

# 확장된 대역폭을 갖는 소형 Epsilon Negative ZOR 안테나

## Small Epsilon Negative ZOR Antenna with Improved Bandwidth

고승태 · 박병철 · 박재현 · 이정해

Seung-Tae Ko · Byung-Chul Park · Jae-Hyun Park · Jeong-Hae Lee

### 요 약

본 논문에서는 확장된 대역폭을 갖는 소형 epsilon negative(ENG) zeroth-order resonance(ZOR) 안테나를 제안하였다. 대역폭을 유지하고 ENG ZOR 안테나의 면적을 줄이기 위해서 안테나 패치 위에 패턴을 새겼고 meandered via를 삽입함으로써 매우 큰 병렬 인덕턴스를 발생시켰다. 동일한 면적, 공진 주파수에서 동작하는 ENG ZOR 안테나에 직선 via 대신 meandered via를 삽입하게 되면 유효 유전율의 분포의 기울기가 공진 주파수 근방에서 더 낮아지고 따라서 대역폭은 넓어진다. 결과적으로 제안한 meandered via를 가진 ENG ZOR 안테나는 직선 via를 가진 나선 구조 ENG ZOR 안테나와 동일한 면적을 가짐에도 불구하고 1.38배의 대역폭을 가지고 있는 것을 확인하였다. 또한, meandered via를 가진 ENG ZOR 안테나는 일반적인 mushroom ZOR 안테나보다 64 %의 면적 감소를 보였다.

### Abstract

In this paper, small epsilon negative(ENG) zeroth-order resonance(ZOR) antenna with improved bandwidth is presented. To reduce the size of ENG ZOR antenna without narrowing bandwidth, large shunt inductance is introduced by adding patterns on patch and meandered via. The effective permittivity of meandered via is less dependent of frequency than that of straight via in same size. Thus, ENG ZOR antenna with meandered via has broader bandwidth. As a result, the bandwidth of ENG ZOR antenna with meandered via is 1.38 times as broad as that of spiral ENG ZOR antenna with straight via. On the other hand, the area of ENG ZOR antenna is reduced by 64 % compared with that of conventional mushroom ZOR antenna.

Key words : Epsilon Negative(ENG), Zeroth-Order Resonance(ZOR), Meandered Via, Effective Permittivity

### I. 서 론

Metamaterial 전송 선로는 주파수에 따라 음 또는 양의 유효 유전율/투자율 값을 가진다. 특히, 특정 주파수에서 유전율/투자율이 영이 되면 전파상수가 영이 되어 무한 파장 공진을 갖게 된다. 이러한 특성을 이용하여 zeroth-order resonance(ZOR) 안테나<sup>[1]</sup>와 power divider<sup>[2]</sup>에 적용할 수 있다. 이를 이용한 mushroom 단위 구조의 ZOR 안테나는 평면 형태의 구조

임에도 불구하고 수평 자계 루프 전류를 형성하게 되어 omni-directional한 안테나 방사 패턴을 가지고 있고 무한 파장을 이용하기 때문에 공진기의 전기적 길이에 대한 소형화에 매우 유리하다<sup>[1]</sup>. 하지만 zeroth-order 공진 주파수를 결정하는 via의 인덕턴스와 patch와 접지면 사이의 커패시턴스 값을 크게 하는데 제한을 가지고 있어 소형화에 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 나선 구조 patch 형태의 ZOR 안테나가 제안되어 안테나가 보다 소형화되었지만 대역폭

「이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(R01-2007-000-10315-0).」  
 홍익대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic Information and Communication Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20080523-16S

· 수정완료일자 : 2008년 7월 30일

이 매우 좁아지는 단점이 있다<sup>[3]</sup>.

본 논문에서는 일반적인 mushroom 단위 구조의 ZOR 안테나보다 소형화에 유리하고 나선 구조의 ZOR 안테나의 단점인 협대역을 보완할 수 있는 ZOR 안테나를 제안한다. 또한, double negative(DNG) ZOR 안테나와 공진 특성이 같으면서 구조가 간단한 ENG ZOR 안테나를 적용하였고, ENG를 이용한 ZOR 안테나 동작 원리는 참고문헌 [4]에서 알 수 있다. 제안된 안테나 구조는 나선 구조 ZOR 안테나에 meandered via의 단위 구조를 갖는다. Meandered via를 ZOR 안테나에 도입하면 병렬 인덕턴스 값이 증가하여 나선 구조와 마찬가지로 소형화에 유리하지만 안테나 저항값은 나선 구조보다 상승폭이 작아 대역폭이 좁아지지 않는다.

일반적인 mushroom 형태의 ZOR 안테나는 drude-model로 유효 유전율 분포를 나타낼 수 있다. 그리고 ZOR 안테나는  $\epsilon = 0$ 에서 공진을 가진다. 이 공진 지점에서 분산 곡선의 기울기가 낮을수록 대역폭은 증가하게 된다. 이것을 확인하기 위해 일반적인 mushroom 단위 구조의 ZOR 안테나, 나선 구조 ZOR 안테나 그리고 제안된 meandered via를 갖는 ZOR 안테나를 동일 주파수에서 설계하여 등가회로로부터 각 파라미터 값을 추출하여 비교하였다. 그 결과로부터 실제로 UHF 대역에서 동작하는 meandered via를 갖는 ENG ZOR 안테나를 설계하고 제작하여 측정 결과를 시뮬레이션과 비교 분석하여 이를 확인하였다.

## II. ENG ZOR 안테나

$$\mu_{eff} = \frac{Z'}{j\omega} = L_R \quad (1)$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{Y'}{j\omega} = C_R - \frac{1}{\omega^2 L_L} \quad (2)$$

ENG ZOR 안테나는 그림 1과 같이 병렬 인덕턴스가 인위적으로 첨가되어 있는 구조이다. 이를 전파 상수에 대입하게 되면 식 (1), (2)와 같이 나오게 되고 주파수에 따른 유전율에 대한 식을 얻어낼 수 있다. ZOR 주파수는 open-ended 경계 조건과 공진기의 입력 임피던스를 도입하면 식 (3)과 같은 ZOR 공진 주파수를 얻어낼 수 있다.

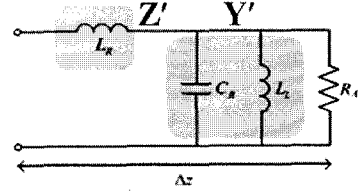


그림 1. 단위 구조 ENG ZOR 안테나의 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit model of ENG ZOR antenna (unit-cell).

$$\omega_{ZOR} = \omega_E = 1/\sqrt{L_L C_R} \quad (3)$$

식 (3)에서 ZOR 공진 주파수가  $L_L$ 과  $C_R$ 에 값에서 결정된다는 것을 알 수 있다<sup>[5]</sup>. 또한, 그림 1 회로에서  $R_A$ 을 가진 저항이 양단에 연결되면 병렬 공진 회로의  $Q$ 값은 식 (4)와 같이 되고 동일 주파수에서  $L_L$ 이 증가하면  $C_R$ 은 감소한다.

$$Q = \frac{R_A}{\omega_0 L_L} \quad (4)$$

그림 2(a)는 같은 공진 주파수, 같은 저항값을 가질 경우  $L_L$ 과  $C_R$  값에 따라 주파수에 따른 유효 유전율 분포를 나타낸 것이다. ZOR 공진은 이론적으로  $\epsilon = 0$ 인 지점에서 결정된다.  $L_L$ 이 상승할수록 또한  $C_R$ 이 감소할수록 유효 유전율의 기울기는 낮아지고, 이에 따라 유효 유전율  $\epsilon = 0$ 에서 발생하는 ZOR 공진의 대역폭이 넓어지는 것을 그림 2(b)에서 확인할 수 있다.

## III. 다양한 형태의 ENG ZOR 안테나

앞에서 해석한 ENG 등가회로의 적용 구조 중 가장 일반적인 것이 그림 3(a)와 같은 일반적인 mushroom 단위 구조이고, patch 사이에  $C_R$ 과 via의  $L_L$ 에 의해 유효 유전율이 주파수에 따라 변하게 된다. 동일 주파수에서 작동하고 대역폭을 넓히기 위해서  $L_L$ 을 증가시키고  $C_R$ 을 감소시켜야 한다.  $L_L$ 을 증가시키는 방법은 patch에 나선 구조를 첨가하는 방법이 있다. 하지만 나선 구조의 감은 횟수가 많을수록 안테나 저항값이 상승하여 크기는 줄일 수 있으나 대역폭이 줄어든다. 다른 방법으로 그림 3(b)와 같이 직선 via 대신 제안된 meandered via를 삽입하는 것이다.  $C_R$ 을 감소시키는 방법은 patch의 크기를 줄이

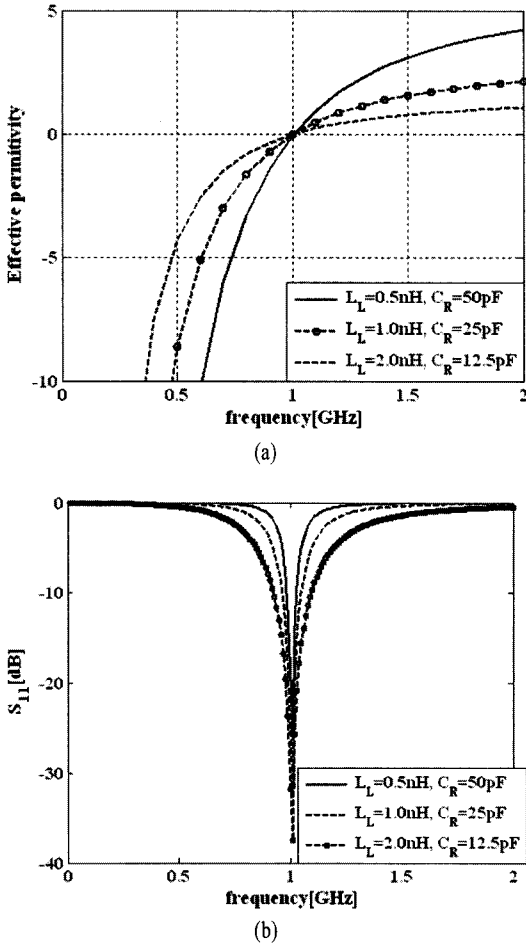


그림 2. (a) 유효 유전율 분포, (b) 반사 계수  
Fig. 2. (a) Dispersion curves of effective permittivity, (b) Return loss.

거나 기판의 유전율을 줄이는 방법이 있고, 본 논문에서는 유전율을 줄이는 방법을 사용했다. 그림 3(c)는 일반적인 직선 via를 갖는 mushroom 구조와 meandered via를 갖는 mushroom 구조의 주파수에 따른 유효 유전율 분포를 나타낸 것이다. 각 단위 구조의 2-port 전송 선로로 가정하고 시뮬레이션 수행으로부터 얻어진 산란계수로부터 식 (5)<sup>[6]</sup>를 이용하여 유효 유전율을 추출했다.

$$\epsilon_{eff} = \left( \frac{1-\Gamma}{1+\Gamma} \right) \frac{Z_a^{TL}}{Z_b^{TL}} \left[ \frac{1}{jL} \left( \frac{c}{\omega} \right) \cosh^{-1} \frac{1-S_{11}^2+S_{21}^2}{2S_{11}} \right] \quad (5)$$

두 구조 모두 patch는 가로, 세로 30 mm, 높이 12.7 mm이고, 일반적인 직선 via를 가진 mushroom

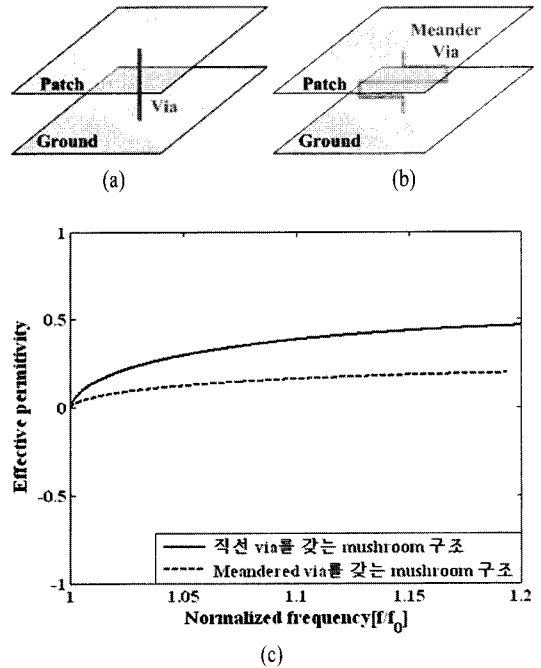


그림 3. (a) 일반적인 직선 via를 가진 mushroom 단위 구조, (b) Meandered via를 가진 mushroom 단위 구조, (c) 유효 유전율 분포  
Fig. 3. (a) Unit-cell of mushroom with straight via, (b) Unit-cell of mushroom with meandered via, (c) Dispersion curves of effective permittivity.

단위 구조의 기판은  $\epsilon_r=2.2$ 이고 meandered via를 가진 mushroom 구조의 기판은  $\epsilon_r=1$ 이다. 동일한 크기와 공진 주파수를 가지기 위해 meandered via를 가진 mushroom 단위 구조는 기판의 유전율을 낮춰 증가한  $L_L$ 만큼  $C_R$ 을 보상했다. 결과적으로 그림 3(c)에서 meandered via를 가진 mushroom 구조가 더 낮은 유전율 분포 기울기 특성을 가지고 있고, 더 넓은 대역폭을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 4의 모든 ZOR 안테나는 UHF 대역 동일 주파수에서 동작하도록 설계한 것이다. 각 안테나의 파라미터는 표 1에서 볼 수 있다. 그림 4(a)는 patch와 직선 via를 갖는 일반적인 ENG ZOR 안테나이다. 그림 4(b)는 나선 구조의 patch를 나타낸 것이고, 그림 4(c)는 나선 구조의 gap의 길이를 넓게 설계한 것이다. 그림 4(d)는 patch 위에 나선 구조를 여러 번 감아 설계한 것이다. 그림 4(e)는 그림 4(c)와 동일한 patch 구조를 가지고 있고 유전율이 2.6인 기판을 사

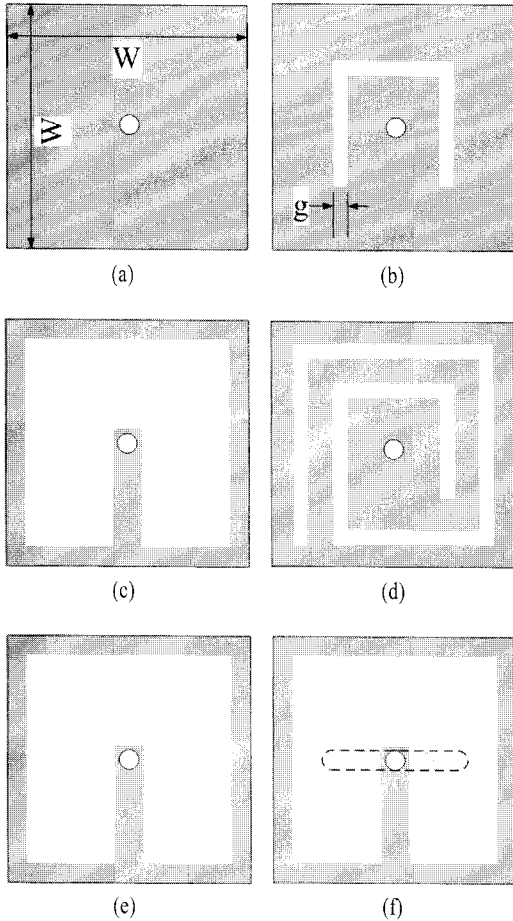


그림 4. 다양한 ENG ZOR 안테나  
Fig. 4. Various ENG ZOR antenna

표 1. 각 형태의 ENG ZOR 안테나 사양  
Table 1. Parameters for each structure of ENG ZOR antenna.

	W [mm]	G [mm]	H [mm]	Via type	$\epsilon_r$	$Q$
(a)	51	None	10	Straight	1	32.56
(b)	47	1	10	Straight	1	36.75
(c)	36	14	10	Straight	1	49.47
(d)	28	1	10	Straight	1	78.77
(e)	28	11	10	Straight	2.6	90.70
(f)	28	11	10	Meander	1	58.40

용하였다. 마지막으로 그림 4(f)는 본 논문에서 제안한 meandered via를 갖는 ENG ZOR 안테나이다. 그림 4(a)~(e)는 직선 via를 갖는 안테나이고, 그림 4(f)

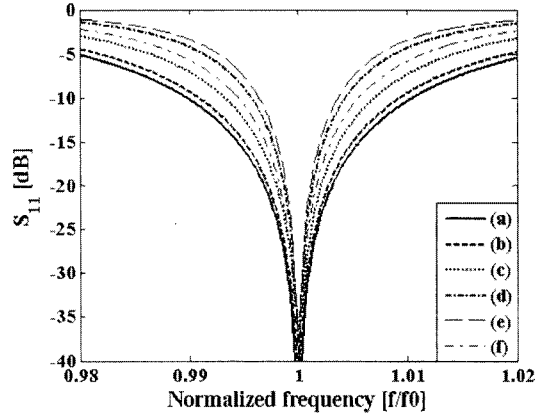


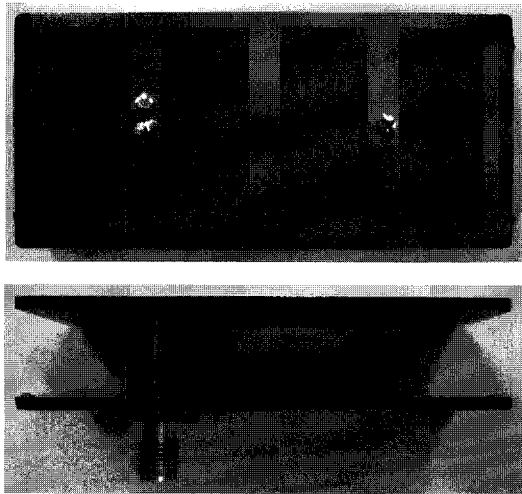
그림 5. 반사 손실  
Fig. 5. Return loss.

안테나는 meandered via를 가지고 있다.

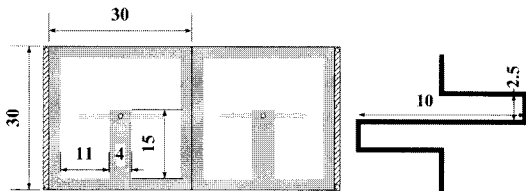
그림 5는 그림 4의 각 안테나들의 시뮬레이션 반사 계수 결과를 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 일반적인 mushroom 형태로 비대역폭은 10 dB 기준으로 2.06 %이다. 그림 4(b)와 (c)의 비대역폭은 각각 1.83 %, 1.36 %이다. 일반적으로 안테나 면적이 줄어들면 높은 Q값으로 비대역폭도 좁아진다. 하지만 그림 4 (d)~(f)의 안테나들은 동일한 면적을 가지고 있지만 다른 Q값을 가지고 있다. 여기서 meandered via를 가진 그림 4(f)의 안테나가 이 중에 가장 넓은 대역폭을 가지고 있다. 그림 4(f)의 안테나의 대역폭은 그림 4(d)보다 1.38배 넓고, 그림 4(e)보다 1.83배 넓다. 따라서 본 논문에서 제안한 meandered via를 갖는 ENG ZOR 안테나는 나선 구조 ENG ZOR 안테나와 동일하게 면적도 줄일 수 있을 뿐만 아니라 나선 구조 ENG ZOR의 단점인 협대역을 보완할 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

그림 6은 제작된 meandered via를 갖는 ENG ZOR 안테나이고 2x1 단위 셀로 구성되어 있으며, 안테나와의 정합을 위해 급전 외곽에 동심원의 gap을 첨가하였다. 또한,  $\epsilon_r \sim 1$ 을 얻기 위해 높이 1.57 mm인  $\epsilon_r = 2.2$ 을 가지는 Rogers duroid5880을 위의 기판과 아래 기판에 따로 사용하였고 사이에 공간을 남겨놓았다. 제작된 제안한 ENG ZOR 안테나의 단위 구조의 수치는 다음과 같다. Patch area=30 mm×30 mm(0.092  $\lambda_0 \times 0.092 \lambda_0$ ), 기판을 포함한 안테나의 높이=12.7



(a)



(b)

그림 6. (a) 제작된 Meandered via를 갖는 ENG ZOR 안테나, (b) 제작된 안테나의 구조(단위: mm)  
Fig. 6. (a) Fabricated ENG ZOR antenna with meandered via, (b) Geometry of the antenna(unit: mm).

mm( $0.039 \lambda_0$ ), 나선 구조의 gap=11.0 mm( $0.034 \lambda_0$ ), meandered via의 넓이와 반지름은 각각 10.0 mm( $0.030 \lambda_0$ ), 0.25 mm로 설계되었다. 제작된 안테나의 중심 주파수는 UHF 대역에서 동작하도록 설계하였다. 시뮬레이션 결과, 제안된 ENG ZOR 안테나의 ZOR 주파수에서의 전계 분포는 그림 7에 나타냈고, 전계가 patch에서 접지면으로 수직으로 일정하게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 그림 8은 제작된 ENG ZOR 안테나의 반사 계수를 시뮬레이션과 측정 결과로 비교한 것이다. 시뮬레이션을 수행한 결과를 보면 중심 주파수 823 MHz, 10 dB 기준 비대역폭은 1.09 %로 나왔다. 측정 결과는 중심 주파수 825 MHz, 비대역폭 1.45 %로 나왔다. 결과적으로, 시뮬레이션과 측정 결과가 매우 동일함을 볼 수 있다. 그림 9는 정규화된 ZOR 안테나의 방사 패턴이다. 그림 9(a)은 E-plane에서 바라본 방사 패턴으로 시뮬레이

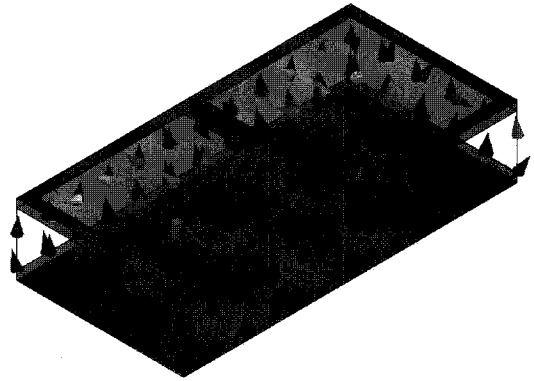


그림 7. ZOR 주파수에서의 전계 분포  
Fig. 7. E-field distribution at ZOR frequency.

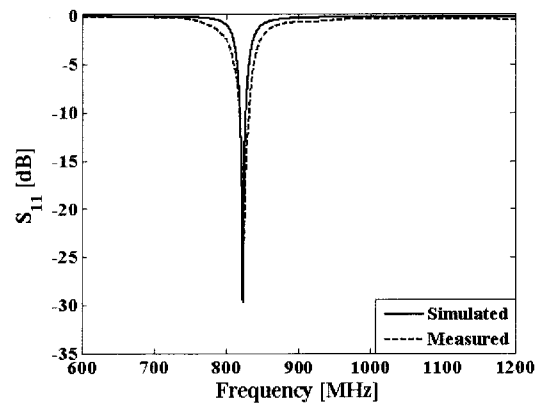
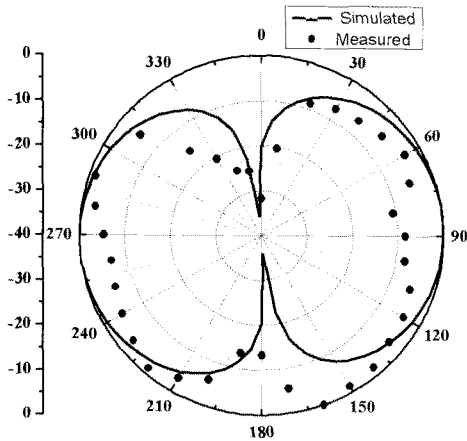


그림 8. 반사 계수  
Fig. 8. Return loss.

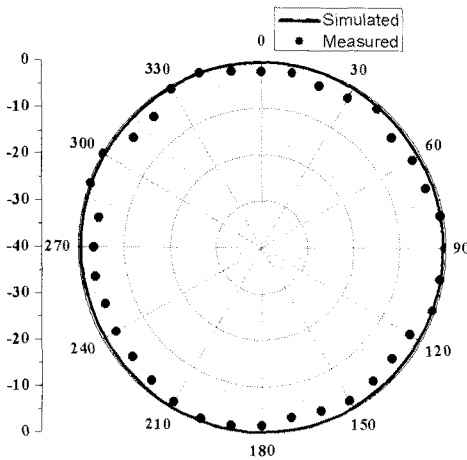
선과 측정 결과를 비교해 보면  $\theta=0^\circ, 180^\circ$ 에서 null이 발생함을 알 수 있고, 최대 이득은 4 dBi이다. 그림 9(b)는 H-plane에서 바라본 방사 패턴으로 측정 결과에서 이득 변화는 3.9 dB이다. 방사 효율은 시뮬레이션은 88 %, 측정 결과는 95 %로 나왔다. 제안된 2×1 meandered via를 갖는 ENG ZOR 안테나는  $\epsilon_r=1$ 인 일반적인 mushroom ZOR 안테나보다 약 64 % 면적 감소를 효과를 얻어낼 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 대역폭이 향상된 소형 ENG ZOR 안테나가 제안되었다. 대역폭을 최대한 유지하면서 안테나의 면적을 줄이기 위해 패치 위에 패턴을 새겼고, 직선 via 대신 meandered via를 삽입하여 매우



(a) E-plane pattern



(b) H-plane pattern

그림 9. 방사 패턴

Fig. 9. Radiation pattern.

큰 병렬 인덕턴스를 발생시켰다. 따라서 ZOR 공진이 일어나는  $\epsilon=0$ 인 주파수에서 직선 via를 갖는 일반적인 mushroom 안테나보다 유효 유전율 분포의 기울기를 낮출 수 있었다. 결과적으로 제안된 안테

나는 직선 via를 갖는 나선 구조 ENG ZOR 안테나보다 1.38배의 대역폭을 가지게 되었다. 또한, 제안된 안테나는 일반적인 mushroom 안테나와 비교하였을 때 64 %의 면적 감소를 보였다.

### 참고 문헌

[1] J. G. Lee, J. H. Lee, "Zeroth order resonance loop antenna", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 3, pp. 994-997, Mar. 2007.

[2] M. A. Antoniadis, G. V. Eleftheriades, "A broadband series power divider using zero-degree metamaterial phase-shifting lines", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, pp. 808-810, 2005.

[3] 박재현, 류영호, 김동진, 추호성, 이정해, "메타물질 전송 선로를 이용한 소형 나선 구조 Zeroth-order Resonance 안테나", *전자공학회논문지*, 44 (7) TC, pp. 626-631, 2007년 7월.

[4] Jae-Hyun Park, Young-Ho Ryu, Jae-Gon Lee, and Jeong-Hae Lee, "Epsilon negative zeroth-order resonator antenna", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 12, pp. 3710-3712, Dec. 2007.

[5] A. Lai, T. Itoh, and C. Caloz, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 5, no. 3, pp. 34-50, 2004.

[6] Shau-Gang Mao, Shiou-Li Chen, and Chen-Wei Huang, "Effective electromagnetic parameters of novel distributed left-handed microstrip lines", *IEEE Transactions Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, pp. 1515-1521, 2005.

고 승 태



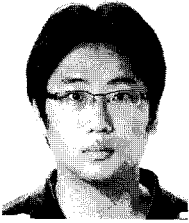
2006년 2월: 홍익대학교 전자전기  
공학부 (공학사)  
2007년 3월~현재: 홍익대학교 전  
파통신공학과 석사과정  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리  
미터파 회로설계, 안테나 설계

박 재 현



2005년 2월: 홍익대학교 전자전기  
공학부 (공학사)  
2008년 2월: 홍익대학교 전파통신  
공학과 (공학석사)  
2008년 2월~현재: 홍익대학교 전  
파통신공학과 박사과정  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리  
미터파 회로설계, Meta-Material

박 병 철



2008년 2월: 홍익대학교 전자전기  
공학부 (공학사)  
2008년 3월~현재: 홍익대학교 전  
파통신공학과 석사과정  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리  
미터파 회로설계, 안테나 설계

이 정 해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학  
과 (공학사)  
1988년 2월: 서울대학교 전기공학  
과 (공학석사)  
1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공  
학박사)  
1993년 3월~1996년 2월: General Ato-  
mics 교환연구원  
1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor  
1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 부교수  
[주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나,  
Metamaterial RF 소자