

Mu-Negative Metamaterial 단일 셀을 가진 듀얼 대역 모노폴 안테나 설계

Dual-Band Monopole Antenna Design with Mu-Negative Metamaterial Unit Cell

이 상 재*, 이 영 훈*

Sang-Jae Lee*, Young-Hun Lee*

Abstract

This paper was studied the double-band monopole antenna design with Mu-negative metamaterial unit cell, which operates at 700MHz and 2.45GHz band. Mu-negative unit cell made of the interdigital capacitor structure to operate a double-band antenna by inserting it into an antenna radiator unit. In addition, the parasitic conductor is implemented on the back side of the antenna radiation part, so that the resonance point of the antenna can be controlled and the bandwidth is improved. Finally, we implemented an antenna operating in the 750MHz UHD band and the 2.45GHz WiFi band. The designed antenna has a size of $200 \times 100\text{mm}^2$. Experimental results show that the 8dB bandwidth and gain characteristics at 750MHz band are 320MHz(42.7%), 5.28dB, 6dB bandwidth and gain at 2.45GHz are 540MHz (21.6%), -0.46dB. From the experimental results, we confirmed that the resonance point with theoretical value is in agreement with experimental value, and the radiation patterns are have the omnidirectional characteristic in both bands.

요 약

본 논문에서는 Mu-negative Metamaterial 단일 셀을 사용하여 700MHz대역과 2.45GHz 대역에서 동작하는 이중 대역 모노폴 안테나 설계에 관하여 연구하였다. Mu-negative metamaterial 단일셀은 interdigital capacitor 구조를 사용하였고, 안테나 방사부에 삽입함으로써 이중대역 안테나를 구현하였다. 또한 기생도체를 안테나 방사부 뒷면에 있도록 구현하여 안테나의 공진점을 제어할 수 있고, 대역폭을 개선하였다. 최종적으로 750MHz UHD대역과 2.45GHz WiFi 대역에서 동작하는 안테나를 구현하였다. 설계제작한 안테나의 크기는 $200 \times 100\text{mm}^2$ 이고, 실험 결과 750MHz 대역에서 8dB 대역폭과 이득특성은 각각 320MHz(42.8%), 5.28dB, 2.45GHz에서 6dB 대역폭과 이득은 540MHz(21.6%), -0.46dB이다. 공진점은 이론값과 실험값이 일치하였으며, 방사패턴은 두 대역에서 전방향 특성을 갖고 있음을 확인하였다.

Key words : Monopole Antenna, metamaterial, mu-negative, interdigital capacitor, parasitic radiator

* School of Electronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology

★Corresponding author

e-mail: radiolee@kumoh.ac.kr, tel:054-478-7505

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

Manuscript received June 5, 2017; revised July. 26, 2017; accepted Aug. 9, 2017

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.

1. 서론

안테나의 원래 특성을 유지하면서 안테나의 크기를 줄일 수 있는 기술과 다중대역 안테나를 설계와 성능을 개선시키는 기술들은 전자파 분야를 연구하는 사람들의 주요 관심이다. 이동성과 소형화를 추구하는 무선통신시스템을 위해서 아주 작은 안테나 개발이 필요한 상황이다. 이러한 특성을 갖는 안테나는 패치안테나에 단락핀을 사용하

여 구현하며[1], 다이폴 안테나에 유도성결합에 용량성 부하를 사용하는 방법[2], Folded 기법[3], Meandering 기법[4],[5]등을 사용하였다.

최근에 Metamaterial을 안테나에 적용함으로써 아주 작은 안테나를 설계하고 연구하였다.[6]-[8] 주기구조를 기존의 안테나에 부가함으로써 안테나는 후방전파(backward propagation)와 무한파장(infinite wavelength)특성을 제시하였다[8]. 이러한 안테나는 부정 굴절율(Negative refractive index) 전송선로(NRI-TL) Metamaterial의 이론을 사용하였다. 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.[9],[10]. 게다가 소형화를 구현함에도 불구하고, 안테나 방사부에 위상차가 없는 일정한 전류특성을 갖게 함으로써 안테나의 방사특성을 디자인 할 수 있다[11].

실제 안테나 설계에서 커패시터와 인덕터의 구현의 어려움에도 불구하고 영차모드(zero mode)와 정모드(positive mode)를 지원하는 mu-zero와 esplion-zero metamaterial 안테나를 제시하였다[12],[13].이 구조는 전송선로에 병렬로 연결된 인덕터와 직렬로 연결된 커패시터를 이용하여 무한 파장과 영차공진을 구현한다. 안테나 방사부에 직렬 커패시터를 부가하여 mu-negative metamaterial unit 셀을 사용하여 소형이면서 광대역 특성을 갖는 안테나를 구현하였다[14].

동작주파수가 1GHz 이하에서 metamaterial unit cell을 이용한 안테나는 대체적으로 커서 실제 적용하기에 어려운 단점이 있다[14].

본 논문에서는 전송선로에 Mu-negative(MNG) metamaterial 단일 셀을 모노폴 안테나에 부가하여 이중대역에서 공진하는 안테나를 설계하였다. Mu-negative 셀은 직렬 커패시터는 Interdigital 커패시터를 사용하였으며, 접지가 없는 경우에 커패시턴스를 계산하였다[15]. 안테나의 공진특성을 개선하기 위해 안테나 후면에 기생소자를 부착하였다[14],[16]. 이러한 설계기법을 사용하여 700MHz UHD 방송대역과 2.45GHz WiFi 대역에서 동작하는 소형 모노폴 소형 안테나를 설계하였다. 이론의 객관성을 입증하기 위해 안테나를 제작하여 실험하였다.

논문 구성은 본론에서 MNG 단일셀 구성과 단위셀의 분석, MZR 안테나 분석하여 700MHz UHD 방송대역과

2.45GHz WiFi 대역에서 공진하는 안테나를 설계 및 제작하고 실험하여 본 논문의 타당성에 대한 내용으로 구성하였고, 마지막으로 결론을 제시하였다.

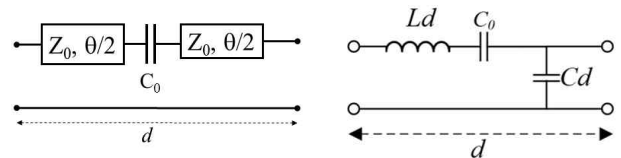
II. 본론

1. MNG를 부가한 전송선로

그림1은 전송선로에 직렬 커패시터를 삽입한 MNG 단일셀의 전송선로 모델이며, 분포정수회로와 집중정수회로이다. 주기경계조건을 적용하면 그림1에 대한 정확한 분산은[14]

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

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



(a) Distributed Circuit (b) Lumped element circuit

Fig. 1. Transmission Model of MNG Unit Cell

(a) 분포회로

(b) 집중정수회로

그림1. MNG 단일 셀의 전송선로 모델

여기서 병렬 인덕터의 크기를 무한하다고 가정하도, 단일 셀의 크기가 작다($\theta \ll 1$)고 가정하면 식1은 다음과 같다.

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

여기서 C_0 는 직렬부하 커패시터이고, C, L은 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. 이에 따른 분산은 그림 2와 같다.

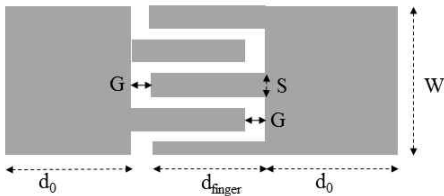
MNG 전송선로의 공진이 발생하는 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

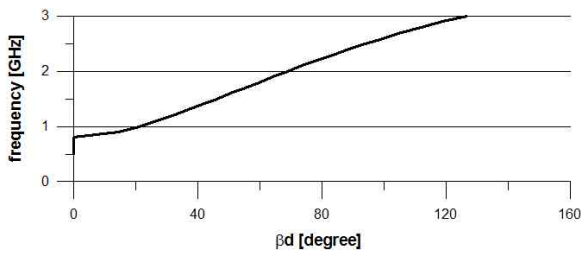
여기서 N은 셀의 수이며, 따라서 정모드(positive mode)에서 공진점을 구할 수 있다.

2. MNG 단일 셀 설계

MNG 단일 셀의 부하 커패시터는 집중소자, 스트립 선로의 간극, IDC(Interdigital capacitor)를 사용해서 구현할 수 있다. 본 논문에서 부하커패시터는 IDC를 사용하였으며, 그 구조는 그림 2와 같으며, 앞에서 설명한 MNG 셀의 분산효과는 그림2(b)와 같다. 그림 2는 유전체는 FR-4이며, 유전률은 4.4, 손실 탄젠트는 0.02, 두께는 0.8mm, 선로폭은 10mm, 길이는 50mm일 때 전파상수에 대한 분산을 나타낸 것이다



(a) Structure of MNG unit cell
(a) MNG 단일 셀의 구조

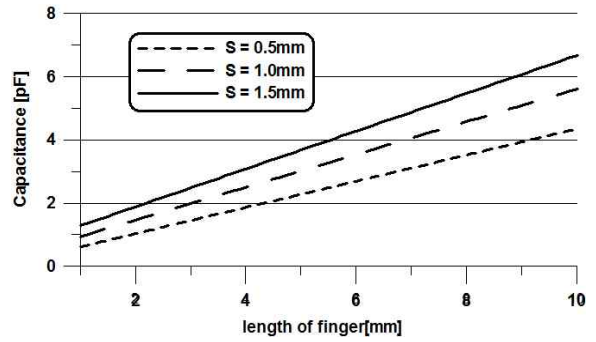


(b) Dispersion diagram of MNG unit cell
(b) MNG 단일 셀의 분산효과

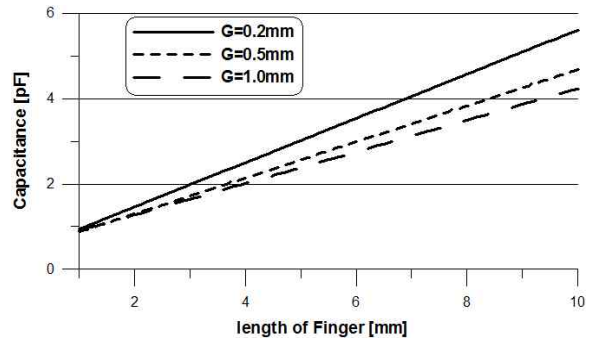
Fig. 2. Structure and dispersion diagram of MNG unit cell
그림 2. MNG 단일셀의 구조 및 분산효과

그림2의 IDC는 접지가 없는 조건에서 C_0 를 계산하였다[15]. 그림 3은 유전체 두께는 0.8mm, 인터디지털의 수는 5개, 인터디지털 폭은 0.5mm, 1.0mm, 1.5mm일 때 d_{finger} 에 따른 커패시터를

계산하였고, 또한 선로간의 간격이 0.2mm, 0.5mm, 0.8mm일 때 커패시터를 각각 계산하였다. 계산결과 인터디지털 선로폭이 넓을수록, 선로간의 간격이 가까울수록 커패시터스가 증가함을 확인하였으며, 이를 통해서 영차공진의 값을 구할 수 있다.



(a) Capacitance of IDC as a function of d_{finger} by S
(a) S에 의한 IDC의 d_{finger} 에 따른 커패시터스



(b) Capacitance of IDC as a function of d_{finger} by G
(b) G에 의한 IDC의 d_{finger} 에 따른 커패시터스

Fig. 3. Capacitance of IDC as a function of d_{finger}
그림 3. IDC의 d_{finger} 에 따른 커패시터스

무손실 전송선로의 특성임피던스는

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

이며, 셀의 크기가 d 인 경우에 전송선로의 전기적인 길이는 $\theta = \beta d$ 이며, 전송선로의 인덕턴스와 커패시터스는 식(5)와 $\theta = \omega \sqrt{LC}d$ 를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다[14]

$$L = \frac{\theta Z_0}{\omega d} \quad (6)$$

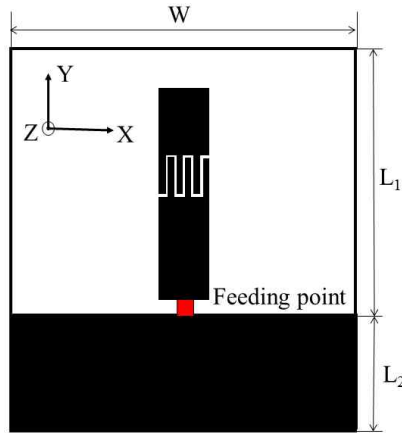
$$C = \frac{L}{Z_0^2} \quad (7)$$

따라서 위에서 언급한 분석방법을 사용하면 주기구조에서 MZR(Mu-zero resonator)의 공진주파

수를 구할 수 있다. 본 논문에서 전송선로 폭은 50mm, MZR주파수는 0.75GHz이고 $C_0 = 3.23pF$ 이다.

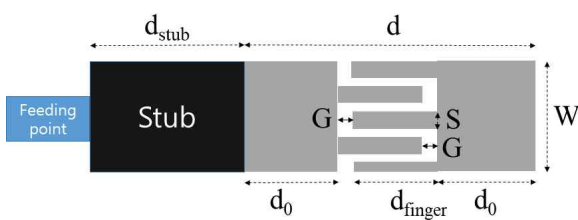
3. MZR 안테나 특성 분석

700MHz UHD 대역과 2.45GHz WiFi 대역에서 만족하는 모노폴 안테나 설계는 MZR 공진기의 설계에 기반하였다. 그림 4는 본 논문에서 제안한 MNG 단일 셀의 모노폴 안테나 구조이다. 그림 4(b)는 모노폴 안테나의 세부구조를 제시하고 있다. 안테나는 MNG 단일셀과 스테브로 구성하고 있으며, 세부 크기는 표1과 같다.



(a) Proposed Structure of Monopole antenna with MNG Unit Cell

(a) 제안한 MNG 단일 셀의 모노폴 안테나 구조



(b) Monopole Structure with MNG unit cell

(b) MNG 단일셀의 모노폴 구조

Fig. 4. Proposed MNG Metamaterial monopole antenna
그림 4. 제안한 MNG metaamterial 모노폴 안테나

제안한 안테나의 특성 변화는 전송선로의 길이 d_0 와 스테브의 길이 d_{stub} 에 대한 모노폴 안테나의 반사손실에 대하여 분석하였다. 안테나의 접지면은 $100 \times 50mm^2$ 이고, 방사부는 $100 \times 100mm^2$ 이다.

그림 5는 MNG 단위셀의 전송선로의 길이에 따른 반사손실을 분석하였다. IDC에서 finger 수를 5개, 폭은 10mm, d_{stub} 는 20mm로 제한하고, 단위 셀의 전송선로 길이를 15mm, 25mm, 35mm로 하였을 경우의 반사손실을 보여주고 있다. 길이가 증가함에 따라 안테나의 첫 번째 공진점과 두 번째 공진점이 낮은 주파수로 이동함으로 보여주고 있다. 따라서 전송선로 길이를 변화시킴으로써 공진주파수를 조정할 수 있음을 알 수 있다.

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

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

S	1.8	d_0	20mm
G	0.2	d	50mm
d_{finger}	10mm	d_{stub}	10mm
W	100mm	L_1	100mm
n	5	L_2	80mm

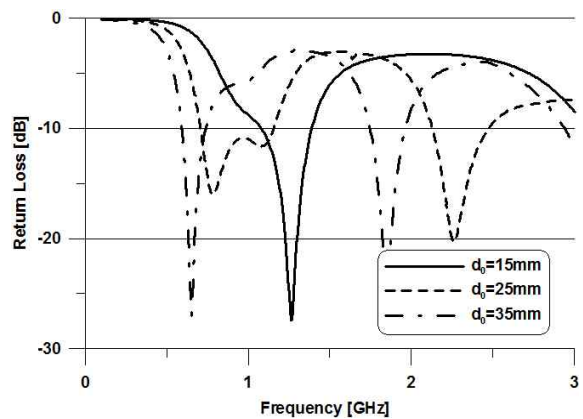


Fig. 5. Return loss of the antenna as a function of d_0

그림 5. d_0 에 따른 안테나 반사손실

그림6은 스테브의 길이에 따른 안테나의 반사손실 특성을 분석하였다. 표1에서 스테브의 길이만을 5mm, 10mm, 15mm일 때 안테나의 공진특성을 보여주고 있다. 스테브가 증가함으로써 첫 번째 공진은 반사손실을 개선하고, 공진주파수를 낮은 주파수로 이동하였다. 반면 두 번째 공진점은 스테브가 10mm 변함으로 최대 주파수가 500MHz 이동하였고, 공진특성을 개선하였다. 따라서 스테브 길이를 사용하여 두 번째 공진점을 개선할 수 있음을 보여주고 있다.

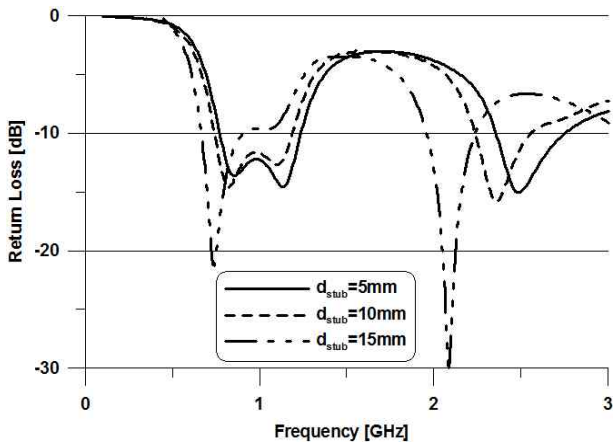
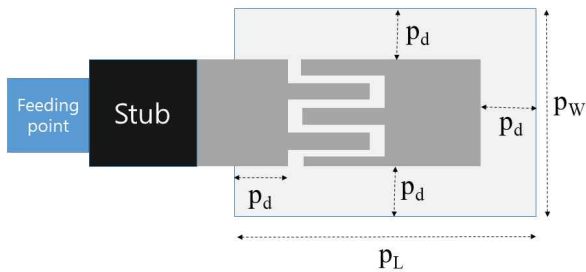
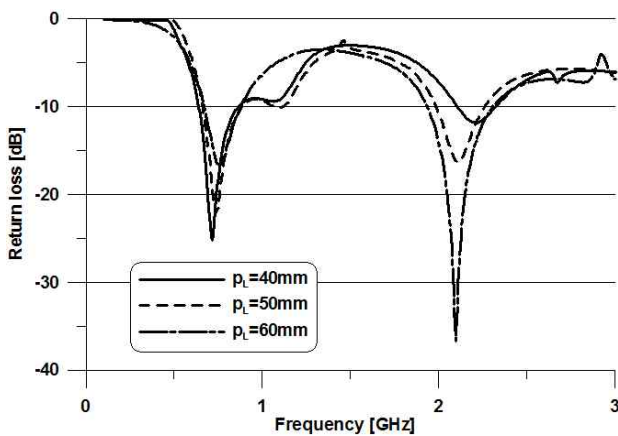


Fig. 6. Return loss of the antenna as a function of d_{stub}
 그림 6. d_{stub} 에 따른 안테나 반사손실



(a) Structure of the monopole antenna with parasitic radiators

(a) 후면에 기생방사판이 있는 모노폴 안테나 구조도



(b). Return loss of the antenna as a function of p_L

(b) p_L 에 따른 안테나 반사손실

Fig. 7. Structure and return loss of the monopole antenna with parasitic conductor on back plane

그림 7. 후면에 기생 도체를 갖는 안테나 구조 및 반사손실

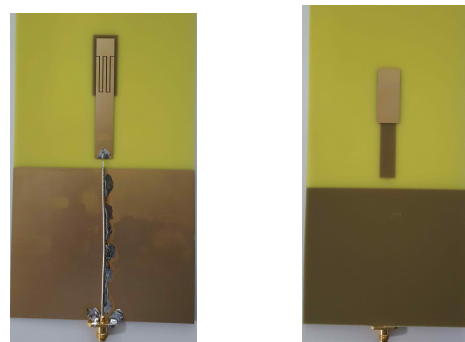
안테나에 기생소자를 부착하여 안테나의 성능과 공진점을 개선하며[14],[16], 기생소자의 위치는

급전구조와 안테나 방사부 근처에 놓는다. 본 연구에서는 그림7과 같이 안테나 방사부 뒷면에 배치하였으며, 기생소자의 크기 p_w 는 14mm, 안테나 방사부와 기생도체판 사이의 거리 p_d 는 2mm로 제한하였다. 기생도체의 길이 p_L 를 40mm, 50mm, 60mm로 변화시킬 경우의 공진점 변화에 대하여 분석하였다. 기생도체의 크기에 따라서 첫 번째 공진점과 두 번째 공진점에서 공진특성 및 매칭특성이 개선됨을 확인할 수 있다.

4. 안테나 설계 제작 및 실험

앞에서는 본 논문에서 제안한 MZR metamaterial 모노폴 안테나에서 IDC, 전송선로 길이, 스텐브 길이, 기생도체부의 크기에 따른 공진점, 반사손실 및 매칭의 개선정도에 대하여 분석하였다.

현재 우리나라에서는 700MHz 대역을 UHD 방송 채널(698~710MHz, 753~771MHz), 재난망 통신(718~728MHz, 773~743MHz), 통신대역(728~748MHz, 783~803MHz)으로 할당하였으며, WiFi 대역으로 2.45GHz를 할당하여 사용하고 있다. 향후 무선서비스에 대비하고, 상기 대역에서 동작하는 MNG Metamaterial 단위셀을 사용한 듀얼 밴드 안테나를 설계 제작하여 실험을 하였다.



(a) Front face (b)Back face

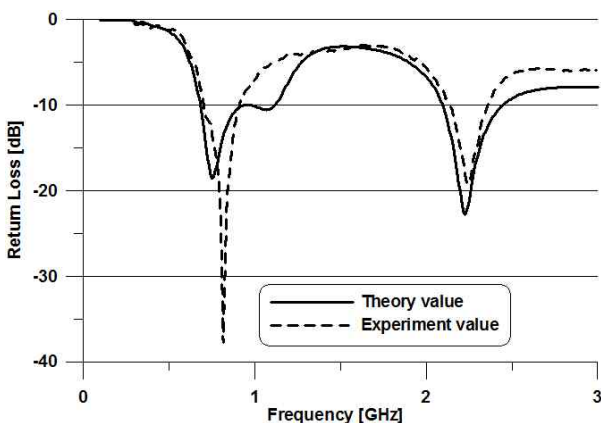
Fig.8 Front and back face designed antenna

그림8. 제작한 안테나 전면과 후면

앞에서 분석한 결과를 사용하여 최적의 안테나를 설계하였다. 안테나 접지영역 크기는 100×50mm²이고, 방사부는 100×100mm²로 제한 하였으며, IDC에서 n은 5개, 길이는 20mm, 공진기 전송선로 길이는 20mm, 스텐브의 길이는 10mm, 모노폴 안테나의 폭은 10mm, 기생도체판의 크기는 14×40mm²이다. 안테나는 기관의 상대 유전율이 4.4이고, 손실

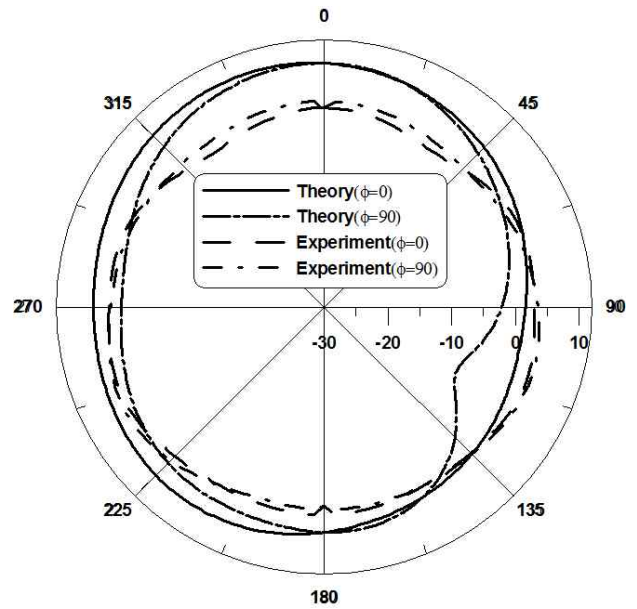
탄젠트가 0.002이고, 두께가 0.8mm인 FR-4 기판에 제작하였으며, 제작된 안테나는 그림 8과 같다.

제작한 안테나의 특성 실험은 구미전자정보기술원이 보유하고 있는 ZVA40(Rohde & Schwarz) 회로망 분석기와 OTA 방사패턴 측정기를 사용하여 제작한 안테나의 반사손실과 방사특성을 각각 실험하였으며, 실험결과는 그림9와 같으며, 안테나 측정항목에 대한 이론값과 실험값의 비교를 표2에 제시하였다. 그림9은 제작한 안테나의 반사손실과 750MHz와 2.45GHz에서 방사패턴을 이론값과 실험값을 나타내고 있다. 반사손실은 첫 번째와 두 번째 공진점은 이론값과 실험값은 동일하였다. 실험결과 첫 번째 공진점에서 8dB 대역폭과 이득은 각각 320MHz(42.7%), 5.28dB 이며, 두 번째 공진점에서 6dB 대역폭과 이득은 각각 540MHz(21.6%), -0.46dB이다. 제작한 안테나의 이론값과 실험값의 오차는 대역폭의 경우 750MHz에서 대역폭과 안테나 이득은 190MHz, 2dB 오차가 발생하였으며, 2.45GHz에서 이득과 대역폭은 80MHz와 2dB정도 오차가 발생하였다. 이것은 케이블 및 실험측정상의 오차로 인한 결과로 사료된다. 방사패턴은 대체적으로 전방향 특성을 가지고 있는 것으로 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 MZR metamaterials 단일 셀을 모노폴 안테나에 적용함으로써 이중대역의 안테나 설계가 용이함을 확인할 수 있었다.



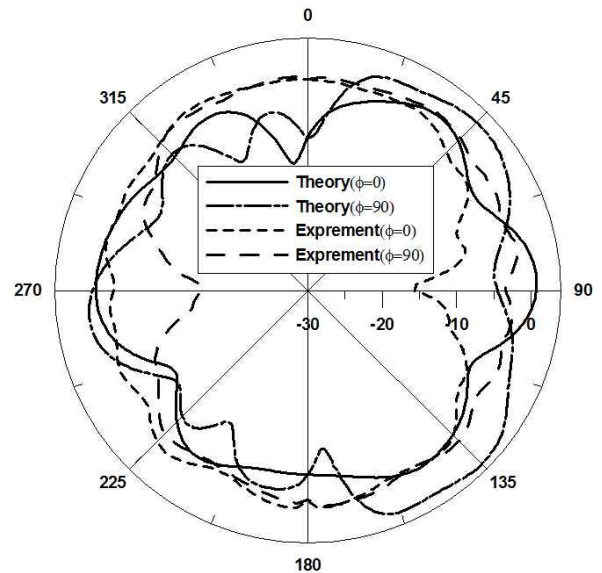
(a). Comparison of theoretical and experimental values of the return loss of a designed antenna

(a) 설계한 안테나의 반사손실의 이론값과 실험값의 비교



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

(b) 750MHz에서의 방사패턴의 이론값과 실험값 비교



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

(c) 2.45GHz에서 방사패턴의 이론값과 실험값 비교

Fig. 9. Experimental results of proposed antenna

그림 9. 제안한 안테나의 실험결과

Table 2. Comparison of theoretical and experimental values of proposed monopole antenna with MZR metamaterial unit cell

표2. 제안한 MNZ metamaterial 모노폴 안테나의 이론 및 실험값 비교

Frequency	Item	Theory value	Experiment value
0.75 (GHz)	Band width	1.17~0.67(8dB) 0.51(67.7%)	1.01~0.69(8dB) 0.32(42.7%)
	Gain	7.73dB	5.28dB
	Directivity	4.46dB	2.23dB
	efficiency	4.296dB	3.04dB
2.45 (GHz)	Band width	2.52~2.06(8dB) 0.46(19.2%)	2.5~1.96(6dB) 0.54(21.6%)
	Gain	2.68dB	-0.46dB
	Directivity	4.83dB	2.83dB
	efficiency	0.04dB	-3.29dB

III 결론

본 논문에서는 Mu-negative Metamaterial 단일 셀을 사용하여 700MHz대역과 2.45GHz 대역에서 동작하는 이중대역 모노폴 안테나 설계방법에 대하여 제안하였다. Mu-negative metamaterial 단일 셀은 interdigital capacitor 구조를 사용하였고, 안테나 방사부에 삽입함으로써 이중대역 안테나를 구현하였다. 또한 기생도체를 안테나 방사부 뒷면에 있도록 구현하여 안테나의 공진점을 제어할 수 있고, 대역폭을 개선하였다. 이러한 구조를 사용하여 최종적으로 750MHz UHD대역과 2.45GHz WiFi 대역에서 동작하는 안테나를 구현하였으며, 최적화를 통해 설계한 안테나를 제작하였다. 설계 제작한 안테나의 크기는 200×100mm²이고, 실험 결과 750MHz 대역에서의 8dB 대역폭과 이득특성은 각각 320MHz(42.7%), 5.28dB이었으며, 2.45GHz에서의 6dB 대역폭과 이득은 540MHz (21.6%), -0.46dB이었다. 공진점은 이론값과 실험값이 일치하였으며, 방사패턴은 두 대역에서 전방향 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 MNG metamaterial

단일셀을 사용하여 대역이 넓은 이중대역의 안테나를 설계할 수 있다.

References

- [1] H. Bukhari and K. Sarabandi, "Miniaturized omnidirectional horizontally polarized antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4280 - 4285, Oct. 2015.
DOI : 10.1109/TAP.2015.2456971
- [2] J. Oh and K. Sarabandi, "Low profile, miniaturized, inductively coupled capacitively loaded monopole antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 3, pp. 1206 - 1213, Mar. 2012.
DOI : 10.1109/TAP.2011.2180313
- [3] G. Ruvio and M. J. Ammann, "A novel wideband semi-planar miniaturized antenna," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 55, no. 10, pp. 2679 - 2685, Oct. 2007.
DOI : 10.1109/TAP.2007.905844
- [4] S. A. Rezaeieh, A. Zamani, K. S. Bialkowski, and A. M. Abbosh, "Unidirectional slot-loaded loop antenna with wideband performance and compact size for congestive heart failure detection," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 63, no. 10, pp. 4557 - 4562, Oct. 2015.
DOI : 10.1109/TAP.2015.2457935
- [5] O. O. Olaode, W. D. Palmer, and W. T. Joines, "Effects of meandering on dipole antenna resonant frequency," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 122 - 125, 2012.
DOI : 10.1109/LAWP.2012.2184255
- [6] C.-J. Lee, K. M. K. H. 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, Aug. 2006.
DOI : 10.1109/TAP.2006.87919

[7] M. A. Antoniadou and G. V. Eleftheriades, "Nonperiodic Disturbance of Mu-Negative Metamaterial Unit Cells" *IEEE Antennas Propag.*, vol. 64, no. 8, pp. 3319-3329, Aug., 2016.

DOI : 10.1109/TAP.2016.2574878

[15] M. Rafaei Booket, M. Vetsi, Z. Atlasbaf, A. Jafargholi, "Ungrounded composite right/left-handed metamaterials : design, synthesis and applications," *IET Microwave. Antenna Propag.* 2012. Vol.6, No. 11, pp. 1259-1268,

DOI : 10.1049/iet-map.2011.0436

[16] Ke Li, Cheng Zhu, Long Li, Yuan-Ming Cai, Chang-Hong Liang, "Design of Electrically Small Metamaterial Antenna With ELC and EBG Loading," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 678-681, 2013.

DOI : 10.1109/LAWP.2013.2264099 , "A Folded-monopole model for electrically small NRI-TL metamaterial antennas," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 425 - 428, 2008.

DOI : 10.1109/LAWP.2008.2008773

[8] M. A. Antoniadou and G. V. Eleftheriades, "Multiband compact printed dipole antennas using NRI-TL metamaterial loading," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 5613 - 5626, Dec. 2012.

DOI : 10.1109/TAP.2012.2211324

[9] 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, May 2015.

DOI : 10.1109/TAP.2015.2405559

[10] 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, Jul. 2015.

DOI : 10.1109/TAP.2015.2429741

[11] 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

[12] Jae-Hyun Park, Y.H. Ryu, J.G. Lee, J.H. Lee, "Esplion Negative Zeroth-Order Resonator Antenna," *IEEE Antennas Propag.*, vol. 55, no. 12, pp. 3710 - 3712, Dec, 2007.

DOI : 10.1109/TAP.2007.910505

[13] 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, June, 2010.

DOI : 10.1109/TAP.2010.2046832

[14] Sasan Adhi Rezacich, Marco A. Antoniadou, Amin M. Abbosh, "Bandwidth and Directivity Enhancement of Loop Antenna

BIOGRAPHY

Sang-Jae Lee (Member)



1980 : BS Degree in Electrical Engineering, Yonsei University
 1982 : MS degree in Electrical Engineering, Yonsei University
 1990 Ph.D degree in Electrical Engineering, Yonsei University
 1983-Present : Professor, School of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology

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