

장거리 전송을 위한 서브 테라헤르츠 고이득 안테나

Sub-Terahertz High-Gain Antenna for Long-Distance Transmission

이정남 · 김광선 · 정재호 · 현석봉 · 조영균*

Jung-Nam Lee · Kwang Seon Kim · Jaeho Jung · Seok Bong Hyun · Young-Kyun Cho*

요약

본 논문에서는 200 GHz 대역 장거리 전송을 위한 서브 테라헤르츠 고이득 안테나를 설계하고, 이를 제작 및 측정하였다. 혼 반사판 안테나, 카세그레인 안테나 및 빔폭 확장을 위한 타원형 카세그레인 안테나 3종을 제작하였으며, 안테나 성능 측정을 위해 측정환경을 구성하고, 수신파워레벨 및 방사패턴을 측정하였다. 측정결과, 245 GHz 중심주파수에서 각각 37 dBi, 52 dBi, 33.3 dBi의 이득과 2.5도, 0.4도, 30도의 빔폭이 측정되었다.

Abstract

In this study, a sub-terahertz high-gain antenna for long-distance transmission in the 200-GHz frequency band is designed, fabricated, and measured. Three types of antennas are fabricated, namely, a horn reflector antenna, cassegrain antenna, and an elliptical cassegrain antenna for beam-width expansion, and a measurement environment is configured to measure antenna performance. Additionally, the reception power level and radiation pattern are measured. As a result of the measurement, antenna gains of 36, 52, and 33.3 dBi and beam widths of 3.5, 0.4, and 30° are measured at the center frequency of 245 GHz.

Key words: Sub-Terahertz, Horn Reflector, Cassegrain, Reception Power Level, Radiation Pattern

I. 서론

미래 이동통신 서비스는 고속, 고용량, 고밀집으로 인해 이동통신망에서 100 Gbps 이상의 데이터 전송이 요구되고, 이를 실현하기 위한 무선 전송 기술로써 테라헤르츠 (THz) 기술이 중요한 기술이 될 것으로 예상된다. 현재까지의 테라헤르츠 기술은 주로 비파괴/비접촉의 광 기반 근거리 검파기술이 연구되고 있으며^{[1],[2]}, 전파 기반의 장거리 전송을 위한 테라헤르츠 무선 전송 기술은 연구

가 미진한 상태이다.

5G 이동통신이 상용화되고, 6G 이동통신 기술에 대한 연구가 논의되면서 테라헤르츠파 대역을 이용한 장거리 무선 전송 기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 2010년에는 일본의 NTT에서 125 GHz 주파수 대역 5.8 km 거리에서 10 Gbps 데이터 전송을 시험하였으며^[3], 2013년에는 독일의 Karlsruhe Institute of Technology에서 237.5 GHz 대역에서 20 m 거리에서 100 Gbps 데이터 전송을 시험하였다^[4]. 일본 오사카 대학에서는 2016년에 320 GHz 대역을

「이 연구는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실).」

한국전자통신연구원 통신미디어연구소(Communications & Media Research Laboratory, Electronics and Telecommunications Research Institute)

*공주대학교 전기전자제어공학부(Division of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University)

· Manuscript received October 29, 2020 ; Revised November 15, 2020 ; Accepted December 1, 2020. (ID No. 20201029-001S)

· Corresponding Author: Young-Kyun Cho (e-mail: ykcho@kongju.ac.kr)

사용하여 100 m 거리에서 50 Gb/s의 무선 전송을 시험하였다^[5]. 상기 장거리 시스템들은 송신부 또는 송/수신부가 광소자 기반으로 설계되었으며, 50 dBi 이상의 높은 이득을 확보하기 위하여 60 cm 이상의 지름을 갖는 반사판 안테나를 사용하였다. 큰 크기와 좁은 빔폭 (0.5도)으로 인하여 이동 환경에는 한계가 존재한다.

6G 이동통신을 구현하기 위해서는 광소자 기반의 전송속도 외에도 시스템의 소형화와 저가화가 중요하다. 전자소자 기반의 시스템은 소수의 RFIC로 RF 시스템을 집적화 할 수 있는 장점이 있다. 전자소자를 기반으로 한 장거리 전송 기술은 2015년에 240 GHz 주파수 대역을 사용하여 850 m 거리에서 64 Gbit/s 전송 시험을 완료하였으며^[6], 2020년 최근에는 독일 슈트트가르트 대학에서 화합물 공정을 사용하여 300 GHz 대역에서 10 m 거리에서 56 Gb/s 전송 성능시험을 완료하였다^[7]. 한국에서는 한국전자동통신연구원에서 2018년부터 전자소자 시스템을 기반으로 한 도로환경에서 대용량 트래픽을 제공하는 200 GHz 대역 기반 무선백홀 연구를 진행하고 있다^{[8],[9]}.

테라헤르츠 안테나는 응용 분야에 따라 나눌 수 있다. 비접촉, 비파괴용으로는 근거리 통신을 사용하기 때문에 이득이 낮은 패치 및 혼 안테나를 사용하고, 고주파 장거리 통신 시스템에는 배열안테나 및 반사판 안테나를 사용한다. 그러나, 배열 패치 안테나는 유전체 손실이 크기 때문에 고성능 유전체 기판 제조 기술이 필요하고, 배열 혼 안테나는 송수신 칩과의 집적이 어렵고 배열 회로를 구성할 수 없는 문제점이 존재한다. 반사판 안테나는 대표적으로 카세그레인 안테나를 사용하는데 이득이 높은 대신에 빔폭이 매우 좁아 이동체에 탑재하기가 불가능하다. 또한, 현재 국내에서는 200 GHz 이상의 안테나를 개발해도 그 성능을 측정할 수 있는 측정시스템이 부족하다.

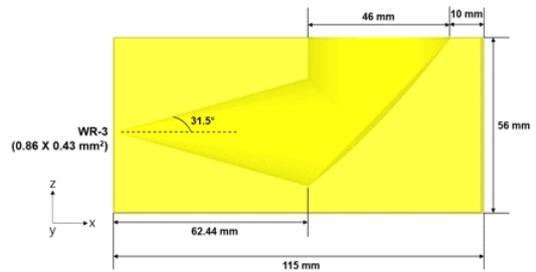
본 논문에서는 도로환경 무선백홀 기반의 장거리 전송이 가능한 고이득 테라헤르츠 안테나를 설계하고, 측정시스템을 구축하여 측정을 수행하였다. 안테나는 기준 혼안테나, 고이득 혼 반사판 안테나, 일반적인 카세그레인 안테나 그리고 최소 30 dBi 이득과 10도 이상의 빔폭을 만족시키는 카세그레인 안테나를 각각 설계하고 측정하여 비교하였다.

II. 테라헤르츠 안테나 설계

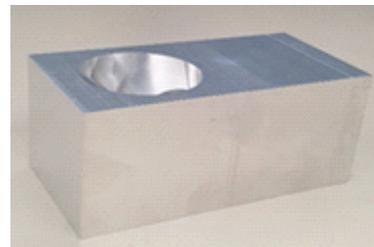
2-1 고이득 혼 반사판 안테나

일반적인 테라헤르츠 혼 안테나는 이득이 약 24 dBi 정도의 중이득을 갖는다. 이는 장거리 통신에 한계가 존재한다. 혼 안테나를 배열로 구성하면 고이득을 달성할 수 있지만 200 GHz 주파수 대역에서 파장이 매우 작기 때문에 배열로 구성하기가 불가능하다. 이런 이유로, 단일 혼 안테나의 이득을 높이기 위해 개구면에 메타물질과 유전체 렌즈를 적용한다^{[10],[11]}.

그림 1은 고이득 혼 반사판 안테나이다. 혼 반사판 안테나는 일반적인 코니컬 혼 안테나와 파라볼릭 안테나를 결합한 안테나이다. 도파관 급전으로 여기된 신호가 반사판에 의해 반사된 후 혼 개구면으로 방사되는 구조로서 혼 안테나의 이득을 높이는 대표적인 안테나이다^[12]. 카세그레인 안테나보다 크기는 작지만 이득은 낮고, 혼 안테나보다 크기는 크지만 이득이 높은 장점이 있다. 급전은



(a) 안테나 구조
(a) Structure



(b) 시제품 사진
(b) Prototype

그림 1. 테라헤르츠 고이득 혼 반사판 안테나
Fig. 1. The proposed THz high gain horn reflector antenna.

WR-3(0.86 mm×0.43 mm)의 도파관 급전을 사용하였으며, 안테나 재질은 알루미늄이다.

2-2 카세그레인 안테나

카세그레인 안테나는 대표적인 고이득 반사판 안테나이다^[12]. 주파수가 THz 이상의 초고주파를 사용하면서 카세그레인 안테나의 단점인 물리적 크기를 작게 구현할 수 있게 되었다. 현재, 수백미터에서 수키로 이상의 거리에서 THz 무선 통신의 실험에서 카세그레인 안테나를 사용하고 있다. 그러나, 안테나의 지름이 약 60 cm 이상으로 크며, 안테나의 빔폭이 매우 좁기 때문에 고정용 Point-to-point 형태로 사용이 제한된다.

그림 2는 카세그레인 안테나의 기본 구조를 도시한 것이다. 다음의 식을 이용하여 245 GHz 중심주파수에서 동작하는 카세그레인 안테나를 설계하였다^[13]. 참고문헌 [13]의 블록킹 조건이 없다는 가정에서의 첫 번째 파라미터 공식을 사용하였다.

$$\theta_e = \arctan \left[\frac{8FD_m D_s}{32fFD_m - D_s(16F^2 - D_m^2)} \right] \quad (1)$$

$$f = L_s \frac{\sigma D_m - 4L_m \tan\left(\frac{\theta_e}{2}\right)}{2\sigma D_m + 8L_s \tan\left(\frac{\theta_e}{2}\right)} \quad (2)$$

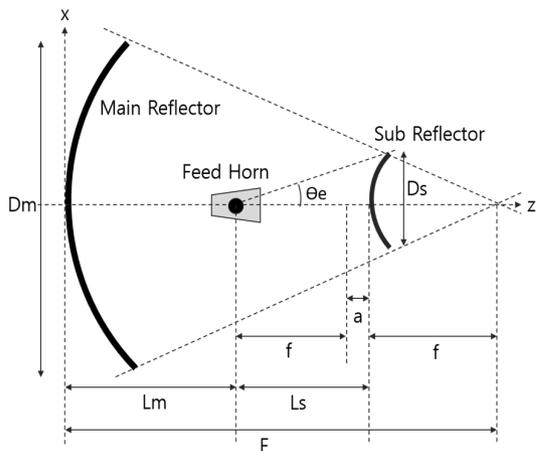


그림 2. 카세그레인 안테나 기본 구조
Fig. 2. The basic structure of the Cassegrain antenna.

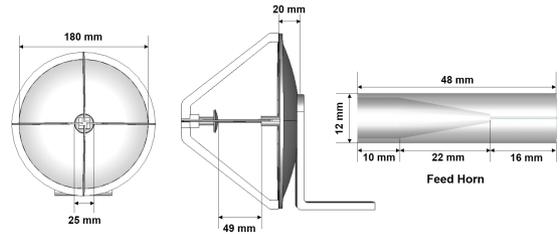
$$F = L_m + 2f \quad (3)$$

$$D_s = \frac{4(L_s - f)}{\frac{1}{\sin(\theta_e)} + \frac{\sigma(16F^2 + D_m^2)}{8FD_m}} \quad (4)$$

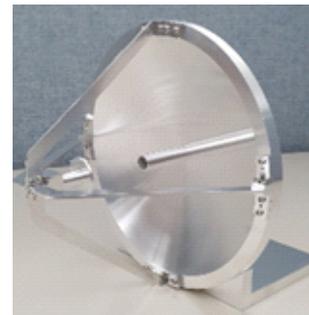
$$a = L_s - f \quad (5)$$

여기서, F 는 주 반사판 (main reflector)의 초점거리, L_s 는 부 반사판 (sub reflector) 중심점과 급전혼 중심과의 거리, D_s 는 부 반사판 직경, σ 는 카세그레인 안테나의 경우, ‘-1’이고, θ_e 는 급전혼의 10 dB 반 빔폭을 의미한다.

그림 3은 제안된 테라헤르츠용 고이득 카세그레인 안테나를 도시한 것이다. 카세그레인 안테나는 주 반사경, 부 반사경, 급전 혼으로 구성된다. 급전 혼 안테나는 카세그레인 안테나의 spillover 효율과 illumination 효율을 높이기 위해 원형의 대칭적인 방사패턴을 가져야 하며, 부엽레벨이 억제되어야 한다^[12]. 일반적인 사각 및 원형 혼 안테나는 개구면 지름과 혼의 길이에 따라 최적의 이득



(a) 안테나 구조
(a) Structure



(b) 시제품
(b) The prototype Cassegrain antenna

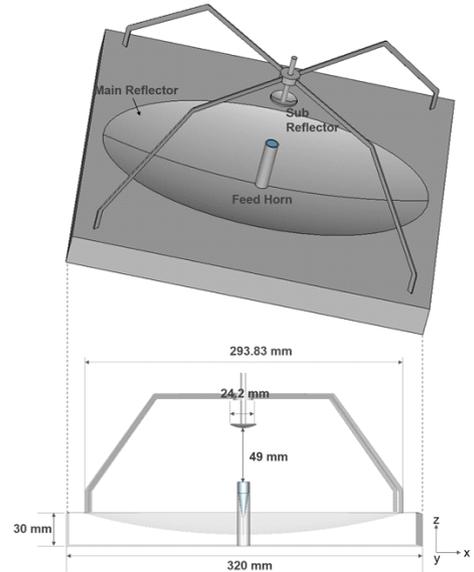
그림 3. 테라헤르츠용 카세그레인 안테나
Fig 3. The Cassegrain antenna for THz system.

을 확보할 수 있지만 방사패턴이 회전 대칭이 아니기 때문에 카세그레인 안테나의 효율이 제한적이다. 본 논문에서는 주 반사경의 직경의 180 mm이고, 급전혼은 spillover 효율과 illumination 효율을 높이기 위해 이중모드 원형 혼 안테나를 사용하였다. 이중모드 혼 안테나는 원형 도파관에 TE_{11} 모드와 TM_{11} 모드가 85:15의 비율로 여기되어 대칭적인 원형 방사패턴을 얻을 수 있으며, 두 모드의 수직 성분은 상쇄되어 교차편파 특성 또한 향상시킬 수 있다^[2]. 설계된 수치를 적용하여 계산하면 245 GHz 중심주파수에서 이득은 약 51.3 dBi, 빔폭은 0.4도이다. 그림 3의 카세그레인 안테나는 빔폭이 약 0.4도로 계산되었다. 이 결과는 빔폭이 너무 좁기 때문에 이동체에 적용하기에는 한계가 있다. 때문에 이득을 줄이고 빔폭을 확장시킨 카세그레인 안테나를 설계하였다.

그림 4는 빔폭을 확장하기 위해 제안한 타원형 카세그레인 안테나이다. 수직 또는 수평면으로 넓은 빔폭을 얻기 위한 대표적인 안테나로 E면 혼 안테나와 H면 혼 안테나가 있다. 수직 또는 수평면 방향으로 특정 각이 커지고, 다른면은 일정한 것이 특징이며, 이득은 사각혼보다 줄어들지만 수직 또는 수평면 방향으로 빔폭이 넓어지는 특징이 있다. 제안된 안테나는 이 특징을 바탕으로 카세그레인 안테나에 적용하였으며, 주반사판의 y축은 고정하고 EM시뮬레이터를 사용하여 반복적으로 x축의 길이를 증가시키는 방법을 사용하여 20~30도 사이의 빔폭을 획득하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 주 반사판의 지름은 1:0.6으로 설계하였으며, 급전 혼은 이중 모드 급전 혼을 사용하였다. 시뮬레이션 결과, 이득은 약 30.3 dBi, 빔폭은 약 25.6도의 결과를 얻었다.

III. 테라헤르츠 안테나 측정환경 구성 및 측정결과

현재 전자 기반의 장거리 전송용 테라헤르츠 안테나를 측정할 수 있는 무반사실 챔버가 없기 때문에 안테나의 성능을 측정하는데 한계가 있다. 본 논문에서는 신호 분석기(signal analyzer)를 사용하여 수신파위레벨(RPL)과 방사패턴 측정을 수행하였다. 실험 장소는 자체 실험실 및 비교적 간섭이 적은 장소에서 실험을 진행하였다(그림 5).



(a) 안테나 구조

(a) Structure

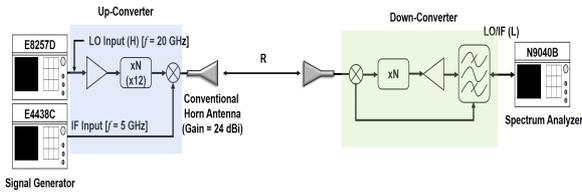


(b) 시작품

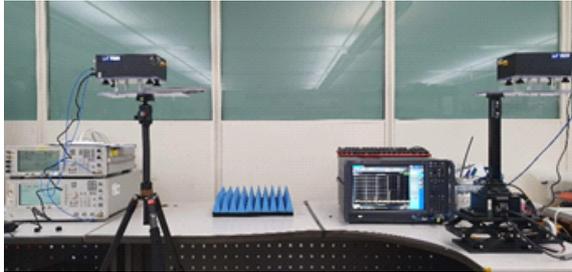
(b) The prototype antenna

그림 4. 빔폭 확장을 위한 테라헤르츠 카세그레인 안테나
Fig 4. The THz Cassegrain antenna for beam-width extension.

먼저, 상용 혼 안테나의 성능을 측정하여 제안된 안테나의 기준 파워를 선정해야 한다. 송/수신 모두 상용 혼 안테나를 사용하여 측정을 수행하였다. 송신부는 analog signal generator(ASG), up-converter (UC)로 구성하였으며, up-converter는 버지니아 다이오드사의 제품을 사용하였으며^[14], 24 dBi 상용 혼 안테나^[15]를 부착하였다. 수신부는 signal analyzer (SA), down-converter (DC)로 구성하였으며, down-converter 또한 버지니아 다이오드사의 제품이며, 24 dBi 상용 혼 안테나를 부착하였다. 측정 주파수는 245 GHz이며, 송신 출력은 0 dBm이다. UC는 12배를 체



(a) 구성도
(a) Configuration diagram



(b) 실제 환경 구성
(b) Actual environment configuration

그림 5. 수신파워레벨 측정 환경 구성
Fig 5. Received power level measurement environment configuration.

배할 수 있기 때문에 2대의 ASG중 E8257D는 LO input으로 20 GHz, E4438C는 IF input으로 5 GHz를 UC로 입력하였다. 안테나간 거리(R)는 약 1 m로 이격시켰다.

그림 6은 상용 혼 안테나의 수신파워레벨을 측정한 결

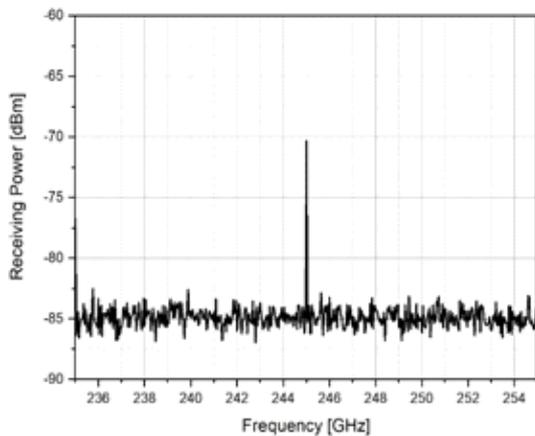


그림 6. 상용 혼 안테나 수신파워레벨 측정 결과
Fig 6. Commercial horn antenna reception power level measurement result.

과이다. 측정결과, 245 GHz에서 약 -72 dBm의 수신파워레벨이 측정되었다. 수신부에 혼 반사판 안테나, 카세그레인 안테나, 타원형 카세그레인 안테나로 교체하여 수신파워레벨을 측정하였다.

그림 7은 제안된 안테나들의 수신파워레벨을 측정한 결과이다. 24 dBi 상용 혼 안테나의 수신파워레벨이 -72 dBm을 기준으로 이득을 유추하였다. 그림 7(a)의 혼 반사판 안테나는 수신파워레벨이 -59 dBm이며, 두 안테나의 수신파워 차이는 13 dBm이고, 이 값을 상용 혼 안테나에 더하여 이득으로 환산하면 약 37 dBi의 이득을 갖는다. 카세그레인 안테나들은 안테나의 무게 때문에 일반적인 도파관을 사용하면 도파관 파손의 문제가 발생하여 5 dB 감쇄기를 도파관 대신 사용하여 측정을 수행하였다. 그림 7(b)의 카세그레인 안테나는 -53 dBm이 측정되었고, 5 dB 감쇄를 고려하면 약 -48 dBm이며, 이득은 약 50 dBi로 예상할 수 있다. 그림 7(c)는 타원형 카세그레인 안테나의 측정결과이며, -66 dBm이 측정되었고, 5 dB 감쇄를 고려하면 약 -61 dBm이며, 이득은 약 35 dBi로 예상된다.

그림 6과 그림 7을 통하여 제안된 안테나의 수신파워레벨을 측정하여 이득을 예측하였다. 그러나, 도로환경 무선백색 시스템에서는 안테나의 방사패턴과 빔폭이 중요하다. 본 논문에서는 그림 5의 측정환경을 바탕으로 안테나의 패턴과 빔폭을 측정할 수 있도록 개선하였다. 수신부가 전자적으로 수평방향으로 ± 60 도로 회전할 수 있도록 구성하였다.

그림 8은 제안된 안테나의 방사패턴을 측정하기 위한 측정환경 구성으로써 비교적 사람의 왕래가 적고 간섭이 적은 공간에서 측정을 수행하였다. 실험환경 구성은 그림 5와 동일하며, 안테나간 거리는 2 m로 이격시켰다. 측정 주파수는 245 GHz, 송신출력은 -10 dBm, 이격거리는 2 m, 송신 혼 안테나의 이득은 24 dBi, 수신 감쇄는 5 dB이며, 수신기 이득은 -1 dB이다.

그림 9는 제안된 안테나의 방사패턴을 측정한 것이다. 측정된 결과는 ± 60 도에서의 수신파워레벨로 측정되기 때문에 프리스(Friis) 공식을 사용하여 이득을 계산하였다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (6)$$

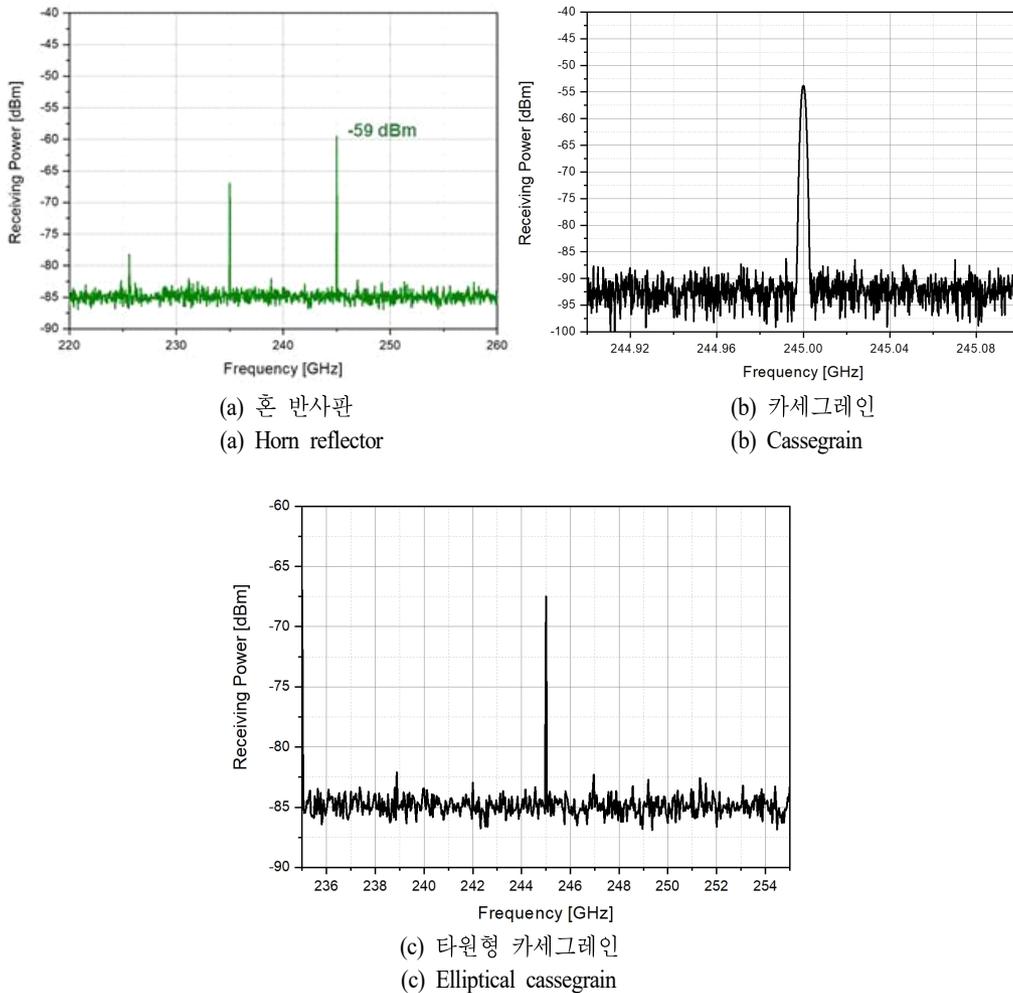
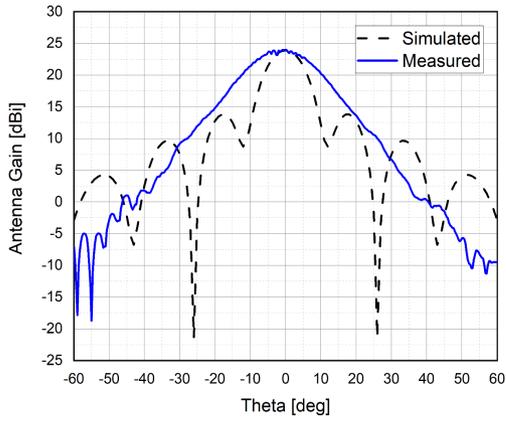


그림 7. 제안된 안테나 수신파워레벨 측정 결과
Fig 7. The proposed antenna reception power level measurement result.

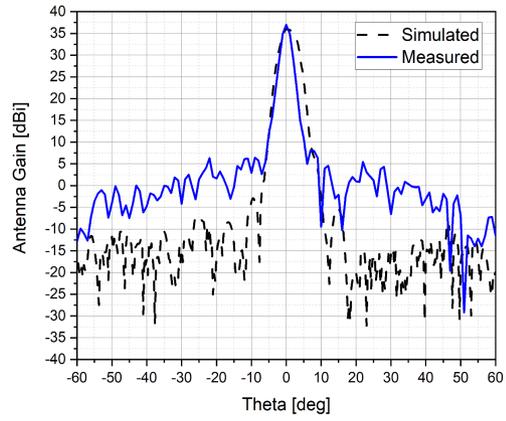


그림 8. 방사패턴 측정을 위한 측정환경구성
Fig 8. The measurement environment configuration for radiation patterns measurement.

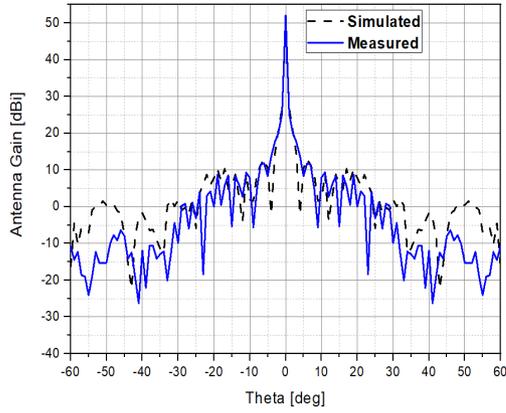
측정주파수 (λ), 송신 출력 (P), 거리 (R), 송신 안테나 이득(G_t), 수신 파워 (P_r)를 알기 때문에 식 (6)을 이용하여 수신 안테나 이득 (G_r)을 구할 수 있다. 본 측정에서는 24 dBi 기준 혼 안테나를 사용하여 측정하고, 이를 기반으로 이득을 계산하였다. 그러므로 제조사에서 제공되는 스펙과 일치되는지 확인하는 과정이 중요하다. 그림 9(a)는 기준 혼 안테나의 측정결과를 도시한 것이다. 제조사 측에서 제공되는 치수를 사용하여 시뮬레이션을 수행한 결과와 비교하였다. 측정결과, 245 GHz 중심주파수에서 24 dBi의 이득과 13도의 빔폭을 획득하여 스펙과 일치하는 것을 확인하였다. 제안된 안테나의 측정결과는 표 1에 표기하였다.



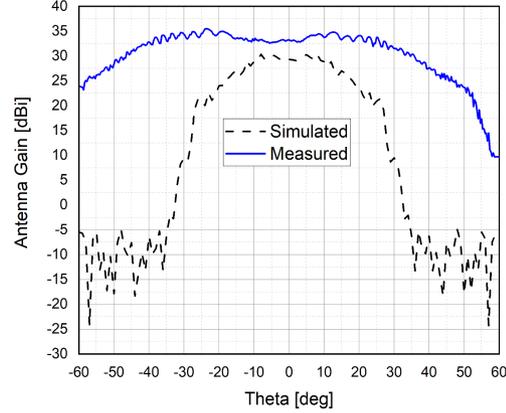
(a) 상용 혼 안테나
(a) Commercial horn antenna



(b) 혼 반사판 안테나
(b) Horn reflector antenna



(c) 카세그레인 안테나
(c) Cassegrain antenna



(d) 타원형 카세그레인 안테나
(d) Elliptical cassegrain antenna

그림 9. 방사패턴 측정결과

Fig 9. Measured radiation patterns.

표 1. 제안된 안테나의 측정결과 비교 ($f_c=245$ GHz)

Table 1. Comparison of the measurement results of the proposed THz antennas ($f_c=245$ GHz).

		Gain [dBi]	BW [deg]			Gain [dBi]	BW [deg]
Standard horn	Sim.	23.6	11	Cassegrain	Sim.	50	0.4
	Mea.	24	13		Mea.	52	0.4
	RPL	24(spec.)	-		RPL	50	-
Horn reflector	Sim.	36	3.5	E. Cassegrain	Sim.	30.3	25.6
	Mea.	37	2.5		Mea.	33.3	30
	RPL	37	-		RPL	35	-

IV. 결 론

본 논문에서는 장거리 전송을 위한 서브 테라헤르츠 고이득 안테나를 설계, 제작하고 측정하였다. 도로환경 무선 백홀 환경 시스템에 이동체에 탑재하기에 적합한 형태의 3종의 안테나를 제작하여 그 가능성을 확인하였다. 서브 테라헤르츠 안테나의 성능을 측정할 수 있는 측정환경을 구성하여 수신파워레벨과 방사패턴을 측정하였으며, 시뮬레이션 결과와 비교하여 무반사 챔버를 활용하지 않고도 신뢰할 수 있는 측정결과를 도출하였다. 향후 제안된 안테나를 활용하여 실제 이동체에 탑재하여 도로 환경에서의 무선백홀 성능시험에 기여할 것이라 사료된다.

References

- [1] S. Osborne, S. O'Brien, E. P. O'Reilly, P. G. Huggard, and B. N. Ellison, "Generation of CW 0.5 THz radiation by photomixing the output of a two-colour 1.49 μ m fabry-perot diode laser," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 4, pp. 296-298, Feb. 2008.
- [2] A. Wakatsuki, Y. Muramoto, and T. Ishibashi, "Development of terahertz-wave photomixer module using a uni-traveling carrier photodiode," *NTT Technical Review*, vol. 10, no. 2, pp. 1-7, 2012.
- [3] A. Hirata, T. Kosugi, H. Takahashi, J. Takeuchi, K. Murata, and N. Kukutsu, et al., "5.8-km 10-Gbps data transmission over a 120-GHz-band wireless link," in *2010 IEEE International Conference on Wireless Information Technology and Systems*, Honolulu, HI, 2010, pp. 1-4.
- [4] S. Koenig, D. Lopez-Diaz, J. Antes, F. Boes, R. Henneberger, and A. Leuther, et al., "Wireless sub-THz communication system with high data rate," *Nature Photonics*, vol. 7, no. 12, pp. 977-981, 2013.
- [5] T. Nagatsuma, K. Oogimoto, Y. Yasuda, Y. Fujita, Y. Inubushi, and S. Hisatake, et al., "300-GHz band wireless transmission at 50 Gbit/s over 100 meters," in *2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Copenhagen, Denmark, 2016, pp. 1-2.
- [6] I. Kallfass, F. Boes, T. Messinger, J. Antes, A. Inam, and U. Lewark, et al., "64 Gbit/s transmission over 850 m fixed wireless link at 240 GHz carrier frequency," *Journal of Infrared Millimeter Terahertz Waves*, vol. 36, no. 2, pp. 221-233, 2015.
- [7] I. Dan, G. Ducournau, S. Hisatake, P. Szriftgiser, R. P. Braun, and I. Kallfass, "A terahertz wireless communication link using a superheterodyne approach," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 32-43, Jan. 2020.
- [8] J. N. Lee, Y. K. Cho, J. H. Jung, and S. B. Hyun, "High-gain sub-terahertz lens horn antenna with a metal guide," *Electronics Letters*, vol. 56, no. 14, pp. 689-691, Jul. 2020.
- [9] J. H. Jung, M. D. Kim, J. N. Lee, Y. K. Cho, K. S. Kim, and H. K. Kwon, et al., "Wireless communication system on very high frequency," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 34, no. 6, pp. 28-41, 2019.
- [10] M. K. Al-Nuaimi, W. Hong, and Y. Zhang, "Design of high-directivity compact size conical horn lens antenna," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 467-470, 2014.
- [11] W. Pan, C. Huang, P. Chen, M. Pu, X. Ma, and X. Luo, "A beam steering horn antenna using active frequency selective surface," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 12, pp. 6218-6223, 2013.
- [12] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, 4th ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2016.
- [13] C. Granet, "Designing axially symmetric Cassegrain or Gregorian dual-reflector antenna from combinations of prescribed geometric parameters," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 76-82, Apr. 1998.
- [14] Virginia Diodes, *Spectrum/Signal Analyser Extension Modules: Operational Manual*, Charlottesville, VA, Rev. 30, 2019.
- [15] Antenal, "Standard gain horn," 2020. Available: <https://antenal.com/products/horn-antennas/standard-gain-horns-sgh/>

이 정 남 [한국전자통신연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2058-5048>



2004년 2월: 한밭대학교 정보통신공학과 (공학사)
2006년 2월: 한밭대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2010년 8월: 한밭대학교 전자공학과 (공학박사)
2011년 11월~현재: 한국전자통신연구원

선임연구원

[주 관심분야] THz, mmWave, UWB, Base Station Antennas

현 석 봉 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1001-4150>



1991년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학사)
1993년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학석사)
1998년 2월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)
1999년 7월~현재: 한국전자통신연구원

책임연구원

[주 관심분야] Wireless Communications, RFIC, Phased Array System, Radar

김 광 선 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4069-2374>



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원 책임연구원

[주 관심분야] Wireless Communications,

THz/mmWave RF Systems, Antenna Array System

조 영 균 [공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-7803-3417>



2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2003년 2월: POSTECH 전자공학과 (공학석사)
2019년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
2003년 3월~2020년 8월: 한국전자통신연구원 책임연구원

2020년 9월~현재: 공주대학교 전기전자제어공학부 교수

[주 관심분야] Analog & RF IC & Components

정 재 호 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7270-032X>



1994년 2월: 경북대학교 재료공학과 (공학사)
1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2004년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
2000년 4월~현재: 한국전자통신연구원

책임연구원

[주 관심분야] Wireless Communications, Radar Signal Processing, RF Circuits & Systems