Composites Research

Vol. 39, No. 5, 561-577 (2026)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2026.39.5.561
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

RCS 출력 강화 3D 프린팅 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체 구조 설계

최현준* · 서한준* · 유종경** · 황민제** · 이현석** · 남영우*,***†

3D-Printed GRIN Gyroid Luneburg Lens-Based Reflector for RCS Enhancement

Hyun-Jun Choi*, Han-Jun Seo*, Jong-Gyeong Yoo, Min-Je Hwang**, Hyun-Seok Lee**, Young-Woo Nam*,***†**

ABSTRACT: This study proposes a 3D-printed gradient-index (GRIN) Gyroid Luneburg lens reflector for passive radar cross-section (RCS) enhancement in the X-band (8–12 GHz). The reflector consists of a GRIN Gyroid Luneburg lens, a perfect electric conductor (PEC) reflector, a support, and a mount. The required layer-wise permittivity distribution was realized by controlling the volume fraction and wall thickness of the Gyroid structure, while an integrated single-material design was adopted to improve 3D-printing manufacturability. The effective permittivity at different volume fractions was evaluated through electromagnetic simulations and measurements and used to construct the GRIN lens. Electromagnetic performance was assessed using RCS simulations of both an effective-permittivity model and a geometrically resolved Gyroid model, followed by comparison with measured RCS results. The results demonstrate that the 3D-printed Gyroid structure can realize the required GRIN permittivity distribution and that the proposed reflector is suitable as a passive X-band RCS enhancement structure.

초 록: 이 논문에서는 X-band (8–12 GHz)에서 수동형 레이더 반사 단면적(Radar Cross Section, RCS)을 증가시키기 위한 3D 프린팅 기반 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체를 제안하였다. 제안한 반사체는 GRIN Gyroid Luneburg Lens와 PEC 반사판 및 지지 구조로 구성되며, Gyroid 내부 형상의 공간적 변화를 통해 요구되는 유효유전율 구배를 구현하였다. 또한 단일 열가소성 수지를 적용한 일체형 구조로 설계하여 복잡한 내부 형상의 구현 가능성과 3D 프린팅 제작성을 확보하였다. Gyroid 구조의 유효유전율 특성은 전자기 해석과 시편 측정을 통해 검토하였으며, 이를 바탕으로 GRIN 유전율 분포의 구현 가능성을 평가하였다. 전자기 성능은 유효유전율이 적용된 등가 모델과 실제 Gyroid 형상 모델의 RCS 해석을 통해 비교하였으며, 제작 시제품의 RCS 측정 결과와 함께 반사 특성의 경향성을 검토하였다. 그 결과, 3D 프린팅 Gyroid 구조를 이용하여 요구되는 GRIN 유전율 분포를 구현할 수 있음을 확인하였으며, 제안한 반사체의 X-band 수동형 RCS 출력 강화 구조로 적용될 수 있음을 확인하였다.

Key Words: 레이더 반사 단면적 증강(Radar Cross-Section Enhancement), 적층 제조(Additive Manufacturing), Luneburg Lens 반사체(Luneburg Lens Reflector), 굴절률 구배 렌즈(Gradient-Index Lens)

Received 21 August 2026, received in revised form 7 September 2026, accepted 13 October 2026

*Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University
**Low Observability Technology Team, Korea Aerospace Industries Ltd
***Aeronautics Major, College of Engineering, Korea Aerospace University
†Corresponding author (E-mail: ywnam@kau.ac.kr)

1. 서 론

현대 전장에서는 무인체계의 활용 범위가 확대됨에 따라, 유인 플랫폼과 무인체계를 연계하여 운용하는 유무인 복합체계의 중요성이 증가하고 있다. 유무인 복합체계는 유인 전력의 임무 부담과 위험 노출을 줄이면서 감시정찰, 표적 획득, 통신 중계 및 타격 임무를 분산 수행하기 위한 운용 개념으로 연구되고 있다[1]. 특히 소형 무인기와 저고도 비행체의 활용이 증가하면서, 이들 표적에 대한 탐지, 추적, 식별 및 대응 기술의 중요성도 함께 증가하고 있다[2,3]. 이러한 환경에서는 무인체계 자체의 비행 성능뿐만 아니라, 레이더 관점에서 표적이 어떻게 탐지되고 식별되는지를 고려한 전자기적 특성 설계가 필요하다.

기만 또는 표적 모사 임무를 수행하는 무인체계에서는 임무 목적에 따라 특정 레이더 반사 특성을 구현하는 것이 중요하다. 소형 무인기는 기하학적 크기, 구성 재료 및 운용 조건에 따라 기존 유인 항공기와 다른 레이더 산란 특성을 보일 수 있으며, 이로 인해 표적 모사 또는 전자기적 기만 목적에서는 요구되는 Radar Cross Section (RCS) 수준을 의도적으로 조절할 필요가 있다[2,3]. RCS는 표적이 입사 전자기파를 레이더 수신 방향으로 산란시키는 능력을 등가 면적으로 나타내는 지표이며, 표적의 형상, 재료 물성, 전기적 크기, 주파수, 입사각 및 편파 조건에 따라 달라진다[4,5]. 따라서 RCS는 레이더 표적의 탐지 가능성과 반사 특성을 정량적으로 평가하는 핵심 지표로 사용된다. RCS를 증가시키기 위한 수동형 반사 구조는 별도의 능동 송신 장치 없이 입사 전자기파를 특정 방향으로 재방사하여 후방 산란 성분을 증가시키는 방식이다. 금속 평판이나 corner 반사체와 같은 단순 반사 구조는 높은 RCS를 구현할 수 있으나, 반사 성능이 입사각과 배치 조건에 민감하다. 반면 Luneburg Lens 기반 반사체는 Gradient-Index (GRIN) 유전율 분포를 이용하여 입사 전자기파를 Lens 후방으로 집속시키고, 반사판과 결합하여 monostatic RCS를 증가시키는 구조로 연구되어 왔다[6-13]. 이러한 특성은 기만 또는 표적 모사 목적의 소형 플랫폼에서 특정 주파수 대역과 방위각 범위의 레이더 반사 특성을 구현하는 데 활용될 수 있다. 그러나 Luneburg Lens는 반경 방향으로 연속적으로 변화하는 유전율 분포를 요구하므로, 실제 제작에서는 이를 직접 구현하기 어렵다. 기존 연구에서는 Luneburg 렌즈와 반사판을 결합한 다양한 반사체 구조가 제안되었으며, 렌즈 형상과 유전율 분포에 따른 전자기파 집속 및 후방 산란 특성이 검토되었다. 이러한 연구들은 Luneburg 렌즈 반사체의 전자기적 설계와 반사 특성을 분석하는 데 기여하였으나, 연속적인 유전율 구배를 실제 제작 구조에 구현하기 위해서는 제작 공정과 내부 형상의 제어를 함께 고려해야 한다. 최근에는 이러한 제작 문제를 해결하기 위해 적층제조 기술을 활용한 GRIN 렌즈 연구가 진행되었다. 특히 공간 충전 곡선과 FDM 공정을 활용한 유전율 구배 구조 제작, polymer jetting 기반의 3차원 Luneburg 렌즈 제작, 적층제조에 적용되는 단위 구조의 크기가 전자기 성능에 미치는 영향 분석 등 다양한 접근이 제시되었다[14-29]. 이러한 연구들은 적층제조 기반 GRIN 렌즈의 설계 및 제작 가능성을 보여주었다. 한편, 실제 제작되는 내부 구조의 기하학적 특성과 유효유전율의 관계를 분석하고, 이를 전체 렌즈 반사체의 RCS 특성과 연계하여 평가하는 과정도 중요하다.

이에 본 연구에서는 단일 열가소성 소재의 Gyroid 구조를 적용한 GRIN Luneburg 렌즈 반사체를 설계하고, 유효유전율 예측부터 전자기 해석 및 제작품의 RCS 측정까지 연계하여 전자기적 구현 가능성을 검토하였다. 먼저 체적분율에 따른 유효유전율을 이론적으로 예측하고, Gyroid 단위 셀 전자기 해석 및 다공성 ABS 시편의 유효유전율 측정을 통해 설계 방법의 타당성을 검토하였다. 또한 유효유전율이 적용된 등가 모델과 실제 Gyroid 형상을 반영한 모델의 RCS 해석 결과를 비교하고, FDM 방식으로 제작한 반사체의 RCS를 측정하였다. 이를 통해 단일 소재 기반의 내부 형상 제어를 활용한 GRIN 렌즈 반사체의 설계, 제작 및 전자기 성능 평가하였다.

2. 전자기 산란 및 유효 유전율 기반 이론

2.1 Luneburg Lens RCS 출력 강화 반사체

Luneburg Lens는 Rudolf K. Luneburg가 기하광학 이론을 바탕으로 제안한 구형 Lens로, Lens 중심으로부터의 반경 위치에 따라 굴절률이 변화하는 비균질 매질 구조이다[30, 31]. 이상적인 Luneburg Lens는 중심부에서 가장 높은 유전율을 가지며, 외곽 표면으로 갈수록 유전율이 점진적으로 감소하는 특성을 갖는다. 이러한 유전율 분포에 의해 외부에서 입사한 평면파는 Lens 내부를 통과하면서 연속적으로 굴절되며, 입사 방향의 반대편 표면 부근으로 집속되며, 이에 따라 Luneburg Lens는 별도의 능동 소자 없이 전자파의 진행 경로를 제어할 수 있는 수동형 전자파 집속 구조로 활용될 수 있다[29-31].

Luneburg Lens는 구형 대칭 구조로 입사파의 방향이 변하더라도 동일한 원리에 의해 Lens 반대편 표면 부근으로 전자파를 집속시킨다. 이상적인 Luneburg Lens의 굴절률 분포는 식 (1)과 같으며 반경 방향 위치에 의해 결정된다. 비자성 유전체를 가정할 경우 굴절률($n(r)$)과 상대유전율($\varepsilon_r(r)$)의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$n^2(r) = \varepsilon_r(r) \tag{1}$$

따라서 이상적인 Luneburg Lens의 상대유전율 분포는 식 (2)와 같이 표현된다.

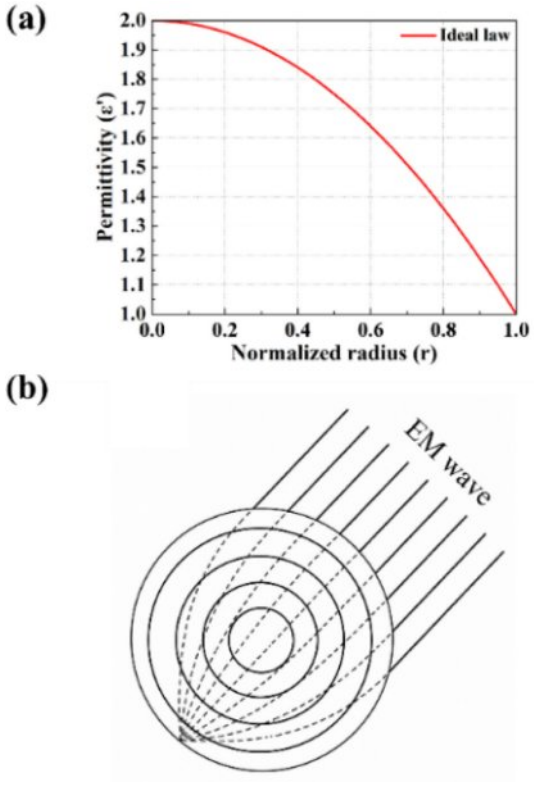


Fig. 1. Relative permittivity profile and electromagnetic-wave focusing of an ideal Luneburg Lens: (a) relative permittivity versus normalized radius and (b) schematic of wave focusing within the Lens

$$\varepsilon_r(r) = 2-\left(\frac{r}{R}\right)^2 \quad (2)$$

이때, r은 Lens 중심으로부터의 반경 위치이며, R은 Lens의 반지름이다. 식 (2)에 따르면 Lens 중심부에서는 $\varepsilon_r = 2$가 되고, Lens의 최외곽 표면에서는 $\varepsilon_r = 1$이 된다. 즉 Luneburg Lens는 중심부에서 외곽으로 갈수록 상대유전율이 감소하는 연속적인 GRIN 구조를 갖는다.

Fig. 1은 이상적인 Luneburg Lens의 유전율 분포와 전자기파 집속 원리를 나타낸다. Fig. 1 F(a)는 정규화된 반경에 따른 상대유전율 변화를 나타낸 것으로, Lens 중심부에서 최대 유전율을 갖고 외곽 표면에서 공기와 동일한 수준의 유전율로 감소하는 특성을 확인할 수 있다. Fig. 1(b)에는 이러한 반경 방향 유전율 구배에 의해 외부에서 입사한 전자기파가 Lens 내부에서 굴절되어 반대편 표면 부근으로 집속되는 과정을 개념적으로 나타내었다.

2.2 GRIN Luneburg Lens 설계 및 유전 특성

Luneburg Lens의 전자기파 집속 특성은 Lens 내부에 형성되는 반경 방향 유전율 구배에 의해 결정된다. 이상적인 경우 유전율은 Lens 중심에서 외곽 표면까지 연속적으로 변화하지만, 실제 제작 가능한 구조에서는 이러한 연속 분포를 그대로 구현하기 어렵다. 본 연구에서는 이상적인 유전율 분포를 유한한 개수의 층으로 이산화하고, 각 층의 목표 유전율을 체적분율이 제어된 Gyroid 구조의 유효유전율로 근사하였다.

2.2.1 목표 유전율 분포

이상적인 Luneburg Lens는 식 (2)와 같이 중심부에서 외곽 표면으로 갈수록 상대유전율이 연속적으로 감소하는 반경 방향의 GRIN 분포를 갖는다. 이러한 연속 유전율 분포는 입사 전자기파가 Lens 내부에서 점진적으로 굴절되도록 하여 입사 방향 반대편의 표면 부근으로 집속시키는 역할을 한다. 그러나 실제 적층제조 공정에서는 위치에 따라 연속적으로 변화하는 유전율을 직접 구현하기 어려우므로, 이상적인 유전율 분포를 제작 가능한 형태로 근사할 필요가 있다.

본 연구에서는 설계 주파수 대역과 전체 반사체의 전자기적 형상 조건을 고려하여 목표 유전율 분포를 설정하였다. 이상적인 연속 유전율 분포는 반경 방향으로 이산화하였으며, 각 영역에는 해당 위치의 유전율 변화 경향을 대표하는 등가 목표 유전율을 부여하였다. 이때 외곽부에서 중심부로 갈수록 목표 유전율이 점진적으로 증가하도록 구성하여 이상적인 Luneburg Lens의 굴절률 구배와 전자기파 집속 특성이 유지되도록 하였다.

이산화된 유전율 분포의 분해능이 증가하면 이상적인 연속 분포에 대한 근사 정확도를 향상시킬 수 있다. 그러나 인접 영역 사이의 목표 유전율 차이가 세분화될수록 이를 구현하기 위한 Gyroid 내부 형상의 정밀한 제어가 요구된다. 특히 FDM 공정에서는 최소 출력 두께, 내부 곡면의 연속성, 형상 오차 및 체적분율 편차가 발생할 수 있으며, 이러한 제작 편차는 설계된 유효유전율 분포의 재현성에 영향을 줄 수 있다.

따라서 본 연구에서는 이상적인 유전율 분포에 대한 전자기적 근사 정확도와 Gyroid 구조의 적층제조 가능성을 함께 고려하여 목표 GRIN 유전율 분포를 구성하였다. 설정된 목표 유전율은 이후 체적분율 변화에 따른 유효유전율 예측 및 Gyroid 단위 cell 해석 결과와 비교하였으며, 이를 바탕으로 각 영역에 적용되는 Gyroid 구조의 기하학적 변수를 결정하였다.

2.2.2 체적분율 기반 유효유전율 해석

목표 유전율 분포를 3D 프린팅 구조로 구현하기 위해서는 각 층의 목표 상대유전율을 실제 제작 가능한 구조 변수로 변환해야 한다. 본 연구에서는 공기와 열가소성 수지로 구성된 다공성 구조를 등가 유전체로 가정하고, 체적분율 변화에 따른 유효유전율을 Knott equation을 이용하여 예측하였다. Knott equation은 기체와 고분자 재료로 구성된

plastic foam의 유전율을 공학적으로 추정하기 위해 제안된 모델로, 기체 영역이 고분자 재료로 둘러싸인 단위 구조를 가정하여 유효유전율을 산출한다[34].

본 연구에서 체적분율은 단위 체적에서 고체 재료가 차지하는 비율로 정의하였다.

$$V_f = V_s / V_{cell} \tag{3}$$

여기서 V_f는 고체 재료의 체적분율, V_s는 단위 구조 내 고체 재료의 체적, V_{cell}은 단위 구조의 전체 체적이다. 공기 영역의 체적분율은 1 – V_f로 나타낼 수 있다. 체적분율이 증가할수록 단위 체적 내 고체 재료의 비율이 증가하므로, 유효유전율은 공기의 상대유전율에서 열가소성 수지의 상대유전율 방향으로 증가한다. Knott equation은 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_s \left[1 - \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_a)(1 - V_f)}{\varepsilon_a + (\varepsilon_s - \varepsilon_a) + (1 - V_f)^{1/3}} \right] \tag{4}$$

여기서 ε_{eff}는 다공성 구조의 유효 상대유전율, ε_s는 고체 열가소성 수지의 상대유전율, ε_a는 공기의 상대유전율, V_f는 고체 재료의 체적분율을 의미하며, 공기의 상대유전율을 $\varepsilon_a = 1$로 가정하였다.

Knott equation을 이용하여 체적분율 변화에 따른 유효유전율을 계산하였고, 이를 통해 각 GRIN 층의 목표 상대유전율에 대응하는 체적분율을 산정하였다. Fig. 2는 체적분율에 따른 예측 유효유전율 변화를 나타낸다. 예측 결과에서 체적분율이 증가할수록 유효유전율은 단조 증가하였으며, 이는 공기 영역의 감소와 고체 재료 영역의 증가에 따른 등가 유전율 변화로 해석된다. 이상적인 Luneburg Lens의 유전율 분포는 외곽부에서 상대유전율 1에 가까운 값을 요구한다. 그러나 실제 FDM 기반 다공성 구조에서는 매우 낮은 체적분율 조건에서 Gyroid 형상의 연속성, 최소 벽 두께, 출력 안정성 및 구조 재현성이 제한될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Knott equation 기반 예측 결과와 FDM 방식의 3D 프린팅 제작 가능성을 함께 고려하여 목표 유전율 구현 범위를 설정하였다. 산정된 체적분율은 이후 Gyroid 단위 cell 모델의 형상 변수 설정과 층별 GRIN 구조 배치의 기준 값으로 사용하였다.

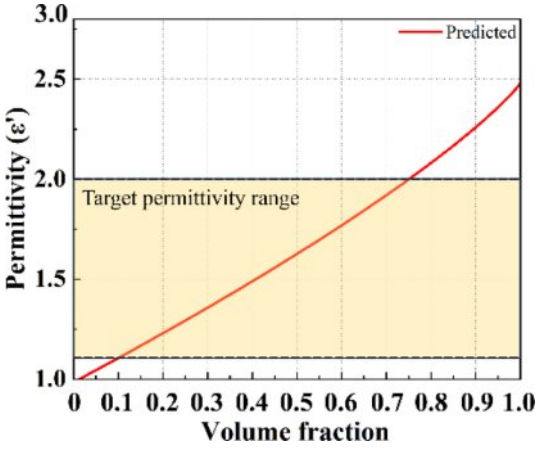


Fig. 2. Predicted effective permittivity and target permittivity range versus volume fraction

2.2.3 Gyroid 구조 유효유전율 해석

2.2.2절에서는 Knott equation을 이용하여 체적분율 변화에 따른 유효유전율을 예측하였다. 그러나 실제 Gyroid 구조의 전자기적 응답은 체적분율 뿐만 아니라 단위 cell의 형상, 주기성, 전자기파 입사 방향 및 편파 조건의 영향을 받는다. CST Studio Suite를 이용하여 Gyroid 단위 cell 모델의 유효유전율 해석을 수행하고, Knott equation 기반 예측 결과와 비교하였다. 해석 모델은 일정한 단위 cell 크기를 갖는 Gyroid 구조로 구성하였으며, Gyroid 구조의 주기성을 모사하기 위해 단위 cell 모델의 측면에는 주기 경계조건을 적용하였으며, 전자기파는 두께 방향으로 입사하도록 설정하였다. 해석에는 frequency domain solver를 사용하였고, 해석 결과로 반사계수 S_{11}과 투과계수 S_{21}을 추출하였다.

S-parameter 기반 유효 물성 추출 방법에서는 반사계수와 투과계수로부터 등가 임피던스 z를 먼저 계산한다. 본 연구에서 사용한 등가 임피던스 산출식은 식 (5)에 나타내었다[40,41].

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \tag{5}$$

또한, 등가 굴절률 n은 식 (6)를 이용하여 산출하였다.

$$n = \frac{1}{k_0 d} \cos^{-1}\left[\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2 S_{21}} \right] \tag{6}$$

여기서 k_0는 자유공간 파수이고, d는 전자기파 진행 방향에 대한 Gyroid 단위 cell 모델의 두께이다. 자유공간 파수 k_0는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0} \tag{7}$$

여기서 λ_0는 자유공간 파장, ω는 각주파수, μ_0는 자유공간 투자율, ε_0는 자유공간 유전율이다. 식 (6)과 식 (7)로부터 등가 임피던스 z와 등가 굴절률 n을 구하면, 유효 상대유전율과 유효 상대투자율은 각각 식 (8) 및 식 (9)와 같이 계산된다.

$$\varepsilon_{eff} = n / z \tag{8}$$

$$\mu_{eff} = n z \tag{9}$$

본 연구에서 사용한 Gyroid 구조는 공기와 열가소성 수

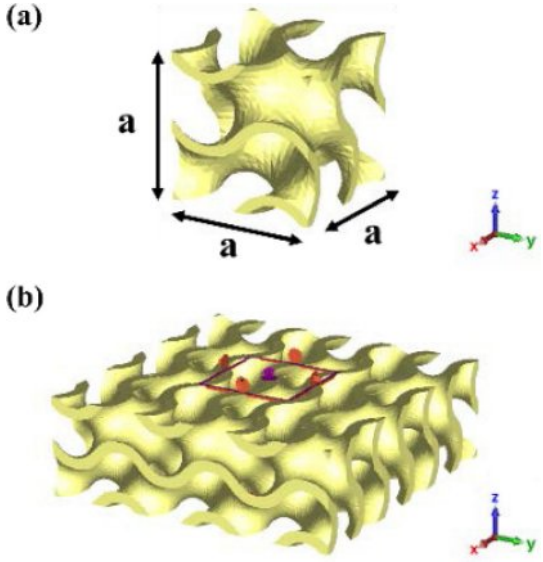


Fig. 3. Gyroid unit-cell model and effective permittivity analysis setup: (a) unit-cell model and (b) simulation model with periodic boundary conditions

지로 구성된 비자성 유전체 구조이므로, 설계 변수는 유효 상대유전율로 설정하였다. 이에 따라 각 체적분율 조건에서 산출된 유효 상대유전율의 실수부를 비교하여 목표 유전율과의 대응성을 검토하였다. 또한 체적분율 변화에 따른 유효유전율 해석 결과를 Knott equation 기반 예측 결과와 비교함으로써, 체적분율 기반 설계가 실제 Gyroid 구조에서도 유효한지 확인하였다. 산출된 유효유전율은 체적분율 변화에 따른 연속성 및 목표 유전율과의 대응성을 기준으로 비교하였으며, 이후 각 체적분율 조건에서 얻은 유효유전율을 바탕으로 GRIN 층별 목표 유전율을 구현하기 위한 Gyroid 형상 변수를 선정하였다.

Fig. 3(a)은 유효유전율 해석에 사용한 Gyroid 단위 cell 모델을 나타내며, Fig. 3(b)은 주기 경계조건과 전자기파 입사 조건이 적용된 유효유전율 해석 모델을 나타낸다.

2.3 전자기 해석

2.3.1 RCS 해석 이론

RCS는 표적이 입사 전자기파를 레이더 수신 방향으로 산란시키는 능력을 등가 면적으로 나타낸 물리량이다. 이는 표적의 실제 투영 면적과 반드시 일치하지 않으며, 표적의 형상, 재료 물성, 전기적 크기, 주파수, 편파 및 입사각에 따라 달라진다[35]. 또한 RCS는 레이더 관점에서 표적의 탐지 가능성 또는 반사 특성을 정량화하는 지표로 사용된다. 원거리장에서 RCS는 입사 전력밀도와 산란 전력밀도의 비로 정의할 수 있으며, 표적에서 거리만큼 떨어진 관측점에서 RCS는 식 (10)에 나타낸 바와 같이 정의된다.

$$\sigma_{RCS} = \lim_{R_0 \to \infty} 4\pi R_0^2 \left(\frac{S_s}{S_i} \right) \tag{10}$$

여기서 σ_{RCS}는 RCS, R_0은 표적으로부터 관측점까지의 거리, S_i는 표적에 입사하는 전력밀도, S_s는 관측 방향으로 산란되는 전력밀도이다. 전력밀도는 전기장 세기의 제곱에 비례하므로, RCS는 식 (11)과 같이 입사 전기장과 산란 전기장의 관계로도 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{RCS} = \lim_{R_0 \to \infty} 4\pi R_0^2 \left(\frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} \right) \tag{11}$$

위 식에서 E_i는 입사 전기장, E_s는 산란 전기장을 의미한다. 즉, 동일한 입사 조건에서 관측 방향으로 산란되는 전기장 성분이 클수록 RCS는 증가한다. 본 연구에서 설계한 Luneburg Lens 반사체는 입사 전자기파를 Lens 후방의 PEC 반사면 부근으로 집속시키고, 반사된 전자기파가 입사 방향으로 재방사되도록 유도함으로써 후방 산란 성분을 증가시키는 구조이다[4].

RCS 해석에서는 절대 크기뿐만 아니라 주파수, 방위각, 고각 및 편파 조건에 따른 RCS 변화가 중요하다. 특히 반사체가 특정 방향으로 산란 에너지를 집중시키는 경우, 해당 방향에서의 monostatic RCS가 증가한다[31,33]. 금속 평판과 같은 이상적인 PEC 반사체는 정면 입사 조건에서 큰 RCS를 가질 수 있다. 면적 A를 갖는 평판형 PEC 표적의 원거리 정면 RCS는 식 (12)와 같이 근사할 수 있다.

$$\sigma_{RCS} = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} \tag{12}$$

이때, A는 반사면의 면적이고, λ는 자유공간 파장이다. 이를 통해 반사면의 전기적 크기가 증가할수록 정면 RCS가 증가함을 알 수 있다. 그러나 실제 반사체의 RCS는 단순한 반사면 면적만으로 결정되지 않는다. 입사파가 구조 내부에서 형성하는 전기장 분포, 반사면 위치, 반사파의 위상 조건 및 재방사 방향이 함께 영향을 미치기 때문이다. 따라서 Lens 기반 반사체에서는 Lens 내부의 유전율 구배와 PEC 반사면의 배치가 RCS 성능을 결정하는 주요 설계 인자가 된다. Luneburg Lens 기반 반사체의 RCS 출력 강화 원리는 전자기파의 집속과 재방사 과정으로 설명할 수 있다. 입사 평면파는 GRIN 유전율 분포를 갖는 Lens 내부를 통과하면서 Lens 후방의 특정 영역으로 집속된다. 이 집속 영역에 PEC 반사면을 배치하면, 집속된 전자기파는 반사면에서 반사된 후 다시 Lens를 통과하며 입사 방향으로 재방사된다. 이때 Lens는 입사 전자기파의 전파 경로를 제어하고, PEC 반사면은 집속된 전자기파를 후방 산란 성분으로 변환한다. 따라서 Luneburg Lens와 PEC 반사면이 결합된 구조는 별도의 능동 소자 없이 특정 관측 방향의 RCS를 증가시키는 수동형 RCS 출력 강화 반사체로 활용될 수 있다[6].

본 연구에서는 이러한 원리를 바탕으로 GRIN Gyroid Luneburg Lens와 PEC 반사판이 결합된 RCS 출력 강화 반사체를 설계하였다. 이후 전자기 해석에서는 monostatic RCS 조건을 적용하여 정면 및 방위각 변화에 따른 후방 산란 성능을 평가하였다.

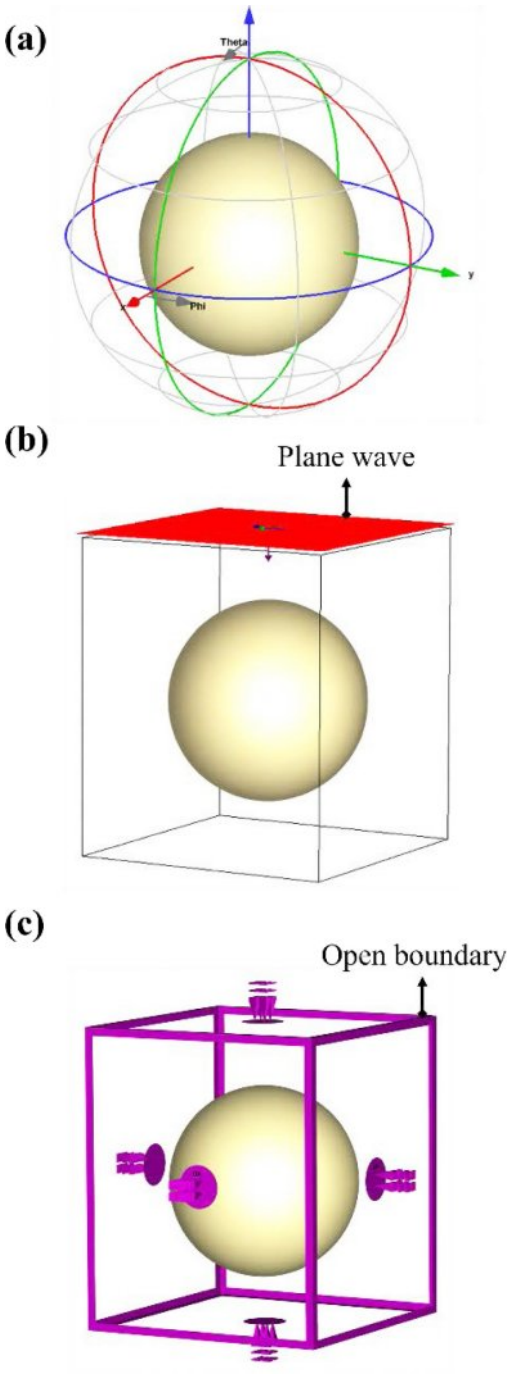


Fig. 4. Monostatic RCS simulation setup for the GRIN Luneburg Lens reflector: (a) azimuth and elevation coordinate system, (b) plane-wave incidence, and (c) boundary conditions

2.3.2 Monostatic RCS 해석 조건

본 연구에서는 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 후방 산란 성능을 평가하기 위해 상용 소프트웨어인 CST Studio Suite를 이용한 monostatic RCS 해석을 수행하였다. monostatic RCS는 송신 방향과 수신 방향이 동일한 조건에서 표적에 의해 입사 방향으로 되돌아오는 산란 성분을 평가하는 방법이다. 따라서 본 해석에서는 반사체에 평면파를 입사시키고, 동일한 방향으로 재방사되는 산란장을 계산하여 RCS를 산출하였다.

해석 모델은 GRIN Luneburg Lens와 후방 PEC 반사판으로 구성된다. 본 연구에서는 반사체의 정면 입사 조건을 $\theta = 0°$로 정의하고, 방위각 θ를 변화시키면서 입사각에 따른 RCS 응답을 비교한다. θ의 절댓값이 증가할수록 입사 평면파는 반사체의 정면 축에서 벗어나 방위각 방향으로 회전한 조건이 된다. 각 방위각 조건에서 송신 방향과 수신 방향을 동일하게 설정함으로써 monostatic 조건에서의 후방 산란 성능을 평가하였다.

전자기 해석에서는 전자기파 산란 문제를 모사하기 위해 평면파 입사 조건을 적용하였다. 해석에는 CST Studio Suite의 time domain solver를 사용하였다. 해석 영역의 외곽에는 자유공간에서의 전자기파 방사를 모사하기 위해 open boundary 조건을 적용하였다. 해석은 설계 주파수 대역인 X-band의 대표 조건에서 수행하였으며, 정면 및 방위각 변화에 따른 RCS 응답을 비교하여 입사 방향 변화에 따른 반사 특성을 평가하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 적용한 monostatic RCS 해석 조건을 나타낸다. 그림에서는 입사 평면파 방향, 산란장 관측 방향, 방위각 변화 조건 및 PEC 반사판이 포함된 GRIN Luneburg Lens 반사체 모델을 제시하였다.

3. GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체 설계

3.1 Gyroid Luneburg Lens 반사체 설계

3.1.1 설계 주파수 및 Lens 크기 선정

GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 설계 주파수는 X-band 영역을 기준으로 설정하였다. X-band는 레이더 표적 탐지 및 RCS 측정에서 주요하게 사용되는 주파수 대역으로, 본 논문에서는 해당 대역에서의 RCS 출력 강화 성능을 평가 대상으로 하였다. 설계 주파수와 Lens 크기는 목표 RCS 수준, 제작 가능성 및 측정 환경을 함께 고려하여 선정하였다. Luneburg Lens 반사체는 입사 전자기파를 Lens 후방의 반사판 부근으로 집속시키고, PEC 반사판을 통해 입사 방향으로 재방사시킴으로써 RCS를 증가시키는 구조이다. 이론적 최대 RCS는 2.3.1절에서 제시한 원형 PEC 평판의 정면 RCS 식을 기준으로 예측할 수 있다. 해당 식에 따르면 RCS는 반사면 면적의 제곱에 비례하고 파장의 제곱에 반비례하므로, 동일한 주파수에서는 반사체 직경이 증가할수록

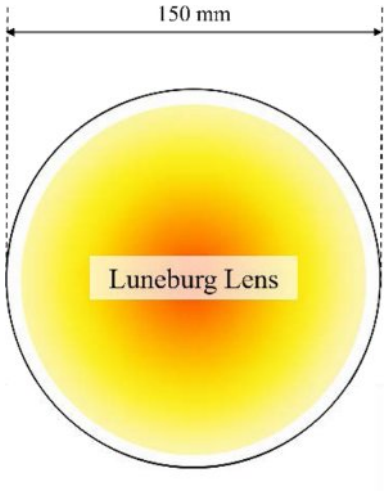


Fig. 5. GRIN Luneburg Lens reflector with a diameter of 150 mm

Table 1. Theoretical boresight RCS versus frequency and reflector diameter

Luneburg Reflector RCS (m^2)		Diameter (mm)					
Frequency (GHz)	Lambda (mm)	110	120	130	140	150	160
8	37.5	0.81	1.14	1.58	2.12	2.79	3.62
9	33.3	1.02	1.45	2.00	2.68	3.54	4.58
10	30.0	1.26	1.79	2.46	3.31	4.37	5.65
11	27.3	1.53	2.16	2.98	4.01	5.28	6.84
12	25.0	1.82	2.58	3.55	4.77	6.29	8.14

이론적 RCS가 증가하며, 동일한 직경에서는 주파수가 증가할수록 RCS가 증가한다. 설계 주파수와 반사체 직경 변화에 따른 이론적 RCS를 비교하기 위해 식 (12)를 이용하여 주파수 8–12 GHz 및 직경 110–160 mm 범위에서 RCS를 계산하였다. Table. 1는 각 주파수와 직경 조건에서 산출한 이론적 최대 RCS를 나타낸다. 계산 결과, X-band 내에서 직경이 증가할수록 RCS는 지속적으로 증가하며, 12 GHz 조건에서 직경 150 mm의 반사체는 약 6.29 m^2의 이론적 RCS를 갖는다. 해당 RCS 수준은 저피탐 형상이 적용되지 않은 일반 항공 표적의 레이더 반사 특성을 모사하기에 충분하다. 따라서 RCS 성능, FDM 3D 프린팅 제작성 및 측정 환경을 고려하여 Fig. 5와 같이 GRIN Luneburg Lens의 외경은 150 mm로 설정하였다.

3.1.2 3D 프린팅 열가소성 수지 선정

GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체는 FDM 방식의 3D 프린팅 공정을 이용하여 제작하였다. FDM 공정은 열가소성 수지를 이용하여 복잡한 형상을 구현할 수 있으므로, 내부 Gyroid 구조를 갖는 GRIN Lens 제작에 적용 가능하다. 본 절에서는 소재의 전자기 물성, 기계적 물성, 내열성, FDM 제작성 및 경제성을 고려하여 반사체 제작에 사용할 열가소성 수지를 선정하였다.

후보 소재는 FDM 3D 프린팅에 적용 가능한 ABS, PC, ULTEM 1010 및 ULTEM 9085로 설정하였다. 비교 항목은 밀도, 인장강도, 압축강도, 유리전이온도 및 상대유전율로 구성하였다. GRIN Luneburg Lens의 목표 유전율은 내부 Gyroid 구조의 체적분율을 조절하여 구현되므로, 모재의 상대유전율은 목표 유전율 범위를 구현할 수 있는 수준이어야 한다. 또한 반사체는 support 및 mount와 결합되어 운용 가속도 하중을 받을 수 있으므로, 소재의 기계적 강도와 형상 안정성도 함께 고려하였다. 후보 소재의 전자기 물성은 자유공간 측정 장비를 이용하여 평가하였다. Fig. 6는 유전율 측정을 위한 자유공간 측정 구성을 나타낸다. Fig. 6(a)는 실제 측정 장비 사진이며, 송수신 안테나 사이에 시험편을 배치하여 소재의 전자기 응답을 측정하였다. Fig. 6(b)는 자유공간 측정 개념도로, vector network analyzer와 focused horn antenna를 이용한 측정 구성을 나타낸다. 측정은 X-band 대역에서 수행하였으며, 각 소재의 주파수별 상대유전율 변화를 비교하였다. Fig. 7은 ABS, PC, ULTEM 1010 및 ULTEM 9085의 X-band 상대유전율 측정 결과를 나타낸다. 측정 결과, 후보 소재의 상대유전율은 X-band 범위에서 급격

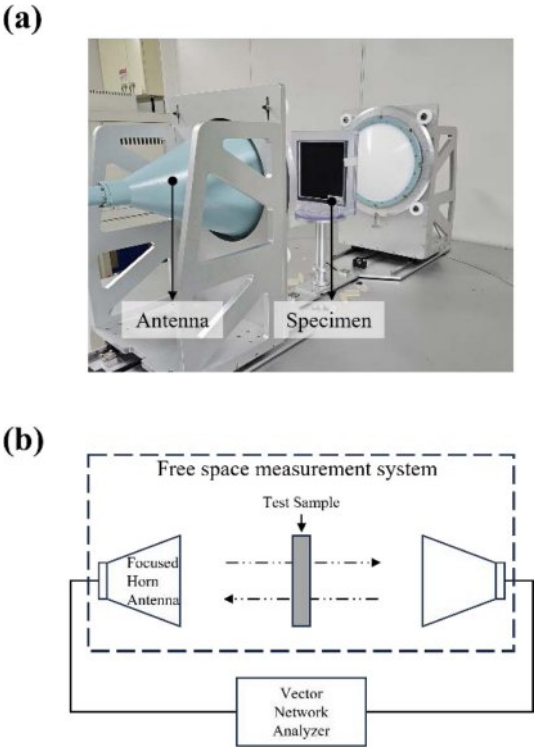


Fig. 6. Free-space permittivity measurement setup: (a) photograph of the measurement system and (b) schematic of the measurement configuration

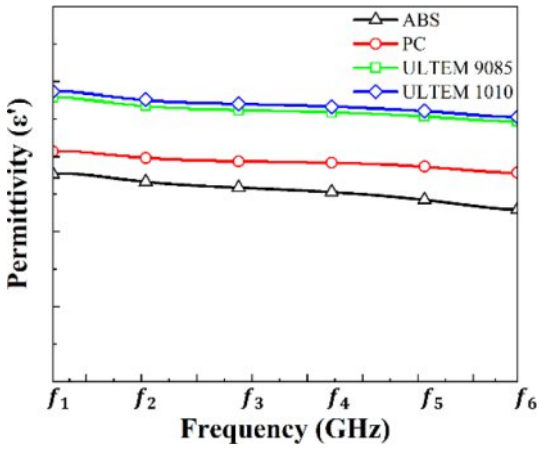


Fig. 7. Measured relative permittivities of thermoplastics

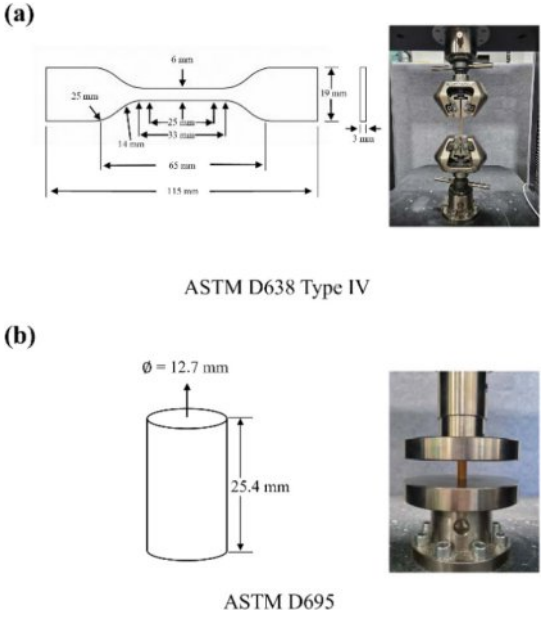


Fig. 8. Mechanical properties evaluation setup: (a) ASTM D638 Type IV and (b) ASTM D695

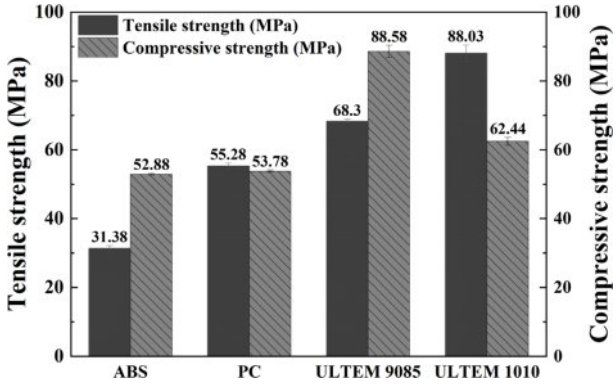


Fig. 9. Measured mechanical properties of thermoplastics

Table 2. Physical, mechanical, and electromagnetic properties of the materials

Materials	Density (g/cm^3)	Tensile Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)	T_g (°C)	Permittivity (@ 10 GHz)
ABS	0.948	31.38 ± 0.77	52.88 ± 0.26	108	2.527
PC	1.028	55.28 ± 0.85	53.78 ± 0.31	161	2.572
ULTEM 9085	1.110	68.30 ± 0.56	88.58 ± 1.76	177	2.701
ULTEM 1010	1.126	88.03 ± 2.38	62.44 ± 1.15	215	2.718

한 변화 없이 완만한 주파수 의존성을 보였다. 10 GHz 기준으로 ABS와 PC의 상대유전율은 유사한 수준을 나타냈으며, ULTEM 9085와 ULTEM 1010은 상대적으로 높은 값을 보였다.

기계적 물성은 인장시험과 압축시험을 통해 평가하였다. Fig. 8는 후보 소재의 기계적 물성 평가에 사용한 시험편 형상과 시험 구성을 나타낸다. Fig. 8 (a)는 ASTM D638 Type IV 기준 인장시험편 및 시험 구성을 나타내며, Fig. 8(b)는 ASTM D695 기준 압축시험편 및 시험 구성을 나타낸다[37, 38]. 각 시험을 통해 인장강도와 압축강도를 Fig. 9과 같이 산출하였으며, 유전율 측정 결과와 함께 Table. 2에 정리하였다. PC와 ULTEM 계열 소재는 ABS보다 높은 인장강도, 압축강도 및 유리전이온도를 나타내므로 기계적 성능과 열 안정성 측면에서 장점을 갖는다. 그러나 고성능 엔지니어링 플라스틱은 소재 비용이 높고 출력 조건이 비교적 까다로우며, 대형 곡면 구조와 다층 Gyroid 구조의 반복 제작 과정에서 공정 부담이 증가할 수 있다. ABS는 PC 및 ULTEM 계열 소재에 비해 기계적 강도와 열 안정성은 낮지만, 상대적으로 낮은 비용과 안정적인 제작성을 갖는다. 또한 10 GHz에서 2.527의 상대유전율을 가지므로, 공기와 ABS가 혼재된 Gyroid 구조의 체적분율을 조절함으로써 GRIN Luneburg Lens에 필요한 목표 유전율 범위를 구현할 수 있다. 본 연구의 설계 유전율 범위가 약 1.1–2.0 수준임을 고려하면, ABS 기반 다공성 구조는 체적분율 제어를 통한 층별 유전율 구현에 적합하다. 그러므로 전자기 물성, 기계적 물성, 3D 프린팅 제작성을 종합적으로 고려하여 ABS를 최종 소재로 선정하였다. 선정된 ABS의 유전율 및 기계적 물성은 이후 Gyroid 구조의 유효유전율 설계와 구조해석 입력 물성으로 사용하였다.

3.2 GRIN Gyroid Luneburg Lens 구조 설계

3.2.1 Gyroid 구조의 기하학적 특성

GRIN Luneburg Lens의 층별 목표 유전율을 구현하기 위한 내부 구조로 Gyroid 구조를 적용하였다. Gyroid 구조는 Schoen이 제안한 Triply Periodic Minimal Surface (TPMS)의 한 종류로, 3차원 공간에서 주기적으로 반복되는 자기 교

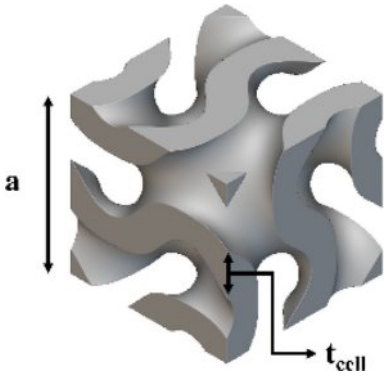


Fig. 10. Gyroid unit-cell model

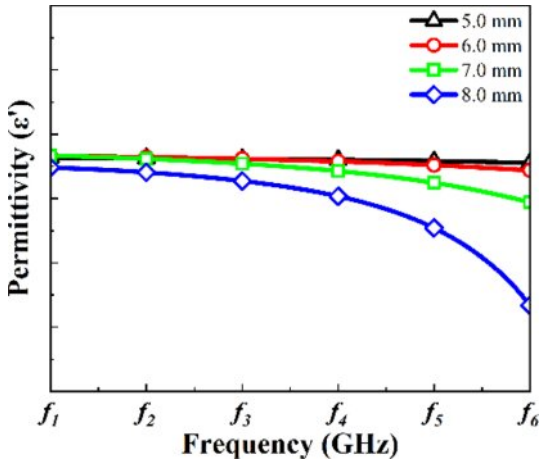


Fig. 11. Effective permittivities versus Gyroid unit-cell size in the X-band

차가 없는 연속 곡면 구조이다[39]. TPMS 구조는 평균 곡률이 0인 최소 곡면으로 정의되며, Gyroid 구조는 절점 연결부가 없는 연속적인 곡면 형상을 갖는다. 이러한 기하학적 특성으로 인해 Gyroid 구조는 내부 연결성이 유지되는 다공성 구조를 형성할 수 있으며, 체적분율 제어를 통해 등가 물성을 조절할 수 있다. Gyroid 구조는 삼각함수 기반의 implicit function으로 표현할 수 있으며, Gyroid surface는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sin x\cos y + \sin y\cos z + \sin z\cos x = 0 \tag{13}$$

위 식에서 x, y, z는 Gyroid surface를 정의하는 공간 좌표이다. 식 (13)은 Gyroid 구조가 세 방향으로 주기성을 갖는 연속 곡면임을 나타내며, 해당 곡면을 기준으로 고체 영역과 공극 영역을 형성할 수 있다.

본 논문에서는 Gyroid surface에 벽 두께를 부여한 sheet-type Gyroid 구조를 사용하였다. Fig. 10은 Gyroid 구조의 단위 cell의 모델링을 나타낸다. 단위 cell 크기는 a로 정의하였으며, Gyroid 곡면에 부여되는 벽 두께는 로 t_{cell} 정의하였다. 단위 cell 크기 a는 Gyroid 구조가 반복되는 기본 길이를 의미하며, t_{cell}은 Gyroid 구조의 곡면을 기준으로 형성되는 고체 영역의 두께를 의미한다.

3.2.2 GRIN Gyroid Luneburg Lens 층별 설계 유전율 산출

Gyroid 구조를 GRIN Lens의 등가 유전체로 적용하기 위해서는 단위 cell 크기 선정이 중요하다. 유효매질 이론에서는 주기 구조의 단위 길이가 작동 파장에 비해 충분히 작은 경우 등가 물성 기반의 균질화 해석을 적용할 수 있다[42, 43]. 반대로 단위 cell 크기가 작동 파장에 대해 상대적으로 증가하면 구조 내부의 공간 분산 영향이 커질 수 있으며, 추출된 유효유전율의 주파수 의존성이 증가할 수 있다[43]. 이를 고려하여 Gyroid 구조를 층별 등가 유전율로 적용하기 위해서는 X-band 대역에서 유효유전율이 안정적으로 유지되는 단위 cell 크기를 선정할 필요가 있다. 단위 cell 크기에 따른 유효유전율 안정성을 비교하기 위해 5.0 mm, 6.0 mm, 7.0 mm 및 8.0 mm의 Gyroid 단위 cell을 대상으로 CST Studio Suite 기반 유효유전율 해석을 수행하였다. 해석에 적용한 모재는 ABS이며, 12 GHz에서 복소 상대유전율은 2.48−j0.012로 설정하였다. 각 조건에는 동일한 체적분율과 동일한 모재 물성을 적용하였으며, 8–12 GHz 범위에서 추출된 유효유전율의 실수부 변화를 비교하였다. Fig. 11은 단위 cell 크기에 따른 X-band 유효유전율 해석 결과를 나타낸다.

해석 결과, 단위 cell 크기가 증가할수록 주파수에 따른 유효유전율 감소 폭이 커지는 경향을 보였다. 5.0 mm 단위 cell은 8–12 GHz 범위에서 유효유전율 변화율이 0.1% 미만으로 나타나 가장 작은 주파수 의존성을 보였다. 반면 6.0 mm, 7.0 mm 및 8.0 mm 조건에서는 단위 cell 크기가 증가함에 따라 변화폭이 점차 증가하였다. FDM 방식의 3D 프린팅의 제작성 측면에서도 5.0 mm 단위 cell은 최외곽층의 낮은 체적분율을 구현할 때 노즐 직경과 벽 두께 제한을 만족하는 최소 설계 크기에 해당한다. 5.0 mm보다 작은 단위 cell은 최외곽층 Gyroid 형상의 연속성과 출력 재현성 확보가 제한적이며, 이보다 큰 단위 cell은 유효유전율의 주파수 의존성이 증가하였다. 최종적으로 유효유전율의 주파수 안정성과 FDM 제작 한계를 함께 고려하여 Gyroid 단위 cell 크기를 5.0 mm로 설정하였다.

2.2.1절에서 설정한 목표 유전율 분포를 기준으로 GRIN Gyroid Luneburg Lens의 반경 방향 설계 유전율을 산출하였다. 목표 유전율 분포는 설계 주파수 대역과 전체 반사체의 형상 조건을 고려하여 설정하였으며, 이상적인 Luneburg Lens의 연속적인 유전율 변화를 실제 제작 가능한 이산형 GRIN 구조로 근사하였다. 이를 위해 Lens 내부를 복수의 반경 방향 영역으로 구분하고, 각 영역에는 해당 위치의 유전율 변화 경향을 대표하는 설계 상대유전율을 부여하였다.

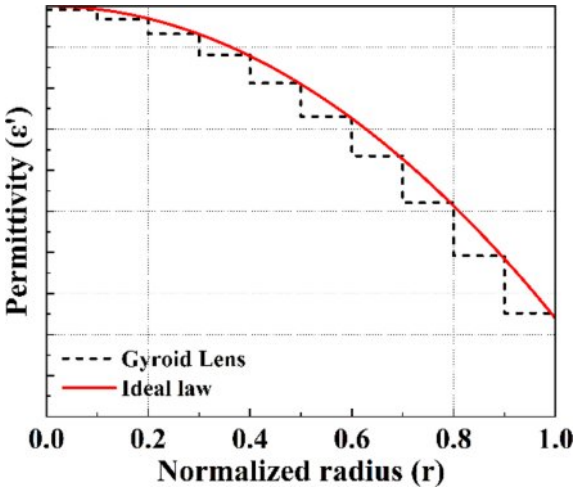


Fig. 12. Layer-wise permittivity profile of the GRIN Gyroid Luneburg Lens

Fig. 12은 정규화된 반경 위치에 따른 목표 유전율의 상대적 변화 경향을 나타낸다. 반경 위치는 전체 Lens 반경을 기준으로 정규화하였으며, 목표 유전율은 설계 범위 내 최솟값과 최댓값을 기준으로 나타내었다. 설계 유전율은 Lens 외곽부에서 상대적으로 낮은 값을 갖고 중심부로 갈수록 점진적으로 증가하도록 설정하여, 이상적인 Luneburg Lens의 반경 방향 GRIN 특성을 근사하였다.

각 반경 방향 영역의 설계 유전율은 2.2.2절의 이론적 예측과 2.2.3절의 Gyroid 단위 cell 해석 결과를 바탕으로 대응되는 체적분율로 변환하였으며, 산출된 설계 유전율은 이후 Gyroid 구조의 체적분율과 기하학적 변수를 결정하고, Lens 내부에 공간적으로 변화하는 유효유전율 분포를 구현하기 위한 기준으로 사용하였다.

3.3 GRIN Gyroid 반사체 구조 설계

3.3.1 GRIN Gyroid Luneburg Lens 형상 설계

GRIN Gyroid Luneburg Lens의 형상 설계는 nTop 소프트웨어를 이용하였다. nTop은 implicit modeling 기반의 형상 생성이 가능하므로, 반복적인 곡면 구조를 갖는 Gyroid 형상을 설계하고 체적분율을 제어하는 데 적합하다. 본 연구에서는 앞 절에서 설정한 반경 방향의 목표 유전율 변화와 이에 대응하는 체적분율을 바탕으로, Lens 내부에 서로 다른 기하학적 특성을 갖는 Gyroid 구조를 배치하였다.

Lens 형상은 구형 구조를 기준으로 구성하였으며, 내부를 복수의 반경 방향 영역으로 구분하였다. 각 영역에는 목표 유전율에 대응하는 체적분율을 부여하고, 이를 구현하기 위해 Gyroid 구조의 벽 두께를 조절하였다. 단위 cell 크기는 Lens 내부에서 일정하게 유지하였으며, 반경 방향의 체적분율 변화는 Gyroid 구조의 기하학적 변화를 통해 구현하였다. 이를 통해 Lens 외곽부에서 중심부로 갈수록 유효유전율이 점진적으로 증가하는 GRIN 분포를 구성하였다.

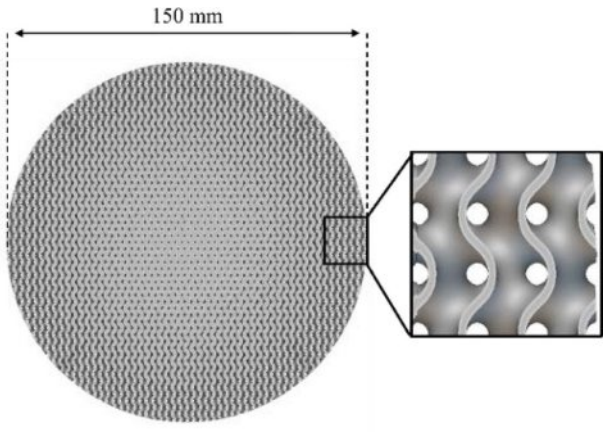


Fig. 13. Final geometry of the GRIN Gyroid Luneburg Lens

Fig. 13는 설계된 GRIN Gyroid Luneburg Lens의 형상과 내부 Gyroid 구조의 배치 개념을 나타낸다. Lens 내부의 Gyroid 구조는 반경 방향 위치에 따라 서로 다른 체적분율을 갖도록 구성하였으며, 인접한 영역 사이에서 구조가 연속적으로 연결되도록 설계하였다. 각 영역은 별도 부품으로 분리하지 않고 하나의 연속 형상으로 구성함으로써, 조립 과정에서 발생할 수 있는 위치 오차와 접합 오차를 줄이고 FDM 3D 프린팅 공정에서 전체 Lens를 일체형으로 출력할 수 있도록 하였다. 설계된 GRIN Gyroid Luneburg Lens는 반경 방향의 체적분율 변화를 반영하면서도 단일 소재 기반의 연속 구조물로 제작할 수 있는 형상을 갖는다.

3.3.2 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체 설계

GRIN Gyroid Luneburg Lens의 RCS 출력 강화 성능을 구현하기 위해 Lens 후방에 PEC 반사판을 배치하고, 이를 지지하기 위한 support 및 mount 구조를 함께 구성하였다. 반사체는 GRIN Gyroid Lens, PEC 반사판, support 및 mount로 이루어지며, 각 구성요소는 전자기파의 집속 및 재방사 기능과 전체 구조의 조립·지지 조건을 함께 고려하여 배치하였다.

PEC 반사판은 Lens를 통과하여 후방으로 집속된 전자기파를 입사 방향으로 재방사시키기 위한 구성요소이다. 반사판의 형상과 배치는 설계 주파수 대역과 입사 방향 변화에 따른 반사 특성을 고려하여 설정하였다. Support는 GRIN Gyroid Lens와 PEC 반사판을 mount에 연결하고, 각 구성요소 사이의 상대적인 위치를 유지하도록 설계하였다.

Support는 반사체의 형상 대칭성을 유지하면서 Lens와 PEC 반사판을 안정적으로 지지할 수 있도록 대칭적으로 배치하였다. Mount는 반사체 하부에서 GRIN Gyroid Lens, PEC 반사판 및 support가 결합된 전체 구조를 지지하도록 구성하였다. 또한 각 구성요소가 조립된 상태에서 설계된 상대 위치를 유지할 수 있도록 support와 mount의 형상을 설정하였다.

Table 3. FDM 3D printing process

Parameters	Values
Material	ABS–M30
Nozzle type	T16
Nozzle diameter (mm)	0.254
Nozzle temperature (°C)	220
Chamber temperature (°C)	92

3.4 FDM 기반 3D 프린팅 공정 및 제작

3.4.1 3D 프린팅 제작 공정 조건

GRIN Gyroid Luneburg Lens는 FDM 방식의 산업용 3D 프린터인 Fortus 450mc를 이용하여 제작하였다. 제작 소재는 ABS–M30으로 선정하였으며, T16 노즐을 사용하였다. T16 노즐의 직경은 0.254 mm이고, 제작 시 노즐 온도와 챔버 온도는 각각 220°C 및 92°C로 설정하였다. 설계된 Lens는 층별 체적분율이 서로 다른 Gyroid 내부 구조를 포함하므로, 출력 과정에서 벽 두께와 내부 형상 재현성이 중요하다. 특히 외곽층은 낮은 체적분율로 인해 상대적으로 작은 벽 두께를 가지므로, 노즐 직경과 적층 안정성을 고려해야 한다. 이에 따라 5.0 mm 단위 cell 크기와 층별 벽 두께 조건을 적용하여 전체 Lens가 하나의 연속 구조로 출력될 수 있도록 제작 조건을 설정하였다. Table. 3은 GRIN Gyroid Luneburg Lens 제작에 적용한 FDM 3D 프린팅 공정 조건을 나타낸다.

3.4.2 GRIN Gyroid Luneburg Lens 제작

앞 절에서 정의한 설계 형상과 공정 조건을 바탕으로 GRIN Gyroid Luneburg Lens를 FDM 방식으로 3D 프린팅하여 제작하였다. 제작된 Lens는 외경 150 mm의 구형 형상을 가지며, 내부에는 5.0 mm 단위 cell 기반의 Gyroid 구조가 적용되었다. 각 층은 별도 부품으로 분리하지 않고 하나의 연속 구조로 출력되도록 구성하였다. Fig. 14은 제작된 GRIN Gyroid Luneburg Lens의 형상을 나타낸다. 제작 결과, Gyroid 패턴이 Lens 표면 전반에 걸쳐 형성되었으며, 층별 체적분율 차이를 갖는 GRIN Gyroid 구조가 일체형으로 구현되었다. 설계 단계에서 렌즈와 서포트를 포함한 예측 질량은 약 730 g이었으나, 동일한 구성요소를 기준으로 측정한 실제 제작 질량은 1149.4 g으로 나타났다. 이는 설계 예측값 대비 419.4 g, 약 57.5% 증가한 결과이다.

본 연구에서는 복잡한 Gyroid 내부 구조를 제작하기 위해 두 가지 슬라이싱 방식을 검토하였다. 첫 번째 방식은 설계 형상의 재현성을 우선하는 방식이었으나, 실제 프린팅 과정에서 제작이 불가능한 문제가 발생하였다. 이에 따라 제작 구현성을 고려하여 중심부에서 시작하는 출력 경로 기반의 두 번째 슬라이싱 방식을 적용하였다. 이러한 출력 방식은 설계 형상과 실제 적층 형상 사이에 차이를 발생시킬 수 있으며, 재료 사용량 및 최종 제작 질량에도 영향을 미칠 가능성이 있다. 다만 설계 및 실제 제작 질량은 모두 렌즈와 서포트를 합산한 값이므로, 해당 질량 정보만으로는 각 구성요소의 질량 증가 기여도나 렌즈 내부의 층별 체적분율 변화를 직접 산출할 수 없다. 이를 확인하기 위해서는 실제 제작품의 내부 형상에 대한 정량적 계측과 추가적인 형상 분석이 필요하다.



Fig. 14. Photographs of the 3D-printed GRIN Gyroid Luneburg Lens

4. 성능 평가 및 해석 결과

4.1 전자기 해석

4.1.1 유효유전율 적용 Luneburg Lens 반사체 RCS 해석

본 절에서는 반경 방향으로 이산화된 유효유전율을 적용한 Luneburg Lens 반사체의 RCS 해석 결과를 나타내었다. 해석 모델은 GRIN Lens와 PEC 반사판으로 구성하였으며, 각 반경 방향 영역에는 Gyroid 구조의 체적분율에 대응하는 유효유전율을 균질 유전체 물성으로 적용하였다. 이를 통해 실제 Gyroid 형상을 직접 반영하기에 앞서, GRIN 유전율 분포의 근사 정도에 따른 RCS 출력 강화 성능을 비교하였다. RCS 해석은 상용 소프트웨어인 CST Studio Suite를 이용하여 수행하였으며, monostatic RCS 해석 조건은 2.3.2절에서 제시한 조건과 동일하게 적용하였다. 해석은 X-band 내 대표 주파수에서 수행하였으며, 방위각을 변화시키면서 입사 방향에 따른 후방 산란 성능을 평가하였다. 비교 대상은 반경 방향 유전율 분포의 분할 수준이 서로 다른 두 모델로 설정하였으며, 각각 Case A와 Case B로 구분하였다. Case B는 Case A보다 반경 방향 유전율 분포를 세분화하여 이상적인 연속 GRIN 분포에 대한 근사도를 향상시킨 모델이다. 두 모델에는 동일한 Lens 외형과 PEC 반사판 조건을 적용하였다. Fig. 15는 유효유전율을 적용한 Luneburg Lens 반사체의 monostatic RCS 해석 결과를 나타낸다. Fig. 15(a)는 Case A, Fig. 15(b)는 Case B의 방위각에 따른 RCS 해석 결과를 나타낸다. 두 모델 모두 해석한 입사각 범위에서 RCS

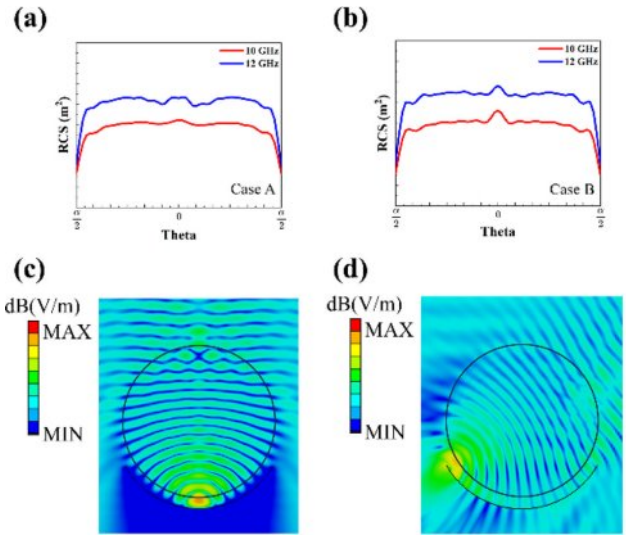


Fig. 15. Monostatic RCS and electric-field simulation results of the Luneburg Lens reflector with effective permittivity: (a) RCS of the case A reflector (b) RCS of the case B reflector, (c) electric-field distribution of the case B reflector at θ = 0°, and (d) electric-field distribution at θ = 60°

출력 강화 효과를 나타냈으며, 높은 주파수 조건에서 상대적으로 높은 RCS 응답을 보였다. 이는 동일한 반사체 크기에서 주파수가 증가할수록 전기적 크기가 증가하기 때문으로 해석된다. Case B는 Case A보다 입사각 범위 전반에서 상대적으로 높은 RCS 수준을 나타냈다. 이는 Case B에서 반경 방향 유전율 분포가 보다 세분화됨에 따라 계단형 유전율 분포와 이상적인 연속 GRIN 분포 사이의 근사 오차가 감소하였기 때문으로 판단된다. 이에 따라 Lens 내부에서의 전자기파 진행 경로와 집속 특성이 개선되고, PEC 반사판을 통한 후방 재방사 특성이 상대적으로 향상된 것으로 해석된다. 이에 따라 Lens 내부에서의 전자기파 집속과 PEC 반사판을 통한 재방사 특성이 상대적으로 효과적으로 구현된 것으로 해석된다. Fig. 15(c)와 Fig. 15(d)는 Case B의 대표적인 정면 및 경사 입사 조건에서의 정규화 전기장 분포를 나타낸다. 정면 입사 조건에서는 입사 전자기파가 Lens 내부에서 굴절되어 반사판 인접 영역으로 집중되는 양상이 나타났다. 이는 GRIN 유전율 분포가 입사파의 진행 경로를 제어하여 반사판 방향으로 전자기 에너지를 유도하고 있음을 보여준다. 경사 입사 조건에서는 정면 입사 조건과 비교하여 전기장 집중 영역이 입사 방향에 따라 이동하였으나, 입사파가 Lens 내부에서 굴절되어 반사판 인접 영역으로 유도되는 전반적인 경향은 유지되었다. 따라서 전기장 분포를 통해 제안한 유효유전율 분포가 다양한 입사 조건에서 전자기파의 집속과 재방사 기능을 구현할 수 있음을 확인하였다.

GRIN 렌즈 적용에 따른 RCS 증가 효과를 평가하기 위해

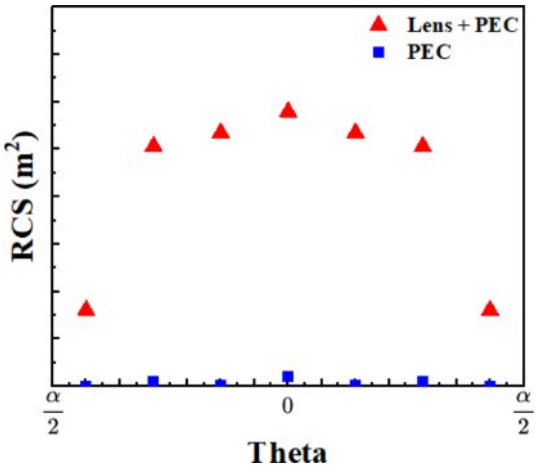


Fig. 16. Comparison of simulated monostatic RCS for the GRIN Luneburg Lens reflector and PEC-only reflector

PEC 단독 모델과 유효유전율을 적용한 GRIN Luneburg 렌즈 반사체의 monostatic RCS를 비교하였다. 두 모델에는 동일한 PEC 반사판 형상과 위치 및 전자기 해석 조건을 적용하였다. Fig. 16은 렌즈 적용 유무에 따른 RCS 비교 결과를 나타낸다. 해석 결과, 검토한 방위각 조건에서 GRIN 렌즈 적용 모델이 PEC 단독 모델보다 높은 RCS를 나타냈다. 특히 정면 입사 조건(θ = 0°)에서는 약 5.60 m²의 RCS 증가가 확인되었다.

4.1.2 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체 RCS 해석

본 절에서는 실제 Gyroid 형상을 반영한 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 RCS 해석을 수행하고, 이를 앞서 4.1.1절에서 제시한 유효유전율 적용 모델과 비교하였다. 유효유전율 모델은 반경 방향으로 변화하는 유효유전율 분포를 균질 유전체로 적용한 해석 모델이며, Gyroid 모델은 이에 대응하는 실제 Gyroid 내부 형상을 포함한 모델이다. 따라서 두 모델의 비교를 통해 유효유전율 기반의 설계 특성이 실제 Gyroid 형상에서도 유지되는지 검토하였다. RCS 해석은 CST Studio Suite를 이용하여 수행하였으며, 해석 조건은 2.3.2절에서 제시한 monostatic RCS 해석 조건과 동일하게 적용하였다. 유효유전율 모델은 입사 방위각에 따라 연속적으로 해석하였으며, Gyroid 모델은 높은 형상 복잡도와 해석 시간 증가를 고려하여 대표적인 방위각 조건에서 RCS 결과를 확인하였다. 두 모델의 비교는 X-band 내 대표 주파수 조건에서 수행하였다. Fig. 17은 유효유전율 적용 Luneburg Lens 반사체와 실제 Gyroid 형상이 적용된 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 방위각에 따른 monostatic RCS 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 분석 결과, Gyroid 모델은 대표적인 입사 조건에서 유효유전율 모델과 유사한 RCS 수준과 변화 경향을 나타냈다. 이는 유효유전율을 적용한 등가 모델의 전자기적 응답이 실제 Gyroid 형상에

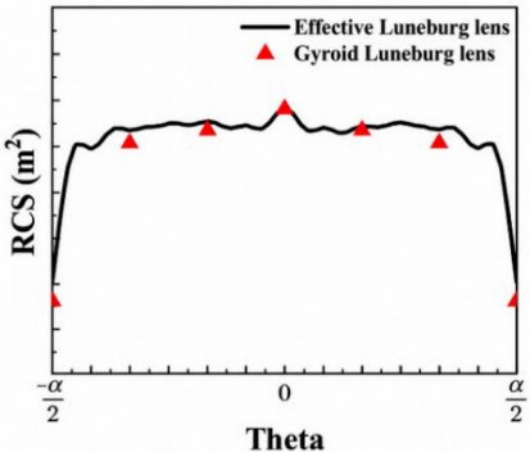


Fig. 17. Comparison of RCS simulation results for GRIN Luneburg Lens reflector models

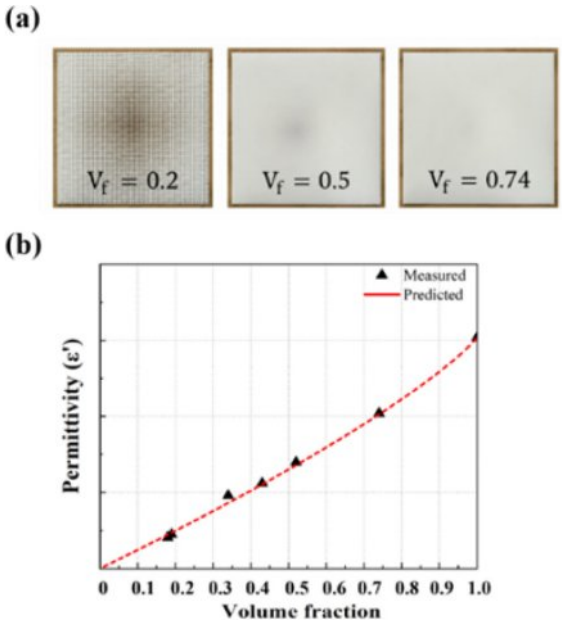


Fig. 18. Effective permittivity of porous ABS specimens at different volume fractions: (a) test specimens and (b) comparison of predicted and measured values

서도 전반적으로 유지됨을 의미한다. 일부 방위각 조건에서는 두 모델 간 RCS 차이가 나타났으며, 이는 균질 유전체로 표현된 유효유전율 모델과 실제 주기 형상을 포함하는 Gyroid 모델의 형상 표현 방식 차이에 기인한 것으로 판단된다. 특히 Gyroid 구조는 곡면 형상을 삼각형 표면 요소로 이산화하여 해석 모델을 구성하므로, 형상 근사 오차와 mesh 품질이 모델 간 RCS 편차에 영향을 줄 수 있다. 그러나 대표적인 방위각 조건에서 Gyroid 모델과 유효유전율 모델의 RCS 변화 경향이 유사하게 나타난 점은 유효유전율 기반의 설계 방법을 실제 Gyroid 구조에 적용하는 접근의 타당성을 뒷받침한다. 따라서 실제 Gyroid 형상을 적용한 GRIN Luneburg Lens 반사체가 유효유전율 모델의 설계 의도를 유지하면서 RCS 출력 강화 특성을 구현할 수 있음을 확인하였다.

4.2 전자기 물성 및 RCS 측정

4.2.1 유효유전율 측정

GRIN Gyroid Luneburg Lens의 층별 유전율은 ABS와 공기로 구성된 다공성 구조의 체적분율을 조절하여 구현하였다. 이에 따라 본 절에서는 체적분율 변화에 따른 ABS 기반 다공성 시편의 유효유전율을 측정하고, 2.2.2절에서 제시한 Knott equation 기반 예측 결과와 비교하였다. 유효유전율은 앞 절에서 설명한 자유공간측정장비를 이용하여 측정하였다. ABS 소재를 사용하여 서로 다른 infill ratio를 갖는 평판 시편을 제작하였으며, 제작된 시편의 정규화 infill ratio는 0.175, 0.188, 0.376, 0.438, 0.530, 0.730 및 1.000 이다.

Fig. 18은 ABS 다공성 시편의 infill ratio별 유효유전율 측정 결과를 나타낸다. Fig. 18(a)은 유효유전율 측정에 사용한 대표 시편을 나타내며, Fig. 18(b)은 Knott equation 기반 예측값과 측정값을 비교한 결과이다. 측정 결과, ABS 기반 다공성 시편의 유효유전율은 infill ratio가 증가함에 따라 점진적으로 증가하였으며, 측정값은 Knott equation 기반 예측 곡선과 전반적으로 잘 일치하였다. 예측값과 측정값의 최대 오차는 약 2% 수준으로 나타나, 체적분율 변화에 따른 유효유전율 예측의 타당성을 확인하였다. 따라서 Knott equation 기반 유효유전율 예측은 GRIN Gyroid Luneburg Lens의 층별 유전율 설계에 적용 가능한 수준의 정확도를 갖는 것으로 판단된다. 이후 층별 설계 유전율에 대응하는 Gyroid 체적분율 및 벽 두께는 해당 예측 관계를 기반으로 산정하였다.

4.2.2 RCS 측정 조건

제작된 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 RCS 출력 강화 성능을 검증하기 위해 한국항공우주산업(주)에서 보유한 MF-EMS (Multi-Functional Electromagnetic Measurements System)를 이용하여 RCS를 측정하였다. MF-EMS는 전자파 무반사 환경에서 표적의 산란 특성을 측정하기 위한 시스템으로, C-band, X-band 및 Ku-band 대역에서 운용 가능하다. 본 연구에서 제작된 3D 프린팅 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체를 대상으로 X-band 대역에서 RCS를 측정하였다. Fig. 19은 RCS 측정 시스템인 MF-EMS의 전체 측정 환경에 대한 모식도로, 송수신 안테나, RF absorber, EL/Az positioner, antenna rail 및 controller로 구성된다. 측정 시편은 실제 측정 환경에서 Lens와 PEC 반사판이 일체화된 상태로 배치하였으며, 방위각 변화에 따른 monostatic RCS를 측정하였다. 방위각 측정 범위는 −75°에서 +75°까지로 설정하였으며, 정면 방향뿐만 아니라 넓은 방위각 범위에서의 RCS 변화를 확인하였다. 측정 결과는

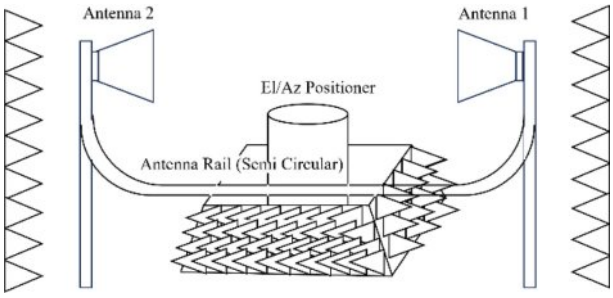


Fig. 19. RCS measurement of the GRIN Gyroid Luneburg Lens reflector; MF–EMS measurement system

이후 CST 해석 결과와 비교하여, 제작된 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 RCS 출력 강화 성능을 평가하였다.

4.2.3 RCS 측정 결과

Fig. 20은 제작된 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 RCS 측정 결과를 전자기 해석 결과와 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 20(a)는 입사각에 따른 해석 및 측정 RCS의 절대값을 비교한 결과이다. 대표 입사 조건에서 측정 RCS와 해석 RCS의 비율을 별도로 계산한 결과, 측정값은 해석값의 80.3% 수준으로 나타나 19.7% 낮은 값을 보였다. 정량적인 차이는 확인되었으나, 정면 입사 조건에서 상대적으로 높은 RCS가 형성되고 방위각이 증가함에 따라 RCS가 감소하는 전반적인 응답 경향은 해석 결과와 유사하게 나타났다. 해석과 측정 결과의 차이에 영향을 미칠 수 있는 요인은 제작 과정에서의 형상 편차, 실제 소재의 유전율 편차 및 보조 구조물의 산란 영향으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 복잡한 Gyroid 내부 구조의 제작 구현성을 고려하여 출력 경로 기반의 슬라이싱 방식을 적용하였다. 이 과정에서 설계 형상과 실제 적층 형상 사이에 차이가 발생할 수 있으며, 벽 두께 및 체적분율의 편차는 설계된 GRIN 유전율 분포와 전자기파 집속 특성에 영향을 미칠 가능성이 있다. 또한 전자기 해석에 적용한 재료 물성과 실제 제작품의 유전율 사이에 차이가 발생할 수 있다. 본 연구의 다공성 ABS 평판 시편에서는 유효유전율 측정값과 이론적 예측값이 최대 약 2% 이내의 차이를 나타냈으나, 이는 평판 시편을 대상으로 확인한 결과이므로 실제 제작된 렌즈 전체의 유전율 분포를 직접 나타내지는 않는다. 실제 반사체에 적용된 support와 mount 역시 전자기파의 산란에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 보조 구조물은 렌즈 및 PEC 반사판 주변의 전자기장 분포와 산란 특성을 변화시킬 가능성이 있다. 따라서 해석과 측정 결과 사이의 차이는 이러한 요인들이 복합적으로 작용했을 가능성을 고려할 필요가 있다. 향후 실제 출력 형상에 대한 정량적 계측과 재료 물성 및 보조 구조물의 영향을 분리한 전자기 해석을 통해 각 요인이 RCS 성능에 미치는 영향을 구체적으로 검토할 필요가 있다. Fig. 20(b)는 측정을 통해 획득한 거리–횡거리 평면에서의 산란 강도 분포

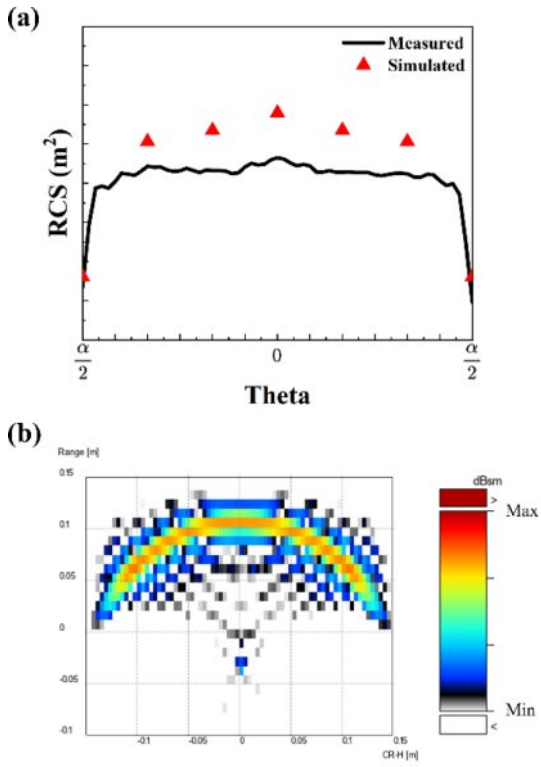


Fig. 20. RCS measurement results of the GRIN Gyroid Luneburg Lens reflector: (a) comparison of simulated and measured RCS and (b) RCS distribution

를 나타낸다. 해당 결과는 제작된 반사체의 공간적인 산란 응답을 보여주며, 입사각에 따른 RCS의 정량적 비교는 Fig. 20(a)를 기준으로 수행하였다. 이상의 결과를 종합하면, 제작 반사체의 측정 RCS는 대표 입사 조건에서 해석 결과 대비 19.7% 낮게 나타났으나, 방위각에 따른 RCS 변화 경향과 주요 후방 산란 특성은 해석 결과와 유사하였다. 이러한 결과는 제안한 3D 프린팅 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 전자기적 구현 가능성을 뒷받침한다.

5. 결 론

본 논문에서는 X-band 대역에서 수동형 RCS 출력 강화를 구현하기 위한 3D 프린팅 기반 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체를 설계하고, 전자기 해석과 유효유전율 및 RCS 측정을 통해 설계 방법의 타당성과 전자기적 성능을 평가하였다. 제안한 반사체는 GRIN Gyroid Luneburg Lens와 PEC 반사판을 중심으로 구성되며, 단일 열가소성 소재로 이루어진 Gyroid 구조의 체적분율을 반경 방향으로 제어하여 요구되는 GRIN 유전율 분포를 구현하였다. 구성요소의 조립성과 FDM 공정의 적용성도 함께 고려하여 일체형 제작이 가능한 구조로 설계하였다. 이에 따라 복수의 유전체 소재를 적층하지 않고도 단일 소재의 기하학적 제어만으

로 공간적으로 변화하는 유효유전율 분포를 구현할 수 있었다.

Gyroid 구조의 체적분율과 유효유전율 간 상관관계는 이론적 예측, 단위 cell 전자기 해석 및 자유공간 유전율 측정을 통해 검토하였다. 유효유전율 측정 결과는 Knott equation 기반 예측값과 최대 약 2% 이내의 차이를 보였으며, 체적분율 제어를 통한 유효유전율 구현 방법의 타당성이 확인되었다. 또한 유효유전율을 적용한 등가 모델과 실제 Gyroid 형상을 반영한 전자기 해석 모델은 대표 입사 조건에서 유사한 RCS 응답과 방위각별 변화 경향을 나타냈다. 이는 등가 유전율을 기반으로 설정한 GRIN 설계 특성이 실제 Gyroid 구조에서도 전반적으로 유지됨을 의미하며, 유효유전율 등가 모델을 초기 설계 및 성능 예측에 활용할 수 있는 가능성을 뒷받침한다. 또한 유효유전율을 적용한 GRIN Luneburg Lens 반사체는 정면 입사 조건에서 PEC 단독 모델보다 약 5.60 m^2 높은 RCS를 나타내어, 해석을 통해 렌즈 적용에 따른 RCS 증가 효과를 확인하였다. 제작된 GRIN Gyroid Luneburg Lens 반사체의 RCS 측정값은 대표 입사 조건에서 해석 결과의 80.3% 수준으로 나타났으며, 해석값보다 19.7% 낮았다. 이러한 정량적 차이에 영향을 미칠 수 있는 요인으로는 FDM 제작 과정에서의 형상 편차, 실제 유전율 분포의 변화 및 보조 구조물의 산란 영향 등을 고려할 수 있다. 다만 본 연구에서는 각 요인의 기여도를 독립적으로 검증하지 않았으므로, 이를 정량적인 오차 원인으로 확정하기는 어렵다. 따라서 해석과 측정 간 정량적인 차이가 존재하였으나, 방위각에 따른 RCS 변화 경향과 주요 후방 산란 특성이 전반적으로 유사하게 나타나 제안한 반사체의 전자기적 구현 가능성을 확인하였다.

결과로부터 단일 소재 기반의 3D 프린팅 Gyroid 구조를 이용하여 GRIN 유전율 분포를 구현할 수 있으며, 제안한 반사체가 X-band 수동형 RCS 출력 강화 구조로 적용될 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 이론적 유효유전율 예측, 단위 cell 해석, 실제 Gyroid 형상 구현 및 RCS 측정을 연계했다는 점에서 공학적 의의가 있다

후 기

이 논문은 2026년도 과학기술정보통신부&방사청의 재원으로 한국연구재단 미래국방가교기술개발 사업(2710094349)과 2026년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2022R1A6A1A03056784).

REFERENCES

1. Lee, H., Kim, D., Park, W., and Choi, J., "Autonomous Collaboration Control for Manned-Unmanned Complex Systems and Its Compositions," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, Vol. 27, No. 6, 2024, pp. 772-783.
2. Wang, J., Liu, Y., and Song, H., "Counter-unmanned Aircraft System(s): State of the Art, Challenges, and Future Trends," *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 36, 2021, pp. 4-29.
3. Khawaja, W., Ezuma, M., Semkin, V., Erden, F., Ozdemir, O., and Guvenc, I., "A Survey on Detection, Classification, and Tracking of AAVs Using Radar and Communications Systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 28, 2026, pp. 3272-3310.
4. Vinogradov, S.S., Smith, P.D., Kot, J.S., and Nikolic, N., "Radar Cross-Section Studies of Spherical Lens Reflectors," *Progress in Electromagnetics Research,* Vol. 72, 2007, pp. 325-337.
5. Kim, K.W., "Characterizations of Spherical Luneburg Lens Antennas with Air-gaps and Dielectric Losses," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 1, 2001, pp. 11-17.
6. Jiao, X.H., Wan, G., Fu, B., and Chen, Y., "A Novel Retroreflective Planar Luneburg Lens for the Radar Cross Section Enhancement," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 32, No. 11, 2022, e23352.
7. Kadera, P., Sanchez-Pastor, J., Eskandari, H., Tyc, T., Sakaki, M., Schusler, M., Jakoby, R., Benson, N., Jimenez-Saez, A., Lacik, J., "Wide-angle Ceramic Retroreflective Luneburg Lens Based on Quasi-conformal Transformation Optics for mm-wave Indoor Localization," *IEEE Access*, Vol. 10, 2022, pp. 41097-41111.
8. Liang, C.S., Streater, D.A., Jin, J.M., Dunn, E., and Rozendal, T., "A Quantitative Study of Luneberg-Lens Reflectors," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 47, No. 2, 2005, pp. 30-42.
9. Liang, C.S., Streater, D.A., Jin, J.M., Dunn, E., and Rozendal, T., "Ground-Plane-Backed Hemispherical Luneberg-Lens Reflector," *IEEE Antennas and Propagation Magazine,* Vol. 48, No. 1, 2006, pp. 37-49.
10. Sakurai, H., Hashidate, T., Ohki, M., Motojima, K., and Kozaki, S., "Electromagnetic Scattering by the Luneberg Lens with Reflecting Cap," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, No. 2, 1998, pp. 94-96.
11. Shi, S.R., Wu, Y.M., Yu, H., Yang, S., and Wu, Q., "A Compact Ku-band Luneburg Lens Reflector Based on Metamaterial Structures," *2015 IEEE 4th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, 2015, pp. 219-220.
12. Bahr, R.A., Adeyeye, A.O., Van Rijs, S., and Tentzeris, M.M., "3D-Printed Omnidirectional Luneburg Lens Retroreflectors for Low-Cost mm-Wave Positioning," 2020 IEEE International Conference on RFID (RFID), 2020, pp. 1-7.
13. Baskov, K.M., Semenenko, V.N., Bobrovskii, S.Y., Poddubnii, D.Y., Yatsenko, V.V., and Furmanova, T.A., "Creating a Luneburg Lens by 3D Printing," 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2023, pp. 204-207.
14. Larimore, Z., Jensen, S., Good, A., Lu, A., Suarez, J., Mirotznik, M., "Additive Manufacturing of Luneburg Lens Antennas Using Space-filling Curves and Fused Filament Fabrication," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 66, 2018, pp. 2818-2827.
15. Larimore, Z., Jensen, S., Parsons, P., Good, B., Smith, K., Mirotznik,

M., "Use of Space-filling Curves for Additive Manufacturing of Three Dimensionally Varying Graded Dielectric Structures Using Fused Deposition Modeling," *Additive Manufacturing*, Vol. 15, 2017, pp. 48-56.
16. Liang, M., Ng, W.R., Chang, K., Gbele, K., Gehm, M. E., Xin, H., "A 3-D Luneburg Lens Antenna Fabricated by Polymer Jetting Rapid Prototyping," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 62, 2014, pp. 1799-1807.
17. Liu, P., Zhu, X., Zhang, Y., Li, J., Jiang, Z., "3D-printed Cylindrical Luneburg Lens Antenna for Millimeter-wave Applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, Vol. 30, 2020, e21994.
18. Munina, I., Grigoriev, I., O'donnell, G., Trimble, D., "A Review of 3D Printed Gradient Refractive Index Lens Antennas," *IEEE Access,* Vol. 11, 2023, pp. 8790-8809.
19. Zhang, S., Arya, R. K., Pandey, S., Vardaxoglou, Y., Whittow, W., Mittra, R., "3D-printed Planar Graded Index Lenses," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 10, 2016, pp. 1411-1419.
20. Biswas, S., Lu, A., Larimore, Z., Parsons, P., Good, A., Hudak, N., Garrett, B., Suarez, J., Mirotznik, M. S., "Realization of Modified Luneburg Lens Antenna Using Quasi-conformal Transformation Optics and Additive Manufacturing," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 61, 2019, pp. 1022-1029.
21. Biswas, S., and Mirotznik, M.S., "High Gain, Wide-angle QCTO-enabled Modified Luneburg Lens Antenna with Broadband Anti-reflective Layer," *Scientific Reports*, Vol. 10, 2020, 12646.
22. Wang, C., Wu, J., and Guo, Y.X., "A 3-D Printed Multibeam Dual Circularly Polarized Luneburg Lens Antenna Based on Quasi-icosahedron Models for Ka-band Wireless Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 68, 2020, pp. 5807-5815.
23. Giddens, H., and Hao, Y., "Multi-beam Graded Dielectric Lens Antenna from Multi-material 3-D Printing," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 68, 2020, pp. 6832-6837.
24. Li, X., Feng, R., Tan, Q., Yi, J., Wang, S., He, F., and Burokur, S.N., "Additively-Manufactured Broadband Metamaterial-Based Luneburg Lens for Flexible Beam Scanning," *Materials*, Vol. 17, No. 12, 2024, 2847.
25. Kim, W., Kim, J., Won, J., Yu, D., and Yoon, I.J., "Rapid Prototyping of Reduced-height Dielectric Lens with One-take 3D Printing for Antenna Directivity Enhancement," *Applied Sciences*, Vol. 12, 2022, 11811.
26. LaRocca, B.F., and Mirotznik, M.S., "Modeling the Performance Impact of Cubic Macro Cells Used in Additively Manufactured Luneburg Lenses," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, Vol. 37, 2022, pp. 1077-1088.
27. Saghlatoon, H., Honari, M.M., Aslanzadeh, S., and Mirzavand, R., "Electrically-small Luneburg Lens for Antenna Gain Enhancement Using New 3D Printing Filling Technique," *AEU–International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 124, 2020, Article No. 153352.
28. Kim, Y., Lee, J., Kim, J., et al., "Lightweight 3D-printed Fractal Gradient-Index Lens Antenna with Stable Gain Performance," *Fractal and Fractional*, Vol. 6, 2022, 551.
29. Nikolic, N., Kot, J.S., and Vinogradov, S., "Scattering by a Luneberg Lens Partially Covered by a Metallic Cap," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 21, No. 4, 2007, pp. 549-563.
30. Luneburg, R.K., Mathematical Theory of Optics, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, USA, 1966.
31. Morgan, S.P., "General Solution of the Luneberg Lens Problem," *Journal of Applied Physics*, Vol. 29, 1958, pp. 1358-1368.
32. Sochacki, J., "Exact Analytical Solution of the Generalized Luneberg Lens Problem," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 73, 1983, pp. 789-795.
33. Gray, D., Thornton, J., and Le Kernec, J., "Small Boat Retro-reflectors," Proceedings of the International Conference on Radar Systems (RADAR 2022), Edinburgh, UK, 2023.
34. Knott, E.F., "Dielectric Constant of Plastic Foams," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 41, 1993, pp. 1167-1171.
35. Knott, E.F., Shaeffer, J.F., and Tuley, M.T., Radar Cross Section, 2nd Ed., SciTech Publishing, Raleigh, USA, 2004.
36. Pouliguen, P., Hémon, R., Bourlier, C., Damiens, J., Saillard, J., "Analytical Formulae for Radar Cross Section of Flat Plates in Near Field and Normal Incidence," *Progress in Electromagnetics Research B,* Vol. 9, 2008, pp. 263-279.
37. ASTM International, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," ASTM D638-14, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2014.
38. ASTM International, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics," ASTM D695-15, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2015.
39. Schoen, A.H., Infinite Periodic Minimal Surfaces without Self-intersections, NASA Technical Note D-5541, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, USA, 1970.
40. Smith, D.R., Schultz, S., Markoš, P., and Soukoulis, C.M., "Determination of Effective Permittivity and Permeability of Metamaterials from Reflection and Transmission Coefficients," *Physical Review B,* Vol. 65, 2002, 195104.
41. Chen, X., Grzegorczyk, T.M., Wu, B.-I., Pacheco, J., and Kong, J.A., "Robust Method to Retrieve the Constitutive Effective Parameters of Metamaterials," *Physical Review E*, Vol. 70, 2004, 016608.
42. Smith, D.R., and Pendry, J.B., "Homogenization of Metamaterials by Field Averaging," *Journal of the Optical Society of America B*, Vol. 23, 2006, pp. 391-403.
43. Simovski, C.R., "On Electromagnetic Characterization and Homogenization of Nanostructured Metamaterials," *Journal of Optics*, Vol. 13, 2011, 013001.
44. Semkin, V., Haarla, J., Pairon, T., Slezak, C., Rangan, S., Viikari, V., and Oestges, C., "Analyzing Radar Cross Section Signatures of Diverse Drone Models at mm Wave Frequencies," *IEEE Access*, Vol. 8, 2020, pp. 48958–48969.
45. Tai, C. T., "The Electromagnetic Theory of the Spherical Luneberg Lens," *Applied Scientific Research, Section B*, Vol. 7, 1958,

pp. 113–130.
46. Rozenfeld, P., "The Electromagnetic Theory of Three-Dimensional Inhomogeneous Lenses," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 24, No. 3, 1976, pp. 365-370.
47. Silitonga, C.S., Sugano, Y., Sakurai, H., Ohki, M., and Kozaki, S., "Optimum Variation of the Luneberg Lens for Electromagnetic Scattering Calculations," *International Journal of Electronics*, Vol. 84, No. 6, 1998, pp. 625-633.
48. Sakurai, H., Ohki, M., Motojima, K., and Kozaki, S., "Scattering and Focusing Effect of Stepped Index Luneberg Lens," *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, Vol. 21, No. 10, 2000, pp. 1639-1652.
49. Lock, J.A., "Scattering of an Electromagnetic Plane Wave by a Luneburg Lens. III. Finely Stratified Sphere Model," *Journal of the Optical Society of America* A, Vol. 25, No. 12, 2008, pp. 2991-3000.
50. Zhu, X., Jin, Y., Ding, Y., Zou, Z., Qin, Z., and Yang, G., "Layered Optimization of Multi-spherical Lumber Lens," 2022 IEEE International Students' *Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, 2022, pp. 1-5.
51. Abueidda, D.W., Elhebeary, M., Shiang, C.S., Pang, S., Abu Al-Rub, R.K., and Jasiuk, I.M., "Mechanical Properties of 3D Printed Polymeric Gyroid Cellular Structures: Experimental and Finite Element Study," *Materials & Design*, Vol. 165, 2019, 107597.