

MNG 단일셀 메타매질 부하를 갖는 삼중대역 폴디드 모노폴 안테나 설계

Tri-Band Folded Monopole Antenna Design with MNG Single Cell Metamaterial Loading

이영훈*
Young-Hun Lee**

Abstract

This paper was studied the tri-band folded monopole antenna design with Mu-negative metamaterial unit cell, which operates at 700 MHz UHD broadcast band and 2.45 GHz/5 GHz WiFi band. The MNR metamaterial is fabricated by forming a capacitor on the backside of the antenna substrate and connecting it to the ground plane through a strip line and a via hole so that a single cell can operate in the MZR (Mu zero resonator). Through this, the resonance point can be controlled to resonate in the zero mode in 700 MHz band, and the bandwidth is improved. Experimental results show that the 10dB bandwidth and gain are 309 MHz (41.2%) and 5.298 dB at the first resonance point, and the 10dB bandwidth and gain at the second resonance point are 821.9 MHz (33.5%) and 2.7840 dB respectively. At the third resonance point, the gain and bandwidth were 1.1314 GHz (20.6%) and 2.9484 dB respectively. We confirmed that the resonance point with theoretical value is in agreement with experimental value. And the radiation pattern is generally omnidirectional, and it has been confirmed that the radiation pattern is good in both forward and backward directions at 0.75 GHz and 2.45 GHz, and has a radiation pattern with multiple lobes at 5.5 GHz

요약

본 논문에서는 MNR(Mu-negative) Metamaterial 단일 셀을 사용하여 700 MHz UHD 방송 대역과 2.45 GHz/5 GHz WiFi 대역에서 동작하는 삼중대역 폴디드 모노폴 안테나 설계에 관하여 연구하였다. MNG metamaterial 단일셀이 MZR(Mu zero resonator)에서 동작하도록 안테나 기판 뒷면에 커패시터를 형성하고, 스트립선로와 비아홀을 통해서 접지면과 연결하여 구현하였다. 이를 통해서 700 MHz대역에서 영차모드에서 공진하도록 공진점을 제어할 수 있고, 대역폭을 개선할 수 있다. 최종적으로 700 MHz UHD방송 대역과 2.45 GHz/5 GHz WiFi 대역에서 동작하는 안테나를 구현하였다. 설계 제작한 안테나의 크기는 100×100mm²이고, 실험 결과 첫 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 309 MHz(41.2%), 5.298 dB이며, 두 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 821.9 MHz(33.5%), 2.7840 dB이며, 세 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 1.1314 GHz(20.6%), 2.9484 dB의 결과를 확인하였다. 안테나의 공진주파수는 이론과 실험이 일치함을 확인하였다. 그리고 방사패턴은 대체적으로 전방향 특성을 가지고 있으며, 0.75 GHz와 2.45 GHz에서는 측면보다 전방향과 후방향으로 방사특성이 양호하며, 5.5 GHz에서는 다중로브를 갖는 방사패턴 특성을 확인하였다

Key words :Folded Monopole Antenna, metamaterial, mu-negative, UHD, WiFi

* School of Electronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology

★Corresponding author

E-mail:radiolee@kumoh.ac.kr, Tel :+82-54-478-7505

This paper was supported by the Academic Research Fund of Kumoh National Institute of Technology Academic Research 2015

Manuscript received Mar. 23, 2018; revised Mar. 27, 2018; accepted Mar. 29, 2018

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

무선을 이용한 정보서비스는 다양화를 추구하면서 무선 주파수 이용범위는 확대되고 있으며, 무선시스템은 높은 데이터 전송과 신뢰성을 추구할 것으로 예상하고 있다. 현재 우리나라는 UHD 서비스를 위해 주파수를 700 MHz대역에 할당하였으며, 근거리무선통신망인 WiFi는 2.5 GHz대역과 5 GHz대역을 할당하여 현재 이들 서비스를 하고 있다. 따라서 이들의 안테나를 소형으로 구현의 필요성이 제기되고 있다.

단일 기판에 안테나를 쉽게 제작 및 성형을 할 수 있는 장점을 가진 평면 모노폴 구조는 넓은 대역 특성과 다중대역 특성을 갖고 있음으로 안테나 구현이 용이하여 널리 사용되고 있다. 이러한 특성을 갖는 안테나는 여러 개의 스트립 선을 사용해서 다중밴드에서 동작하도록 구현하였으며, 반면에 크기가 크고, 아주 큰 접지면적이 필요한 단점을 가지고 있다[1]. 다른 방법으로는 비 사용 대역에서는 잡음 제거 능력이 우수하고, 스위치를 사용해서 재구성이 가능한 안테나를 구현하는 것이다[2],[3]. 그러나 스위치와 바이어스 회로를 사용함으로써 디자인에서 복잡성과 제조 단가가 비싼 단점을 가지고 있다.

최근에 메타매질을 안테나에 적용하여 아주 작은 안테나를 설계하고 연구하였다[6]-[8]. 전송선로 메타매질(Transmission-Line Metamaterials : TL-MTM) 구조는 소형 안테나를 구현하는데 효과적으로 적용하고 있다[4]-[6]. TL-MTM 공진형 안테나는 처음으로 PCB 기판을 사용하여 구현하였다[8],[9]. 다중대역 TL-MTM 공진 안테나는 여러 개의 Left Handed 모드를 사용하여 구현하였으며, 대역폭이 매우 좁은 단점을 가지고 있다[10].

TL-MTM은 후방파(left handed propagation : LH)와 전송파(right handed propagation : RH) 성질을 가지고 있으며, CRLH(composite Right- and Left-handed) 특성을 가지고 있다. CRLH는 단위 셀은 LH와 RH 경계영역에서 파장이 무한대인 특이한 특성을 가지고 있다. TL-MTM의 등가모델은 일반 전송선로 등가모델에 직렬 커패시턴스와 병렬 인덕턴스를 부가한다. 여기에서 무한 파장 성질을 이용한 것이 ZOR(Zero-order resonator)이다[11],[12]. ZOR은 무한 파장 특성을 사용함으로써 안테나 크기를 소형화를 구현할 수 있다. 이러한 ZOR은 ENR(Esplan Negative) TL-MTM과 MNG(Mu Negative) TL-MTM으로 구현된다.

이것은 전송선로에 직렬 용량성분과 병렬 인덕터 성분을 부가함으로써 일반적으로 구현할 수 없는 맞춤형 전파특성을 구현할 수 있다. 이러한 성질들을 사용함으로써 크기가 주파수에 무관한 안테나와 소자 설계에 구현이 가능하게 되었으며, 아울러 안테나의 엄청난 소형화가 가능하였다.[13],[14]. 더불어서 소형화를 구현함에도 불구하고, 안테나 방사부에 위상차가 없는 일정한 전류특성을 갖게 함으로 안테나의 방사특성을 디자인할 수 있다[16].

본 논문에서는 폴디드 모노폴 구조를 사용하였으며, 전송선로에 MNG TL-MTM 단일 셀을 폴디드 모노폴 안테나에 부가하여 삼중대역에서 공진하는 안테나를 설계하였다. 폴디드 구조를 구현하기 위해서 모노폴과 안테나 후면에 커패시터 구조를 사용하여 직렬 커패시터 조절이 용이하도록 구현하였고, 스트립선로와 비아홀을 사용하여 접지면과 연결하였다. 이러한 설계기법을 사용하여 700 MHz UHD 방송대역과 2.45 GHz/5 GHz WiFi 대역에서 동작하는 소형 폴디드 모노폴 소형 안테나를 설계하였다. 이론의 객관성을 입증하기 위해 안테나를 제작하여 실험하였다.

논문 구성은 본론에서 MNG TL MTM 단일셀 구성과 단위셀의 분석, MNG 안테나 분석하여 700 MHz UHD 방송대역과 2.45 GHz/5 GHz WiFi 대역에서 공진하는 3중대역 안테나를 설계 및 제작하고 실험하여 본 논문의 타당성에 대한 내용으로 구성하였고, 마지막으로 결론을 제시하였다.

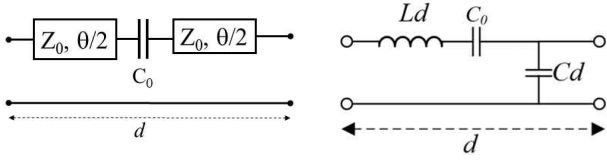
II. 본론

1. MNG TL MTM 단위셀

그림 1은 전송선로에 직렬 커패시터를 삽입한 MNG TL MTM 단위셀의 전송선로 모델이며, 분포정수회로와 집중정수회로를 사용하여 그림 1(a)와 같이 표현이 가능하며, 주기경계조건을 적용하면 그림 1에 대한 정확한 분산은[16]

$$\cos(\beta d) = \cos(\theta) + \left(\frac{1}{2\omega C_0 Z_0} \right) \sin(\theta) \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 θ 는 전송선로의 전기적인 길이이며, $\theta = \omega \sqrt{LC}d$ 이다.



(a) Distributed Circuit (b) Lumped element circuit
(a) 분포회로 (b) 집중정수회로

Fig. 1. Transmission Model of MNG Unit Cell
그림 1. MNG 단일 셀의 전송선로 모델

여기서 병렬 인덕터의 크기를 무한하다고 가정하고, 단일 셀의 크기가 작다($\theta \ll 1$)고 가정하면 식 (1)은 다음과 같다.

$$\cos(\beta d) = 1 - \frac{1}{2} \left(\omega^2 L C d^2 - \frac{C d}{C_0} \right) \quad (2)$$

여기서 C_0 는 직렬부하 커패시터이고, C , L 은 전송선로의 단위길이당 커패시터와 인덕터이고, β 는 전파상수이고, Z_0 는 전송선로의 특성임피던스이다. 셀의 크기가 무한히 작다고 가정하면 MNG의 전파상수는 다음과 같다[12],[13],[16].

$$\beta_{MNG} = \omega \sqrt{\left[L - \frac{1}{\omega^2 C_0 d} \right] C} \quad (3)$$

식 (3)을 자세히 분석하면 임의의 주파수에서 전파상수가 영의 값을 가질 수 있음을 직관적으로 알 수 있다. 즉 직렬로 삽입한 C_0 와 전송선로의 직렬 인덕턴스를 조합함으로써 전파상수가 영인 공진조건을 얻을 수 있으며, 이를 영차공진(Zeroth order resonance)이라 한다.

MNG 전송선로의 공진이 발생하는 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\beta_{MNG} d = \frac{n\pi}{N} : n = 0, 1, 2, 3, 4 \dots (N-1) \quad (4)$$

여기서 N 은 셀의 수이며, 따라서 정모드(positive mode)에서 공진점을 구할 수 있다.

MNG TL-MTM의 MZR(mu zero resonance) 공진 주파수는 일반 전송선로의 종단을 개방과 단락조건을 이용한다[14]. 이때 종단이 개방되면 입력임피던스는

$$\begin{aligned} Z_{in} &= -jZ_0 \cot(\beta d^{\beta \rightarrow 0}) \\ &= -jZ_0 \frac{1}{\beta d} = j\sqrt{\frac{Z}{Y}} \left(\frac{1}{-j\sqrt{ZY}} \right) \frac{1}{N} = \frac{1}{NY} \end{aligned} \quad (5)$$

이고, 단락된 조건에서 입력 임피던스는

$$\begin{aligned} Z_{in} &= -jZ_0 \tan(\beta d^{\beta \rightarrow 0}) \\ &= -jZ_0 \beta d = j\sqrt{\frac{Z}{Y}} (-j\sqrt{ZY}) N = NZ \end{aligned} \quad (6)$$

이다. 이 조건을 그림 1에 적용하면 식 (5)-(6)은 다음과 같이 유도된다.

부하 개방조건에서 입력임피던스는

$$Z_{in} = \frac{1}{j\omega N C_R} \quad (7)$$

이고, 부하 단락조건에서 입력임피던스는

$$Z_{in} = j\omega N L_H + \frac{N}{j\omega C_L} \quad (8)$$

이 된다. MZR 공진주파수는 식(8)을 사용하여 구하면

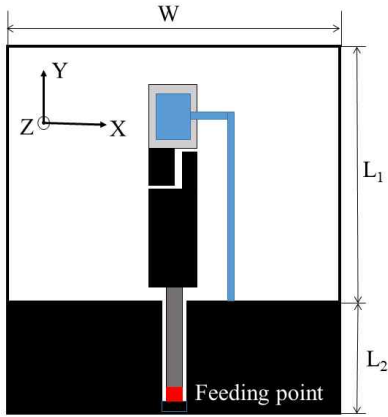
$$\omega_{MZR} = \omega_M = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}} \quad (9)$$

이다. 따라서 공진주파수는 공진기의 길이와 무관함을 확인할 수 있다[14].

2. MNG 단위 셀을 갖는 폴디드 모노폴 안테나

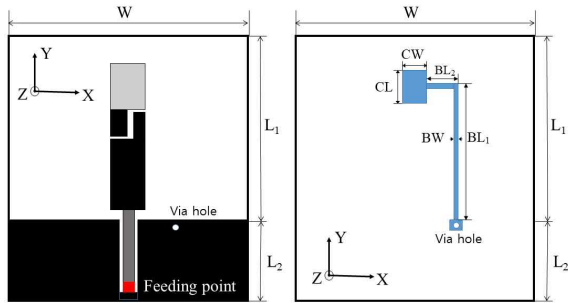
700 MHz UHD 대역과 2.45 GHz/ 5GHz WiFi 대역에서 공진하는 3중대역 안테나는 MNG 단위셀을 갖는 폴디드 모노폴 안테나 MZR 공진기의 설계에 기반하였다.

그림 2는 본 논문에서 제안한 MNG 단일 셀을 갖는 폴디드 모노폴 안테나 구조이다. 그림 2(b)-(c)는 폴디드 모노폴 안테나의 세부구조이며, 그림 2(d)는 MNG TL-MTM 단위셀을 보여주고 있다. 안테나는 MNG 단일 셀과 스테르브로 구성하고 있으며, 세부 크기는 표 1과 같다.



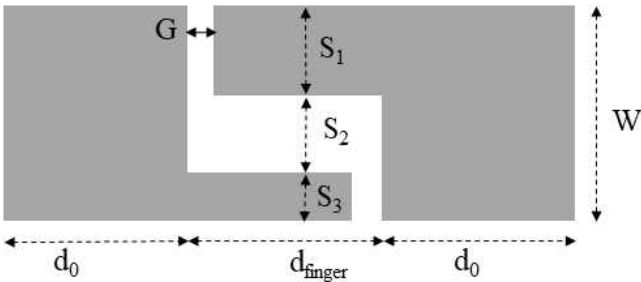
(a) Proposed Structure of Folded Monopole antenna with MNG TL-MTM Unit Cell

(a) 제안한 MNG TL-MTM 단일 셀의 폴디드 모노폴 안테나 구조



(b) Upper side
(b) 전면부

(c) Upper side
(c) 후면부



(d) Monopole Structure with MNG unit cell
(d) MNG 단일셀의 모노폴 구조

Fig. 2. Proposed MNG Metamaterial monopole antenna
그림 2. 제안한 MNG metamaterial 모노폴 안테나

Table 1. Detailed geometric value of the Folded Monopole with MNG Unit cell(Unit : mm)

표 1. MNG 단일셀을 갖는 폴디드 모노폴 안테나의 세부 크기(단위 : mm)

W	100	L_1	37
L_2	75	CL	9
CW	10	BL_1	31
BL_2	7.5	BW	1
S_1	7	S_2	6
S_3	1	d_0	9
d_{finger}	15	G	0.9
W_0	14		

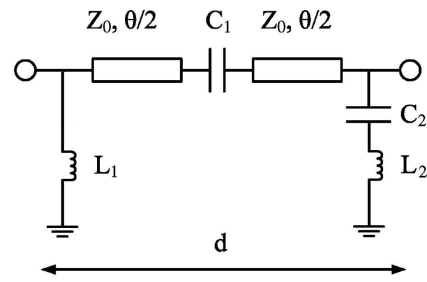


Fig. 3. MNG TL-MTM unit cell equivalent circuits
그림 3 MNG TL-MTM 단위셀 등가회로

그림 3은 본 논문에서 제시한 안테나 구조의 MNG TL-MTM 단위셀의 등가회로이며, 폴디드 구조가 되도록 형성함으로써 낮은 주파수에서 공진하고, 대역폭이 넓어지는 특성을 얻을 수 있다[16]. 그림 1의 구조에서 MZR은 비대칭이 되도록 형성하였고, 그림 3에서 C_1 는 스트립선로의 MZR의 스트립과 스트립 사이에 발생하는 직렬 커패시턴스이며, L_{01} 은 MZR의 접지면에서 형성된 병렬 인덕턴스이고, L_{02} 는 기판 뒷면에 접지면에 연결된 스트립 선로와 비아에 의한 인덕턴스이며, C_2 는 MNG의 선로와 기판 뒷면에 있는 금속도체 간에 발생한 커패시턴스이다.

본 연구에서 제안한 안테나는 상대유전율 $\epsilon_r = 4.4$, 손실 탄젠트 $\tan \delta = 0.016$, 두께가 0.8 mm인 FR4 기판을 사용하였다. 안테나 급전은 CPW를 사용하였으며, 그 길이는 37 mm이다. 그림 4는 모노폴 안테나와 MZR 단위셀을 갖는 폴디드 모노폴 안테나와의 반사손실 비교한 것이다. 그림 4에서 모노폴 안테나는 2.013 GHz, 3.650 GHz, 5.335 GHz에서 공진하고 있으며, 반면에 MZR 단위셀을 갖은 폴디드 모노폴 MTM 부하 안테나는 0.707 GHz, 2.379 GHz, 3.601 GHz, 5.287 GHz에서 공진함을 확인할 수 있다. 따라서 MZR 단위 셀을

갖는 폴디드 모노폴 MTM 안테나의 MZR 공진점은 0.707 GHz에서 동작하며, 2.4 GHz/5 GHz대역은 모노폴 안테나 구조로 동작함을 알 수 있다.[16] 따라서 모노폴 구조를 사용함으로써 UHD, 2.4 GHz/5 GHz 무선 대역에서 동작하는 3중 대역 안테나를 구현 할 수 있음을 확인할 수 있다.

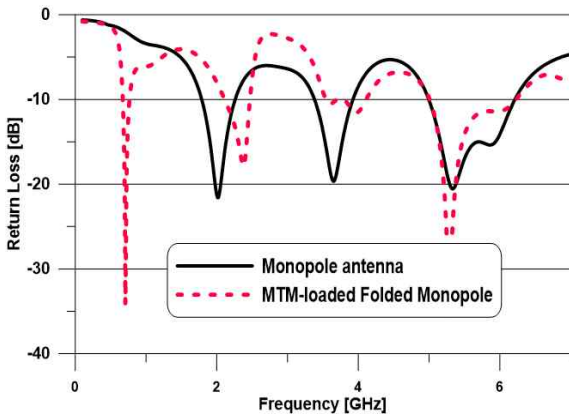


Fig. 4. Simulated return-loss characteristics of the monopole antenna and MTM loaded folded monopole antenna

그림 4. 모노폴 안테나와 MTM 부하가 있는 폴디드 모노폴 안테나의 반사손실

제안한 안테나의 특성 변화는 그림 1(d)에서 모노폴 단일 셀의 C_1 에 영향을 주는 G , S_2 폭의 넓이와 길이 d_{finger} 와, MNG 단일 셀 전송선로 길이 d_0 와 스텔브의 길이에 대한 모노폴 안테나의 반사손실에 대하여 분석하였다. 안테나의 접지면은 $100 \times 37 \text{ mm}^2$ 이고, 방사부는 $100 \times 75 \text{ mm}^2$ 이다.

그림 5는 MNG 단위셀에서 C_1 에 영향을 주는 G 의 간격을 0.3 mm, 0.7 mm, 1.3 mm으로 변경하였을 경우에 반사손실특성이다. 간격이 증가함에 따라서 길이가 증가함에 따라서 모든 공진점의 주파수가 높아짐을 나타내고 있다. 첫 번째의 경우에는 간격이 넓어지면서 커패시턴스가 작아지면서 MNG 단위 셀의 공진주파수가 높아지게 되고, 두 번째와 세 번째의 공진점은 안테나의 리액턴스가 변함에 따라서 공진주파수가 높아지게 되며, 반사손실이 향상됨을 확인하였다.

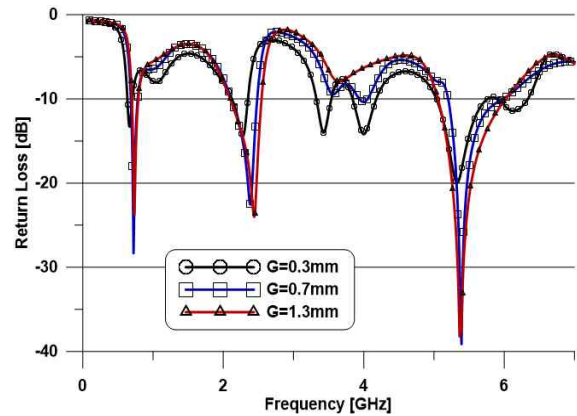


Fig. 5. Return loss of the antenna as a function of G
그림 5. G 에 따른 안테나 반사손실

그림 5는 S_2 폭을 1 mm, 7 mm, 13 mm일 때 두 번째 공진점의 변화폭이 최대 320 MHz 낮아졌다. 반면에 첫 번째 공진점과 세 번째 공진점의 변화는 매우 적다. 따라서 MNG 단위셀의 C_1 에 의해서 안테나의 공진주파수가 매우 민감하게 변화됨을 확인할 수 있었다.

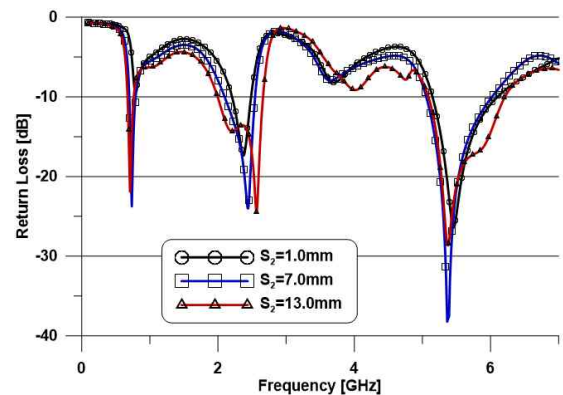


Fig. 6. Return loss of the antenna as a function of S_2
그림 6. S_2 에 따른 안테나 반사손실

그림 7은 d_{finger} 의 길이를 증가함에 따른 안테나의 반사손실이다. d_{finger} 가 5mm 증가하면 첫 번째 공진주파수는 120MHz, 두 번째 공진주파수는 475MHz, 세 번째 공진주파수는 650MHz변화됨을 확인하였다. 이것은 안테나 전체 길이가 증가함으로써 공진주파수가 변함을 나타내고 있다.

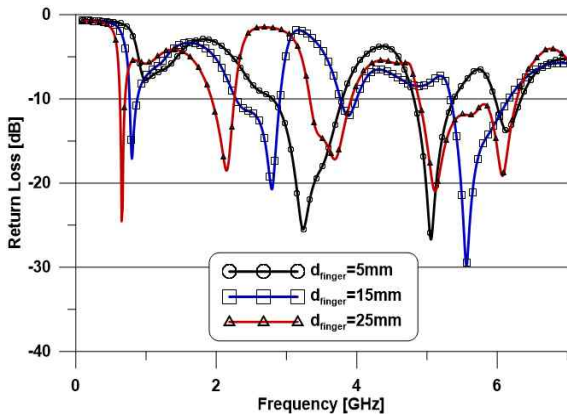


Fig. 7. Return loss of the antenna as a function of d_{finger}
 그림 7. d_{finger} 에 따른 안테나 반사손실

그림 8은 MNG 단위 셀의 스트립선로의 길이 d_0 에 따른 안테나의 반사손실을 보여주고 있다. 길이 d_0 를 증가함으로써 모든 공진점은 낮은 주파수로 이동하였으며, 이것은 안테나의 크기가 증가에 의한 것이다. 특히 d_0 의 길이를 5 mm 증가시키면 첫 번째와 두 번째 공진주파수가 낮은 주파수로 약 100 MHz이동하였으며, 세 번째 공진주파수는 약 300 MHz 이동함을 확인할 수 있다.

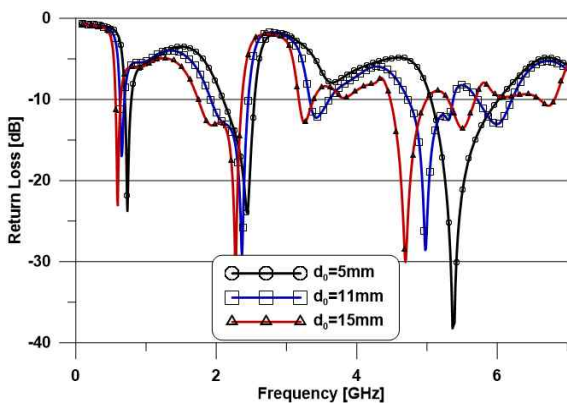


Fig. 8. Return loss of the antenna as a function of d_0
 그림 8. d_0 에 따른 안테나 반사손실

3. 안테나 설계 제작 및 실험

앞에서는 본 논문에서 제안한 MNG metamaterial 모노폴 안테나에서 갭과 결합면적의 변화, 전송선로 길이, 단위셀의 길이에 따른 공진점, 반사손실 및 매칭의 개선 정도에 대하여 분석하였다.

현재 우리나라에서는 700 MHz 대역을 UHD 방송 채널(698~710 MHz, 753~771 MHz), 재난망 통신(718

~728 MHz, 773~743 MHz), 무선통신대역(728~748 MHz, 783~803 MHz)으로 할당하였으며, WiFi 대역은 2.4 GHz대역(2.4~2.4835 GHz)과 5 GHz대역(5.15~5.825 GHz)을 할당하여 사용하고 있다. 향후 무선서비스에 대비하고, 상기 대역에서 동작하는 MNG Metamaterial 단위셀을 사용한 삼중대역 안테나를 설계 제작하여 실험을 하였다.

안테나 제작에 사용한 기판은 상대 유전율이 4.4이고, 손실 탄젠트가 0.002이고, 두께가 0.8 mm인 FR-4이며, 제작된 안테나는 그림 9와 같다.

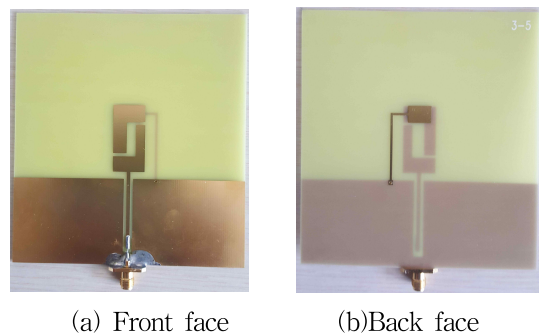


Fig. 9. Front and back face designed antenna
 그림 9. 제작한 안테나 전면과 후면

앞에서 분석한 결과를 사용하여 최적의 안테나를 설계하였으며 설계한 안테나의 세부적인 설계사양은 표 2와 같다. 안테나의 전체크기는 100×100 mm² 접지영역 크기는 100×38 mm²이고, 방사부는 100×62 mm²로 제한 하였으며, MNG 단위 셀의 폭은 14 mm, 급전선은 37 mm로 제한 하였다.

제작한 안테나 특성 실험은 구미전자정보기술원이 보유하고 있는 ZVA40(Rohde & Schwarz) 회로망 분석기와 OTA 방사패턴 측정기를 사용하여 제작한 안테나의 반사손실과 방사특성을 각각 실험하였으며, 실험결과와 그림 9와 같으며, 안테나 측정항목에 대한 이론값과 실험값의 비교를 표 3에 제시하였다.

그림 10은 제작한 안테나의 반사손실과 750 MHz와 2.45 GHz와 5.5 GHz에서 방사패턴을 이론값과 실험값을 비교하였다. 반사손실 결과로부터 첫 번째, 두 번째와 세 번째의 공진점은 이론값과 실험값은 동일함을 확인하였다. 실험결과 첫 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 309 MHz(41.2 %), 5.298 dB이며, 두 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 821.9 MHz(33.5 %), 2.7840 dB이며, 세 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 1.1314 GHz(20.6 %), 2.9484 dB이다.

Table 2. Detailed geometric design value of the folded monopole with MNG unit cell(Unit : mm)

표 2. MNG 단일셀을 갖는 폴디드 모노폴 안테나 설계의 세부 크기(단위 : mm)

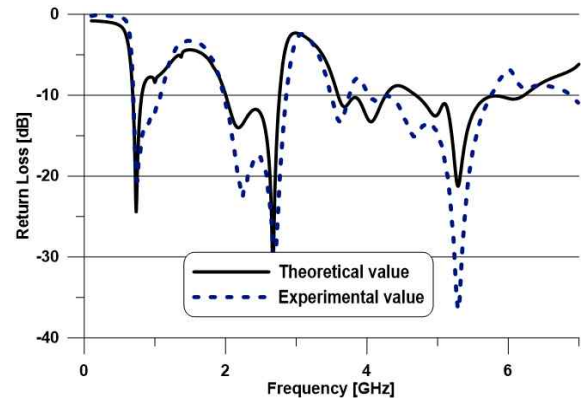
W	100	L_1	37
L_2	72	CL	7
CW	10	BL_1	28
BL_2	7.5	BW	1
S_1	5	S_2	5
S_3	4	d_0	7
d_{finger}	14.1	G	0.9
W_0	14		

Table 3. Comparison of theoretical and experimental values of proposed monopole antenna with MZR metamaterial unit cell

표3. 제안한 MNZ metamaterial 모노폴 안테나의 이론 및 실험값 비교

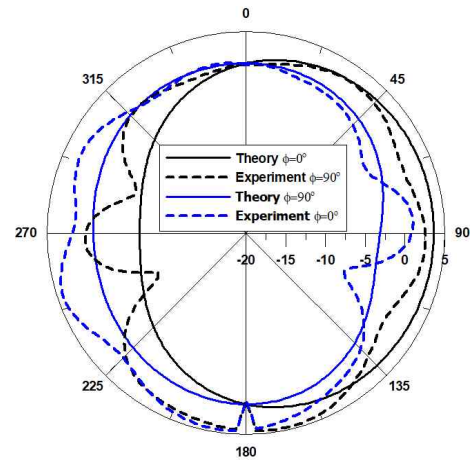
Frequency	Item	Theory value	Experiment value
0.75 (GHz)	Band width	0.6875-0.8114 GHz 0.1239 GHz(16.5 %)	0.6875-0.9965 GHz 0.3090GHz(41.2 %)
	Gain	2.2782 dB	5.298 dB
	Directivity	3.9036 dB	3.1859 dB
	Efficiency	6.1818 dB	2.01251 dB
2.45 (GHz)	Band width	2.0270-2.7661 GHz 0.7391 GHz(30.2 %)	2.0425-2.8644 GHz 0.8219GHz(33.5 %)
	Gain	4.0668 dB	2.7840 dB
	Directivity	4.3061 dB	4.15266 dB
	Efficiency	-0.2384 dB	-1.36866 dB
5.5GHz	Band width	4.6862-5.9847 GHz 1.2985 GHz(23.6 %)	4.4974-5.6288 GHz 1.1314 GHz(20.6 %)
	Gain	4.3468 dB	2.9484 dB
	Directivity	4.5411 dB	6.19874 dB
	Efficiency	-0.1943 dB	-1.1472 dB

제작한 안테나의 이론값과 실험값의 오차는 대역폭의 경우 750 MHz에서 대역폭과 안테나 이득은 185.1 MHz, 0.9 dB이며, 2.45 GHz에서 이득과 대역폭은 82.8 MHz와 1.28 dB이며, 5.5 GHz에서 이득과 대역폭은 167.1 MHz와 1.362 dB으로 나타났다. 이러한 오차가 발생한 것은 케이블 및 실험측정상의 오차로 인한 결과로 사료된다.



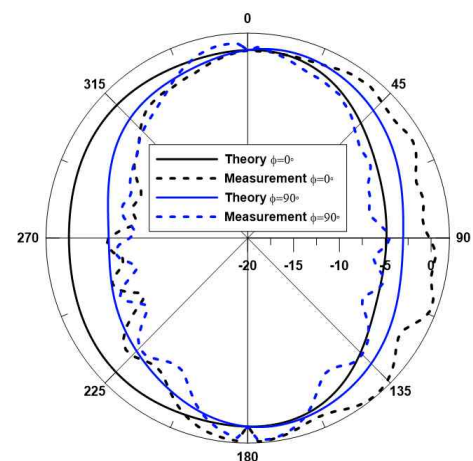
(a). Comparison of theoretical and experimental values of the return loss of a designed antenna

(a) 설계한 안테나의 반사손실의 이론값과 실험값의 비교



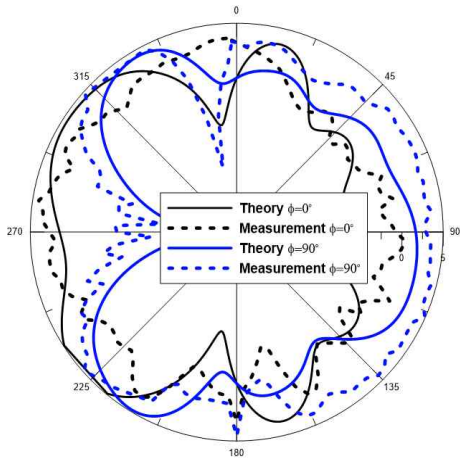
(b) Comparison of theoretical and experimental values of the radiation pattern at 750 MHz

(b) 750 MHz에서의 방사패턴의 이론값과 실험값 비교



(c) Comparison of theoretical and experimental values of the radiation pattern at 2.45 GHz

(c) 2.45 GHz에서 방사패턴의 이론값과 실험값 비교



(d) Comparison of theoretical and experimental values of the radiation pattern at 5.5 GHz

(d) 5.5 GHz에서 방사패턴의 이론값과 실험값 비교

Fig. 10. Experimental results of proposed antenna
 그림 10. 제안한 안테나의 실험결과

방사패턴은 대체적으로 전방향 특성을 가지고 있으며, 0.75GHz와 2.45GHz에서는 측면보다 전방향과 후방향으로 방사특성이 양호하며, 5.5GHz에서는 다중로브를 갖는 방사패턴을 갖음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 MZR metamaterial 단일 셀을 폴디드 모노폴 안테나에 적용함으로써 삼중대역의 안테나 설계가 용이함을 확인할 수 있었다.

III 결론

본 논문에서는 MNG Metamaterial 단일 셀을 사용하여 700 MHz DTV대역과 2.4 GHz/5 GHz WiFi대역에서 동작하는 삼중대역 모노폴 안테나 설계방법에 대하여 제안하였다. MNG metamaterial 단일셀은 구조를 사용하였고, 안테나 방사부에 삽입함으로써 삼중대역 안테나를 구현하였다. 또한 기생도체를 안테나 방사부 뒷면에 있도록 구현하여 안테나의 공진점을 제어할 수 있고, 대역폭을 개선하였다. 이러한 구조를 사용하여 최종적으로 750 MHz UHD대역과 2.4 GHz/5 GHz WiFi 대역에서 동작하는 안테나를 구현하였으며, 최적화를 통해 설계한 안테나를 제작하였다. 설계 제작한 안테나의 크기는 100×100 mm²이고, 반사손실 결과로부터 첫 번째, 두 번째와 세 번째의 공진점은 이론값과 실험값은 동일함을 확인하였다. 실험결과 첫 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 309 MHz(41.2 %), 5.298 dB

이며, 두 번째 공진점에서 10 dB 대역폭과 이득은 각각 821.9 MHz(33.5 %), 2.7840 dB이며, 세 번째 공진점에서 10dB 대역폭과 이득은 각각 1.1314 GHz(20.6 %), 2.9484 dB의 결과를 확인하였다. 방사패턴은 대체적으로 전방향 특성을 가지고 있으며, 0.75GHz와 2.45GHz에서는 측면보다 전방향과 후방향으로 방사특성이 양호하며, 5.5 GHz에서는 다중로브를 갖는 방사패턴을 갖음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 MNR metamaterial 단일 셀을 폴디드 모노폴 안테나에 적용함으로써 삼중대역의 안테나 설계가 용이함을 확인할 수 있었다.

References

[1] Y. Ge, K. Esselle, and T. Bird, "Compact triple-arm multiband monopole antenna," *Proc. IEEE Int. Workshop on: Antenna Technology Small Antennas and Novel Metamaterials*, pp.172 - 175, 2006, DOI:10.1109/IWAT.2006.1609003

[2] S. Yang, C. Zhang, H. K. Pan, A. E. Fathy, and V. K. Nair, "Frequency reconfigurable antennas for multiradio wireless platforms," *IEEE Microw. Mag.*, vol.10, no.1, pp.66 - 83, 2009, DOI:10.1109/MMM.2008.930677

[3] S. Yang, A. E. Fathy, S. El-Ghazaly, H. K. Pan, and V. K. Nair, "A novel hybrid reconfigurable multi-band antenna for universal wireless receivers," *Electromagnetic Theory Symp.*, 2007.

[4] G. V. Eleftheriades, A. K. Iyer, and P. C. Kremer, "Planar negative refractive index media using periodically loaded transmission lines," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol.50, no.12, pp.2702 - 2712, 2002, DOI:10.1109/TMTT.2002.805197

[5] G. V. Eleftheriades and K. G. Balmain, *Negative-Refractive Metamaterials: Fundamental Principles and Applications*, Wiley-Blackwell, 2005.

[6] C. Caloz and T. Itoh, "Novel microwave devices and structures based on the transmission-line approach of meta-materials," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, Jun. 2003, pp.195 - 198, 2003, DOI:10.1109/MWSYM.2003.1210914

- [7] G. V. Eleftheriades, "Enabling RF/microwave devices using negative refractive-index transmission-line(NRI-TL) metamaterials," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol.49, no.2, pp.34 - 51, 2007.DOI: 10.1109/MAP.2007.379612
- [8] G. V. Eleftheriades, A. Grbic, and M. Antoniades, "Negative-refractive-index transmission-line metamaterials and enabling electromagnetic applications," *IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp. Digest*, pp.1399 - 1402, 2004.DOI: 10.1109/APS.2004.1330448
- [9] A. Sanada, M. Kimura, H. Kubo, C. Caloz, and T. Itoh, "A planar zeroth order resonator antenna using a left-handed transmission line," in *Proc. 34th Eur. Microwave Conf. (EuMC)*, pp.1341 - 1344, 2004.DOI:10.1109/EUMC.2004.183842
- [10] C.-J. Lee, K. Leong, and T. Itoh, "Composite right/left-handed transmission line based compact resonant antennas for RF module integration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.54, no.8, pp.2283 - 2291, 2006.DOI:10.1109/TAP.2006.879199
- [11] Jae-Hyun Park, Y.H. Ryu, J.G. Lee, J.H. Lee, "Epsilon Negative Zeroth-Order Resonator Antenna," *IEEE Antennas Propag.*, vol.55, no.12, pp.3710 - 3712, 2007.DOI:10.1109/TAP.2007.910505
- [12] Jae-Hyun Park, Y.H. Ryu, J.G. Lee, J.H. Lee, "Mu-Zero Resonance Antenna," *IEEE Antennas Propag.*, vol.58, no.6, pp.3710 - 3712, 2010.DOI:10.1109/TAP.2010.2046832
- [13] E. Forati, G. W. Hanson, and D. F. Sievenpiper, "An epsilon-near-zero total -internal-reflection metamaterial antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.63, no.5, pp.1909 - 1916, 2015
- [14] W. Liu, Z. N. Chen, and X. Qing, "Metamaterial -based low-profile broadband aperture -coupled grid-slotted patch antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.63, no.7, pp.3325 - 3329, 2015.DOI:10.1109/TAP.2015.2429741
- [15] A. L. Borja, P. S. Hall, L. Qing, and H. Iizuka, "Omnidirectional loop antenna with left-handed loading," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.6, pp.495 - 498, 2007.DOI:10.1109/LAWP.2007.905016
- [16] Sasan Adhi Rezacich, Marco A. Antoniades,

- Amin M. Abbsh, "Bandwidth and Directivity Enhancement of Loop Antenna by Non Periodic Disturbution of Mu-Negative Metamaterial Unit Cells" *IEEE Antennas Propag.*, vol.64, no.8, pp.3319-3329, 2016.DOI:10.1109/TAP.2016.2574878
- [17] Marco A. Antoniades, George V. Eleftheriades, "A Broadband Dual mode Monopole Antenna Using NRI-TL Metamaterial Loading", *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.8, pp.258-261, 2009.DOI:10.1109/LAWP.2009.2014402

BIOGRAPHY

Young -Hun Lee (Member)



1986 : BS Degree in Electronic Engineering, Kwangwoon University
1988 : MS degree in Electronic Engineering, Yonsei University
1995 : Ph.D degree in Electronic Engineering, Yonsei University
1995.3-2002.2 : Associate Professor, Dept. of Radio Engineering, Honam University
2002-Present : Professor, School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology
2016.1-2017.1 : Visiting Scholar Professor, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Duke University