

mmWave 대역 통신을 위한 3D 인쇄된 역피라미드형 GRIN 렌즈와 통합된 고이득 패치 안테나 설계

Design of a High-Gain Patch Antenna Integrated with a 3D Printed Inverted Pyramidal GRIN Lens for mmWave Communications

조 정 아 · 하 노 겐* · 김 상 길*

Junga Jo · Nohgyeom Ha* · Sangkil Kim*

요 약

본 논문은 3D 인쇄 기술로 제작된 PLA 소재의 역피라미드 형태의 GRIN(graded index) 렌즈를 설계 및 제작하여 mmWave 대역 평면 패치 안테나와 통합하였다. 3D 인쇄 공정의 특징에 적합한 렌즈 구조를 설계하기 위해서 렌즈를 3차원 정육면체 구조의 복셀(Voxel)로 구분 지었다. 각 복셀은 PLA와 공기층의 부피 비율을 이용하여 필요한 유효 유전율을 구현하였고, 유효 유전율에 따른 굴절율 변화를 이용해 렌즈를 설계했다. 설계한 렌즈는 역피라미드 구조이며, 수직으로 5개 층을 가진다. 제작된 저비용 역피라미드형 GRIN 렌즈는 24~25 GHz 대역에서 동작하는 평면 패치 안테나의 이득을 3.8 dBi 증가시켰다.

Abstract

This paper presents the design and fabrication of an inverted pyramidal graded index (GRIN) lens made from polylactic acid (PLA) material using three-dimensional (3D) printing technology that was integrated with an mmWave-band planar patch antenna. To design a lens structure suitable for the characteristics of the 3D printing process, the lens was divided into 3D cubic voxels. Each voxel utilized the volume ratio of PLA to air to achieve the required effective permittivity, and the lens was designed using refractive index changes according to the effective permittivity. The designed lens had an inverted pyramidal structure and consisted of five vertical layers. The low-cost inverted pyramidal GRIN lens increased the gain of the planar patch antenna operating in the 24~25 GHz band by 3.8 dBi.

Key words: Luneburg Lens, Patch Antenna, mmWave, 3D Printing, High-Gain Antenna

I. 서 론

스마트폰의 보급과 인터넷 발달에 따른 정보의 홍수로

인해서 데이터 수요가 급증하였으며, sub-6 GHz 대역의 주파수를 주로 사용하는 상용 스펙트럼 대역은 포화상태에 이르렀다^[1]. B5G/6G와 같은 차세대 통신 기술의 핵심

「이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.」

한국항공우주산업주식회사(Korea Aerospace Industries, LTD)

*부산대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Pusan National University)

· Manuscript received November 30, 2023 ; Revised December 27, 2023 ; Accepted April 16, 2024. (ID No. 20231130-101)

· Corresponding Author: Sangkil Kim (e-mail: ksangkil3@pusan.ac.kr)

성능지표 중 하나인 초고속 데이터 송수신 속도 또한 넓은 통신 대역폭과 낮은 통신 지연 시간이 필요하다고 널리 알려져 있다^[2]. 이러한 사회적·기술적 요구에 대응하기 위해서 넓은 주파수 대역폭과 기존의 통신 속도를 획기적으로 개선할 수 있는 밀리미터파(mmWave) 대역을 활용하는 차세대 통신 기술의 중요성이 강한 주목을 받고 있다^[3]. mmWave 대역의 신호는 짧은 파장 길이 때문에 높은 경로 손실과 낮은 장애물 투과 특성이 있으며, 이로 인해서 통신 거리가 기존의 통신 기술보다 짧아지는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 높은 이득을 가지는 안테나와 빔조향 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[4]~[6]}.

여러 안테나 구조 중에서도 얇은 두께, 가벼운 무게, 그리고 시스템 통합의 용이성 측면에서 마이크로스트립 패치 안테나에 관한 연구가 많이 보고되었으며, mmWave 통신에 적합한 다양한 형태의 패치 안테나가 연구되고 있다. 얇은 두께로 고이득을 형성하는 특징으로 인해, 마이크로스트립 패치 안테나는 다양한 분야에서 널리 사용되었다^[7]. 차세대 mmWave 통신에서 요구하는 다양한 안테나 특성을 패치 안테나를 기반으로 구현하기 위해서 일반적으로 배열 안테나 기술을 사용한다. 특히나, 높은 이득과 빔 조향 성능을 구현하기 위해서 배열 안테나 기술을 많이 적용하는데, 기지국이나 중계기 사이의 통신과 같이 고정된 방향으로 통신할 때는 렌즈를 사용하여 안테나 이득을 증가시키는 것이 더욱 경제적으로 작용할 수 있다^[8].

본 논문에서는 고정된 방향의 통신 링크를 구성할 때 간편하게 적용할 수 있는 유전체 렌즈를 활용한 고이득 패치 안테나 설계를 제안한다. 마이크로파 대역에서의 유전체 렌즈는 일반적으로 매우 크고 무거운 부품이며, 일반적으로 마이크로파 대역에서 유전체 렌즈를 설계하기 위해서는 유효 유전율(ϵ_{eff}) 혹은 굴절률(n)을 조절해야 한다. 이를 위해서 물질의 실질적인 두께를 조절하는 방법이 널리 사용되지만, 이러한 제조방식은 비용 효율성이 떨어지며, 제조과정 또한 복잡하다. 본 연구에서는 3D 인쇄 기술을 적용하여 제작 비용과 무게를 획기적으로 낮추었다. 공기와 3D 인쇄 물질의 비율을 조절하여 렌즈 설계에 필요한 ϵ_{eff} 및 n 을 구현하였고, 3차원 복셀(Voxel)

구조 기반으로 유전 렌즈를 이산화(discretization)하여 패치 안테나에 적합한 GRIN(gradient index) 렌즈를 설계하였다. 안테나 동작 주파수는 제한하는 렌즈와 패치 안테나의 mmWave 대역에서의 동작을 검증하기 위해서 상용되는 mmWave 5G 통신 주파수 대역인 n258 대역(24.25~27.5 GHz)으로 설정하였다.

II. 렌즈 및 안테나 설계

2-1 패치 안테나 설계

본 논문에서 설계한 패치 안테나는 Aperture 커플링 급전 방식을 가지고 있으며, 자세한 구조는 그림 1에 나타

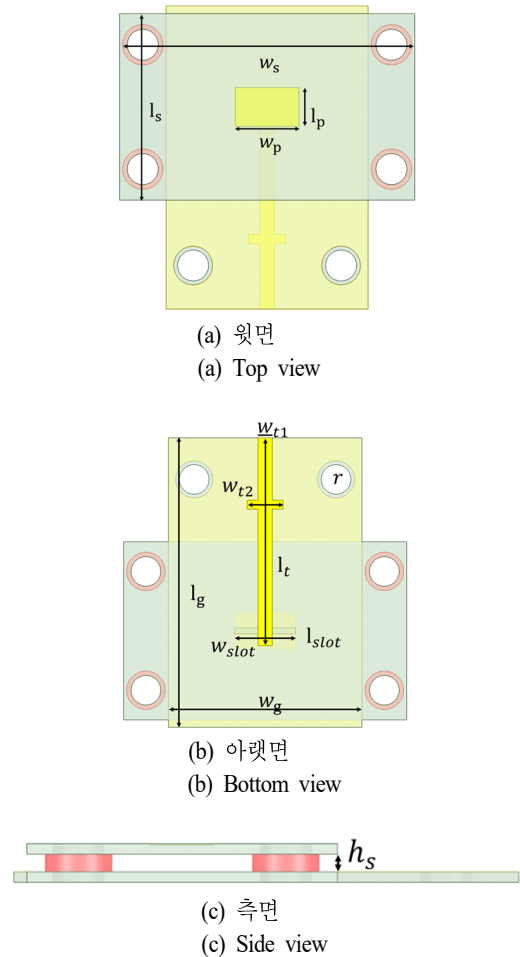


그림 1. 다층 패치 안테나 구조

Fig. 1. Multi-layer patch antenna structure.

표 1. 안테나 설계 변수 (단위: mm)
Table 1. Antenna design parameters in mm.

w_p	4.1	w_g	13
l_p	2.5	l_g	19.5
w_s	12	h_g	0.4
l_s	13	w_{t1}	0.95
h_s	0.4	l_{t1}	14
w_{slot}	4.1	w_{t2}	2.4
l_{slot}	0.4	l_{t2}	0.6

나 있다. 제안하는 안테나는 급전 네트워크가 있는 회로 부와 방사 패치가 인쇄된 2개의 인쇄 기판을 적층한 구조이며, 장사 패치와 급전부 사이에 공기층을 삽입하여 mmWave 대역에서의 기판 손실을 최소화하였다. 일반적인 인쇄 회로 기판 공정(PCB, printed circuit board)을 사용하여 제작했기 때문에 약 $250 \mu\text{m}$ 의 제작 오차가 존재하며, 이는 동작 주파수 대역에서 치명적인 성능 변화를 초래할 수 있다. 제작 오차를 최소화하기 위해서 안테나 급전부는 접지면에 설계된 aperture를 통해서 안테나 방사 패치로 에너지를 공급하는 구조로 설계했다. 따라서, 안테나 급전부와 방사 패치를 비교적 독립적으로 최적화할 수 있으며, coupled 구조의 장점인 높은 편파 순도와 교차 편파비를 달성할 수 있다.

제안하는 안테나는 0.6 mm 두께의 일반적인 FR4 기판에 인쇄되었으며, 사용한 FR4 기판의 비유전율(ϵ_r)과 손실($\tan \delta$)은 각각 4.4와 0.025이다^[7]. 두 개의 안테나 기판은 4개의 나일론 볼트와 너트로 단단히 고정하였다. 사각 패치 안테나와 급전부의 간격을 0.4 mm로 균일하게 유지하기 위해서 PLA(polyactic acid) 소재를 3D 인쇄기를 사용하여 그림 1과 같이 고리 형태로 인쇄하여 패치 안테나의 네 모서리에 배치했다. 설계한 패치 안테나를 50 Ω 마이크로스트립 전송선로에 정합하기 위해서 폭(W_D) 2.4 mm×길이(l_D) 0.6 mm의 직렬 커패시터를 삽입하였다. 설계한 패치 안테나의 상세한 치수는 표 1에 정리되어 있다.

2-2 역피라미드형 GRIN 렌즈 설계

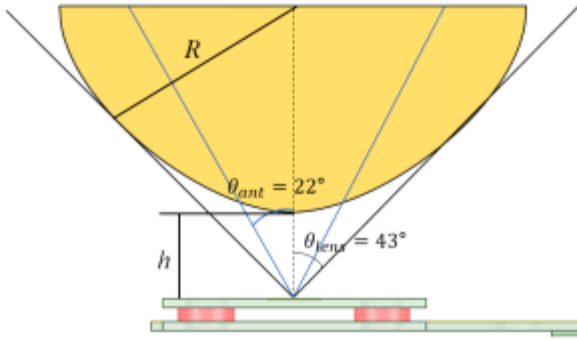
본 논문에서는 기존의 유전체를 깎아 제작하는 제조방

식(subtractive manufacturing)과 다르게 3D 인쇄 기술을 사용하여 적층 제조방식(additive manufacturing)을 사용하여 제작했다. 3D 인쇄 공정은 필요한 만큼만 소재를 인쇄하여 구조를 제작하기 때문에 마이크로파 렌즈와 같은 유전체 구조 제조에 유리하며, 자유롭게 형상을 제작할 수 있어서 많은 주목을 받는 제조 방식이다^[9]. 본 연구에서는 비용 효율성이 높고 쉽게 구할 수 있는 소재인 PLA 소재를 이용했다. 상대적으로 기존의 절삭 가공과 비교하면 제조 오차가 큰 3D 인쇄 공정을 활용하여, 짧은 파장이 있는 mmWave 대역 부품을 제작하기 위해서는 설계 단계에서부터 제작 오차를 완화할 수 있는 구조를 설계해야 한다. 본 논문에서는 구형 Luneburg 렌즈의 장점인 자유로운 입사각에 착안하여, 그림 2와 같이 반구형 구조에 기반을 두어 렌즈의 형상을 설계했다^[10]. 급전 패치 안테나의 3-dB 빔 폭($2\theta_{ant}$)을 충분히 포함할 수 있도록 렌즈의 크기를 설계하였으며, 안테나로부터 방사되는 에너지를 최대한 모으기 위해서 식 (1)에 따라서 렌즈의 반지름(R)과 안테나-렌즈 간 거리(h)를 고려하여 렌즈의 크기를 설계했다. 설계된 렌즈의 크기는 그림 2와 같이 급전 안테나 3-dB 빔 폭의 약 2배($\theta_{lens} \approx 2\theta_{ant}$)이다.

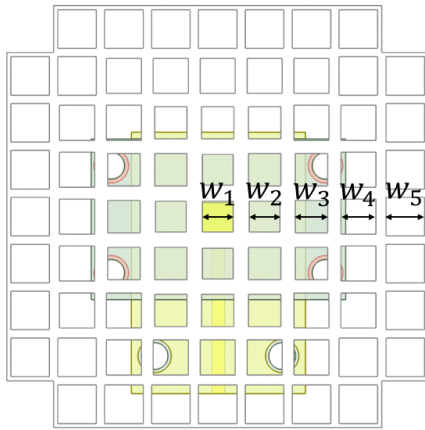
$$\tan^{-1}(\theta_{lens}) = \tan^{-1}\left(\frac{R}{R+h}\right) = 43^\circ \quad (1)$$

전자기 에너지는 설계된 렌즈에 의해서 위상이 조절되며, 안테나로부터 방사된 전자기 에너지는 유전체 렌즈의 단위 부피 혹은 단위 셀의 굴절률($n = \sqrt{\epsilon_r}$)에 의해서 위상이 조절될 수 있다. 3D 인쇄 공정의 특성상 제작의 용이성과 제작 오차를 줄이기 위해서 단위 셀로 나누어 제작했으며, 3차원 구조인 렌즈의 특성을 반영하기 위해서 복셀 구조로 이산화했다. 복셀의 크기는 파장보다 작을 때($L \ll \lambda/2$) 더욱 효율적이기 때문에, 3D 인쇄기의 제작 성능을 고려하여 최소의 크기로 설계했다. 일반적인 상용 3D 인쇄 장비 특성을 고려하여 렌즈는 5개의 수직 층으로 분할했고, 이때의 정육면체 복셀 한 변의 길이($W_{unitcell}$)는 3.5 mm이다.

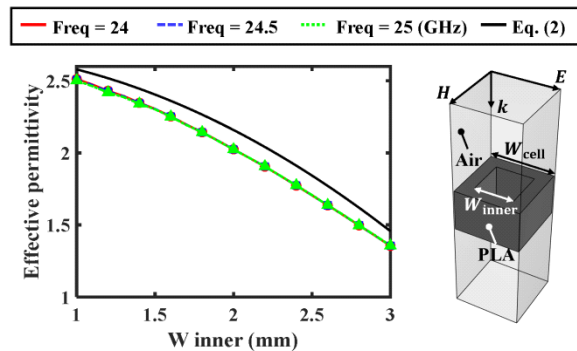
굴절률의 변화는 복셀의 구조를 통해서 구현할 수 있으며, 다양한 형태로 설계할 수 있다. 본 연구에서는 3D 프린터기의 성능에 의존하지 않는 구조를 제안한다. 그림



(a) 안테나 3-dB 빔 폭과 렌즈 설계
(a) Antenna 3-dB beam width and lens design



(b) 제안하는 역피라미드 GRIN 렌즈 구조의 윗면
(b) Top view of the proposed inverse pyramid GRIN lens



(c) 내부 너비 변화에 따른 유효 유전율 그래프
(c) An effective permittivity graph with changes in the inner width of the unit cell

그림 2. 안테나 및 렌즈 구조

Fig. 2. Antenna and lens: structure and geometry.

2(b)와 같이 복셀이 가지는 단위 부피당 PLA의 비율과 공기의 비율을 조절하여 렌즈를 구성하는 단위 부피당 유효 유전율을 제어했다. 수직과 수평 인쇄 과정만으로도 구현할 수 있는 구조이기 때문에 제작 오차를 최소화할 수 있으며, 상용 3D 인쇄기를 사용해서도 정밀한 구조물 인쇄가 가능하다. 복셀의 체적 밀도(ρ)는 식 (2)와 같이 복셀의 전체 체적(V_{vox}) 대비 PLA 소재의 체적 비율(V_{PLA})로 나타낼 수 있으며, 식 (2)를 통해서, 렌즈를 구성하는 각 복셀의 유효 유전율($\epsilon_{r_{eff}}$)을 얻을 수 있다. 이때, PLA의 유전율(ϵ_{PLA})은 2.72, 공기의 비유전율은 1.0이다. 렌즈의 반지름은 R 이고, 렌즈 안에서 중심에서부터의 거리를 r 이라고 하면, $\epsilon_{r_{eff}}$ 은 식 (3)에 따라서 구할 수 있다. 유효 유전율을 반구형 렌즈 중심에서부터 거리에 따라 변화도록 하여 GRIN 렌즈의 특성을 구현하였다.

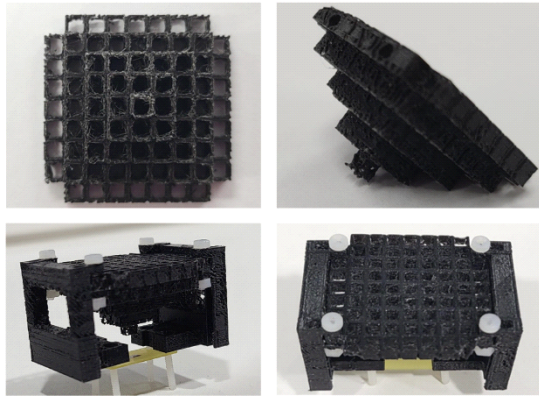
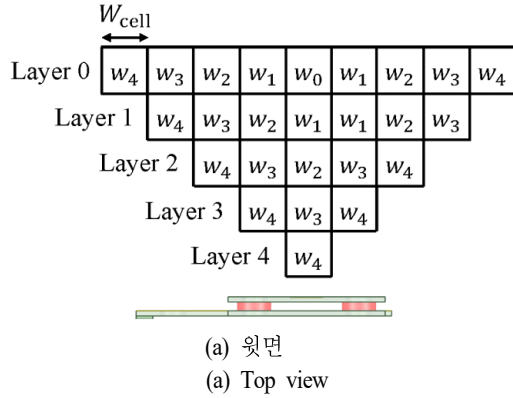
$$\rho = \frac{V_{PLA}}{V_{vox}} = \frac{\epsilon_{r_{eff}} - 1}{\epsilon_{PLA} - 1} \quad (2)$$

$$\epsilon_{r_{eff}}(r) = 2 - \frac{r^2}{R^2} \quad (3)$$

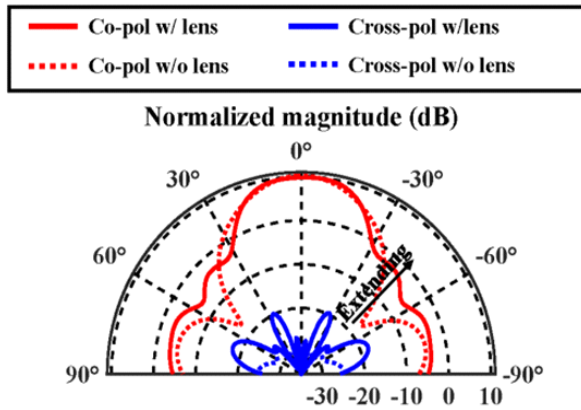
그림 2(c)에서 각 단위 셀 내의 면적 변화에 따른 유효 유전율을 식 (2)로 계산한 것과 3차원 전파 해석 유한요소 해석을 통해 얻어낸 결과를 비교하였다. 동작 주파수 대역 내에서 보이는 결과는 거의 유사하게 나타났으며, 1 GHz의 변화가 동작 파장에 큰 변화율을 가져오지 않기 때문에 등가적 해석이 일관되게 적용되는 것으로 볼 수 있다. 식 (2)와 전산모사 결과는 그래프의 형태가 유사하게 나타났으나, 내부 면적 변화에 따른 유효 유전율의 값에서 0.08 정도의 차이를 보여주었다.

반구형의 렌즈 외형에 최대한의 복셀을 배치하기 위해서 그림 3과 표 2와 같이 역피라미드 형태로 렌즈를 설계했으며, 표 1과 같이 수직으로 5개의 층으로 구분하였다. 최종적으로 설계된 렌즈의 지름은 식 (2)에 따라 31.5 mm이며, 설계한 유전체 렌즈를 안테나와 통합 및 고정하기 위해서 3D 인쇄기로 고정용 틀을 인쇄했다.

실제 제작 시 고정용 틀로 인한 렌즈의 곡률이 발생한 다. 그림 3(c)는 고정용 틀의 영향 및 렌즈의 곡률을 모두 반영한 경우와 실제 오차가 적용되지 않은 경우를 전파



(b) 제작된 렌즈 및 안테나
(b) Fabricated patch antenna with the proposed lens



(c) 실제 제작을 고려한 경우와 실제 형태를 반영하지 않았을 때 전파 해석의 비교
(c) Comparison of simulated radiation patterns between the ideal and practical cases

그림 3. 제안하는 역피라미드 GRIN 렌즈 구조
Fig. 3. Geometry of the proposed inverted pyramidal GRIN lens.

표 2. 렌즈를 구성하는 복셀의 특성
Table 2. Characteristic of voxels of the lens.

Cell	Effective Permittivity ($\epsilon_{r_{eff}}$)	Density (ρ)	Inner width (W_{inner})
w_0	1.990	0.58	2.260
w_1	1.972	0.57	2.295
w_2	1.889	0.52	2.425
w_3	1.750	0.44	2.619
w_4	1.556	0.32	2.886

해석 측면에서 비교하였다. 이상적인 상태일 때 빔 집중이 일정하게 나타나며, 0 dBi 기준 빔 너비가 70도 정도 나오지만, 실제 환경을 반영할 때 60도 정도 나오며, 방사 널(null)이 형성되지 않는 형태가 된다. 지지대에 사용된 소재 역시 PLA로 공기 중의 유전율과 비교하여 상대적으로 높고, 이로 인해 전파의 회절 측면에서 영향을 준 것으로 예상된다.

III. 안테나 측정

본 연구에서 제안한 5개 층으로 구성된 역피라미드형 GRIN 렌즈를 패치 안테나와 결합하여 무반향실(anechoic chamber)에서 반사 계수($|S_{11}|$), 안테나 이득(gain), 그리고 방사 패턴(radiation pattern)을 측정하였다. 측정된 -10 dB 동작 대역폭은 그림 4와 같이 24.4~25.5 GHz이며, 안

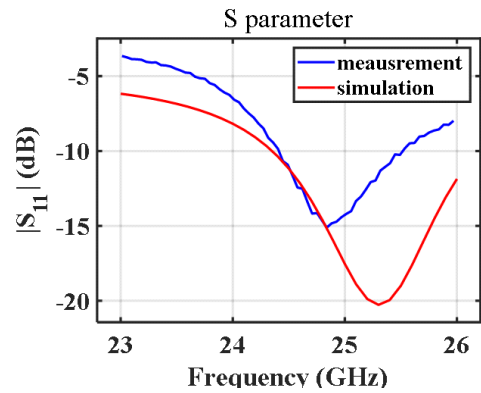


그림 4. 안테나의 반사 계수 측정($|S_{11}|$)
Fig. 4. Measured reflection coefficients ($|S_{11}|$).

테나 이득은 동작 대역폭에서 7.18~8.6 dBi로 측정되었다. 본 연구에서 제안하는 역피라미드형 GRIN 렌즈가 장착되지 않았을 때의 안테나 이득은 동작 대역폭에서 3.3~4.8 dBi로 측정되었다. 역피라미드형 GRIN 렌즈를 통해서 기존의 안테나 이득을 약 3.41 dBi 개선되었음을 확인할 수 있다.

중심 동작 주파수인 25 GHz에서 측정된 방사 패턴은 그림 5에서 보여주고 있다. 제안하는 역피라미드 GRIN 렌즈 장착 여부에 따라서 제안하는 패치 안테나의 3-dB 빔 폭은 66°에서 45°로 줄어드는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 본 연구에서 제안하는 역피라미드형 GRIN 렌즈가 전자기 에너지를 집중시키는 역할을 한다는 것을 보여준

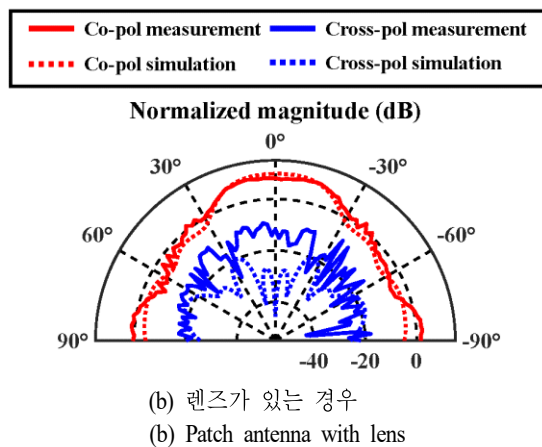
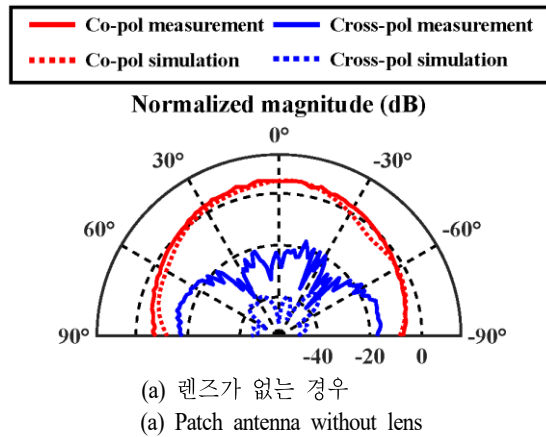


그림 5. 렌즈 장착 유무에 따른 안테나 방사패턴

Fig. 5. Antenna radiation pattern depending on lens attachment.

다. 렌즈 유무에 따라서 전파 해석 결과와 측정값을 비교할 때 co-pol 측면에서 유사하다. 렌즈가 있는 경우, 약간의 측정 오차가 존재한다. 이는 설계 단계에서의 유전체 모델링과 3D-프린터의 제작 오차에서 기인한 것으로 볼 수 있다. 정밀한 광경화성 수지 조형 방식(SLA)의 3D-프린터로 제작한다면, 설계 시 예상했던 유전율을 조형할 수 있을 거라 예상된다. 또한, PLA 소재가 가지는 mmWave 대역에서의 전기적 특성이 측정을 기반으로 정확하게 정의된다면 오차를 크게 줄일 수 있다. 또한, 렌즈 제작에 사용한 3D 인쇄기의 노후로 인해서 제작 오차가 크게 발생했다.

단일 패치 안테나의 이득을 늘리기 위해 수직 공간을 이용하는 방식으로 GRIN 렌즈가 사용되었다. 이는 수평적으로 배열을 확장하기 어렵지만, 수직 여유 공간에서 매우 효과적인 이득을 볼 수 있다. 또한, 소스로 사용되는 안테나 형태에 구애받지 않기 때문에 2×2 단일 배열 안테나 혹은 다양한 안테나 등에 사용될 수 있다. 주로 3D 프린팅에 사용되는 소재는 매우 가볍고 기존 방식으로 설계하기 어려운 형태 또한 구현할 수 있어 안테나에 따른 근접장의 방사 패턴을 고려하여 최적 렌즈 설계가 가능하다.

표 3에서 본 논문에서 제안하는 3D 인쇄 기술로 제작된 Luneburg 렌즈 안테나를 최근에 보고된 mmWave 대역 안테나와 비교하여 정리하였다^{[11]~[13]}. 참고문헌 [11]에서는 구형 Luneburg 렌즈를 혼안테나로 급전하여 28 GHz에서 19 dBi의 이득을 보여줬으며, 참고문헌 [12]에서는 납작한 원통형 렌즈에 슬롯 안테나로 급전하여 26 GHz에서 15.7 dBi의 이득을 구현했다. 참고문헌 [13]은 ME-다이폴 급전 구조를 활용하여 33 GHz에서 20 dBi의 안테나 이득을 얻었다. 최근 보고된 렌즈 안테나들은 부피가 매우 크

표 3. 제안하는 안테나 성능 비교

Table 3. Antenna performance comparison.

Ref.	Freq. (GHz)	Antenna feeding	Gain (dBi)	Size in λ
[11]	28	Horn	19.0	12.66×12.66×12.66
[12]	26	Slot	15.7	7.65×7.65×1.74
[13]	33	ME-Dipole	20.0	4.95×4.95×4.95
This work	25	Patch	8.6	2.63×2.63×1.46

며 급전을 위해서 높은 이득을 가지는 혼안테나 및 ME-다이폴 구조를 급전에 사용했다. 반면, 제안하는 안테나는 평면 적층 구조에 적합한 형태이며, 상대적으로 매우 작은 부피를 가지고 있다. 또한, 저손실 고주파 대역용 3D 인쇄 물질이 아닌 일반적인 PLA를 사용해서 인쇄했기 때문에 비용과 범용성 측면에서 높은 경쟁력을 가지고 있다.

IV. 결 론

본 논문은 3D 인쇄 제조 기술로 제작된 역피라미드 형태의 GRIN 렌즈와 결합한 mmWave 대역에서 동작하는 패치 안테나를 제안했다. 패치 안테나에 적합한 유전체 렌즈 구조 설계를 제안했으며, 여러 형태의 평면 안테나와 통합될 수 있는 범용성 높은 렌즈 구조이기 때문에 높은 기술 잠재력이 있다. 3D 인쇄 공정과 호환성을 높이기 위해서 정육면체의 복셀을 기반으로 구형 렌즈를 이산화하여 분석했으며, Luneburg 렌즈의 장점인 다초점 특성을 구현하였다. 공기와 3D 인쇄 소재인 PLA의 부피 비율을 단위 복셀 내에서 조절하여 GRIN 특성을 구현했다. 제작된 역피라미드형 GRIN 렌즈는 기존의 패치 안테나 이득을 약 3.1 dBi 증가시켰고, mmWave 대역에서의 3D 인쇄 제조 기술의 가능성을 확인했다. 정교한 3D 인쇄기와 저손실 3D 인쇄 소재를 사용한다면, 더욱 개선된 렌즈 성능을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 제안한 안테나는 기지국이나 중계기 사이의 통신과 같이, 고정된 방향으로 통신을 하는 차세대 mmWave 통신 환경에 적용될 수 있으며, 3D 인쇄 기술의 도입으로 인해서 빠른 설계 및 제조를 할 수 있으므로 높은 기술적·경제적 잠재력이 있다.

References

- [1] C. Yeh, G. D. Jo, Y. J. Ko, and H. K. Chung, "Perspectives on 6G wireless communications," *ICT Express*, vol. 9, no. 1, pp. 82-91, Feb. 2023.
- [2] E. Park, S. Kim, "Design and analysis of a TEM mode rectangular coaxial waveguide for mobile 5G millimeter wave antenna module applications," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 3, pp. 169-175, Jul. 2020.
- [3] L. Zhang, H. Zhao, S. Hou, Z. Zhao, H. Xu, and X. Wu, et al., "A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117460-117504, Jul. 2019.
- [4] S. W. Chi, C. H. Lee, and J. H. Lee, "Study on multi-beam forming with improved accuracy of steering angle and sidelobe control," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 6, pp. 449-456, Jun. 2018.
- [5] T. Jeong, K. Oh, J. Y. Jung, and K. C. Hwang, "Design of thinned phased array antenna with subarrays," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 4, pp. 284-292, Apr. 2022.
- [6] S. Kuttu, D. Sen, "Beamforming for millimeter wave communications: An inclusive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 949-973, Dec. 2015.
- [7] G. Kim, S. Kim, "Design and analysis of dual polarized broadband microstrip patch antenna for 5G mmWave antenna module on FR4 substrate," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 64306-64316, May 2021.
- [8] T. Li, Z. N. Chen, "Compact wideband wide-angle polarization-free metasurface lens antenna array for multibeam base stations," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 3, pp. 1378-1388, Oct. 2019.
- [9] J. G. Hester, S. Kim, J. Bito, T. Le, J. Kimionis, and D. Revier, et al., "Additively manufactured nanotechnology and origami-enabled flexible microwave electronics," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 4, pp. 583-606, Apr. 2015.
- [10] R. Chen, J. Zhou, W. X. Long, and W. Zhang, "Hybrid circular array and Luneberg lens for long-distance OAM wireless communications," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 1, pp. 485-497, Jan. 2023.
- [11] Y. Guo, Y. Li, J. Wang, L. Ge, Z. Zhang, and M. Chen, et al., "A 3D printed nearly isotropic Luneburg lens an-

tenna for millimeter-wave vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 1145-1155, Feb. 2022.

- [12] P. Liu, X. W. Zhu, Y. Zhang, J. Li, and Z. Jiang, "3D-printed cylindrical Luneburg lens antenna for millimeterwave applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 30,

no. 1, p. e21994, Jan. 2020.

- [13] Y. Li, L. Ge, M. Chen, Z. Zhang, Z. Li, and J. Wang, "Multibeam 3-D-printed Luneburg lens fed by magneto-electric dipole antennas for millimeter-wave MIMO applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 5, pp. 2923-2933, May 2019.

조 정 아 [한국항공우주산업주식회사/연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-7039-9183>



2024년 2월: 부산대학교 전기공학과 (공학사)

2024 3월~현재: 한국항공우주산업주식회사 연구원

[주 관심분야] 항공우주 기술, 렌즈

김 상 길 [부산대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1720-2410>



2010년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

2011년 12월: 조지아공과대학 전자공학 (공학석사)

2014년 12월: 조지아공과대학 전자공학과 (공학박사)

2015년 1월~2018년 2월: Qualcomm Inc. USA

2018년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용

하 노 점 [부산대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4827-6877>



2019년 8월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)

2022년 2월: 부산대학교 전자공학과 (공학석사)

2022년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] 전파기와 흡수체, RF-

Photonics