

## 무선랜 MIMO용 L-형 슬롯 안테나 L-shaped Slot Antenna for WLAN MIMO Application

송원호<sup>1</sup> · 남주열<sup>1</sup> · 이기용<sup>2</sup> · 이영순<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>금오공과대학교 전자공학부

<sup>2</sup>국방기술품질원 대구센터 1팀

Won-Ho Song<sup>1</sup> · Ju-Yeol Nam<sup>1</sup> · Ki-Yong Lee<sup>2</sup> · Young-soon Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gyeongsangbuk-do 39177, Korea

<sup>2</sup>1st Daegu Team, Defense Agency for Technology and Quality, Daegu 42037, Korea

### [요 약]

본 논문에서는 격리도를 높이기 위한 디커플링 구조를 사용하지 않는 2.4 GHz (2.4 ~ 2.484 GHz) 및 5 GHz (5.15 ~ 5.825 GHz) WLAN용 MIMO (multiple-input-multiple-output) 안테나를 새롭게 제안하였다. 제안된 안테나는 PCB 좌측 및 우측 모서리에 위치 하면서 양 끝이 개방된 두 개의 L-형 슬롯에 의해 부유된(floating) 접지면에 에칭된 두 개의 n-형 슬롯으로 구성된다. 제안된 안테나는 크기가  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ 이고 두께가 1.6 mm, 유전율 4.3인 FR4 기판의 한쪽 면에서 설계 및 제작되었다. 제작된 안테나의 측정결과, 임피던스 대역폭 ( $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ )이 2.4 GHz 대역에서는 0.3 GHz (2.28 ~ 2.58 GHz), 5 GHz 대역에서는 0.89 GHz (5.11 ~ 6 GHz) 인 대역폭을 얻을 수 있었다. 또한 안테나의 전체 효율은 동작 주파수 전대역에서 80% 이상이며, 디커플링 구조를 사용하지 않았음에도 불구하고 상관계수는 0.05 이하의 매우 작은 값을 가진다.

### [Abstract]

In the present study, a dual-band multiple-input-multiple-output (MIMO) antenna covering WLAN frequency bands of 2.4 GHz (2.4 ~ 2.484 GHz) and 5 GHz (5.15 ~ 5.825 GHz) is newly presented to avoid use of decoupling structure for increasing isolation. The antenna consists of two L-shaped slots with n-shaped slots etched on the floating ground plane surrounded by open ended L-shaped slots which are placed in the left and right corner of PCB respectively. The proposed antenna is designed and fabricated on one side of FR4 substrate with dielectric constant of 4.3, thickness of 1.6 mm, and size of  $50 \times 50 \text{ mm}^2$ . It has been observed that the measured impedance bandwidths ( $S_{11} \leq -10 \text{ dB}$ ) are 0.3 GHz (2.28 ~ 2.58 GHz) in 2.4 GHz frequency band and 0.89 GHz (5.11 ~ 6 GHz) in 5 GHz frequency band respectively. In addition, It has been observed that the whole efficiency are more than 80 % in the whole operating frequency band and envelope correlation coefficient of the antenna is less than 0.05 as a very small value in spite of nothing of the decoupling structure.

**Key word** : Wireless local area network, Dual-band, Multiple-input-multiple-output, Without decoupling structure, Slot antenna.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2016.20.4.344>



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 9 June 2016; Revised 20 July 2016

Accepted (Publication) 10 August 2016 (30 August 2016)

\*Corresponding Author; Young-soon Lee

Tel: +82-54-478-7501

E-mail: yslee@kumoh.ac.kr

## I. 서론

최근 4G LTE (long-term evolution)와 같은 현대 무선통신 시스템의 경우 500 Mbps 이상의 고속 데이터 전송을 보장하고 동시에 다양한 전파 경로에 의해 전기장 세기가 약해지는 페이딩(fading) 현상을 방지하기 위해 MIMO (multiple input multiple output) 시스템을 필연적으로 사용하는 추세에 있다 [1]. 이와 같은 목적으로 사용되는 MIMO 시스템의 경우 송수신기에 2개 이상의 다수의 안테나를 사용하게 되는데, 안테나의 소형화 요구에 의해 각 안테나들이 서로 가까이 근접하게 되어 전자기적인 상호 간섭과 결합이 발생되므로 각 안테나가 임피던스 대역폭 및 방사패턴과 같은 원래의 고유한 특성을 유지할 수 없는 문제점이 발생하게 된다. 그러므로 각 안테나의 고유한 특성을 유지하면서 상호 결합을 최소화시켜 높은 격리도를 얻을 수 있는 MIMO 안테나 설계 기술이 MIMO 시스템에서 핵심 기술로 인식되고 있다.

최근 MIMO 안테나의 이러한 상호 결합을 줄이기 위한 다양한 방법이 제안되고 있다. 참고 문헌 [1]에서는 상호결합을 줄이기 위한 디커플링(decoupling) 구조로 두 안테나 사이에 굴곡형 T형 공진기를 사용하였고, 또한 참고 문헌 [1]에서 소개된 다양한 MIMO 안테나의 최근 설계기법들을 요약하면 다음과 같다. 높은 격리도 및 좋은 정합 특성을 얻기 위해 SRR (split ring resonator)[2], EBG (electromagnetic band gap)[3], 기생소자 (parasitic element)[4] 및 메타물질(metamaterial) 등과 같은 디커플링 구조를 배열된 안테나 사이에 배치하는 기법들이다. 그러나 이러한 디커플링 구조는 안테나 사이에서 정해진 일정한 공간을 필연적으로 확보해야 하므로 안테나의 크기가 증가되는 결과를 초래하고, 또한 디커플링 구조가 복잡하여 설계 및 제작에 어려움이 있다.

또한 최근 WLAN IEEE 802.11.n 규격의 2.4 GHz 대역 (2.4 ~ 2.484 GHz) 및 5 GHz 대역 (5.15 ~ 5.825 GHz) 에서 사용이 가능한 이중 대역용 MIMO 안테나 설계가 각광을 받고 있다. 예로 참고 문헌 [5]에서는 다층 디커플링 구조로 PCB 상층에는 CCL (capacitive loaded loop)들을 하층에는 상보(complementary) CCL들을 사용하였다. 이와 같은 이중대역용 MIMO 안테나의 경우 디커플링 구조가 다층 구조로 단일 대역용 디커플링 구조보다 더욱 복잡해지는 문제점이 있다. 참고문헌[6]에서는 디커플링 구조를 사용하지 않은 WLAN 이중대역용 MIMO 안테나로 4소자 마이크로스트립 급전방식의 원형(annular) 슬롯 구조 안테나를 제시하였다. 4소자 슬롯 중에서 반경이 큰 2소자 슬롯은 2.4 GHz에서 동작하고 나머지 반경이 작은 2소자 슬롯은 5.2 GHz에서 동작한다. 그러나 원형 슬롯의 경우 공진형 안테나 구조로 임피던스 대역폭이 비교적 좁아, 5.2 GHz에서의 대역폭 200 MHz는 문제점으로 지적될 수 있고, WLAN 5 GHz 대역의 상위 대역인 5.47 ~ 5.825 GHz 대역을 사용할 수 없다는 점 또한 문제점으로 지적될 수 있다.

본 논문에서는 디커플링 구조를 사용하지 않고 WLAN 이

중대역용(2.4 ~ 2.484 GHz 및 5.15 ~ 5.825 GHz) MIMO 안테나를 설계할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 참고 문헌 [6]에서는 디커플링 구조 없이도 높은 격리도를 얻을 수 있는 이유를 적정 간격을 유지할 수 있는 안테나 배치 구조 및 직교성 급전 방식으로 해석하였다. 본 논문에서의 제안 이유는 슬롯 구조의 안테나를 사용한 것이 높은 격리도의 가장 큰 이유라고 사료되고, 이러한 근거의 이유를 참고 문헌 [6]에서 2.4 GHz 및 5.2 GHz 공진주파수 대역에서 슬롯 안테나의 접지면에 유기된 면전류분포 결과를 제시한 그림 6을 통해, 면전류가 원형 슬롯 주변에만 집중되어 있는 결과로부터 설명할 수 있겠다.

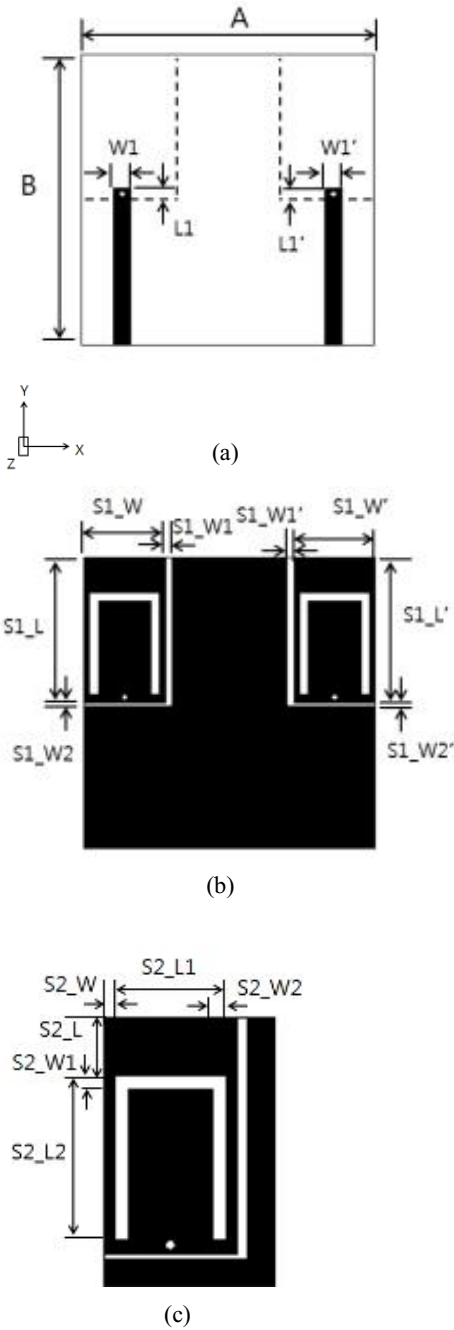
그러므로 본 논문에서는 PCB 접지면의 가장자리에 위치하면서 대역폭이 넓은 L-형 모노폴 슬롯[7]을 기본 구조로 선택하여 5 GHz에서 동작할 수 있도록 설계하고, 이 슬롯에 의해 부유된 접지면 내부에 n-형 슬롯을 추가하여 2.4 GHz에서 동작할 수 있는 2소자 MIMO 안테나를 제안하고자한다. 또한 마이크로스트립 급전 구조를 참고 문헌 [6] 및 [7]에서는 개방 중단 구조를 사용하였으나, 대역폭을 보다 넓게 하기위하여 본 논문에서는 참고 문헌 [8]에서와 같이 급전선의 개방 중단 부분을 도체 비아(via)를 통해 부유된 접지면과 단락 중단하는 급전구조를 사용하였다. 본 논문에서의 MIMO 안테나 모의실험 설계는 CST사의 MWS를 사용하였다.

## II. 안테나 구조 및 설계

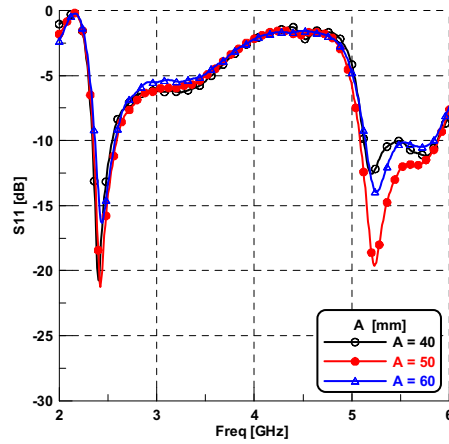
본 논문에서 제안 하고자하는 안테나의 구조를 그림 1에 제시하였다. 그림 1(a)는 PCB 윗면 평면도로 비아를 통해 단락 중단된 마이크로스트립 급전 구조이고, 그림 1(b)는 PCB의 접지면 평면도로 5 GHz 공진을 위해 접지면 가장자리에 위치하면서 양 끝이 개방된 L-형 모노폴 슬롯과 2.4 GHz 공진을 위해 L-형 슬롯에 의해 부유된 접지면 내부의 n-형 슬롯이 에칭된 2소자 MIMO 안테나 구조이며, 그림 1(c)는 그림 1(b)에서 n-형 슬롯을 가진 L-형 모노폴 슬롯 1소자의 확대된 평면도이다.

설계된 안테나는 유전율 4.3, 두께 1.6 mm인 FR4 epoxy 기판이 사용 되었으며 기판의 크기는  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  이다. 3 mm의  $50 \Omega$  전송선로와 접지면의 슬롯을 이용하여 이중 대역 공진을 발생시킨다. 접지면에서 양 끝단이 개방되는 L-형 슬롯에서 5.15 ~ 5.825 GHz대역의 1차 공진을 발생시키며, 그 내부에 있는 n-형 슬롯에서 2.4~2.484 GHz의 2차 공진을 발생시킨다. 안테나의 소형화 및 MIMO 안테나로의 활용성, 그리고 높은 격리도를 위하여 슬롯과 급전선을 한쪽 모서리에 위치시켰다.

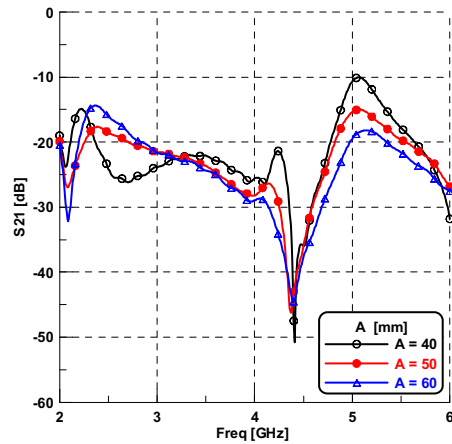
그림 2와 그림 3에서는 PCB의 가로 길이인 A의 변화에 따른 S-parameter  $S_{11}$  및  $S_{21}$  경향을 각각 나타내었다. 먼저 A의 크기가 달라짐에 따라 두 안테나의 인접한 정도가 달라지게 된다. 이는 곧 MIMO 안테나에서 중요한 격리도를 조절 할 수 있다는 이야기이다. A의 길이를 40 mm에서 60 mm 까지 10



**그림 1.** 제안된 안테나의 구조  
 (a) 단락 종단된 마이크로스트립 급전 구조  
 (b) 제안된 2소자 모노폴 슬롯 기반의 MIMO 안테나 구조  
 (c) n-형 슬롯을 가진 모노폴 슬롯의 확대된 그림  
**Fig. 1.** Configuration of the proposed antenna. (a) Configuration of short-circuited microstrip feed-line, (b) Configuration of the proposed 2 elements monopole slot-based MIMO antenna, and (c) Enlarged view of the monopole slot with n-shaped slot.



**그림 2.** A 변화에 따른 모의실험 결과  $S_{11}$   
**Fig. 2.** Simulated  $S_{11}$  for different values of parameter A.



**그림 3.** A 변화에 따른 모의실험 결과  $S_{21}$   
**Fig. 3.** Simulated  $S_{21}$  for different values of parameter A.

mm 간격으로 변화시키면서  $S_{11}$  과  $S_{21}$  을 비교하였다. 먼저 그림 2를 보았을 때 A가 40 mm와 60 mm일 때는 5 GHz 대역에서 Threshold한 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그림 3을 보면 두 안테나의 거리가 멀어질수록  $S_{21}$  의 값이 점점 작아지는 것을 (즉, 격리도가 증가되는 것을) 확인할 수 있다. -10 dB를 기준으로  $S_{11}$  과  $S_{21}$  비교 그래프를 종합한 결과 가로 길이 A는 50 mm가 적당하다는 결론을 지었다.

그림 4는 급전선로의 길이를 결정하는 L1의 변화에 따른  $S_{11}$  결과를 비교한 결과이다. L1이 증가하면 2.4 GHz WLAN 대역에서는 공진주파수의 이동이 일어나지 않으며 반사손실 값이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 5 GHz WLAN 대역에서는 L1이 증가하면 공진주파수와 대역폭의 변화가 일어나는 것을 확인할 수 있다. L1이 1.5 mm나 3 mm인 경우는 -10 dB 기준 대역폭이 작아 사용할 수가 없다. L1이 2 mm인 경우 가장 넓은 대역폭을 가지는 것을 확인 하였다.

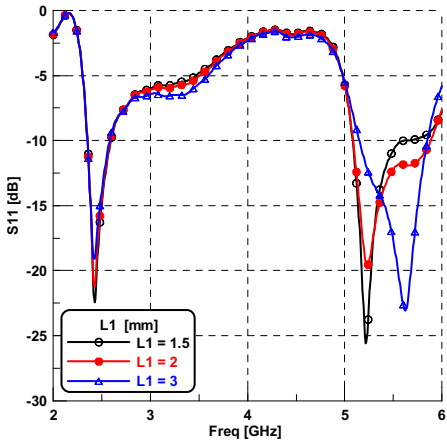


그림 4. L1 변화에 따른 모의실험 결과  $S_{11}$   
 Fig. 4. Simulated  $S_{11}$  for different values of parameter L1.

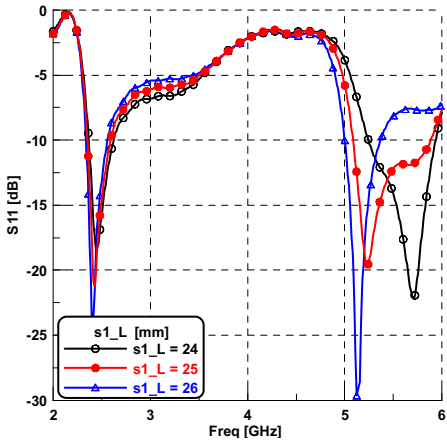


그림 5. S1\_L 변화에 따른 모의실험 결과  $S_{11}$   
 Fig. 5. Simulated  $S_{11}$  for different values of parameter S1\_L.

표 1. 제안된 안테나의 최적화 파라미터  
 Table 1. Optimization parameter of the proposed antenna.

parameter	value [mm]	parameter	value [mm]
A	50	S1_W	14
B	50	S1_W1	1.2
W1	3	S1_W2	0.5
L1	2	S2_L1	12
S1_L	25	S2_L2	17.5
S2_W1	1.5	S2_W2	1.5

그림 5는 접지면을 floating하는 L-형 슬롯의 세로 길이에 해당하는 S1\_L의 변화에 따른 S11 경향을 나타내었다. L-형 슬롯의 길이에 따라 5 GHz 대역에 많은 변화가 발생하였다. 또

한 접지면과 부유되는 위치가 변화 하면 내부 n-형 슬롯과의 거리도 변하게 되기때문에 2.4 GHz 대역에서도 변화가 발생하였다. S1\_L이 25 mm일 때 최적의 대역폭을 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 그림 2~ 5에 제시된 각 파라미터 변화에 따른 경향 분석을 토대로, 표 1에 모의실험 최적화된 2소자 MIMO 안테나의 설계 파라미터 값을 제시하였다.

### III. 제작 및 측정결과



(a) top



(b) bottom

그림 6. 제작된 안테나 (a) top view, (b) bottom view  
 Fig. 6. Fabricated antenna. (a) top view and (b) bottom view.

앞서 분석된 결과를 바탕으로 최적화된 구조를 적용하여 제작한 안테나를 그림 6에 제시하였다. 제작에는 모의실험 값과 동일한 두께 1.6 mm, 유전율 4.3인 FR-4 기판이 사용되었다.

그림 7은 모의실험 결과와 실제 제작된 안테나의 S11을 측정하여 비교한 그래프이다. 모의 실험 결과 임피던스 대역폭

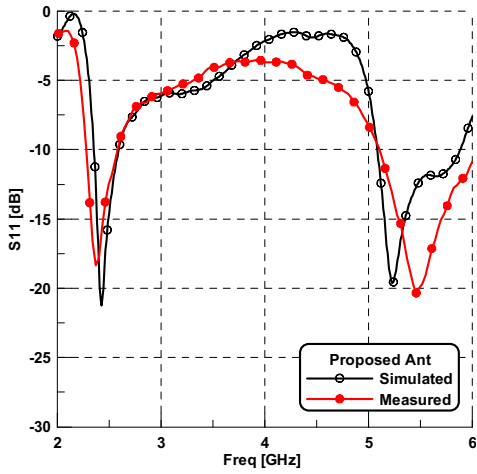


그림 7. 제작된 안테나의  $S_{11}$   
 Fig. 7.  $S_{11}$  of fabricated antenna.

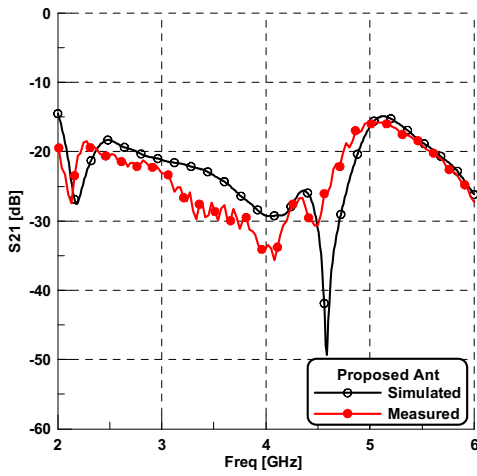
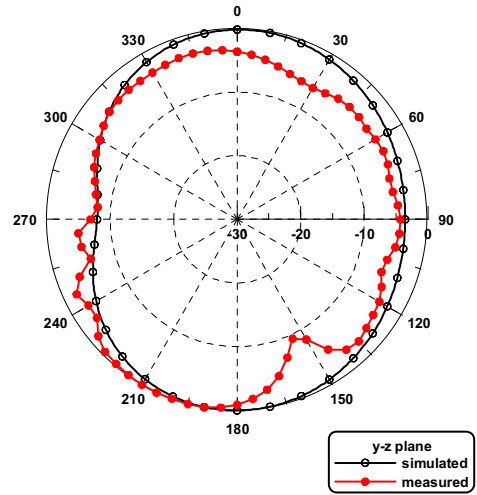
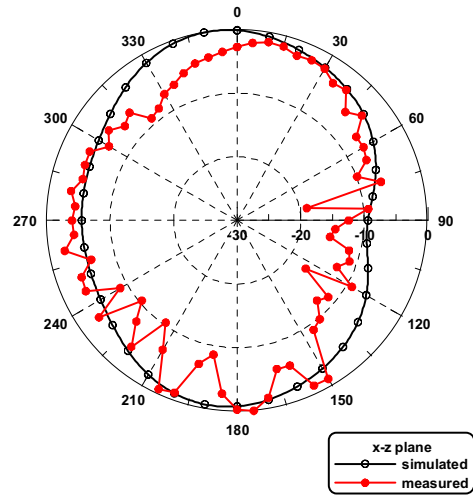


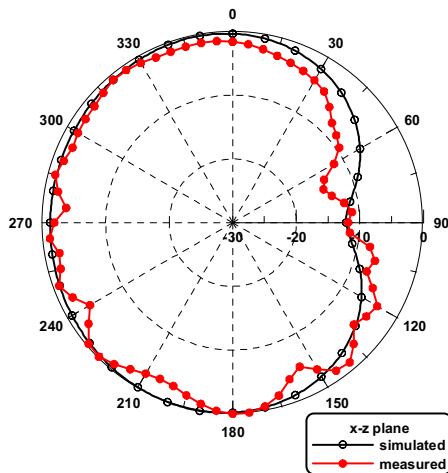
그림 8. 제작된 안테나의  $S_{21}$   
 Fig. 8.  $S_{21}$  of fabricated antenna.



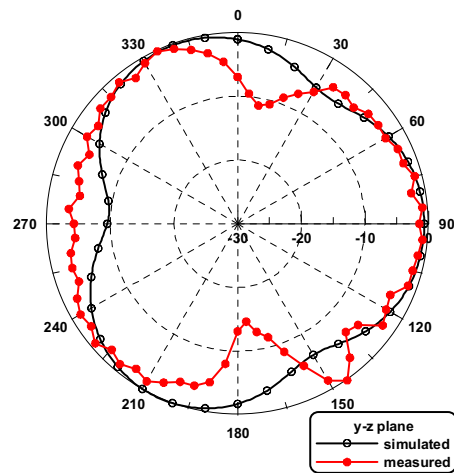
(b) Y-Z plane at 2.4 GHz



(c) X-Z plane at 5.5 GHz



(a) X-Z plane at 2.4 GHz



(d) Y-Z plane at 5.5 GHz

그림 9. 제작된 안테나의 2D 방사패턴  
 Fig. 9. Measured 2D radiation patterns of fabricated antenna.

( $S_{11} \leq -10$  dB)이 2.4 GHz 대역에서 0.23 GHz (2.35 ~ 2.58 GHz), 5 GHz 대역에서 0.79 GHz (5.09 ~ 5.88 GHz)를 가지는 것을 알 수 있으며, 측정 값은 0.3 GHz (2.28 ~ 2.58 GHz), 0.89 GHz (5.11 ~ 6 GHz)를 가지는 것을 확인 할 수 있었다. 제작 후 측정 결과값이 모의실험값 보다 대역폭이 증가 한 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과는 참고문헌 [6]의 결과 임피던스 대역폭이 2.4 GHz 대역에서 0.15 GHz, 5.2 GHz 대역에서 0.2 GHz인 결과와 비교해볼 때 임피던스 대역폭이 많이 증가 개선된 결과임을 알 수 있다.

그림 8은 모의실험 결과와 실제 제작된 안테나의  $S_{21}$ 을 측정 하여 비교한 그래프이다. 그림에 나타나 바와 같이 전 설계하고자 하는 전 대역에서 -10 dB 보다 더 작은  $S_{21}$  값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 측정결과  $S_{21}$ 이 2.4 GHz (2.4 ~ 2.484 GHz) 대역에서는 최저 -20.2 dB (-20.2 ~ -20.7 dB), 5 GHz (5.15~5.825 GHz) 대역에서는 최저 -15.9 dB (-15.9 ~ -23.1 dB) 값을 가짐을 알 수 있었다. 이를 통해 두 안테나 사이에 높은 격리도를 가지는 것을 확인 할 수 있다.

그림 9는 각 주파수 별로 모의실험 한 2D 방사패턴 결과 값과 실제 측정한 2D 방사패턴 결과값을 비교하여 나타낸 그래프이다. X-Z 평면에서는 대체적으로 등방성 구조가 나타난 것을 확인 할 수 있다. Y-Z 평면에서는 5.5 GHz에서 90° 방향으로 방사세기가 좀 더 센 것을 확인 할 수 있다.

MIMO안테나의 경우 전체 효율을 구하는 공식은 다음과 같다.

$$\eta_{total} = \eta_{radiation} (1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2) \tag{1}$$

이와 같은 안테나 전체효율  $\eta_{total}$ 은 그림 10과 같이 설계하고자 하는 WLAN 대역에서 80% 이상의 높은 효율을 가지는 것을 확인할 수 있다.

상관계수(ECC; envelope correlation coefficient)는 MIMO 안테나의 성능을 평가할 수 있는 중요한 파라미터이다. 상관계수를 근사화 하여 구하는 공식[1]은 다음과 같다.

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{12}^* S_{22}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \tag{2}$$

본 논문에서는 두 안테나를 완벽한 대칭으로 설계하였기 때문에,  $S_{11}=S_{22}$ ,  $S_{12}=S_{21}$ 이다.

그리하여 수식을 조금 더 간단하게 표현하면 아래식과 같다.

$$\rho_e = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{21}^* S_{11}|^2}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)^2} \tag{3}$$

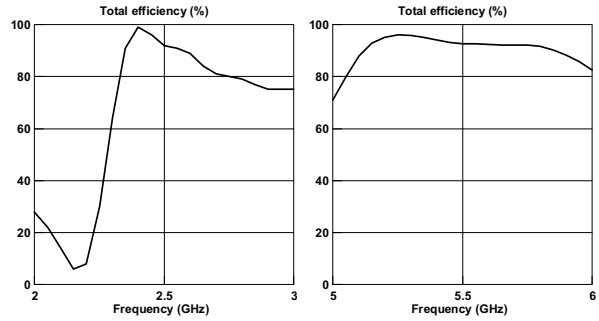


그림 10. 제안된 안테나의 전체 효율  
Fig. 10. Total efficiency of the proposed antenna.

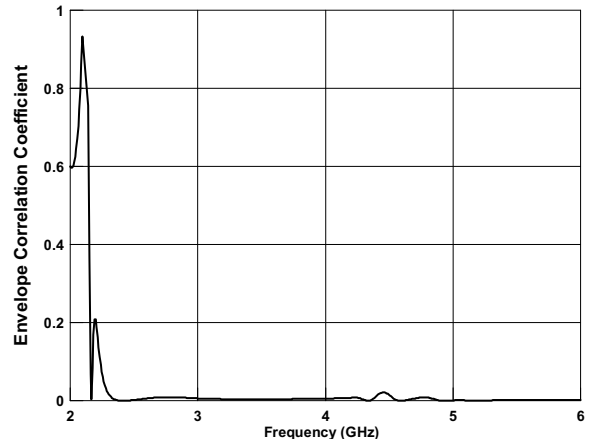


그림 11. 안테나의 상관계수  
Fig. 11. ECC of the proposed antenna.

이 근사식은 무손실 안테나의 경우 기지국에서는 0.7 이하, 휴대 단말기에서는 0.5 이하를 만족하여야 한다.

그림 11에서는 식 (3)의 근사식을 이용하여 계산된 상관계수  $\rho_e$ 의 결과를 제시하였다. WLAN 대역에서  $\rho_e$ 가 0.05 이하로 만족할 만한 매우 작은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서 양 끝단이 개방되는 L-형 슬롯에 의해 floating (접지면과 부유)된 접지면 내부의 n-형 슬롯 구조의 이중대역용 WLAN 대역 MIMO 안테나를 제안하였다. 제안된 안테나는 디커플링 구조가 필요없어 50×50 mm<sup>2</sup>의 PCB의 모서리에 안테나를 설계하여, 기존 참고문헌 [6]에서의 60×60 mm<sup>2</sup>의 PCB 크기보다 그 크기를 줄일 수 있었다. 각각의 중요한 안테나 설계 파라미터에 대한 모의실험 경향 분석 결과를 토대로 최적화된 구조의 안테나를 설계 및 제작을 하였다. 제작된 안테나의 측정 결과 임피던스 대역폭( $S_{11} \leq -10$  dB)이 2.28 ~

2.528 GHz 및 5.11 ~ 6 GHz 로 IEEE 802.11.n WLAN 규격의 동작 주파수 대역 2.4 ~ 2.484 GHz 및 5.15 ~ 5.825 GHz를 충분히 만족함을 알 수 있었다. 또한 MIMO 안테나의 중요한 특성인 격리도를 나타내는  $S_{21}$ 의 측정값이 동작 주파수 전 대역에서 -15.7 dB 이하의 값을 가지고, 측정된 S-parameter로부터 계산된 상관계수  $\rho_e$  또한 동작 주파수 전대역에서 0.05 이하의 값을 가지는 것이 확인되어 본 논문에서 제안된 MIMO 안테나가 비교적 높은 격리도 특성을 가짐을 알 수 있다. 방사 패턴의 형태도 X-Z 평면에서 비교적 등방성에 가까운 형태이고, 안테나 효율 또한 80 % 이상의 높은 효율을 가짐을 알 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제안된 안테나는 2.4 GHz 및 5 GHz 이 중 대역 사용이 가능한 디커플링 구조가 필요없는 WLAN용 MIMO 안테나로 사용이 바로 가능할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

### 참고 문헌

[1] Y. Liu, L. Yang, Y. Liu, J. Ren, J. Wang, and X. Li, "Dual-band planar MIMO antenna for WLAN application," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 1, pp. 2257-2262, Oct. 2015.  
 [2] P. Gao, H. Sailing, X. Wei, Z. Xu, N. Wang, and Y. Zheng,

"Compact printed UWB diversity slot antenna with 5.5-GHz band-notched characteristics," *IEEE Antenna and Wireless Propagation Letters*, Vol. 13, No. 1, pp. 376-379, 2014.  
 [3] L. Peng, and C. L. Ruan, "UWB band-notched monopole antenna design using electromagnetic-band structures," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 59, No. 4, pp. 1074-1081, 2011.  
 [4] Z. Li, Z. Du, M. Takahashi, K. Saito, and K. Ito, "Reducing mutual coupling of MIMO antennas with parasitic elements for mobile terminals," *IEEE Transactions On Antennas And Propagation*, Vol. 60, No. 2, pp. 73-451, Feb. 2012.  
 [5] M. S. Sharawi, A. B. Numan, and D. N. Aloï, "Isolation improvement in a dual-band dual-element MIMO antenna system using capacitively loaded loops," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 134, No. 1, pp. 247-266, 2013.  
 [6] M. U. Khan, and M. S. Sharawi, "A dual-band microstrip annular slot-based MIMO antenna system," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 57, No. 2, pp. 360-364, 2015.  
 [7] 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.  
 [8] P. Y. Lin, C. L. Li, and C. K. Huang, "Impedance bandwidth improvement for microstrip-feed slot antennas using short-circuited termination," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 45, No. 1, pp. 67-70, 2005.



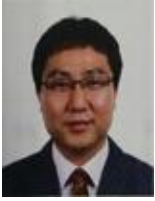
**송 원 호 (Won-Ho Song)**

2010년 2월 : 구미대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 2013년 2월 : 금오공과대학교 전자 및 전기공학과 (공학석사)  
 2013년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학과 박사과정  
 ※ 관심분야 : 안테나 설계 및 해석, RF 회로설계



**남 주 열 (Joo-Yeol Nam)**

2010년 2월 : 구미대학교 정보통신공학과 (공학사)  
 2013년 2월 : 금오공과대학교 전자 및 전기공학과 (공학석사)  
 2013년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 전자공학과 박사과정  
 ※ 관심분야 : 안테나 설계 및 해석, RF 회로설계



**이 기 용 (Ki-Yong Lee)**

2003년 2월 : 청주대학교 정보통신공학과 (공학석사)  
2011년 8월 : 금오공과대학교 전자 및 전기공학과 (공학석사)  
2014년 3월 ~ 현재 : 금오공과대학교 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 : 전자기이론, 안테나 산란문제, 도파관 불연속, 개구결합