

## 초소형·고효율 Fabry-Perot Cavity(FPC) 안테나의 설계 방법

### Design of an Ultrasmall High-Efficiency Fabry-Perot Cavity Antenna

김 성 주<sup>1</sup> · 김 건 우<sup>2\*</sup> · 김 동 호<sup>3</sup>

Seong Ju Kim<sup>1</sup> · Kunwoo Kim<sup>2\*</sup> · Dongho Kim<sup>3</sup>

#### 요 약

본 논문은 AMC(artificial magnetic conductor)를 이용한 초소형·고효율 FPC(Fabry-Perot Cavity) 안테나 설계 방법을 제안한다. 제안된 안테나는  $2\lambda, 3\lambda$  이상의 크기를 갖는 기존의 FPC 안테나와는 다르게  $0.37\lambda \times 0.37\lambda$ 의 초소형 안테나로 옆으로 빠져나가는 에너지를 막는 벽으로 둘러싸여 있다. 본 논문에서는 금속 벽에 AMC를 설치하여 작은 공진기 안테나의 고질적인 문제인 낮은 방사 효율을 91%로 상당히 개선시켰다. 제안된 안테나를 배열 안테나의 소자로 사용할 경우, 좁은 소자 간의 간격으로 grating lobe 없이 넓은 빔 조향 범위를 가질 뿐더러 각각의 소자 옆면이 모두 벽으로 둘러싸여 원치 않는 커플링이 매우 적으므로 높은 조향 정확도를 가질 것으로 예상된다.

#### Abstract

We propose a novel design method for an ultrasmall high-efficiency Fabry-Perot cavity (FPC) antenna using an artificial magnetic conductor (AMC). Unlike conventional FPC antennas, which are approximately  $2\lambda, 3\lambda$  in size, the proposed antenna has an ultrasmall size of  $0.37\lambda \times 0.37\lambda$ , and it is enclosed by metallic walls blocking leaky waves. By installing an AMC on the metal walls, we significantly improve the radiation efficiency by up to 91%. When the proposed antenna is utilized as an element of array antennas, it is expected to demonstrate a wide beam-steering range without grating lobes, owing to the narrow interval of the elements and the high steering accuracy resulting from the inhibition of undesirable couplings between the elements by the side walls.

Key words: Fabry-Perot Cavity, Ultra-Small, High Efficiency, Artificial Magnetic Conductor, Array Antenna

#### I. 서 론

Fabry-Perot cavity(FPC) 안테나는 단일 급전 안테나와 간단한 구조를 사용함에도 불구하고, 상판과 접지면 사이의 다중 공진을 이용하여 높은 이득을 얻을 수 있는 안테나로 고이득 응용 분야에서 활발하게 연구되고 있다<sup>[1]~[3]</sup>. 하지만, 확실적인 설계 방법과 구조로 인해 다른 응용 분

야에 관한 연구는 거의 수행되고 있지 않다.

본 논문에서는 배열 안테나 분야에 적용할 수 있는 초소형·고효율 FPC 안테나의 설계 방법을 최초로 제안한다. 새롭게 제안된 안테나는  $2\lambda, 3\lambda$  이상의 크기를 갖는 기존의 안테나와는 다르게  $0.37\lambda \times 0.37\lambda$ 의 초소형 안테나이다. 이때, 면적이 작아짐에 따라 옆으로 빠져나가는 에너지가 증가하는데, 이를 막기 위해 옆면에 금속

「이 논문은 2022년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.」

세종대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sejong University)

\*한화시스템 특수레이다팀(Specific Radar Team, Hanwha Systems)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0002-6117-8799>), 2: 수석연구원(<https://orcid.org/0000-0002-4585-4080>), 3: 교수(<https://orcid.org/0000-0002-7861-4286>)

· Manuscript received September 29, 2022 ; Revised October 13, 2022 ; Accepted October 19, 2022. (ID No. 20220929-077)

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

벽을 설치하였다. 또한, 금속 벽에 artificial magnetic conductor(AMC)를 설치하여 작은 공진기 안테나의 고질적인 문제인 낮은 방사 효율을 91 %로 상당히 개선시켰다.

제안된 FPC 안테나를 배열 안테나에 적용하면 소자 간의 간격이 좁으므로 grating lobe 없이 넓은 빔 조향 범위를 가지고, 각각의 소자 옆면이 모두 벽으로 둘러싸여 있어 원치 않는 커플링이 적으므로 높은 조향 정확도를 가질 것으로 예상된다.

## II. 본 론

그림 1은 제안된 FPC 안테나의 전체적인 구조와 내부 모습을 나타내며, 상판인 partially reflective surface(PRS)와 접지면, 2개의 금속 벽, 그리고 2개의 AMC가 설치된 금속 벽으로 구성되어 있다. 배열 안테나가 넓은 빔 조향 범위와 높은 조향 정확도를 얻기 위해서는 소자 간의 거리가 가까워야 할 뿐만 아니라, 거리가 가까워짐에 따라 커지는 커플링 또한 차단해야 한다. 이를 위해 제안된 안테나는  $0.37 \lambda \times 0.37 \lambda$ 의 매우 작은 크기를 갖도록 설계했으며, 옆면에 벽을 세워 빠져나가는 전파를 막음으로써 소자 간의 커플링을 최소화했다.

기존 옆면이 벽으로 둘러싸인 FPC 안테나는 금속 벽으로 옆면을 막아 빠져나가는 전파를 반사시켜 높은 안테나 이득을 얻었다<sup>[2]</sup>. 하지만, 제안된 안테나는 기존의 안테나와는 다르게 크기가 매우 작아 옆면을 금속 벽으로 막는 경우 높은 방사 효율을 얻지 못하는 한계가 있고, 이

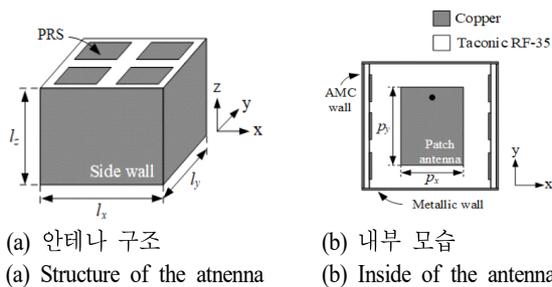


그림 1. 초소형·고효율 FPC 안테나의 (a) 구조 및 (b) 내부 모습,  $l_x=20$  mm,  $l_y=20$  mm,  $l_z=26$  mm,  $p_x=16$  mm,  $p_y=13.6$  mm

Fig. 1. (a) The structure and (b) the inside of the ultra-small high efficiency FPC antenna.

는 공진기 이론에 의해서 다음과 같이 설명된다<sup>[4]</sup>.

공진기 안테나 내부에서는 특정 공진 모드가 형성되는데, 이때 각 모드의 위상 상수( $\beta_r$ )는 dispersion equation에 의해 다음과 같이 구해진다<sup>[4]</sup>.

$$\beta_r = \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 + \beta_z^2} \quad (1)$$

$$\beta_x = \frac{m\pi}{l_x}, \quad \beta_y = \frac{n\pi}{l_y} \quad (2)$$

여기서  $\beta_x, \beta_y, \beta_z$ 는 각각  $x, y, z$  방향으로의 위상 상수,  $m$ 과  $n$ 은  $x$ 축과  $y$ 축 방향 모드의 개수, 그리고  $l_x$ 와  $l_y$ 는 안테나의  $x$ 축과  $y$ 축 방향의 길이이다.

공진기의 크기가  $0.5 \lambda$ 보다 작은 경우,  $\beta_x$  또는  $\beta_y$ 는 식 (2)에 의해  $\beta_r$ 보다 큰 값을 가지며, 이에 따라  $\beta_z$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\beta_z = \pm j \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 - \beta_r^2} \quad (3)$$

이때,  $\beta_z$ 는 허수값을 가지므로 안테나에서 방사된 전파는 감쇠파(evanescent waves)가 되어, 그림 2(a)와 같이  $z$  방향으로 감쇠하면서 진행한다. 이에 따라 안테나는 낮은 방사 효율을 갖게 된다.

본 논문에서는 작은 공진기의 고질적 문제인 낮은 방사 효율을 개선하기 위해 그림 2(b)와 같이  $x$  방향으로 설치된 반사 벽에 AMC를 설치하였다. AMC가 설치된 벽은 금속 벽과 다르게 AMC의 반사 위상을 조절해  $\beta_x$ 를 바꿈으로써  $\beta_z$ 를 실수값으로 만들어 작은 공진기에서도 높은 방사 효율을 가질 수 있다.

이와 더불어 지향적인 빔 성형을 위해 목표 방향으로 파면을 형성시키는 기본 공진 모드인 TE<sub>101</sub> 모드가 형성

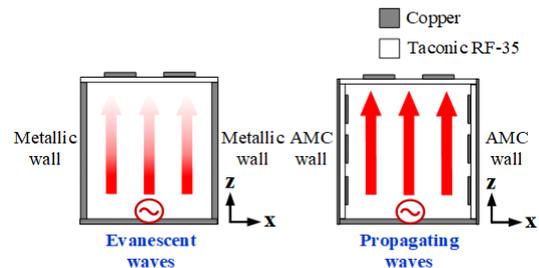


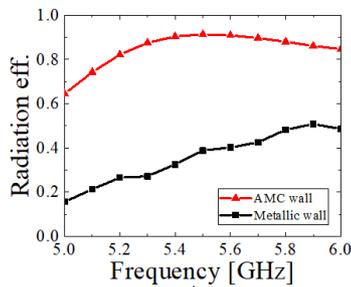
그림 2. 반사 벽에 따른 공진기 내부 전파  
Fig. 2. The waves inside the cavity according to the walls.

되도록 AMC를 설계하였다<sup>[2]</sup>. 식 (1) 및 식 (2)와 공진기를 둘러싸는 각 면의 반사 위상에 의해 TE<sub>101</sub> 모드가 형성되는 AMC의 반사 위상은 다음과 같이 구할 수 있다<sup>[14]</sup>.

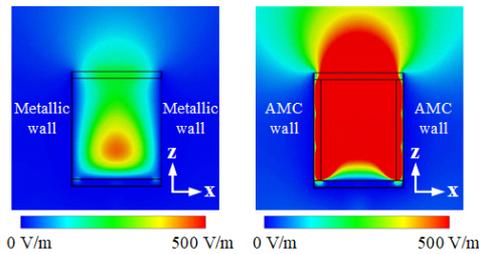
$$\beta_r = \sqrt{\left(\frac{\phi_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{\phi_{prs} + \phi_{gnd}}{2l_z}\right)^2} \quad (4)$$

$$\phi_x = l_x \sqrt{\beta_r^2 - \left(\frac{\phi_{prs} + \phi_{gnd}}{2l_z}\right)^2} \quad (5)$$

이때,  $l_z$ 는 안테나의 높이이고  $\phi_x$ ,  $\phi_{prs}$ ,  $\phi_{gnd}$ 는 각각 AMC, PRS, 그리고 접지면의 반사 위상이다. 그림 3은 AMC의 효과를 보여주기 위해 나타낸 그래프와 시뮬레이션 결과로 반사 벽에 따른 안테나의 방사 효율과 전계 분포( $E_y$ )이다. AMC가 설치된 안테나가 금속 벽으로만 둘러싸인 안테나보다 훨씬 높은 방사 효율을 가짐을 확인할 수 있다.



(a) 방사 효율  
(a) Radiation efficiency



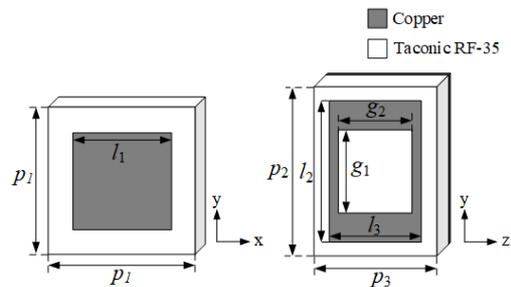
(b) 공진기 내부 전계 분포( $E_y$ )  
(b)  $E_y$  field distribution inside the cavity

그림 3. 반사 벽에 따른 (a) 방사 효율 및 (b) 공진기 내부 전계 분포( $E_y$ )

Fig. 3. (a) The radiation efficiency and (b)  $E_y$  field distribution inside the cavity according to the walls.

그림 4는 제안된 안테나의 상판인 PRS와  $x$  방향으로 설치된 반사 벽에 사용된 AMC 단위 셀의 형상으로 모두 1.52 mm 두께의 Taconic RF-35 유전체 기판을 사용하였다. 그림 4(a)의 제안된 PRS는 윗면의 정사각형 패치의 넓이를 조절하여 설계 주파수에서 원하는 반사 특성을 구현하였으며, 반사 크기와 위상은 각각 0.3과  $-120.18^\circ$ 이다. 그림 4(b)의 AMC는 매우 작은 크기를 갖는 제안된 안테나에 설치하기 위해 AMC 또한 소형화시켰으며, 내부에 사각 슬릿을 삽입하여 커패시턴스를 높임으로써 낮은 주파수에서도 동작하도록 만들었다. 설계 주파수에서 AMC의 반사 위상은  $74.91^\circ$ 로 식 (5)로부터 구한 값과 같다.

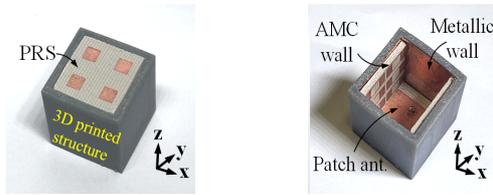
그림 5는 제작된 안테나 사진으로 각각의 기판을 3차원으로 구성하기 위해 3D 프린터로 만든 구조물을 사용하였으며, 구조물 내부에 금속 테이프를 붙이고 패치 안테나를 포함한 접지면, AMC 벽, 그리고 PRS를 차례로 연결해 제작하였다. 그림 6은 제안된 안테나의  $S_{11}$  특성과 E-, H-평면 방사 패턴의 시뮬레이션 및 측정 결과이다. 제안된 안테나는  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 26 \text{ mm}$  ( $0.37 \lambda \times 0.37 \lambda \times 0.48 \lambda$ )의 매우 작은 크기를 가지며 좋은 임피던스 매칭 특성과 함께 목표 주파수인 5.5 GHz에서 4.41 dBi의 실현 이득을 가지며, 방사 효율과 개구부 효율은 각각 91%, 163.4%로 상당히 높은 값을 갖는다. 안테나를 조립하는 과정에서 각 기판이 금속 테이프와 완벽하게 전기적으로 연결되지 않는 제작 오차로 인해 측정 결과와 시뮬



(a) PRS 단위 셀  
(a) PRS unit cell  
(b) AMC 단위 셀  
(b) AMC unit cell

그림 4. 제안된 (a) PRS 및 (b) AMC 단위 셀 구조,  $p_1=10 \text{ mm}$ ,  $p_2=10 \text{ mm}$ ,  $p_3=7.5 \text{ mm}$ ,  $l_1=4 \text{ mm}$ ,  $l_2=9 \text{ mm}$ ,  $l_3=5 \text{ mm}$ ,  $g_1=4 \text{ mm}$ ,  $g_2=4.4 \text{ mm}$

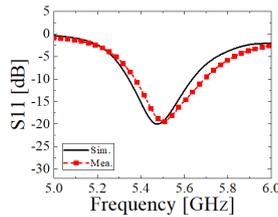
Fig. 4. The structure of the proposed (a) PRS and (b) AMC unit cells.



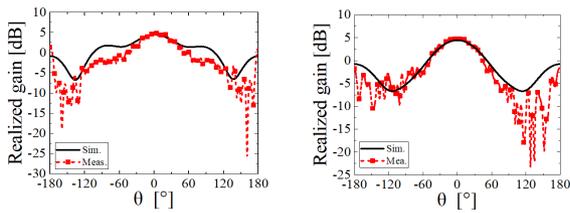
(a) 안테나 구조 (b) 내부 모습  
 (a) Structure of the antenna (b) Inside of the antenna

그림 5. 제작된 FPC 안테나의 (a) 전체 모습 및 (b) 내부 모습

Fig. 5. (a) The structure and (b) the inside of the fabricated FPC antenna.



(a)  $S_{11}$  특성  
 (a) Reflection coefficient characteristic

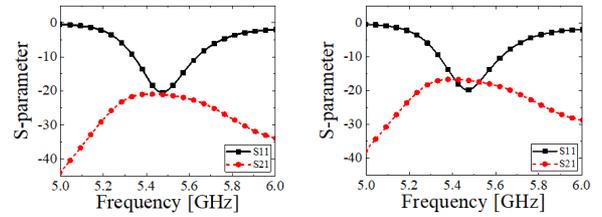


(b) E-평면 방사 패턴 (c) H-평면 방사 패턴  
 (b) E-plane radiation pattern (c) H-plane radiation pattern  
 그림 6. 제안된 안테나의 (a)  $S_{11}$  특성, (b) E-평면 및 (c) H-평면 방사 패턴

Fig. 6. (a) The reflection coefficient characteristic, (b) E-plane, and (c) H-plane radiation pattern.

레이션 결과는 다소 차이가 있지만, 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 안테나가 각각  $x, y$  방향으로  $0.5 \lambda$  간격씩 배열되어 있었을 경우  $S_{21}$  특성을 확인한 시뮬레이션 결과로,  $S_{11}$ 과 함께 나타냈다. 이때, port 1은 안테나의 입력 포트이고 port 2는 인접한 안테나의 입력 포트이다. 제안된 안테나는 옆면이 모두 벽으로 둘러싸여 있어 목표 주파수 5.5 GHz에서  $x, y$  방향 모두  $S_{21}$ 이 약 20 dB로 원치 않는 커플링이 적은 것을 확인할 수 있다.



(a)  $x$  방향 배열 (b)  $y$  방향 배열  
 (a)  $x$ -direction array (b)  $y$ -direction array

그림 7. (a)  $x$  방향 및 (b)  $y$  방향으로 배열되어 있을 경우,  $S_{11}$  및  $S_{21}$  특성

Fig. 7. (a) The  $S_{11}$  and  $S_{21}$  characteristics when the proposed antennas are arranged in the (a)  $x$ -, (b)  $y$ -direction.

### III. 결 론

본 논문에서는 초소형·고효율 Fabry-Perot cavity(FPC) 안테나의 설계 방법을 제안하였다. 제안된 안테나는  $0.37 \lambda \times 0.37 \lambda \times 0.48 \lambda$ 의 소형화된 소자로 grating lobe 없이 넓은 빔 조향 범위를 제공할 수 있으며, 모든 면이 벽으로 둘러싸여 있어 커플링에 의한 영향이 적다. 또한, 모듈 형태로 제안된 안테나는 레고처럼 다양한 모양으로 조립할 수 있으므로 다양한 형상의 배열 안테나로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] V. Trentini, "Partially reflecting sheet arrays," *IRE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 4, no. 4, pp. 661-671, Oct. 1956.
- [2] D. Kim, J. Ju, and J. Choi, "A broadband Fabry-Pérot cavity antenna designed using an improved resonance prediction method," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, no. 5, pp. 1065-1069, May 2011.
- [3] D. Kim, J. I. Choi, "High-gain Fabry-Pérot cavity antenna with planar metamaterial superstrate for wibro base station antennas," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 19, no. 12, pp. 1367-1374, Dec. 2008.
- [4] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 382-390, 1989.