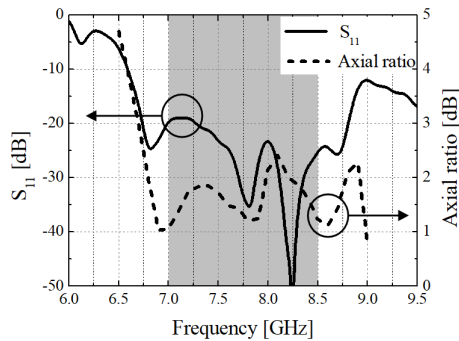
표 3. 외벽의 폭 변화에 따른 원편파 도파관 안테나 특성 (시뮬레이션)

Table 3. Characteristic of circular polarized waveguide antenna according to the change in the width of the outer wall (simulation).

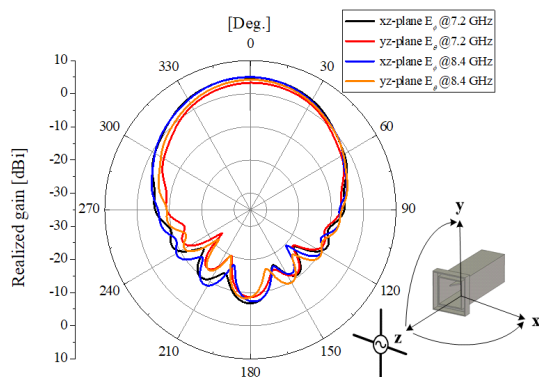
Freq. [GHz]	7.8					
	h_1					
	1 mm	3 mm	5 mm	7 mm	9 mm	11 mm
Gain [dBi]	3.82	4.33	4.79	2.91	2.28	1.13
HPBW[°] @yz-plane	80	75	80	195	65	140
FBR[dB]	13.87	13.66	10.32	2.75	2.69	10.22
Freq. [GHz]	8.4					
	h_1					
	1 mm	3 mm	5 mm	7 mm	9 mm	11 mm
Gain [dBi]	5.48	6.19	1.61	3.59	4.6	5.26
HPBW[°] @yz-plane	60	60	160	85	75	40
FBR[dB]	17.14	10.53	5.28	15.03	19.57	21.63



(a) 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 구조
(a) Structure of an outer wall mounted circular polarization waveguide antenna



(b) S_{11} 및 축비
(b) S_{11} and axial ratio



(c) 7.2 GHz, 8.4 GHz 대역에서 방사 패턴 특성
(c) Characteristic of radiation patterns in 7.2 GHz and 8.4 GHz

그림 5. 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 S_{11} , 축비 및 방사 패턴 특성 (시뮬레이션)

Fig. 5. Characteristic of an outer wall mounted circular polarized waveguide antenna S_{11} , axial ratio and radiation pattern (simulation).

2.3 이중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 설계

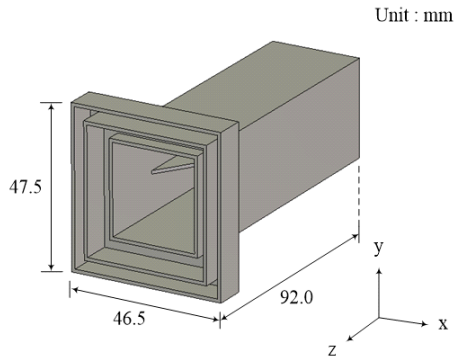
그림 5의 두 주파수에서는 충분한 이득을 갖지만, 7.0~8.5 GHz 대역 중 여러 주파수 대역의 방사 패턴에서 90°와 270°에서의 이득이 충분하지 않은 경우가 있어 추가 개선이 요구되기 때문에 외벽을 이중으로 재설계하였다.

그림 6(a)에 나타난 바와 같이 외벽을 이중으로 탑재함으로써 단일 외벽을 탑재했을 때보다 클리핑 웨이브의 경로를 더 증가시켰으며, 이로 인하여 빔 폭이 더 증가하였다. 두 외벽의 크기는 도파관으로부터 수직 높이가 각각 5.3 mm, 9.5 mm이고, +z축 방향으로의 길이는 10 mm, 9.5 mm이다. 그림 6(b)에는 이중 외벽을 탑재한 원편파 도파관 안테나의 S_{11} 과 축비 특성을 나타내었다. 7.0~8.5 GHz 주파수 대역 모두에서 S_{11} 이 -20 dB 이하의 값을 얻었고, 축비 또한 대부분 2 dB 이하의 값을 얻을 수 있었다. 그림 6(c)에는 방사 패턴 특성을 나타내었다. 단일 외벽을 탑재했을 때와 마찬가지로 두 주파수에서는 충분한 이득을 갖지만, 7.0~8.5 GHz 대역 중 여러 주파수 대역의 방사 패턴에서 90°와 270°에서의 이득이 충분하지 않아 반구형 커버리지 조건에 부합하게 이득을 증가시킬 필요가 있다.

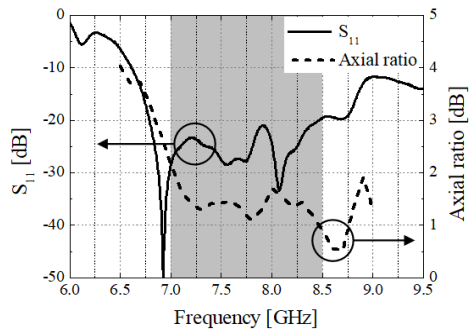
2.4 삼중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 설계

이중 외벽에 변화를 주는 방법으로는 모든 주파수 범위의 빔 폭을 증가시키기에 따라 한계가 발생하여 그림 7(a)에서와 같은 구조로 삼중 외벽을 원형 편파 도파관 안테나에 탑재하였다. 3번째 외벽은 1, 2번째 외벽과 달리 x축과 y축 방향으로 방사면만 존재하는 평면의 형태이며, 2번째 외벽으로부터 3 mm의 폭을 갖는다.

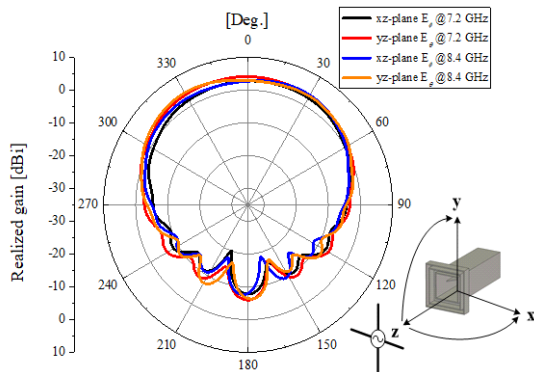
그림 7(b)에는 삼중 외벽을 탑재한 원형 편파 도파관 안테나의 S_{11} 및 축비 특성을 나타내었다. 7.0~8.5 GHz 주파수 대역에서 -19 dB 이하의 S_{11} 을 만족하였으나, 대역 내에서 축비는 2.7 dB 이하의 값으로 이중 외벽과 비교하여 상대적으로 축비가 증가한 특성을 나타내었다. 그림 7(c)에는 삼중 외벽 탑재 원형 편파 도파관 안테나의 방사 패턴을 나타내었으며, 주파수 대역에 따라 빔 모양이 크게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 삼중 외벽 탑재 시 방사 패턴의 빔 폭은 소폭 증가하였으나, 최대 축비가 2.7dB에 근접한 값을 가졌으며, 방사 패턴 모양이 모든 주파



(a) 이중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 구조
(a) Structure of double outer wall mounted circular polarization waveguide antenna

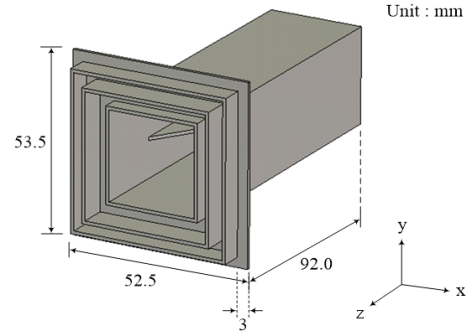


(b) S_{11} 및 축비
(b) S_{11} and axial ratio

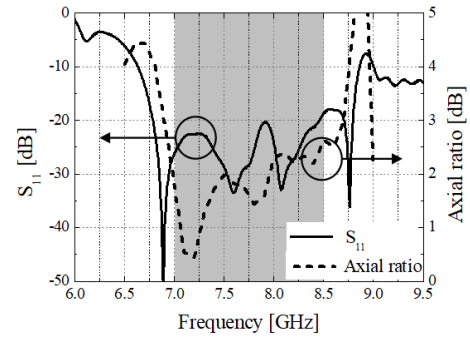


(c) 7.2 GHz, 8.4 GHz 대역에서 방사 패턴 특성
(c) Characteristic of radiation patterns in 7.2 GHz and 8.4 GHz

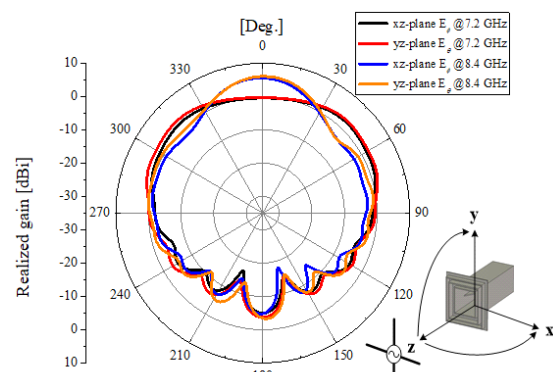
그림 6. 이중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 S_{11} , 축비 및 방사 패턴 특성 (시뮬레이션)
Fig. 6. Characteristic of double outer wall mounted circular polarized waveguide antenna S_{11} , axial ratio and radiation pattern (simulation).



(a) 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 구조
(a) Structure of triple outer wall mounted circular polarization waveguide antenna



(b) S_{11} 및 축비
(b) S_{11} and axial ratio



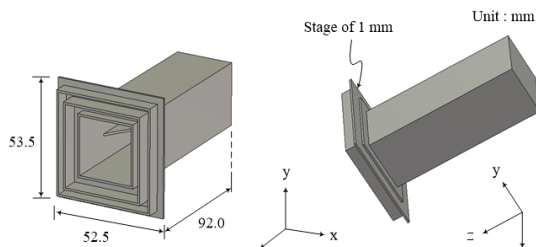
(c) 7.2 GHz, 8.4 GHz 대역에서 방사 패턴 특성
(c) Characteristic of radiation patterns in 7.2 GHz and 8.4 GHz

그림 7. 이중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 S_{11} , 축비 및 방사 패턴 특성 (시뮬레이션)
Fig. 7. Characteristic of triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna S_{11} , axial ratio and radiation pattern (simulation).

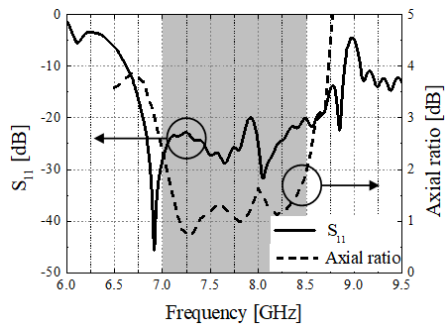
수에서 일정한 모양을 유지하지 않아 추가적인 구조 변형이 요구되었다.

2-5 Offset시킨 삼중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 설계

그림 8(a)에는 삼중 외벽을 탑재한 안테나에서 첫 번째 외벽이 $-z$ 축 방향으로 1 mm 이동하면서 외벽 뒤쪽으로 첫 번째 외벽과 두, 세 번째 외벽 사이에서 offset이 형성된 구조를 나타내었다. 이 구조를 통하여 그림 7(a) 구조의 단점을 개선하여 최종 저궤도 위성 TC&R용 안테나를 설계하였다. 그림 8(b)에는 최종 설계한 안테나의 S_{11} 및 축비 특성을 나타내며, 요구 대역 내에서 -20 dB 이하의 특성을 얻었고, 축비 또한 2 dB 이하가 됨으로써 그림



(a) Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 구조
(a) Structure of modified triple outer wall mounted circular polarization waveguide antenna



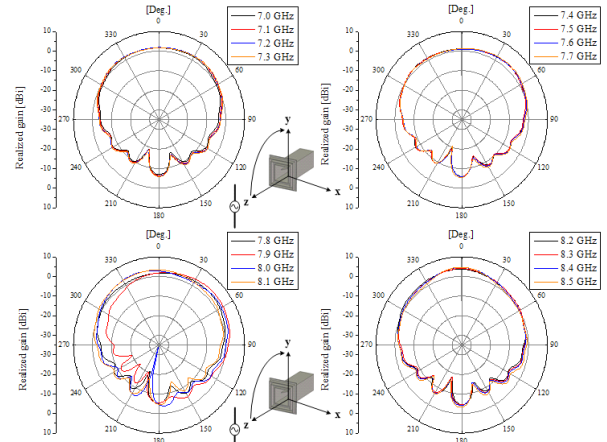
(b) S_{11} 및 축비
(b) S_{11} and axial ratio

그림 8. Offset 시킨 삼중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 S_{11} , 축비 및 방사 패턴 특성 (시뮬레이션)

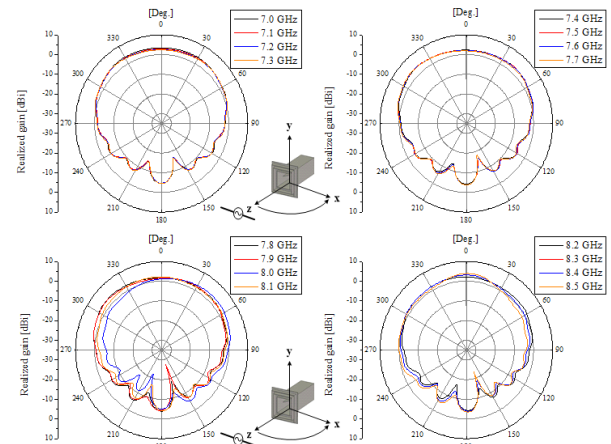
Fig. 8. Characteristic of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna S_{11} , axial ratio and radiation pattern (simulation).

7(b)와 비교하여 안정화되었다.

그림 9에는 최종 설계된 안테나의 7.0~8.5 GHz까지의



(a) Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 방사 패턴 (7.0~8.5 GHz, yz-plane E_θ , 시뮬레이션)
(a) Radiation pattern of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (7.0~8.5 GHz, yz-plane E_θ , simulation)



(b) Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 방사 패턴 (7.0~8.5 GHz, xz-plane E_θ , 시뮬레이션)
(b) Radiation pattern of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (7.0~8.5 GHz, xz-plane E_θ , simulation)

그림 9. Offset 시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 방사 패턴 특성 (시뮬레이션)

Fig. 9. Characteristic of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna radiation pattern (simulation).

방사 패턴을 나타내었다. 제안한 7.0~8.5 GHz 대역의 모든 주파수의 270°~90°에서 -5 dBi 이상의 이득을 갖는다. 또한, 빔의 모양이 주파수와 관계없이 일정하게 유사한 모양을 나타냄과 동시에 충분한 이득을 확보하여 반구형 커버리지 조건에 부합하였다.

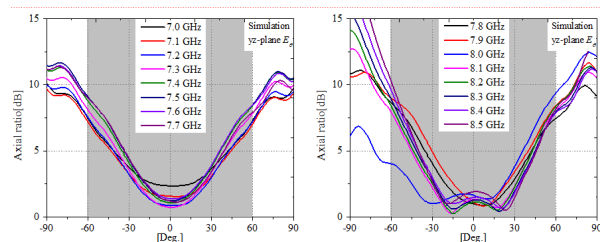
그림 10에는 제안된 안테나의 yz-, xz-plane E_θ 에 대한 각도별 축비를 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 1° 간격으로 값을 표기하고 목표치인 $\pm 60^\circ$ 내에서 10 dB 내외의 조건을 만족하였다.

표 4에는 offset을 한 경우와 하지 않은 경우, 핵심 성능 지표들의 결과를 나타내었다. 대부분의 특성은 유사하지만 offset을 한 경우가 하지 않은 경우보다 38° 더 넓은 빔폭을 확보할 수 있었다. 반구형 커버리지를 갖기 위해 반

표 4. 7.8 GHz 대역에서 offset에 따른 원편파 도파관 안테나 특성 (시뮬레이션)

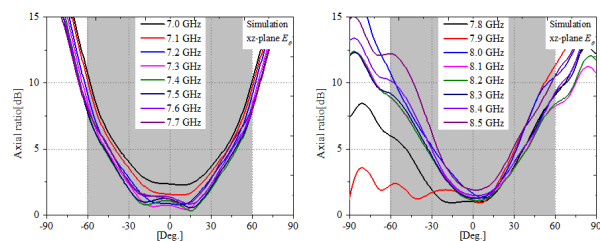
Table 4. Circular polarization waveguide antenna characteristic according to the offset in 7.8 GHz (simulation).

	When no offset is set	When offset is set
Freq. [GHz]	7.8	
S_{11} [dB]	-25.67	-26.19
Axial ratio [dB]	1.44	0.99
Band width [GHz]	2.23(28.6%)	2.28(29.2%)
Gain [dBi]	2.53	2.36
HPBW[°] @ yz-plane	109	147



(a) Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 축비 (yz-plane E_θ , 시뮬레이션)

(a) Axial ratio of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (yz-plane E_θ , simulation)



(b) Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 축비 (xz-plane E_θ , 시뮬레이션)

(b) Axial ratio of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (xz-plane E_θ , simulation)

그림 10. Offset 시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 축비 특성 (시뮬레이션)

Fig. 10. Characteristic of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna axial ratio (simulation).

드시 필요한 구조적 변형이라고 사료된다.

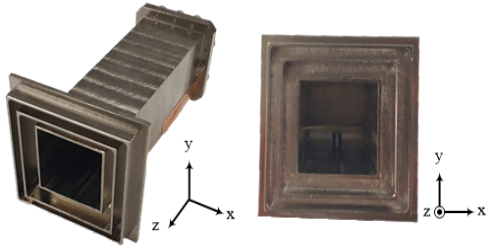
2-6 Offset시킨 삼중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 제작

그림 11(a)에는 시뮬레이션을 바탕으로 설계한 안테나의 제작도를 나타내었으며, 제작된 안테나의 재질은 황동이며, 도전율은 24.6~34.5%이다. 그림 11(b)에는 SS과 축비의 시뮬레이션 결과와 측정치를 비교할 수 있도록 그래프로 나타내었다. 그래프에 나타난 바와 같이 제작된 안테나는 7.0~8.5 GHz의 대역을 만족하며, 축비 또한 해당 주파수 대역 내에서 3 dB 이하임을 확인할 수 있다. 이를 통해 제작한 안테나와 설계한 안테나의 특성과 유사함을 확인하였다.

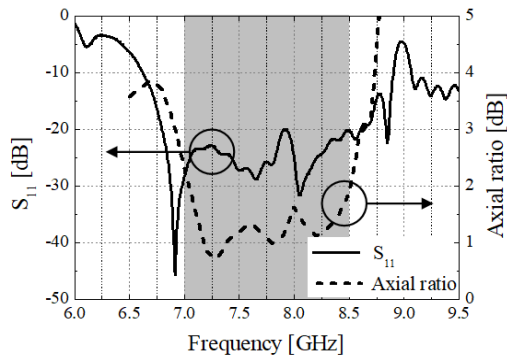
그림 12에는 제작된 안테나의 yz-, xz- plane E_θ 방사 패턴 측정치를 나타내었다. 7.0~8.5 GHz의 주파수 대역에서 측정된 결과를 비교 분석하였으며, 제작한 안테나와 설계한 안테나의 특성이 매우 유사함을 확인하였고, 그 결과를 표 5에 나타내었다.

그림 13에는 제작한 안테나의 축비 특성을 나타내었다. 그림 13(a), 그림 13(b)에 나타난 측정 결과는 15° 간격으로 측정하여 점을 이어서 연결한 그래프로 시뮬레이션과 정확히 일치하진 않지만 유사한 특성임을 확인하였다.

표 6에 나타난 바와 같이 시뮬레이션과 측정치의 데이



(a) 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 구조
(a) Structure of triple outer wall mounted circular polarization waveguide antenna



(b) S_{11} 및 축비
(b) S_{11} and axial ratio

그림 11. Offset시킨 삼중 외벽 탑재를 통한 원편파 도파관 안테나 S_{11} 및 축비 특성 (측정치)

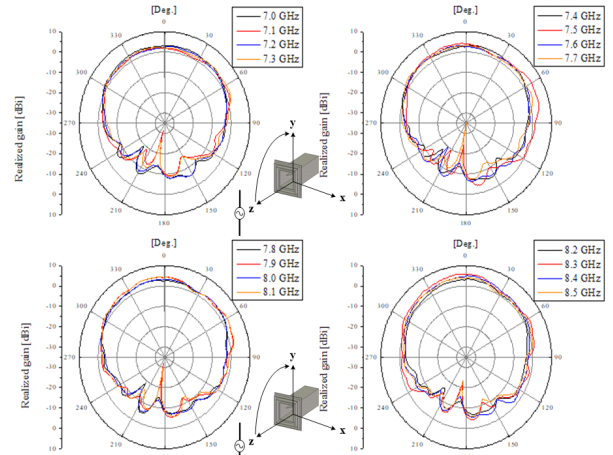
Fig. 11. Characteristic of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna S_{11} and axial ratio (measurement).

터를 핵심 성능 지표들을 기준으로 비교한 결과, 매우 유사한 특성을 보였으며, 실제 측정치가 목표치인 $\pm 60^\circ$ 내에서 10 dB 내외의 조건을 만족하였고, 그 결과를 표 7에 나타내었다.

III. 결 론

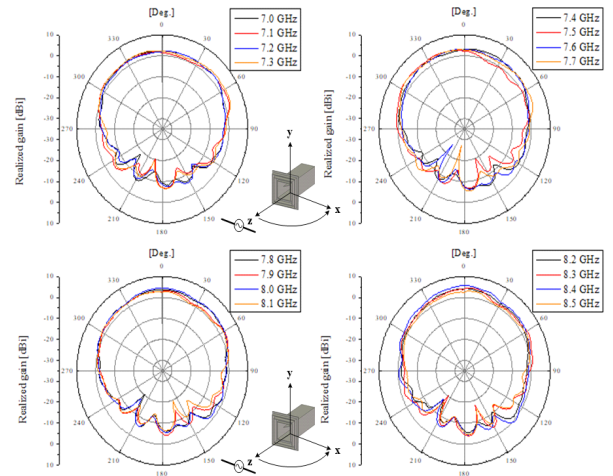
본 논문에서는 위성과 지상국의 교신을 위해 TC&R에 필요한 7.0~8.5 GHz의 X-band에서 반구형 커버리지를 갖는 저궤도 위성 TC&R용 도파관 안테나를 제안하였고, 이를 구현하기 위해 광각의 빔 방사가 가능한 혼 안테나를 설계 및 측정하였다.

먼저 원편파를 발생시키고, 축비 대역폭의 확대를 위해 도파관 내부에 septum 구조를 활용하여 설계하였다.



(a) Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 방사 패턴 (7.0~8.5 GHz, yz-plane E_θ , 측정치)

(a) Radiation pattern of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (7.0~8.5 GHz, yz-plane E_θ , measurement)



(b) Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 방사 패턴 (7.0~8.5 GHz, xz-plane E_θ , 측정치)

(b) Radiation pattern of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (7.0~8.5 GHz, xz-plane E_θ , measurement)

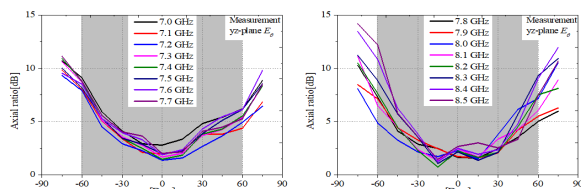
그림 12. Offset시킨 삼중 외벽 탑재 원편파 도파관 안테나 방사 패턴 특성 (측정치)

Fig. 12. Characteristic of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna radiation pattern (measurement).

표 5. 7.8 GHz 대역에서 외벽 개수에 따른 원편과 도파관 안테나 특성

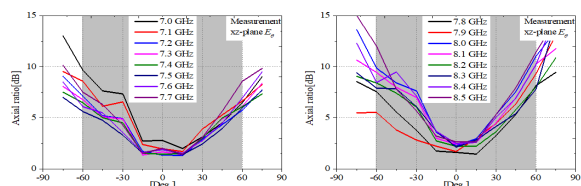
Table 5. Circular polarization waveguide antenna characteristic according to the number of outer walls in 7.8 GHz.

Number of outer walls	Simulation				Measurement
	0	1	2	3	3
Freq. [GHz]	7.8				
S_{11} [dB]	-22.91	-35.23	-25.5	-26.19	-45.1
Axial ratio [dB]	2.86	1.21	1.08	0.99	1.61
Band width [GHz]	2.84 (36.4%)	2.91 (37.3%)	2.89 (37.1%)	2.28 (29.2%)	2.45 (31.4%)
Gain [dBi]	5.54	3.45	2.72	2.36	2.7
HPBW[°] @ yz-plane	70	80	126	147	145
FBR[dB]	15.74	15.03	10.56	8.15	10.62



(a) Offset 시킨 삼중 외벽 탑재 원편과 도파관 안테나 축비 (7.0~8.5 GHz, yz-plane E_θ , 측정치)

(a) Axial ratio of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (7.0~8.5 GHz, yz-plane E_θ , measurement)



(b) Offset 시킨 삼중 외벽 탑재 원편과 도파관 안테나 축비 (7.0~8.5 GHz, xz-plane E_θ , 측정치)

(b) Axial ratio of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna (7.0~8.5 GHz, xz-plane E_θ , measurement)

그림 13. Offset 시킨 삼중 외벽 탑재 원편과 도파관 안테나 축비 특성 (측정치)

Fig. 13. Characteristic of modified triple outer wall mounted circular polarized waveguide antenna axial ratio (measurement).

표 6. 7.8 GHz 대역에서 시뮬레이션 및 측정치 특성 비교
Table 6. Comparison of simulation and measurement value in 7.8 GHz.

	Simulation	Measurement
Freq. [GHz]	7.8	
S_{11} [dB]	-26.19	-45.1
Axial ratio [dB]	0.99	1.61
Band width [GHz]	2.28(29.2%)	2.45(31.4%)
Gain [dBi]	2.36	2.7
HPBW[°] @yz-plane	147	145

표 7. 목표치, 측정치 및 상용 제품 특성 비교

Table 7. Comparison of objective, measurement value and commercial products.

	Objective	Measurement	Commercial products
Frequency range	7.0~8.5 GHz (Main frequency : 7.2 GHz, 8.4 GHz)		7.2 GHz, 8.45 GHz
Axial ratio @ $\pm 60^\circ$	Around 10 dB	7.0~8.3 GHz : 10 dB or less 8.4 GHz, 8.5 GHz : Around 10 dB	-
Gain @ 90° , 270°	-5 dBi or more	90° : -2.1 dBi 270° : -2.93 dBi	Around -3 dBi
Size	52.5 mm×53.5 mm×92 mm		125 mm×125 mm×200 mm

또한, 원편파를 유지하는 범위 내에서 방사 패턴의 빔 폭을 확장하기 위해 구형 도파관의 개구부 끝부분에서 corrugate 구조의 외벽을 추가하고, offset 시켰다. 그 결과 7.0~8.5 GHz의 대역폭을 만족하였으며, 반구형 커버리지 특성을 만족함과 동시에 $\pm 60^\circ$ 에서 10 dB 내외의 축비를 얻었다. 또한, 공진주파수에서 빔 폭 내 모든 각도의 평균 이득이 -2.51 dBi로 저궤도 위성 TC&R용 안테나로 충분한 빔 폭 및 축비와 이득을 확보하고 FBR을 개선하였다. 또한,

기존 상용화 안테나 대비 91.7%의 소형화를 이루었다.

따라서, 반구형 커버리지 방사 패턴을 만족하고, S-band 주파수 자원의 부족 및 위성 간 간섭 증가 등의 문제점을 해결함과 동시에 지상국과 위성 간 교신을 위한 TC&R용 안테나로 적합함을 확인하였다.

References

- [1] J. D. Choi, G. H. Yang, "Geostationary orbit satellite technology status and domestic development," *The Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 37, no. 12, pp. 72-88, Dec. 2010.
- [2] J. D. Choi, J. S. Park, S. S. Jang, B. K. Park, J. A. Kim, and S. R. Lee, "GEO-KOMPSAT-2 Satellite Development Status," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, pp. 864-869, Nov. 2012.
- [3] X. Bai, R. Jin, L. Liu, J. Geng, and X. Liang, "Generation of OAM radio waves with three polarizations using circular horn antenna array," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 5, pp. 1-11, Feb. 2015.
- [4] M. J. Franco, "A high-performance dual-mode feed horn for parabolic reflectors with a steppedseptum polarizer in a circular waveguide," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 53, no. 3, pp. 142-146, Jun. 2011.
- [5] S. Arora, V. S. Puram, B. S. Reddy, V. S. Kumar, C. Sriharsha, and D. V. Ramana, "X-Band choked horn antenna for on-board TTC downlink of deep space satellite applications," in *2017 IEEE International Conference on Antenna Innovations & Modern Technologies for Ground, Aircraft and Satellite Applications(iAIM)*, Bangalore, Nov. 2017, pp. 24-26.
- [6] J. C. Angevain, N. J. Fonseca, "Waveguide septum polarizer shaped with legendre polynomials," in *2017 IEEE 11th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP)*, Paris, Mar. 2017, pp. 19-24.
- [7] RUAG, "X-Band - Dual band RX/TX TTC antennas." Available: https://www.ruag.com/system/files/media_document/2020-01/X-band%20TTC%20Antennas%20November_2020.pdf
- [8] H. J. Lee, D. S. Choi, Y. S. Choi, S. I. Lee, W. K. Lim, and J. M. Woo, "Circularly polarized antenna in a spherical waveguide by a septum," in *Proceedings of Winter Microwave and Propagation Conference*, Feb. 2021, p. 278.
- [9] J. Y. Shin, H. S. Sim, B. H. Lee, J. R. Lee, and J. M. Woo, "Front-to-back ratio improvement of a high-power horn antenna," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 5, pp. 389-392, May 2018.

최 동 수 [충남대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8951-3261>



2013년 2월: 경상대학교 물리학과 (이학사)
2019년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2019년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정
[주 관심분야 안테나 설계]

최 윤 선 [충남대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0615-8701>



2014년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2016년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2019년 3월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정
[주 관심분야 안테나 설계]

이 효 진 [충남대학교/석사]

<https://orcid.org/0000-0001-5331-8686>



2018년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학사)
2020년 8월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
[주 관심분야 안테나 설계]

이 선 익 [한국항공우주연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9910-6259>



1995년 2월: 연세대학교 천문대기과학과 (이학사)
1997년 2월: 연세대학교 천문대기과학과 (이학석사)
2001년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
2016년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

1995년 12월~1996년 12월: ETRI 관제기술연구소 위축연구원
1997년 3월~2003년 7월: (주)하이게인안테나 (부설)전파통신연구소 선임연구원

2003년 9월~2003년 12월: 연세대학교 연구원

2003년 12월~현재: 한국항공우주연구원 책임연구원

[주 관심분야 RF 통신시스템, TC&R]

주 대 근 [대전테크노파크/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4846-1100>



2004년 8월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2013년 2월~현재: 충남대학교 전파공학과 박사과정
2010년 6월~현재: 대전테크노파크

[주 관심분야 안테나 설계]

우 중 명 [충남대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-5796-5426>



1985년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년 3월: 일본 니혼대학 전자공학과(공학석사)
1996년 3월: 일본니혼대학 전자공학과 (공학박사)

1996년 3월~현재: 충남대학교 전파정보통신공학과 교수

[주 관심분야 안테나 설계]