

다중 빔 및 다중 편파 특성을 갖는 렌즈 안테나 설계

Designing a Lens Antenna with Multiple Beams and Multiple Polarization Characteristics

장성익¹ · 채수창^{2*} · 장은성³ · 최승혁⁴ · 박재우⁵ · 김정욱⁶Sung-Ik Jang¹ · Soo-Chang Chae^{2*} · EunSung Jang³ · Seung-hyuk Choi⁴ · Jae-Woo Park⁵ · Jeong-Wook Kim⁶

요 약

본 논문에서는 다중 빔 및 다중 편파 특성을 갖는 고이득 렌즈 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 렌즈를 활용해 높은 안테나 이득을 달성하였다. 두 개의 직교 슬롯과 적절한 위상차 설계로 서로 다른 방향으로 빔을 형성하며, 동시에 다양한 편파 특성 (수직 편파 [H-pol], 수평 편파 [V-Pol], 좌원 편파 [LHCP])을 구현하였다. 제안된 안테나는 능동 소자 없이 간단한 구조로도 다중 편파를 구현하고 다양한 방향으로 동시에 방사할 수 있도록 설계하여 다중 빔 커버리지와 다중 편파가 요구되는 무선 통신 환경에서 활용 가능하다.

Abstract

This study proposed a high-gain lens antenna with multiple beams and multiple polarization characteristics. The proposed antenna achieved a high gain using a lens structure. Using two orthogonal slots with an appropriate phase difference design, the antenna formed beams in different directions while simultaneously implementing various polarization characteristics (horizontal, vertical, and left-hand circular polarizations). Without requiring active components, the proposed antenna enabled multiple polarizations and simultaneous radiation in multiple directions with a simple structure, making it suitable for wireless communication applications that require multiple beam coverages and polarization diversity.

Key words: Multiple Beam and Multiple Polarization Antenna, High Gain Lens Antenna

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템에서는 단일 안테나로 다중 방향 통신이 가능한 다중 빔 및 다중 편파 안테나 기술이

주목받고 있다. 특히 서로 다른 방향으로 서로 다른 편파의 빔을 동시에 방사할 수 있는 안테나는 하나의 하드웨어로 다중 사용자와의 동시 통신을 가능하게 하여 시스템 효율성을 크게 향상시킨다^[1].

†이 논문은 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00446223, 신호처리 알고리즘 및 재구성 가능한 ASIC 개발).

아주대학교 AI융합네트워크학과(Department of Artificial Intelligence Convergence Network, Ajou University)

*한국전자기술연구원 ICT 디바이스 패키징 연구센터(ICT Device Packaging Research Center, Korea Electronics Technology Institute)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0004-8948-1716>), 2: 선임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-8279-9439>), 3: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0001-4969-2939>),

4: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0005-3944-8122>), 5: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0003-1829-9071>), 6: 조교수(<https://orcid.org/0000-0001-7401-2977>)

• Manuscript received September 4, 2025 ; Revised September 28, 2025 ; Accepted October 14, 2025. (ID No. 20250904-089)

• Corresponding Author: Jeong-Wook Kim (jeongwookkim@ajou.ac.kr)

기존의 다중 편파 안테나는 시간에 따라 편파를 전환하여 재구성하는 방식을 사용하곤 했으나, 공간적으로 서로 다른 편파를 동시에 방사하는 기술은 무선 통신의 용량과 커버리지를 효과적으로 개선할 수 있다. 예를 들어, 좌측 방향으로의 수평 편파, 중앙으로는 원형 편파, 우측으로는 수직 편파를 동시에 방사하면 각 방향의 사용자와 독립적인 통신 채널을 형성할 수 있다^[2].

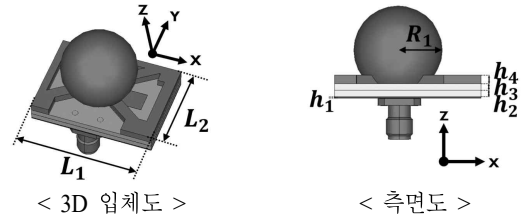
이러한 고정 방향 다중 빔 및 다중 편파 안테나는 특정 응용 분야에서 효과적이다. 로비의 좌우 방향과 중앙에 위치한 사용자에게 서로 다른 편파로 동시 서비스를 제공하거나, 전시장과 같은 대형 공간에서 섹터별로 다른 편파를 활용하여 고정된 커버리지를 제공하는 고정 무선 액세스 시스템에 활용 가능하다. 이처럼 공간 다중화를 통해 주파수 효율을 높여 우수한 통신 성능을 보이며 복잡한 구조를 갖는 실내 환경에서도 활용 가능하다^[3].

또한 능동 소자가 없는 단일 안테나의 간단한 구조로 설계되어 하드웨어 복잡도를 크게 줄일 수 있다.

렌즈를 활용한 빔 형성 기술은 이러한 다중 빔 안테나 구현에 효과적이다. 렌즈의 빔 집속 효과를 이용하면 슬롯 급전 방식과 결합하여 특정 방향 정확하게, 높은 이득의 서로 다른 편파의 빔을 방사할 수 있게 된다^[4].

II. 안테나 구조 및 설계

그림 1(a)와 같이 안테나는 1개의 급전층과 2개의 패치 층 그리고 최상단의 렌즈 층으로 구성된 4층 구조를 가진다. 모든 기판들의 가로, 세로 길이는 34.0×24.5 mm이며, 급전층은 Astra MT77 기판(유전 상수=3.0, $\tan\delta=0.0017$, 두께=0.254 mm)을, 상부 패치층들은 Rogers AD300D 기판(유전 상수=2.94, $\tan\delta=0.0021$, 두께=1.52 mm)을, 렌즈는 3D 프린팅 기술을 활용하여 제작되었으며, Preperm (TM) ABS300 filament(유전 상수=3, $\tan\delta=0.018$)을 사용하여, 유전 상수는 3으로 패치층과 유사한 값을 사용하고 패치층과 에어갭 없이 부착되어 급격한 유전을 변화 없이 전파가 효과적으로 전달되도록 했으며, 필라멘트는 안정적인 유전 특성과 기계적 강도를 제공하는 재료를 사용하였다. 손실은 다소 높지만, 그림 2를 통해 렌즈의 빔 집속 효과로 손실을 충분히 상쇄함을 보여주며 실제 동작 대역에

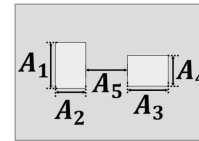


< 3D 입체도 >

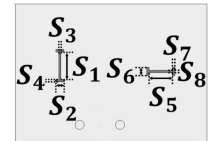
< 측면도 >

(a) 적층형 패치 안테나 구조

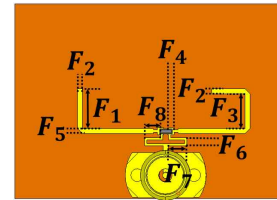
(a) Stacked patch antenna structure



< 3층, 2층 패치층 상단 >



< 접지판(슬롯) >



< 1층 급전층 하단 >

(b) 각 층의 상세 구조

(b) Detailed structure of each layer

그림 1. 제안된 안테나 구조

Fig. 1. Configuration of proposed antenna.

서 방사 효율은 -1 dB 정도로 충분한 방사 성능을 확보하였다.

그림 2는 렌즈층의 유무에 따른 비교, 그림 3은 적층 구조의 유무에 따른 비교 그래프로, 렌즈층과 적층 구조로 인해 동작 대역에서 안테나 이득이 향상됨을 보였다.

그러나 9.5 GHz 부근에서 렌즈 층과 적층 구조로 구성된 패치 층 사이의 다중 반사에 의한 상쇄 간섭으로 이득이 일시적으로 감소하는 현상이 관찰되었으나, 그럼에도

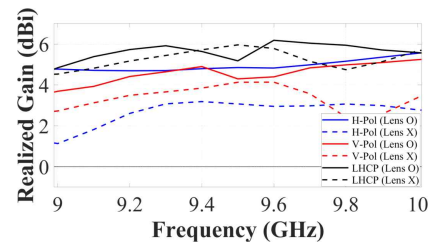


그림 2. 렌즈 유무에 따른 안테나 이득 변화

Fig. 2. Antenna gain with and without lens.

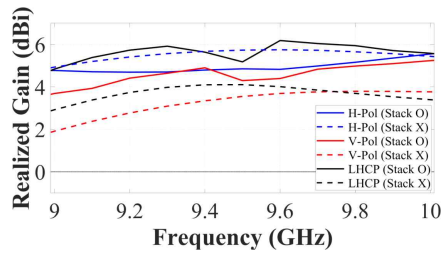


그림 3. 적층 구조에 따른 안테나 이득 변화
Fig. 3. Antenna gain variation with stacked structures.

표 1. 제안된 안테나 주요 설계 파라미터(단위: mm)
Table 1. Design parameter of a proposed antenna (Unit: mm).

A_1	8.28	A_2	5.52	A_3	7.35	A_4	5.49
A_5	7.57	S_1	4.92	S_2	1.40	S_3	0.42
S_4	0.44	S_5	4.12	S_6	1.50	S_7	0.44
S_8	0.42	F_1	5.00	F_2	0.60	F_3	4.40
F_4	0.80	F_5	0.60	F_6	0.97	F_7	2.33
F_8	2.00	h_1	0.254	h_2	1.52	h_3	1.524
h_4	2.00	R_1	10.5	L_1	34.0	L_2	24.5

LHCP 편파를 제외하고는 이득이 향상되었으며, LHCP 편파의 경우 감소가 되어도 다른 편파에 비해 충분히 높은 이득을 갖기에 유의미한 효과를 볼 수 있었다.

접지판의 두 슬롯은 X 축과 Y 축 방향으로 각각 배치되어, 단일 입력 포트에서 월킬슨 디바이더를 통해 동시에 급전되며, 이를 통해 방향별로 다른 편파를 방사한다.

표 1은 제안된 안테나의 주요 설계 파라미터를 나타낸다. A_1 부터 A_5 는 각 패치의 주요 변수를, S_1 부터 S_8 은 슬롯의 주요 변수를, F_1 부터 F_8 은 피드 라인의 주요 변수를, h_1 부터 h_4 는 각 기판의 높이를, R_1 은 렌즈의 반지름을, L_1 , L_2 는 기판들의 가로 및 세로 길이를 나타낸다.

III. 제작 및 측정 결과

제안된 안테나를 그림 4와 같이 제작하여 성능을 검증하였다. 그림 5(a)는 단일 입력 포트에서 월킬슨 디바이더를 통해 두 직교 슬롯을 동시에 급전하여 측정된 안테나의 반사계수 특성으로 개별 편파가 아닌 전체 안테나 시스템의 반사 계수를 나타낸다. 그래프에서 9.2 GHz와 11 GHz 부근에서 복수의

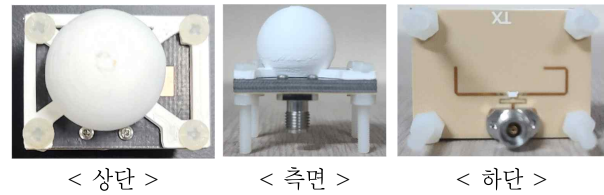
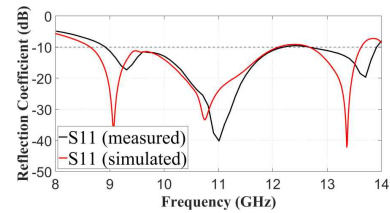
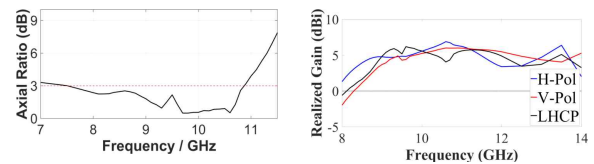


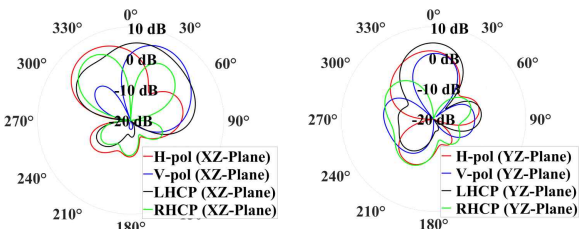
그림 4. 제작된 안테나의 모습
Fig. 4. Fabricated antenna.



(a) 반사 계수
(a) Reflection coefficient



(b) 축비 및 편파별 안테나 이득
(b) Axial ratio and antenna gain for each polarization



(c) 편파 별 안테나 방사 패턴
(c) Antenna radiation patterns for each polarization

그림 5. 제안된 안테나 성능 특성
Fig. 5. Proposed antenna performance characteristics.

공진점이 관찰되었다. 이는 좌우 패치 층의 가로, 세로 길이 차이로 서로 다른 주파수에서 공진이 발생한 것이며, 적층된 패치들 간의 상호 결합 효과로 광대역 특성을 달성하였다. -10 dB 이하를 만족하는 임피던스 대역폭은 시뮬레이션은 8.64~12.1 GHz(33.4 %), 측정값은 8.9~12.1 GHz(30.5 %)를 보였다.

그림 5(b)는 7.5 GHz부터 10.87 GHz까지 축비가 3 dB

표 2. 안테나 성능 비교 테이블

Table 2. Performance comparison of antennas.

Ref.	Width	Length	Height	Gain (dBi)	BW (%)	FoM
Pro.	H-Pol	0.98	0.71	0.63	6.9	227
	LHCP				6.2	204
	V-Pol				6	197
[2]	1.13	1.13	0.113	11	7.0	60.3
[5]	0.65	0.65	0.067	27	3.05	194
[6]	1.5	0.81	0.24	24	7.0	138
[7]	0.7	0.7	0.025	7.6	6.7	104

이하를 만족하기에 좌원 편파가 정상적으로 방사됨을 보이고 있으며, 편파별 안테나 이득 그래프를 통해 동작 주파수 대역에서 H-Pol은 최대 6.9 dBi, V-Pol은 6 dBi, LHCP는 6.2 dBi 안테나 이득을 갖는 것을 보인다.

그림 5(c)는 중심주파수에서 편파별 방사 패턴으로, 설계된 편파 특성에 부합하는 방사 패턴을 확인하였다.

표 2는 제안된 안테나와 다중 빔 및 다중 편파 특성을 가질 수 있는 편파 및 패턴 재구성 안테나들의 성능을 비교한 것이다. 공정한 비교를 위해 표의 수치들은 제안하는 안테나와 기존 논문들의 값 모두 동작 주파수 대역에서 최저 주파수의 파장(λ_0) 대비로 나타내었다.

제안된 안테나의 다중 편파 특성을 종합적으로 평가하기 위해 수직, 수평, 좌원 편파에 대한 성능을 제시하였으며, 모든 편파에서 3 dB 이하의 축비와 -10 dB를 기준으로 하는 임피던스 대역폭을 모두 만족하는 8.64~10.87 GHz(22.9 %)를 기반으로 FoM을 산출하였다.

FoM(figure of merit)은 제한된 면적에서의 안테나 성능 효율성을 평가하기 위해 직접 정의한 지표로 $FoM = (\text{대역폭} \times \text{이득}) / (\text{안테나 수평 면적})$ 으로 계산된다. 이는 단위 면적당 달성 가능한 대역폭과 이득의 곱을 나타내는 중요한 성능 파라미터이다.

제안된 안테나는 H-Pol에서 FoM 값이 227, LHCP에서 204, V-Pol에서 197로 가장 우수한 성능을 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다중 빔 및 다중 편파 특성을 갖는 렌즈 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 XZ 평면을 기준으로 좌, 중, 우 방향마다 각각 다른 편파가 동시에 방사되

도록 설계하였으며, 렌즈를 활용하여 동작 주파수 대역에서 높은 안테나 이득을 달성하였다. 또한 능동 소자를 사용하지 않는 간단한 구조로 다중 빔 및 다중 편파 특성을 구현하였으며, 기존 안테나들 대비 우수한 FoM을 보여 제약된 환경에서도 효율적으로 우수한 무선 통신 환경을 형성하는데 기여할 것으로 사료된다.

References

- [1] D. Martinez-De-Rioja, E. Martinez-De-Rioja, J. A. Encinar, R. Florencio, and G. Toso, "Reflectarray to generate four adjacent beams per feed for multispot satellite antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 2, pp. 1265-1269, Feb. 2019.
- [2] Z. Wang, S. Han, and Y. Dong, "Miniaturized quad-polarized pattern reconfigurable antenna for intelligent IoT applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 21, pp. 35361-35375, Nov. 2024.
- [3] P. Y. Qin, Y. J. Guo, and C. H. Liang, "Effect of antenna polarization diversity on MIMO system capacity," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 9, pp. 1092-1095, Nov. 2010.
- [4] C. Lee, K. H. Park, H. Kim, J. Lee, H. Kim, and K. H. Shin, et al., "Design of dual polarized FMCW radar system with high gain lens antenna for through-the-wall human detection," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 3590-3600, Dec. 2024.
- [5] L. Kang, H. Li, B. Tang, X. Wang, and J. Zhou, "Quad-polarization-reconfigurable antenna with a compact and switchable feed," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 548-552, Apr. 2021.
- [6] G. A. Ramirez, I. Zhou, S. Blanch, M. A. Towfiq, B. A. Cetiner, and J. Romeu, et al, "Reconfigurable dual-polarized beam-steering broadband antenna using a crossed-strips geometry," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1379-1383, Aug. 2021.
- [7] A. N'gom, A. Diallo, K. Talla, A. Chaibo, I. Dioum, and J. M. Ribero, et al., "A reconfigurable beam dual polarized microstrip cross patch antenna," in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation EUCAP*, Paris, Mar. 2017, pp. 3135-3139.