

## 수직한 방사패턴을 형성하는 이중대역 비대칭 배열 메타물질 안테나

표성민<sup>1</sup>, 한상민<sup>2\*</sup>, 이동효<sup>1</sup>, 김영식<sup>1</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 컴퓨터전파통신공학과

<sup>2</sup>순천향대학교 정보통신공학과

### A Dual-Band Asymmetrical Metamaterial Antenna for Orthogonal Radiation Patterns

Seongmin Pyo<sup>1</sup>, Sang-Min Han<sup>2\*</sup>, Dong-Hyo Lee<sup>1</sup> and Young-Sik Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Computer and Radio Communications Engineering, Korea Univ.

<sup>2</sup>Dept. of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang Univ.

**요약** 본 논문에서는 메타물질 특성을 가지는 단위 구조의 비대칭 배열을 이용하여 서로 수직한 방사패턴을 형성하는 이중대역 메타물질 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 메타물질 단위 구조를 비대칭 주기배열로 인하여 2개의 수직한 공진 모드를 발생시킨다. 2개의 수직한 공진 모드는 안테나의 선형 편파 특성을 변화시키지 않고, 오직 방사패턴만 수직하게 형성하는 특징을 가지고 있다. 본 논문에서는 안테나 표면에서는 전개분포의 분석을 통하여 수직한 공진 모드를 분석하였으며, 측정 실험을 통해 안테나의 성능을 검증하였다. 제안된 안테나는 각각의 공진주파수에서 y축과 x축 방향으로 서로 수직한 방사패턴을 가지고 있으며, 각각 3.34 dBi 와 3.86 dBi 의 안테나 이득을 나타내었다. 또한 안테나의 크기 감소와 방사효율 증가를 위하여 동일한 안테나의 접지면에 슬롯을 적용하여, 크기 감소와 12 % 와 27 % 의 방사효율 증가 효과를 실험적으로 검증하였다.

**Abstract** A new metamaterial antenna with dual resonant modes is presented using an asymmetrical periodic arrangement for orthogonal radiation patterns. The proposed antenna produces two orthogonal modes by the asymmetrical periodic unit-cell arrangement. The orthogonal resonant mode provides perpendicular radiation patterns without changing the antenna polarization at each resonant mode. The fabricated antenna shows good agreements with the theoretical analysis of the electric-field. The experimental results shows the orthogonal radiation patterns along x- and y-axes, and gains are 3.34 and 3.86 dBi at each radiating resonant mode, respectively. Additionally, slotted ground structures are embedded on the back side of the antenna in order to reduce the size and enhance the radiation efficiency of 12 % and 27 %, respectively.

**Key Words** : Composite right/left-handed transmission lines (CRLH-TLs), Magnetic monopole antennas, Microstrip patch antennas, Dual-band antennas, Orthogonal radiation patterns.

### 1. 서론

소위 메타물질이란 인공적으로 가공된 음의 유전율과 음의 투자율을 동시에 갖는 자연에 존재하지 않는 물질을 뜻한다[1]. 이러한 메타물질은 composite right/left-handed (CRLH) 전송선 이론을 통해 등가회로

모델이 정립되었고, 회로소자, 안테나, 전파굴절 등의 RF 및 초고주파 공학 분야에서 널리 응용되고 있다 [2-4]. 특히 CRLH 전송선 메타물질은 특정 주파수에서 위상속도가 영(0)이 되는, 소위 영차 모드 공진(zeroth-order resonance), 혹은 무한 파장 공진 현상을 가지고 있다. 즉, 영이 아닌 주파수에서 영의 전파상수를 가지게 되고, 무

\*교신저자 : 한상민 (smhan@sch.ac.kr)

접수일 2009년 7월 11일

수정일 09년 09월 07일

게재확정일 09년 09월 16일

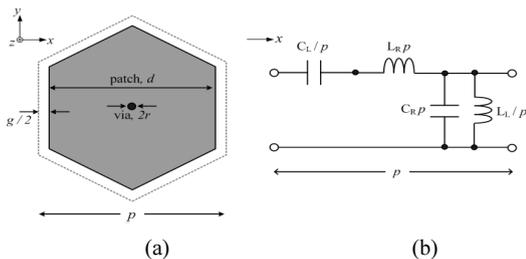
한 파장의 전기적 길이 성분으로 공진을 발생한다[5]. 이러한 영차 모드 공진은 주파수에 무관한 특성으로 인하여, 소형 안테나 구현에 주로 사용되고 있다[6].

본 논문에서는 이러한 메타물질의 단위구조를 비대칭적으로 배열하여, 서로 수직한 방사 패턴을 갖는 이중대역 안테나를 제안하였다. 제안한 안테나는 근접한 두 개의 공진 모드에서 안테나 편파 특성의 변화 없이 수직한 방사패턴을 형성하는 장점을 가지고 있다. 본문은 제2장에서 메타물질의 단위 구조를 CRLH 전송선 이론을 바탕으로 특성을 분석하였고, 제3장에서 분석된 단위 구조의 비대칭 배열 구조를 적용하여, 서로 수직한 성분을 갖는 이중대역 공진을 분석하여 기본형과 접지면 슬롯이 있는 형태의 두 가지 안테나를 설계하였다. 제4장에서는 제작 및 측정 실험을 통하여 이론적으로 분석된 결과를 검증하였으며, 제5장에서 결론을 맺었다.

## 2. 단위구조 분석

그림 1은 육각형 패치 모양을 갖는 메타물질의 단위구조와 1차원 CRLH 전송선으로 표현된 등가회로이다. 단위 구조는 일반적으로 무한 임피던스 접지면으로 이용되는 Electromagnetic Band-Gap (EBG) 구조를 사용하였다[7]. 이러한 단위구조는 무한 임피던스 접지면 뿐만 아니라, CRLH 전송선으로 널리 이용된다 [8]. 위의 단위 구조는 일반적인 육각형 모양의 마이크로스트립 전송선 (d) 과 단위구조사이의 공간 (g), 그리고 금속 패치면과 접지면을 연결하여 주는 수직 비아 (2r)로 구성된다. 이러한 구조는 그림 1(b)와 같이 전송선 특성에 의한 단위 직렬 인덕턴스 ( $L_R$ )와 단위 병렬 캐패시턴스 ( $C_R$ ), 격자 사이의 공간 (g)의 결합에 의한 단위 직렬 캐패시턴스 ( $C_L$ )와 수직 비아에 의한 단위 병렬 인덕턴스 ( $L_L$ )로 표현할 수 있다.

설계된 단위 구조를 EM 시뮬레이터를 통해 물리적 구조의 S-parameter를 추출한 뒤, 회로 분석 시뮬레이터를 통해 등가회로 모델의 파라미터를 추출하였다.



[그림 1] (a) 메타물질의 단위구조와 (b) 1차원 무한소의 길이성분을 갖는 CRLH 전송선으로 표현된 등가 회로

추출된 등가회로 모델의 파라미터는  $L_R = 1.25$  nH,  $C_R = 3.71$  pF,  $L_L = 0.59$  nH,  $C_L = 0.38$  pF 이다. 추출된 단위구조의 파라미터를 식 (1a)과 (2b)에 대입하여, 손실이 없는 전송선 이론에 적용하여, 메타물질 단위구조의 특성 임피던스와 전파계수를 아래 식과 같이 계산할 수 있다 [4].

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}, \tag{1a}$$

$$\beta = \sqrt{ZY}, \tag{1b}$$

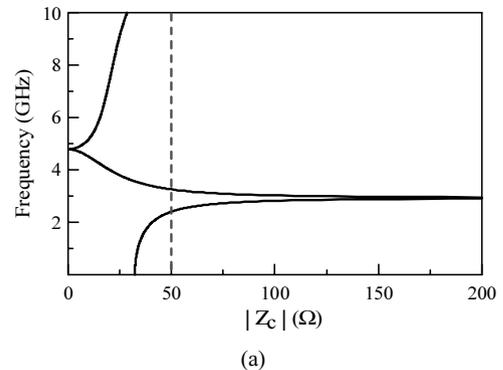
여기서

$$Z = j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_L}, \tag{2a}$$

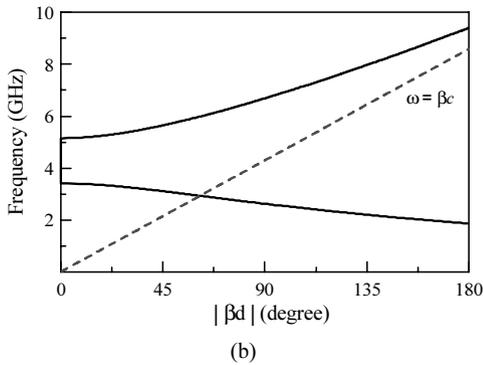
$$Y = j\omega C_R + \frac{1}{j\omega L_L} \tag{2b}$$

의 조건을 만족해야 한다.  $Z$ 와  $Y$ 는 1차원 무한소의 길이성분을 갖는 CRLH 전송선의 직렬 임피던스와 병렬 어드미턴스이다.

그림 2는 식 (1)과 (2)에 의해 계산된 단위 구조의 특성 임피던스와 전파 계수의 주파수 특성을 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이, 메타물질 단위 구조는 3.4 GHz 이하의 영역에서는 음의 기율기의 전파계수를 갖는 메타물질 전파특성을 보여주고 있으며, 3.4 GHz에서 5.2 GHz까지는 band-gap 특성을 보여 주며, 5.2 GHz 이상의 주파수 영역에서는 양의 기율기의 전파계수로 동작함을 알 수 있다. 다음 장에서는 분석된 단위 구조의 비대칭 배열을 이용하여 양의 기율기의 전파계수를 갖는 영역에서의 안테나를 설계하였다.



(a)



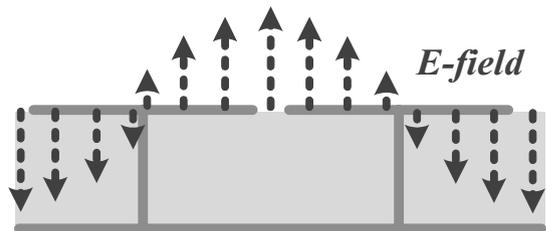
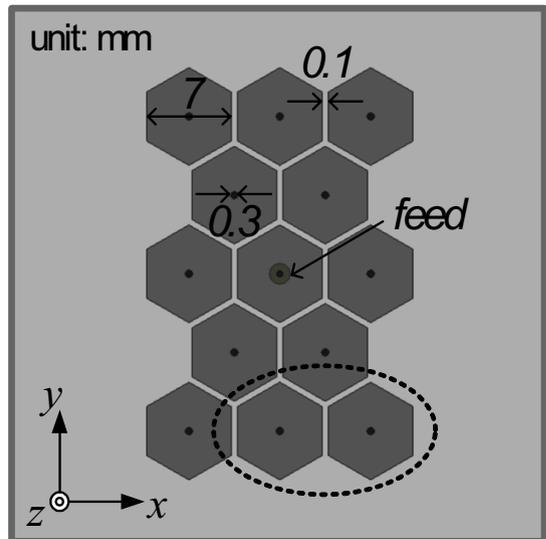
[그림 2] 메타물질 단위구조의 (a) 특성 임피던스와 (b) 전파 계수

### 3. 이중대역 비대칭 배열 메타물질 안테나 설계

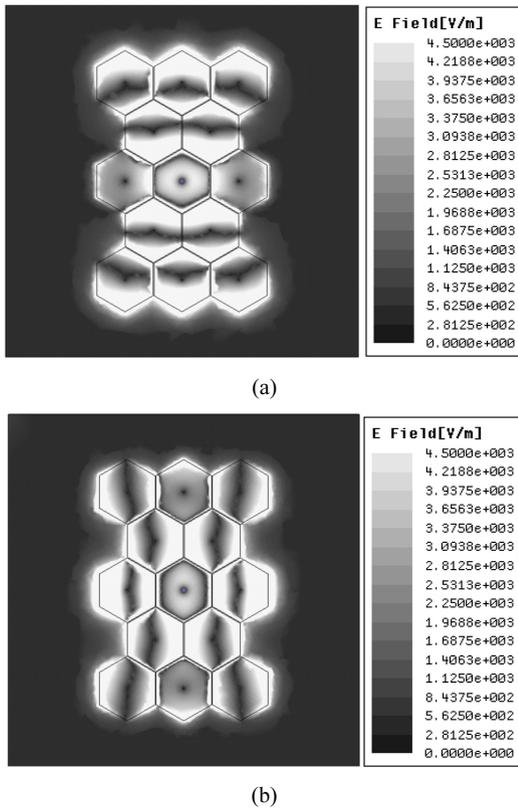
본 장에서는 앞서 분석된 단위 구조를 활용하여 비대칭 배열 안테나를 설계하였으며, 접지면 슬롯을 삽입한 안테나를 설계하여 성능 향상을 보였다. 그림 3은 13개 단위구조의 비대칭 배열 형태를 가진 안테나를 보이고 있다. 단위 구조는 7 mm 길이를 갖는 마이크로스트립 패치로 이루어져 있으며, 수직 비아의 직경(2r)은 0.3 mm, 단위 구조 사이의 공간(g)은 0.1 mm로 설계하였다. 안테나의 전체 크기는 32.7 mm × 21.2 mm이며, 안테나의 기판은 비유전율이 10.2인 Rogers사의 RO6010.2LM 1.27 mm 두께의 기판을 사용하였고 안테나 접지면의 총 크기는 44 mm × 44 mm이다. 평면상에서 비대칭 구조를 이루지만, 각각의 x축과 y축에 대해서 대칭적인 구조를 만족하기 위하여, 단위 구조의 중심에 직접 50 Ω 동축 케이블을 이용하여 급전 회로를 구성하였다.

그림 3의 하단부 그림은 안테나의 구조에서 양의 전파 계수 갖는 영역에서는 방사 매커니즘을 보여준다. 이는 단위구조 사이의 결합에 의해 전계가 형성됨을 알 수 있다. 또한 단위 구조 사이의 결합 공간에서는 가장 강한 전계가 형성되며, 단위 구조의 금속 패치면은 접지면과 연결된 수직 비아로 인해 가장 낮은 전계가 형성됨을 알 수 있다. 뿐만 아니라 비아의 위치에서 전계의 방향은 반대로 형성된다. 그림 4는 비대칭 주기 구조로 구현한 안테나의 각각의 공진 모드에서의 표면 전계 크기 분포 모의실험 결과이다. 1차와 2차 공진 모드는 그림 4(a)와 4(b)의 전계 크기 분포에서 알 수 있듯이, 비아의 위치에서 가장 약한 전계가 형성되고, 격자 사이의 공간(g)에서 가장 강한 전계가 형성된다. 이러한 결과는 이미 그림 3

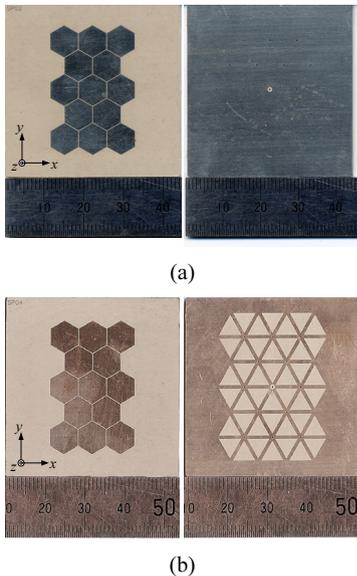
에서 논의한 전계의 크기와 방향에 대한 결과와 일치함을 알 수 있다. 이와 같이 결정된 1차와 2차 방사 공진 모드의 전계 분포는 제안한 안테나의 축 방향으로 전기적 길이에 영향을 받음을 알 수 있다. 즉, 그림 4(a)와 그림 4(b)와 같이 두 개의 수직한 공진 모드는 수직한 전계 분포를 형성하며, 서로 다른 주파수 의존적인 축 지향성을 갖는 전계가 형성된다. 따라서 1차 방사 공진 모드에서는 y축으로 지향성을 갖으며, 2차 방사 공진 모드에서는 y축에 수직인 x축 방향으로 서로 수직한 전계가 형성됨을 알 수 있다. 그림 5는 제안한 안테나의 제작된 모습을 보이고 있다. 그림 5(a)는 비대칭 배열을 갖는 메타물질 안테나의 사진이며, 그림 5(b)는 동일한 구조에 육각형 메타물질 단위 구조의 각 모서리를 향해 6개의 정삼각형 슬롯이 접지면에 적용된 모델이다. 삼각형 슬롯의 크기는 각 변이 5.54 mm이며, 슬롯 간 간격은 0.9 mm로 설계되었다.



[그림 3] 메타물질 단위구조의 비대칭 배열을 이용한 안테나 구조(상단)와 방사 매커니즘(하단)



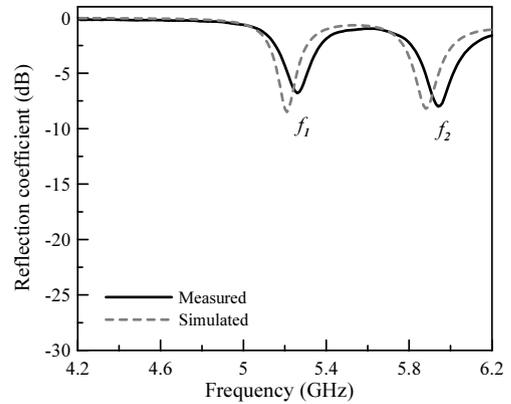
[그림 4] 제안한 안테나의 전계 분포 크기의 모의실험 결과 (a) 1차 공진 모드와 (b) 2차 공진 모드



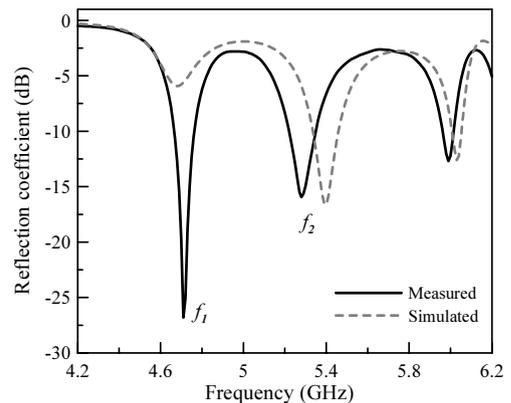
[그림 5] (a) 슬롯이 없는 안테나의 제작 사진과 (b) 슬롯 접지면이 적용된 안테나 제작 사진

#### 4. 측정 결과

제안된 비대칭 구조의 메타물질 안테나는 네트워크 분석기와 무반사실을 통해 안테나의 반사계수와 방사패턴, 그리고 안테나 이득 및 효율을 측정하였다. 그림 6은 제안된 안테나의 반사 계수 측정 결과로 각각 기본형 안테나와 접지면에 슬롯이 있는 안테나를 나타내고 있다. 측정된 1차와 2차 방사 공진주파수 ( $f_1$  &  $f_2$ )는 각각 5.26 GHz와 5.94 GHz이며, 모의실험 결과인 5.17 GHz와 5.88 GHz와 잘 일치함을 알 수 있다. 접지면 슬롯이 적용될 경우 그림 6(b)에서 볼 수 있듯이, 측정된 1차 2차 공진주파수는 4.72 GHz와 5.28 GHz이며, 모의실험의 결과인 4.68 GHz와 5.40 GHz와 거의 일치함을 알 수 있다.

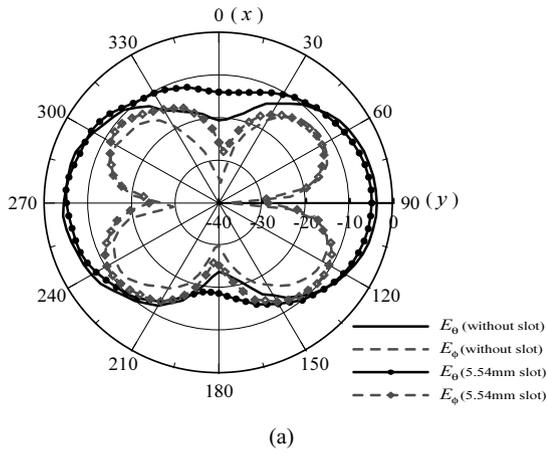


(a)

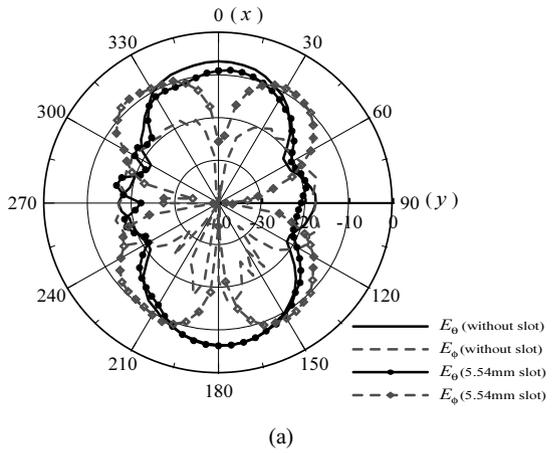


(b)

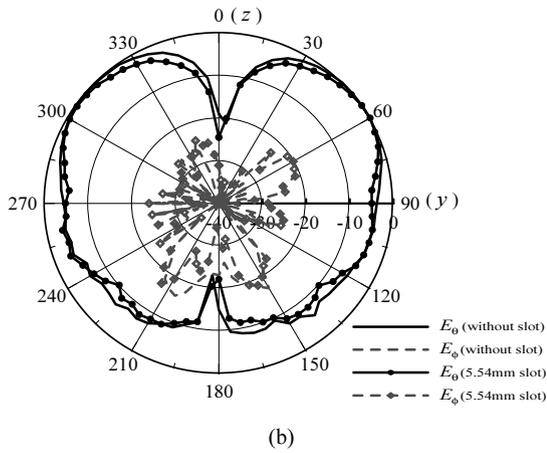
[그림 6] (a) 슬롯이 없는 비대칭 안테나의 반사계수와 (b) 슬롯 접지면이 적용된 안테나의 반사계수



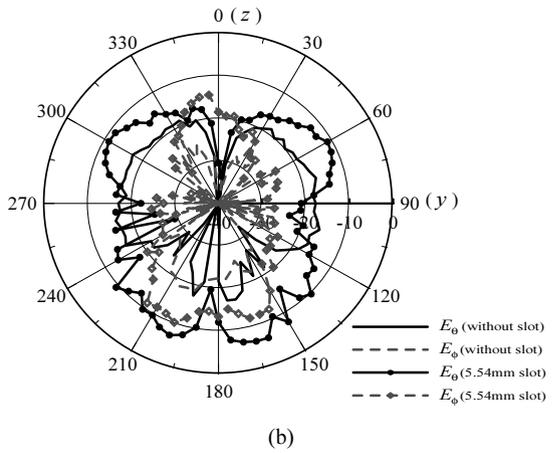
(a)



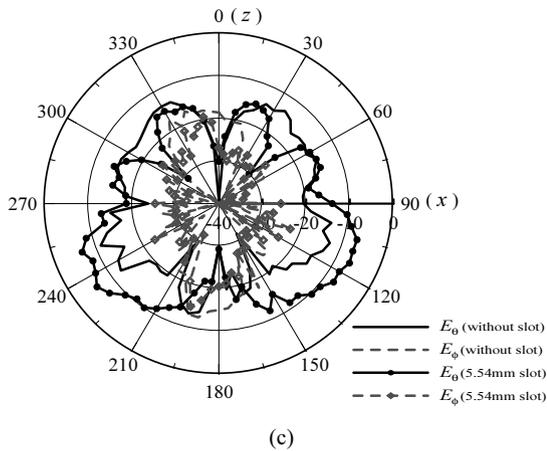
(a)



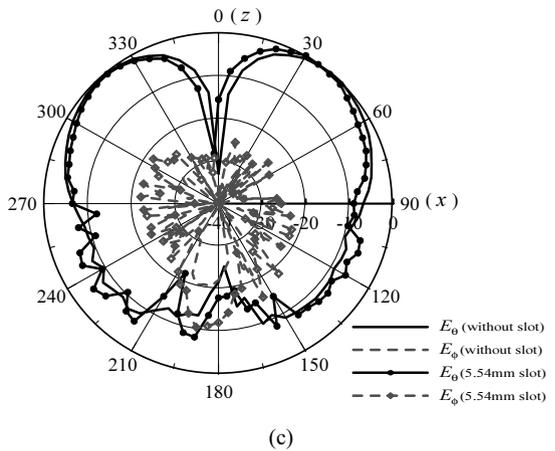
(b)



(b)



(c)



(c)

[그림 7] 제한한 안테나의 1차 공진 주파수 (슬롯이 없는 경우: 5.26 GHz, 5.54 mm 슬롯이 있는 경우: 4.72 GHz)의 안테나 방사패턴 측정결과 (a)xy면, (b)yz면, (c)zx면

[그림 8] 제한한 안테나의 2차 공진 주파수 (슬롯이 없는 경우: 5.94 GHz, 5.54 mm 슬롯이 있는 경우: 5.29 GHz)의 안테나 방사패턴 측정결과 (a)xy면, (b)yz면, (c)zx면

슬롯이 적용된 안테나는 슬롯에 의한 slow-wave effect에 의해 1차 공진주파수에서는 21 %의 크기 감소효과를 보이며, 2차 공진주파수에서는 10.2 %의 크기 감소효과를 보인다. 두 안테나는 슬롯 유무에 상관없이 모두 기본적인 패치에서의 전계 분포 특성에 의해 동일한 방사 패턴을 나타내었다. 그림 7과 그림 8은 슬롯이 없는 구조의 안테나에 대한 1차와 2차 공진주파수에서 측정된 안테나 방사패턴이다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 1차 공진주파수에서 y축 방향으로 분포된 전계분포로 인하여, y축 방향으로 지향성을 갖는 방사패턴을 형성한다. 이와 반대로, 그림 8에서, 2차 공진주파수에서 방사패턴은 x축 방향으로 지향성을 가진 방사패턴을 형성한다. 즉, 제안된 안테나는 각각의 공진주파수에서 각각 서로 수직한 y축과 x축 방향으로 지향성 방사패턴을 형성함을 알 수 있다. 또한  $\theta$  방향과  $\phi$  방향으로의 안테나 편파는 변하지 않음을 확인할 수 있다. 측정된 안테나 이득은 1차와 2차 방사 공진주파수에서 각각 3.34 dBi 와 3.86 dBi 이다.

비대칭 슬롯 접지면이 적용된 안테나의 경우 슬롯에 의한 안테나 방사 성능 향상으로 변화된 특성을 표 1에 정리하였다. 표 1에서 요약된 바와 같이, 제안한 안테나는 수직한 두 모드에서 비슷한 안테나 이득과 방사효율을 가지고 있다. 또한 실험적으로 슬롯은 각각 공진주파수에서 크기 감소 효과뿐만 아니라, 약 12 %와 27 %의 방사효율을 증가시켰다.

[표 1] 안테나 측정 결과 요약

안테나 형태	공진 모드 (주파수)	안테나 이득	안테나 방사효율
제안한 비대칭 배열 메타물질 안테나	1차 공진 5.26 GHz	3.34 dBi	52.4 %
	2차 공진 5.94 GHz	3.86 dBi	41.0 %
비대칭슬롯 접지면 메타물질 안테나 (슬롯크기: 5.54 mm)	1차 공진 4.72 GHz	4.01 dBi	63.7 %
	2차 공진 5.29 GHz	3.89 dBi	68.3 %

## 5. 결론

본 논문에서 육각형 모양의 메타물질 단위구조의 비대칭 주기배열을 이용하여, 수직한 방사패턴을 갖는 이중대역 안테나를 제안하였다. 비대칭 주기배열 구조는 수직한 축에 대하여 서로 다른 전기적 길이를 제공하여, 서로 근접한 주파수대역에서 수직한 방향의 전계를 형성하며.

수직한 전계분포는 안테나의 편파의 변화를 발생시키지 않으면서 방사패턴의 방향만 수직하게 변화하였다. 또한 실험적으로 안테나의 접지면에 추가적인 비대칭 슬롯을 이용하여, 안테나의 방사효율 및 공진주파수의 감소 효과를 얻었다. 제안한 안테나는 높은 서로 근접한 대역에서 서로 다른 방향의 방사패턴을 형성하기 때문에, 주파수 다이버시티 및 방사패턴 다이버시티용 안테나로 그 응용 범위를 확대할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 제안한 안테나의 다양한 비대칭 주기배열 구조와 슬롯의 크기와 모양 변형을 통해 안테나 방사 구조 및 패턴 변화에 대한 지속적인 연구를 진행할 예정이다.

## 참고문헌

- [1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Jan. 1968.
- [2] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," *IEEE Microwave Mag.*, vol. 5, no. 3, pp.34-50, Sep. 2004.
- [3] C. Caloz, T. Itoh, and A. Rennings, "CRLH metamaterial leaky-wave and resonant antennas," *IEEE Antennas Propagat. Mag.*, vol. 50, no. 5, pp. 25-39, Oct. 2008.
- [4] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials*. New York: Wiley, 2006.
- [5] A. Sanada, C. Caloz, and T. Itoh, "Zeroth order resonance in the left-handed transmission line," *IEICE Trans. Electron.*, vol. 87-C, no. 1, pp. 1-7, Jan. 2004.
- [6] C.-J. Lee, K.M.K.H. Leong, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmissionline based compact resonant antennas for RF module integration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 8, pp. 2283-2291, Aug. 2006.
- [7] D. Sievenpiper, L. Zhang, R.F.J. Broas, N.G. Alexopolous, and E. Yablonovitch, "High-impedance electromagnetic surfaces with a forbidden frequency band," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, no. 11, pp. 2059-2074, Nov. 1999.
- [8] A. Sanada, K. Murakami, I. Awai, H. Kubo, C. Caloz, and T. Itoh, "A planar zeroth-order resonator antenna using a left-handed transmission line," in *Proc. the 34th European Microwave Conference*, Amsterdam, The Netherlands, Oct. 2004, pp. 1341-1344.

**표 성 민**(Seongmin Pyo)

[정회원]



- 2002년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
- 2004년 2월 : 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
- 2004년 1월 ~ 2007년 3월 : (주) 팬택&큐리텔 내수그룹 중앙연구소 전임연구원
- 2007년 3월 ~ 2008년 8월 : 고려대학교 정보통신기술연구소 연구원

- 2008년 9월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 박사과정

<관심분야>

Metamaterial-based RF device, circuit and system

**한 상 민**(Sang-Min Han)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 전파공학과(공학사)
- 1998년 8월 : 고려대학교 대학원 전파공학과 (공학석사)
- 2003년 8월 : 고려대학교 대학원 전파공학(공학박사)
- 2003년 10월 ~ 2004년 11월 : 미 UCLA Post-Doctoral Research Fellow

- 2005년 1월 ~ 2007년 8월 : 삼성종합기술원 전문연구원
- 2007년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야>

RF Systems, Low-Power Transceivers, Active Antennas

**이 동 효**(Dong-Hyo Lee)

[준회원]



- 2008년 2월 : 남서울대학교 정보통신공학과 (공학사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 석사과정

<관심분야>

Reconfigurable antenna, array antenna and system

**김 영 식**(Young-Sik Kim)

[정회원]



- 1978년 3월 ~ 1982년 1월 : 홍익공업대학 전자과 조교수
- 1988년 5월 : Univ. of Massachusetts at Amherst (공학박사)
- 1988년 5월 ~ 1989년 2월 : Univ. of Massachusetts at Amherst, Post-Doc.

- 1989년 3월 ~ 1993년 2월 : 한국전자통신연구원 이동통신연구단 무선기술연구실 실장
- 1993년 3월 ~ 현재 : 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 교수

<관심분야>

RF front-end system, Antennas