

T형의 아이솔레이터를 활용한 안테나 이중대역 격리도 향상

Dual-band Isolation Enhancement of Antennas Using a T-Shaped Isolator

김 정 환 · 김 형 동

Jeonghwan Kim · Hyeongdong Kim

요 약

본 논문에서는 모바일 기기에서 다중입출력(MIMO) 이중대역 PIFA(planar inverted-F antenna) 간의 상호 간섭을 줄이기 위한 T형 아이솔레이터 설계를 제안한다. T형 아이솔레이터는 두 개의 집중소자 커패시터를 이용하여 각 주파수 대역의 공진을 독립적으로 제어할 수 있도록 설계되었다. 시뮬레이션을 활용해 각각의 주파수 대역에서 커패시터 값의 변화에 따라 아이솔레이터의 공진 주파수가 독립적으로 변하는 것을 확인하였다. 아이솔레이터의 크기에 따른 격리도 성능변화도 분석하였으며 크기가 커질수록 격리도 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 아이솔레이터 적용 시 결합 계수가 저주파 대역에서 -13 dB 이하, 고주파 대역에서 -17 dB 이하로 유지되는 것을 확인하였다.

Abstract

This study proposes a T-shaped isolator design to reduce mutual interference between dual-band planar inverted-F antennas (PIFAs) in multiple-input multiple-output (MIMO) systems for mobile devices. A T-shaped isolator was designed to independently control the resonance of each frequency band using two lumped capacitors. Through simulations, we verified that the resonance frequency of the isolator changed independently with variations in the capacitance values for each frequency band. We also analyzed the impact of the isolator size on isolation performance and observed improved isolation as the isolator size increased. With the isolator, the coupling coefficient between the antennas remained below -13 and -17 dB for the low and high bands, respectively.

Key words: MIMO Antenna, Dual-Band PIFA, Internal Isolator, Isolation enhancement

I. 서 론

모바일 안테나는 스마트폰, 태블릿, 웨어러블 기기 등 다양한 모바일 기기에서 무선 통신을 가능하게 하는 핵심 요소이다. 사용자 수요가 증가함에 따라 빠르고 안정적인 데이터 전송이 필수적이기 때문에, 모바일 안테나의 성능 향상은 중요한 연구 분야로 떠오르고 있다. PIFA

(planar inverted-F antenna)는 일반적인 F형 안테나를 뒤집어 평면화한 형태로, 기판(ground plane)과의 결합을 제어하는 방식으로 주로 모바일 기기와 같은 제한된 공간에서 사용될 때 유리한 안테나이다^[1]. 또한, 단순한 구조를 통해 2.4 GHz 및 5 GHz 대역의 공진을 확보하며 Wi-Fi 5 안테나로 사용할 수 있는 다중대역 PIFA 또한 연구되었다^[2].

한양대학교 융합전자공학부(Department of Electronic Engineering, Hanyang University)

· Manuscript received October 28, 2024 ; Revised November 6, 2024 ; Accepted November 10, 2024. (ID No. 20241028-117)

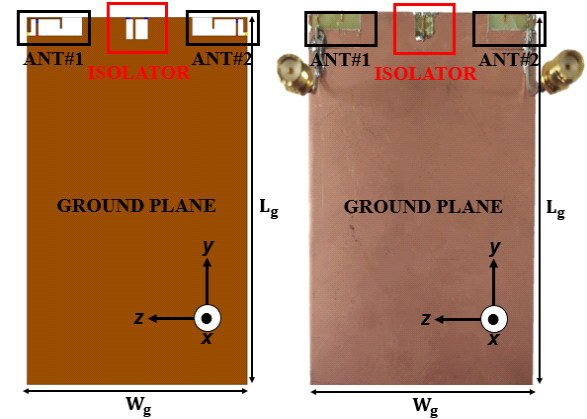
· Corresponding Author: Hyeongdong Kim (e-mail: hdkim@hanyang.ac.kr)

Wi-Fi 무선 통신 시스템은 주로 통신의 안정성을 높이기 위해 같은 대역의 여러 안테나를 사용하는 다중입출력 안테나로 설계된다. 그러나 모바일 기기의 물리적 제한으로 인해 좁은 공간 내에 여러 안테나를 배치하게 되면서 안테나 간 상호 간섭이 발생할 가능성이 커지며, 이는 통신 성능 저하로 이어질 수 있다. 이러한 모바일 안테나 간의 간섭 문제를 해결하고 격리도를 높이는 방법으로 아이솔레이터 설계가 끊임없이 연구되고 있다^{[3]~[10]}. 특히 사물인터넷 단말기에 적합한 내장형 아이솔레이터로 동작할 수 있는 loop-type^[7], neutralization-line^[8], U-shaped slot^[9], annular slot^[10] 아이솔레이터들이 제안되었다. 하지만 이 방식의 아이솔레이터들은 모두 단일 대역의 격리도 향상을 목표로 하며, 비교적 넓은 면적을 차지하기 때문에 사물인터넷 단말기용 안테나 특성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

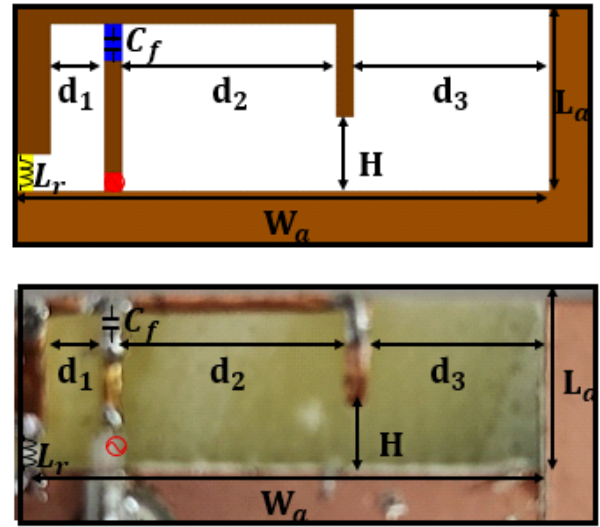
본 논문에서는 두 개의 이중대역 PIFA로 구성된 Wi-Fi 5 안테나 시스템에서 2.4 GHz 대역과 5.5 GHz 대역 모두의 격리도를 향상시키기 위해 6×6 mm 크기의 T형 아이솔레이터를 제안한다. 제안된 아이솔레이터를 활용하여 단말기 내부에 초소형의 공간을 활용하여 두 안테나의 이중대역 격리도를 향상할 수 있다. T형 아이솔레이터는 두 개의 루프에 집중소자 커패시터를 활용하여 각 공진 주파수를 독립적으로 제어함으로써, 접지면의 크기가 달라지더라도 적용할 수 있는 설계 기법이다. 이를 통해 각 주파수 대역에서 안정적인 격리도를 유지하며, 다양한 기기 환경에서도 최적의 방사 성능을 확보할 수 있다.

II. 아이솔레이터 설계

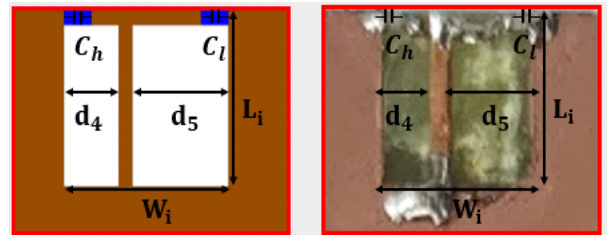
그림 1은 제안된 2개의 이중대역 PIFA와 T형 아이솔레이터의 전체적인 구성 및 구체적인 안테나와 아이솔레이터의 배치를 각각 시뮬레이션 모델과 제작된 시제품 형태로 보여준다. 제안된 안테나의 길이, 인덕터 및 커패시터 값은 표 1에 제시되어 있다. 안테나의 L_R 위로의 구리 두께는 1 mm이며 나머지 두께는 0.5 mm이다. 그림에 나타난 바와 같이, 두 개의 안테나는 기판의 가장 위쪽 양쪽 끝에 배치되었다. 기판의 크기는 100×60 mm의 크기로 상용화 되고 있는 휴대폰의 크기로 설정하였으며, 1 mm 두



(a) 전체 안테나 구조
(a) Overall antenna structure



(b) 이중대역 PIFA
(b) Dual band PIFA



(c) T형 아이솔레이터
(c) T-shaped isolator

그림 1. 안테나 및 아이솔레이터 구성
Fig. 1. Antenna and isolator configuration.

표 1. 제안된 안테나 및 아이솔레이터의 설계 파라미터
Table 1. Design parameter of proposed antenna and isolator.

Parameter	L_g	W_g	L_a	W_a	L_i	W_i	d_1	d_2
Value	100 mm	60 mm	5 mm	15 mm	6 mm	6 mm	1.5 mm	6 mm
Parameter	d_3	d_4	d_5	H	L_r	C_f	C_l	C_h
Value	5.5 mm	2 mm	3.5 mm	2 mm	2.3 nH	0.2 pF	0.12 pF	0.42 pF

계의 FR4($\epsilon_r=4.4$) 기판에 인쇄된다. 안테나의 크기는 5×15 mm의 크기로 기존에 제안되었던 이중대역 PIFA 구조를 활용하였다. 아이솔레이터의 크기는 6×6 mm로 설정하였다. 안테나 시뮬레이션은 ANSYS 고주파 구조 시뮬레이터(HFSS)를 사용하였다.

그림 2는 전체 안테나 구성의 각 대역의 공진 주파수에서의 전류 분포를 나타낸다. 각 안테나는 두 개의 포트에서 전원이 공급되어 작동한다. 접지 방사 안테나의 작동 원리는 전압원, 공급 루프, 방사 루프, 접지면 간의 강한 자기 결합을 생성하는 데 기반하여, 접지면을 큰 다이폴 안테나로 효과적으로 변환하는 것이다.

그림 3은 제안된 T형 아이솔레이터의 전류 분포를 보여준다. 아이솔레이터의 동작원리는 시리즈 커패시터 C_l 및 C_h 를 포함하는 2.45 GHz와 5.5 GHz의 루프 형 공진 구조를 생성함으로써 두 개의 안테나 간의 결합을 억제하는 데 기반하고 있다. 각 커패시터는 아이솔레이션 루프

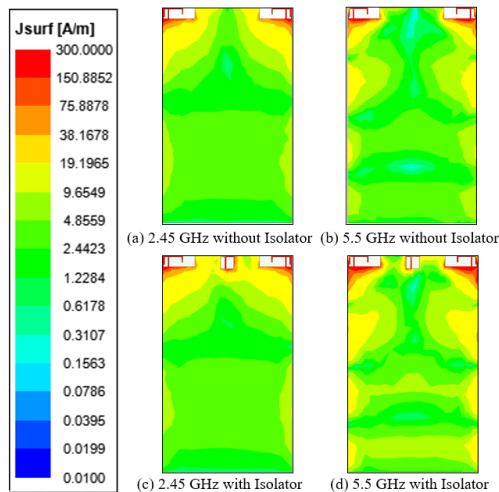


그림 2. 전체 전류분포
Fig. 2. Current distribution of overall structure.

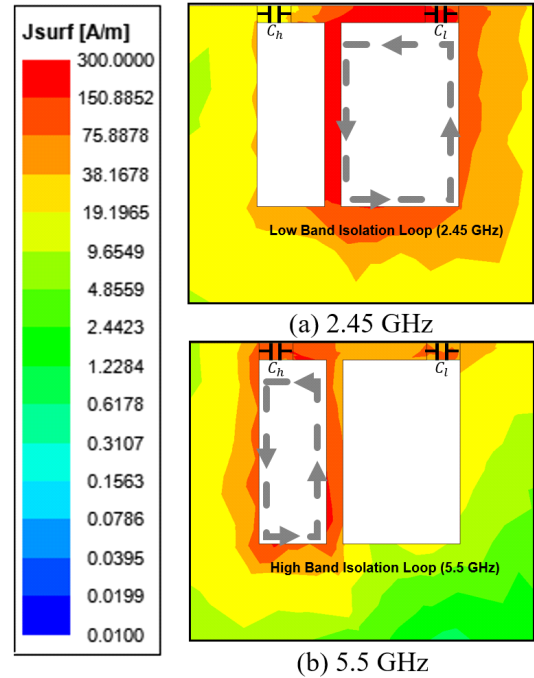


그림 3. 아이솔레이터 전류분포
Fig. 3. Current distribution of an isolator.

의 공진 주파수를 제어하도록 설계되었으며, 루프 공진기의 공진 주파수는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다^[11].

$$f_l = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_l C_l}}, \quad f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_h C_h}} \quad (1)$$

여기서 f_l 과 f_h 는 각각의 아이솔레이터의 공진 주파수이며, L_l 와 L_h 는 제안된 루프의 직렬 인덕턴스 값이고, C_l 과 C_h 는 공진 주파수를 맞추기 위해 삽입된 직렬 커패시턴스 값이다.

그림 4는 시뮬레이션된 S-파라미터를 나타낸다. 안테나의 반사 계수에 대한 시뮬레이션 결과는 저주파 대역에서 176, 174 MHz 고주파 대역에서 942, 894 MHz의 -10 dB

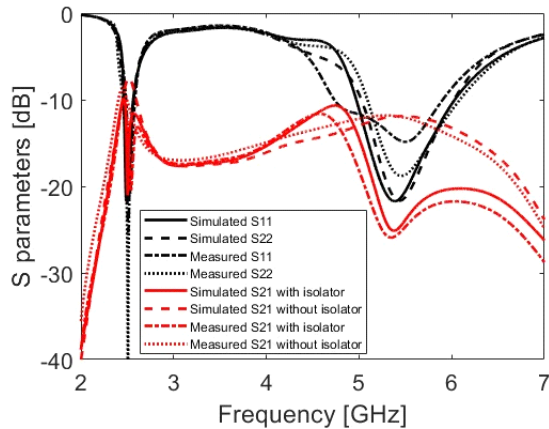


그림 4. 제안된 안테나의 S -파라미터 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulated S -parameters of the proposed antenna.

임피던스 대역폭을 보여준다. 안테나의 결합 계수에 대해서는 S_{21} 은 아이솔레이터 없이 저주파 대역에서 약 -7 dB, 고주파 대역에서 -13 dB의 결합 계수로 나타난다. 그러나 제안된 T형 아이솔레이터를 사용 하면 저주파 주파수 대역에서 -11 dB 이하, 고주파 대역에서 -17 dB 이하로 향상된다.

그림 5는 시뮬레이션 및 측정된 안테나 이득(antenna gain)과 효율(antenna efficiency)을 나타낸다. 측정 결과를 기준으로, 낮은 대역에서는 최대 2.23 dB의 이득이 나타났고, 높은 대역에서는 최대 2.42 dB의 이득이 기록되었다. 효율 측면에서는 낮은 대역에서 최대 79 %, 높은 대

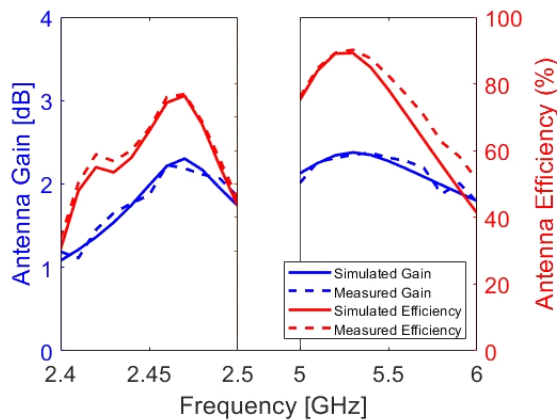


그림 5. 제안된 안테나의 이득 및 효율
Fig. 5. Antenna gain and efficiency.

역에서 최대 89 %의 효율을 보였다. 시뮬레이션과 측정 결과는 유사하게 나타나며, 설계된 안테나의 성능이 목표 주파수 대역에서 최적화되었음을 확인할 수 있다. 2.4 GHz와 5 GHz 대역 모두에서 시뮬레이션 결과와 측정 결과가 유사하게 나타나며, 이득과 효율이 목표 주파수 대역에서 최대화됨을 확인할 수 있다.

그림 6은 제안된 이중대역 안테나의 방사 패턴을 나타내며, 각 주파수 대역(2.45 GHz 및 5.5 GHz)에서 xy 평면과 yz 평면의 방사 특성을 나타낸다. 그래프는 θ -편파 성분(E_θ), ϕ -편파 성분(E_ϕ), 그리고 전체 전계(E_{total})의 성분으로 분해되어 있다. 2.45 GHz 대역에서 xy 평면에서는 θ -편파 성분이 주로 지배적이며, 전 방향성 방사 특성을 나타낸다. ϕ -편파 성분은 θ 성분에 비해 상대적으로 낮으며, 이는 주로 수직 편파 방사 특성이 강함을 시사한다. yz 평면에서의 방사 패턴은 좌우 대칭성을 가지며, 0° 및 180° 에서 최소 방사를 나타내며 이는 접지면과의 강한 결합 효과 때문이다. 5.5 GHz 대역에서 xy 평면에서는 θ -편파 성분은 더욱 강조되며, 전 방향 방사 특성이 감소하고 특정 방향으로 방사가 집중된다. 이는 안테나 구조가 고주파 대역에서의 방사 효율을 최적화하도록 설계되었음을 나타낸다. yz 평면에서는 ϕ -편파 성분이 θ -편파 성분에 비해 미미하며, 방사 패턴은 주로 전면 방향으로 강화되고 90° 및 270° 에서 최대 방사를 나타낸다.

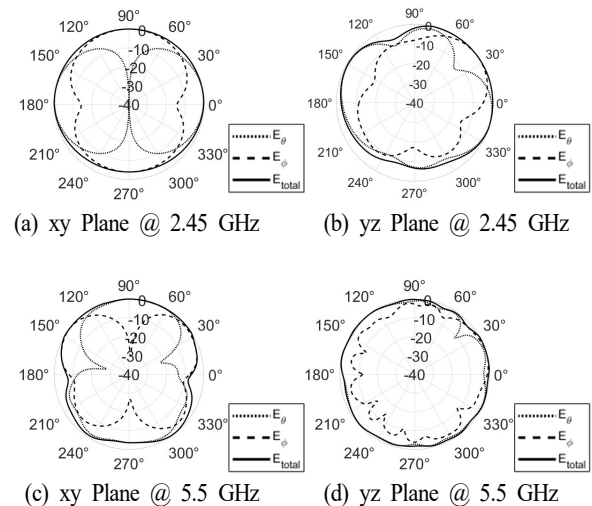


그림 6. 방사 패턴
Fig. 6. Radiation patterns.

III. 아이솔레이터 동작원리

이 섹션에서는 T형 아이솔레이터의 설계 과정 및 성능 분석에 대해 논의한다. 주된 초점은 2.4 GHz 및 5 GHz 대역에서 안테나 간의 격리를 개선하는 데 있으며, 제안된 안테나 #1과 #2 및 아이솔레이터 #3 간의 전압 관계는 3 포트 네트워크 시스템으로 표현할 수 있다. 마이크로파 네트워크 시스템의 **decoupling theorem**에 따르면, 아이솔레이터에 의한 안테나 간의 상관관계에 미치는 영향을 식 (2)와 같이 표현할 수 있다^[11].

$$S'_{12} = S_{12} + \frac{S_{13}S_{23}\Gamma_3}{1 - \Gamma_3 S_{33}} \quad (2)$$

여기서 S'_{12} 와 S_{12} 는 각각 아이솔레이터가 있을 때와 없을 때 안테나 #1과 #2 간의 결합 계수이며, Γ_3 는 아이솔레이터의 반사 계수로, 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\Gamma_3 = \frac{V_3^+}{V_3^-} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3)$$

여기서 Z_L 은 부하 임피던스이고 Z_0 는 특성 임피던스이다. 식 (2) 및 식 (3)에 따르면, 안테나 #1과 #2 간의 결합 계수는 제안된 아이솔레이터의 임피던스 매칭에 의해 조절될 수 있음을 보여줄 수 있다. 따라서 아이솔레이터의 공진 주파수에 따른 S_{21} 의 변동 경향을 시뮬레이션 결과를 통해 분석해야 한다. 모든 시뮬레이션 결과에서 범례에 명시되지 않은 매개변수는 표 1에 제공된 값을 따른다.

그림 7은 C_i 의 변화에 따른 각 대역에서 S_{21} 의 변화를 보여준다. C_i 의 값이 증가함에 따라 2.4 GHz 대역에서 아이솔레이터의 공진 주파수가 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 반면 C_i 가 감소하면 공진 주파수가 증가한다. C_i 의 변화에 따른 5 GHz 대역의 변화는 미미하다고 볼 수 있다.

그림 8은 C_h 의 변화에 따른 각 대역에서 S_{21} 의 변화를 보여준다. 5 GHz 대역에서 커패시턴스 값이 변화함에 따라 공진 주파수의 변화가 나타나며, 반면 2.4 GHz 대역에서는 변화가 미미하다. C_i 및 C_h 의 변화 경향 분석을 통해 각 아이솔레이터 루프가 독립적으로 작동함을 확인할 수 있다.

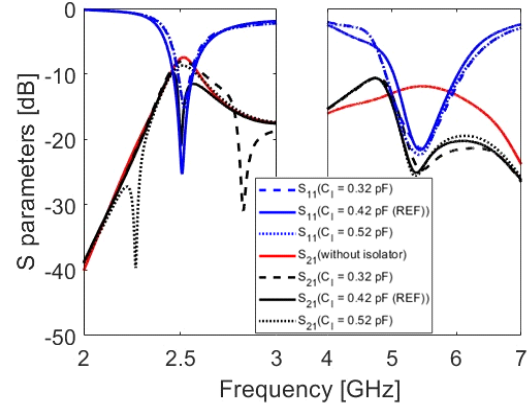


그림 7. C_i 값의 변화에 따른 S_{11} 및 S_{21}

Fig. 7. Simulated S_{11} and S_{21} with different C_i values.

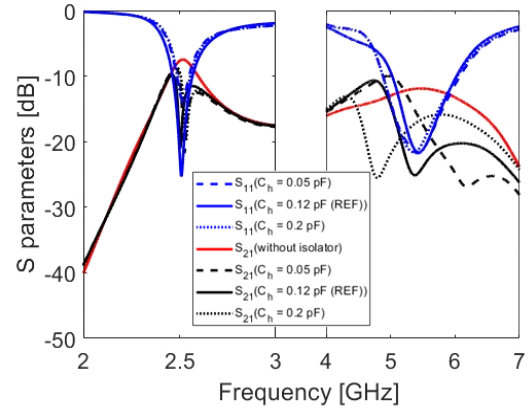


그림 8. C_h 값의 변화에 따른 S_{11} 및 S_{21}

Fig. 8. Simulated S_{11} and S_{21} with different C_h values.

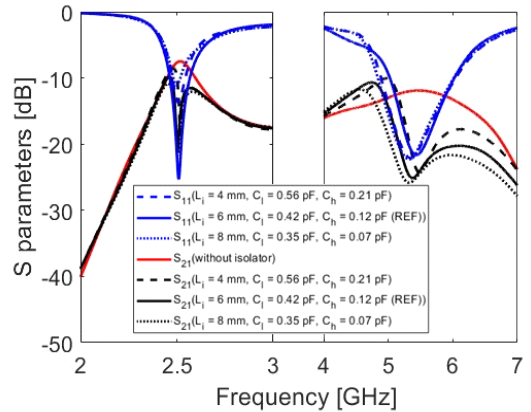


그림 9. L_i 값의 변화에 따른 S_{11} 및 S_{21}

Fig. 9. Simulated S_{11} and S_{21} with different L_i values.

그림 9는 아이솔레이터 깊이 L_i 에 따른 S_{21} 의 변화를 보여준다. 높이 변동에 따른 공진 주파수 변화는 C_l 및 C_h 의 값을 사용하여 조정되었다. 아이솔레이터의 깊이가 증가함에 따라 격리 성능이 개선되는 것을 관찰할 수 있으며, 이는 S_{21} 이 향상되는 더 넓은 주파수 대역폭으로 나타난다.

그림 10은 아이솔레이터 폭 W_i 에 따른 S_{21} 의 변화를 보여준다. 이 경우에도 공진 주파수는 C_l 및 C_h 를 조정하여 일치시켰다. 깊이 변화에서 관찰된 경향과 유사하게 폭이 넓어질수록 격리 성능이 향상된다. 그러나 변화된 길이 대비 격리도 변동 폭은 깊이에서가 훨씬 많다. 이로써 아이솔레이터 설계 시 폭을 늘리는 것보다 깊이를 늘리는 것이 훨씬 더 효과적이라는 것을 알 수 있다.

안테나 상관도(ECC)는 MIMO 안테나 시스템의 중요한 파라미터이다. S-파라미터를 사용하여 ECC를 계산하기 위해 식 (4)를 사용할 수 있다^{[3]~[10]}.

$$ECC = \frac{|S_{11}^* S_{21} + S_{21}^* S_{22}|}{(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)(1 - |S_{22}|^2 - |S_{12}|^2)} \quad (4)$$

여기서 S_{11}^* 와 S_{22}^* 는 각각 S_{11} 와 S_{22} 의 복소 켤레 값이다. 그림 11은 제안된 MIMO 안테나의 아이솔레이터 유무에 따른 시뮬레이션된 ECC를 보여준다. 아이솔레이터가 없을 때에 비해 아이솔레이터를 포함한 구조에서 낮은 ECC값을 확인할 수 있으며 저주파 대역에서 0.02 나타낸다.

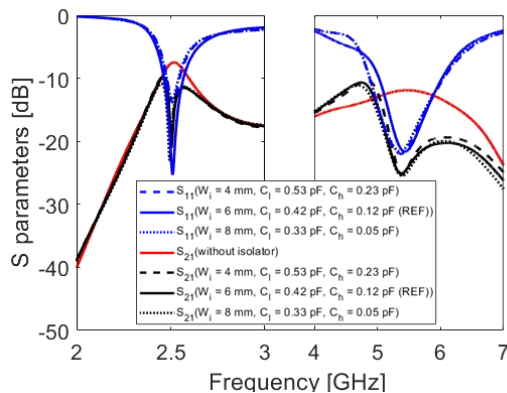


그림 10. W_i 값의 변화에 따른 S_{11} 및 S_{21}
Fig. 10. Simulated S_{11} and S_{21} with different W_i values.

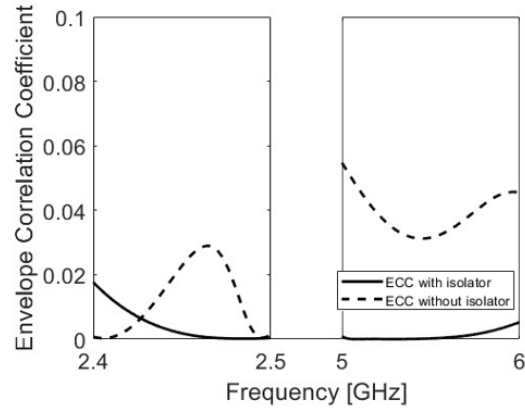


그림 11. 안테나 상관도(ECC)
Fig. 11. Simulated envelope correlation coefficient.

표 2. 제안된 안테나 및 아이솔레이터의 설계 파라미터
Table 2. Design parameter of proposed antenna and isolator.

Ref.	Frequency bands (GHz)	Isolation (dB)	Isolator type	ECC
[7]	2.4~2.5	-14	Rectangular slot	0.3
[8]	3.1~5	-22	Neutralization line	0.1
[9]	1.8~2.5	-20	U-shaped slot	0.015
[10]	1.7~2.3	-22	Annular slot	0.03
Proposed	2.4~2.5, 5~6	-13, -17	T-shaped slot	0.02, 0.005

표 2는 제안된 T형 슬롯 아이솔레이터의 성능을 기존 연구와 비교한 결과를 보여준다. 기존의 loop type, neutralization line, U-shape slot, annular slot 아이솔레이터는 각각 최대 -14 dB에서 -22 dB의 격리도와 ECC 값 0.3에서 0.015를 나타낸다. 반면, 제안된 T형 슬롯 아이솔레이터는 2.4~2.5 GHz 대역에서 -13 dB, 5~6 GHz 대역에서 -17 dB의 격리도를 달성했으며, ECC는 각각 0.02 이하와 0.005 이하로 우수한 상관도 성능을 보인다. 이를 통해 제안된 설계는 기존 대비 향상된 격리도와 낮은 상관도를 보여준다.

IV. 결 론

본 논문은 T형 아이솔레이터를 활용하여 다중입출력

이중대역 PIFA의 격리도를 향상시킬 수 있는 내용을 제안하였다. 제안된 아이솔레이터를 통해 모든 2.4 GHz 대역에서 -13 dB 이하, 5 GHz 대역에서 -17 dB 이하의 격리도 성능을 확보하였으며 상관도 또한 저주파 대역에서 0.02, 고주파 대역에서 0.005 이하의 우수한 성능을 이뤄냈다.

References

- [1] S. Jeon, Y. Liu, S. Ju, and H. Kim, "PIFA with parallel resonance feed structure for wideband operation," *IET Electronics Letters*, vol. 47, no. 23, pp. 1263-1265, Nov. 2011.
- [2] Y. Liu, J. Lee, K. Jung, and H. Kim, "Dual-band PIFA using resonated loop feed structure," *IET Electronics Letters*, vol. 48, no. 6, pp. 309-310, Mar. 2012.
- [3] J. N. Lee, S. B. Hyun, and Y. K. Cho, "A compact ultra-wideband chip antenna with bandwidth extension patch and simple isolator for MIMO systems for mobile handheld terminals," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 3, pp. 272-282, May 2022.
- [4] P. Garg, P. Jain, "Isolation improvement of MIMO antenna using a novel flower shaped metamaterial absorber at 5.5 GHz WiMAX band," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 4, pp. 675-679, Apr. 2020.
- [5] T. Li, W. Chen, and Q. Wang, "A simple method to enhance gain and isolation of MIMO antennas simultaneously based on metamaterial structures for millimeter-wave applications," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 10, pp. 342-350, Oct. 2021.
- [6] J. Kim, Y. Park, and H. Choi, "Enhanced isolation technique using a compact decoupling structure for MIMO antennas in mobile devices," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 21, no. 4, pp. 38-45, Apr. 2021.
- [7] L. Qu, R. Zhang, and H. Kim, "Decoupling between ground radiation antennas with ground-coupled loop-type isolator for WLAN applications," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 10, no. 5, pp. 546-552, Apr. 2016.
- [8] S. Zhang, G. F. Pedersen, "Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 166-169, May 2015.
- [9] Y. Cao, S. W. Cheung, and T. I. Yuk, "Frequency-reconfigurable multiple-input - multiple-output monopole antenna with wide-continuous tuning range," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 10, no. 12, pp. 1322-1331, Sep. 2016.
- [10] R. Hussain, M. U. Khan, and M. S. Sharawi, "An integrated dual MIMO antenna system with dual-function GND-plane frequency-agile antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 142-145, Jan. 2017.
- [11] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2011.

김 정 환 [한양대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-9957-2721>



2017년 2월: 울산과학기술원 전기전자 및
컴퓨터공학부 (공학사)
2019년 8월: 울산과학기술원 전기 및 전자
공학부 (공학석사)
2020년 3월~현재: 한양대학교 융합전자
공학부 박사과정
[주 관심분야] 안테나 설계

김 형 동 [한양대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4540-9451>



1984년 2월: 서울대학교 전기전자공학과
(공학사)
1986년 2월: 서울대학교 전기전자공학과
(공학석사)
1992년 2월: 미국 University of Texas at
Austin (공학박사)
1992년 3월~1993년 2월: 미국 University
of Texas at Austin 연구교수
1993년 3월~현재: 한양대학교 융합전자공학부 정교수
[주 관심분야] 안테나 설계