

# 단일 RF 채널 기반 60 GHz 대역 광각 및 고이득 End-Fire 안테나 설계

## Wide-Beam and High-Gain End-Fire Antenna Design for the 60 GHz Band with a Single RF Channel

한 성 준 · 박 건 · 홍 원 빈

Sungjun Han · Geon Park · Wonbin Hong

### 요 약

본 논문에서는  $0.05 \lambda_0$ 의 얇은 기판 구조와 단일 RF 체인을 특징으로 하는 60 GHz 비면허 주파수 대역 고이득·광각 안테나를 제안한다. 제안한 안테나는 최대 7.8 dBi의 이득과  $129^\circ$ 의 넓은 빔폭을 달성하며, 57~64 GHz 대역 전반에서 안정적인 이득과 광각 특성을 유지한다. 이러한 성능은 디렉터 소자(supporting directors)와 유도벽(guiding wall)을 적용하여 추가 전계를 유도하고 방사 특성을 구조적으로 안정화한 데에 기인하며, 그 결과 단순한 형태에서도 우수한 성능을 확보한다. 제안한 안테나는 단거리 밀리미터파(millimeter-wave) 환경에서 정렬 오차에 따른 통신 음영 지역을 효과적으로 제거하며, 소형화와 에너지 효율성이 요구되는 차세대 무선 통신 시스템 구현에 기여할 수 있음을 보여준다.

### Abstract

This paper presents a high-gain, wide-beamwidth planar antenna on a thin substrate for the unlicensed 60 GHz band, with a substrate thickness of  $0.05 \lambda_0$  and a single RF chain. The proposed antenna achieved a peak gain of 7.8 dBi and beamwidth of  $129^\circ$  while maintaining a stable gain and wide angular coverage across 57~64 GHz. These results were enabled by the incorporation of supporting directors and a guiding wall that induced additional fields and structurally stabilized the radiation characteristics, thereby ensuring a robust performance with a simple configuration. The proposed antenna effectively mitigated communication blind spots caused by misalignment in short-range millimeter-wave scenarios and demonstrated a strong potential for compact and energy-efficient next-generation wireless communication systems.

Key words: Antenna Module Integration, High Gain Antenna, Planar Wide-Beam Antenna, Single RF Chain, Unlicensed 60 GHz Band

### I. 서 론

최근 60 GHz가 포함된 V-대역은 비면허 주파수 대역

으로 자유롭게 사용할 수 있어 그 중요성이 더욱 부각되고 있다<sup>[1]</sup>. 또한 이 대역은 파장이 짧아 고속 데이터 전송과 광대역 특성을 제공하여 단거리 고속 무선 통신에 적

「본 연구는 국방기술진흥연구소(KRIT)의 지원을 받아 방위사업청(DAPA)에서 추진하는 과제 “개인전투체계용 증강현실기반 지능형 화기조준 기술(2022-2025)”의 일환으로 수행되었습니다(과제번호: KRIT-CT-22-019).」

포항공과대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pohang University of Science and Technology[POSTECH])

· Manuscript received October 2, 2025 ; Revised October 19, 2025 ; Accepted December 2, 2025. (ID No. 20251002-117)

· Corresponding Author: Wonbin Hong (e-mail: whong@postech.ac.kr)

합하나<sup>[2]</sup>, 동시에 경로 손실(path loss)<sup>[3]</sup>과 대기 중 산소 흡수로 인한 신호 감쇠라는 제약을 수반한다<sup>[4]</sup>. 이를 보완하기 위하여 mmWave(millimeter-wave) 시스템에서는 배열 안테나와 빔포밍 기법을 적용하여 높은 이득과 광각 특성을 구현한다<sup>[5]</sup>. 이러한 기술은 5G 시스템에서 지향성 통신과 무선 링크 품질 향상에 기여하지만, 고비용·복잡한 구조 및 대형 RF 프런트엔드로 인해 다중 연결성과 빔포밍 요구를 충족하는 데 한계가 있으며<sup>[6]</sup>, 채널 수 증가로 인한 전력 소모 또한 소형·경량 단말기에 불리하게 작용한다<sup>[7]</sup>.

이와 같은 한계를 극복하기 위하여 시스템 복잡성·비용·전력 소모를 줄일 수 있는 단일 채널 기반 광각 및 고이득 안테나에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[8-11]</sup>. 하지만, 참고문헌 [8]은 최대 140°의 광각 특성을 확보하였으나 이득이 최대 4.5 dBi 수준에 머물렀으며, 참고문헌 [9]는 반전력 빔폭의 편차가 크다. 또한 일부 연구는 동작 대역폭이 7.6 % 이하로 협소하거나<sup>[10],[11]</sup>, 안테나의 기판이  $0.26 \lambda_0$ 로 두껍다는 문제를 보였다<sup>[12]</sup>. 이는 넓은 빔폭, 높은 이득, 안정적인 주파수 특성과 얇은 기판 구조를 동시에 충족하기 어려움을 의미한다.

본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위하여, 단일 채널 기반으로 고이득과 광각 특성을 동시에 구현하며 높은 신호 감쇠 환경에서 배열 안테나를 대체할 수 있는 안테나를 제안한다. 제안한 안테나는 얇은 기판 구조로 설계되어 그림 1과 같이 휴대형 및 집적 환경에 적합하고, 디렉터 소자(supporting directors)와 유도벽(guiding wall)을 통해 안정적인 방사 특성을 확보한다. 이를 통해 송·수신

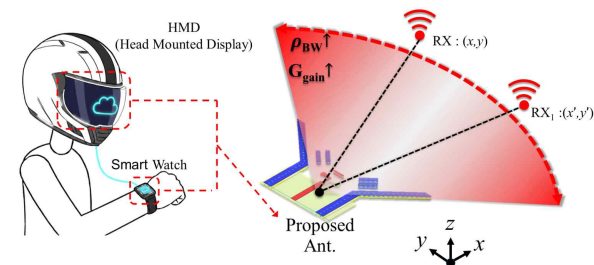


그림 1. 제안한 고이득·광각 안테나의 활용 예시  
Fig. 1. Application scenario of the proposed wide beam-width, high gain antenna.

안테나 간 정렬 오차가 발생하더라도 우수한 통신 품질을 제공하며, 동작 대역 전반에서 이득과 반전력 빔폭의 편차가 작아 신뢰성 있는 성능을 유지할 수 있을 것으로 기대된다.

## II. 안테나 구조 및 분석

그림 2는 제안한 60 GHz 대역 고이득 및 광각 안테나의 구조를 나타낸다. 안테나는 낮은 손실 특성을 지닌 Taconic RF-35 기판( $\epsilon_r=3.5$ ,  $\tan\delta=0.002$ , 두께 8 mil)을 사용하여 구현되었다. 평면 금속 구조는 두께 18  $\mu\text{m}$ 의 구리로 형성되었으며, 상·하부 금속의 일부는 비아(via)를 통해 전기적으로 연결되었다.

설계 과정은 그림 3과 같이 총 세 단계로 구성된다. Design A는 전형적인 다이폴(dipole)과 디렉터(director)로 이루어진 평면형 야기-우다 안테나를 기반으로 설계되었다. 이 구조는 구동 소자가 자체적으로 비대칭-대칭 변환

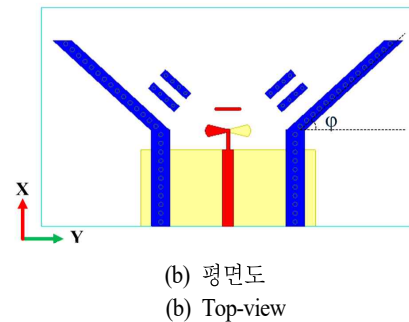
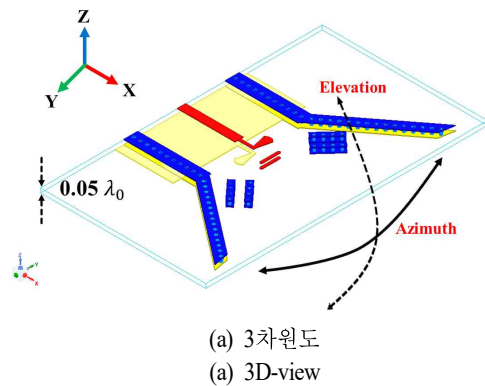


그림 2. 제안한 안테나의 전체 구조  
Fig. 2. Overall structure of the proposed antenna (design parameters:  $\phi=45^\circ$ ).

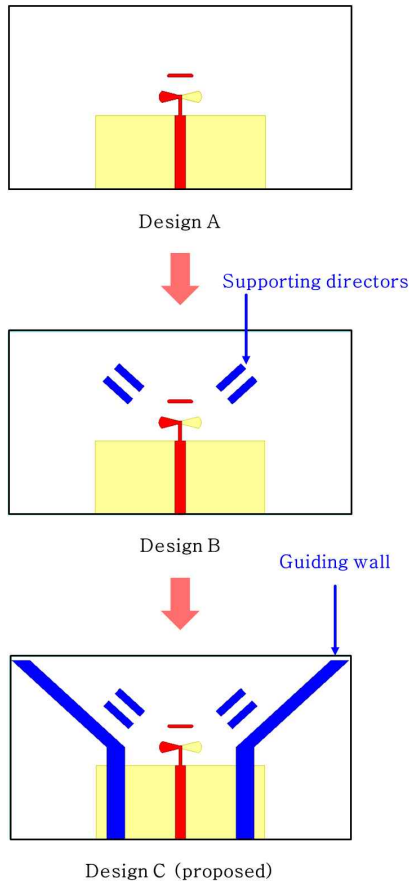


그림 3. 제안한 안테나의 발전 과정  
Fig. 3. Evolution of the proposed antenna.

을 수행하므로 추가적인 발룬이 요구되지 않는다. 또한, 그림 4와 같이 약 60°의 반전력 빔폭과 8.5 dBi의 최대 이득을 보인다.

빔폭을 확대하기 위해 Design B에서는 반파장 길이의 디렉터 소자(supporting directors)를 추가하였다. 이 구조를 추가함으로써 그림 5에서 확인할 수 있듯이 반전력 빔폭이 약 40° 확대되었다. 이러한 현상은 디렉터 소자 간의 상호 결합(mutual coupling)과 추가적인 가장자리 전계(fringing field)에 기인한다. 이 효과는 그림 6과 같이 두 디렉터 소자 간의 간격(Sub<sub>D</sub>)을 조정하여 검증하였다. 시뮬레이션 결과, Sub<sub>D</sub>가 커질 경우, 디렉터 소자 간의 상호 결합이 줄어 빔폭 증가폭이 감소함을 확인하였다. 또한 본 구조는 57~64 GHz 동작 대역에서 추가 전후를 비교했을 때 최대 약 40°, 최소 약 10°의 빔폭 증가를 제공하지만, 여전히 동작

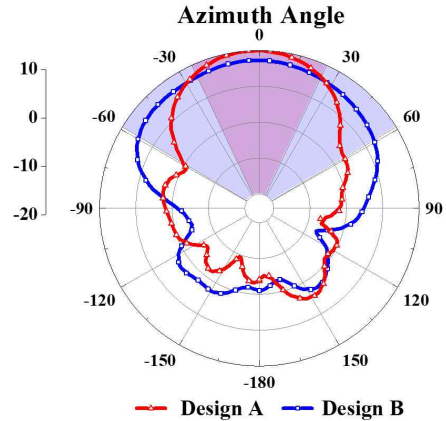


그림 4. 60 GHz azimuth 평면에서 Design A와 B의 방사 패턴

Fig. 4. Simulated radiation patterns of Designs A and B at 60 GHz in the azimuth plane.

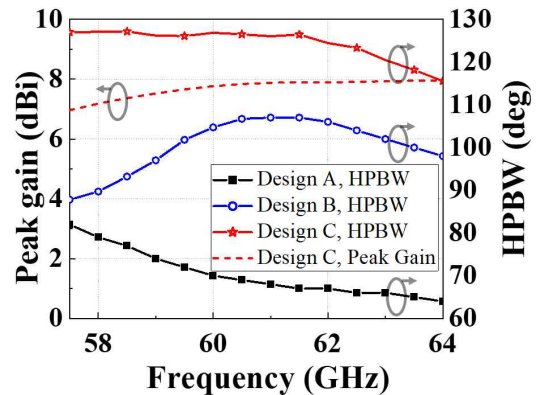


그림 5. Design A~C의 반전력 빔폭(HPBW)과 Design C의 최대 이득

Fig. 5. Simulated half-power beamwidths for Designs A~C, along with the peak gain of Design C.

대역 내에서 빔폭 변동이 크게 나타난다. 이는 주파수에 따라 변하는 파장으로 인해 전계 분포가 달라지기 때문이다.

Design C에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 유도벽(guiding wall)을 도입하였다. 유도벽은 그림 7과 같이 가장자리 전계를 물리적으로 제한하여 전계 분포를 안정화하고 전자기 에너지를 주 방사 방향으로 유도한다. 이를 검증하기 위해 유도벽 각도  $\phi$ 를 매개변수로 하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 그림 8(a)에 나타난 바와 같이  $\phi$ 가 감소할수록 낮은 주파수 구간에서 빔폭 변동이 크게 나

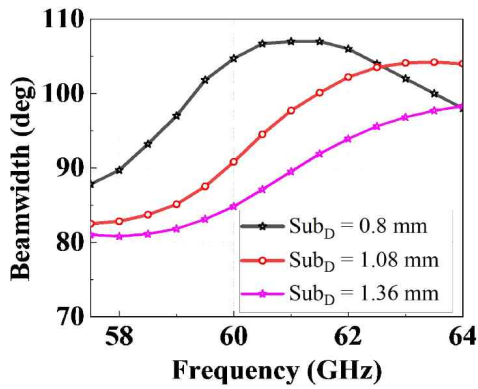
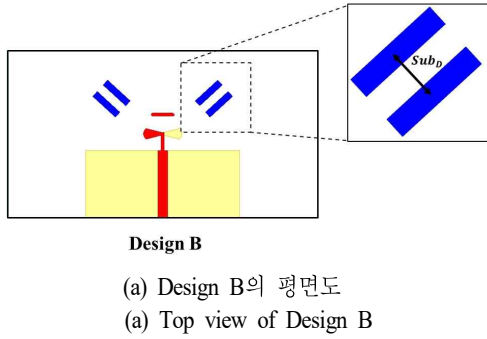


그림 6. Design B의 구조와  $Sub_D$  변화에 따른 반전력 빔폭(HPBW) 시뮬레이션 결과  
 Fig. 6. Simulated half-power beamwidths (HPBWs) for different  $Sub_D$  values.

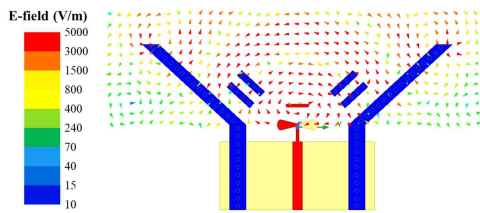
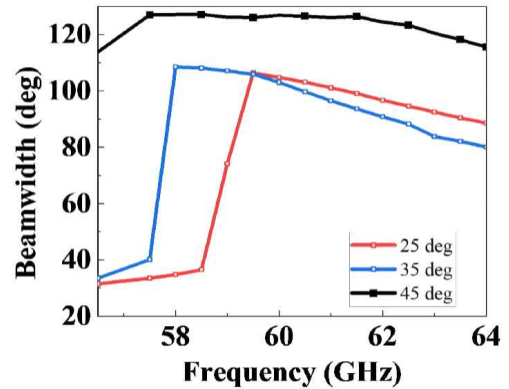
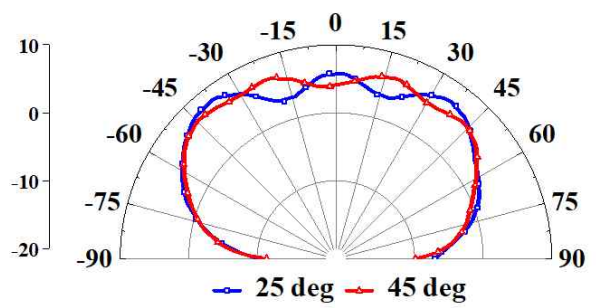


그림 7. 제안한 안테나(Design C)의 60 GHz에서의 전기장 분포  
 Fig. 7. E-field distribution of the proposed antenna (Design C) at 60 GHz.

타난다. 그림 8(b)에 따르면,  $\phi=25^\circ$ 일 때 전계가 가장자리로 확산되어 주엽이 양측으로 분리되며,  $\pm 40^\circ$  부근에 약 8 dBi의 최대 이득이 관찰된다. 그러나  $12^\circ \sim 25^\circ$  구간에



(a)  $\phi$ 에 따른 빔폭 변화  
 (a) Beamwidth variation as a function of  $\phi$



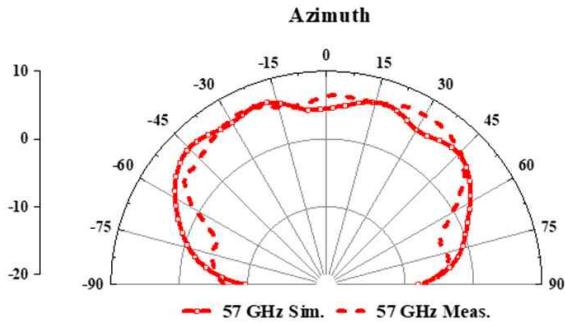
(b)  $\phi=25^\circ$  및  $45^\circ$ 에서의 방사 패턴  
 (b) Radiation patterns at  $\phi=25^\circ$  and  $45^\circ$

그림 8. 유도벽(guiding wall) 각도  $\phi$ 에 따른 빔폭과 방사 패턴 특성  
 Fig. 8. Beamwidth and radiation patterns with respect to the guiding wall angle  $\phi$ .

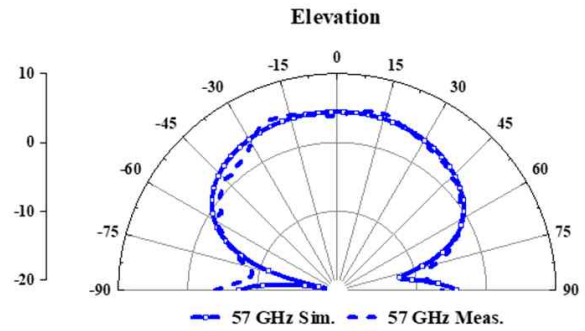
최소 2.8 dBi의 국부 null이 형성되어 반전력 빔폭이  $40^\circ$ 로 축소된다. 반면  $\phi=45^\circ$ 에서는 유도벽이 전계를 중앙으로 집중시켜 null이 제거되고 주엽이 정면 방향으로 재정렬된다. 이에 따라 반전력 빔폭은 약  $120^\circ$ 로 확장되며 최대 이득은 7.1 dBi로 나타난다. 결론적으로, 제안한 구조는  $115^\circ \sim 129^\circ$ 의 넓은 빔폭과 7~7.8 dBi의 높은 이득을 달성하며, 빔폭 및 이득의 변동을 최소화하여 전 대역에서 안정적인 동작을 가능하게 한다.

### III. 측 정

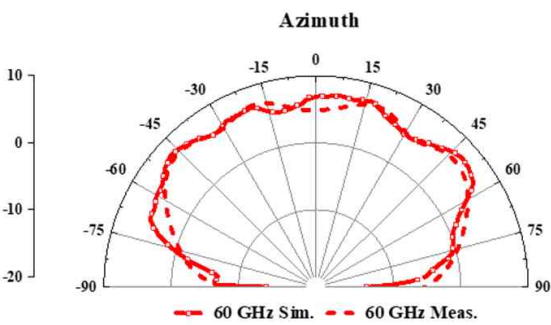
그림 9 및 그림 10은 제안한 안테나의 방위각(azimuth) 및 고도각(elevation) 평면에서의 방사 패턴과 이득의 측



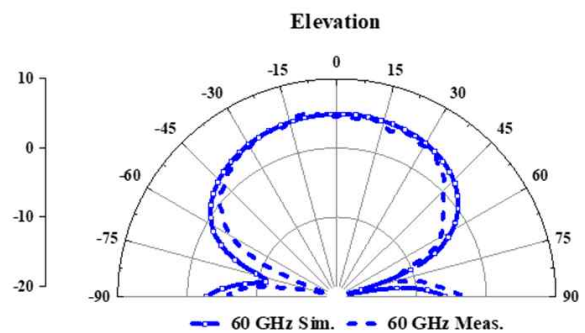
(a) 57 GHz



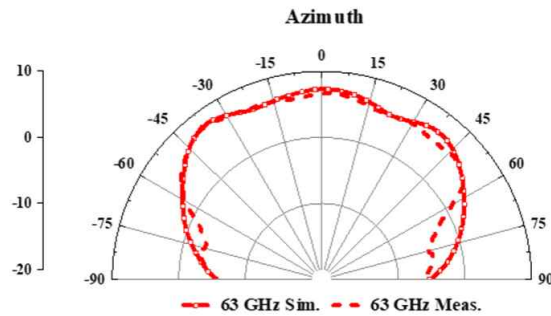
(a) 57 GHz



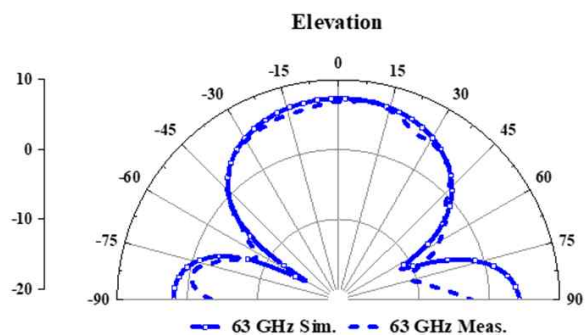
(b) 60 GHz



(b) 60 GHz



(c) 63 GHz



(c) 63 GHz

그림 9. 제안한 안테나의 azimuth 평면에서의 시뮬레이션 및 측정 결과 비교

Fig. 9. Comparison of simulated and measured results of the proposed antenna in the azimuth plane.

정값과 시뮬레이션 결과를 비교하여 제시한다. 측정은 실제 활용을 고려하여 57, 60, 63 GHz에서 수행하였으며, 60 GHz의 경우 방위각 평면과 고도각 평면의 반전력 빉폭은 각각 129°와 90°로 나타난다. 또한 최대 이득은 7.8 dBi이며, 동작 주파수 대역 전반에서 측정값과 시뮬레이션 결과가 높은 일치성을 보인다. 아울러 그림 11은 제작한 고

그림 10. 제안한 안테나의 elevation 평면에서의 시뮬레이션 및 측정 결과 비교

Fig. 10. Comparison of simulated and measured results of the proposed antenna in the elevation plane.

이득·광각 안테나 시제품의 S-파라미터에 대한 시뮬레이션과 측정값을 비교한 결과를 제시한다. 측정 결과 -10 dB 임피던스 대역폭 기준 동작 주파수 범위는 58.6~65.2 GHz로 확인된다. 시뮬레이션과 측정 간 차이는 제작 공정 오차와 기생 성분에 기인하는 것으로 판단된다.

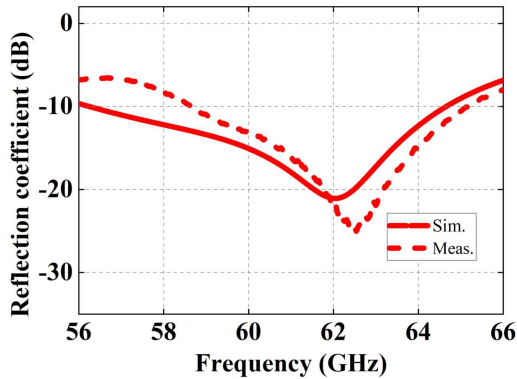
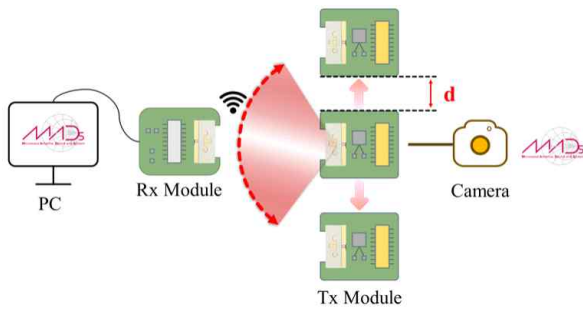
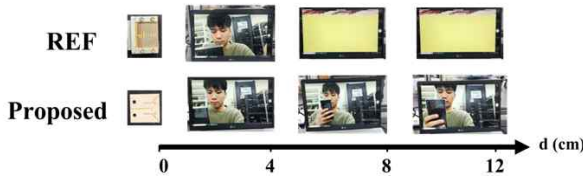


그림 11. 제안한 안테나의  $S_{11}$  특성 시뮬레이션 결과와 측정 결과 비교

Fig. 11. Comparison of simulated and measured  $S_{11}$  results of the proposed antenna.



(a) 정렬 오차(misalignment) 조건의 안테나 송수신 시나리오 실험 구성  
(a) Experimental setup for the antenna transmit-receive scenario with misalignment



(b) 정렬 오차 거리  $d$  변화에 따른 비교군(Yagi-Uda)과 제안 안테나의 영상 데이터 전송 결과  
(b) Video transmission results of the reference Yagi-Uda antenna and the proposed antenna as the misalignment distanced  $d$  varies

그림 12. 정렬 오차 조건에서의 송수신 실험 구성과 영상 데이터 전송 결과

Fig. 12. Experimental configuration and video transmission results under alignment error.

추가로, 제안한 광각 및 고이득 안테나 특성의 통신 음영 지역 완화 기여 여부를 검증하기 위하여 그림 12(a)와 같은 실험을 수행하였다. 실험은 카메라와 안테나가 부착된 송신 모듈(Tx)에서 영상을 송출하고, 수신 모듈(Rx)으로 수신한 영상을 PC 화면으로 확인하는 방식으로 진행되었다. 정렬 오차(misalignment)는 송·수신 안테나 간 중심축의 불일치를 의미하며, 본 연구에서는 두 안테나 중심축 사이의 횡방향 변위를 정렬 오차 거리  $d$ 로 정의하고 실험 과정에서 의도적으로 부여하여 영상 데이터 전송 성능을 평가하였다. 또한, 비교 대상으로 8.5 dBi의 최대 이득과  $72^\circ$ 의 HPBW를 갖는 야기-우다 안테나를 사용하였으며, 전송 거리는 영상 품질의 유의미한 차이가 관찰되지 않는 1 m 이내로 고정하였다. 그림 12(b)에 따르면, 야기-우다 안테나는 정렬 오차 거리가 증가할수록 데이터 전송률이 급격히 저하된다. 반면 제안한 안테나는 넓은 빔 커버리지와 높은 이득 특성으로 인해 최대 약 3배의 정렬 오차 조건에서도 안정적인 통신 성능을 유지한다.

표 1은 제안한 안테나와 선행 연구들의 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 비교의 명확성을 위해 성능지수(FoM)로서 식 (1) 및 식 (2)와 같이 정의한 FoM1과 FoM2를 도입하였다.

$$FoM1 = \frac{Peak\ Gain \times Peak\ HPBW}{100} \quad (1)$$

$$FoM2 = \frac{FBW}{Antenna\ Height \times 10} \quad (2)$$

최근 보고된 선행 연구들과 비교해, 제안한 안테나는 광각 및 고이득 특성을 동시에 달성할 뿐만 아니라, 안테

표 1. 선행 연구와의 비교

Table 1. Comparison of the previously reported work.

Ref.	Freq. (GHz)	Gain (dBi)	HPBW ( $^\circ$ )	Antenna height ( $\lambda_0$ )	FoM 1	FoM 2
[8]	24.6~39.7	2.1~4.5	140	N/A	6.3	N/A
[9]	1.18~1.58	6.46~7.13	70~109	0.197	7.77	14.72
[10]	2.39~2.49	6.3	100	0.07	6.3	5.85
[12]	60~75	8~10	70	0.255	7.0	8.71
This work	57~64	7~7.8	120~129	0.05	10.6	23.1

나 높이와 중심주파수 비대역폭(FBW)에서도 성능적 우위를 보인다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는  $0.05 \lambda_0$ 의 얇은 기판 구조와 단일 RF 체인을 특징으로 하는 60 GHz 대역 고이득·광각 안테나를 제안하고 이를 실험적으로 검증하였다. 제안한 구조는 최대 7.8 dBi의 이득과 방위각/고도각 기준  $129^\circ/90^\circ$ 의 반전력 빔폭을 달성하였으며, 57~64 GHz 대역 전반에서 안정적인 특성을 유지하였다. 또한 선행 연구 대비 넓은 빔폭과 높은 이득을 확보함으로써 통신 음영을 효과적으로 완화하는 성능을 보였으며, 실제 사용 환경을 모사한 실험을 통해 정렬 오차가 있는 상황에서도 안정적인 데이터 전송이 가능함을 입증하였다. 나아가, 본 연구를 이중편파 및 다중 대역 구조로 확장할 경우 활용도가 더욱 높아질 것으로 기대된다.

#### References

[1] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 3, pp. 366-385, Mar. 2014.

[2] S. Seo, Y. Lee, and H. Shin, "Design of a 60 GHz GaAs enhancement-mode pHEMT power amplifier MMIC with 28 dBm output power," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 2, pp. 116-129, Feb. 2023.

[3] H. T. Friis, "A note on a simple transmission formula," *Proceedings of the IRE*, vol. 34, no. 5, pp. 254-256, May 1946.

[4] M. Adnan, T. Jeong, J. Park, and K. C. Hwang, "SIW-based cavity-backed elliptical slot  $2 \times 2$  antenna array for two-channel mm-Wave in-band full-duplex communication," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 3, pp.

313-316, Mar. 2025.

[5] I. J. Hwang, J. G. Baek, J. Kim, J. I. Park, D. C. Kim, and H. Chae, et al., "Millimeter-wave far-field range antenna measurement system for a W-band monopulse antenna," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 5, pp. 494-503, Sept. 2024.

[6] A. S. Y. Poon, M. Taghivand, "Supporting and enabling circuits for antenna arrays in wireless communications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2207-2218, Jul. 2012.

[7] X. Gao, L. Dai, S. Han, C. L. I, and R. W. Heath, "Energy-efficient hybrid analog and digital precoding for mmWave MIMO systems with large antenna arrays," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 998-1009, Apr. 2016.

[8] J. Kim, S. U. Oh, and T. H. Jang, "Wide beamwidth and miniaturized millimeter-wave endfire angled ME dipole antenna with extended ground," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 23, no. 3, pp. 965-969, Mar. 2024.

[9] D. Kim, Y. Song, H. Moon, S. Kim, J. Shin, and G. Lee, et al., "Design of L-band planar dipole antenna and structures for enhanced front-to-back ratio and half-power beamwidth," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 6, pp. 548-559, Jun. 2025.

[10] Z. Liu, Y. He, and Y. Li, "Beamwidth enhancement of microstrip antennas using capacitive via-fence loading," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 4, pp. 151-158, Jan. 2023.

[11] S. J. Sun, Y. C. Jiao, and Z. Weng, "Wide-beam dielectric resonator antenna with attached higher-permittivity dielectric slabs," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 3, pp. 462-466, Mar. 2020.

[12] L. Chi, Z. Weng, Y. Qi, and J. L. Drewniak, "A 60 GHz PCB wideband antenna-in-package for 5G/6G applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1968-1972, Nov. 2020.

한 성 준 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0007-2280-2628>



2024년 8월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)

2024년 9월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] Wide-Beam Antenna, Wide-Beam Coverage, Single-RF Chain, Millimeter-Wave (mmWave) Wireless Systems

홍 원 빈 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0224-7280>



2004년: Purdue University 전자공학과 (공학사)

2005년: University of Michigan 전자공학과 (공학석사)

2009년: University of Michigan 전자공학과 (공학박사)

2009년~2014년: 삼성전자 책임연구원

2014년~2016년: 삼성전자 수석연구원

2016년 2월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] Antenna Array, Radiation Pattern, Reconfigurable Intelligent Surface, Antenna-on-Display

박 건 [포항공과대학교/석사]

<https://orcid.org/0009-0005-6250-3281>



2022년 2월: 중앙대학교 전자공학과 (공학사)

2025년 2월: 포항공과대학교 전자공학과 (공학석사)

[주 관심분야] Filtering Antennas, mmWave Antennas, Wide-Beam Antenna, Wide-Beam Coverage, Single-RF Chain