

# ENG 영차 공진을 이용하여 대역폭이 개선되고 지향성 방사 패턴을 갖는 하이브리드 안테나

## Broadband Hybrid Antenna with Directional Radiation Pattern Utilizing Epsilon Negative Zeroth-Order Resonance

김 인 호 · 이 정 해

In-Ho Kim · Jeong-Hae Lee

### 요 약

본 논문에서는 epsilon negative(ENG) 영차 공진과  $TM_{010}$ -모드를 결합하여 넓은 대역폭을 갖고, 지향성 방사 패턴을 갖는 하이브리드 안테나를 제안한다. ENG 영차 공진을 얻기 위해 버섯 구조를 이용하였고,  $TM_{010}$  모드를 얻기 위해 패치 안테나를 이용하였다. 이 두 개의 안테나 사이에 갭을 주어 하나의 동축 선로 급전 구조로 두 개의 안테나를 결합하였다. ENG ZOR 주파수는 4 GHz,  $TM_{010}$ 의 주파수는 3.9 GHz로 설계하였다. 두 주파수가 근접해 있기 때문에 이중 공진을 형성할 수 있고, 따라서 대역폭을 확장시킬 수가 있다. ENG ZOR 안테나는 전방향성의 방사 패턴을 갖지만, ENG ZOR 주파수와  $TM_{010}$ 의 주파수가 매우 근접해 있기 때문에 전방향성의 방사 패턴의 널 부분을  $TM_{010}$  모드 방사가 보상해줄 수 있어 제안된 안테나는 지향성 방사 패턴을 갖는다. 제안된 안테나는 버섯 구조의 단위 셀을 각각 4개, 3개, 2개로 줄여나가면서 3가지 종류로 설계하여 특성을 분석하였다. 각각의 제안된 안테나는 비대역폭 4.29~4.95 %, 이득 3.16~5.57 dBi, 효율 62.4~94.2 %의 특성을 가지고 있다.

### Abstract

In this paper, the hybrid antenna utilizing epsilon negative zeroth-order resonance(ENG ZOR) and  $TM_{010}$ -mode is presented. The antenna has a directional radiation pattern and improved bandwidth. To obtain a ENG ZOR and  $TM_{010}$ -mode, the hybrid antenna employs the mushroom structure and the microstrip patch, respectively. Two antennas of the mushroom and the patch are coupled by gap and fed by one coaxial feed. The frequencies of ENG ZOR and of  $TM_{010}$  resonance are designed to be 4 GHz and 3.9 GHz, respectively. Because two resonant frequencies are set to be close, the dual-resonance can be formed, resulting in the broader bandwidth. Even though the radiation pattern of an ENG ZOR antenna is omnidirectional, the directional radiation of a microstrip patch antenna compensates the null of omnidirectional pattern of an ENG ZOR antenna. Thus, the hybrid antenna has a directional radiation pattern. The antennas having 4, 3, and 2 unit cells of mushroom structure are designed and analyzed. The antennas have fractional bandwidths of 4.29~4.95 %, gains of 3.16~5.57 dBi, and radiation efficiencies of 62.4~94.2 %.

Key words : Hybrid Antenna, Epsilon Negative Zeroth-Order Resonance(ENG ZOR),  $TM_{010}$ -Mode, Directional Radiation Pattern

## I. 서 론

최근의 안테나 설계 기술은 소형화와 동시에 넓은 대역폭을 요구하고 있다. 마이크로스트립 패치

「본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단을 통한 중견연구자지원사업으로 수행된 연구임(No. 2010-0013273).」  
홍익대학교 전자전기공학부(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

· 논문 번호 : 20100604-06S  
· 교신저자 : 이정해(e-mail : jeonglee@hongik.ac.kr)  
· 수정완료일자 : 2010년 8월 23일

안테나는 비용이 저렴하고, 제작이 용이하며, 소형화할 수 있기 때문에 많이 이용되고 있다. 하지만, 마이크로스트립 패치 안테나는 좁은 대역폭을 갖는 단점이 있다. 따라서, 마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭을 확장시키기 위해 현재 많은 연구들이 수행되어지고 있다<sup>[1]~[4]</sup>.

마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭은 기판의 두께와 투자율에 비례하며, 유전율에 반비례함을 알 수 있다<sup>[5]</sup>. 따라서 현재까지 마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭을 넓히기 위해 기판의 두께와 투자율을 높이고, 유전율을 낮추는 방법이 많이 이용되고 있다<sup>[1]</sup>.

마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭을 넓히는 또 다른 방법으로 이중 공진을 이용하는 방법이 있다. 이중 공진을 이용하여 대역폭을 넓힌 몇 가지 예를 보면, 마이크로스트립 패치 안테나의 TM<sub>010</sub> 공진과 모노폴 안테나의 공진을 이용한 안테나가 보고되었다<sup>[2]</sup>. 또한, 마이크로스트립 패치 안테나의 TM<sub>010</sub> 공진과 인위적으로 캐패시턴스와 인덕터를 삽입하여 이중 공진을 형성하는 안테나도 보고된 바 있다<sup>[3]</sup>. 마지막으로, 모노폴 안테나의 공진과 epsilon negative zeroth resonance(ENG ZOR)을 결합한 전방향성 안테나가 보고되었다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서는 현재까지 보고되지 않은 마이크로스트립 패치 안테나의 TM<sub>010</sub> 공진과 ENG ZOR을 이용하여 대역폭을 확장하는 동시에 지향성의 방사 패턴을 갖는 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나에서 ENG ZOR은 버섯 구조를 이용하였으며, 단위 셀은 각각 4개, 3개, 2개를 갖는 3종류 안테나를 설계 및 제작하였다. 이들 안테나의 대역폭, 이득, 방사효율 등을 측정하고 비교 분석하였다.

## II. ENG 영차 공진 안테나

ENG 영차 공진은 유전율이 0이 되는 특정 주파수에서 무한 파장을 갖는 특징이 있다<sup>[6]</sup>. 그림 1은 ENG 전송 선로의 등가회로를 보여준다. 그림 1의 등가회로를 갖는 ENG 전송 선로는 인위적인 병렬 인덕턴스가 삽입됨으로써 구현이 가능하다. 병렬 인덕턴스를 형성하는 대표적인 방법은 그라운드와 패치 사이에 via를 삽입하는 것이다. 이러한 구조를 버섯 구조

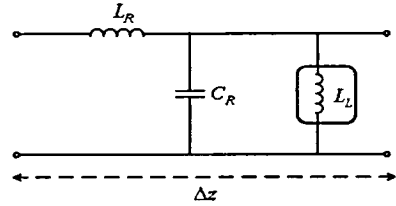


그림 1. ENG ZOR 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of ENG ZOR.

라 명명하기도 한다.

ENG ZOR의 유효 유전율과 유효 투자율은 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다<sup>[7]</sup>.

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

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

전송 선로의 전파 상수에 임피던스와 어드미턴스를 대입하게 되면 식 (1), (2)와 같이 유효 유전율과 유효 투자율을 구할 수 있다. 버섯 구조와 같은 경우 via의 크기에 따라 C<sub>R</sub>과 L<sub>L</sub>의 값이 변하기 때문에 유효 유전율이 음이 될 수 있는 특징이 있다. 영차 공진 주파수는 open-ended 경계 조건과 공진기의 입력 임피던스를 도입하면 식 (3)과 같은 영차 공진 주파수를 얻어낼 수 있다<sup>[7]</sup>.

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

위의 영차 공진을 이용한 안테나들은 공진 주파수에서 무한 파장 특성을 갖기 때문에 접지면에 대해 모든 전계가 수직으로 형성된다. 따라서 영차 공진을 이용한 안테나는 수평 자계 루프 전류를 형성하게 되어 전방향성 방사 패턴을 가진다<sup>[8]</sup>.

## III. 하이브리드 안테나 설계

제안된 안테나는 그림 2와 같이 버섯 구조의 ENG ZOR 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나를 결합한 구조이다.

여기서 N은 via의 개수 즉 ENG ZOR 안테나의 단위 셀 수를 의미한다. 메타 물질 개념으로부터 제안된 안테나인 ENG ZOR 안테나와 마이크로스트립 패치

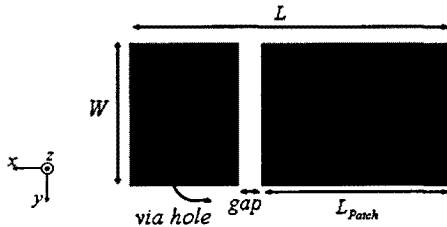


그림 2. 하이브리드 안테나 구조  
Fig. 2. Structure of the hybrid antenna.

안테나를 결합했기 때문에 본 논문에서는 제안된 안테나를 하이브리드 안테나라 명명하겠다. 그림 2에서 보는 바와 같이 ENG ZOR 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나 사이에 gap을 주어 결합한 구조이다. 하이브리드 안테나는 ENG ZOR 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나와의 결합으로 사이즈가 커지는 단점이 있다. 이러한 단점을 최소화하기 위해 하이브리드 안테나를 그림 2와 같이 버섯 구조의 단위 셀을 각각 4개, 3개, 2개로 줄여나가면서 3가지 종류로 설계하였다. 사용된 기판은 사용된 기판은 유전율이 2.2인 RT/Duroid 5880이고, 높이는 1.58 mm이다. 하이브리드 안테나의 급전은 마이크로스트립 패치 안테나 부분에 동축 선로를 사용하였다.

하이브리드 안테나의 매칭은 ENG ZOR 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나 사이에 gap을 두는 방법과 그림 2에서 나타낸 급전 위치를 조절하는 방법으로 하였다. 먼저 gap에 따른 매칭 방법을 살펴보면 그림 3과 같이 ENG ZOR 안테나는 단위 셀 개수가 줄어들수록 안테나의 임피던스가 커지는 경향이 있다.

안테나의 임피던스가 커질수록 캐패시턴스 값을 줄임으로써 임피던스를 낮출 수가 있다. 따라서 단위 셀에 따른 ENG 영차 공진 안테나의 임피던스 변화에 따라 gap을 조절하여 하이브리드 안테나를 매칭시켰다. 즉, 단위 셀이 줄어들수록 gap을 넓힘으로써 캐패시턴스 값을 줄여야 된다. 표 1에서 보는 바와 같이 4개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나와 2개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 gap은 1 mm의 차이가 난다.

두 번째 방법으로 급전 위치를 조절하면 안테나의 임피던스 또한 조절할 수 있다. Gap에 따른 매칭 방법에 의하면 4개의 단위 셀보다 3개의 단위 셀 하이브

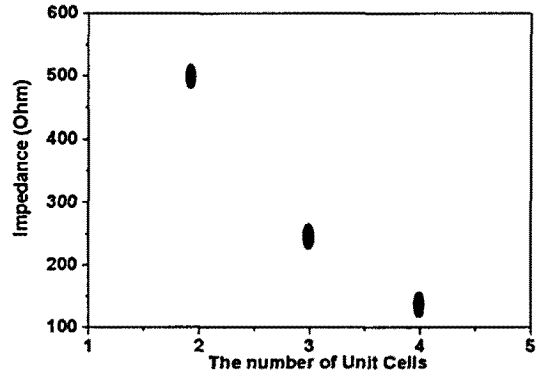


그림 3. 단위 셀에 따른 ENG ZOR 안테나의 임피던스  
Fig. 3. The impedance of ENG ZOR antenna versus unit cells.

표 1. 단위 셀에 따른 하이브리드 안테나의 수치  
Table 1. The size of the hybrid antenna versus unit cells.

	$L$ (mm)	$W$ (mm)	$L_{patch}$ (mm)	Via hole (mm)	Gap (mm)
2 unit cells	34.7	22	24	0.6	4
3 unit cells	37.4	22	24	0.6	3
4 unit cells	41.1	22	24	0.6	3

리드 안테나의 임피던스가 더 높기 때문에 3개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 gap이 더 넓어야 한다. 하지만 표 1에서 보면, 4개의 단위 셀과 3개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 gap은 3 mm로 같다. 이는 3개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 gap을 4개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 gap과 동일하게 유지하면서 급전 위치 조절만으로도 매칭이 가능하기 때문이다. 2개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나는 gap과 급전 위치를 동시에 조절하여 매칭하였다.

표 1은 각각 4개, 3개, 2개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 수치를 나타낸다.

#### IV. 시뮬레이션 및 측정 결과

하이브리드 안테나를 제작하여 10 dB 대역폭과 방사 패턴을 측정하였다. 그림 4는 4개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭을 시뮬레이션한 결과이다. ENG 영차 공진 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나의 공

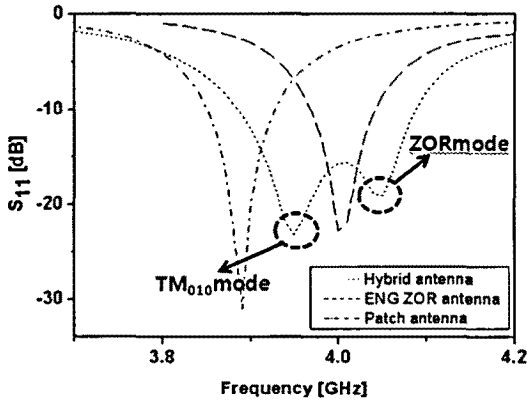


그림 4. 하이브리드 안테나와 패치 안테나의 대역폭 비교

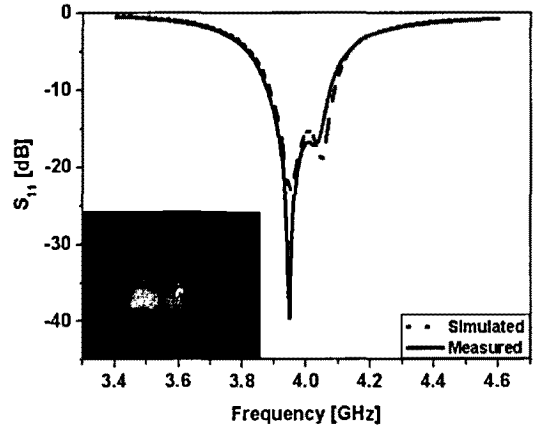
Fig. 4. Comparison of the bandwidth of hybrid antenna and patch antenna.

진 주파수는 각각 4 GHz, 3.9 GHz로 설계되었다. 그림 4에서 보는 바와 같이 마이크로스트립 패치 안테나의 10 dB 대역폭은 80 MHz로 2.06 %이고, 4개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 10 dB 대역폭은 200 MHz로 5.01 %이다.

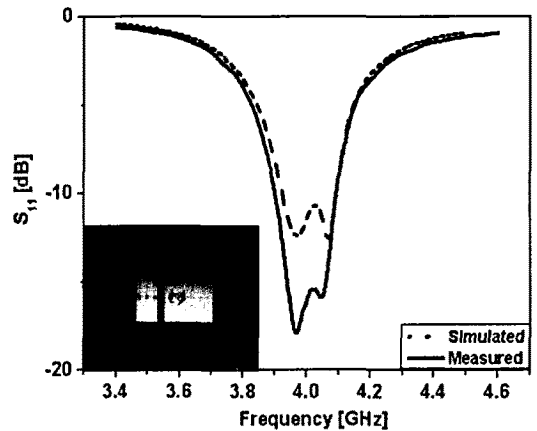
이는 마이크로스트립 패치 안테나보다 약 2.5배 더 넓은 대역폭을 갖는다. 하지만 하이브리드 안테나는 ENG ZOR 안테나와 마이크로스트립 패치 안테나가 결합된 형태이기 때문에 사이즈가  $0.29 \lambda_0 \times 0.55 \lambda_0$ (너비×길이)로  $0.29 \lambda_0 \times 0.31 \lambda_0$ (너비×길이)의 크기를 갖는 마이크로스트립 패치 안테나보다 크다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 ENG 영차 공진 안테나를 구성하는 버섯 구조의 단위 셀을 4개, 3개, 2개로 줄여가며 사이즈를 최소화 시키면서 하이브리드 안테나의 특성을 확인하였다. 단위 셀을 줄여도 대역폭 확장과 지향성 방사 패턴을 가짐을 시뮬레이션으로 확인하였다. 그림 5은 제작한 하이브리드 안테나의 측정된 대역폭이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 시뮬레이션과 측정이 매우 유사함을 알 수 있다. 단위 셀 4개, 3개, 2개를 갖는 각각의 하이브리드 안테나의 대역폭은 표 2와 같다.

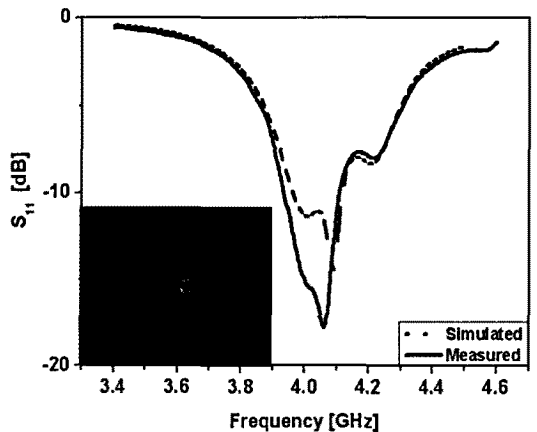
표 2에서 보는 바와 같이 대역폭은 시뮬레이션 값과 측정 값이 매우 유사하다. 단위 셀이 많을수록 대역폭이 증가한다. 즉, 단위 셀이 줄어들수록 대역폭이 감소됨을 볼 수 있다. 하지만 이중 공진을 형성하기 때문에 마이크로스트립 패치 안테나보다 대역폭



(a) 4 단위 셀 하이브리드 안테나의 반사 손실  
(a) The return loss of 4 unit cells hybrid antenna



(b) 3 단위 셀 하이브리드 안테나의 반사 손실  
(b) The return loss of 3 unit cells hybrid antenna



(c) 2 단위 셀 하이브리드 안테나의 반사 손실  
(c) The return loss of 2 unit cells hybrid antenna

그림 5. 하이브리드 안테나의 대역폭  
Fig. 5. The bandwidth of the hybrid antennas.

표 2. 단위 셀에 따른 하이브리드 안테나의 대역폭  
Table 2. The bandwidth of the hybrid antenna with unit cells.

	중심 주파수(GHz) (시뮬레이션/측정)	비대역폭(%) (시뮬레이션/측정)
2 unit cells	4.04/4.02	3.96/4.29
3 unit cells	4.005/3.996	4.25/4.78
4 unit cells	3.99/3.98	5.01/4.95

이 넓다. 대역폭이 가장 좁은 2개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나와 비교해도 마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭보다 약 2배 넓음을 확인할 수

있다.

중심 주파수는 단위 셀이 줄어들수록 높아짐을 알 수 있다. 이는 버섯 구조의 패치 부분이 작아짐에 따라 병렬 캐패시턴스 값이 작아져서이다.

그림 6은 x-z 평면과 y-z 평면에서의 하이브리드 안테나의 시뮬레이션 및 측정 방사 패턴을 나타낸다.

그림 6에서 보는 바와 같이 4개, 3개, 2개 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 방사 패턴은 x-z 평면, y-z 평면에서 시뮬레이션과 측정값이 매우 유사함을 알 수 있다. 또,  $TM_{010}$ 은 물론 ENG ZOR 주파수에서도 지향성 방사 패턴이 나타남을 확인할 수 있었다.

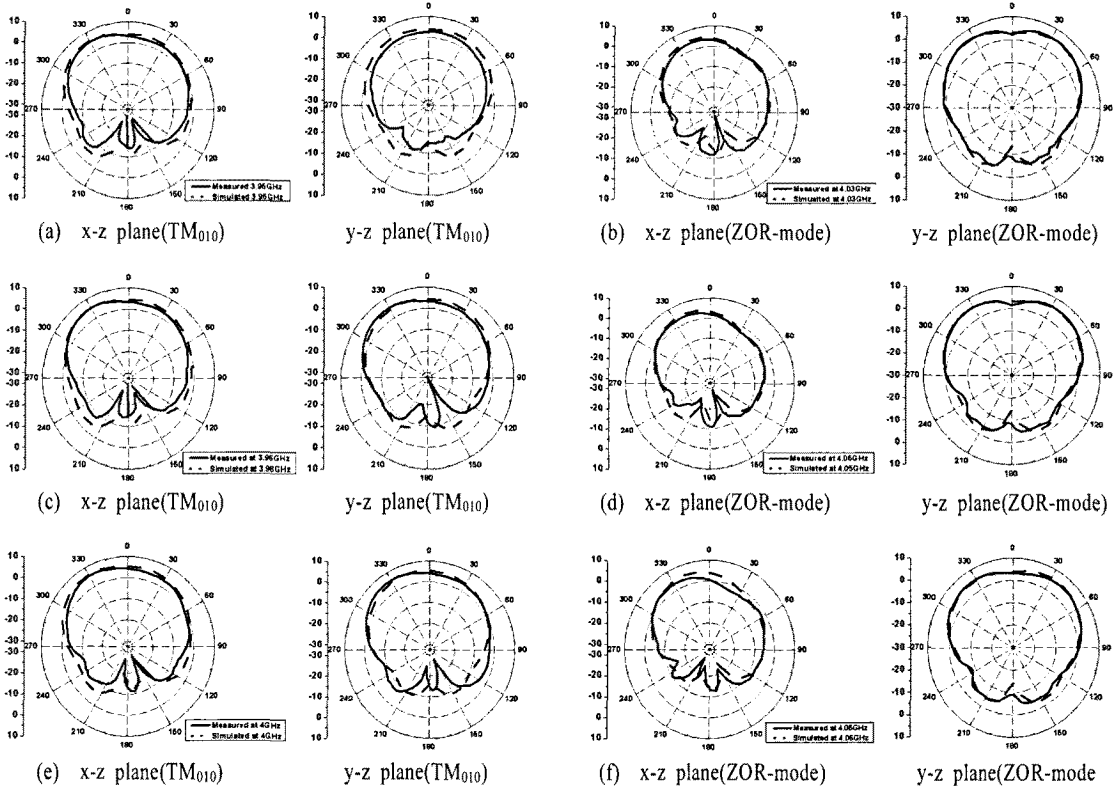


그림 6. (a)  $TM_{010}$ (3.95 GHz)에서 4단위 셀 하이브리드 안테나의 방사 패턴(dBi), (b) 영차 공진(4.03 GHz)에서 4단위 셀 하이브리드 안테나의 방사 패턴(dBi), (c)  $TM_{010}$ (3.96 GHz)에서 3단위 셀 하이브리드 안테나의 방사 패턴(dBi), (d) 영차 공진(4.05 GHz)에서 3단위 셀 하이브리드 안테나의 방사 패턴(dBi), (e)  $TM_{010}$ (4 GHz)에서 2단위 셀 하이브리드 안테나의 방사 패턴(dBi), (f) 영차 공진(3.95 GHz)에서 2단위 셀 하이브리드 안테나의 방사 패턴(dBi)

Fig. 6. (a) Radiation pattern of 4 unit cells hybrid antenna at  $TM_{010}$ (3.95 GHz)(dBi), (b) Radiation pattern of 4 unit cells hybrid antenna at ZOR(4.03 GHz)(dBi), (c) Radiation pattern of 3 unit cells hybrid antenna at  $TM_{010}$ (3.96 GHz)(dBi), (d) Radiation pattern of 3 unit cells hybrid antenna at ZOR(4.05 GHz)(dBi), (e) Radiation pattern of 2 unit cells hybrid antenna at  $TM_{010}$ (4 GHz)(dBi), (f) Radiation pattern of 2 unit cells hybrid antenna at ZOR (4.06 GHz)(dBi).

표 3. 측정된 하이브리드 안테나의 이득과 효율  
Table 3. The gain and efficiency of the measured hybrid antennas.

		이득[dBi] ( $TM_{010}/ZOR$ )	효율(%) ( $TM_{010}/ZOR$ )
2 unit cells	측정 (시뮬레이션)	5.57/3.16 (6.26/4.75)	89.7/67.1 (94.9/88.6)
3 unit cells	측정 (시뮬레이션)	5.34/3.3 (5.45/5.34)	94.2/62.4 (95.2/90.73)
4 unit cells	측정 (시뮬레이션)	5.07/3.69 (5.78/4.91)	90.5/62.4 (95.6/92)

ENG ZOR 안테나는 수평 단계 루프 전류를 형성하게 되어 전방향성 방사 패턴을 가진다<sup>[8]</sup>. 또한, ENG ZOR 안테나의 대역폭은 매우 좁다. 하지만 상대적으로 마이크로스트립 패치 안테나의 대역폭은 넓다. 따라서 패치 안테나의 공진 주파수에서는 패치 안테나만 동작을 하게 되는 반면에, 좁은 대역폭을 갖는 ENG ZOR 안테나는 동작하지 않는다. 하지만 ENG ZOR 주파수에서는 ENG ZOR 안테나와 패치 안테나가 동시에 작동하게 된다. 이는 안테나 패치 안테나의 공진 주파수가 ENG ZOR 주파수에 매우 근접해 있기 때문에 ENG ZOR 주파수에서 패치 안테나의  $TM_{010}$ 과 동일한 전계 분포가 유지된다. 따라서 지향성의 방사 패턴을 갖는 마이크로스트립 패치 안테나에서 ENG ZOR 안테나의 전방향성 방사 패턴의 널 부분을 보상해 주기 때문에 하이브리드 안테나는 지향성의 방사 패턴을 갖게 된다. 3종류의 하이브리드 안테나의 측정된 이득과 효율은 표 3과 같다. 측정된 효율은 Wheeler Cap 방법을 사용하였다<sup>[9]</sup>.

표 3을 살펴보면 시뮬레이션 이득과 효율은 각각 4.75~6.26 dBi, 88.6~95.6 %로 나타난다. 하지만 측정된 이득과 효율은 각각 3.16~5.57 dBi, 62.4~94.2 %로 측정되었다. 이득의 오차는 측정시 케이블 손실에 따른 결과라 사료된다. 효율은 ENG ZOR에서 시뮬레이션과 측정값이 상당한 오차를 보인다. Wheeler Cap 방법은 단일 공진에서 정확성이 높으나, 다중 공진에서의 효율을 측정할 때 정확성이 떨어짐에 따라 오차가 발생한 것이라 사료된다.

## V. 결 론

본 논문에서는 ENG 영차 공진과 마이크로스트립

패치 안테나의  $TM_{010}$  공진을 결합한 하이브리드 안테나를 제안하였다. ENG ZOR을 얻기 위해 버섯 구조를 이용하였다. 또, 갭을 주어 마이크로스트립 안테나와 결합하였다. 하이브리드 안테나의 매칭은 갭과 급전 위치를 조절하며 매칭시켰다. 4개, 3개, 2개의 단위 셀을 갖는 하이브리드 안테나의 측정된 대역폭은 각각 4.95 %, 4.78 %, 4.29 %로 2.06 %의 대역폭을 갖는 마이크로스트립 패치 안테나보다 모두 2배 이상 확장되었다. ENG ZOR 주파수와 마이크로스트립 패치 안테나의  $TM_{010}$  공진 주파수가 매우 근접해 있기 때문에 ENG 영차 공진 안테나의 전방향성 방사 패턴의 널 부분을 마이크로스트립 패치 안테나의 지향성 방사 패턴이 보상해 주기 때문에 제안된 하이브리드 안테나는 지향성 방사 패턴을 갖는다.

## 참 고 문 헌

- [1] Kin-Lu Wong, Chia-Luan Tang, and Jyh-Ying Chiou, "Broad-band probe-fed patch antenna with a W-shaped ground plane", *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 6, Jun. 2002.
- [2] Reza Zaker, Changiz Ghobadi, and Javad Nourinia, "Bandwidth enhancement of novel compact single and dual band-notched printed monopole antenna with a pair of L-shaped slots", *IEEE Transactions and Antennas and Propagation*, vol. 57, no. 12, Dec. 2009.
- [3] N. Fayyaz, S. Safvi-Naeini, "Bandwidth enhancement of a rectangular patch antenna by integrated reactive loading", *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1998.
- [4] Marco A. Antoniadis, George V. Eleftheriades, "A broadband dual-mode monopole antenna using NRI-TL metamaterial loading", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, 2009.
- [5] R. C. Hansen, Mary Burke, "Antennas with magneto-dielectrics", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 26, no. 2, Jul. 2000.
- [6] J. H. Park, Y. H. Ryu, J. G. Lee, and J. H. Lee, "Epsilon negative zeroth-order resonator antenna",

*IEEE Transaction on Antennas and Propagation*,  
vol. 55, no. 12, pp. 3710-3712, 2007.

- [7] 박병철, 이정해, "영차 공진을 이용한 전방향성 원형 편파 안테나", 한국전자과학회논문지, 20(8), pp. 806-812, 2009년 8월.
- [8] 고승태, 박병철, 박재현, 이정해, "확장된 대역폭

을 갖는 소형 epsilon negative ZOR 안테나", 한국 전자과학회논문지, 19(8), pp. 920-926, 2008년 8월.

- [9] 조치현, 추호성, 박익모, 강진섭, "개선된 Wheeler cap 방식을 이용한 안테나 효율 측정", 한국전자과학회논문지, 17(4), pp. 317-323, 2006년 4월.

### 김 인 호



2009년 2월: 홍익대학교 전자전기 공학부 (공학사)  
 2009년 3월~현재: 홍익대학교 전자정보통신공학과 석사과정  
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 회로 설계, Metamaterial 안테나

### 이 정 해



1985년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
 1988년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
 1996년 3월: UCLA 전기공학과 (공학박사)  
 1993년 3월~1996년 2월: General Atomics 교환연구원  
 1996년 3월~1996년 8월: UCLA 전기공학과 Postdoctor  
 1996년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학부 교수  
 [주 관심분야] 마이크로파 및 밀리미터파 소자, 안테나, Metamaterial RF 소자