

광선추적법 기반의 구형렌즈와 Luneburg렌즈 안테나의 성능비교

Comparison of Sphere Lens and Luneburg Lens Antenna Performance Based on Ray-Tracing Technique

박수홍 · 김형철 · 한정훈* · 이재호** · 서동욱

Su Hong Park · Hyeongchul Kim · Jung-Hoon Han* · Jae-Ho Lee** · Dong-Wook Seo

요약

본 논문에서는 구형의 렌즈에 적용하기 위한 광선추적법을 기술하고, PO(physical optics) 적분식으로부터 변형하여 구형렌즈에 의한 방사패턴을 계산하는 수식을 기존의 문헌들을 바탕으로 다시 정립한다. 제시한 해석방법을 이용하여 단일매질의 구형렌즈와 Luneburg 렌즈의 크기와 점 소스 거리에 따른 방사패턴을 계산한다. 두 가지 렌즈 모두 렌즈의 크기가 클수록 빔폭이 좁아지는 결과를 보이지만, 부엽특성은 Luneburg 렌즈의 경우 렌즈의 표면에 소스가 위치하여야 하며, 단일매질 구형렌즈의 경우 렌즈의 표면에서 소스가 적절히 떨어져 있어야 부엽레벨이 낮아짐을 확인하였다. 추가로 평행한 광선들이 단일매질 구형렌즈에 입사하는 경우 형성되는 초점거리와 초점을 형성하는 빔의 비율의 해석을 통하여 1.4~1.5의 굴절률을 가지는 단일매질 구형렌즈에 렌즈 표면으로부터 $0.4 \sim 0.5 \lambda$ 거리에 떨어진 지점에 소스를 위치시키면, 단일매질의 구형렌즈가 제작하기에 복잡한 Luneburg 렌즈를 대체할 수 있는 가능성을 보였다.

Abstract

In this paper, we describe a ray-tracing method for spherical lenses and reestablish an equation for calculating the radiation pattern using a spherical lens based on previous literature by modifying the physical optics (PO) integral equation. Using this formula, we calculated the radiation pattern according to the size and point source distance of a single-medium spherical lens and a Luneburg lens. While both lenses showed that the beam width became narrower as the lens size increased, the side-lobe level decreased when the source was located on the surface of the lens in the case of the Luneburg lens and when the source was appropriately distanced from the lens surface in the case of the single-medium spherical lens. In addition, through the analysis of the focal length and the beam forming the focus when parallel rays are incident on a single-medium spherical lens, we show that a single-medium spherical lens with a refractive index of 1.4 to 1.5 can replace a complex Luneburg lens by placing the source at a distance of 0.4λ to 0.5λ from the lens surface.

Key words: Luneburg Lens, Radiation Pattern, Ray-Tracing, Single-Medium Spherical Lens

「이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2021R1I1A3044405).」

국립한국해양대학교 전파공학과 / 해양인공지능융합전공(Department of Radio Communications Engineering / Interdisciplinary Major of Maritime AI Convergence, National Korea Maritime & Ocean University)

*한국항공대학교 전기전자공학과(Department of Electrical and Electronic Engineering, Korea Aerospace University)

**국립군산대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Kunsan National University)

· Manuscript received August 10, 2024 ; Revised August 29, 2024 ; Accepted October 1, 2024. (ID No. 20240810-081)

· Corresponding Author: Dong-Wook Seo (e-mail: dwseo@kmou.ac.kr)

I. 서 론

미래의 모바일 네트워크는 높은 데이터율을 제공하기 위해서 밀리미터파 대역 이상의 주파수 대역에서 사용될 것으로 예상된다. 이러한 주파수 대역에서는 경로손실이 크기 때문에 상대적으로 높은 이득의 안테나가 사용되어야 경로손실 효과를 완화할 수 있다. 또한, 충분한 커버리지를 제공하기 위해서 안테나는 넓은 각도에서 빔을 조향하거나 다중 빔을 생성할 수 있어야 한다^{[1]-[3]}.

안테나 이득을 증가시키기 위해 다수의 방사체를 배열함으로써 방사면적을 증가시키는 구조가 일반적으로 사용되지만, 방사면적의 증가를 최소화하면서 이득을 증가시키기 위해 개구 안테나를 비롯한 방사체 위에 렌즈를 적용하는 방법이 사용된다. 렌즈는 일반적으로 간단한 형상과 구조를 가짐에도 불구하고 적용하고자 하는 안테나 형상이나 개구 모양에 따라 곡면을 설계하고 제작해야 해서 범용성이 떨어진다^{[4],[5]}.

3D 프린팅 기술이 발전함에 따라 유전체를 이용한 메타구조 제조에 있어 큰 진전이 이루어지고 있다. 특히, 매우 복잡한 GRIN(*gradient-refractive index*) 렌즈를 비용 효율적으로 제작할 수 있게 되었다^{[6]-[8]}. GRIN 렌즈는 공간상의 유전체 밀도를 조정함으로써 유전율(또는 굴절률)을 변화시킴으로써 렌즈를 통과하는 전자기파를 조정하여, 안테나 이득, 지향성, 안테나 패턴, 스티어링 각도, 대역폭 및 기타 주요 안테나 매개 변수를 수정/증대하여 안테나의 성능을 극적으로 변경하는 데 사용되고 있다. GRIN 렌즈의 대표적인 유형으로 Luneburg 렌즈가 있다. Luneburg 렌즈는 렌즈의 경계에 있는 점원에서 발생하는 광선이 렌즈를 떠날 때 서로 평행할 것이라는 특성을 가진 구형렌즈이다^{[9],[10]}. 반대로 렌즈에 들어가는 평행 광선의 빔을 렌즈 표면의 한 지점에 초점을 맞추는 것도 가능하다. 또한, Luneburg 렌즈의 표면에 위치하는 점원의 위치에 따라 빔의 방향이 결정되어 스캐닝 손실없이 높은 이득을 가지기 때문에 다중 빔을 위한 용도로 다양하게 활용되고 있다. 이러한 Luneburg 렌즈를 비롯한 GRIN 렌즈들은 3D 프린팅 기술이 발전되어 제작에 있어 기술적인 어려움은 매우 낮아졌지만, 여전히 정교하게 GRIN 렌즈를 구현하는 것은 큰 노력과 시간이 요구된다.

본 논문에서는 대표적인 GRIN 렌즈 중 하나인 Luneburg 렌즈를 단일매질로 구성된 구형렌즈로 대체할 수 있는지에 대한 사용 가능성을 광선추적법(*ray-tracing*)을 기반으로 두 형태의 렌즈의 성능을 비교함으로써 살펴해보도록 한다.

II. 광선추적법 모델

GRIN 렌즈를 해석하기 위한 광선추적법은 주로 대칭적인 구조를 이용하여 Eikonal 방정식에 대한 수치적 또는 해석적 방법을 사용하거나 Fermat의 광선불변을 이용하여 계산하는 방법들이 시도되고 있다^{[11],[12]}. 본 장에서는 구형을 2차원적으로 계층화된(*layered*) 완벽한 원들로 모델링하고 Snell의 법칙을 적용하여 수치적으로 계산하고자 한다.

Luneburg 렌즈의 굴절률(*refractive index*), n 은 식 (1)과 같이 표현된다^{[6]-[8]}.

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (1)$$

여기서 r 은 렌즈의 중심점에서 거리, R 은 렌즈의 반지름을 의미한다. 따라서 Luneburg 렌즈의 중심점에서의 굴절률 n 은 1.414이고, 비유전율 ϵ_r 은 2 V/m의 값을 가진다. 반면, 단일매질의 구는 렌즈의 위치와 상관없이 비유전율 2 V/m의 매질로 구성되어 있다고 가정한다. 단일매질의 구형렌즈의 경우 굴절률 n 은 위치와 상관없이 상수로 표현된다.

광선이 $i-1$ 번째 지점(x_{i-1}, y_{i-1})에서 x 축을 기준으로 a_{i-1} 의 각도의 기울기로 ΔS 만큼의 거리를 이동한다면 다음 i 번째 지점 (x_i, y_i)을 식 (2) 및 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$x_i = x_{i-1} + \Delta S \cos a_{i-1} \quad (2)$$

$$y_i = y_{i-1} + \Delta S \sin a_{i-1} \quad (3)$$

한편, i 번째 지점과 관련된 파라미터로 방위각 방향의 각도 u_i 와 렌즈 원점에서의 거리 r_i 를 각각 식 (4) 및 식 (5)와 같이 정의한다.

$$u_i = \tan^{-1} \frac{y_i}{x_i} \quad (4)$$

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (5)$$

i 번째 지점에 도착한 광선이 그다음 ΔS 만큼의 거리를 이동하는 경우, 매질의 유전율(또는 굴절률)이 달라지면 식 (6)의 Snell의 법칙에 따라 광선이 굴절된다.

$$n_{i-1} \sin \theta_{i-1} = n_i \sin \theta_i \quad (6)$$

여기서 n_{i-1} 과 n_i 는 $i-1$ 번째와 i 번째 매질의 굴절률이 고, θ_{i-1} 과 θ_i 는 각각 입사각과 굴절각을 의미한다.

구형렌즈를 2차원 단면으로 가정하고, 위아래 대칭구조를 이용하여 그림 1과 같이 원의 좌측에서 렌즈 외부에서 렌즈로 들어가는 경로와 원의 우측에서 렌즈 내부에서 외부로 나가는 경로 2개를 생각할 수 있다.

먼저, 좌측의 렌즈 외부에서 내부로 입사되는 경우 삼각형 각도 특성에 의해 입사각 θ_{i-1} 는 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_{i-1} = a_{i-1} + \pi - u_i \quad (7)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입함으로써 식 (8)과 같이 투과각 θ_i 를 구할 수 있다.

$$\theta_i = \sin^{-1} \left[\frac{n(r_i) \sin \theta_{i-1}}{n(r_{i-1})} \right] \quad (8)$$

이로부터 투과된 광선의 진행 기울기 a_i 역시 얻을 수 있다.

$$a_i = \theta_i - (\pi - u_i) \quad (9)$$

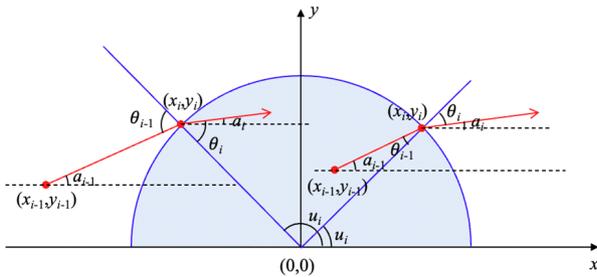


그림 1. 원형의 렌즈구조에서 렌즈 외부에서 내부로 입사하는 경로와 내부에서 외부로 나가는 경로
Fig. 1. In a circular lens structure, the path from the outside to the inside of the lens and the path from the inside to the outside.

동일한 과정을 원의 오른쪽편에서 광선이 원 내부에서 바깥방향으로 나가는 과정의 경우, 입사각 θ_{i-1} , 투과각 θ_i , 투과된 광선의 진행 기울기 a_i 는 각각 식 (10)~식 (12)와 같이 정리할 수 있다.

$$\theta_{i-1} = u_i - a_{i-1} \quad (10)$$

$$\theta_i = \sin^{-1} \left[\frac{n(r_i) \sin \theta_{i-1}}{n(r_{i-1})} \right] \quad (11)$$

$$a_i = u_i - \theta_i \quad (12)$$

한편, 광선의 방향벡터와 렌즈의 원점을 기준으로 하는 광선의 위치벡터를 내적하여 음의 값을 가지면 광선이 렌즈 안으로 들어오는 것으로 판단하고, 양의 값을 가지면 렌즈 밖으로 나가는 광선이라 판단할 수 있다.

이와 같이 설명한 광선추적법 알고리즘을 순서도로 정리하면 그림 2와 같다.

III. 렌즈 안테나 방사패턴

안테나의 방사패턴을 계산하기 위해서 관측점들을 원

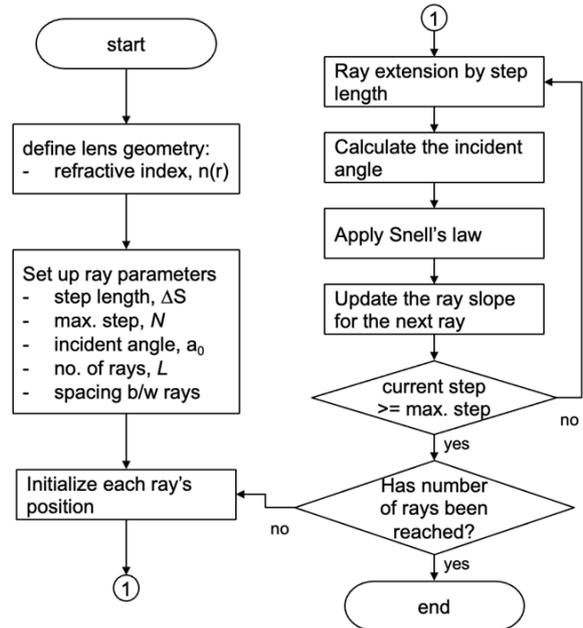


그림 2. GRIN 렌즈 해석을 위한 광선추적법 순서도
Fig. 2. Flow chart of the Ray-Tracing method for GRIN lens.

거리장을 만족하는 파장에 비해 큰 곳에서 방위각을 변경하면서 산란파를 계산함으로써 방사패턴을 얻을 수 있다.

산란체에 의한 원거리장 산란파를 계산하는 PO (physical optics) 산란파는 식 (13)과 같이 적을 수 있다^[13].

$$\vec{E}^s = \frac{-j\omega\mu}{4\pi r} e^{-jkr} \iint_s \left[\vec{J}_s + \frac{1}{\eta_0} \vec{J}_m \times \hat{r} \right] e^{jk\vec{r}' \cdot \hat{r}} dS \quad (13)$$

여기서 J_s 와 J_m 은 산란체에 입사하는 전계와 자계에 의해 유도되는 전기전류와 자기전류를 의미한다.

최근 유전체의 Luneburg 렌즈와 전기적으로 동등하도록 평행판 도파관으로 구현된 Geodesic 렌즈의 방사패턴을 계산하기 식 (8)의 PO 산란파와 유사한 수식들을 제시하고 있다^{[14]~[16]}. 본 연구에서 적용하는 점 소스에 의한 광선추적법과 이를 통한 안테나 해석은 스칼라양에 의한 결과이므로 Kirchhoff의 스칼라 회절 이론(Kirchhoff's scalar diffraction theory)으로부터 그림 3과 같은 렌즈구조에서 식 (8)을 식 (14)와 같이 변환할 수 있다.

$$E(\phi) = \frac{-jk}{4\pi r} e^{-jkr} \sum_k A_k \exp[-jk \text{path}_k] \exp[jk\vec{r}' \cdot \hat{r}] \cdot [\hat{n}_k \cdot \hat{s}_k + \hat{n}_k \cdot \hat{r}_k] \Delta L_k \quad (14)$$

여기서 A_k 는 광선이 렌즈가 나가는 개구 위의 k 번째 지점에서의 전기장의 크기를 의미한다. 소스 포인트에서 동일한 간격(또는 각도) dL_k' (또는 $d\phi_k'$)로 동일한 크기의 전계를 가지는 레이튜브가 방사된다고 가정하면 레이튜브 보존 이론으로부터 렌즈의 개구에서 전계 크기는 식 (15)와 같이 표현된다.

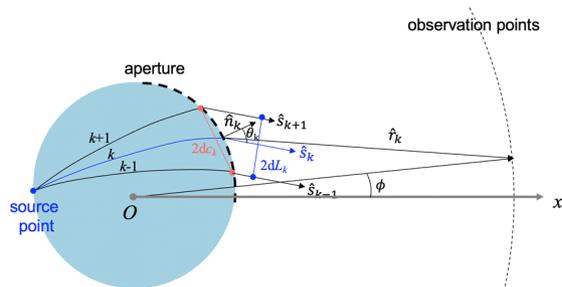


그림 3. 원거리장 패턴 계산을 위한 구조와 관련 파라미터
Fig. 3. Geometric parameters associated with the numerical evaluation of the far-field pattern.

$$A_k = A_k' \sqrt{dL_k' / dL_k} \quad (15)$$

여기서 dL_k 는 식 (16)과 같이 근사화할 수 있다.

$$dL_k = dc_k \cos \theta_k \quad (16)$$

식 (9)의 원거리장 산란파를 계산하기 위해서는 광선추적법으로부터 렌즈를 빠져나가는 개구 위의 위치 정보와 렌즈 내부에서 이동하면서 경로위상의 합을 추가로 계산되어야 한다.

IV. 구형렌즈와 Luneburg 렌즈의 성능 비교

앞선 장에서 설명한 광선추적법을 굴절률 $n=1.4$ (비유전율 $\epsilon_r=1.96$)의 구형렌즈와 식 (1)의 굴절률을 가지는 Luneburg 렌즈에 적용하고, 렌즈 개구 지점정보와 광선의 경로정보를 기반으로 원거리장 방사패턴을 계산하여 비교한다.

4-1 광선추적법 해석결과

구형의 단일매질 렌즈와 Luneburg 렌즈의 중심이 원점일 때 2차원 단면에서 광선추적법을 이용하여 구의 반지름 r 을 기준으로 점 소스의 위치에 따른 해석결과는 그림 4와 같다.

단일매질의 구형렌즈와 Luneburg 렌즈 모두 점 소스의 위치가 렌즈 내부에서 외부로 나갈수록 광선이 퍼지는 특성에서 광선이 모이는 특성으로 변경된다. 그림 4(b)와 같이 Luneburg 렌즈의 경우 알려진 대로 점 소스가 렌즈 표면에 위치하는 경우 방사된 광선 대부분이 렌즈를 지나서 가로축에 평행하게 향하는 것을 알 수 있다. 또한, 점 소스가 렌즈로부터 멀어질수록 광선이 모아져서 특정한 지점으로 빔을 포커싱하게 된다. 즉, Luneburg 렌즈의 경우 소스가 렌즈 표면에 위치하는 경우 초점거리가 무한대이고, 소스가 렌즈 표면에서 멀어질수록 초점거리가 렌즈 반대편 표면으로 가까워지는 특성을 가진다.

단일매질의 구형렌즈의 경우 점 소스가 내부에 위치하는 그림 4(d)의 경우 렌즈 내부에서 전반사가 현상에 의해 빔이 퍼지는 방향으로 균일하게 방사되지 않는 특성을 가지며, 소스가 렌즈 표면에 위치하면 렌즈를 통과한

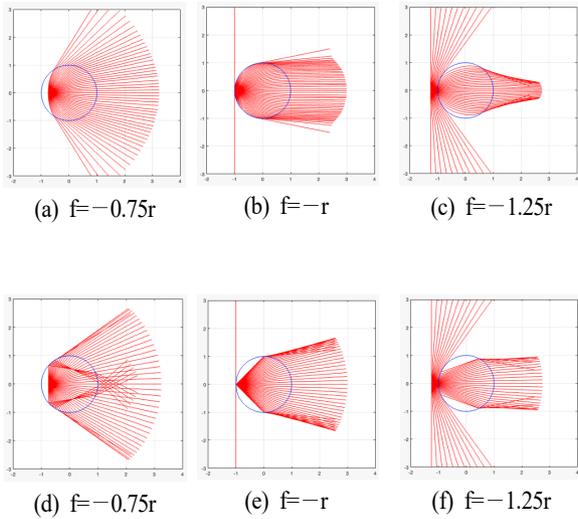


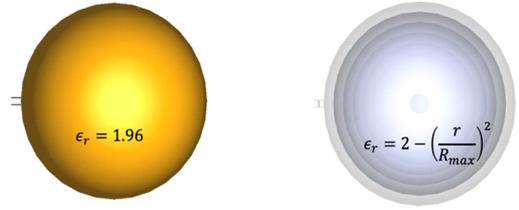
그림 4. 구형렌즈에 광선추적법을 적용한 궤적 해석 결과: Luneburg 렌즈에서 점 소스 거리((a)~(c))와 단일매질 구형렌즈에서 점 소스 거리((d)~(f))
 Fig. 4. Results of trajectory analysis using ray tracing on a spherical lens: Point source distances in a Luneburg lens and point source distances in a single-medium spherical lens.

광선들이 모여져서 거리방향으로 평행한 성분이 증가한다. 하지만 빔의 가장자리 쪽으로 중심보다 더 많은 빔이 경로가 형성되는 것을 알 수 있다. 소스의 위치를 렌즈 표면에 더 떨어트리게 되면 렌즈를 통과한 빔 대부분이 거리방향으로 평행하게 된다. 즉, 단일매질의 구형렌즈로도 매질의 특성(굴절률)과 크기에 따라 적절한 소스의 위치를 변경하여 평면파 형태로 변형시켜 빔을 집중시켜서 안테나 이득을 증가시킬 수 있음을 의미한다.

4-2 방사패턴 해석 검증

식 (9)를 광선추적법의 결과에 적용하여 안테나 방사패턴을 얻는 방법의 결과를 검증하기 위하여 CST Studio suite를 통하여 해석한 결과와 비교를 수행한다.

단일매질의 구형렌즈는 그림 5(a)와 같이 1파장(λ : wavelength) 반지름의 구형으로 모델링 되었고, 전체 크기가 동일한 Luneburg 렌즈는 구 내부에서 매질이 달라져야 해서 그림 5(b)와 같이 중심으로부터 균일한 두께로 10개의 층으로 구성하고 각 층의 중간값 유전율의 매질로 모

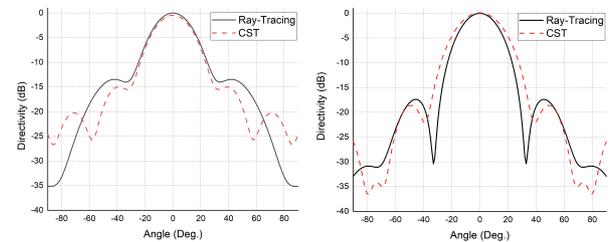


(a) 단일매질 구형렌즈 (b) 10개 층으로 구성된 Luneburg 렌즈
 (a) Single-medium spherical lens (b) 10-layer Luneburg lens

그림 5. 구형렌즈 모델
 Fig. 5. Spherical lens models.

델링하였다. 한편, EM 시뮬레이션 툴에서 점 소스와 유사한 소스를 모델링하기 위하여 $0.01 \times 0.01 \lambda$ 면적의 2개의 작은 금속판 0.01λ 간격으로 평행하게 배치하고 두 금속판에 discrete 포트를 통하여 직접 전력을 인가하는 방식으로 모델링하였다.

그림 6은 광선추적법의 결과를 이용하여 계산한 방사패턴과 EM 시뮬레이션 툴로 계산한 방사패턴 결과를 나타내었다. 두 모델에서 모두 방사패턴이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 다만, 각도가 커질수록 광선추적법과의 차이를 보인다. 이는 EM 시뮬레이션에서 구현한 점 소스가 이상적인 점 소스보다는 미소 다이폴(infinitesimal dipole)에 가까운 구조로 등방성(isotropic) 특성보다는 전방향성(omnidirectional) 특성으로 각도가 커질수록 점 소스와 특성과는 달라지기 때문이다. 단일매질의 구형렌즈가 부엽에서 레벨에서 더욱 차이가 나는 것은 그림 4(e)에 나타난 것처럼 광선추적법을 통한 해석결과 광선들



(a) 단일매질 구형렌즈 (b) 10개 층으로 구성된 Luneburg 렌즈
 (a) Single-medium spherical lens (b) 10-layer Luneburg lens

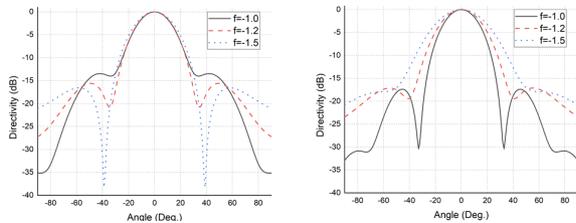
그림 6. 광선추적법과 EM 시뮬레이션 툴에 의한 방사패턴
 Fig. 6. Radiation pattern by ray tracing and EM simulation.

그룹의 가장자리 부분에서 빔들이 모여서 부엽레벨이 높게 나오지만, EM 시뮬레이션의 경우 이상적인 점 소스가 아니라 가장자리 쪽으로 입사되는 전계는 상대적으로 작기 때문에 판단된다.

4.3 반지름과 소스 위치에 따른 방사패턴 비교

그림 7은 그림 4와 같은 반지름 1λ 의 구에서 소스의 위치를 변경하면서 계산된 방사패턴을 나타낸다. 단일매질의 구형렌즈는 소스의 위치가 렌즈로부터 멀어지더라도 3 dB 빔폭이 27도에서 29도로 메인빔의 변화는 거의 없이 부엽레벨만 -13.45 dB 에서 -16.56 dB 까지 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 소스의 위치가 멀어지더라도 메인빔이 향하는 광선의 수는 큰 차이가 없이 부엽방향으로 향하는 광선은 오히려 줄어들기 때문이다. 반면에 Luneburg 렌즈의 경우 소스의 위치가 렌즈에서 멀어질수록 빔폭이 27도에서 39도로 커지고 부엽레벨은 -17.4 dB 에서 -17 dB 정도로 약간 상승하는 패턴을 가진다.

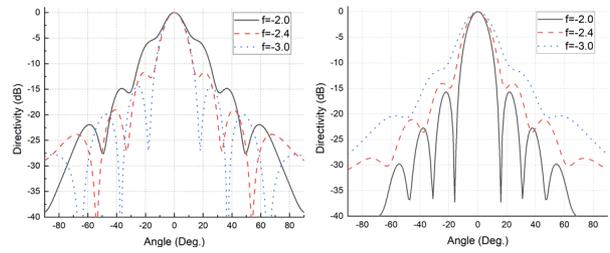
그림 8 및 그림 9는 각각 반지름이 2λ 와 3λ 의 단일매질 구형렌즈와 Luneburg 렌즈에 대하여 소스의 거리에 따른 방사패턴 해석결과이다. 이러한 해석결과로부터 3 dB 빔폭과 부엽레벨을 표 1과 같이 정리하였다. 전체적으로 1λ 반지름의 구와 유사한 3 dB 빔폭과 부엽레벨 특성을 가진다. 단일매질의 구형렌즈는 소스가 렌즈에 가까이 위치할수록 빔폭이 넓어지고 부엽레벨이 증가하는 반면, Luneburg 렌즈는 그 반대로 점 소스가 표면에 떨어질수록 빔폭이 넓어지고 부엽레벨이 상승한다. 두 가지 경



(a) 단일매질 구형렌즈 (a) Single-medium spherical lens
(b) Luneburg 렌즈 (b) Luneburg lens

그림 7. 광선추적법으로 계산된 반지름 1λ 구형렌즈의 방사패턴

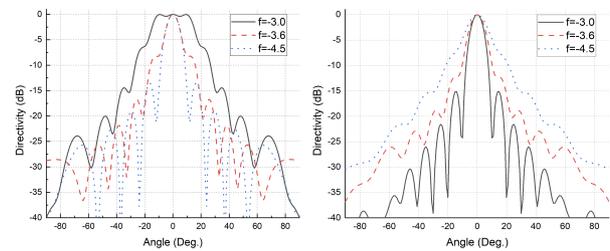
Fig. 7. Radiation pattern of spherical lens of radius 1λ by ray tracing.



(a) 단일매질 구형렌즈 (a) Single-medium spherical lens
(b) Luneburg 렌즈 (b) Luneburg lens

그림 8. 광선추적법으로 계산된 반지름 2λ 구형렌즈의 방사패턴

Fig. 8. Radiation pattern of spherical lens of radius 2λ by ray tracing.



(a) 단일매질 구형렌즈 (a) Single-medium spherical lens
(b) Luneburg 렌즈 (b) Luneburg lens

그림 9. 광선추적법으로 계산된 반지름 3λ 구형렌즈의 방사패턴

Fig. 9. Radiation pattern of spherical lens of radius 3λ by ray tracing.

우 모두 반지름이 클수록 전체 안테나의 개구 면적이 증가하는 효과로 빔폭이 좁아지는 특성을 보인다. 이러한 결과로부터 단일매질의 구형렌즈로도 소스의 위치를 적절히 조절함으로써 Luneburg 렌즈와 동등한 효과를 가질 수 있음을 확인할 수 있다.

4.4 단일매질 구형렌즈의 소스위치 해석

지금까지의 해석을 통하여 단일매질의 구형렌즈의 소스 위치를 적절히 선택하면 Luneburg 렌즈와 같은 효과를 가질 수 있음을 확인하였다. 높은 이득의 렌즈 안테나는 소스에서 방사된 필드가 평면파 형태로 진행되어야 해서, 역으로 평면파가 구형렌즈에 입사하는 경우 형성되는 거리방향 축상의 지점들을 계산하여 소스의 위치를 결정도

표 1. 렌즈별 소스 거리에 따른 3 dB 빔폭과 부엽레벨
Table 1. 3 dB beamwidth and sidelobe level according to source distance for single-medium sphere and Luneburg lenses.

(3 dB beamwidth/ sidelobe level)	Single-medium spherical lens			Luneburg lens		
	$r=1 \lambda$	$r=2 \lambda$	$r=3 \lambda$	$r=1 \lambda$	$r=2 \lambda$	$r=3 \lambda$
$f=1.0 r$	27°/ -13.5 dB	17°/ -5 dB	30°/ -6.5 dB	27°/ -17. dB	13°/ -15.6 dB	9°/ -15.1 dB
$f=1.2 r$	28°/ -15.6 dB	15°/ -11.7 dB	10°/ -8.2 dB	32°/ -17. dB	16°/ -14 dB	11°/ -12 dB
$f=1.5 r$	31°/ -16.6 dB	15°/ -14.3 dB	11°/ -13.6 dB	39°/ -17 dB	21°/ -11 dB	15°/ -7.7 dB

록 한다.

그림 10은 굴절률이 다른 단일매질 구형렌즈에 동일한 간격으로 50개의 광선을 입사(붉은색)하여 렌즈를 통과한(녹색) 후 렌즈를 통과하여(파란색) 렌즈의 중심점과 동일한 거리방향 축에 교차(검정 원)하는 지점들을 나타내었다. 굴절률이 1.4인 단일매질 구형렌즈의 경우 모든 광선이 초점을 형성하지만, 렌즈 표면인 1λ 에서 1.7λ 까지 거리에서 형성된다. 반면, 굴절률이 1.9인 경우 대부분이 렌즈의 표면에서 초점이 형성되지만, 일부 광선의 경우 초점을 형성시키지 못하는 광선들이 있음을 알 수 있다.

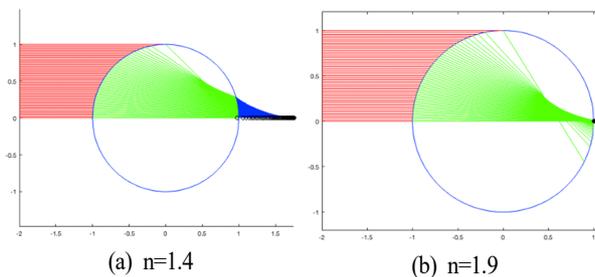


그림 10. 광선추적법을 이용한 평면파 입사시 단일매질 구형렌즈의 초점

Fig. 10. Focus distance of a single-medium spherical lens for plane wave incidence using ray tracing.

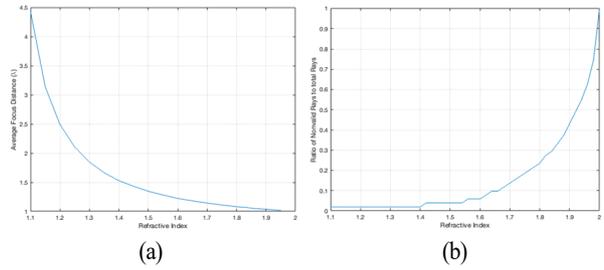


그림 11. 광선추적법을 이용한 평면파 입사시 굴절률에 따른 단일매질 구형렌즈의 (a) 평균 초점 거리 및 (b) 입사 광선수 대비 초점을 형성하지 못하는 광선 비율

Fig. 11. (a) Average focal distance of a single-medium spherical lens according to refractive index and (b) the ratio of non-valid rays to the total incident rays.

굴절률을 1.1에서 2.0으로 변화시키며 위와 같은 해석을 수행하여 계산된 평균 초점거리와 초점을 형성하지 못하는 광선의 비율을 그림 11에 나타내었다. 그림 10에서 예상할 수 있듯이 굴절률이 증가할수록 평균 초점거리가 렌즈의 표면 방향으로 형성되는 반면, 초점을 형성하지 못하는 광선의 비율도 급격히 증가한다. 이로부터 $n=1.4 \sim 1.5$ 의 굴절률을 가지는 단일매질 구형렌즈로 초점거리 $1.4 \sim 1.5 \lambda$ 에서 피딩하면 우수한 안테나 성능을 낼 수 있음을 예상할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 구형의 렌즈에 적용하기 위한 광선추적법을 기술하고, PO 적분식으로부터 변형된 구형렌즈에 의한 방사패턴을 계산하는 수식을 기존의 문헌들을 바탕으로 다시 정립하였다. 제시한 해석방법을 이용하여 단일매질의 구형렌즈와 Luneburg 렌즈의 크기와 점 소스 거리에 따른 방사패턴을 계산하였다. 두 가지 형태의 렌즈 모두 렌즈의 크기가 클수록 빔폭이 좁아지는 결과를 보였다. 그리고, Luneburg 렌즈의 경우 기존에 잘 알려진 것과 같이 렌즈의 표면에 소스가 위치하여야 하며, 단일매질 구형렌즈의 경우 렌즈의 표면에서 소스가 떨어져 있어야 부엽레벨이 낮아짐을 확인할 수 있었다. 이러한 해석으로부터 소스의 위치를 잘 선택한다면 단일매질의 구형렌즈

가 제작하기에 복잡한 Luneburg 렌즈를 대체할 수 있는 가능성을 보였다.

추가로 단일매질 구형렌즈의 소스 위치를 선정하기 위하여 평행한 광선들이 단일매질 구형렌즈에 입사하는 경우 형성되는 초점거리와 초점을 형성하는 빔의 비율의 해석을 수행하였다. 이러한 결과로부터 1.4~1.5의 굴절률을 가지는 단일매질 구형렌즈에 렌즈 표면으로부터 $0.4 \sim 0.5 \lambda$ 거리에 떨어진 지점에 소스를 위치시켜야 함을 알 수 있었다.

향후 점 소스 대신 렌즈로 직접 급전이 가능한 도파관 구조로 소스로 변경되었을 때 영향도를 분석하고 도파관 유형별로 Luneburg 렌즈를 대체할 수 있는 단일매질 구형렌즈를 제작 및 측정할 예정이다.

References

- [1] M. H. Lee, J. H. Lee, and T. Son, "Design of a millimeter-wave sequential fed patch array antenna for 5G mobile communication," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 9, pp. 827-830, Sep. 2020.
- [2] D. W. Kim, E. H. Jan, and S. S. Oh, "Implementation of a three-dimensional analog beamforming system using stacked Rotman lenses at 28 GHz," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 11, pp. 943-950, Nov. 2021.
- [3] J. Y. Ha, D. W. Seo, "Calculation of optimum feed-line impedance of series-fed microstrip antennas using the image parameter method and Bloch theory," *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, vol. 47, no. 2, pp. 78-83, Apr. 2023.
- [4] G. H. Lee, S. K. Kim, W. Mohyuddin, H. C. Choi, and K. W. Kim, "A design of improved 100 GHz lens antennas for the ECEI system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 9, pp. 817-824, Oct. 2016.
- [5] H. Lee, J. Choi, "A high gain corrugated horn antenna with dielectric lens," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 5, pp. 486-489, Jun. 2016.
- [6] Fortify, "3D printed dielectric lenses increase antenna gain and widen beam scanning angle," 2021. Available: <https://www.microwavejournal.com/articles/36375-d-printed-dielectric-lenses-increase-antenna-gain-and-wide-n-beam-scanning-angle>
- [7] P. Lambert, "State-of-technology update on GRIN/Luneburg dielectric lenses/antennas for microwave/mmWave applications," 2022. Available: <https://www.microwavejournal.com/articles/37538-state-of-technology-update-on-grinluneburg-dielectric-lensesantennas-for-microwavemmwave-applications>
- [8] R. A. Bahr, A. O. Adeyeye, S. van Rijs, and M. M. Tentzeris, "3D-printed omnidirectional Luneburg lens retroreflectors for low-cost mm-Wave positioning," in *2020 IEEE International Conference on RFID*, Orlando, FL, Sep.-Oct. 2020, pp. 1-7.
- [9] K. W. Kim, "Characterizations of spherical Luneburg lens antennas with air-gaps and dielectric losses," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 1, no. 1, pp. 11-17, May 2001.
- [10] J. Jo, N. Ha, and S. Kim, "Design of a high-gain patch antenna integrated with a 3D printed inverted pyramidal GRIN lens for mmWave communications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 4, pp. 287-294, Apr. 2024.
- [11] J. E. Gómez-Correa, A. L. Padilla-Ortiz, A. Jaimes-Nájera, J. P. Trevino, and S. Chávez-Cerda, "Generalization of ray tracing in symmetric gradient-index media by Fermat's ray invariants," *Opt Express*, vol. 29, no. 21, pp. 33009-33026, Sep. 2021.
- [12] S. J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, Piscataway, NJ, Rutgers University, 2016.
- [13] D. Jenn, *Radar and Laser Cross Section Engineering*, 2nd ed. Reston, VA, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [14] F. Doucet, N. J. G. Fonseca, E. Girard, H. Legay, and

R. Sauleau, "Analytical model and study of continuous parallel plate waveguide lens-like multiple-beam antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 9, pp. 4426-4436, Sep. 2018.

[15] Q. Liao, N. J. G. Fonseca, M. Camacho, Á. Palomares-Caballero, F. Mesa, and O. Quevedo-Teruel, "Ray-tracing model for generalized geodesic-lens multiple-beam

antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 3, pp. 2640-2651, Mar. 2023.

[16] P. Castillo-Tapia, J. Rico-Fernández, S. Clendinning, F. Mesa, and O. Quevedo-Teruel, "Evaluation of losses in 3-D-printed geodesic lenses using a ray-tracing model," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 72, no. 1, pp. 234-242, Jan. 2024.

박 수 흥 [국립한국해양대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0009-4448-0775>



2024년 3월~현재: 국립한국해양대학교
전파공학과 석사과정
[주 관심분야] RF, Radar, 레이다 신호 처리 등

한 정 훈 [한국항공대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0002-3721-7700>



2009년 02월: 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 (공학사)
2011년 02월: 한국과학기술원 전기및전자 공학과 (공학석사)
2014년 08월: 한국과학기술원 전기및전자 공학과 (공학박사)
2021년 2월: 국가보안기술연구소 선임연구원

2024년 2월: 제주대학교 통신공학과 조교수

2024년 3월~현재: 한국항공대학교 전기전자공학과 조교수
[주 관심분야] 안테나 시스템, 전자파 수치해석, 레이다 시스템, 고출력 전자파, 전자파 보안 등

김 형 철 [국립한국해양대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1187-9834>



2022년 8월: 국립한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2024년 9월~현재: 국립한국해양대학교 전파공학과 박사과정
[주 관심분야] RF, WPT 등

이 재 호 [국립군산대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6878-8848>



2002년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)

2004년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학석사)

2010년 9월: 일본 Tokyo Institute of Technology 전기및전자공학 (공학박사)

2004년 5월~2005년 7월: 정보통신연구진

홍원 연구원

2010년 10월~2012년 2월: 삼성탈라스 전문연구원

2013년 3월~2022년 8월: 한국전자통신연구원 책임연구원

2022년 9월~현재: 국립군산대학교 전자공학과 조교수

[주 관심분야] 안테나 이론, 배열안테나, 레이더 시스템

서 동 욱 [국립한국해양대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9449-7772>



2003년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)

2005년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학석사)

2011년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학 (공학박사)

2011년 1월~2012년 9월: 국방기술품질원

선임연구원

2012년 10월~2017년 8월: 한국전자통신연구원 선임연구원

2017년 9월~현재: 국립한국해양대학교 전자전기정보공학부 교수

[주 관심분야] 전자파 수치해석, RCS 해석, 레이더 시스템, 레이더 신호처리, 무선전력전송