

국내 5G 통신 환경에 적용할 수 있는 주파수 선택적 라조버 설계

Design of Frequency Selective Rasorber Applicable to Domestic 5G Communication Environments

문 윤 석 · 권 중 화* · 홍 익 표

Yoon-Seok Moon · Jong-Hwa Kwon* · Ic-Pyo Hong

요 약

본 논문에서는 A-T-A 특성을 가지며 국내 5G 대역의 신호를 투과시키며 대역 외 주파수를 흡수하는 주파수 선택적 rasorber(FSR)를 제안하였다. 제안한 FSR 구조는 사각링 패치 구조에 저항소자가 포함된 손실형 FSS, 격자 구조에 사각 패치 구조를 추가하여 구성된 무손실 FSS 그리고 두 구조의 임피던스 매칭을 위한 공기층으로 구성하였다. 본 논문에서 제안한 FSR 구조의 시뮬레이션 결과 3.59 GHz 대역에서 -1.04 dB의 손실을 지니며, -3 dB 동작 대역폭으로 420 MHz (3.44~3.86 GHz)를 확인하였다. 제안한 구조의 성능을 검증하기 위해 20×20 배열(500×500 mm²) 구조를 제작하여 자유공간 측정 방법을 통해 실제 성능을 검증하였다. 측정 결과 3.64 GHz 대역에서 -1.18 dB의 손실을 보였으며, -3 dB 동작 대역폭으로 390 MHz(3.43~3.82 GHz)를 확인하였다.

Abstract

In this paper, a frequency-selective rasorber (FSR) with absorptive-transmissive-absorptive (A-T-A) characteristics is proposed for the domestic 5G frequency band that absorbs out-of-band signals. The proposed FSR consists of a lossy frequency-selective surface (FSS) incorporating resistive elements within a square-ring patch configuration, a lossless FSS formed by adding a square patch structure to a lattice structure, and an air layer that provides impedance matching between the two FSS structures. Simulation results show a transmission loss of -1.04 dB at 3.59 GHz and a -3 dB operating bandwidth of 420 MHz (3.44~3.86 GHz). To verify the performance of the proposed structure, a 20×20 array with an overall size of 500×500 mm² was fabricated, and its actual performance was evaluated using a free-space measurement method. The measured results show a transmission loss of -1.18 dB at 3.64 GHz, and a -3 dB operating bandwidth of 390 MHz (3.43~3.82 GHz) was confirmed.

Key words: Frequency Selective Surface, Frequency Selective Rasorber, Bandpass, 5G Band, Impedance Matching

「본 연구는 2022년도 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원(RS-2022-NF000835), 2025년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2019-NR040074)이자, 2025년도 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구입(No. RS-2025-02642985, 고출력 전자파 방호를 위한 식별·보호·감시 기술 개발)」

국립공주대학교 스마트정보기술공학과(Department of Smart Information Technology Engineering, Kongju National University)

*한국전자통신연구원 전파연구본부(Radio Research Division, Electronics and Telecommunications Research Institute)

· Manuscript received September 5, 2025 ; Revised September 24, 2025 ; Accepted November 6, 2025. (ID No. 20250905-091)

· Corresponding Author: Ic-Pyo Hong (e-mail: iphong@kongju.ac.kr)

I. 서론

지난 수십 년간 전자기기가 증가함에 따라 무선 통신 환경에서 동일채널, 인접채널 및 다중경로 전자파 간섭 등으로 인한 통신 성능저하가 발생하였다. 이러한 전자파 간섭 해결 방안으로 주파수 선택적 표면(FSS, frequency selective surface)이 연구되었다^[1]. FSS는 유전체 위에 일정한 패턴을 지닌 금속 패치의 단위 구조가 무한히 배열되어 표면에 입사하는 신호의 주파수를 선택적으로 차단 또는 투과하는 공간필터 기능을 수행한다. 하지만 동작 대역폭을 늘리기 위해서는 구조를 적층해야 할 뿐만 아니라 투과 대역 외 주파수는 반사하므로 인접채널에 간섭을 유발할 수 있다. 이를 보완하는 방안 중 하나로 표면에 입사된 신호를 흡수하는 FSS 기반 메타 표면 흡수체(MTA, metasurface absorber) 연구가 진행되었다^[2]. MTA는 기존 FSS에 저항소자와 RF 접지면을 추가하여 자유공간과의 임피던스 매칭을 통해 반사를 최소화 및 투과 특성 제거를 통해 흡수 성능을 향상한 구조이다. 하지만 동작 주파수 대역이 기지국과의 통신 대역에 위치할 때 통신이 불가능하다는 단점이 존재한다. 따라서 오늘날의 연구진들은 주파수 선택적 Raserber(FSR, frequency selective raserber) 연구를 진행하여 기존 문제점을 제거하고자 하였다^{[3][4]}. FSR은 손실형 FSS, 공기층 그리고 무손실 FSS로 구성된다. 공기층을 가지므로 적층형 FSS 구조와 유사한 형태를 지니지만, FSR은 구조 하단부를 대역통과 FSS로 구성하여 투과 대역 외 주파수에서는 RF 접지면으로 동작한다. 따라서 주파수 흡수 기능과 투과 기능을 동시에 수행할 수 있다는 장점이 있으며, 동작 특성에 따라 A-T Raserber^[5], T-A Raserber^[6], A-T-A Raserber^[7], T-A-T Raserber^[8], A-T-A-T Raserber^[9] 등으로 구분할 수 있다. 또한 FSR은 투과 특성 구현을 위해 인덕터와 커패시터 소자를 사용한 병렬 LC 공진 구조^[10], 금속 패치 간 병렬 LC 공진 구조^[11], 마이크로스트립 기반 병렬 LC 공진 구조^[12] 등으로 설계될 수 있다. 이러한 특징은 외부로부터 전자기기의 보호 및 간섭 억제와 통신이 필요한 분야에 적용될 수 있으므로, 본 논문에서는 국내 5G 통신 대역(3.42~3.7 GHz) 통신 환경에 적용할 수 있는 A-T-A 구조의 FSR를 제안하였다.

II. Raserber 설계 및 측정

본 논문에서 제안한 손실형 FSS 구조는 사각링 패치 구조와 마이크로스트립 필터로 구성되었으며, 광대역 손실 특성 구현을 위해 4개의 220 Ω 칩 저항소자를 추가하였다. 흡수대역을 기준으로 설계하는 다른 특성의 FSR 구조와 달리, A-T-A 특성의 FSR은 투과 대역이 흡수대역의 중앙에 위치하므로 공기층의 두께는 투과주파수 3.55 GHz의 $0.25 \lambda_T$ (21 mm)로 설계해야 하지만, 실제 FSR 구조는 전파의 전송경로상에서 공기층뿐만 아니라 유전체도 위치한다. 따라서 유전체의 전기적 길이를 고려한 공기층의 두께 감소와 C 밴드 흡수대역 향상을 목적으로 C 밴드의 $0.25 \lambda_L$ 파장 길이(9.375~18.75 mm)에 부합하는 공기층의 두께 $0.177 \lambda_T$ (15 mm)로 설계하였다. 설계한 FSR 구조와 설계 파라미터는 그림 1과 표 1에 나타내었다.

그림 1에 제안한 FSR은 3.55 GHz 대역 투과 특성과 투과 대역 외 주파수 흡수 특성 구현을 위해 구조 상단부에 손실형 FSS를, 구조 하단부에 무손실 FSS를 배치하였다. 따라서 FSR 구조에 전파가 입사하면 손실형 FSS를 통해 3.55 GHz 대역의 신호는 투과하고 투과 대역 외 신호는 손실을 지니며 무손실 FSS에 도달한다. 이때 무손실 FSS는 3.55 GHz 대역통과 특성이 있으므로 투과 대역 외 주파수에서 RF 접지면으로 동작한다. RF 접지면으로 동작하는 무손실 FSS는 신호를 손실형 FSS로 반사하므로 손실형 FSS 표면의 220 Ω 칩 저항소자를 통해 S, C 대역 흡수 특성을 구현할 수 있다. 표 1의 파라미터는 기본적인 마이크로스트립 LC 필터 기반 FSR^[12]과 사각링 공진 FSS^[13]의

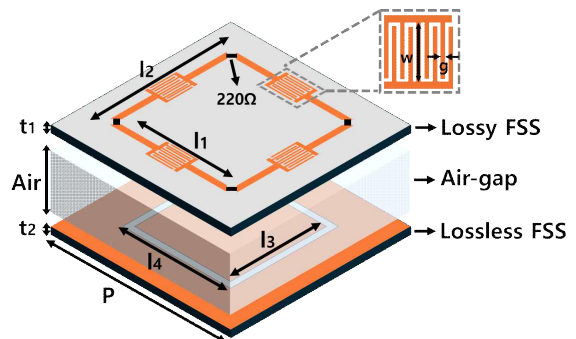
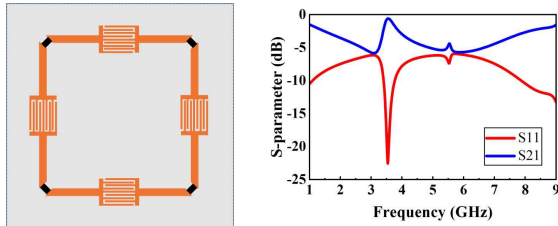


그림 1. 제안한 주파수 선택적 Raserber 구조
Fig. 1. Proposed frequency selective raserber structure.

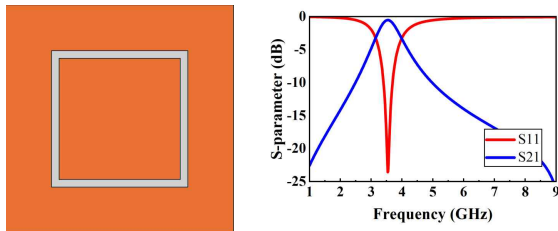
표 1. 제안한 FSR의 설계 파라미터

Table 1. Design parameters of proposed FSR.

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
P	25.0	w	3.9
l_1	18.0	g	0.2
l_2	20.0	t_1	1.0
l_3	15.8	t_2	1.0
l_4	16.8	Air	15.0



(a) 손실형 FSS 시뮬레이션 결과
(a) Lossy FSS simulation results



(b) 무손실 FSS 시뮬레이션 결과
(b) Lossless FSS simulation results

그림 2. 손실형 FSS 및 무손실 FSS 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulation results of lossy FSS and lossless FSS.

공식을 기반으로 설계하였다. 구조의 대역 차단 특성은 사각링 구조 슬롯 길이에 영향을 받고, 대역통과 특성은 마이크로스트립 LC 필터 내부 금속 길이에 영향을 받는다.

본 논문에서 제안한 FSR 구조를 설계 및 해석하기 위해 FEM(finite element method) 기반 상업용 고주파 전자기 소프트웨어인 HFSS를 사용하였다. HFSS 시뮬레이터는 FSS 구조 해석을 위해 floquet port와 master & slave를 사용하여 단위구조 시뮬레이션이 진행됐으며, 실제 측정을 통해 시뮬레이션 결과의 정확성이 검증되었다^{[14][15]}. 그림 2(a)의 손실형 FSS 시뮬레이션 결과 3.55 GHz 주파수에서 -0.58 dB의 삽입 손실과 투과 대역 외 주파수 1~9

GHz 대역에서 약 $-1.5 \sim 5.8$ dB의 손실을 확인하였다. FSR의 하부 구조는 무손실 FSS로 사각링 슬롯 구조로 설계하여 3.55 GHz 대역 주파수는 투과하며 투과 대역 외 주파수는 반사하는 대역통과 FSS 구조로 설계하였다. 그림 2(b)의 무손실 FSS 시뮬레이션 결과 3.54 GHz 대역에서 -0.51 dB의 삽입 손실과 -23.5 dB의 반사 손실값을 확인하였다.

그림 3은 두 FSS 구조를 결합하여 설계한 FSR 구조의 시뮬레이션 결과이다. FSR 구조의 시뮬레이션 결과 3.59 GHz 주파수에서 약 -1.04 dB의 삽입 손실과 -3 dB 대역폭으로 420 MHz($3.44 \sim 3.86$ GHz)를 확인하였다. 또한 시뮬레이션 결과를 통해 그림 2(a)의 손실형 FSS에서 보이지 않던 차단 공진이 약 2.2 GHz 대역에서 발생함을 확인할 수 있다. 손실형 FSS에서는 저항값이 표면 임피던스 값에 영향을 주어 공진이 발생하지 않지만, FSR 구조에서는 투과 대역 외에서 RF 접지면 역할을 하는 무손실 FSS의 영향을 받아 차단 공진이 발생하게 된다.

그림 2 및 그림 3의 시뮬레이션 결과는 무한주기 시뮬레이션 결과로, 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 설계한 FSR의 단위 구조를 20×20 배열(500×500 mm²)로 제작한 구조와 자유공간 환경에서 측정된 결과를 그림 4에 나타내었다. 실제 제작한 구조를 자유공간 측정법을 사용하여 측정된 결과 3.64 GHz 주파수에서 약 -1.18 dB의 삽입

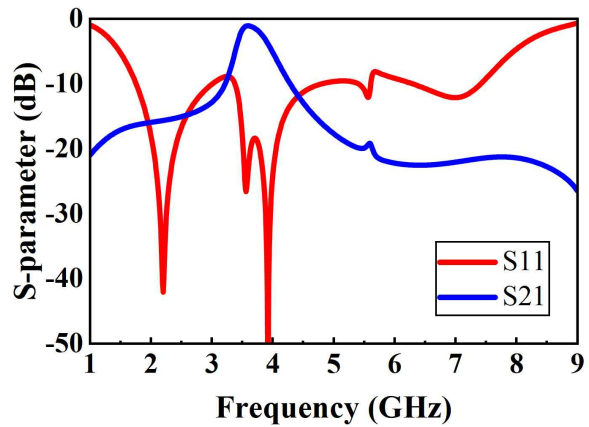
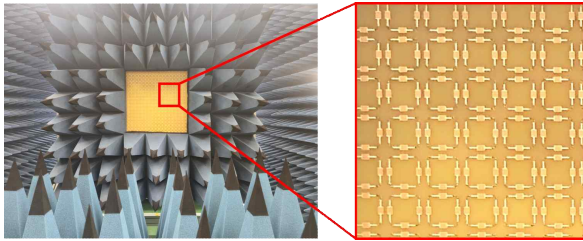
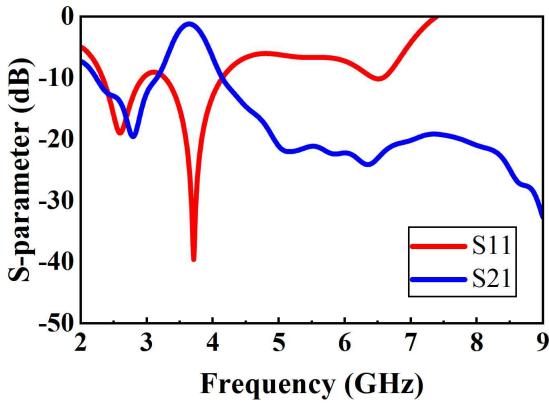


그림 3. 제안한 FSR 구조의 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results of proposed FSR structure.



(a) 20×20 배열 FSR 구조 자유공간 측정환경
 (a) 20×20 array FSR structure free-space measurement environment

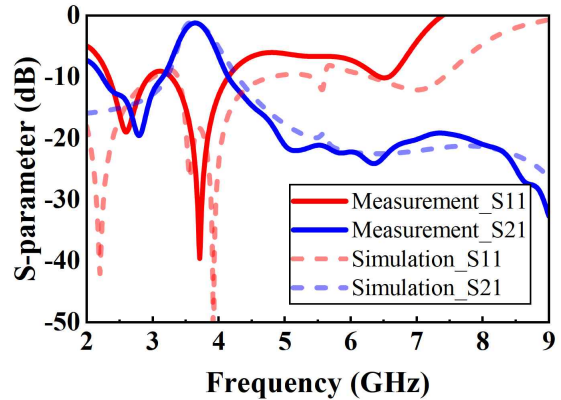


(b) 제작한 FSR 구조 자유공간 측정 결과
 (b) 20×20 array FSR structure free-space measurement results

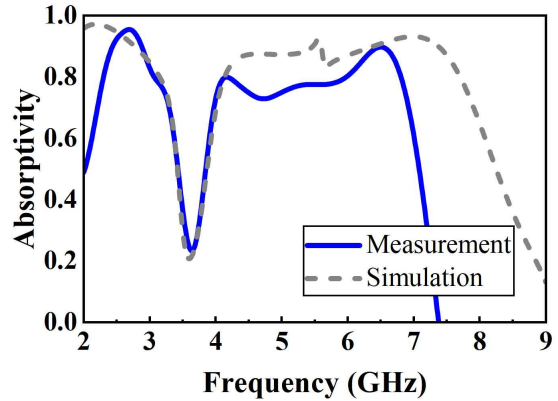
그림 4. 제작한 FSR 구조 및 측정 결과
 Fig. 4. Fabricated FSR structure and measurement results.

손실과 -3 dB 대역폭으로 390 MHz(3.45~3.84 GHz)를 확인하였다. 시뮬레이션 대비 공진주파수가 약 50 MHz가량 증가하였으며, -3 dB 대역폭이 30 MHz가량 감소하였음을 확인할 수 있다.

그림 5는 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교한 그래프이다. 4~6 GHz 대역에서 시뮬레이션 결과의 최저 흡수율 85%에서 실제 측정 결과 흡수율이 최저 73%까지 흡수 성능이 저하됨을 확인할 수 있다. 4~6 GHz 대역의 흡수 성능저하의 원인은 다음과 같다. FSR 제작 과정에서 발생한 손실형 FSS와 무손실 FSS의 투과 공진주파수 오차뿐만 아니라 FR4 기판의 얇은 두께로 인해 기판의 휨이 발생하여 중앙 부분의 두께가 증가하였다. 따라서 상대적으로 낮은 파장 길이를 갖는 C 밴드에서 최소 손



(a) FSR 측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교
 (a) Comparison of FSR measurement results and simulation results



(b) FSR 측정 결과와 시뮬레이션 흡수율 비교
 (b) Comparison of FSR measurement absorption results and simulation absorption results

그림 5. 측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교
 Fig. 5. Comparison of simulation and measurement results.

실을 만족하는 공기층 두께가 증가함에 따라 반사 손실이 감소하여 시뮬레이션 결과 대비 낮은 흡수 성능을 보였다. 제안한 FSR 구조와 선행 연구된 FSR 구조의 성능 비교표를 표 2에 나타내었다.

III. 결 론

본 논문에서는 5G 통신 대역에 활용할 수 있는 FSR을 제안하였다. 시뮬레이션 결과 3.59 GHz 주파수에서 약 -1.04 dB의

표 2. 제안한 FSR 구조 성능 비교표

Table 2. Comparison table of FSR performance.

Ref	A-T properties	Pass band (IL)	FBW (%)	Periodicity (λ_L, λ_T)	Thickness (λ_L, λ_T)
[5]	A-T	6.52 GHz (-0.22 dB)	103.9	0.957 λ_L	0.125 λ_L
[6]	T-A	5.99 GHz (-1.78 dB)	60.4	0.287 λ_L	0.287 λ_L
[8]	T-A-T	2.1. GHz, 8.8 GHz (-1.5 dB)	69.1	0.026 λ_L	0.09 λ_L
[9]	A-T-A-T	11.7 GHz, (-1.0 dB) 16 GHz (-0.7 dB)	95.7 14.7	0.015 λ_L	0.08 λ_L
[10]	A-T-A	6.74 GHz (-2.45 dB)	51.6 37.2	0.449 λ_T	0.254 λ_T
[11]	A-T-A	6.3 GHz (-0.6 dB)	91.4 31.9	0.504 λ_T	0.231 λ_T
[12]	A-T-A	10.3 GHz (-0.3 dB)	79.3 29.1	0.515 λ_T	0.24 λ_T
This work	A-T-A	3.59 GHz (-1.18 dB)	43.4 20.2	0.295 λ_T	0.177 λ_T

삽입 손실을 보였으며, 검증을 위해 20×20 배열(500×500 mm²)로 제작하여 실제 자유공간 환경에서 측정을 진행하였다. 측정 결과 3.64 GHz 주파수에서 약 -1.18 dB의 삽입 손실로 시뮬레이션 결과 대비 50 MHz의 공진주파수 증가와 0.14 dB의 손실 차이를 확인하였다.

References

[1] D. Ferreira, R. F. S. Caldeirinha, I. Cuiñas, and T. R. Fernandes, "Square loop and slot frequency selective surfaces study for equivalent circuit model optimization," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 9, pp. 3947-3955, Sep. 2015.

[2] H. Wang, P. Kong, W. Cheng, W. Bao, X. Yu, L. Miao, and J. Jiang, "Broadband tunability of polarization-insensitive absorber based on frequency selective surface," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, p. 23081, Mar. 2016.

[3] Z. Sun, Q. Chen, M. Guo, H. Yu, and Y. Fu, "Frequency selective rasorber and reflector with two-sided absorption bands," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 6025-6031, Dec. 2018.

[4] V. Rathore, S. Ghosh, "A polarization-independent frequency selective surface based switchable absorber/rasorber," *2020 National Conference on Communications(NCC)*, Kharagpur, Feb. 2020.

[5] H. Zhang, H. Ye, Z. Lu, W. Dai, M. Xiao, and J. Jiang, "Miniaturized lossy-layer scheme for designing a frequency selective rasorber," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 21, no. 12, pp. 2472-2476, Dec. 2022.

[6] L. Deng, S. Yu, and N. Kou, "A miniaturized frequency selective rasorber with high frequency harmonic suppression," *Progress In Electromagnetics Research Letters*, vol. 111, pp. 35-43, Jun. 2023.

[7] M. Mao, X. Huang, "A highly selective frequency selective rasorber with helical structure," in *2024 IEEE 7th International Conference on Electronic Information and Communication Technology(ICEICT)*, Xi'an, 31 Jul.-Aug. 2024.

[8] M. M. Zargar, A. Rajput, K. Saurav, and S. K. Koul, "Polarization-insensitive frequency selective rasorber with broad absorption band and two-sided transmission bands," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 32, no. 4, p. e23067, Jan. 2022.

[9] M. M. Zargar, A. Rajput, and K. Saurav, "Miniaturized design of dual transmission frequency selective rasorber with wide angular stability," *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 5, no. 4, pp. 922-932, Aug. 2024.

[10] K. Zhang, W.en Jiang, and S. Gong, "Design bandpass frequency selective surface absorber using LC resonators," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 2586-2589, Aug. 2017.

[11] H. Huang, Z. Shen, "Absorptive frequency-selective transmission structure with square-loop hybrid resonator," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 3212-3215, Nov. 2017.

[12] Q. Chen, D. Sang, M. Guo, and Y. Fu, "Frequency-

selective rasorber with interabsorption band transparent window and interdigital resonator," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 8, pp. 4105-4114, Aug. 2018.

- [13] A. Chatterjee, S. K. Parui, "A dual layer frequency selective surface reflector for wideband applications," *Radio-engineering*, vol. 25, no. 1, pp. 67-72, Apr. 2016.
- [14] S. Biber, M. Bozzi, O. Gunther, L. Perregrini, and L. P.

Schmidt, "Design and testing of frequency-selective surfaces on silicon substrates for submillimeter-wave applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 9, pp. 2638-2645, Sep. 2006.

- [15] M. Qu, Y. Feng, J. Su, and S. M. Ali Shah, "Design of a single-layer frequency selective surface for 5G shielding," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 3, pp. 249-252, Mar. 2021.

문 윤 석 [국립공주대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-3524-2384>



2024년 2월: 국립공주대학교 스마트정보 기술공학과 (공학사)
 2024년 3월~현재: 국립공주대학교 정보 통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] 주파수 선택구조, 전자파 흡수체

홍 익 표 [국립공주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1875-5420>



1994년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2000년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
 2000년 3월~2003년 2월: 삼성전자 무선

사업부 책임연구원

2006년 2월~2007년 2월: Texas A & M University, Visiting Scholar

2012년 2월~2013년 2월: Syracuse University, Visiting Scholar

2003년 3월~현재: 국립공주대학교 스마트정보기술공학과 교수
[주 관심분야] 전자기 수치해석, 주파수 선택구조

권 중 화 [한국전자통신연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2132-7403>



1994년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
 2010년 2월: 연세대학교 전기전자공학 (공학박사)
 2017년~2018년: 한국전자과학회 EMC기

술연구회 위원장

2023년~2024년: 한국전자과학회 전자파보안연구회 위원장

2021년 9월~2022년 8월: Missouri Univ. of Science & Technology 방문연구원

1999년 1월~현재: 한국전자통신연구원 입체통신연구소 전파 연구본부 전파환경감시연구실 책임연구원

[주 관심분야] SI/PI 및 EMC 대책 기술 및 표준화, 고출력 전자파 펄스 방호대책 및 측정·평가 기술