

메타물질 구조를 이용한 전기적 소형 안테나의 설계

이 홍 민*

Design of an Electrically Small Antenna Using Metamaterial Structure

Hong-Min Lee*

요 약

본 논문에서는 전기적 소형 모노폴 형태의 안테나가 제시되었다. 크기가 매우 짧은 ($l \approx \lambda_g/15$) 모노폴은 용량성 소자로 동작하며, 접지면 위에 놓여진 개방형 슬롯구조는 유도성 소자로 동작하므로, 이 둘 두 소자를 결합시킨 구조는 LC 공진기를 형성하게 된다. 안테나에 대한 등가회로 모델은 안테나의 해석 및 설계의 정확성을 파악하기 위하여 사용되었다. 제안된 안테나는 매우 작은 전기적인 크기를 갖고 있으나 양호한 성능을 나타내고 있다. 측정된 안테나의 최대 이득과 효율은 주파수 2.1 GHz에서 각각 3.6 dBi 및 77.8 %를 나타내었다.

ABSTRACT

In this paper, a novel electrically small monopole type resonant antenna is proposed. The very short length monopole ($l \approx \lambda_g/15$) acts as a capacitive element and the slot on the ground structure acts as an inductive element, hence the combined system with these two elements thus form an LC resonator. The equivalent circuit model of the antenna structure was used to analysis and qualify the design correctness. Although the proposed antenna has very small size, it shows good performances. The measured maximum gain and radiation efficiency of the fabricated antenna at the frequency of 2.1 GHz was 3.6 dBi and 77.8 %, respectively.

Keywords: Small antenna, Meta structure, Impedance matching, LC resonator, Fabricated antenna

1. 서 론

최근 급속도로 발전하는 무선 통신 시스템들은 직접회로 기술의 발달을 기반으로 점차 그 크기가 소형화되고 있으며, 이들 시스템에 장착하기 위한 소형 안테나가 요구되고 있다. 안테나를 소형화시

키면 기구적으로 크기가 작아지므로 사용상 편리한 여러 가지 장점이 있지만 안테나의 이득이 낮아진다.

전기적인 소형 안테나는 매우 작은 방사 저항을 갖으며 리액턴스 성분이 매우 크므로 임피던스 정합이 어려우며 소형화에 따른 안테나 효율과 대역

* 교신저자 경기대학교 전자공학과 (hmlee@kyonggi.ac.kr)

“이 연구는 2007학년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음”

접수일자: 2010년 1월 29일, 수정일자: 2010년 3월 15일, 심사완료일자: 2010년 3월 19일

폭이 좁다. 따라서 전기적인 소형 안테나를 정합시키기 위한 정합 회로망이 필요하게 된다. 전기적 소형 안테나에 대한 연구는 안테나의 소형화에 따른 효율 저하 및 협대역 특성에 대한 단점을 개선에 집중되어져 왔다. Richard W. Ziolkowski에 의하여 제안된 EESA (Efficient Electrically Small Antennas)는 SNG (Single Negative) 물질 또는 DNG (Double Negative) 물질과 같이 음의 굴절률 특성을 나타내는 메타 매질을 전기적 소형 안테나의 덮개 층으로 사용한 전기적 소형안테나이다[1]. 이러한 구조의 사용으로 기존의 전기적 소형 안테나보다 효율 및 이득 증가를 나타내었으며, Chu가 제시한 전기적 소형 안테나의 이론적 한계를 나타내는데 가장 밀접한 FBW (Fractional bandwidth)도 크게 개선됨을 제시되었다. 그러나 SNG와 DNG 메타물질 구조는 자연계 상에 존재하지 않는 물질이므로 인위적인 등가 구조를 적용하여 설계하여야 한다. 이러한 등가 메타 물질 구조를 기반으로 한 전기적 소형 안테나는 EZ 안테나가 가장 대표적인 형태이다. 이러한 EZ 안테나는 소형 루프 안테나에 음의 투자율을 갖는 SRR (Split Ring Resonator)를 이용한 구조로 되어 있다. 그러나 소형 루프 안테나의 경우 비교적 넓은 접지면 환경이 요구되며 메타물질 구현 구조를 위한 SRR에 의해 저자세화하기에 어려운 단점이 있다[2-4]. 따라서 본 논문에서는 모노폴 구조를 효과적으로 정합시켜 전기적 소형 안테나를 구현하고자한다

II. 전기적 소형 안테나

Wheeler에 의해서 정의되어진 전기적 소형화 안테나는 다음의 조건식을 만족하여야 한다[5].

$$ka < 1 \quad (1)$$

여기서 $k=2\pi/\lambda$, λ 는 자유 공간상의 파장이며 a 는 전기적 소형 안테나의 최대 크기를 둘러싼 구의 반경이다. 그러나 메타 물질 구조를 이용한 전기적 소형 안테나일 경우 전기적 소형 안테나에서 발생하는 자속 성분에 의해서 메타 물질 구조에 자체가 여기 되어 메타 물질 구조도 전기

적 소형 안테나로 동작하게 된다. 따라서 Wheeler에 의해서 정의된 전기적 소형 안테나는 메타 물질 구조까지 포함하여야 한다. 이러한 논리를 바탕으로 메타 물질 구조를 포함한 유효 반경(r_e)를 고려하여 메타 물질 구조를 이용한 전기적 소형 안테나는 다음과 같이 새롭게 정의되었다.

$$kr_e \leq 0.5 \quad (2)$$

전기적인 소형 안테나와 메타 물질 구조를 포함한 유효 반경 r_e 를 그림 1에 나타내었다.

일반적으로 길이가 l 인 전기적 소형 모노폴 안테나의 방사저항 $R_{r, monopole}$ 은 다음 식으로 나타내어진다.

$$R_{r, monopole} = 10\pi^2 (l/\lambda)^2 \quad (3)$$

전기적으로 소형화된 안테나는 그 크기를 소형화 할수록 안테나의 방사 저항이 급격히 감소하고 리액턴스 성분이 증가하게 된다. 전기적 소형 안테나의 크기 감소에 따른 리액턴스 성분의 증가로 인하여 방사되는 에너지보다 안테나 주변에 저장되는 에너지가 커져 안테나의 Q가 높아지며 이로 인하여 대역폭이 감소하게 된다. 기존의 Chu 등이 제시한 소형 안테나의 이론적 한계에 따르면 소형 안테나의 Q는 주어진 물리적 공간을 얼마나 효율적으로 사용하였는가에 따라 결정되며, 성능이 우수한 소형 안테나의 설계를 위해서는 Q를 낮추어 안테나의 대역폭과 방사효율 등의 성능을 좋게 하여야 한다[6].

메타 물질이 갖는 특수한 전자기적 성질을 바탕으로 전기적 소형화 안테나의 개념도를 그림 2에 나타내었다. 일반적인 양의 유전율과 양의 투자율 값을 갖는 자유 공간 상에서 안테나의 크기를 소형화 할수록 커패시턴스 성분이 높게 나타난다.

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_{eff}C_{eff}} \quad (4)$$

따라서 전기적 소형 안테나는 등가적으로 커패시턴스 (C_{eff})로 나타낼 수 있다. 전기적인 소형

안테나에서 야기된 자속 성분에 의해서 메타 물질 구조도 전기적인 소형 안테나로서 동작한다. 전기적 소형 안테나의 커패시턴스 성분 (C_{eff})과 음의 유전율에 기인한 메타 물질의 인덕턴스 성분 (L_{eff})은 등가적인 LC 공진 회로를 이루어 공진 구조를 형성하며, 이 경우에 전기적 소형 안테나의 공진 각주파수 ω_0 는 근사적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_0 = 1/\sqrt{L_{eff}C_{eff}} \quad (4)$$

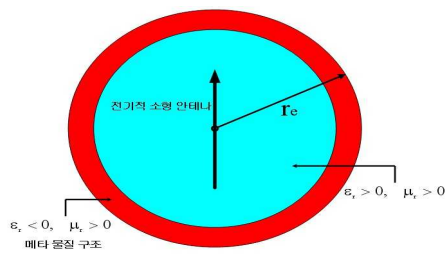


그림 1. 전기적 소형 안테나와 메타 물질 구조를 포함한 유효반경 r_e
 Fig. 1. The electrically small antenna and effective radius r_e enclosing metamaterial structure

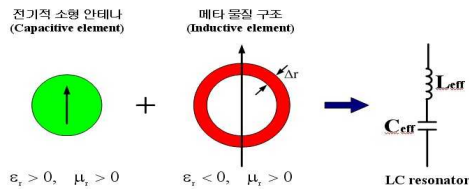


그림 2. 메타 물질 구조 기반 전기적 소형 안테나의 개념도
 Fig. 2. The schematic diagram of electrically small antenna based metamaterial structure

메타 물질 구조 기반 전기적 소형 안테나의 개념도를 바탕으로 본 연구에서는 소형화된 모노폴 안테나가 나타내는 커패시턴스 성분을 음의 유전율에 기인한 인덕턴스 성분을 갖는 메타 물질 구조와 결합시켜 LC 공진 구조를 형성하였다.

III. 안테나 설계

그림 3에 제안된 안테나의 구조를 나타내었다. 제안된 안테나는 FR-4 ($\epsilon_r = 4.4$, 두께 = 0.8 mm) 기판을 사용하여 메타 물질 구조, 모노폴 안테나, 급전 패드, 접지 면으로 구성되어졌으며 급전 패드는 동축 프로브에 연결하였다. 안테나의 설계 중심 주파수는 2.035 GHz이며, 크기가 매우 짧은 ($l \approx \lambda_g/15$) 모노폴은 용량성 소자로 동작 하며, 접지 면에 놓여진 $16\text{mm} \times 6\text{mm}$ 크기를 갖는 개방형 슬롯구조는 유도성 소자로 동작하므로, 이들 두 소자를 길이 7mm의 마이크로스트립 선로를 사용하여 결합시킴으로서 LC 공진기를 형성하게 된다. 제안된 안테나의 특성을 해석하기 위하여 제안된 구조에 대한 등가회로 모델을 그림 4에 나타내었다.

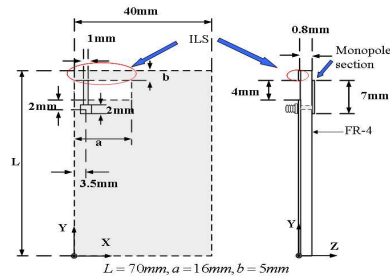
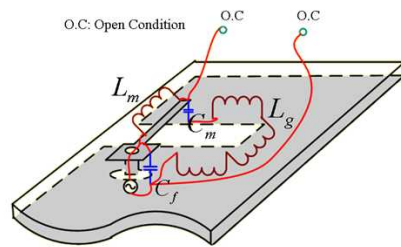


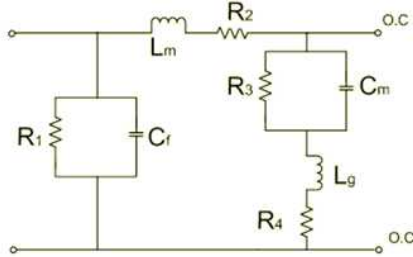
그림 3. 제안된 안테나의 구조
 Fig. 3 The geometry of proposed antenna



(a) 안테나 개념도
 (a) geometry of antenna

C_f 는 동축 급전선로와 소형 수직 모노폴 프로브의 정전용량이며, L_m 은 소형 모노폴과 연결되

어진 수평부 마이크로스트립 선로의 인덕턴스 성분이다. C_m 은 스트립 선로와 접지면 사이의 정전 용량이며, L_g 는 개방 슬롯 구조의 주변을 따라 흐르는 전류 성분에 의하여 증가적으로 발생되어진 인덕턴스 성분을 나타낸다. 이들 증가소자에 대한 값을 표1에 나타내었다.



(b) 등가 회로 모델
(b) equivalent circuit model

그림 4. 제안된 안테나의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of the proposed antenna

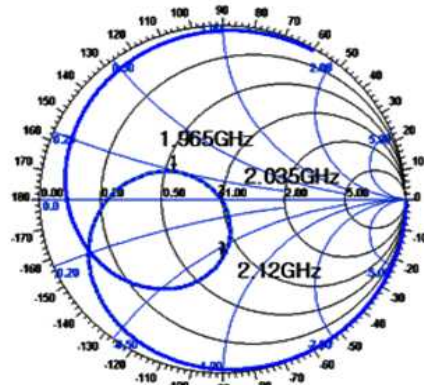
그림 5(a)는 그림 4의 등가회로를 사용하여 circuit simulation에 의한 안테나의 입력임피던스 궤적이다. 그림 5(b)는 그림 3의 안테나 구조를 CST사의 3-D field simulator[7] 를 사용하여 모의 실험한 안테나의 입력임피던스 궤적을 나타내었다.

표 1 등가회로 소자 값
Table 1. Calculated values of circuit elements

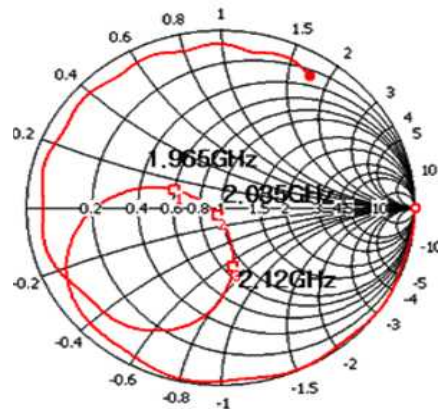
| Capacitance (pF) | | Inductance (nH) | |
|-------------------------|--------|-----------------|-------|
| C_f | 1.3 | L_m | 4 |
| C_m | 0.15 | L_g | 36 |
| Resistance (Ω) | | | |
| R_1 | 40.7 K | R_2 | 0.637 |
| R_3 | 81 K | R_4 | 0.779 |

이들 모의실험 결과를 비교하면 그림 4에 제시된 등가회로 모델의 타당성을 확인할 수 있으며 접지 면에 개방형 슬롯 구조가 유도성 리액턴스를 나타내게 함으로서 전기적 소형 모노폴 안테나가

잘 정합되어지고 있음을 보여주고 있다.



(a) 등가회로 모의실험
(a) circuit simulation



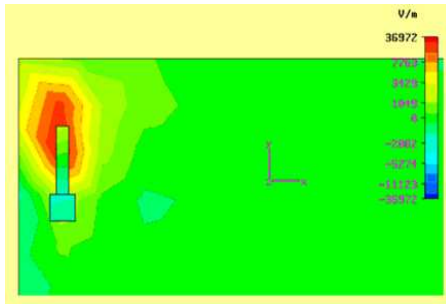
(b) 3차원 구조 모의실험
(b) 3-D field simulation

그림 5 제안된 안테나의 입력임피던스 궤적

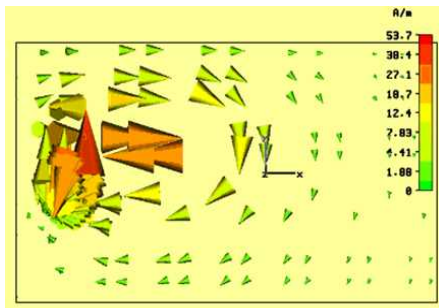
Fig. 5 The loci of input impedances of the proposed antenna

안테나의 공진 주파수는 2.035 GHz이며 170 MHz의 임피던스 대역폭($SWR \leq 2$)을 나타내고 있다. 그림 6에 제안된 안테나의 전계의 법선 성분 및 표면 전류 밀도를 나타내었다. 전계의 법선 성분을 보면 전기적 소형 안테나와 연결되어진 마이크로스트립 선로의 끝단과 접지면 사이에는 매우 높은 커패시턴스 성분이 나타나고 있음을 볼 수

있다. 또한 제안된 안테나의 전류 밀도를 살펴보면 전류는 접지 면에 형성되어진 개방형 슬롯 구조의 주변을 통하여 흐르고 있으며 이로 인하여 등가적으로 인덕턴스 성분이 나타나게 된다. 제안된 안테나는 소형 모노폴 구조가 나타내는 용량성 리액턴스 성분을 개방형 슬롯 구조가 갖는 유도성 리액턴스 성분과 결합되어져 임피던스 정합이 이루어지며 개방 슬롯의 방사 개구 구조를 통하여 공간적으로 전자파 에너지를 방사하고 있다.



(a) 전계 분포



(b) 표면전류

그림 6 전계분포 및 표면 전류밀도
Fig. 6 Field and surface current distribution

IV. 실험 결과

그림 7에 0.8 mm 높이를 갖는 FR-4 ($\epsilon_r=4.4$) 기판을 이용하여 제작된 제안된 안테나의 사진을 나타내었다. 안테나의 반사 손실을 나타내었다. 접지면의 크기는 $40\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 이며 안테나의

크기는 전체 접지면의 15 %를 차지하고 있다. 그림 8에 제작된 안테나의 반사손실을 나타내었다. 제작된 안테나의 공진주파수는 2.04 GHz로 나타났으며, 임피던스 대역폭 ($VSWR \leq 2$)은 174 MHz로서 모의실험 결과와 비교하면 매우 양호한 결과를 나타내었다.

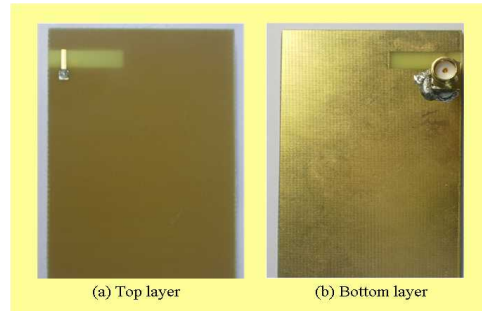


그림 7 제작된 안테나 사진
Fig. 7 Photo of the fabricated antenna

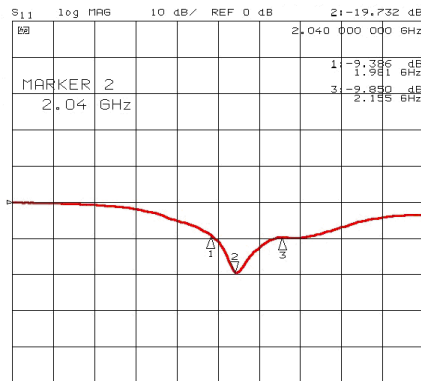


그림 8 제작된 안테나의 반사손실(S_{11})
Fig. 8 Measured return loss of the fabricated antenna(S_{11})

제작된 안테나의 방사패턴 측정 결과를 그림 9에 나타내었다. 안테나의 크기가 작으므로 측정되어진 방사패턴은 거의 등방성의 방사패턴을 나타내고 있었으며 안테나의 최대이득은 2.1 GHz에서 3.6 dBi를 나타내었다. 제작된 안테나의 이득과 방사 효율을 표2에 요약하였다. 측정된 안테나의 최대효율은 77.8 %로 나타났으며 평균적으로 74

% 정도를 나타내고 있으므로, 안테나의 정합이 잘 이루어지고 있음을 보여준다.

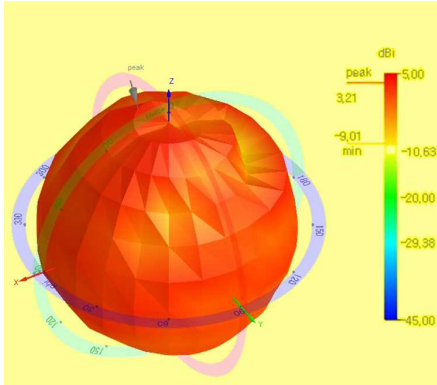


그림 9 측정된 삼차원 방사패턴
Fig. 9 Measured three-dimensional radiation pattern

표 2 안테나 이득 및 효율
Table 2. Measured efficiency and maximum gain of the antenna

| Frequency (MHz) | Maximum gain (dBi) | Efficiency (%) |
|-----------------|--------------------|----------------|
| 2000 | 2.99 | 72.4 |
| 2040 | 2.99 | 73.6 |
| 2100 | 3.60 | 77.8 |
| 2200 | 2.49 | 64.9 |

V. 결론

전기적 소형 모노폴 안테나는 용량성 리액턴스를 나타내므로 그 자체만으로는 공간에 에너지를 방사할 수 없다. 이러한 안테나를 음의 유전율 특성을 나타내는 등가 인덕티브 구조를 결합시키어 안테나를 정합시키어 줌으로서 공간에 에너지를 방사시킬 수 있다. 연구에서는 소형 모노폴 프로브 구조의 안테나에 접지면에 구성되어진 개방 슬롯 구조를 결합시키어 안테나를 정합함으로써 효과적으로 에너지를 방사시킬 수 있는 전기적 소형안테나를 제안하였다.

제안된 안테나는 $40\text{ mm} \times 70\text{ mm}$ 크기의 접지면

을 갖으며 안테나 방사소자의 크기는 $16\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ ($0.1\lambda \times 0.06\lambda$)이므로 $ka = 0.6 < 1$ 인 조건을 나타내고 있으므로 전기적 소형 안테나로 동작한다.

참고 문헌

- [1] R. W. Ziolkowski and A. Erentok, "Metamaterial-based efficient electrically small antennas", IEEE Trans. Ant. Prop., vol. 54, no. 7, pp. 2113-2130, July 2006.
- [2] A. Erentok and R. W. Ziolkowski, "An efficient metamaterial-inspired electrically small antenna", Microw. Optical Techn. Lett., vol. 49, no. 6, pp. 1287-1290, June 2007.
- [3] A. Erentok and R. W. Ziolkowski, "A dual-band efficient metamaterial-inspired electrically-small magnetic-based antenna", Proc. IEEE Trans. Ant. Prop., pp. 1877-1880, 2007.
- [4] S. R. Best, "A discussion on the properties of electrically small self-resonant wire antennas", IEEE Ant. and Prop. Mag., vol. 46, no. 6, pp. 9-22, Dec. 2004.
- [5] H. A. Wheeler, "Fundamental limitations of small antennas", Proc. IRE, vol. 35, pp. 1479-1331, Dec. 1947.
- [6] L. J. Chu, "Physical limitations of omnidirectional antennas", J. Appl. Phys, vol. 19, pp. 1163-1175, Dec. 1948.
- [7] CST STUDIO SUITETM 2006 MWS (Micro Wave Studio) manual, CST Corporation.

