THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2020 Aug.; 31(8), 663～676.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2020.31.8.002
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

# 튜토리얼: 메타표면을 이용한 빔포밍/빔조향 투과 안테나

# Tutorial: Reconfigurable Transmitarray Antenna Using Metasurface

이 재 곤

Jae-Gon Lee

## 요 약

본 논문에서는 메타표면을 이용한 빔포밍/빔조향 고이득 투과 안테나의 동작 원리를 소개하고, 최신 연구동향에 대해서 알아본다. 소스 안테나와 평면 형태의 메타표면으로 구성된 투과 안테나는 높은 투과도와 360도 이상의 투과 위상변화 특성을 가지는 메타표면에 의해서 소스 안테나의 파면을 제어하는 동작원리를 가진다. 메타표면을 투과한 파면을 원하는 빔조향 각도의 수직방향에 동위상으로 제어하면 특정 각도로 방사하는 고이득의 안테나를 설계할 수 있다. 원하는 특정 각도로 빔을 조향하기 위해서는 크게 두 가지의 방법으로 나눌 수 있는데, 투과 위상변화가 가변적인 메타표면을 적용하거나 소스 안테나의 파면을 형상을 변화시키는 방법이 있다. 이러한 타입의 빔포밍/빔조향 고이득 안테나는 고효율, low-profile, 저비용 관점에서 주로 연구되어지고 있고, 본 논문에서는 다양한 빔조향 고이득 투과 안테나의 구조와 특징을 분석하였다.

## Abstract

In this paper, we describe the operation principle of a reconfigurable transmitarray antenna(TA) using a transmissive metasurface (MS) and introduce state-of-the-art technology trends. The TA comprises a source antenna; further, the design of a planar MS allows for the control of the wave front from the feed source when the MS exhibits a good transmittance and a full transmission phase variation of 360°. When the MS varies the phase of the transmitted wave passing through the MS such that it is in-phase at the normal plane of the desired direction, a highly directive beam can be obtained in this direction. Two types of methods can be employed to achieve beam steering in the desired direction. One is to control the shape of the transmission phase using an active MS with a changeable transmission phase variation. The other is to control the shape of the transmission phase by varying the wave front of the feed source. The reconfigurable TA has been intensively researched to achieve high efficiency, low-profile, and low-cost performance; further, the implementation and characteristics of various reconfigurable high-gain TAs are analyzed in this study.

Key words: Transmitarray Antenna(TA), Metasurface, Beam Forming, Beam Steering

## Ⅰ. 서 론

고이득 빔조향 안테나는 5G 무선이동통신, radio frequency(RF) 무선전력전송, 위성통신 등에 많이 사용되고 있는 안테나이다. 이러한 고이득 및 빔조향 특성을 얻기 위해서 전통적으로 위상배열 안테나, 유전체 렌즈 안테

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1F1A1051217).」

경남대학교 전자공학과 (Department of Electronic Engineering, Kyungnam University)

· Manuscript received July 30, 2020 ; Revised August 18, 2020 ; Accepted August 25, 2020. (ID No. 20200730-005S)

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

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

나, 파라볼릭 안테나 등과 같은 타입의 안테나로 설계가 되었다[1]~[3]. 그러나 이러한 종류의 안테나들은 좋은 특성에도 불구하고 몇 가지 단점이 있는데, 파라볼릭 안테나와 유전체 렌즈 안테나는 구조적으로 곡선의 형태를 가지고 있기 때문에 제작하기가 어렵고 고가이다. 또한 평면 위상배열 안테나는 밀리미터파 대역에서 고이득 특성을 요구하는 응용분야에서는 복잡한 급전 구조와 안테나 전체 무선성능에 영향을 줄 수 있는 정도의 손실이 발생할 수 있다.

2011년 투과 및 반사된 전자파의 파면을 제어할 수 있는 특성변화가 있는 메타표면(Gradient metasurface)[4]이 제안되면서 기존의 고이득 안테나의 단점을 해결하기 위해서 평면 형태의 메타표면을 이용한 투과 안테나의 연구가 최근 몇 년간 많은 연구가 진행되고 있다[5]~[9]. 소스 안테나와 평면 형태의 메타표면으로 구성된 투과 안테나는 높은 투과도와 360도 이상의 투과 위상변화 특성을 가지는 메타표면에 의해서 소스 안테나의 파면을 제어하는 동작원리를 가진다. 이러한 타입의 투과 안테나는 고이득 안테나뿐만 아니라, 빔포밍, 빔조향, 다중빔[10]~[12]과 같은 빔 제어 시스템으로 설계되어 많은 응용분야에 이용되어질 수 있다. 원하는 방향으로 빔포밍/빔조향을 하기 위해서는 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 투과 안테나의 전체 파면은 소스 안테나의 파면과 평면파가 메타표면을 통과한 파면의 합으로 계산할 수 있기 때문에, 빔조향을 구현하기 위해서는 투과 위상변화가 가변적인 메타표면을 적용하거나 소스 안테나의 파면 형상을 변화시키는 방법이 있다. 먼저 투과 위상변화가 가변적인 메타표면, 즉 가변 메타표면은 phase shifter, varactor 다이오드, MEMS, ferroelectric이나 liquid crystal(LC)과 같은 active material, PIN 다이오드 등으로 구현이 가능하다. 투과 위상변화를 자유롭게 가변할 수 있는 장점으로 인하여 대다수의 메타표면을 이용한 빔포밍/빔조향 투과 안테나는 전자의 방법으로 설계된다[13]~[24]. 하지만 구현의 복잡도나 능동 소자의 추가 손실로 인하여 투과 안테나의 전체적인 무선성능 저하가 발생할 수 있는 단점이 있다. 후자의 방법은 구조적으로 소스 안테나의 파면 형상을 전기적 또는 기계적으로 변화시키는 방법으로 메타표면이 구조적으로 고정되는 장점이 있으나, 한정된 빔조향 각도나 이산화 또는 기계적으로 소스 안테나의 위치를 변경하기 위해서 부피가 큰 모터를 사용해야 하는 단점이 있다[25]~[29].

본 논문에서는 다음과 같은 구성으로 작성되어진다. 2장에서는 메타표면을 이용한 투과 안테나의 빔포밍/빔조향 원리 및 특성 분석을 설명하고, 투과안테나의 중요한 성능지표인 개구효율에 대해서 기술하며, 3장에서는 빔조향 투과 안테나 중에서 투과 위상변화가 가변적인 메타표면을 이용한 다양한 종류의 빔조향 투과 안테나의 동작원리와 그 결과를 다룬다. 4장에서는 소스 안테나 파면 형상을 변화를 통하여 구현되는 빔조향 투과 안테나의 원리 및 그 특성을 기술하고, 5장에서 결론을 맺는다.

## Ⅱ. 투과 안테나의 빔포밍/빔조향 원리

투과 안테나는 패치 안테나 혹은 혼 안테나와 같은 지향성 안테나의 방사 패턴을 수정할 수 있는 일반적인 안테나 구조이다. 이러한 투과 안테나는 소스 안테나와 입사파의 파면을 조절할 수 있는 구조로 구성되어 있다. 입사파의 크기와 위상을 조절할 수 있는 구조를 이용하여 투과 안테나는 빔조향이나 빔집속, 편파 제어 등에 여러 가지 분야에 활용할 수 있다. 그림 1은 소스 안테나와 메타표면으로 구성된 투과 안테나의 일반적인 방사 모델이

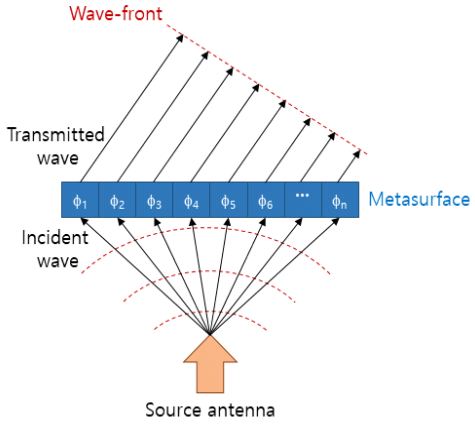


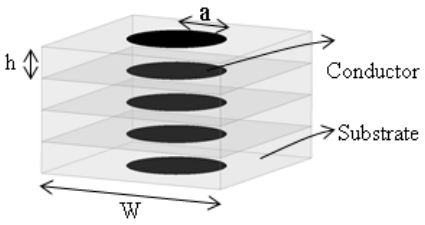

그림 1. 메타표면을 이용한 투과 안테나의 일반적인 방사 모델

Fig. 1. Generic radiation model of transmitarray antenna using a metasurface.

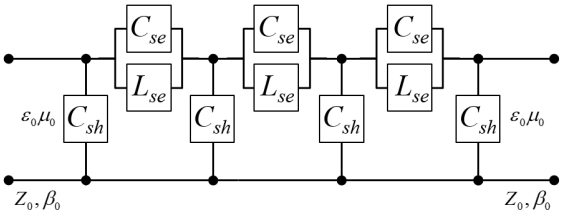
다. 그림 1과 같이 입사파의 방향은 메타표면의 투과 위상 제어에 의한 재방사로 결정되고, 이러한 메타표면은 일반적으로 평면 배열을 형성하는 공간 주기성을 갖는 여러 공진 유닛셀로 구성된다. 메타표면의 유닛셀은 보통 마이크로스트립 패치 어레이나 메타물질[30],[31], 주파수 선택표면 (FSS)[32]~[34] 등을 기반으로 설계된다. 그림 2는 마이크로스트립 패치 어레이 메타표면[35]의 유닛셀과 그 투과 특성을 나타낸다. 그 유닛셀은 4개의 유전체와 5개의 금속 원형 패치로 구성되어 있고, 등가회로모델은 그림 2(b)와 같이 통과대역에서 직렬 인덕턴스와 병렬 커패시턴스로 나타낼 수 있다. 메타표면의 투과 특성은 금속 원형 패치의 반지름($a$)으로 조절할 수 있는데, 5.8 GHz에서 원형 마이크로스트립 패치 어레이 메타표면의 투과도와 투과 위상은 그림 2(c)와 같다. 이 때, 정사각형 유닛셀의 크기($W$)는 20 mm ($0.38\lambda_0$)이고, 유전체 기판의 유전율 ($\varepsilon_r$)과 두께($h$)는 각각 2.2와 3.2 mm이다. $a$가 1 mm에서 9.1 mm까지 투과도는 0.8 이상, 투과 위상의 변화폭은 약 400도를 얻을 수 있다. 그림 3은 10×10 원형 패치 어레이 유닛셀로 구성된 메타표면을 이용한 고이득 투과 안테나의 구조이다. 메타표면의 전체 크기는 200 mm(약 $4\lambda_0$)이고, 소스 안테나와 메타표면 간격은 50 mm (약 $1\lambda_0$)이다. 메타표면 유무에 따른 안테나의 원거리 방사패턴을 그림 4에 나타내었는데, 메타표면을 이용한 투과 안테나의 이득이 약 12 dB 개선됨을 알 수 있다.

투과 안테나의 전체 파면은 개념적으로 그림 5와 같이 소스 안테나의 파면과 메타표면의 투과 위상의 합으로 나타낼 수 있다. 그림 5(a)와 같이 투과 안테나의 전체 파면이 직선의 형태가 되면 고이득을 구현할 수 있고, 가변 메타표면을 이용한 고이득 빔조향 투과 안테나의 파면은 그림 5(b)와 같은 메타표면의 투과 위상 변화로 구현이 가능하며, 소스 안테나의 파면 형상 변화를 통한 투과 안테나의 파면은 그림 5(c)와 같은 소스 안테나의 파면과 같은 관계를 가진다.

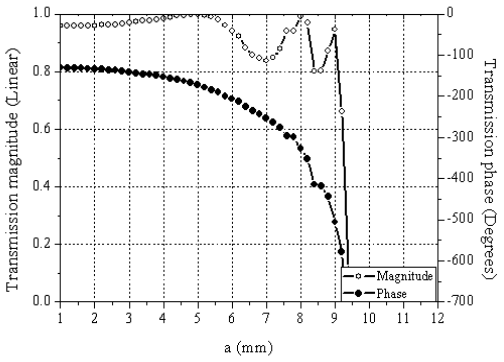
개구 효율(aperture efficiency)은 메타표면을 이용한 투과 안테나의 중요한 성능 지표이다. 개구 효율($\eta_a$)은 식 (1)과 같이 taper 효율($\eta_t$), spillover 효율($\eta_s$), 편파 효율($\eta_{pol}$), 투과 효율($\eta_{tran}$), 위상 효율($\eta_{ph}$), 랜덤 표면 오차 효율($\eta_r$)의 곱으로 계산할 수 있다[36],[37].




(a) 원형 마이크로스트립 패치 어레이 메타표면의 유닛셀
(a) Unitcell of circular microstrip patch array metasurface




(b) 원형 마이크로스트립 패치 어레이 메타표면의 등가회로 모델
(b) Equivalent circuit model of circular microstrip patch array metasurface

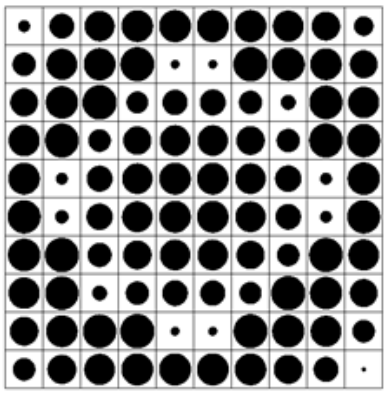



(c) 원형 마이크로스트립 패치 어레이 메타표면의 투과 특성
(c) Transmittance responses of circular microstrip patch array metasurface

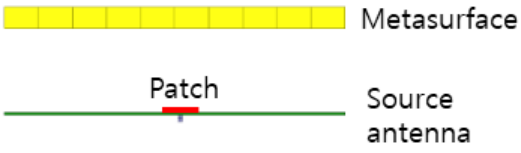
그림 2. 마이크로스트립 패치 어레이 메타표면의 유닛셀과 투과 특성
Fig. 2. Metasurface unitcell based on microstrip patch array and its transmittance responses.

$$\eta_a = \eta_t \cdot \eta_s \cdot \eta_{pol} \cdot \eta_{tran} \cdot \eta_{ph} \cdot \eta_r \quad (1)$$

여기서, 메타표면을 이용한 투과 안테나의 개구 효율에 주된 영향을 끼치는 효율은 taper 효율과 spillover 효율이고, 이러한 두 효율은 소스 안테나와 메타표면의 크기 및



(a) 10×10 원형 패치 어레이 유닛셀로 구성된 메타표면 (평면도)
(a) Metasurface composed of 10×10 circular patch array unitcell(top view)




(b) 메타표면을 이용한 고이득 투과 안테나 구조(측면도)
(b) High gain transmitarray antenna using a metasurface(side view)

그림 3. 원형 패치 어레이 메타표면을 이용한 고이득 투과 안테나
Fig. 3. High gain transmitarray antenna using a circular patch array metasurface.

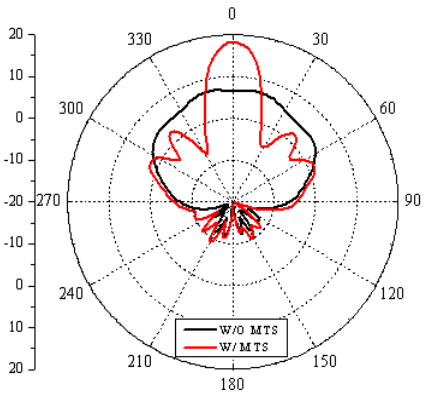
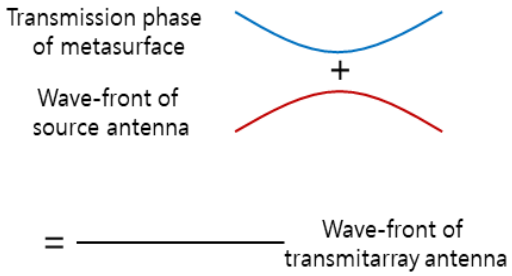
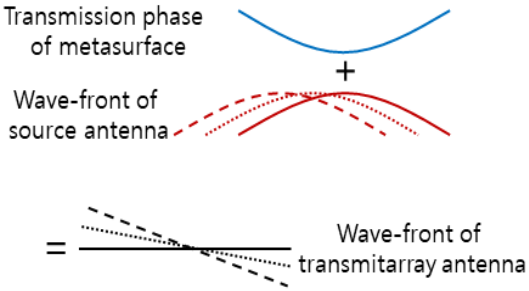


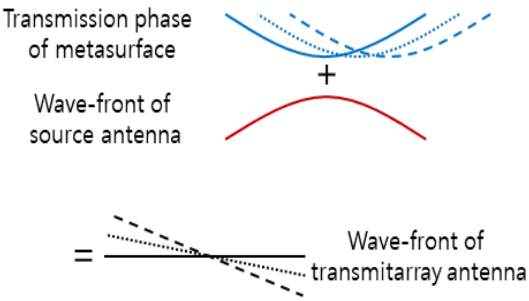

그림 4. 메타표면 유무에 따른 안테나의 원거리 방사패턴(모의실험)
Fig. 4. Simulated far-field radiation patterns of antenna without and with metasurface.




(a) 고이득 투과 안테나
(a) High gain transmitarray antenna




(b) 가변 메타표면을 이용한 고이득 빔조향 투과 안테나
(b) High gain beam steering transmitarray antenna using an active metasurface




(c) 소스 안테나의 파면 형상 변화를 이용한 고이득 빔조향 투과 안테나
(c) High gain beam steering transmitarray antenna by a changeable wave front of a source antenna

그림 5. 투과 안테나의 전체 파면 개념도
Fig. 5. Conceptual diagram of wave front of transmitarray antenna.

간격에 의해서 결정된다. Taper 효율과 spillover 효율은 각각 소스 안테나로부터 메타표면에 도달하는 전력의 균일성과 전력량과 관계가 있고, 식 (2)와 식 (3)에 의해서 계산되어진다.

$$\eta_t = \frac{1}{S} \times \frac{\left| \int E(x,y)^2 dS \right|^2}{\int |E(x,y)|^2 dS} \quad (2)$$

$$\eta_s = \frac{\int |E(x,y)|^2 dS}{P_{rad}} \quad (3)$$

여기서, $S$와 $P_{rad}$는 각각 메타표면의 면적과 소스 안테나의 방사전력이다. 메타표면을 이용한 투과 안테나의 개구 효율의 최적화를 위해서 소스 안테나의 종류, 소스 안테나와 메타표면 간의 거리($F$), 메타표면의 크기($D$)를 결정하는 것이 매우 중요하다. 소스 안테나와 메타표면 간의 거리가 짧으면 spillover 효율은 높지만, taper 효율은 낮아진다. 반대로 $F$가 길어지면 taper 효율은 높지만, spillover 효율은 낮아진다. 또한, 메타표면의 크기가 커지면 spill-over 효율은 높지만, taper 효율은 낮아진다. 따라서 투과 안테나의 개구 효율의 최대화를 위해서는 $F/D$의 최적화가 필요하다. 그림 6은 소스 안테나의 다양한 이득에 따른 최대 개구 효율 및 최적의 $F/D$를 나타내었다[12]. 소스 안테나의 이득이 상대적으로 낮으면 개구 효율의 최대값은 낮아지지만 $F/D$, 즉 low-profile한 투과안테나를 설계할 수 있다. 그리고 최대의 개구 효율을 확보하기 위해서는 높은 이득을 가지는 소스 안테나를 적용하면 된다. 그림 6을 보면 알 수 있듯이, 예를 들어 소스 안테나를 7.5 dBi 이득을 가지는 패치 안테나를 투과 안테나에 적용할 경우 최대 개구 효율은 약 62 %이고, $F/D$는 약 0.2로 설계할 수 있다.

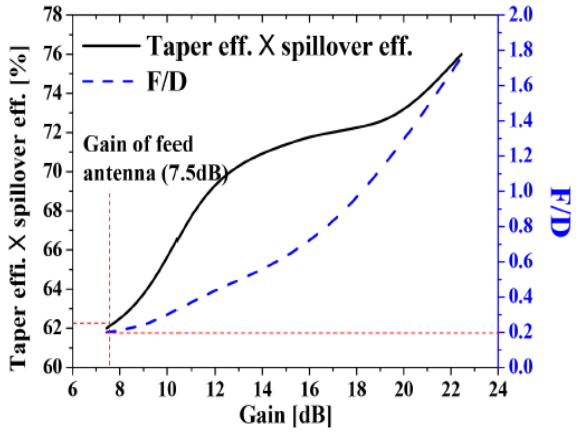



그림 6. 소스 안테나의 다양한 이득에 따른 최대 효율 및 최적의 $F/D$[12]

Fig. 6. Maximum efficiency and optimal $F/D$ at various gains of source antenna[12].

## Ⅲ. 가변 메타표면을 이용한 빔조향 투과 안테나

먼저 메타표면의 유닛셀의 구조를 변경에 의해서 투과 위상을 조절하고, 이를 이용한 빔포밍 및 빔조향 투과 안테나 설계를 알아본다. 메타표면의 유닛셀을 그림 7과 같이 대역통과 필터의 투과 특성을 가지는 개구형 급전 패치 구조를 이용하여 설계하면, 패치의 크기와 슬롯의 길이, 폭의 변화에 따라서 투과 위상을 조절할 수 있다[13]. 이러한 구조로 설계된 메타표면의 유닛셀을 그림 8과 같이 배치를 하면 broadside 방향 또는 30도 빔조향 특성을 가진 투과 안테나를 설계할 수 있다. 여기서 메타표면의 유닛셀을 설계할 때, 가장 중요한 요소는 최소의 적층 구조를 가지면서 100 % 투과도와 360도 이상의 투과 위상 변화를 확보하는 것이다. 또한 광대역의 안테나 이득 대역폭을 위해서 주파수에 따른 위상 변화의 기울기가 일정해야 한다.

다음은 가변 메타표면을 이용한 여러 가지 타입의 투과 안테나에 대해서 살펴본다. 참고문헌 [15]에서는 메타표면에 varactor 다이오드를 적용하여 phase shifter를 구현

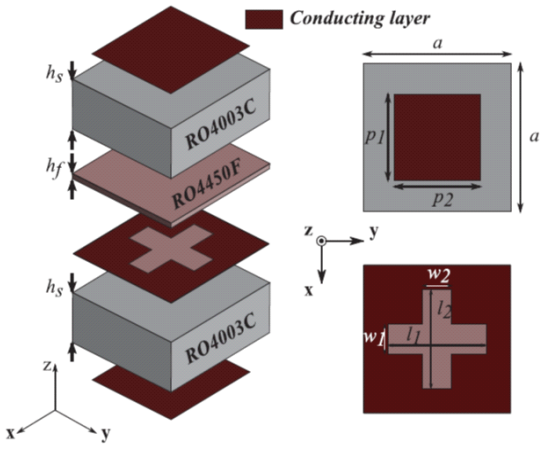



그림 7. 메타표면 유닛셀 구조[13]

Fig. 7. Geometry of the unitcell[13].

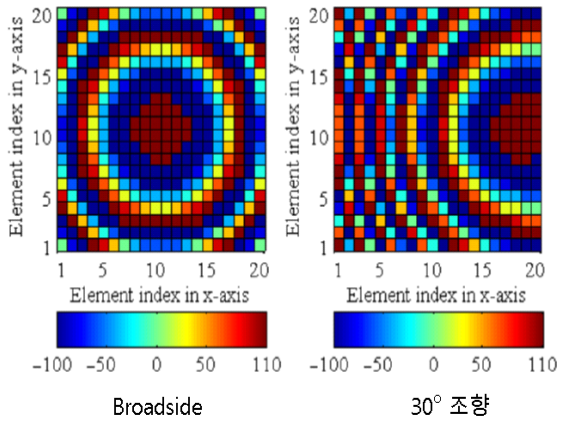
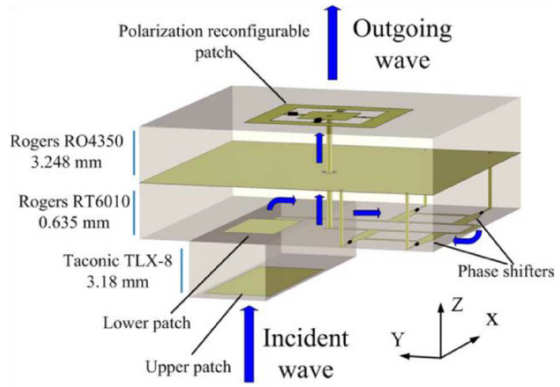



그림 8. 두 가지 빔조향 각도를 위한 20×20 메타표면의 위상 분포도[13]

Fig. 8. Phase distribution over a 20×20 element transmitarray for two beam directions[13].

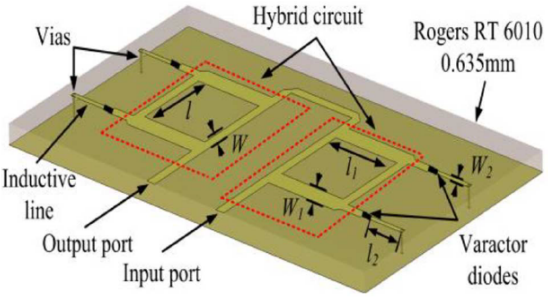
하고, PIN 다이오드를 이용하여 이중편파 및 원형편파 특성을 가진 투과 안테나를 설계하였다. 그림 9는 빔조향 및 이중/원형 편파가 가능한 투과 안테나를 위한 메타표면 구조를 나타낸다. 2층 구조의 패치에 의해서 입사파가 전달이 되고 전송선로로 신호가 변환된다. 신호는 2단의 반사 타입 위상 천이기를 통과하고, 유닛셀 상단에 위치한 패치 구조로 금속 via hole에 의해서 전달이 된다. 반사 타입의 위상 천이기는 varactor 다이오드에 의해서 커패시턴스가 가변이 되고, 그 결과, 메타표면의 투과 위상이 변하게 되는 것이다. 또한 유닛셀 상단에 위치한 패치 구조에 두 개의 on-off 기능을 가진 PIN 다이오드를 배치하여 이중 또는 원형 편파 투과 안테나 설계도 가능하다. 그림 10은 제작된 시제품과 5.4 GHz에서 측정된 원거리 방사 패턴이고, 그림 10(b)를 보면 알 수 있듯이 빔조향 무선특성이 잘 구현되고 있다.

패턴 구조나 능동소자 이외에 강유전체나 LC 등과 같은 능동 물질을 이용한 가변 메타표면을 설명하고, 투과 안테나의 빔조향 무선성능을 살펴본다[18],[19]. 그림 11(a)를 보면 알 수 있듯이, 두 개의 유전체 기판으로 분리된 금속 패턴이 있는 세 개의 층으로 구성되어 있다. 외각층은 각각 커패시턴스 층으로, 가운데 층은 인덕턴스 층으로 나누어져 있고, 외각의 커패시턴스 층은 강유전체인 얇은 BST(barium-strontium-titanate) 위에 구현이 되어 있다. DC



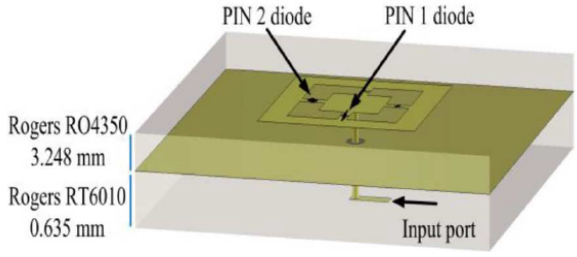

(a) 메타표면 유닛셀

(a) Unitcell of metasurface




(b) 반사 타입의 위상 천이기 구조

(b) Reflection-type phase shifter topology




(c) 편파 재구성이 가능한 상단 패치 구조(모의실험 모델)

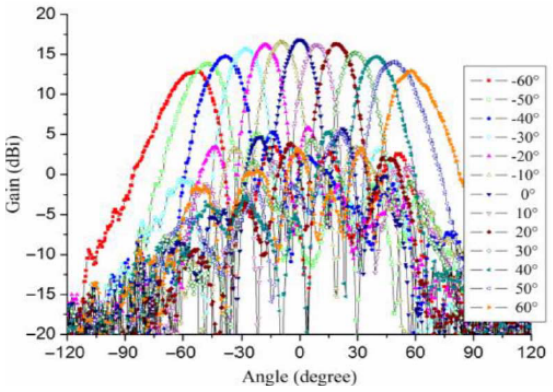
(c) Simulation model of the polarization reconfigurable patch cell

그림 9. 빔조향 및 이중/원형 편파 투과 안테나를 위한 메타표면 구조[15]

Fig. 9. Metasurface for beam steering and dual/circular polarization transmitarray antenna[15].

전압에 의해서 BST 층에 구현된 커패시턴스 값이 가변되고, 그 결과 메타표면의 위상 변화가 발생한다. 그림 11(b)는 제작된 시제품 사진이고, 그림 12는 인가된 DC 전

(a) 제작된 시제품
(a) Fabricated prototype

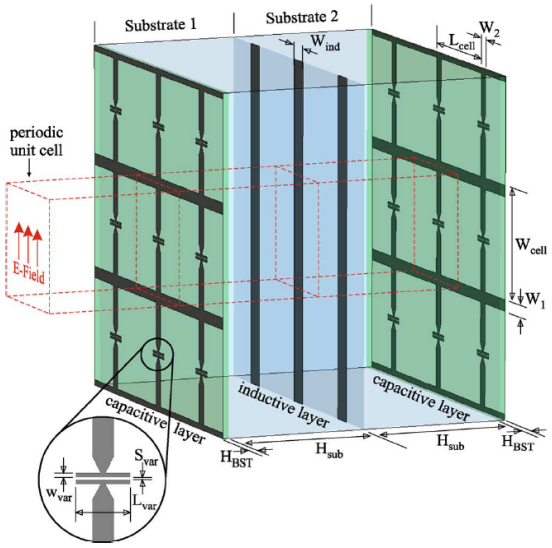



(b) 원거리 방사패(5.4 GHz)
(b) Far-field radiation patterns(5.4 GHz)

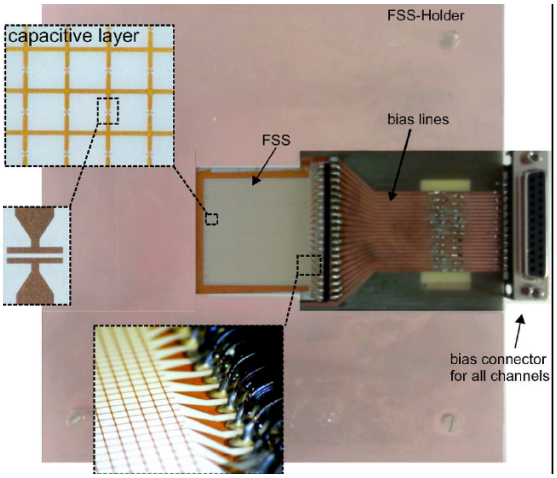
그림 10. 전체 투과 안테나와 빔조향 무선성능[15]
Fig. 10. Transmitarray antenna and beam-steering performance[15].

압에 따른 빔조향 특성을 나타낸다. 그림 12(a)는 DC 바이어스 인가 전의 원거리 방사패턴이고, 그림 12(b)는 0 V부터 120 V까지 점진적으로 전압을 인가한 원거리 방사패턴으로 빔조향 각도는 10도이다.

그림 13은 LC가 적용된 가변 메타표면의 유닛셀 구조이다. 유전체 기판에 fishnet 구조의 유닛셀이 위치하고, LC 층에 의해서 분리되어 있다. 이 때, LC는 인가되는 전압에 의해서 유전율이 변화하기 때문에 fishnet 구조의 커패시턴스값과 인덕턴스 값이 변하고, 메타표면의 투과 위상이 가변될 수 있다. 그림 14는 각 층별로 분리된 메타표면의 시제품 사진인데, 양쪽 기판에 fishnet 패턴이 있고 가운데 LC가 채워질 구조로 이루어져 있다. 그림 15는 DC




(a) 얇은 BST가 적용된 적층 구조의 메타표면
(a) Metasurface consists of 3 metallization layer with thin BST layer



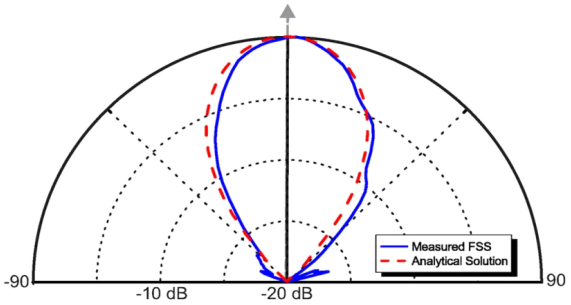

(b) 제작된 시제품
(b) Fabricated prototype

그림 11. 강유전체를 이용한 빔조향 투과 안테나[18]
Fig. 11. Beam steering transmitarray antenna using a ferroelectric[18].

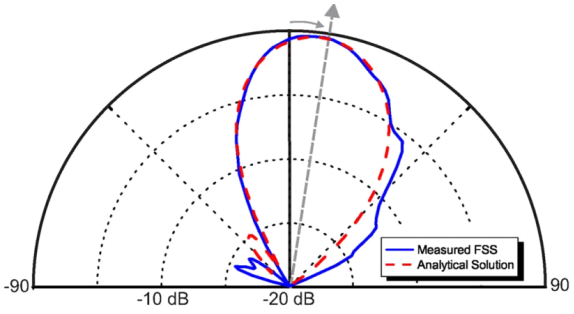
바이어스 인가에 따른 원거리 방사패턴의 측정값이다.

5 V에서 20 V의 점진적인 전압의 감소 및 증가로 인하여 약 ±5도의 빔조향 특성을 얻었다.

마지막으로 PIN 다이오드의 on-off 특성을 이용한 1-bit, 2-bit 위상 양자화 메타표면을 이용한 빔조향 투과




(a) DC 바이어스 인가 전
(a) Untuned state




(b) DC 바이어스 인가 후(0~120 V)
(b) Tuned state(0~120 V)

그림 12. 강유전체 메타표면을 이용한 투과 안테나의 빔 조향 특성[18]
Fig .12. Beam-steering performance of transmitarray antenna using a ferroelectric metasurface[18].

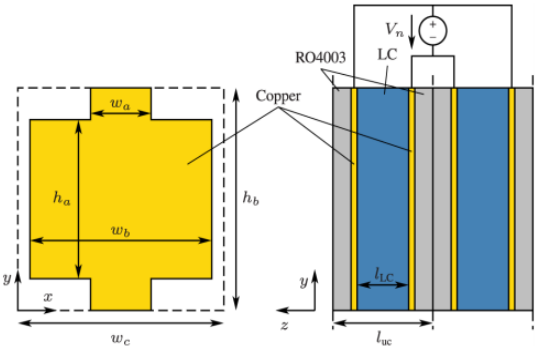



그림 13. LC가 적용된 가변 메타표면의 유닛셀 구조[19]
Fig. 13. Active metasurface based on liquid crystal(LC)[19].

안테나에 대해서 기술한다. 이와 같은 위상 양자화 메타표면은 PIN 다이오드를 이용하기 때문에 상대적으로 varactor 다이오드나 MEMS 스위치 대비 삽입 손실이 적

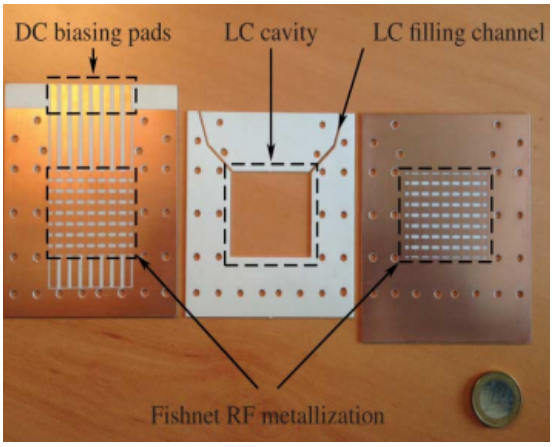



그림 14. 각 층별 분리된 메타표면의 시제품[19]
Fig. 14. Photograph of metasurface divided by single opened unitcell layer[19].

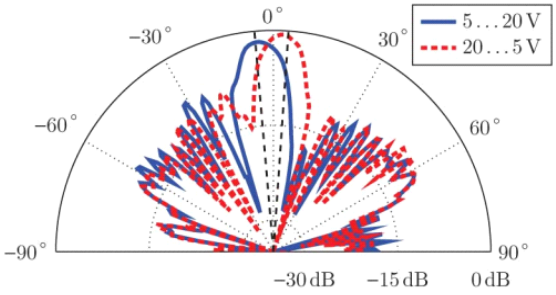
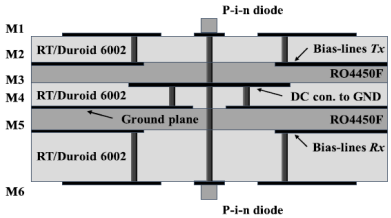


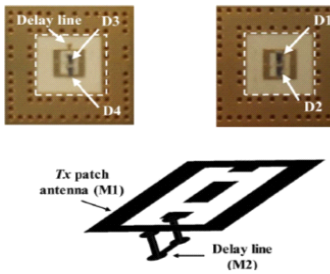

그림 15. 측정된 원거리 방사패턴(두 가지 상태)[19]
Fig. 15. Measured far-field radiation patterns(two tuning states)[19].

고, 바이어스 구조 구현이 간단한 장점이 있다. 하지만 위상 양자화로 인한 개구 효율이나 이득이 감소하는 단점이 발생한다. 그림 16은 2-bit 위상 양자화 메타표면의 유닛셀을 나타내고 있다[20]. M6 층의 수신 패치 구조의 다이오드($D_1$, $D_2$)를 각각 on-off 시키면 표면 전류가 반대가 되어서 180도의 위상 차이가 발생한다. 또한 M1 층의 송신 패치 구조의 다이오드($D_3$, $D_4$)를 switching하고 M2층의 지연선으로 인해 추가로 90도의 위상 변화가 발생하여 0도, 90도, 180도, 270도의 2-bit의 위상 상태를 얻을 수 있다.

그림 17은 제안된 유닛셀의 2-bit 투과위상과 측정된 방사패턴을 나타내었고, 2-bit 메타표면을 이용하여 ±60도의 빔조향 특성을 보여주고 있다. 그림 18(a)는 1-bit 위

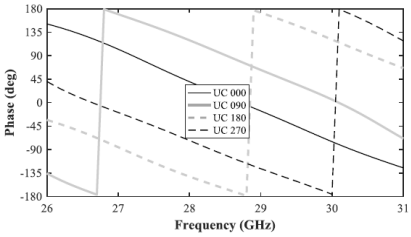



(a) 2-비트 위상 양자화 메타표면의 유닛셀(단면도)
(a) Unitcell of 2-bit reconfigurable metasurface(cross-section view)

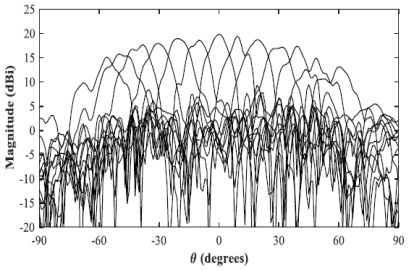



(b) M1 층과 M6층의 패치 구조
(b) Patch on M1 and M6 layers

그림 16. 2-비트 위상 양자화 메타표면의 유닛셀[20]
Fig. 16. Unitcell of 2-bit reconfigurable metasurface[20].

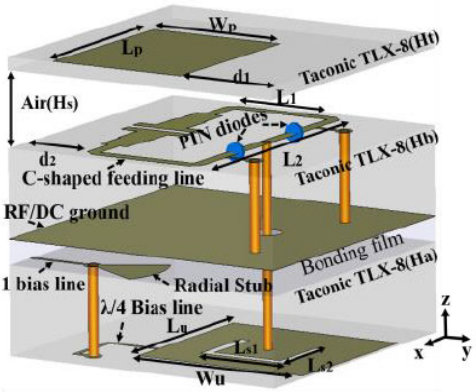



(a) 제안된 유닛셀의 2-비트 투과위상
(a) 2-bit transmission phase of the proposed unitcell

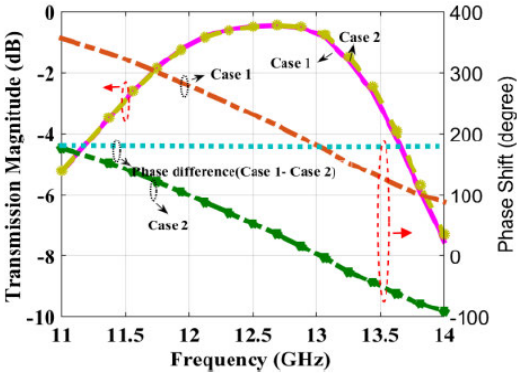



(b) 방사패턴
(b) Radiation pattern

그림 17. 유닛셀의 2-비트 투과위상 및 방사패턴[20]
Fig. 17. 2-bit transmission phase of the proposed unitcell and radiationpattern[20].




(a) 1-비트 위상 양자화 메타표면의 유닛셀
(a) Unitcell of 1-bit reconfigurable metasurface




(b) 제안된 유닛셀의 1-비트 투과 응답특성
(b) 1-bit transmission responses of the proposed unitcell

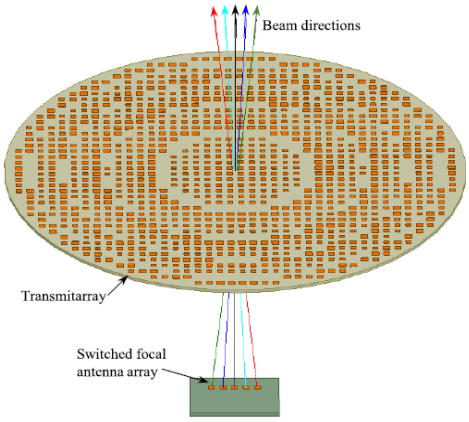
그림 18. 1-비트 위상 양자화 메타표면의 유닛셀 및 투과 응답특성[22]
Fig. 18. Unitcell of 1-bit reconfigurable metasurface and its transmission responses[22].

상 양자화 메타표면의 유닛셀을 보여주고 있다. 수신 구조는 U-shape의 슬롯이 있는 패치 형태이고, 송신 구조는 두 개의 PIN 다이오드가 있는 C-shape의 급전선과 사각 패치로 설계된다. 가운데 수신과 송신 구조의 공통 접지면이 위치하고, 수신 패치 상단에 바이어스 선이 위치한다. 두 개 의 다이오드가 각각 on/off, off/on이 되면 그림 18(b)와 같이 180도 차이가 발생하는 투과 위상을 얻을 수 있다.

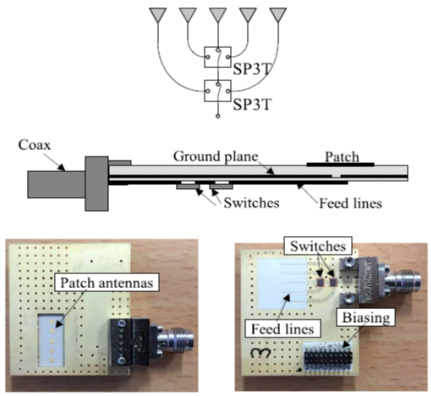
참고문헌 [22]에서 제안된 1-bit 메타표면을 이용하여 광대역 빔조향 투과 안테나를 설계할 수 있다.

## Ⅳ. 가변 소스 안테나를 이용한 빔조향 투과 안테나

참고문헌 [28], [29]는 전기적 가변 소스 안테나를 이용한 빔조향 투과 안테나에 관한 논문이다. 그림 19와 같이 구조적으로 고정된 메타표면과 소스 안테나의 스위칭에 의해서 빔을 조향하는 방법이 있다. 소스 안테나의 파면이 그림 5(c)에서 설명된 것처럼 가변되기 때문에 메타표면의 투과 위상과 조합에 의해서 빔조향 투과 안테나가 구현이 된다. 그림 19(b)를 보면 알 수 있듯이 두 개의 SP3T 스위칭 소자를 적용하여 다섯 개의 소스 안테나를 선택적으로 동작시킨다. 빔조향 특성을 비교적 간단하게 구현할 수 있지만, 한정된 빔조향 각도나 이산화의 단점도 있다. 그러한 단점을 개선한 것이 그림 20과 같이 두 개의 소스 안테나를 동작시키고, 위치와 각각의 위상을 조절하여 연속적인 빔조향 각도 구현이 가능한 연구가 수행되었다[29]. 일차원 위상 제어가 가능한 평면 형태의 소스 안테나와 이차원 메타표면의 조합으로 기존의 일차원 위상 배열 안테나의 이득보다 개선되는 특징이 있다. 그림 21은 제작된 투과 안테나의 시제품과 빔조향 무선 성능을 나타내었다. 끝으로 소개되었던 다양한 투과 안테



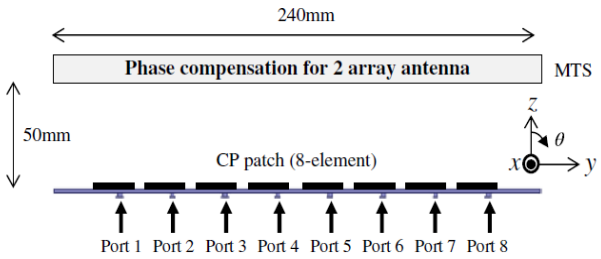

(a) 소스 안테나의 스위칭에 의한 빔조향 개념도
(a) Principle of beam steering based on switched source



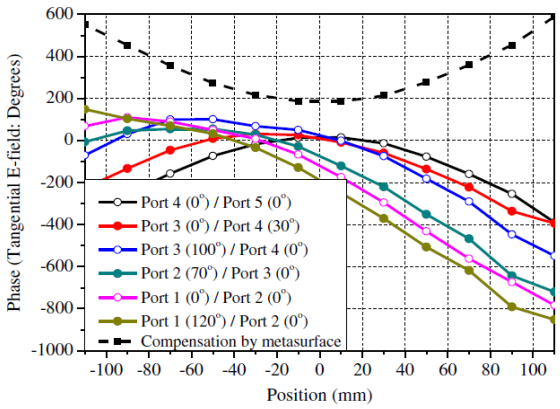

(b) 스위칭 회로가 포함된 소스 안테나 제작사진
(b) Photograph of source antenna including a switching circuit

그림 19. 소스 안테나의 스위칭에 의한 투과 안테나 및 스위칭 회로[28]

Fig. 19. Transmitarray antenna using switched source antennas and switching circuit[28].



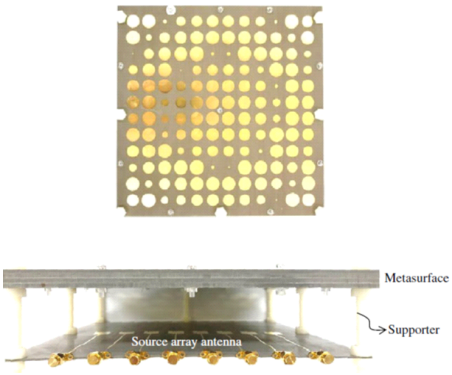

(a) 가변 소스를 이용한 빔조향 투과 안테나 구조 (측면도)
(a) Structure of beam steering transmitarray antenna using various source position(side view)



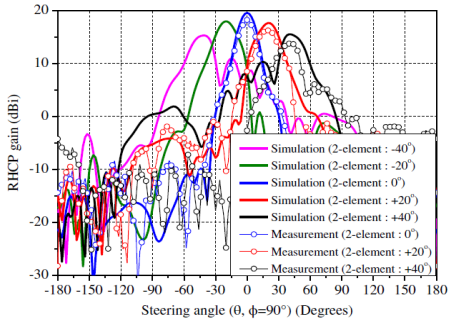

(b) 메타표면과 소스 안테나의 위치에 따른 위상 특성
(b) Phases of metasurface and source antenna

그림 20. 가변 소스를 이용한 빔조향 투과 안테나 및 메타표면과 소스 안테나의 위상 특성[29]

Fig. 20. Beam steering transmitarray antenna using various source position, and phases of metasurface and source antenna [29].




(a) 제작된 시제품
(a) Fabricated prototype




(b) 원거리 방사패턴
(b) Far-field radiation pattern

그림 21. 전체 투과 안테나와 빔조향 무선성능[29]
Fig. 21. Beam steering transmitarray antenna and beam-steering performance[29].

나들의 특성을 표 1에서 비교하였다.

## Ⅴ. 결 론

메타표면을 이용한 투과 안테나의 빔조향 특성은 투과 위상변화가 가변적인 메타표면을 고정된 소스 안테나와 조합을 이루거나, 투과 위상변화가 고정적인 메타표면과 파면의 형상이 변하는 소스 안테나의 조합 방식을 이용하여 얻을 수 있다. 본 논문에서는 이러한 타입의 빔포밍/빔조향 투과 안테나의 동작 원리를 설명하고, 다양한 타입의 빔조향 구조와 그 방사특성을 살펴보았다. 또한 투과 안테나의 최대 개구 효율을 확보하기 위해서 소스 안테나의 이득에 따른 최적의 *F/D*를 계산하고, 높은 투과 효율을 갖는 메타표면 설계가 필요하다.

## References

[1] A. W. Rudg, N. A. Adatia, "Offset-parabolic-reflector antennas: A review," in *Proceedings of IEEE*, Dec. 1978, vol. 66, no. 12, pp. 1592-1681.

[2] S. Hwang, B. Lee, D. H. Kim, and J. Y. Park, "Design of S-band phased array antenna with high isolation using broadside coupled split ring resonator," *The Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 2, pp. 108-116, Apr. 2018.

표 1. 다양한 투과 안테나 특징 비교
Table 1. Comparison of characteristics of various transmitarray antennas.

| Ref. | Beam steering method | | Characteristics |
|---|---|---|---|
| [15] | Active metasurface | Varactor diode | Excellent beam steering performance, but complicated bias circuit |
| [18] | | Ferroelectric | Narrow beam steering angle |
| [19] | | Liquid crystal | |
| [20] | | p-i-n diode (2-bit metasurface) | Excellent beam steering performance / simple bias circuit, but degradation of antenna efficiency |
| [22] | | p-i-n diode (1-bit metasurface) | |
| [28] | Changeable source | Source antenna's switching | Discrete beam steering angle |
| [29] | | Source antenna's switching + phase shifter | Excellent beam steering performance, but hybrid type(phased array and transmitarray antennas) |

[3] P. Bia, D. Caratelli, L. Mescia, and J. Gielis, "Analysis and synthesis of supershaped dielectric lens antennas," *IET Microwave*, *Antenna & Propagation*, vol. 9, no. 14, pp. 1497-1504, 2015.

[4] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J. P. Tetienne, and F. Capasso, et al., "Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction," *Science*, vol. 334, no. 6054, pp. 333-338, 2011.

[5] B. Rahmati, H. R. Hassani, "Low-profile slot transmitarray antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 1, pp. 174-181, Jan. 2015.

[6] S. H. R. Tuloti, P. Rezaei, and F. T. Hamedani, "High-efficient wideband transmitarray antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 817-820, May 2018.

[7] M. O. Bagheri, H. R. Hassani, and B. Rahmati, "Dual-band, dual-polarised metallic slot transmitarray antenna," *IET Microwave*, *Antenna and Propagation*, vol. 11, no. 3, pp. 402-409, Feb. 2017.

[8] L. W. Chen, Y. Ge, and T. S. Bird, "Ultrathin flat microwave transmitarray antenna for dual-polarised operations," *Electronics Letters*, vol. 52, no. 20, pp. 1653-1654, Sep. 2016.

[9] C. Tian, Y. C. Jiao, and G. Zhao, "Circularly polarized transmitarray antenna using low-profile dual-linearly polarized elements," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 465-468, Jun. 2017.

[10] H. X. Xu, T. Cai, Y. Q. Zhuang, Q. Peng, G. M. Wang, and J. G. Liang, "Dual-mode transmissive metasurface and its applications in multi-beam transmitarray," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 1797-1806, Apr. 2017.

[11] A. H. Abddlrahman, P. Nayeri, A. Z. Elesherbeni, and F. Yang, "Single-feed quad-beam transmitarray antenna design," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 3, pp. 953-959, Mar. 2016.

[12] C. H. Lee, T. V. Hoang, S. W. Chi, S. G. Lee, and J. H. Lee, "Low profile quad-beam circularly polarized antenna using transmissive metasurface," *IET Microwave*, *Antenna and Propagation*, vol. 13, no. 10, pp. 1690-1698, Aug. 2019.

[13] K. Pham, N. T. Nguyen, A. Clemente, L. Di Palma, L. Le Coq, and L. Dussopt, et al., "Design of wideband dual linearly polarized transmitarray antennas," *IEEE Trans.actions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 5, pp. 2022-2026, May 2016.

[14] L. Di Palma, A. Clemente, L. Dussopt, R. Sauleau, P. Potier, and P. Pouliguen, "Circularly-polarized reconfigurable transmitarray in Ka-band with beam scanning and polarization switching capabilities," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 2, pp. 529-540, Feb. 2017.

[15] C. Huang, W. Pan, X. Ma, B. Zhao, J. Cui, and X. Luo, "Using reconfigurable transmitarray to achieve beam-steering and polarization manipulation applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 11, pp. 4801-4810, Nov. 2015.

[16] J. G. Nicholls, S. V. Hum, "Full-space electronic beam-steering transmitarray with integrated leaky-wave feed," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 8, pp. 3410-3422, Aug. 2016.

[17] L. Boccia, I. Russo, G. Amendola, and G. Di Massa, "Multilayer antenna-filter antenna for beam-steering transmit-array applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 7, pp. 2287-2300, Jul. 2012.

[18] M. Sazegar, Y. Zheng, C. Kohler, H. Maune, M. Nikfalazar, and J. R. Binder, et al., "Beam steering transmitarray using tunable frequency selective surface with integrated ferroelectric varactors," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 12, pp. 5690-5699, Dec. 2012.

[19] M. Maasch, M. Roig, C. Damm, and R. Jakoby, "Voltage-tunable artificial gradient-index lens based on a liquid crystal loaded fishnet metamaterial," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp.

1581-1584, 2014.

[20] F. Diaby, A. Clemente, R. Sauleau, K. T. Pham, and L. Dussopt, "2-bit reconfigurable unit-cell and electronically steerable transmitarray at Ka-band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 5003-5008, Jun. 2020.

[21] Y. Wang, S. Xu, F. Yang, and M. Li, "A novel 1 bit wide-angle beam scanning reconfigurable transmitarray antenna using an equivalent magnetic dipole element," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 7, pp. 5691-5695, Jul. 2020.

[22] M. Wang, S. Xu, F. Yang, N. Hu, W. Xie, and Z. Chen, "A novel 1-bit reconfigurable transmitarray antenna using a C-shaped probe-fed patch element with broadened bandwidth and enhanced efficiency," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 120124-120133, Jul. 2020.

[23] F. Wu, J. Wang, K. M. Luk, and W. Hong, "A wideband low-profile efficiency-improved transmitarray antenna with over-1-bit phase-shifting elements," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 32163-32169, 2020.

[24] Q. Zeng, Z. Xue, W. Ren, and W. Li, "Dual-band beam-scanning antenna using rotatable planar phase gradient transmitarrays," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 68, no. 6, pp. 5021-5026, Jun. 2020.

[25] E. B. Lima, S. A. Matos, J. R. Costa, C. A. Fernandes, and N. J. G. Fonseca, "Circular polarization wide-angle beam steering at Ka-band by in-plane translation of a plate lens antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 12, pp. 5443-5455, Dec. 2015.

[26] S. B. Yeap, X. Qing, and Z. N. Chen, "77-GHz dual-layer transmit-array for automotive radar applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 6, pp. 2833-2837, Jun. 2015.

[27] M. Jiang, Z. N. Chen, Y. Zhang, W. H. Hong, and X. Xuan, "Metamaterial-based thin planar lens antenna for spatial beamforming and multibeam massive MIMO," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 2, pp. 464-472, Feb. 2017.

[28] L. Dussopt, A. Moknache, J. Säily, A. Lamminen, M. Kaunisto, and J. Aurinsalo, et al., "A V-band switched-beam linearly polarized transmit-array antenna for wireless backhaul applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 12, pp. 6788-6793, Dec. 2017.

[29] J. G. Lee, T. S. Kwon, and J. H. Lee, "Beam pattern reconfigurable circularly polarized transmitarray antenna by rearrangement of sources," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 61, no. 4, pp. 999-1003, Apr. 2019.

[30] F. Capolino, *Applications of Metamaterials*, Boca Raton, FL, CRC Press, 2009.

[31] C. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.

[32] J. C. Vardaxoglou, *Frequency Selective Surfaces: Analysis & Design*, Taunton, Research Studies Press, 1997.

[33] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2005.

[34] K. Sarabandi, N. Behdad, "A frequency selective surface with miniaturized elements," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 5, pp. 1239-1245, May 2007.

[35] M. Li, N. Behdad, "Wideband true-time-delay microwave lenses based on metallo-dielectric and all-dielectric lowpass frequency selective surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 8, pp. 4109-4119, Aug. 2013.

[36] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2012.

[37] G. Minatti, E. Martini, and S. Maci, "Efficiency of merasurface antennas," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 65, no. 4, pp. 1532-1541, Apr. 2017.

이 재 곤 [경남대학교/조교수]

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 전자공학과 조교수

[주 관심분야] Metamaterial/Metasurface RF 소자, 소형안테나, 4G/5G 안테나 등