

편파 변환이 가능한 초소형, 고효율 Cube 안테나

Polarization Reconfigurable Compact and Highly Efficient Cube Antenna

김성주 · 한지은 · 오경현* · 김동호

Seoung Ju Kim · Ji-Eun Han · Kyung-Hyun Oh* · Dongho Kim

요 약

서로 다른 반사 위상을 갖는 AMC(artificial magnetic conductor) 측벽을 이용하여 편파를 수직 또는 수평 방향으로 변환할 수 있는 새로운 초소형, 고효율 안테나를 제안한다. 제안된 안테나는 배열 안테나의 기본 소자로 사용될 수 있도록 가로와 세로 방향으로 모두 0.48λ 의 크기를 갖도록 제작되었다. 이에 따른 안테나 이득의 감소는 FP(Fabry-Perot) 공진 조건을 사용함으로써 최소화하였다. AMC 반사 위상에 따른 모드를 계산할 수 있도록 기존의 도체로 구성된 공진기 관련 수식을 변경하였다. 그 결과, AMC의 반사 위상을 조절하여 TE 101 모드(수직편파) 또는 TE 011 모드(수평편파)를 형성시킬 수 있다. 급전 안테나로는 일반적인 마이크로 스트립 패치 안테나를 사용하였는데, 패치를 45° 회전시키고 AMC 반사 위상을 적절히 조절함으로써 원하는 편파만을 방사할 수 있도록 하였다. 제안된 안테나는 $0.48 \lambda \times 0.48 \lambda \times 0.47 \lambda$ 의 크기를 가지며, 개구부 효율은 141 %로 기존의 FPC 안테나보다 획기적으로 향상되었다.

Abstract

This paper proposes a highly efficient and compact cube antenna that can reconfigure its polarization using artificial magnetic conductor (AMC) side walls. Fabry-Perot (FP) resonance condition was employed along with cavity resonance condition to maximize antenna gain. To calculate cavity modes affected by AMC reflection phases, conventional formulas were modified. Consequently, it became feasible to control polarization by forming TE101 mode for vertical polarization or TE011 mode for horizontal polarization. A conventional microstrip patch antenna was used as a feeding antenna, with a 45° rotated patch, and the AMC reflection phase was adjusted appropriately to radiate the desired polarization. The developed antenna measured $0.48 \lambda \times 0.48 \lambda \times 0.47 \lambda$ and exhibited a remarkable improvement in aperture efficiency, reaching 141 %, compared to the conventional FPC antenna.

Key words: Reconfigurable Polarization, FP Resonance, AMC (Artificial Magnetic Conductor), High-Gain, High-Efficiency

I. 서 론

편파 변환 기술은 채널 용량을 향상시킬 뿐만 아니라

자연환경에 의해 발생하는 다양한 클러터 간섭을 완화할 수 있어 레이더, 모바일 기지국, UAM(urban air mobility) 및 여러 최첨단 무선 통신 기술에서 주목을 받고 있으며,

「이 논문은 2023년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구임.」

세종대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sejong University)

*한화시스템 특수레이다팀(Specific Radar Team, Hanwha Systems)

· Manuscript received July 20, 2023 ; Revised August 20, 2023 ; Accepted September 22, 2023. (ID No. 20230720-056)

· Corresponding Author: Dongho Kim (e-mail: dongkim@sejong.ac.kr)

편파 변환이 가능한 고이득 고효율 안테나에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다^{[1]~[4]}. 기존의 편파 변환 안테나들은 PIN 다이오드나 버랙터 다이오드를 급전 안테나 직접 부착하는 것이 일반적이다. 하지만 급전 안테나에 높은 전류가 흐를 경우 PIN 또는 버랙터 다이오드가 손상되는 문제점을 가진다^{[5],[6]}. 본 논문에서는 급전 안테나와 이격된 벽면에 버랙터를 설치하여 사용 가능한 전력을 높일 수 있는 새로운 편파 변환 방법을 제안한다.

제안된 안테나는 AMC(artificial magnetic conductor) 측벽으로 둘러싸인 FPC(Fabry-Perot cavity) 구조이다. 그림 1에 나타난 것처럼 기존의 FPC 안테나는 이득 감소와 높은 부엽 준위를 야기하는 옆으로 새어나가는 에너지가 존재하는데, 본 논문에서는 AMC 측벽이 옆으로 새는 에너지를 막아주어 그 문제를 해결하였다.

더불어 제안된 안테나는 최초로 공진기의 고유모드(eigenmode)를 조절하여 편파를 변환함으로써, 간단한 구조로도 우수한 편파 변환 성능과 141 %의 매우 높은 개구부 효율을 갖는다. 모든 시뮬레이션은 CST Studio Suite를 사용했다^[5].

II. 본 론

2-1 FP(Fabry-Perot) 공진 조건

그림 2에는 제안된 안테나의 구조가 나타나있다. 제안된 안테나는 상판인 PRS(partially reflective surface)와 접지면 그리고 4개의 AMC 측벽으로 구성되어 있는 공진기 구조이다. 공진기 내부에서 발생하는 공진을 이용해 고이득과 편파 변환 기능을 동시에 얻을 수 있다.

FPC 안테나는 그림 3과 같이 PRS의 반사 위상과 접지

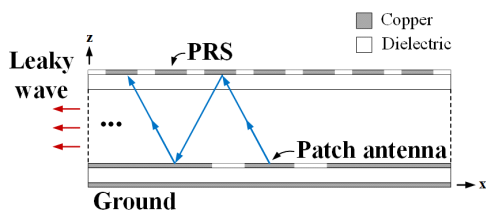


그림 1. 일반적인 FPC 안테나의 구조
Fig. 1. A conventional FPC antenna structure.

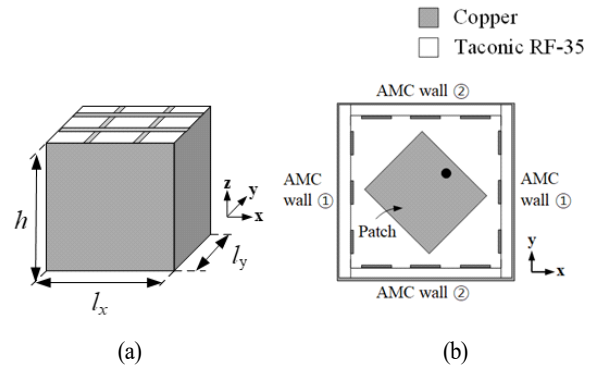


그림 2. 제안된 안테나의 (a) 전체 구조 (b) 내부 모습,
 $l_x=17$ mm, $l_y=17$ mm, $h=16.68$ mm

Fig. 2. (a) The overall structure and (b) the cross-sectional view of the proposed antenna with $l_x=17$ mm, $l_y=17$ mm, and $h=16.68$ mm.

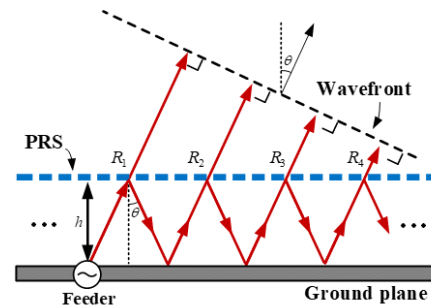


그림 3. FPC 안테나의 동작 원리
Fig. 3. The operation principle of FPC antennas.

면 사이의 거리를 적절히 조절하여 PRS를 투과한 파들이 목표 파면에서 동위상이 되도록 하여 고이득을 얻을 수 있다. 이때, PRS와 접지면 사이의 거리(h)는 식 (1)의 FP 공진조건을 만족해야 한다^[6].

$$h = \frac{c}{2f} \left(\frac{\phi_{PRS} + \phi_{GND}}{2\pi} + N \right), N = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

여기서 ϕ_{PRS} 와 ϕ_{GND} 는 각각 PRS와 접지면의 반사 위상, f 는 동작 주파수이다. 그림 4에 나타나 있는 PRS 단위 셀의 반사 특성과 식 (1)에 의해 h 를 구할 수 있다. PRS 단위 셀은 윗면 스트립 라인의 폭 w_{p1} 과 아랫면 패치의 길이 l 을 조절하여 반사 특성을 바꿀 수 있다. PRS 단위 셀에 사용된 유전체는 1.52 mm 두께의 Taconic RF-35이다.

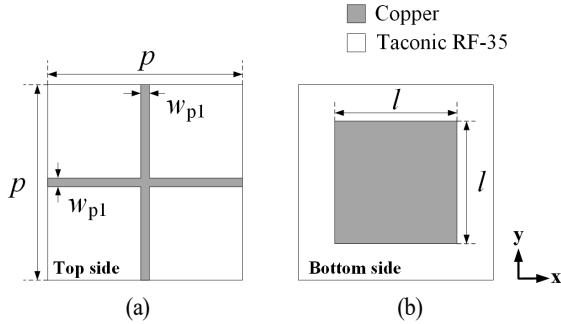


그림 4. 제안된 PRS 단위셀 (a) 윗면과 (b) 아랫면 구조, $p=6.95$ mm, $w_{p1}=0.4$ mm, $l=4.5$ mm
Fig. 4. (a) The upper and (b) the lower sides of the proposed PRS with $p=6.95$ mm, $w_{p1}=0.4$ mm, and $l=4.5$ mm.

2-2 AMC 측벽 설계

본 논문에서는 감쇄파(evanescent waves)를 억제해 고이득 특성을 얻고 편파 변환 기능을 구현하기 위해 AMC로 구성된 측벽을 옆면에 설치하였다^[7]. 여섯 면이 모두 도체 벽으로 둘러싸인 일반적인 공진기는 공진기 내부 크기와 벽의 경계 조건에 의하여 내부 공진 모드가 결정된다. 각 모드의 위상 상수 (β_r)는 dispersion equation에 의해 식 (2) 및 식 (3)으로 정의된다는 것은 잘 알려져 있다^[8].

$$\beta_r = \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2} \quad (2)$$

$$\beta_x = \frac{m\pi}{l_x}, \beta_y = \frac{n\pi}{l_y} \quad (3)$$

여기서 β_x, β_y 는 각 방향으로의 위상 상수, m 과 n 은 정수로 각각 x 축과 y 축 방향으로 모드의 개수, l_x, l_y 는 공진기 안쪽의 x 축과 y 축 방향의 길이를 나타낸다.

이때, 공진기의 측벽이 도체에서 AMC로 대체되면 식 (3)은 식 (4) 및 식 (5)와 같이 변경된다.

$$\beta_x = \frac{\phi_x + \pi(m-1)}{l_x} \quad (4)$$

$$\beta_y = \frac{\phi_y + \pi(n-1)}{l_y} \quad (5)$$

여기서 ϕ_x, ϕ_y 는 각각 x, y 방향에 설치된 AMC 측벽의 반사 위상을 나타낸다.

β_z 는 β_x, β_y 와 달리 식 (1)의 FP 공진 조건에 의해 식 (6)과 같이 정리된다.

$$\beta_z = \frac{\phi_{PRS} + \phi_{GND} + 2\pi(q-1)}{2h_r} \quad (6)$$

여기서 q 는 정수로 z 방향으로의 모드 개수를 나타낸다. 식 (2)를 식 (4)~식 (6)을 이용해 다시 적으면 식 (7)과 같다.

$$\beta_r = \sqrt{\left(\frac{\phi_x + \pi(m-1)}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{\phi_y + \pi(n-1)}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{\phi_{PRS} + \phi_{GND} + 2\pi(q-1)}{2h_r}\right)^2} \quad (7)$$

모드 개수를 나타내는 m, n, q 에 원하는 각 방향의 모드 수(번호)를 대입하면, 모드 형성에 필요한 AMC 측벽의 반사 위상을 구할 수 있다. 수직편파인 TE 101 모드를 형성하는 AMC의 반사 위상은 $m=q=1, n=0$ 으로부터 식 (8)과 같이 구해진다.

$$\phi_x = l_x \sqrt{\beta_r^2 - \left(\frac{\phi_y - \pi}{l_y}\right)^2} - \frac{\phi_{PRS} + \phi_{GND}}{2h} \quad (8)$$

식 (8)과 같은 방법으로 수평편파인 TE 011 모드를 형성시키는 AMC의 반사 위상은 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\phi_y = l_y \sqrt{\beta_r^2 - \left(\frac{\phi_x - \pi}{l_x}\right)^2} - \frac{\phi_{PRS} + \phi_{GND}}{2h} \quad (9)$$

식 (8) 및 식 (9)에서 서로 다른 두 AMC의 반사 위상이 서로에게 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 즉, 식 (8)에서 ϕ_x 를 결정하려면 ϕ_y 값을 먼저 정해야 하고, 식 (9)도 이와 같이 동작한다. 본 논문에서는 수평편파를 기준으로 $\phi_x=180^\circ, \phi_y=115.7^\circ$ 의 반사 위상을 각각 사용하였다. 두 값을 서로 바꾸면 수직편파를 방사한다.

그림 5 및 그림 6에는 식 (8) 및 식 (9)에 따라 설계된 AMC ①과 AMC ②의 단위 셀의 형상을 보여준다. 편파 변환을 위해 수직편파와 수평편파를 형성할 수 있도록 두 가지 AMC 단위 셀을 설계하였다. AMC 단위 셀은 두 종류 모두 1.52 mm 두께의 Taconic RF-35를 사용하였으며, 뒷면은 copper로 완전히 덮여 있다.

제안된 안테나의 가장 중요한 기술인 편파 변환에 있

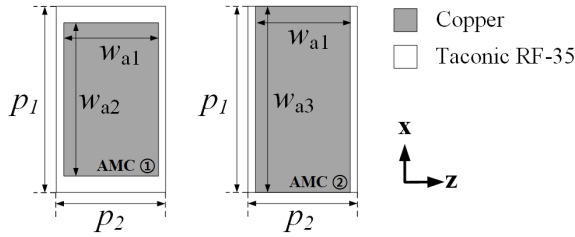


그림 5. 제안된 AMC 단위 셀의 구조, $p_1=4.63$ mm, $p_2=2.7$ mm, $w_{a1}=2.4$ mm, $w_{a2}=3.87$ mm, $w_{a3}=4.63$ mm
Fig. 5. The proposed AMC unitcell geometry with $p_1=4.63$ mm, $p_2=2.7$ mm, $w_{a1}=2.4$ mm, $w_{a2}=3.87$ mm, and $w_{a3}=4.63$ mm.

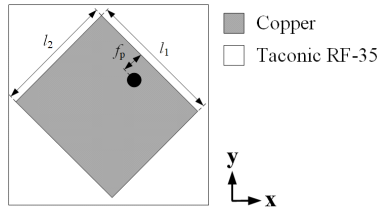


그림 6. 45° 편파를 급전하기 위한 패치 안테나의 구조, $l_1=10$ mm, $l_2=8.7$ mm, $f_p=0.8$ mm
Fig. 6. The proposed microstrip patch antenna to feed 45° polarization with $l_1=10$ mm, $l_2=8.7$ mm, and $f_p=0.8$ mm.

어 AMC 측벽의 반사 위상 조절과 함께 급전 안테나가 입사 편파 방향이 매우 중요하다. 본 논문에서는 수직 또는 수평편파를 방사하는 일반적인 패치를 급전 소자로 사용하지 않고 그림 6에 나타나 있는 45° 편파의 패치 안테나를 급전 소자로 사용했다. 제안된 안테나는 내부 전파를 수직 또는 수평 방향으로 선택적 공진시킬 수 있어 편파 변환이 가능하다. 따라서 공진기 내부에는 수직과 수평 성분 모두 존재해야 하는데, 45° 편파는 수직과 수평 성분을 모두 포함하고 있다.

수직편파 모델은 AMC ①이 x 방향, AMC ②가 y 방향에 배치되어야 하고 그때의 공진기 내부 전계 분포는 그림 7(a)와 같다. 수평편파는 AMC ①이 y 방향, AMC ②가 x 방향에 배치되어야 하며, 그때의 공진기 내부 전계 분포는 그림 7(b)와 같다. 그림 8은 실제 제작된 cube 안테나의 모델과 측정 환경을 보여준다. 제작된 안테나는 $0.48\lambda \times 0.48\lambda \times 0.47\lambda$ 의 매우 작은 크기이다. AMC 뒤편이 모

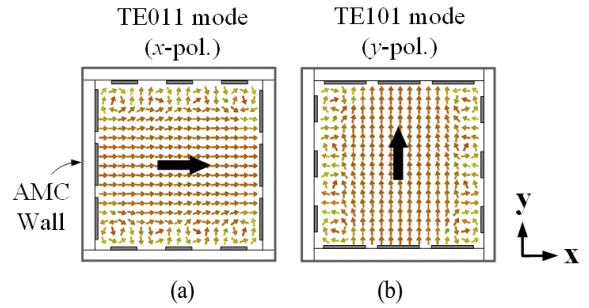


그림 7. Cube 안테나 내부 전계 분포 (a) 수평편파 (b) 수직편파
Fig. 7. The E-field distribution of the proposed cube antenna for (a) horizontal polarization, and (b) vertical polarization.

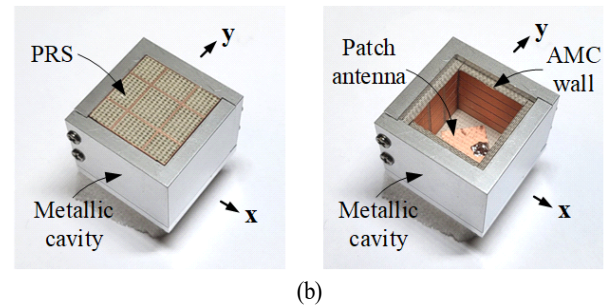
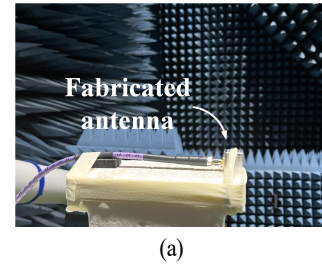


그림 8. (a) 측정환경 및 (b) 제작된 cube 안테나의 구조
Fig. 8. (a) The measurement environment and (b) the structure of the fabricated cube antenna.

두 copper로 덮여있기 때문에 AMC 측벽은 편파 변환 성능에는 영향을 주지 않는다.

그림 9(a)와 그림 9(b)는 수직 및 수평편파 모델의 S_{11} 특성을 보여준다. 두 모델 모두 패치 안테나를 기준으로 대칭이므로 매우 안정되며 유사한 S_{11} 특성을 갖는다. 측정된 안테나의 -10 dB 대역폭은 각각 446 MHz (8.35 GHz ~ 8.796 GHz)이다. 그림 9(c)와 그림 9(d)는 주파수에 따

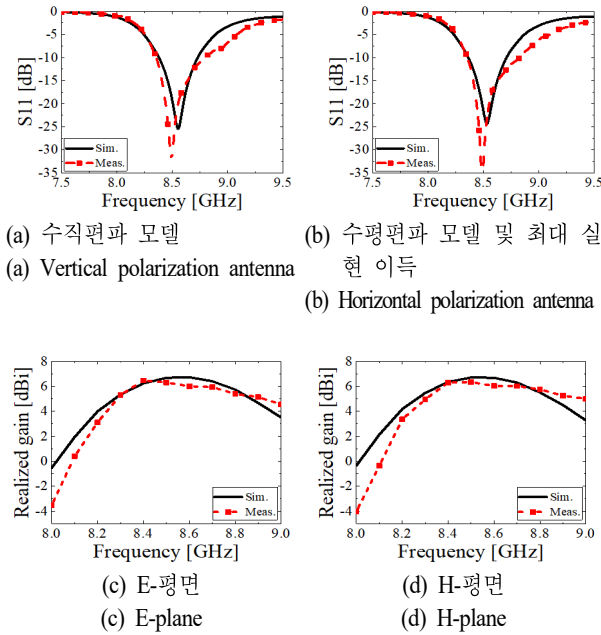


그림 9. S_{11} 특성 및 최대 실현 이득
Fig. 9. S_{11} and maximum realized gain.

른 최대 실현 이득(realized gain) 을 나타낸 것이다. 목표 주파수인 8.5 GHz에서 측정된 실현 이득은 각각 6.31 dBi, 6.34 dBi이며, 개구부 효율은 144.65 %와 147.67 %로 매우 높다.

그림 10에는 8.5 GHz에서의 수직편파와 수평편파 모델의 E-평면 및 H-평면 방사 패턴이 주어져 있다. S_{11} 특성과 마찬가지로 수직 및 수평편파에 대한 방사 패턴이 매우 유사함을 알 수 있으며, 이는 제안된 안테나가 두 편파에서 모두 매우 유사한 성능을 보임을 입증하는 중요한 특성이다. 교차 편파 억제율은 목표 복사 각도(0°)에서 약 20 dB로 편파 변환 성능 또한 매우 우수함을 증명한다.

III. 결 론

본 논문에서는 기존의 방법과는 차별적으로 벽면에 서로 다른 두 반사 계수를 갖는 AMC를 설치하여 편파 변환이 가능한 초소형, 고효율 cube 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 간단한 구조만으로도 높은 개구부 효율을 가질 뿐만 아니라 편파를 선택적으로 변환할 수 있어

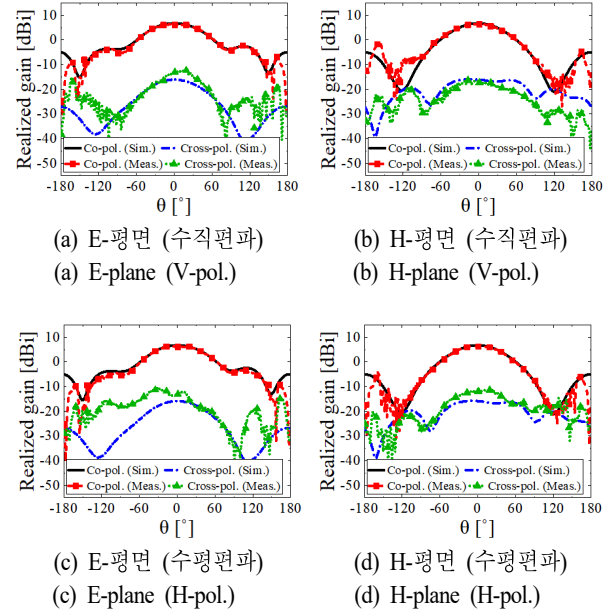


그림 10. 수직 및 수평편파 모델의 방사 패턴
Fig. 10. Radiation patterns of the vertical and horizontal polarization antennas.

대전력, 고이득의 편파 변환이 필요한 다양한 응용 분야에서 높은 시장성을 가질 것으로 기대된다.

References

- [1] J. F. Valenzuela-valdes, M. A. Garcia-Fernandez, A. M. Martinez-Gonzalez, and D. Sanchez-Hernandez, "The role of polarization diversity for MIMO systems under Rayleigh-fading environments," *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, vol. 5, pp. 534-536, Dec. 2006.
- [2] C. G. Christodoulou, Y. Tawk, S. A. Lane, and S. R. Erwin, "Reconfigurable antennas for wireless and space applications," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 7, pp. 2250-2261, Jul. 2012.
- [3] I. J. Nam, S. Lee, and D. Kim, "Miniaturized beam reconfigurable reflectarray antenna with wide 3-D beam coverage," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 4, pp. 2613-2622, Apr. 2022.
- [4] Y. G. Jeon, G. R. Yun, J. Kim, and D. Kim, "Polarization reconfigurable high-gain fabry-perot cavity antenna," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.

70, no. 9, pp. 7727-7734, Sep. 2022.

- [5] M. S. Khan, A. Ifikhar, A. D. Capobianco, R. M. Shubair, and B. Ijaz, "Pattern and frequency reconfiguration of patch antenna using PIN diodes," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 59, no. 9, pp. 2180-2185, Sep. 2017.
- [6] A. Khidre, F. Yang, and A. Z. Elsherbeni, "A patch antenna with a varactor-loaded slot for reconfigurable dual-band operation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 2, pp. 755-760, Feb. 2015.
- [7] Dassault Systemes, "CST studio suite: Electromagnetic field simulation software," 2023. Available: https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/?utm_source=cst.com&utm_medium=301&utm_campaign=cst

- [8] G. V. Trentini, "Partially reflecting sheet arrays," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 4, no. 4, pp. 666-671, Oct. 1956.
- [9] S. J. Kim, K. Kim, and D. Kim "Design of an ultrasmall high-efficiency fabry-perot cavity antenna," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 10, pp. 824-827, Oct. 2022.
- [10] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 382-390, 1989.

김 성 주 [세종대학교/공학석사]

<https://orcid.org/0000-0002-6117-8799>



2021년 2월: 세종대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
 2023년 2월: 세종대학교 전자공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 고이득 안테나, FP 공진 안테나, 메타 표면

오 경 현 [한화시스템(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7715-8995>



1998년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2010년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 1998년~현재: 한화시스템(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 지향성 배열 안테나, 광대역 안테나, 전자빔조향 안테나

한 지 은 [세종대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-2385-5805>



2022년 2월: 세종대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
 2022년 2월~현재: 세종대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 고이득 안테나, FP 공진 안테나, 메타 표면

김 동 호 [세종대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7861-4286>



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2003년 3월~2006년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
 2000년 1월~2011년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원

2011년 3월~현재: 세종대학교 전자정보통신공학과 교수
 [주 관심분야] 반사배열(Reflectarray) 안테나, Fabry-Perot cavity 안테나, 재구성 지능형 반사 표면(Reconfigurable Intelligent Surface), 메타 표면(Metasurface) 안테나, 전자파 잔향실(Reverberation Chamber), 전자장 이론, 인공전자기 구조체(AMC, FSS, PRS, EBG, Metamaterials) 등