

이중대역 저지특성을 가지는 2.4 GHz WLAN 및 UWB 겸용 모노폴 안테나

Dual Band-notched Monopole Antenna for 2.4 GHz WLAN and UWB Applications

이 기 용¹ · 이 영 순^{2*}

¹국방기술품질원 유도전자센터

²금오공과대학교 전자공학부

Ki-yong Lee¹ · Young-soon Lee^{2*}

¹Missile Electronics Center, Defense Agency for Technology and Quality, Daegu, 42037, Korea

²Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do, 39177, Korea

[요 약]

본 논문에서는 이중대역 저지 특성을 가지는 2.4 GHz WLAN (2.4 ~ 2.484 GHz) 및 UWB (3.1 ~ 10.6 GHz) 겸용 모노폴 안테나를 제안하였다. 3.5 GHz WiMAX 대역 저지 특성을 얻기 위하여 기존의 방사패치 중앙에 위치한 U-형태 슬롯을 대신하여 방사패치 가장자리에 위치하는 한쌍의 L-형 슬롯이 사용되고, 반면에 7.5 GHz 대역 저지를 위하여 급전선 인근에 배치되는 한 쌍의 C-형태의 스트립 공진기를 사용한다. 제안된 안테나의 제작 및 측정 결과, 임피던스 대역폭 ($|S_{11}| \leq -10$ dB) 이 8.62 GHz (2.38 ~ 11 GHz) 로 2.4 GHz WLAN 대역을 포함한 UWB 대역을 충분히 만족하고, 반면에 3.5 GHz WiMAX 저지 대역 ($|S_{11}| > -10$ dB) 은 1.13GHz (3.15 ~ 4.28 GHz), 7.5 GHz 저지 대역은 800 MHz (7.2~8 GHz) 의 저지 대역폭을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 특히 사용하고자 하는 전 주파수 대역에서 안정되고 우수한 무지향성 방사패턴을 얻을 수 있었으며 2.51~6.81 dBi의 높은 이득 또한 얻을 수 있었다.

[Abstract]

In the paper, a dual band-notched monopole antenna is proposed for 2.4 GHz WLAN (2.4 ~ 2.484 GHz) and UWB (3.1 ~ 10.6 GHz) applications. The 3.5 GHz WiMAX band notched characteristic is achieved by a pair of L-shaped slots instead of the previous U-shaped slot on the center of the radiating patch, whereas the 7.5 GHz band notched characteristic is achieved by C-shaped strip resonator placed near to the microstrip feed line. The measured impedance bandwidth ($|S_{11}| \leq -10$ dB) is 8.62 GHz (2.38 ~ 11 GHz) which is sufficient to cover 2.4 GHz WLAN and UWB band, while measured band-notched bandwidths for 3.5 GHz WiMAX and 7.5 GHz band are 1.13 GHz (3.15 ~ 4.28 GHz) and 800 MHz (7.2 ~ 8 GHz) respectively. In particular, it has been observed that antenna has a good omnidirectional radiation patterns and higher gain of 2.51 ~ 6.81 dBi over the entire frequency band of interest.

Key word : WLAN/UWB, Monopole antenna, Dual band-notch, L-shaped slot, C-shaped strip resonator.

<https://doi.org/10.12673/jant.2017.21.2.193>



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.

Received 2 February 2017; Revised 30 March 2017

Accepted (Publication) 20 April 2017 (30 April 2017)

*Corresponding Author; Young-soon Lee

Tel: +82-54-478-7501

E-mail: yslee@kumoh.ac.kr

I. 서론

최근 다양하고 새로운 무선 기술이 개발되며 그에 따른 서비스의 수요 또한 급격하게 증가하고 있다. 또한 허용된 사용 주파수 대역의 유한성으로 인해 Wi-Fi 대역과 같이 수요가 많은 주파수 대역을 분산시키는 것과 같은 효율적인 주파수 대역 활용에 대한 관심이 예전부터 확산되어 왔다. 이런 문제를 해결하기 위한 방안 중 하나로 차세대 무선 기술이며 여러 장점을 갖는 UWB 무선 통신 기술의 응용에 관한 관심이 증대되고 있다.

UWB 무선 통신 기술은 미국의 연방 통신 위원회(FCC; Federal Communication Commission)로부터 2002년 2월 민간 사용에 대한 규제가 완화되었다. UWB의 허가 제원은 3.1~10.6 GHz의 주파수 대역을 사용하고 있다[1]. UWB는 근거리에서 대용량의 데이터를 고속 전송하는 무선통신 기술로 최소 100 Mbps에서 최대 1 Gbps 속도로 데이터를 전송하고, 기존 무선통신 기술인 블루투스, 와이파이 보다 전력효율이 높고, 넓은 임피던스 대역폭, 낮은 소비 전력 등과 같은 여러 장점을 가지므로 근거리 통신망(LAN), 홈 네트워크 무선기기, 레이더, 빌딩이나 제한된 영역에서 실시간으로 사람이나 객체의 위치를 자동으로 인식하는데 사용되는 위치 측위(RTLS) 등에 적합한 기술로 활용 분야가 집중 개발되고 있다. 이와 같이 UWB 무선 통신 기술의 활용 분야가 집중 개발됨에 따라 최근 견고하면서도 저렴한 가격으로 제작이 쉬운 평판형 형태의 안테나 개발에 대한 필요성이 대두되고 있다.

그러나 UWB 무선 통신의 사용 주파수 대역이 3.1~10.6 GHz로 넓은 동작 대역폭을 가진다. 사용 주파수 대역 내를 살펴보면 3.5 GHz (3.4~3.69 GHz) 대역을 사용하는 WiMAX, 5.2 GHz (5.15~5.35 GHz) 및 5.8 GHz(5.725~5.825 GHz) 대역을 사용하는 WLAN과 같은 무선 통신 기술 및 7.5 GHz (7.25~7.75 GHz) 대역을 사용하는 X-Band 위성 통신 시스템의 다운링크용과 같은 다양한 무선 통신 기술이 공존하고 있다. 이러한 무선 통신 기술이 혼용되어 사용되어질 경우 UWB 통신에 전자기적 간섭(electromagnetic interference) 문제가 필연적으로 발생할 수 있다.

이와 같이 전자기적 간섭 문제를 피하기 위하여 단일 혹은 다중 주파수 대역 저지 특성을 가지는 다양한 UWB용 안테나 설계 방법이 제시되고 있다. 본 논문에서는 대역저지를 위한 다양한 방법 중에서도 비교적 구조가 간단하여 설계가 용이한 방법 중 하나인 슬롯을 사용하는 방법을 소개하고자 한다. 슬롯을 사용하는 기존의 방법으로 방사패치 혹은 접지면 주위에 L-형태[2], E-형태[3], C-형태[4],[5], SRR-형태[6],[7], U-형태[8],[9] 등의 다양한 형태의 슬롯을 에칭 하여 주파수 대역 저지 특성을 가지도록 설계하는 방법들이 제안되었다.

본 논문에서는 UWB (3.1~10.6 GHz) 뿐만 아니라 2.4 GHz WLAN (2.4~2.484 GHz) 용으로도 사용이 가능하면서, UWB 주파수 대역 내에서 5 GHz WLAN 대역은 제외한 전자기적 간섭 문제의 발생이 예상되는 3.5 GHz WiMAX(3.4~3.69 GHz) 대역 및

7.5 GHz (7.25~7.75 GHz) 위성 통신 다운 링크용 대역의 이중대역 저지를 만족하는 안테나를 설계 하고자 한다.

먼저 2.4 GHz WLAN 및 UWB 용의 안테나 설계를 위해 참고 문헌 [9]에서 제안된 원형 패치에 다각형 패치가 결합된 마이크로 스트립 급전 모노폴 안테나를 사용하고자 한다. 참고 문헌 [9]에서는 WiMAX 단일 대역 저지를 위해 안테나의 패치 중앙에 U-형태의 슬롯을 사용하였다. 이 경우 패치에 유기되는 전류가 중앙에 위치한 U-형태의 슬롯으로 인해 다중 전류 경로를 가지게 되므로 모노폴 안테나의 무지향성 방사패턴이 왜곡될 수 있고 또한 안테나 이득에도 손실을 볼 수 있다는 점이 문제점으로 지적될 수 있다. 그러므로 본 논문에서는 안테나이득의 손실 없이 무지향성 방사패턴을 유지하는 3.5 GHz WiMAX 대역 저지를 위해서 중앙에 위치한 U-형태의 슬롯 대신에 패치의 좌측 및 우측 가장자리에 위치하면서 한 쪽 끝이 개방된 한 쌍의 L-형태의 슬롯을 사용하고자 한다.

한 쪽 끝이 개방된 한 쌍의 L-형태의 슬롯은 U-형태의 슬롯의 대칭축을 따라 절단된 결과로 볼 수 있으며 이는 참고 문헌 [10]에서 제안하는 $\lambda_g/2$ 공진형 슬롯의 대칭축을 따라 절단된 결과인 한 쪽 끝이 개방된 $\lambda_g/4$ 모노폴 슬롯과 유사한 개념이다. 반면에 7.5 GHz 위성 통신 다운 링크용 대역 저지를 위하여 안테나 이득과 방사패턴에 영향을 적게 줄 것으로 예상되는 참고 문헌 [11]에서 사용된 C-형태 도체 스트립 공진기를 급전선 양 옆에 배치하여 사용하고자 한다. 본 논문에서의 안테나 모의실험 설계는 CST사의 MWS를 사용하였다.

II. 안테나 구조 및 설계

본 논문에서 제안 하고자하는 한 쌍의 L-형태 슬롯 및 C-형태 스트립을 사용한 이중대역 저지 특성을 갖는 마이크로스트립 급전 모노폴 안테나를 그림 1에 제시하였다. 그림 1에서 r은 원형 패치의 반지름이며 Lf는 급전선의 길이이다. t1은 다각형의 높이 t2는 다각형의 폭이다. 또한 방사패치내의 L-모양의 슬롯에서는 SW2는 슬롯의 세로폭, SL2는 슬롯의 세로 길이, SL1는 슬롯의 가로길이, 마지막으로 SW1은 슬롯의 가로폭에 해당된다. 유전체 기판은 유전상수(ϵ_r)가 4.4, 두께가 1.6 mm, 기판 크기가 37 mm × 48 mm 인 FR4 기판을 사용하였다. 이와 같이 제안된 안테나 구조의 최적 설계를 위하여 몇 가지 중요한 설계 파라미터 변화에 따른 공진주파수 및 반사계수의 변화들을 분석하여 아래의 그림들에 제시하였다.

먼저 그림 2에서는 먼저 방사패치와 접지면 높이와의 사이 폭 g의 길이를 0.25 mm에서 0.75 mm까지 증가시키며 주파수 변화 및 반사계수 크기를 비교하였을 때, g가 0.75 mm일 때 최적의 모의실험 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 파라미터 g는 임피던스 정합을 위한 스테르브 역할을 하는 것으로 사료되며 UWB 전체 대역을 만족시키는 아주 중요한 파라미터 중 하나라고 할 수 있겠다.

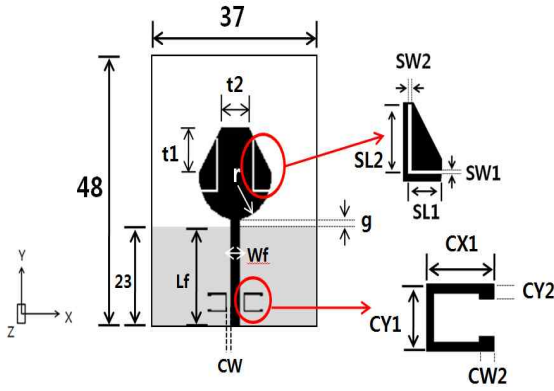


그림 1. 제안된 안테나
Fig. 1. The proposed antenna.

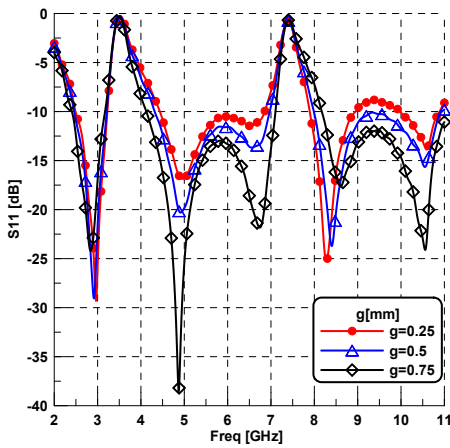


그림 2. g의 변화에 따른 모의실험 결과 반사계수
Fig. 2. Simulated return losses for different values of parameter g.

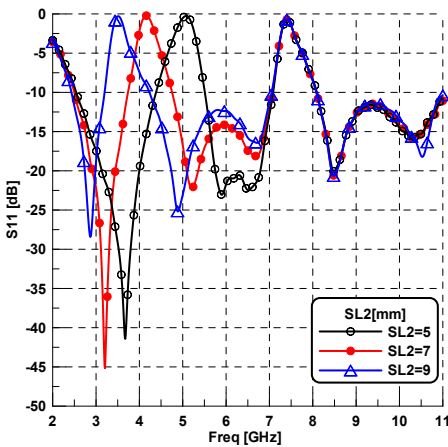


그림 3. SL2의 변화에 따른 모의실험 결과 반사계수
Fig. 3. Simulated return losses for different values of parameter SL2.

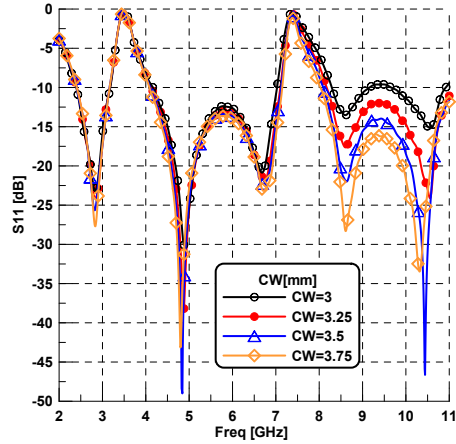


그림 4. CW의 변화에 따른 모의실험 결과 반사계수
Fig. 4. Simulated return losses for different values of parameter CW.

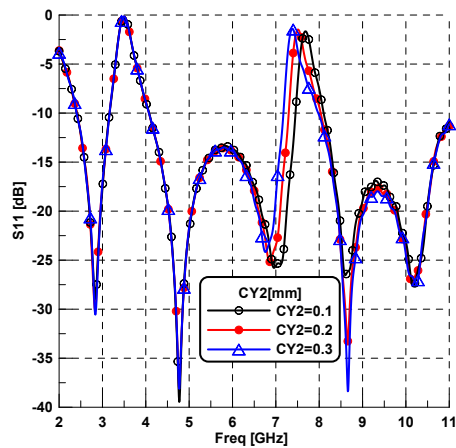


그림 5. CY2의 변화에 따른 모의실험 결과 반사계수
Fig. 5. Simulated return losses for different values of parameter CY2.

그림 3에서는 L형 슬롯의 세로길이 SL2 길이의 변화에 따른 경향을 제시하였다. 슬롯의 세로길이에 해당되므로 WiMAX 대역의 저지를 위한 공진주파수를 담당하는 파라미터라 예상된다. SL2의 길이를 5 mm에서 9 mm 까지 2 mm 간격으로 증가시키며 주파수 변화 및 반사계수의 크기를 비교하였을 때, SL2의 길이가 증가 할수록 반사계수의 변화는 거의 없고 예상했던바와 같이 대역저지 공진주파수가 낮아지는 현상을 볼 수 있으며, SL2의 길이가 9 mm 일 때 원하는 대역저지를 만족하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 SL2가 WiMAX 대역의 저지를 위한 공진주파수를 담당하는 주 파라미터임을 확인 할 수 있다.

그림 4에서는 C-형태의 공진기와 급전선 사이의 간격 CW의 변화에 따른 경향을 제시하였다. CW를 3 mm에서 3.75 mm까지 0.25 mm 간격으로 증가시키며 주파수 변화 및 반사계수의 크기를 비교하였을 때, CW가 증가할수록 high band (7.2 ~ 10.6 GHz) 에서 공진주파수의 변화는 거의 없고 반사계수의 변화가 크게 두드러졌다. CW의 간격이 3.25 mm 일 때 원하는

7.5 GHz 대역 저지 특성을 만족하는 것을 확인 할 수 있다.

마지막으로 그림 5에서는 C-형태의 공진기에서 개방된 양끝의 세로길이 CY2 길이의 변화에 따른 경향을 제시하였다. CY2의 길이를 0.1 mm에서 0.3 mm 까지 0.1 mm 간격으로 증가시키며 주파수 변화 및 반사계수의 크기를 비교하였을 때, CY2의 길이가 증가할수록 반사계수의 변화는 거의 없고 저지 대역의 공진주파수가 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. CY2가 0.3 mm일 때 최적의 파라미터를 만족하는 것을 확인할 수 있고, 7.5 GHz (7.25 ~ 7.75 GHz) 대역 저지를 만족 시키는 중요한 파라미터라고 생각된다.

지금까지 중요한 안테나 설계 파라미터 변화에 따른 공진주파수 및 반사계수의 변화를 분석해보면 방사패턴에 대칭으로 에칭된 L형 슬롯이 WiMAX (3.4 ~ 3.69 GHz) 대역저지 특성을 나타내는 것을 알 수 있고 C-형태의 스트립 공진기가 7.5 GHz (7.25 ~ 7.75 GHz) 대역저지 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 앞서 제시된 모의 실험결과를 통한 최적의 안테나 구조 설계 파라미터의 값을 표1에 제시하였다.

III. 제작 및 측정결과

앞서 분석된 결과를 토대로 최적화 된 구조를 적용하여 제작한 안테나를 그림 6에 제시하였다. 제작에는 모의 실험에서와 같이 두께 1.6 mm, 유전율 4.4인 FR-4기판이 사용되었다.

그림 7은 모의실험 결과와 실제 제작된 안테나의 반사 손실 측정결과를 비교하여 나타낸 그림이다. 그림 7에서 보는바와 같이 모의실험 결과 임피던스 주파수 대역폭 ($|S_{11}| \leq -10\text{dB}$) 이 2.4 GHz WLAN을 포함한 전체 UWB 대역 8.56 GHz (2.44 ~ 11 GHz) 를 만족하고 이 대역 내에서 WiMAX 저지 대역은 1.02 GHz (3.18 ~ 4.2 GHz), 7.5 GHz 저지 대역은 1.03 GHz (7.05 ~ 8.08 GHz) 를 가지는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 모의실험 결과는 2.4 GHz WLAN을 포함한 UWB의 전체 대역폭을 충분히 만족하면서 이중 대역저지 특성도 만족했다. 또한 실제 제작된 안테나의 측정 결과로는 2.4 GHz WLAN을 포함한 전체 UWB 대역 8.62 GHz (2.38 ~ 11 GHz) 를 만족하고, WiMAX 저지 대역은 1.13 GHz (3.15 ~ 4.28 GHz), 7.5 GHz 저지 대역은 800 MHz (7.2 ~ 8 GHz) 의 대역폭을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 모의실험 결과와 실제측정결과에서 조금의 차이는 있지만 2.4 GHz WLAN을 포함한 UWB 대역과 대역저지 특성을 충분히 만족 할 수 있는 결과이다.

그림 8에서는 각 주파수별 X-Z 평면 (H-plane) 에서의 2D 방사패턴의 모의실험 결과와 측정 결과를 비교하여 제시하였다. 그림 8에서 볼 수 있는 것처럼 모의실험 결과와 실제 측정 결과의 방사패턴의 경향이 비교적 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 또한 X-Z 평면(H-plane)에서는 사용하고자 하는 주파수 전 대역에서 무지향성인 방사패턴을 가지는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9에서도 각 주파수별 X-Y 평면 (E-plane) 에서의 2D 방사패턴의 모의실험 결과와 측정된 결과를 비교하여 제시하였

다. 그림 9에서 보는 바와 같이 방사 패턴의 형태가 8자 빔 형태와 다중 빔 형태를 가지는 것을 볼 수 있어 본 논문에서 제안한 안테나가 전형적인 다이폴 및 모노폴 안테나의 방사패턴 경향을 볼 수 있다. 특히 본 논문의 안테나가 사용하고자하는 주파수 전 대역에서 안정된 방사패턴을 보이며, 한 가지 강조하고 싶은 점은 X-Z 평면(H-plane)상에서 우수한 무지향성 방사패턴을 가지는 점이다.

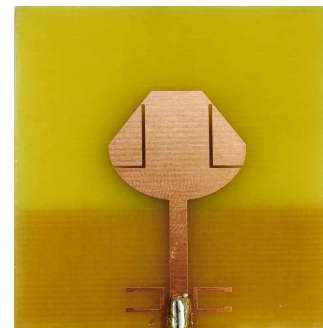
다만 모의실험 결과와 측정 결과 값이 다소 오차가 있는 것으로 보이는데, 이것은 방사패턴을 측정 할 때 흔하게 나타나는 현상으로 OTA 챔버 내에서 방사패턴 측정을 위해 SMA 커넥터와 연결된 케이블에 의한 감쇄 및 케이블의 꼬임과 장력으로 인해 방사패턴에 영향을 주었을 것으로 사료된다.

안테나의 이득은 기존 논문 구조의 U-형태[9] 의 슬롯의 사용 결과가 2.4 ~ 4.2 dBi의 이득을 가지는 반면에 본 논문에서의 측정결과로 2.51 ~ 6.81 dBi로 개선된 높은 이득을 얻을 수 있었다.

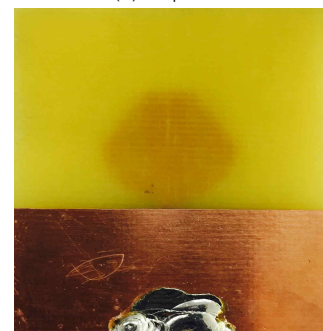
표 1. 제안된 안테나의 최적화 파라미터

Table 1. Optimization parameter of the proposed antenna.

parameter	values [mm]	parameter	values [mm]
A	37	CY1	3.5
B	48	CY2	0.3
Lf	19	CW	3.25
g	0.75	SL2	9



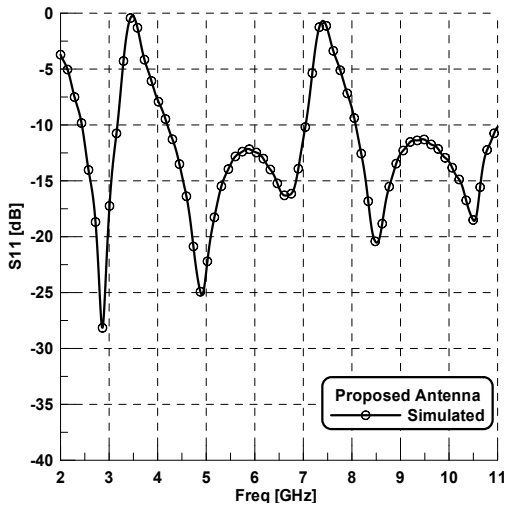
(a) Top view



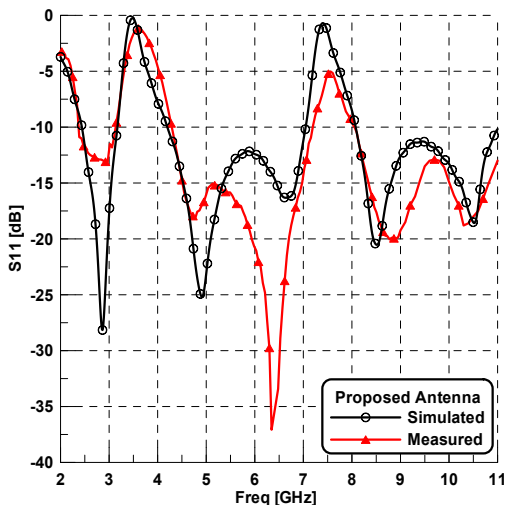
(b) Bottom view

그림 6. 제작된 안테나

Fig. 6. Fabricated antenna.

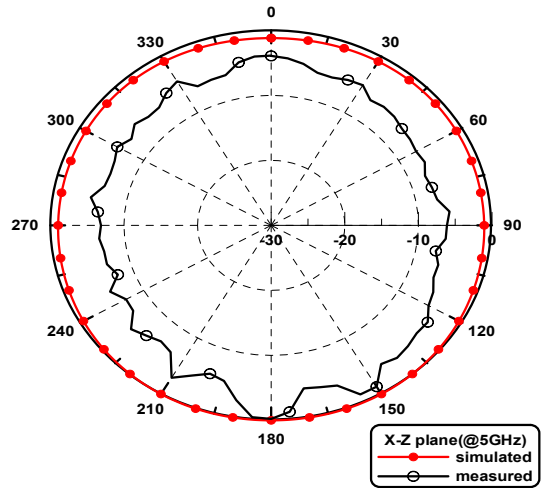


(a) Simulated result

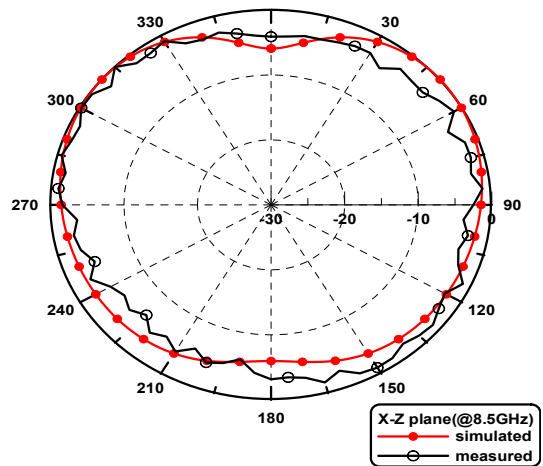


(b) Measured result

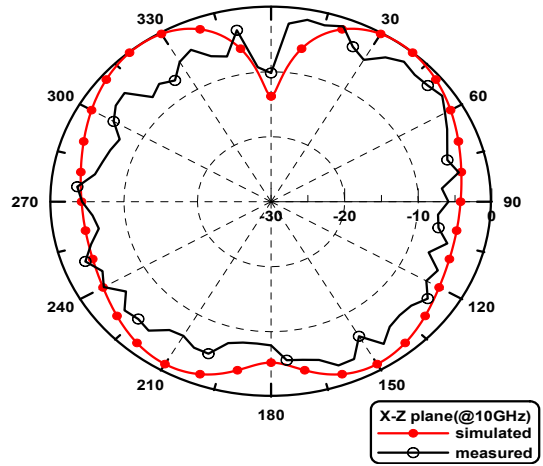
그림 7. 모의실험과 제작된 안테나의 반사계수
Fig. 7. Simulated and measured return losses of fabricated antenna.



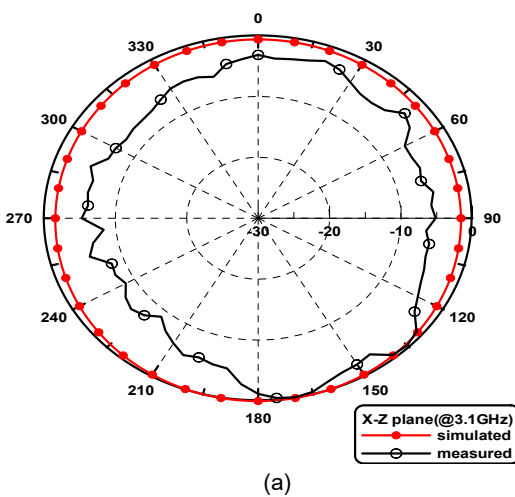
(b)



(c)



(d)



(a)

그림 8. 제작된 안테나의 2D 방사패턴(X-Z Plane)
Fig. 8. 2D radiation patterns of antenna.(X-Z Plane)

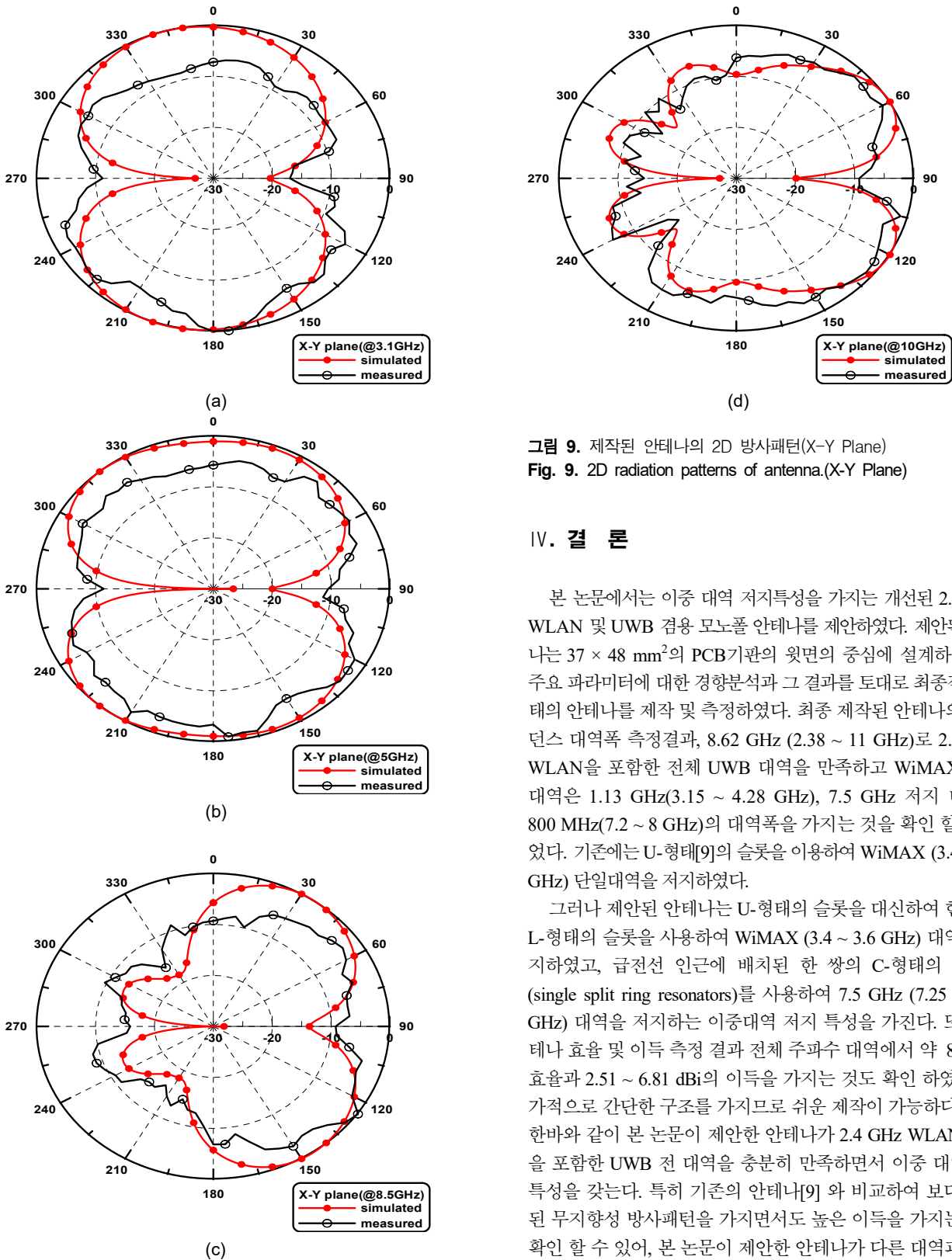


그림 9. 제작된 안테나의 2D 방사패턴(X-Y Plane)
 Fig. 9. 2D radiation patterns of antenna.(X-Y Plane)

IV. 결론

본 논문에서는 이중 대역 저지특성을 가지는 개선된 2.4 GHz WLAN 및 UWB 겸용 모노폴 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 $37 \times 48 \text{ mm}^2$ 의 PCB기판의 윗면의 중심에 설계하였으며 주요 파라미터에 대한 경향분석과 그 결과를 토대로 최종적인 형태의 안테나를 제작 및 측정하였다. 최종 제작된 안테나의 임피던스 대역폭 측정결과, 8.62 GHz (2.38 ~ 11 GHz)로 2.4 GHz WLAN을 포함한 전체 UWB 대역을 만족하고 WiMAX 저지 대역은 1.13 GHz(3.15 ~ 4.28 GHz), 7.5 GHz 저지 대역은 800 MHz(7.2 ~ 8 GHz)의 대역폭을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 기존에는 U-형태[9]의 슬롯을 이용하여 WiMAX (3.4 ~ 3.6 GHz) 단일대역을 저지하였다.

그러나 제안된 안테나는 U-형태의 슬롯을 대신하여 한 쌍의 L-형태의 슬롯을 사용하여 WiMAX (3.4 ~ 3.6 GHz) 대역을 저지하였고, 급전선 인근에 배치된 한 쌍의 C-형태의 SSRRs (single split ring resonators)를 사용하여 7.5 GHz (7.25 ~ 7.75 GHz) 대역을 저지하는 이중대역 저지 특성을 가진다. 또한 안테나 효율 및 이득 측정 결과 전체 주파수 대역에서 약 80%의 효율과 2.51 ~ 6.81 dBi의 이득을 가지는 것도 확인 하였다. 추가적으로 간단한 구조를 가지므로 쉬운 제작이 가능하다. 언급한바와 같이 본 논문이 제안한 안테나가 2.4 GHz WLAN 대역을 포함한 UWB 전 대역을 충분히 만족하면서 이중 대역저지 특성을 갖는다. 특히 기존의 안테나[9]와 비교하여 보다 안정된 무지향성 방사패턴을 가지면서도 높은 이득을 가지는 것을 확인 할 수 있어, 본 논문이 제안한 안테나가 다른 대역과의 간섭이 적은 이중대역 저지특성을 가지는 WLAN 및 UWB 대역 겸용 안테나로 바로 사용 가능할 것으로 기대된다.

향후 본 연구가 상용 제품화될 수 있도록 양산 준비에 따른

추가적인 연구를 실시할 계획이다.

References

- [1] First Report and Order, Revision of part 15 of the commission's rule regarding ultra-wideband transmission systems FCC 02-48, Federal Communications Commission, 2002.
- [2] Z. F. Yao, X. Wang, S. G. Zhou, L. Sun, B. H. Sun, and Q. Z. Liu, "A novel dual band-notched ultra-wideband slot antenna," in *IEEE International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, Kunming: China, pp. 66-69, Nov. 2008.
- [3] N. Ojaroudi, M. Ojaroudi, and N. Ghadimi, "UWB monopole antenna with WLAN frequency band-notched performance by using a pair of E-shaped slits," *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, Vol. 28, No. 12, pp. 1244-1249, Dec. 2013.
- [4] Q. X. Chu and Y. Y. Yang, "A compact ultra wideband antenna with 3.4/5.5 GHz dual band-notched characteristics," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 56, No. 12, pp.3637-3644, Dec. 2008.
- [5] A. Boutejdar, A. A. Ibrahim, and E. P. Burte, "A compact multiple band-notched planer antenna with enhanced bandwidth using parasitic strip lumped capacitors and DGS-Technique," *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 203-208, Feb. 2015.
- [6] M. C. Tang, S. Q. Xiao, T. W. Deng, D. Wang, J. Guan, B. Z. Wang, and G. D. Ge, "Compact UWB antenna with multiple band-notches for WiMAX and WLAN," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 59, No. 4, pp. 1372-1376, Apr. 2011.
- [7] M. Yoo and S. Lee "SRR- and CSRR-loaded ultra-wideband (UWB) antenna with tri-band notch capability," *Journal of Electromagnetic Waves & Applications*, Vol. 27, No. 17, pp. 2190-2197, Aug. 2013.
- [8] Q. X. Chu and T. G. Huang, "Compact UWB antenna with sharp band-notched characteristics for lower WLAN band," *Electronics Letters*, Vol. 47, No. 15, pp. 838-839, July, 2011.
- [9] B. Satyanarayana and S. Mulgi, "Design of planer band-notched monopole antenna for 2.4 GHz WLAN and UWB applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 11, pp. 2496-2501, Nov, 2015.
- [10] S. I. Latif, L. Shafai, and S. K. Sharma, "Bandwidth enhancement and size reduction of microstrip slot antenna," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, Vol. 53, No. 3, pp. 994-1003, Mar. 2005.
- [11] G. Srivastava, S. Dwari, and B. K. Kanaujia, "A compact triple band notch circular ring antenna for UWB applications," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 3, pp. 668-672, Mar, 2.15.



이 기 용 (Ki-Yong Lee)

2003년 2월 : 청주대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2011년 8월 : 금오공과대학교 전자 및 전기공학과 (공학석사)
 2014년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 대학원 전자공학과 박사과정
 2003년 1월 ~ 현재 국방기술품질원 근무
 ※ 관심분야 : 안테나 설계 및 해석, 안테나 산란 문제



이 영 순 (Young-Soon Lee)

1979년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
 1981년 2월 : 한국과학기술원 전자공학과 (공학석사)
 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
 1981년 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
 ※ 관심분야 : 전자기장 이론, 안테나 산란문제, 도파관 불연속, 전자기장 개구결합 문제, 전자기장 수치해석