

## 리플렉트어레이 안테나의 개구 효율 구조적 최적화 연구

### A Study on the Structural Optimization of Aperture Efficiency for Reflectarrays

정재민 · 이홍주\* · 이재곤\*\*

Jae-Min Jeong · Hong Ju Lee\* · Jae-Gon Lee\*\*

#### 요약

본 논문에서는 메타표면을 기반으로 한 고이득 리플렉트어레이 안테나에 대한 개구 효율의 구조적 최적화 연구를 하였다. 다양한 동위상에 따른 유닛 셀 배치, 입사각 차이에 따른 반사위상 고려 및 유닛 셀 배치, 메타표면 외곽에 PEC 벽 적용, 중심 패턴 제거를 적용한 안테나의 성능을 비교·분석하였다. 설계된 리플렉트어레이 안테나는 개구 효율과 부엽 레벨을 주요 성능 지표로 설정하였으며, 전자기 시뮬레이션을 통해 각각의 구조가 안테나 특성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 모의실험 결과, 특정 환경 및 구조에서 개구 효율 향상과 부엽 레벨 억제와 같은 특성을 보였다. 설계된 리플렉트어레이 안테나는 제안한 구조적 최적화 과정을 거쳐 제작되었으며, 이를 기반으로 측정을 수행하였다. 그 결과, 측정된 방사 특성은 시뮬레이션 결과와 유사한 양상을 보여 설계된 리플렉트어레이 안테나의 타당성과 유효성을 확인하였다.

#### Abstract

In this study, structural optimization of the aperture efficiency of a high-gain reflectarray antenna based on a metasurface was conducted. The performances of various configurations were compared and analyzed, including unit cell arrangements under various in-phase criteria, unit cell arrangements considering the reflection phase with incident angle differences, application of a PEC wall at the outer boundary of the metasurface, and removal of the central patterns. The aperture efficiency and side-lobe level were adopted as the main performance indicators for the designed reflectarray antenna, and electromagnetic simulations were conducted to quantitatively evaluate the impact of each structure on the antenna characteristics. The full-wave simulation results showed improved aperture efficiency and suppressed side lobe levels in specific environments and configurations. The designed reflectarray antenna was fabricated using the proposed structural optimization process, and measurements were conducted. As a result, the measured radiation characteristics exhibited close agreement with the full-wave simulation results, thereby confirming the validity and effectiveness of the designed reflectarray antenna.

Key words: Reflectarray Antenna, Metasurface, Aperture Efficiency, Side Lobe Level, Millimeter-Wave Applications

---

「본 과제(결과물)는 2025년도 교육부 및 경상남도의 재원으로 경상남도RISE센터의 지원을 받아 수행된 지역혁신중심 대학지원체계(RISE)의 결과입니다 (2025-RISE-16-005).」

경남대학교 융합IT공학과(Department of Convergence IT Engineering, Kyungnam University)

\*경남대학교 전자SW공학과(Department of Electronic and Software Engineering, Kyungnam University)

\*\*경남대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Kyungnam University)

· Manuscript received September 26, 2025 ; Revised October 4, 2025 ; Accepted October 13, 2025. (ID No. 20250926-109)

· Corresponding Author: Jae-Gon Lee (e-mail: jaegonlee@kyungnam.ac.kr)

I. 서 론

최근 고주파 대역에서의 무선 통신 수요가 급격히 증가함에 따라, 고이득 안테나 기술에 대한 필요성이 높아지고 있다. 특히, 5G와 차세대 6G 통신, 위성 통신, 레이더 센서 등 다양한 응용 분야에서는 대용량 데이터 전송과 고품질 서비스 제공을 위해 넓은 대역폭과 안정적인 전파 전송 특성을 갖춘 안테나가 필수적이다. 이러한 요구를 만족하기 위해 다양한 고이득 안테나 구조가 제안됐으나, 기존의 파라볼릭 안테나는 큰 부피와 무게로 인해 설치와 운용에 제약이 따르고, 위상 배열 안테나는 복잡한 급전 구조와 높은 제작 비용이라는 한계를 지니고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 리플렉트어레이 안테나가 주목받고 있다<sup>[1]-[10]</sup>. 리플렉트어레이 안테나는 평면 구조를 기반으로 하여 경량화와 저비용 제작이 가능하며, 파라볼릭 안테나와 위상 배열 안테나의 장점을 동시에 제공한다. 특히, 반사면을 이루는 유닛 셀의 반사 위상을 정밀하게 제어함으로써, 다양한 방향으로의 빔 조향을 할 수 있기 때문에 위성 통신이나 밀리미터파 대역 응용에서 효과적인 기술로 평가받고 있다<sup>[11]-[21]</sup>.

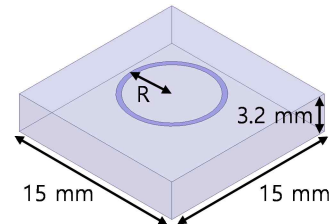
기존의 리플렉트어레이 안테나 연구는 주로 다양한 유닛 셀 구조의 설계와 효율 극대화를 목표로 하며, 이를 위해 F/D(focal length to diameter ratio)에 대한 최적화가 중심이 되어왔다. 그러나, 이러한 접근은 제한적인 구조 변화만을 반영하므로, 실제 환경에서의 유연한 적용에는 한계가 있다. 본 논문에서는 실용적이고 정밀한 안테나 성능 향상을 위해 다양한 설계 전략을 도입하였다. 먼저, 다양한 동위상에 따른 유닛 셀 배치를 고려하여 빔 정렬의 효율성을 비교하였으며, 입사각 변화에 따른 반사 위상 변화를 고려한 유닛 셀 배열을 통해 전반적인 반사 특성을 분석하였다. 또한, 메타표면 외곽에 PEC 벽을 적용하고, 중심부 패턴을 부분 제거함으로써 중심 영역의 전파 특성 변화가 전체 방사 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이때, 전자기 시뮬레이션을 통해 각 구조가 안테나 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 구조적 설계 변화가 고이득 및 부엽 억제 특성에 어떠한 차이를 발생시키는지를 체계적으로 고찰하였다. 이를 통해 메타표면 기반 리플렉트어레이 설계의 방향성을 제시함과 동시에, 고이득 통신 시스템 및 밀리미터파 응용

의 실질적인 적용 가능성을 확인하고자 한다.

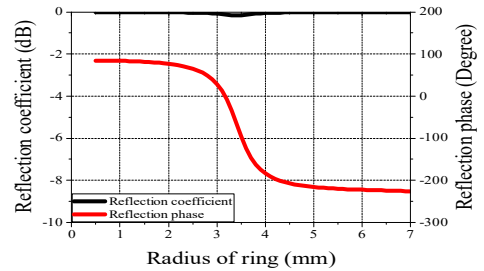
II. 리플렉트어레이 안테나 구조

리플렉트어레이 안테나는 그림 1(a)와 같이 X-밴드(8.2 GHz)에서 동작하는 유닛 셀을 배열하여 설계되었다. 유닛 셀 크기는 가로 15 mm( $0.41 \lambda_0$ ), 세로 15 mm( $0.41 \lambda_0$ ), 두께 3.2 mm이며,  $\epsilon_r=4.5$ ,  $\tan\delta=0.002$ 인 Rogers TMM 4 기판이 사용되었다. 기판 하단은 접지면, 상단에는 링 모양의 금속 패턴이 존재한다. 링 모양 패턴의 폭을 0.4 mm로 고정한 후, 반경을 0.5 mm부터 7 mm까지 조절하여 모의실험된 유닛 셀의 반사 계수 및 반사 위상 결과를 그림 1(b)에 나타내었다. 모의실험 결과, 약  $310^\circ$ 의 반사위상 변화 폭을 얻을 수 있었고, 반사 계수는 약 0 dB임을 확인하여 전반사가 가능함을 알 수 있다.

그림 2는 유닛 셀을 21×21개로 배열하여 구성한 리플렉트어레이 안테나의 모습이다. 이때 최대 개구 효율의 얻기 위해 모서리 부분의 유닛 셀을 계단 모양으로 각각 12개씩 제거하여 원형에 가깝게 설계하였다. 리플렉트어레이 안테나의 고이득 특성을 확보하기 위해서는 메타표면



(a) 메타표면의 유닛 셀  
(a) Unit cell of metasurface



(b) 모의실험된 반사계수와 반사위상 결과  
(b) Full-wave simulated reflected coefficients and phase

그림 1. 메타표면의 유닛 셀 및 모의실험 결과  
Fig. 1. Metasurface unit cell and full-wave simulated results.

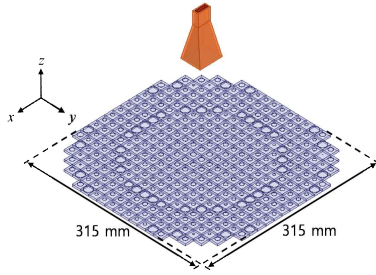


그림 2. 리플렉트어레이 안테나 설계

Fig. 2. Design of reflectarray antenna.

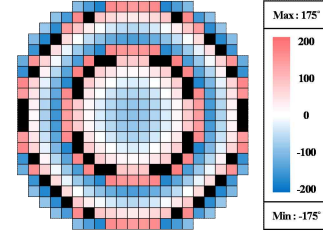
에서 반사되는 전파가 서로 동위상이 되어야 한다. 또한, 10 dBi의 이득을 가진 급전 혼 안테나를 사용하였기 때문에, taper 효율과 spillover 효율 관점에서 최대 이득을 얻기 위해 F/D 비율이 0.5가 되도록 급전용 혼 안테나를 배치하였다<sup>[22]</sup>. 이렇게 배치된 급전으로부터 각 유닛 셀 위치에 입사하는 전파의 위상을 확인할 수 있다. 각 유닛 셀이 반사해야 하는 목표 위상은 유닛 셀에서 반사되는 위상과 입사 전파의 위상 차이를 통해 구할 수 있다. 그리고 목표 위상 값에 대응되는 반경을 갖는 링 형태의 유닛 셀을 배치함으로써 리플렉트어레이 안테나를 설계하였다.

### 2.1 다양한 동위상에 따른 유닛 셀 배치

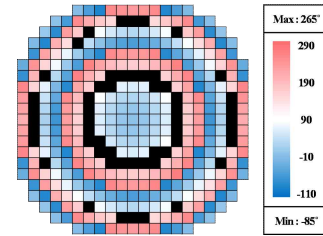
설계한 유닛 셀은 약 310° 범위의 반사 위상을 가짐으로, 목표 위상 값에 해당되는 링 반경이 존재하지 않는 경우에는 가장 근접한 값에 해당되는 링 반경을 선택하여 유닛 셀을 배치하였다. 그림 3은 동위상 기준을 0°, 90°, 180°, 270°로 설정하였을 때 각 유닛 셀이 반사해야 하는 위상 분포를 나타내며, 검은색으로 표시된 부분은 목표 위상 값에 대응되는 링 반경이 존재하지 않아, 근접한 값의 반경을 적용하였음을 의미한다. 그림 4는 동위상 기준별 유닛 셀 배치를 적용한 리플렉트어레이 안테나의 원거리 방사패턴을 나타내며, 표 1은 최대 이득, 부엽 레벨, 안테나 효율을 정리한 것이다. 안테나 효율( $\eta$ )은 식 (1)에 의해서 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{G\lambda^2}{4\pi A} \quad (1)$$

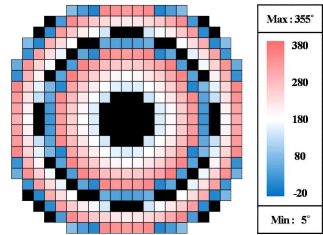
여기서,  $G$ 는 안테나 이득,  $\lambda$ 는 동작주파수의 파장,  $A$ 는



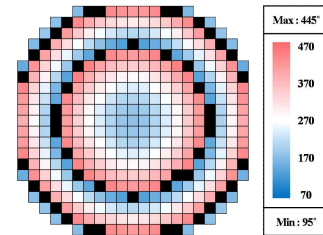
(a) 메타표면의 반사 위상(동위상=0°)  
(a) Reflection phase of metasurface (In-phase=0°)



(b) 메타표면의 반사 위상(동위상=90°)  
(b) Reflection phase of metasurface (In-phase=90°)



(c) 메타표면의 반사 위상(동위상=180°)  
(c) Reflection phase of metasurface (In-phase=180°)



(d) 메타표면의 반사 위상(동위상=270°)  
(d) Reflection phase of metasurface (In-phase=270°)

그림 3. 목표 동위상에 따른 메타표면의 반사 위상분포  
Fig. 3. Reflection phase distribution of the metasurface for the target in-phase.

반사판의 면적이다. 안테나 개구효율은 46 %에서 53 %까지의 변화, 부엽 레벨은 약 19 dB에서 약 23 dB까지의 결과값 변화를 얻었다. 표 1에서 알 수 있듯이, 동위상 기준

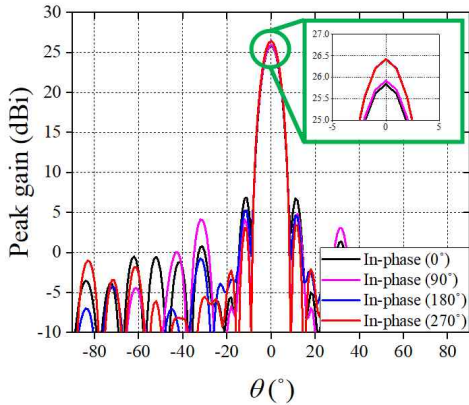


그림 4. 다양한 동위상에 따른 유닛 셀 배치를 적용한 리플렉트어레이 안테나의 모의실험 결과(x-z plane)  
 Fig. 4. Full-wave simulated results of the reflectarray antenna with unit cell arrangements based on various in-phase conditions (x-z plane).

표 1. 다양한 동위상에 따른 유닛 셀 배치를 적용한 리플렉트어레이 안테나의 모의실험 결과  
 Table 1. Full-wave simulated results of the reflectarray antenna with unit cell arrangements based on various in-phase conditions.

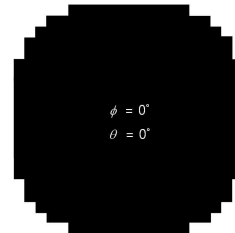
In-phase reference (°)	0	90	180	270
Maximum gain (dBi)	25.8	25.9	26.4	26.4
Side lobe level (dB)	19.0	21.1	21.2	23.0
Antenna efficiency (%)	46	47	53	53

을 0° 또는 90°로 설정한 경우보다 180°와 270°로 설정한 경우에서 더 높은 이득과 향상된 안테나 효율이 나타났다. 또한, 부엽 레벨도 270°로 설정한 경우에 가장 우수하게 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 기준 위상을 하나만 설정하기보다는 여러 경우를 설정하여 최적의 조건을 선택할 필요가 있음을 나타낸다.

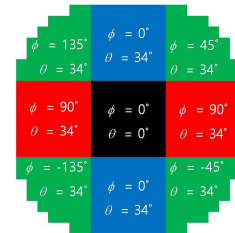
2-2 입사각 차이에 따른 유닛 셀 배치

메타표면의 중앙부 유닛 셀에는 전파가 정상 입사( $\theta = 0^\circ$ )하지만, 개구 주변부에 위치한 유닛 셀에는 전파가 경사 입사하게 된다. 이때, 각 유닛 셀은 동일한 급전원로부터 방사된 전파를 수신하더라도, 입사각에 따라 반사 위

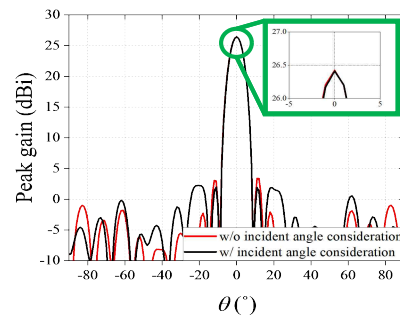
상 특성이 달라질 수 있다. 즉, 이는 급전점으로부터의 거리 차이에 따른 위상지연 보상과는 별개로, 입사각 자체가 반사 위상 응답에 미치는 영향을 평가하기 위한 것이다. 이에 따라 입사각 고려 여부에 따른 차이를 비교하기 위해 유닛 셀 배치를 달리하여 성능을 분석하였다. 그림 5(a)는 모든 유닛 셀에 대해 정상 입사한다고 가정하여 위상을 계산하고 유닛 셀을 배치한 경우이며, 그림 5(b)는 메타표면을 크



(a) 입사각 미고려  
 (a) w/o incident angle consideration



(b) 입사각 고려  
 (b) w/ incident angle consideration



(c) 모의실험된 최대 이득 결과(x-z plane)  
 (c) Full-wave simulated peak gain results (x-z plane)

그림 5. 입사각 차이에 따른 반사위상 고려 여부를 적용한 유닛 셀 배치 및 모의실험 결과

Fig. 5. Unit cell arrangement and full-wave simulated results w/o and w/ consideration of reflection phase depending on incident angle differences.

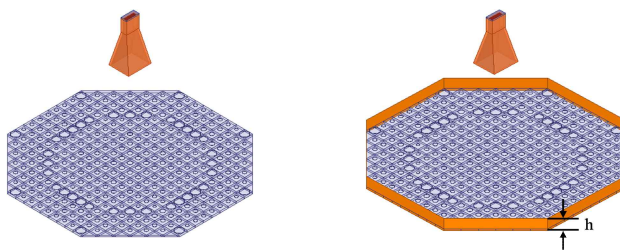
표 2. 입사각 차이에 따른 반사위상 고려 여부에 따른 리플렉트어레이 안테나 모의실험 결과

Table 2. Full-wave simulated results w/o and w/consideration of reflection phase depending on incident angle differences.

Metric	Unit cell arrangement without incident angle consideration	Unit cell arrangement with incident angle consideration
Maximum gain (dBi)	26.4	26.4
Side lobe level (dB)	23.0	24.5
Antenna efficiency (%)	53	53

계 9개의 구간으로 분할한 뒤 각 구간의 중앙을 기점으로 하는 대표 입사각을 적용하여 위상을 계산하고 유닛 셀을 배치한 경우이다. 그림 5(c) 및 표 2는 입사각 차이에 따른 반사 위상 고려 및 유닛 셀 배치를 적용한 리플렉트어레이 안테나의 모의실험 결과이다. 입사각 고려 여부에 따라 최대 이득 및 안테나 효율은 큰 차이가 없었으며, 부엽 레벨은 입사각을 고려한 경우가 24.5 dB로 소폭 개선되었다. 이를 통해 본 연구에서 리플렉트어레이 안테나 설계를 위한 유닛 셀 배치 시 정상 입사 조건만 고려해도 성능 평가에 충분함을 확인하였다.

### 2-3 PEC 벽 적용



(a) PEC 벽 미적용  
(a) w/o PEC wall

(b) PEC 벽 적용  
(b) w/ PEC wall

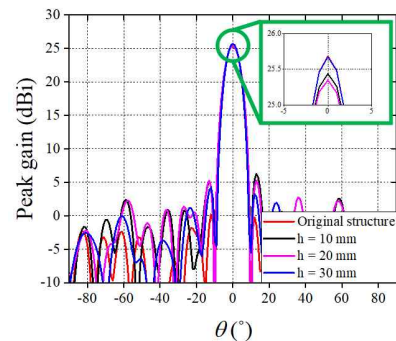
안테나 개구 효율은 크게 spillover 효율과 taper 효율의 곱으로 표현된다. Spillover 효율은 급전된 전력이 개구 내 얼마나 잘 수용되는지를 나타내며, taper 효율은 개구 전역에 걸쳐 전력 분포가 얼마나 균일한지를 의미한다.

본 연구에서는 spillover 억제를 통해 개구 효율을 개선하고자, 그림 6(a)와 같이 메타표면 외곽을 팔각형으로 형상화하였다. 이후 메타표면 외곽에 PEC 벽을 배치하였다. PEC 벽의 높이는 10, 20, 30 mm로 변화시키며 급전 조건 ( $F/D=0.5$ )과 유닛 셀 위상 배치는 동일하게 유지하였다. PEC 벽은 메타표면으로 입사하는 전파가 외부로 누설되는 것을 방지하기 때문에, spillover 효율 개선을 통한 개구 효율 개선을 기대할 수 있다. 그러나 그림 6(c) 및 표 3의 결과에서 확인되듯 PEC 벽 적용 및 높이를 증가시켰으나, 최대 이득, 부엽 레벨 등의 지표에서 뚜렷한 개선 효과는

표 3. 메타표면 외곽 PEC 벽 적용 및 높이 변화에 따른 리플렉트어레이 안테나 모의실험 결과

Table 3. Full-wave simulated results of reflectarray antenna with PEC wall application and height variation at the outer boundary of the metasurface.

Height of PEC wall (mm)	0	10	20	30
Maximum gain (dBi)	25.7	25.4	25.4	25.7
Side lobe level (dB)	25.5	19.2	20.1	21.5
Antenna efficiency (%)	45	42	42	45



(c) 모의실험된 최대 이득 결과(x-z plane)

(c) Full-wave simulated peak gain results (x-z plane)

그림 6. 메타표면 외곽 PEC 벽 적용 및 높이 변화에 따른 리플렉트어레이 안테나 모의실험 결과

Fig. 6. Full-wave simulated results of reflectarray antenna with PEC wall application and height variation at the outer boundary of the metasurface.

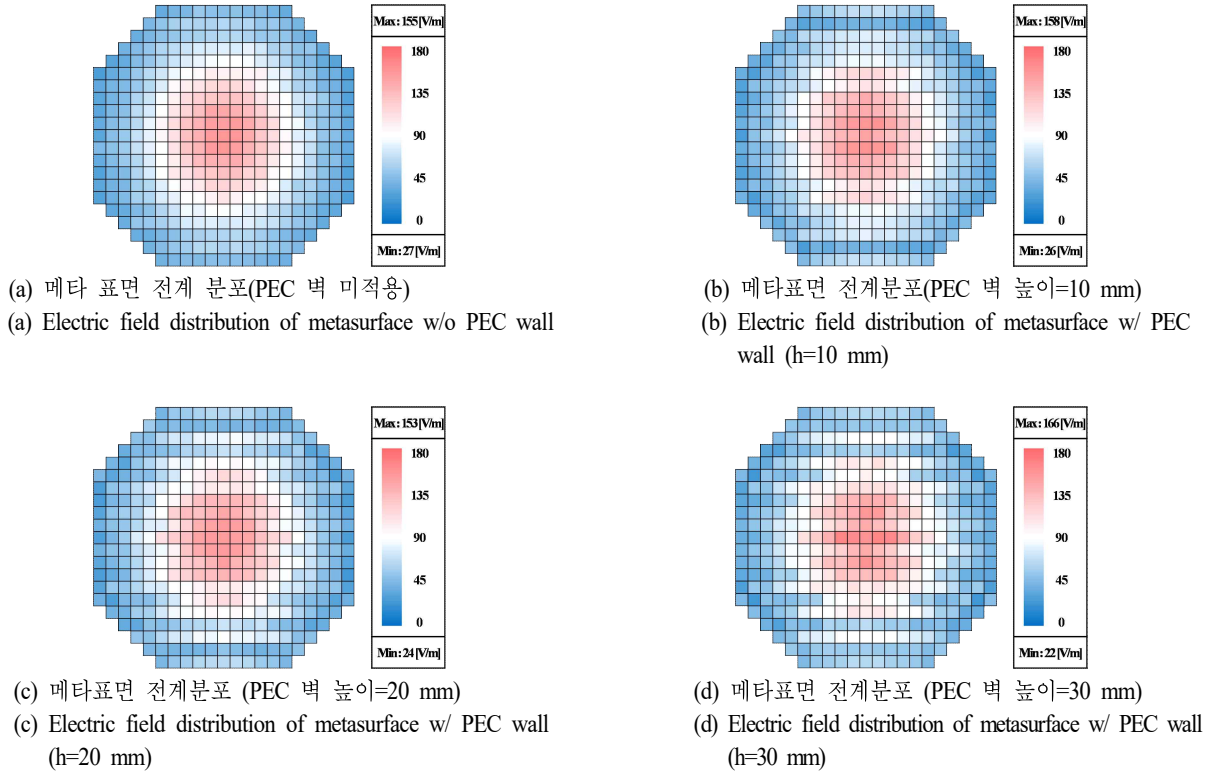


그림 7. PEC 벽 유무 및 높이 변화에 따른 메타표면 전계 분포  
 Fig. 7. Electric field distribution of metasurface with PEC wall presence and height variation.

나타나지 않았다. 그 이유는 taper 효율이 낮기 때문이다. 그림 7에 나타난 유닛 셀 중심 전계 분포 결과에서 확인할 수 있듯, PEC 벽의 유무와 무관하게 개구 전역에서 전계 분포가 불균일하게 나타났다. 특히 개구 중앙부에 전력이 집중되는 형태가 유지되면서, spillover 효율 개선 효과가 낮은 taper 효율에 의해 상쇄되었다. 따라서 개구 효율 향상을 위해 메타표면 외곽에 PEC 벽을 추가하는 것은 효과가 없음을 확인할 수 있다.

#### 2.4 중심부 패턴 제거

리플렉터레이 안테나는 기존 파라볼릭 안테나를 대체하기 위한 평면형 반사 구조로, 파라볼릭 안테나의 구조적 특징을 고려할 필요가 있다. 예를 들어, 이중 곡면 반사판 구조에서는 주 반사판 중심 상부에 부 반사판이 배치되며, 이를 위한 급전 구조가 필요하므로 주 반사판 중앙에는 개구부가 형성된다. 이러한 이유로 실제 시스템

구현에서는 개구 중심부의 반사 구조를 제거해야 하는 경우가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 리플렉터레이 안테나의 중심부 패턴만 제거한 구조에서 안테나 성능을 분석하였다. 그림 8 및 표 4는 메타표면 중심부 패턴 제거에 따른 리플렉터레이 안테나 모의실험 결과이다. 중심부 패턴을 제거하지 않은 경우와 비교했을 때, 1×1 크기의 제거에서는 큰 변화가 없었으나, 패턴 제거 영역이 확대될수록 최대 이득과 부엽 레벨이 감소하는 경향을 보였다. 패턴 제거 영역이 5×5까지 확대된 경우, 최대 이득은 약 25.2 dBi로 1.2 dB 낮아졌으며, 안테나 효율은 40%로 13% 감소하였다. 부엽 레벨 역시 13.5 dB로 9.5 dB 저하된 결과가 확인되었다.

### III. 제작 및 측정

본 연구에서 설계한 리플렉터레이 안테나는 실제 제작을 통해 성능을 검증하고, 모의실험 결과와 비교·분석

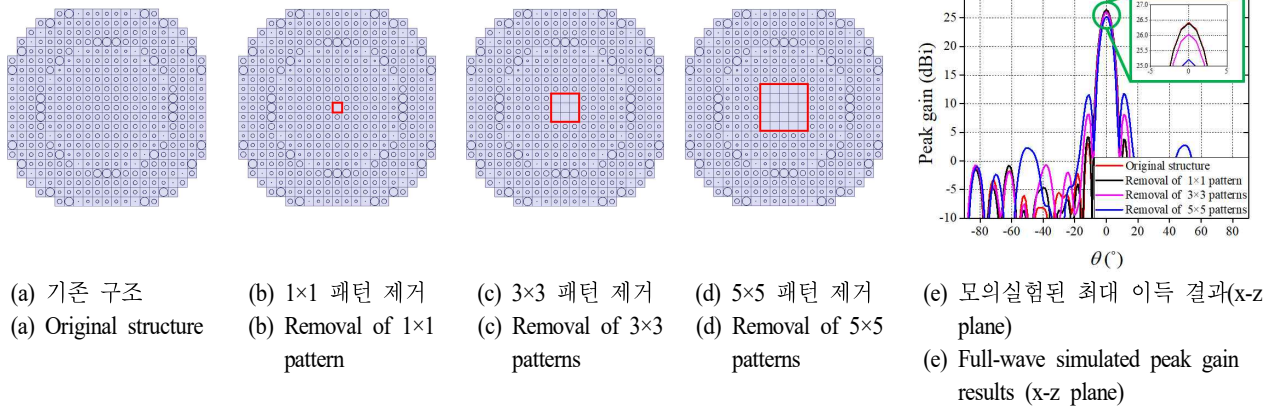
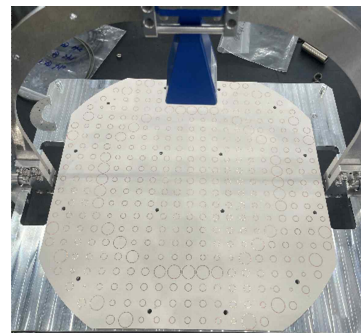


그림 8. 메타표면 중심부 패턴 제거에 따른 리플렉트어레이 안테나 모의실험 결과  
 Fig. 8. Full-wave simulated with removal of center pattern of metasurface.

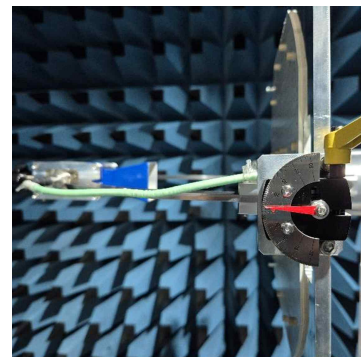
표 4. 메타표면 중심부 패턴 제거에 따른 리플렉트어레이 안테나 모의실험 결과  
 Table 4. Full-wave simulated results of reflectarray antenna with removal of center pattern of metasurface.

Removal of center pattern	0	1×1	3×3	5×5
Maximum gain (dBi)	26.4	26.4	26.0	25.2
Side lobe level (dB)	23.0	22.3	17.9	13.5
Antenna efficiency (%)	53	53	48	40

하였다. 그림 9(a)는 제작된 리플렉트어레이 안테나를 위에서 본 모습이다. 급전용 혼 안테나가 모의실험에서 설정하였던 F/D=0.5 조건을 맞추도록 메타표면 위로 배치되어있으며, 측정 시 발생하는 움직임을 대비하여 금속 지그 및 지지대로 고정되어있다. 그림 9(b)는 제작한 리플렉트어레이 안테나의 성능을 확인하기 위해 무반사 챔버 내부에서 거치해 둔 사진이다. 그림 10은 모의실험과 측정 결과 이득 패턴을 비교하기 위한 그래프이며, 표 5는 이를 정량적으로 평가하기 위해 수치로 나타낸 것이다. 측정된 최대 이득(25.5 dBi)은 모의실험 값(26.4 dBi)에 비해 약 1 dB 낮게 나타났다. 또한, 부엽 레벨과 안테나 효율은 각각 모의실험 대비 4.4 dB, 10 % 낮은 것으로 확인되었다. 이는 금속지지 구조에 의한 전파 차폐효과, 실제 제작 오차 및 구조 불완전성, 측정환경에 따른 지향성 비



(a) 제작된 리플렉트어레이 안테나(top view)  
 (a) Fabricated reflectarray antenna (top view)



(b) 무반사 챔버 내 측정 사진  
 (b) Photograph of measurement in anechoic chamber

그림 9. 제작된 리플렉트어레이 안테나 및 무반사 챔버 내 측정 사진

Fig. 9. Photographs of fabricated reflectarray antenna and measurement in anechoic chamber.

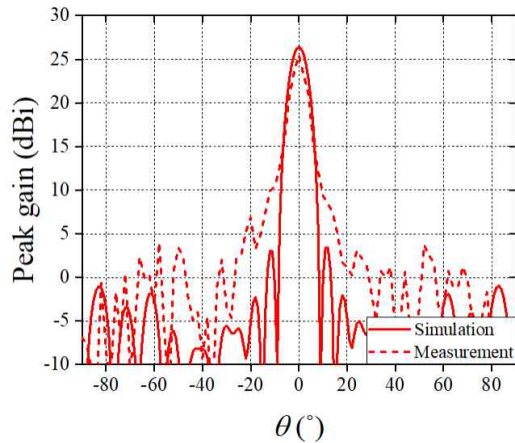


그림 10. 리플렉트어레이 안테나 모의실험 및 측정 결과  
Fig. 10. Full-wave simulated and measured results of reflectarray antenna.

표 5. 리플렉트어레이 안테나 모의실험 및 측정 결과  
Table 5. Full-wave simulated and measured results of reflectarray antenna.

Simulation	Maximum gain (dBi)	26.4
	Side lobe level (dB)	23.0
	Antenna efficiency (%)	53
Measurement	Maximum gain (dBi)	25.5
	Side lobe level (dB)	18.6
	Antenna efficiency (%)	43

대칭으로 발생한 결과로 분석된다. 금속지지 구조에 의한 측정된 이득 감소는 오프셋 급전 구조를 적용함으로써 개선될 수 있으며, 향후 연구에서는 구조적 보안을 통해 제안된 최적화 기법의 효율성을 검증할 예정이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 X-밴드에서 동작하는 리플렉트어레이 안테나를 설계·제작하여, 구조적 특성이 방사 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 동위상 기준을 설정하는 것은 하나로 고정하기보다 여러 값을 설정하여 비교·검증하는 과정이 필요함을 확인하였으며, 입사각 차이에 따른 방사 위상 고려 유무에 따른 유닛 셀 배치 결과는 큰 차이를 보이지 않아 정상 입사 조건으로 단순화해도 타당함을 보였다. 메타표면의 중심부는 패턴을 제거하는 영역이 확

대될수록 이득 및 부엽 레벨이 감소하는 경향을 보였으며, PEC 벽은 spillover 효율을 개선할 수 있으나 taper 효율 저하로 인해 성능 개선 효과가 크지 않았다. 마지막으로 제작 및 측정 결과는 가공 오차와 금속 지지 구조 등 현실적인 제약으로 인한 차이가 발생하였으나, 방사 패턴의 경향성이 모의실험 결과와 유사한 것을 확인하였다. 이러한 결과는 리플렉트어레이 안테나 설계 시 실제 제작 및 측정 환경에서 발생할 수 있는 제약을 고려해야 하며, 동시에 다양한 구조적 변화를 검토하여 최적의 성능을 달성할 수 있도록 설계 방향성을 제공한다.

#### References

- [1] J. Ali, A. Ahmad, and D. Choi, "Single-layer metasurface-based reflectarray antenna with H-shaped slotted patch for X-band communication," *Nanomaterials*, vol. 14, no. 18, p. 1495, Sep. 2024.
- [2] X. Li, X. Li, Y. Y. Luo, G. M. Wei, and X. Yi, "A novel single layer wideband reflectarray design using two degrees of freedom elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 8, pp. 5095-5099, Aug. 2021.
- [3] B. Ma, F. Lu, G. Zhi, X. Xue, X. Zhao, and C. Ma, et al., "Development of an X-band reflectarray antenna for satellite communications," *Scientific Reports*, vol. 11, p. 6530, Mar. 2021.
- [4] M. Karimipour, I. Aryanian, "High-efficiency dual-polarized broadband reflecting metasurface using continuous polarization conversion technique and element with multi degree of freedom," *Scientific Reports*, vol. 12, p. 7577, May 2022.
- [5] S. Li, Y. Cai, H. Ma, L. Bu, S. Qi, and Y. Cao, et al., "A novel broadband reflectarray antenna employing equivalent magnetic dipole elements," *Scientific Reports*, vol. 15, p. 10771, Mar. 2025.
- [6] L. Zhang, J. Zhang, Y. He, C. Mao, W. Li, and S. W. Wong, et al, "A single-layer 10~30 GHz reflectarray antenna for the Internet of vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 1480-1490, Feb. 2022.

- [7] H. Zhang, Y. Wang, J. Wang, H. Xiao, X. Chen, and X. Wang, "A single-layer circularly polarized reflectarray antenna with high aperture efficiency for microwave power transmission," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2023, no. 1, p. 1569710, Jan. 2023.
- [8] M. I. Abbasi, M. Y. Ismail, M. R. Kamarudin, and Q. H. Abbasi, "Reconfigurable reflectarray antenna: A comparison between design using PIN diodes and liquid crystals," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, no. 1, p. 2835638, Oct. 2021.
- [9] M. Elahi, T. Jeong, Y. Yang, K. Y. Lee, and K. C. Hwang, "A wideband reflectarray antenna for satellite application with low cross-polarization," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 7, p. 4545, Apr. 2023.
- [10] L. Veluchamy, K. T. Selvan, R. Jyoti, and S. S. Kumar, "Wideband reflectarray antennas using concentric ring-based elements for Ku-band applications," *IETE Journal of Research*, vol. 69, no. 3, pp. 1675-1685, Apr. 2023.
- [11] G. Bashir, A. K. Singh, and A. Dubey, "Wide band beam steering digital metasurface reflectarray antenna for millimeter wave applications," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 121800-121810, Oct. 2023.
- [12] Z. Zhang, H. Luyen, J. H. Booske, and N. Behdad, "A dual-band, polarization-rotating reflectarray with independent phase control at each band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 69, no. 9, pp. 5546-5558, Sep. 2021.
- [13] Q. Zhou, L. Guo, "A multipolarized metal-only reflectarray antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 8, pp. 6977-6982, Aug. 2023.
- [14] S. A. M. Soliman, E. M. Eldesouki, and A. M. Attiya, "Analysis and design of an X-band reflectarray antenna for remote sensing satellite system," *Sensors*, vol. 22, no. 3, p. 1166, Feb. 2022.
- [15] A. Ali, M. Khalily, T. Brown, and R. Tafazolli, "Metasurface-based THz reflectarray antenna with vortex multiplexing and beam-steering capabilities for future wireless communications," *iScience*, vol. 25, no. 8, p. 104725, Aug. 2022.
- [16] Juwanto, S. Attamimi, Umairah, and M. Alaydrus, "1-Bit reconfigurable reflectarray for short-range wireless systems," *Progress in Electromagnetics Research C*, vol. 159, p. 48, Aug. 2025.
- [17] Y. Zhao, S. Yu, and N. Kou, "PIN diodes loaded 1-bit cylindrical reconfigurable reflectarray antenna," *Progress in Electromagnetics Research Letters*, vol. 106, pp. 97-102, Sep. 2022.
- [18] A. Niccolai, F. Grimaccia, M. Mussetta, R. Zich, and A. Gandelli, "Optimization environment definition for beam steering reflectarray antenna design," *Mathematics*, vol. 10, no. 1, p. 33, Dec. 2021.
- [19] B. Beiranvand, R. Mirzavand, "Enhancing wireless applications through reconfigurable electro-mechanical reflectarray antenna design for beam steering," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 30140, Dec. 2024.
- [20] B. T. Malik, S. Khan, and S. Koziel, "Beam steerable MIMO antenna based on conformal passive reflective metasurface for 5G millimeter wave applications," *Scientific Reports*, vol. 14, p. 24086, Oct. 2024.
- [21] Y. H. Nam, J. H. Lee, "A novel method for enhancement of gain bandwidth of a hybrid 3-state reconfigurable reflectarray metasurface antenna," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 5, pp. 447-452, Sep. 2025.
- [22] M. H. Dahri, M. H. Jamaluddin, F. C. Seman, M. I. Abbasi, N. F. Sallehuddin, and A. Y. I. Ashyap, et al., "Aspects of efficiency enhancement in reflectarrays with analytical investigation and accurate measurement," *Electronics*, vol. 9, no. 11, p. 1887, Nov. 2020.

정 재 민 [경남대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-8152-9081>



2025년 2월: 경남대학교 전자SW공학과 (공학사)

2025년 3월~현재: 경남대학교 융합IT공학과 석사과정

[주 관심분야] 안테나, 메타표면 등

이 재 곤 [경남대학교/부교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2392-1606>



1999년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)

2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학석사)

2007년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학박사)

2007년 3월~2015년 8월: LG전자 책임연구원

2015년 9월~2019년 2월: 홍익대학교 메타물질전자소자센터 연구교수

2019년 3월~현재: 경남대학교 전기공학과 부교수

[주 관심분야] Metamaterial/Metasurface RF 소자, RF 센서, 5G/6G 안테나 등

이 흥 주 [경남대학교/학부과정]

<https://orcid.org/0009-0003-5295-3428>



2020년 3월~현재: 경남대학교 전자SW공학과 학부과정

[주 관심분야] 안테나, 메타표면 등