

버섯 형태를 갖는 광대역 ENG 영차 공진 안테나

Wideband ENG Zeroth-Order Resonant Antenna Having Mushroom Shape

장우철 · 이범선

Woo-Cheol Chang · Bomson Lee

요약

본 논문에서는 microstrip line에서 광대역 특성을 갖는 ENG(Epsilon Negative) ZOR(Zeroth-Order Resonant) 안테나를 설계, 제작, 측정 및 비교, 분석하였다. 제안된 안테나는 mushroom 구조를 이용하여 설계하였고, 영차 공진 단일 셀의 공진 주파수는 12 GHz이다. 안테나 크기는 7.65×1.31×2.37 mm(or 0.306×0.053×0.095 λ₀ at 9.2 GHz)이다. 설계 방법은 방사 손실을 고려한 전송 이론 모델링을 바탕으로 설계하였다. 정합을 위한 결합 커패시터를 사용해서 안테나 공진 주파수가 9.2 GHz로 낮아졌으며, 이 주파수에서 측정된 대역폭은 1,831 MHz(20.0%)이며, 최대 이득은 7.1 dBi이다.

Abstract

This Letter presents a wideband ENG(Epsilon Negative) ZOR(Zeroth-Order Resonant) antenna designed on a microstrip line. It has a mushroom structure and its size is only 7.65×1.31×2.37 mm(or 0.306×0.053×0.095 λ₀ at 12 GHz) owing to zeroth-order resonance. The design procedures with closed form solutions are provided using transmission line theory considering radiation loss. The measured antenna bandwidth is about 20.0 % at 9.2 GHz and antenna gain is 7.1 dBi despite the compact size.

Key words : Metamaterial, Zeroth-Order, Mushroom, ENG, Resonant Antenna

I. 서론

Metamaterial이란 일반적인 상태에서 갖지 못하는 전자기학적인 특성을 인위적인 방법을 통해 새로운 특성을 갖게 하는 것을 말한다. Metamaterial은 크게 네 가지로 분류된다. 그 중 유효 유전율이 음의 값을 가지는 형태를 ENG(Epsilon Negative)라 한다^[1]. Metamaterial 구조를 응용한 전송선(MTM-TL)은 기존의 Right-Handed(RH) 전송선에 직렬의 *C*와 병렬의 *L*을 삽입한 것이며, 이를 통해 Left-Handed(LH) 특성을 가지는 전송선의 구현이 가능해졌다. MTM-TL은 전

파상수가 음의 영역까지 조절 가능하다. 특히 전파상수가 0인 경우 MTM-TL 상에서 물리적 길이와 무관하게 전기적 길이가 0이 되어 모든 물리량이 같게 반응한다. MTM-TL의 특성을 응용한 안테나에 대한 연구가 활발하다. 대표적으로 누설파 안테나(leaky wave antenna)^[2], 공진 안테나(resonant antenna)^[3] 등이 있다. MTM-TL를 응용한 안테나는 작은 크기를 가지는 장점에 불구하고 협대역이란 단점을 가진다.

본 논문에서는 광대역 특성을 갖는 단일 셀 ENG 영차 공진 안테나를 설계 및 제작, 측정하였다. Mu-

「본 연구는 한국산업기술평가원의 IT산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음[2009-F-033-01, 메타전자파 구조를 이용한 전파(RF) 스펙트럼 특성 개선 기술 연구].」

경희대학교 전파공학과(Department of Radio Science & Electronic Engineering, Kyunghee University)

· 논문 번호 : 20090730-12S

· 수정완료일자 : 2009년 9월 16일

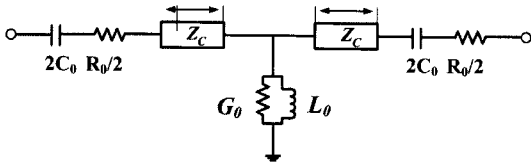


그림 1. 손실을 고려한 RLH 단일 셀 등가 모델
Fig. 1. Lossy RLH-TL unit cell equivalent model.

shroom 구조를 이용하였고, 방사 손실을 고려한 전송이론 모델링^[4]을 바탕으로 설계하였다.

II. 방사 손실을 고려한 Right/Left Handed(RLH) 전송선 단일 셀 등가 모델

그림 1은 방사 손실을 고려한 단일 셀 모델이다. 방사 손실을 고려한 단일 셀 모델은 기존 MTM-TL에 방사 소자인 직렬 저항 R_0 와 병렬 컨덕턴스 G_0 을 추가하였다. Z_c 와 k_d 는 각각 우형 전송선의 특성 임피던스와 단일 셀의 전기적 길이이다. L 과 C 는 각각 RH 전송선의 분포 직렬 인덕턴스[H/m]와 병렬 커패시턴스[F/m]이다^[4].

kd 가 아주 작지 않은 단일 셀을 설계할시, 각주파수 ω 에서 원하는 단일 셀의 위상을 ϕ_ω 라 하면 그림 1의 C_0 와 L_0 는 식 (1), (2)로 구할 수 있다.

$$C_0 = \frac{-\sqrt{2} \sin(kd) + \sqrt{2} \sin^2(kd) + 4(\cos(kd) - \cos(\phi_\omega)) \cos^2\left(\frac{kd}{2}\right)}{2\sqrt{2}Z_c \omega (\cos(kd) - \cos(\phi_\omega))} [F] \quad (1)$$

$$L_0 = Z_c^2 C_0 [H] \quad (2)$$

그림 2와 같이 종단을 개방된 등가 회로에서 어드미턴스 Y 는 식 (3)과 같다^[5]. ω_0 는 메타 구조의 공진 각주파수이다. 입력 임피던스 Z_{in} 은 식 (4)와 같다.

$$Y = G_0 + j2(Cd)(\omega - \omega_0) \quad (3)$$

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{G_0 + j2(cd)(\omega - \omega_0)} \quad (4)$$

종단을 개방시킨 단일 셀에서 병렬 컨덕턴스 G_0 은 1/50 Ω보다 매우 작은 값을 갖는다. 단일 셀의 공진 주파수에서 1/Y는 50 Ω보다 매우 큰 값을 가진다. 50 Ω feed line는 1/Y와 정합이 이루어지지 않는다. Feed line과 1/Y를 정합시키기 위하여 결합 커

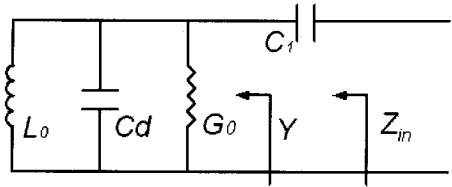


그림 2. 종단을 개방시킨 단일 셀 MTM-TL 안테나 등가 회로

Fig. 2. Equivalent circuit for open-terminated one-unit-cell MTM antenna.

패시턴스 C_1 을 사용한다.

정합 각주파수 ω_1 는 식 (5)을 이용하여 구할 수 있고^[6] ($Y_c - G_0$)의 정도에 따라 ω_1 는 ω_0 보다 작은 값을 갖는다. 안테나 공진 주파수 f_1 는 $\omega_1/2\pi$ 며, 정합 커패시턴스 C_1 은 식 (6)과 같다.

$$\omega_1 = \omega_0 - \frac{1}{2(Cd)} \sqrt{G_0(Y_c - G_0)} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{G_0^2 + 4(Cd)^2(\omega_0 - \omega_1)^2}{2(Cd)(\omega_0 - \omega_1)} [F] \quad (6)$$

III. 단일 셀 ENG ZOR 안테나 설계 및 결과

제안된 안테나는 Mushroom 구조를 이용하여 설계하였고, 영차공진 단일 셀의 공진 주파수는 12 GHz이다. 단일 셀의 전기적 길이 kd 는 $\pi/4$ 이다. 식 (1), (2)로 계산된 L_0 , C_0 의 값은 0.8 nH, 0.32 pF이다. 표 1은 종단을 개방시킨 단일 셀(그림 3)의 제원 값이다. 이때 kd 는 $\pi/4$ [rad], L_0 는 0.8 nH이다.

그림 4는 종단을 개방시킨 단일 셀을 EM simulation을 통해 얻은 어드미턴스 특성이다. 그림 4-(a)에서의 $\text{Re}[Y]$ 는 G_0 이다. 그림 4-(b)에서의 $\text{Im}[Y]$ 의 값은 12 GHz에서 0을 갖는다. 즉, $h=1$ mm, $h=1.6$ mm, $h=2$ mm, $h=2.7$ mm인 종단을 개방시킨 단일 셀

표 1. 종단을 개방시킨 단일 셀의 제원(단위: mm)
Table 1. Specification of one-unit-cell when open termination(unit: mm).

h	W	L	D
1	3.1	1.91	0.03
1.6	4.85	1.78	0.22
2	6.24	1.67	0.45
2.37	7.5	1.54	0.9

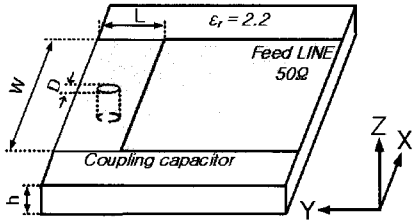


그림 3. 종단을 개방시킨 단일 셀 구조
Fig. 3. Fabricated one-unit-cell when open termination.

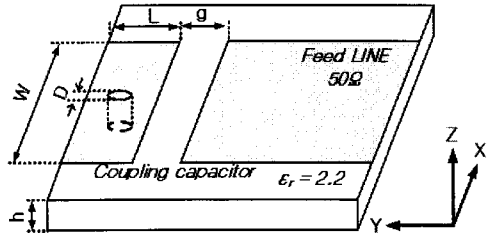
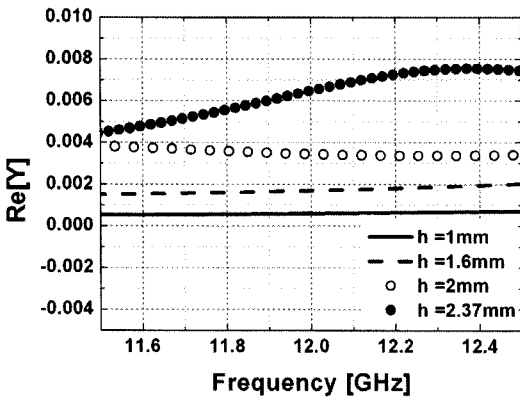
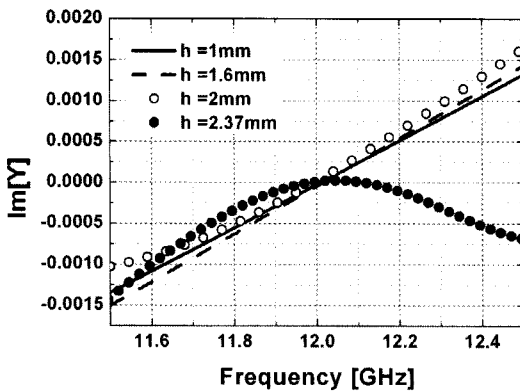


그림 5. 단일 셀 영차 공진 ENG 안테나 구조
Fig. 5. Fabricated one-unit-cell ZOR ENG antenna.



(a) 종단을 개방시킨 단일 셀의 conductance
(a) Conductance of unit cell when open termination



(b) 종단을 개방시킨 단일 셀의 susceptance
(b) Susceptance of unit cell when open termination

그림 4. 종단을 개방시킨 단일 셀의 어드미턴스
Fig. 4. Admittance of unit cell when open termination.

은 영차 공진을 한다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 종단을 개방시킨 단일 셀(그림 3)에 결합 커패시턴스를 추가한 단일 셀 영차 공진 ENG 안테나이다. 결합 커패시턴스는 갭(gap)으로 구현하였다. 높이에 따른 갭 길이는 표 2로 정리하였다.

Circuit simulation(ADS)는 그림 6과 같이 구성하

표 2. 결합 커패시턴스를 위한 갭의 길이(단위: mm)
Table 2. Length of the gap for a coupling capacitor (unit: mm).

<i>h</i>	1	1.6	2	2.37
<i>g</i>	0.6	0.6	1.15	1.6

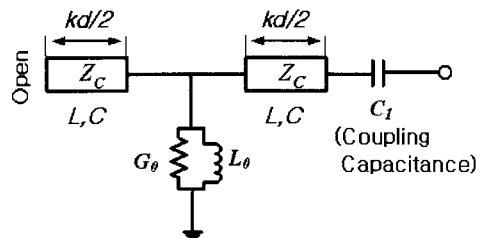


그림 6. ENG 영차 공진 안테나의 등가회로
Fig. 6. Equivalent circuit for ENG ZOR antenna.

표 3. 높이에 따른 G0, C1, L, C
Table 3. G0, C1, L, C with a height *h*.

<i>h</i> (mm)	<i>G</i> ₀ ($\bar{\sigma}$)	<i>C</i> ₁ (pF)	<i>L</i> (nH)	<i>C</i> (pF)
1	0.0006	0.047	231.6	92.6
1.6	0.0017	0.082	234.4	93.8
2	0.0034	0.125	236.2	94.5
2.37	0.0065	0.190	237.6	95.0

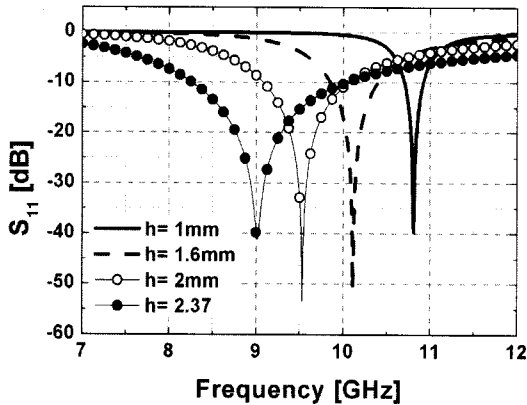
고 표 3의 값을 이용하여 수행하였다. *G*₀는 그림 4에서 구하였고, *L*과 *C*는 참조논문 [4]의 절차에 따라 구하였다. *C*₁은 식 (6)으로 구하였다. 높이에 따른 *G*₀, *C*₁, *L*, *C*의 값을 표 3으로 정리하였다.

그림 7은 주파수에 따른 Circuit/EM simulation으로 구한 안테나 반사계수 특성으로 비교적 잘 일치하였다. 표 4에서는 높이에 따른 circuit/EM simulation의 대역폭을 비교하였다. *h*=1 mm, 1.6 mm에서는 서로 잘 일치하였으나 *h*=2 mm, 2.37 mm에서는 차이가

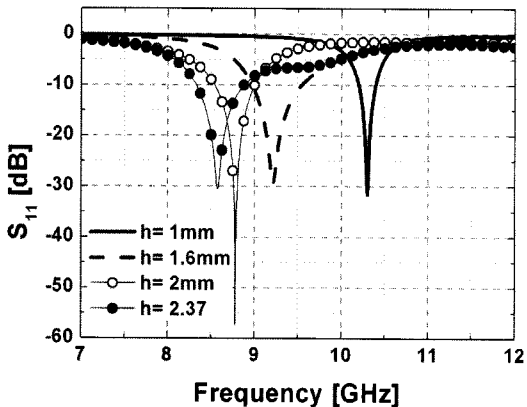
표 4. 높이에 따른 대역폭(비대역폭)

Table 4. Bandwidth as a function of height(fractional bandwidth).

h(mm)	BW(Fractional BW)	
	Circuit	EM
1	210 MHz(1.9 %)	210 MHz(2.0 %)
1.6	550 MHz(5.5 %)	540 MHz(5.8 %)
2	1,200 MHz(12 %)	473 MHz(5.8 %)
2.37	1,740 MHz(19 %)	650 MHz(7.6 %)



(a) Circuit simulation의 S_{11}
(a) S_{11} of circuit simulation



(b) EM simulation의 S_{11}
(b) S_{11} of EM simulation

그림 7. Circuit/EM simulation의 S_{11}
Fig. 7. S_{11} of circuit/EM simulated.

났다(EM은 튜닝하지 않은 결과임). 표 5에서는 식 (6)으로 계산된 f_1 과 circuit/EM simulation으로 구한 f_1 를 나타내었는데 비교적 잘 일치하였다.

표 5. 높이에 따른 안테나 공진 주파수

Table 5. Antenna resonant frequency as a function of height.

h(mm)	f_1 [GHz]		
	Theory	Circuit	EM
1	10.6	10.8	10.3
1.6	9.8	10	9.2
2	9.1	9.5	8.8
2.37	8.4	9	8.6

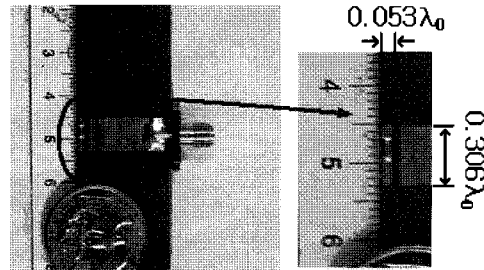


그림 8. 구현된 단일 셀 ENG 영차 공진 안테나
Fig. 8. Fabricated one-unit-cell ENG ZOR antenna.

IV. 단일 셀 ENG ZOR 안테나 제작 및 분석

그림 8은 실제 제작한 안테나이다. 제작에는 유전율 2.2, 높이 2.37mm의 Teflon 기판을 사용하였으며 feed line은 50 Ω으로 급전하였다.

III장에서는 높이 2.37 mm인 안테나를 설계하였고 지름 0.9 mm인 via(shorting pin)를 사용하여 L_0 를 구현하였다. 제작 여건상 안테나는 지름 1 mm via를 사용하여 제작하였다.

via 지름의 변화로 인해 L_0 는 0.95 nH로 변하였다. 새로운 L_0 에서 영차 공진을 위한 단일 셀의 전기적 길이는 39° 이고, 분포정수 C 와 L 의 값은 95.07 pF/m, 237.64 nH/m이며, G_0 는 0.0033 Ω , C_1 는 0.135 pF, f_1 는 8.8 GHz이다.

새로운 단일 셀에 대한 영차 공진 안테나 제원은 $h=2.37$ mm, $W=7.65$ mm, $L=1.31$ mm, $D=1$ mm, $g=1.1$ mm이다. 안테나 크기는 $7.65 \times 1.31 \times 2.37$ mm(or $0.306 \times 0.053 \times 0.095 \lambda_0$)이다.

그림 9는 circuit/EM simulation 및 측정된 안테나의 반사계수이다. 표 6에서 circuit/EM simulation 및 측정에 근거한 중심 주파수는 각각 9.12 GHz, 9.15

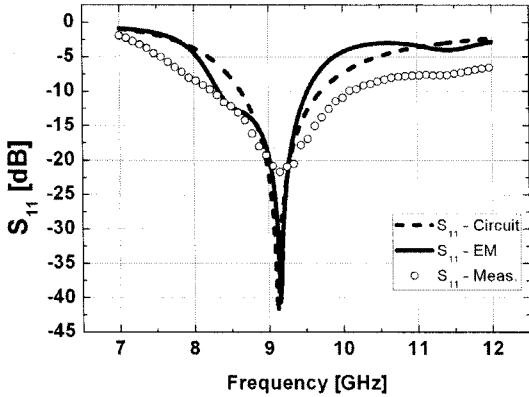


그림 9. Circuit/EM simulation 및 측정 반사계수
Fig. 9. Reflection coefficients based on circuit/EM simulation and measurement.

표 6. Circuit/Em simulation 및 측정 반사계수 특성
Table 6. S_{11} of circuit/EM simulation and measured.

	Circuit	EM	Meas.
대역폭	1,040 MHz	1,182 MHz	1,831 MHz
중심 주파수	9.12 GHz	9.15 GHz	9.17 GHz
비대역폭	11.4 %	12.9 %	19.97 %

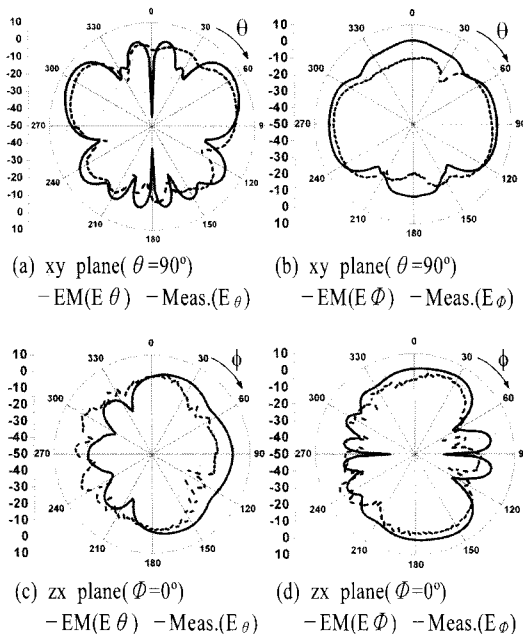


그림 10. 구현된 안테나의 방사 패턴
Fig. 10. The radiation patterns of fabricated antenna.

GHz, 9.17 GHz로 일치하는 것을 확인할 수 있다. Circuit/EM simulation의 대역폭은 1,040 MHz(11.4 %),

1,182 MHz(12.9 %)이며, 측정된 안테나의 대역폭은 1,831 MHz(19.97 %)이다. 접지면의 크기는 100×2.31 mm이다. 접지면의 크기가 60×2.31 mm로 작아질 때까지는 대역폭 및 이득 크게 영향을 미치지 못하였다.

그림 10은 EM simulation 및 측정으로 구한 방사 패턴이다. XY, ZX 평면에서 측정하였다. EM simulation을 통한 안테나 이득은 7.2 dBi이고, 효율은 84.7 %이며, 측정된 안테나 이득은 7.1 dBi이다. 그림 9에서 보듯이 EM simulation과 측정된 방사 패턴은 유사한 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 광대역 특성을 갖는 mushroom 형태의 단일 셀 ENG 영차 공진 안테나를 설계 및 제작, 측정하였다.

높이 변화에 따른 안테나의 대역폭 특성을 분석하였다. 그 결과 기판의 높이가 높아짐에 따라 정합 주파수 f_1 는 낮아지고 G_0 는 커지며 대역폭은 넓어짐을 확인하였다.

제작 안테나의 크기는 7.65×1.31×2.37 mm(or 0.306 × 0.053×0.095 λ_0)이다. 측정 결과 대역폭은 1,831 MHz (19.97 %)이고, 안테나 이득은 7.1 dBi이다.

참 고 문 헌

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

[2] Sung-joon Lim, C. Caloz, and T. Itoh, "Metamaterial-based electronically controlled transmission-line structure as a novel leaky-wave antenna with tunable radiation angle and beamwidth", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 161-173, 2005.

[3] C. A. Allen, K. M. K. H. Leong, and T. Itoh, "Design of a balanced 2D composite right-/left-handed transmission line type continuous scanning leaky-wave antenna", *IET Antennas & Propagation*, vol. 1, no. 3, pp. 746-750, 2007.

- [4] Changho Choi, Bomson Lee, "Investigation of radiation effects for 1-D left-handed transmission lines", *Proc. Int. Symp. on AP-S*, pp. 1-4, Jul. 2008.
- [5] R. E. Collin, *Foundation for Microwave Engineer-*

ing, New York: McGraw-Hill, 1992.

- [6] Tack-Gyu Kim, Bomson Lee, "Metamaterial-based compact zeroth-order resonant antenna", *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 1, pp. 12-13, 2009.

장 우 철



2009년 8월: 경희대학교 전파통신
공학과 (공학사)
[주 관심분야] Small Antenna, Meta-
material Transmission Line, Micro-
wave Passive Devices 등

이 범 선



1982년 2월: 서울대학교 전기공학
과 (공학사)
1991년 8월: 미국 네브래스카 주립
대 전자공학과 (공학석사)
1995년 5월: 미국 네브래스카 주립
대 전자공학과 (공학박사)
1995년 9월~현재: 경희대학교 전자

전파공학과 교수

2008년 1월~현재: 한국전자과학회 마이크로파 및 전파연
구회 위원장

[주 관심분야] Microwave Antenna, Metamaterial, RF Identifi-
cation(RFID) Tags, Microwave Passive Devices 등