

근접장 빔 포커싱을 위한 초점 가변 메타표면 렌즈 설계

Design of a Metasurface Lens to Adjust the Focal Length for Near-Field Beam Focusing

임 태 흥 · 서 철 현* · 추 호 성

Tae Heung Lim · Cheolhun Seo* · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 근접장 내 빔 포커싱을 하기 위해서 기계적 회전을 이용한 초점 가변 메타 표면 렌즈를 제안한다. 제안된 메타 표면 렌즈는 모아레 렌즈 이론을 바탕으로 투과위상분포를 계산하고, 각 위치의 투과위상분포에 맞는 단위셀 형상을 적용하여 2개의 렌즈로 구현하였다. FEKO EM 시뮬레이션 툴을 이용해 각 위상분포에 따른 $0.48 \text{ m} \times 0.48 \text{ m}$ 의 메타 표면 렌즈를 모델링하고, 상단렌즈의 각도를 회전시켜 각 각도에서의 근접장 분포와 초점 거리를 확인하였다. 상단 렌즈의 각도를 $\theta=0^\circ$ 에서 60° 까지 회전시켜 최대 0.86 m 에서 최소 0.68 m 까지 초점 거리가 변화됨을 확인하였고, 각 초점 위치에서의 정규화시킨 근접장 세기는 0.68 m 에서 최대 전계 세기가 도출되었다.

Abstract

In this paper, we propose a metasurface lens to adjust the focal length for near-field beam focusing by using mechanical rotation. The proposed metasurface is implemented with two lenses using unit cell geometries, where the transmit phase distributions of the proposed metasurface lens are calculated based on the Moire lens theory. The lenses with dimensions of $0.48 \text{ m} \times 0.48 \text{ m}$ are modeled using the FEKO EM simulation tool, and the near-field distributions and focal lengths are obtained in accordance with the rotating angle of the upper lens. When the upper lens is rotated from $\theta=0^\circ$ to 60° , the focal length can be changed from a distance of 0.86 m to 0.68 m , and the maximum normalized nearfield intensity is achieved at a focal length of 0.68 m .

Key words: Varifocal Lens, Metasurface, Moire Lens, Transmit Metasurface

I. 서 론

최근 Fresnel 근거리장 영역에서 빔을 집속하는 기술은 바이오 센싱, 무선 전파 치료, 무선 전력 전송, RFID 등의

어플리케이션에서 다양하게 적용되고 있다^[1]. 일반적으로 근접장 빔집속을 위해서는 다수의 배열안테나 또는 큰 개구면 안테나를 이용하여 송신부를 설계한다. 좁은 영역에서 빔의 집속과 동시에 방향을 변경하기 위해서 배열

「이 연구는 2015년도 및 2017년도 정부(교육부와 과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2017R1A5A1015596, 2015R1A6A1A03031833).」

홍익대학교 전자전기공학과(Department of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*송실대학교 정보통신전자공학부(Department of Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received March 26, 2021 ; Revised April 16, 2021 ; Accepted June 25, 2021. (ID No. 20210326-003S)

· Corresponding Author: Hosung Choo (e-mail: hschoo@hongik.ac.kr)

안테나의 위상과 진폭을 조절하는 선행연구가 다수 진행되어 왔다. 그 예로 마이크로스트립 패치안테나의 최적 위상과 진폭을 도출하여 급전부를 설계하는 연구^[2], 배열 안테나에 phase shifter를 장착하여 빔의 초점을 조절하는 연구^[3] 등 다양한 연구가 수행되었다. 하지만, 이러한 연구들은 배열안테나의 위상을 조절하기 위해 급전부 설계가 매우 복잡해지거나 제작에 있어 비용이 많이 드는 단점이 있다.

본 논문에서는 근접장 내 빔 포커싱을 하기 위해서 기계적 회전을 사용하는 초점 가변 메타 표면 렌즈를 제안한다. 제안된 메타 표면 렌즈는 모아레 렌즈 이론을 바탕으로 투과위상분포를 계산하고, 각 위치의 투과위상분포에 맞는 단위셀 형상을 적용하여 2개의 렌즈로 구성된다. 단위셀의 경우, 4개의 유전체 레이어에 5개의 원형 패치를 이용하여, 360°의 위상 변화를 도출하였다. FEKO EM 시뮬레이션 툴을 이용해 각 투과위상분포에 따른 0.48 m × 0.48 m의 메타 표면 렌즈를 설계하고, 평면파를 입사하여 렌즈의 투과위상분포를 확인하였다. 제안된 메타 표면 렌즈가 초점 가변이 가능함을 확인하기 위해 상단렌즈의 각도를 회전시켜 각 각도에서의 근접장 분포를 확인하여, 근접장 내 초점 가변이 가능함을 확인하였다.

II. 초점가변 메타표면 설계 및 분석

그림 1은 근접장 빔 포커싱을 위한 제안된 메타표면의 모식도를 나타낸다. 제안된 메타표면은 Lens 1(T₁)과 Lens 2(T₂)로 구성되어 있고, 각 렌즈는 동일하게 반경 R을 가지도록 구현하였다. 여기서, 두 렌즈의 후면에 평면파를 입사하는 경우, Fresnel 근접장 영역 내 회색 점 A에 빔이 집속하게 된다. 그리고 T₂를 회전시킴으로써 회색 점 B로 초점이 변하여 빔이 집속한다. 이러한 기술은 기존에 광학에서 사용하는 모아레 렌즈와 동일한 방식이다. 이러한 모아레 렌즈의 원리는 모아레 현상에서 비롯되었으며, 이는 유사한 주기를 가지는 두 개의 격자 패턴이 겹쳐질 때 맥놀이 현상에 의해 공간적으로 큰 패턴이 형성되는 현상을 나타낸다^[4]. 그림 2(a)와 그림 2(c)는 모아레 렌즈 이론을 바탕으로 하여 각 렌즈 T₁ 및 T₂에 대한 투과위상분포를 보여준다. T₁과 T₂는 서로 켈레복소수 관계를 가지

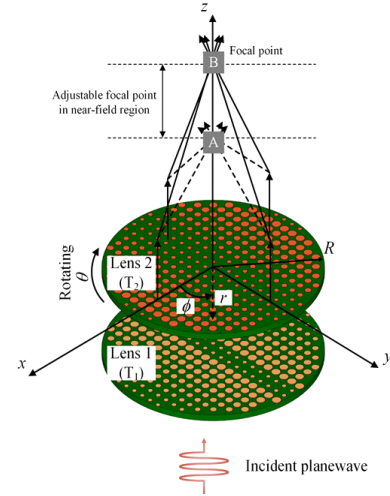


그림 1. 근접장 빔 포커싱을 위한 초점 가변 메타표면 렌즈 모식도

Fig. 1. Conceptual figure of metasurface lens with adjustable focal length for nearfield beam focusing.

고 있으며, 이에 따른 위상은 식 (1)과 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있다^[5].

$$T_1 = \exp(jF(r)\phi) \quad (1)$$

$$T_2 = T_1^* = \exp(-jF(r)\phi) \quad (2)$$

여기서 r 은 렌즈의 중심으로부터 각 cell이 위치하는 거리를 나타내며, ϕ 는 x 축을 주축으로 회전한 각도를 의미한다. $F(r)$ 은 임의의 실수 함수를 나타내며, 본 연구에서는 parabolic Fresnel lens 함수인 ar^2 를 적용하여 렌즈를 설계하였다. 그림 2(b)는 고정된 렌즈 T₁에 대한 투과위상분포를 나타내며, 그림 2(d) 렌즈 T₂를 $\theta=30^\circ$ 만큼 기계적으로 회전하였을 경우의 투과위상분포를 보여준다. T₂의 회전에 대한 투과위상분포는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_2 = \begin{cases} \exp(jF(r)(\phi-\theta)) & \text{for } \theta \leq \phi < 2\pi \\ \exp(jF(r)(\phi-\theta+2\pi)) & \text{for } 0 \leq \phi < \theta \end{cases} \quad (3)$$

θ 는 T₂에 대한 회전 각도를 나타내며, 최대 2π 까지 변화가 가능하다. 두 렌즈 T₁과 T₂의 위상을 곱함으로써 식 (4)에서 나타내는 최종 투과위상분포를 계산할 수 있다.

$$T_{12} = \begin{cases} \exp(jF(r)(\theta)) & \text{for } \theta \leq \phi < 2\pi \\ \exp(jF(r)(\theta-2\pi)) & \text{for } 0 \leq \phi < \theta \end{cases} \quad (4)$$

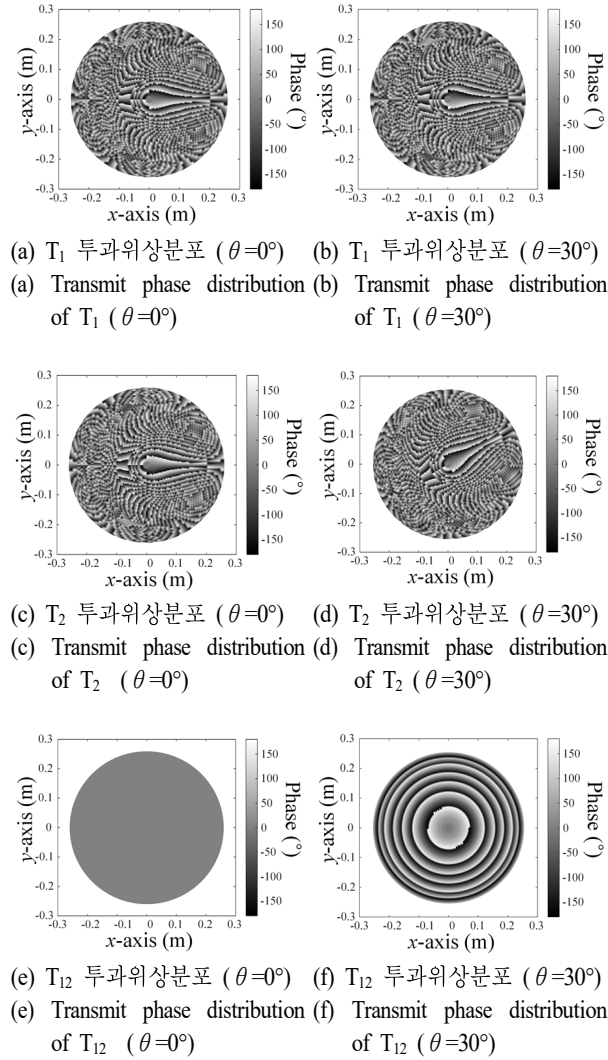


그림 2. 모아레 렌즈 이론을 이용한 빔포커싱 투과위상 분포

Fig. 2. Transmit phase distributions for a beam focusing using Moire lens theory.

그림 2(e)와 그림 2(f)는 렌즈 회전에 따른 최종 위상분포 결과를 보여준다. T_2 를 회전하지 않을 경우, 투과파의 위상 분포는 T_1 과 T_2 가 겹쳐 복소수이기 때문에 모든 위치에 대해 동일한 투과위상분포가 나타난다. 반면에 T_2 를 회전하는 경우 위상의 분포가 다중원을 형성하며 초점이 변하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 각 위치에서의 위상을 표현하기 위해 주기구조를 이용하여 단위셀을 $f=5.8$ GHz의 주파수에서 그림 3(a)와 같이 설계하였다^[6].

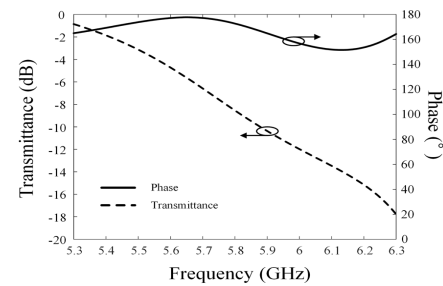
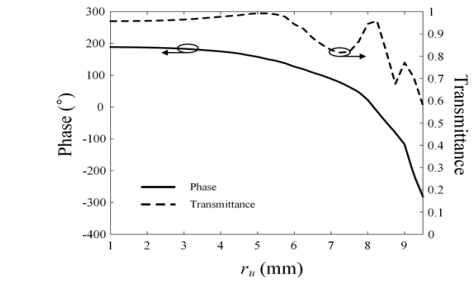
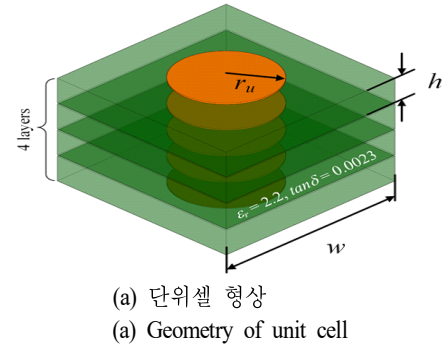


그림 3. 단위셀 형상에 따른 투과 계수 및 위상 특성

Fig. 3. Transmittance and phase characteristics according to unit cell geometry.

너비가 $w(=20$ mm [$0.38 \lambda_0$])인 정사각 모양의 4개 유전체 레이어에 반지름 r_u 를 가지는 5개의 원형 패치를 각 레이어에 인쇄하여 설계하였다. 이때 각 유전체의 높이는 $h(=3.2$ mm [$0.06 \lambda_0$])로 동일하게 결정하였다. 그림 3(b)는 r_u 를 1 mm에서 9.5 mm까지 변화시키며 투과상수와 투과되는 위상에 대한 변화에 대해 나타내며, 원형 패치의 반지름에 따라 360° 의 위상 변화와 0.6 이상의 투과계수

가 도출됨을 확인하였다. 그림 3(c)는 r_u 를 8.5 mm로 고정하고, 이때 투과계수와 위상변화에 대한 주파수 응답특성을 보여준다. 5.3 GHz에서 6.3 GHz 대역까지 투과계수는 3 dB 이상 위상의 변화는 152.3°로 나타남을 확인하였다. 그림 4(a)와 그림 4(b)는 모아레 렌즈 이론 기반의 총 484 개의 단위셀에 대한 투과위상분포를 나타내며, 각 위상분포에 맞는 단위셀을 이용하여 메타표면 렌즈(T_1 과 T_2)를 설계하였다.

그림 4(c)와 그림 4(d)는 각 위상분포에 맞는 단위셀 패치 모양을 이용한 메타 표면 렌즈 T_1 과 T_2 의 최종 구현 형

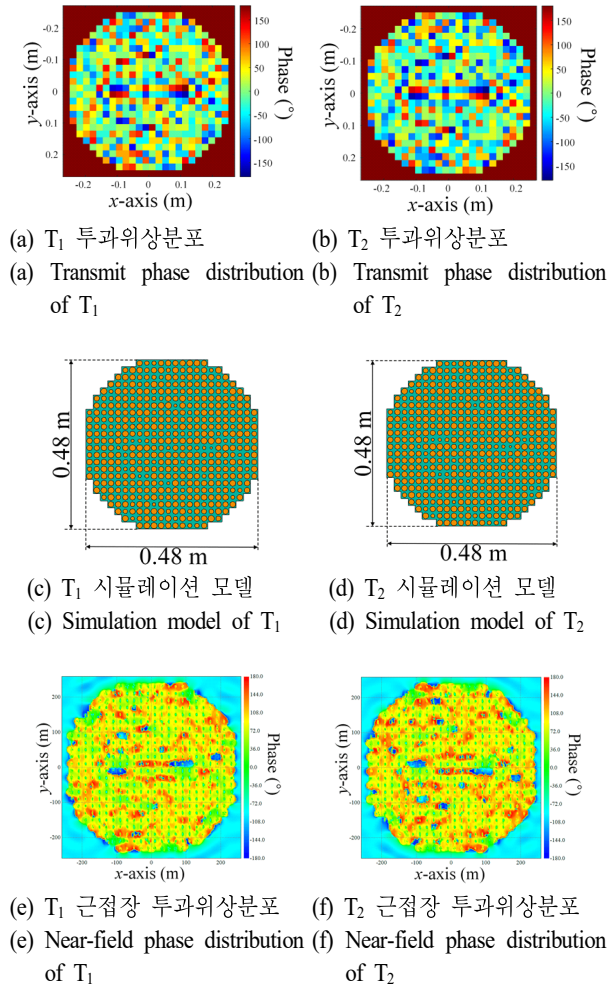


그림 4. 제안된 메타 표면 렌즈 투과위상분포 및 형상
Fig. 4. Transmit phase distributions and geometry of the proposed metasurface lens.

상을 나타낸다. 또한 FEKO EM 시뮬레이션 툴을 이용해 각 메타 표면에 평면파를 입사하였을 때, 메타표면 위의 근접장에 대한 투과위상분포를 그림 4(e)와 그림 4(f)에서 보여준다. 시뮬레이션 투과위상분포와 이론으로 계산한 결과가 유사함을 확인하였다. 시뮬레이션 위상분포와 이론으로 계산한 결과가 유사함을 확인하였다. 제안된 메타 표면 렌즈를 이용해 근접장에서 초점 가변이 가능함을 확인하기 위하여, T_1 과 T_2 를 z 축을 중심으로 15 mm 간격을 가지도록 배치한 후 평면파를 입사하여 시뮬레이션하였다.

그림 5는 T_2 의 각도를 $\theta = 0^\circ$ 에서 60° 까지 회전시켜 가며 초점이 가변되는 것을 나타내며, 초점 거리는 최소 0.68 m에서 최대 0.86 m까지 변화되는 것을 확인할 수 있다. 각 초점 위치에서의 정규화시킨 근접장 세기는 0.68 m에서 최대 전계 세기가 도출되었으며, 모든 회전각에 대해 최소 0.78 이상의 정규화된 근접장의 세기가 나타남을 확인하였다. 그림 6은 최대 초점 거리부터 최소 초점 거리에 대한 근접장 전계 분포에 대한 결과를 보여준다. x 축의 중심에서 전계가 집중되어 있으며, 초점이 가변되어도 중심 전계는 최소 2 dBV/m 이상 나타남을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 근접장 내 빔 포커싱을 하기 위한 기계적 회전을 이용한 초점 가변 메타 표면 렌즈를 제안하였

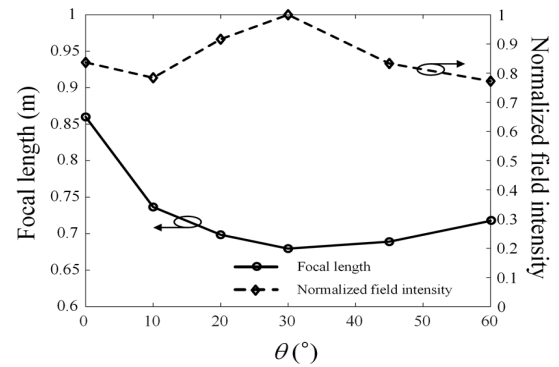


그림 5. T_2 렌즈 회전 각도에 따른 가변 초점 거리 및 정규화 근접장 세기

Fig. 5. Focal length and normalized field intensity according to the rotating angles of the lens T_2 .

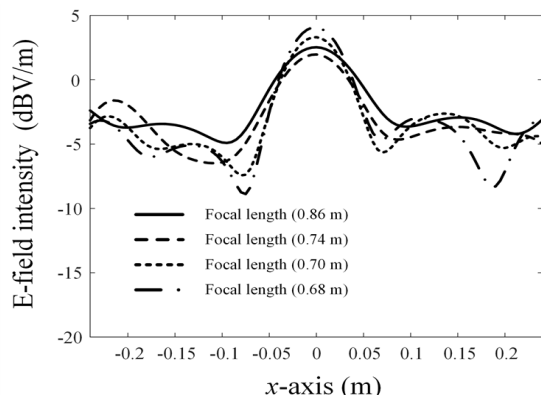


그림 6. 초점 거리에 따른 근접 전기 세기 분포

Fig. 6. Near E-field distribution according to the focal length.

다. 제안된 메타 표면 렌즈는 모아레 렌즈 이론을 바탕으로 투과위상분포를 계산 후, 각 위치의 투과위상분포에 맞는 단위셀 형상을 적용하여 2개의 렌즈를 설계하였다. 상단렌즈 T_2 의 각도를 $\theta = 0^\circ$ 에서 60° 까지 회전시켜 최대 0.86 m에서 최소 0.68 m까지 초점 거리가 변화됨을 확인하였다. 각 초점 위치에서의 정규화시킨 근접장 세기는 0.68 m에서 최대 전기 세기가 도출되었다. 본 연구는 향후 제안된 메타 표면 렌즈를 이용해 초점을 가변하여 근거리장 빔집속을 하는 무선 전력 전송 응용 분야에도 적용 가능할 것으로 사료된다.

임 태 홍 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7968-1272>



2016년 8월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)

2018년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2018년 9월~2019년 2월: 홍익대학교 과학기술연구소 연구원

2019년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학과 박사과정

[주 관심분야] 배열안테나, TMA 안테나, Antenna Propagation

References

- [1] G. Kim, B. Lee, "Design of wireless power and information transfer systems considering figure of merit for information," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 4, pp. 241-247, Oct. 2020.
- [2] L. Shan, W. Geyi, "Optimal design of focused antenna arrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, no. 11, pp. 5565-5571, Nov. 2014.
- [3] R. Hansen, "Focal region characteristics of focused array antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 33, no. 12, pp. 1328-1337, Dec. 1985.
- [4] S. Bernet, M. Ritsch-Marte, "Adjustable refractive power from diffractive moiré elements," *Applied Optics*, vol. 47, no. 21, pp. 3722-3730, Jul. 2008.
- [5] S. Bernet, W. Harm, and M. Ritsch-Marte, "Demonstration of focus-tunable diffractive Moiré-lenses," *Optics Express*, vol. 21, no. 6, pp. 6955-6966, Mar. 2013.
- [6] J. G. Lee, "Tutorial: Reconfigurable transmitarray antenna using metasurface," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 8, pp. 663-676, Aug. 2020.

서 철 현 [숭실대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6765-8734>



1983년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 3월: 서울대학교 전자공학 (공학석사)

1993년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)

1993년~1995년: MIT 연구원

1993년~1997년: 숭실대학교 정보통신학과 조교수

1999년 8월~2001년 1월: MIT 방문교수

1997년~2004년: 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수

2005년~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] 이동 및 위성통신 Microwave 부품 및 시스템, PBG를 이용한 RF 부품

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)

2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)

2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)

2003년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수

[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나