

전송 선로 트랜스포머 기반 넓은 입력 전력 및 광대역 특성을 갖는 고효율 정류기

High-Efficiency Rectifier Based on Transmission-Line Transformer with Wide Input Power and Frequency Ranges

김 빛 찬 · 이 다 주 · 오 준 택

Bitchan Kim · Daju Lee · Juntaek Oh

요 약

본 논문은 전송선로 트랜스포머 기반 넓은 입력 전력 및 주파수 범위 특성을 갖는 고효율 정류기를 설계 및 제작한 결과를 제시한다. 제안한 정류기는 전압 체배기와 정합을 위한 전송선로가 전압 체배기의 각 다이오드에 연결되어 구성된다. 두 개의 연결된 전송 선로는 트랜스포머 형태로 구성되어 길이 당 높은 인덕턴스를 가져 낮은 삽입 손실을 갖도록 하며, 넓은 입력 전력 및 주파수 범위에서 소스 임피던스에 정합하도록 최적화 하였다. 제안한 정류기는 34.4 mm×12.8 mm의 크기로 제작되었으며, 측정을 통해 성능을 검증하였다. 제작된 정류기는 2.0~2.8 GHz의 넓은 주파수 대역에서 70 % 이상의 높은 전력 변환 효율을 가졌으며, 2.45 GHz의 중심주파수에서 50 % 이상의 전력 변환 효율을 갖는 입력 전력 범위가 4.6~22.8 dBm임을 측정을 통해 확인하였다.

Abstract

In this paper, a high-efficiency rectifier based on a transmission-line transformer with wide input power and frequency ranges is presented. The proposed rectifier was configured with a voltage multiplier and transmission lines connected to each diode. Both the connected transmission lines were coupled and configured in the form of a transformer for a high Q-factor and low insertion loss. Further, the rectifier was optimized to match the source impedance for wide input power and frequency ranges. The size of the proposed rectifier was 34.4 mm × 12.8 mm, and its performance was verified through measurements. The proposed rectifier exhibited a high power conversion efficiency of over 70% in a wide frequency band of 2.0 GHz - 2.8 GHz. The rectifier exhibited a power conversion efficiency of 50% or more in the power range of 4.6 dBm - 22.8 dBm at a center frequency of 2.45 GHz.

Key words: Wideband, Wide Input Power Range, Wireless Power Transfer, Rectifier

I. 서 론

RF 기반 무선전력 전송(wireless power transfer, WPT)과

에너지 하베스팅(energy harvesting, EH) 기술에 대한 적용 범위가 확장됨과 동시에, 적용 범위에 따른 다양한 사용 주파수 및 동작 범위를 갖는 WPT 및 EH 시스템 수요가

「이 논문은 과기정통부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019R1G1A1003865)」

승실대학교 전자정보공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received March 2, 2022 ; Revised March 8, 2022 ; Accepted March 22, 2022. (ID No. 20220302-022)

· Corresponding Author: Juntaek Oh (e-mail: kingojt@ssu.ac.kr)

늘어나고 있다^[1]. 다양한 목표 성능을 갖는 시스템 구성을 위해서는 다중 대역 또는 광대역을 지원하면서 거리에 따른 입력 전력이 변화하더라도 높은 효율을 유지할 수 있는 정류기가 필수적이다. 하지만 다중 대역 또는 광대역을 포함하거나, 넓은 입력 전력 범위를 포함하는 정합방식은 복잡하기 때문에 다양한 접근이 필요하다.

넓은 입력 전력 및 주파수 범위에 고효율 동작이 가능한 정류기를 구성하는 하나의 방식으로서 두 개의 정류부를 사용하는 방식이 있으며, 하나의 정류부는 낮은 입력 전력 또는 낮은 주파수 대역에 정합하고, 다른 하나의 정류부는 높은 입력 전력 범위 또는 높은 주파수 대역에 정합하여 정류기를 구현할 수 있다. 이 방식은 넓은 입력 전력 및 주파수 범위 특성을 모두 만족시킬 수 있다는 장점이 있지만, 로드 저항이 두 개로 나뉘어 구성되어 DC 전력을 하나의 로드로 전달하는 데에 추가적인 회로가 필요하다는 단점이 있다^{[2][3]}. 입력 정합단만을 구성하여 한 번에 임피던스를 정합하는 방식은 정류기를 정합하는 가장 간단한 방식이지만, 입력 정합단이 복잡해질 수 있다는 특징이 있다^{[4]~[6]}. 결합된 전송선로 기반 정류기는 이러한 입력 정합단의 복잡도를 낮추면서도 넓은 주파수 대역에서 높은 효율을 갖는다는 특징이 있다^{[7][8]}.

본 논문에서는 다양한 사용 주파수 및 입력 전력 범위를 포함하는 전송선로 트랜스포머 기반 정류기를 제안하였다. 사용된 전압 체배기의 각 다이오드에 직렬 전송선로를 이용하여 전압 체배기의 입력 임피던스를 소스 임피던스에 정합하였으며, 두 개의 전송 선로는 낮은 삽입 손실을 갖기 위해서 결합되어 트랜스포머 형태로 구성되었다. 전송선로 트랜스포머의 최적화를 통해 정류기가 넓은 입력 전력 및 주파수 범위에서 높은 효율을 달성하고자 했다.

II. 회로 설계

제안하는 정류기는 그림 1과 같이 입력 정합단, 전압 체배기, 전압 체배기용 정합단으로 구성되어 있다. 전압 체배기는 병렬 연결된 다이오드를 사용하는 방식이기 때문에 높은 입력 전력까지 정류가 가능할 뿐만 아니라, 입력 전력 및 주파수에 따른 임피던스 변화가 작다는 것이

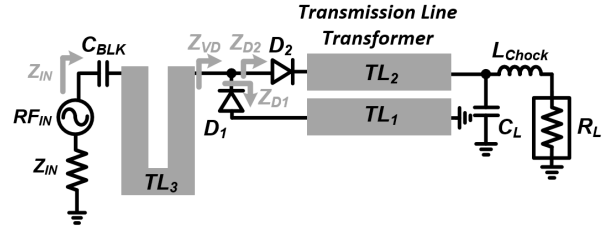


그림 1. 제안하는 정류기 도식도
Fig. 1. Schematic of proposed rectifier.

특징이다^[9]. 본 연구에서는 전송선로 트랜스포머를 이용하여 전압 체배기의 각 다이오드 임피던스를 제어하여 정류기를 정합하고자 하였다.

그림 2는 2.45 GHz에서 입력전력에 따른 다이오드의 입력 임피던스를 나타낸 것이다. 다이오드 D_1 의 입력 임피던스 Z_{D1} 은 D_2 의 입력 임피던스 Z_{D2} 와 다른 것을 알 수 있는데, 이는 입력 전력이 커지면 로드 커패시턴스 C_L 에 걸리는 정류 전압이 높아짐에 따라서 D_2 의 양단에 걸리는 DC 전압과 D_1 에 걸리는 전압의 차이가 커지기 때문에 입력 임피던스 차이가 발생한다^[9]. 전압 체배기의 입력 임피던스 Z_{VD} 는 Z_{D1} 과 Z_{D2} 의 병렬 값으로 결정되는 특성을 활용하여, 직렬 전송선로 TL_1 을 이용하여 D_1 은 0~20 dBm의 목표 입력 전력 범위에서 72 Ω을 중심으로 $-j31 \sim 40$ Ω의 허수부를 가지도록 정합하였다. D_2 는 직렬 전

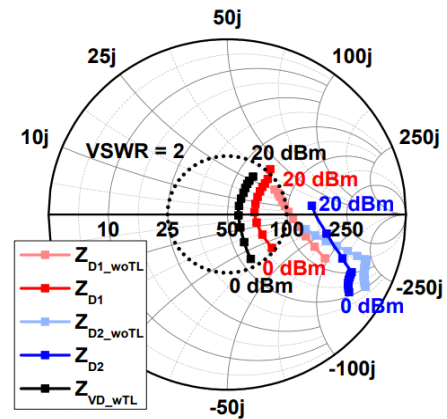


그림 2. 2.45 GHz에서 입력전력에 따른 다이오드의 입력 임피던스 시뮬레이션 결과 ($R_L = 680 \Omega$)
Fig. 2. Simulated input impedance of the diodes with input power at 2.45 GHz ($R_L = 680 \Omega$).

송선로 TL_2 를 이용하여 $65 \sim 195 \Omega$ 의 실수부를 $56 \sim 160 \Omega$ 으로 낮추고 허수부를 평균적으로 $+j40 \Omega$ 만큼 증가시켜서, 전압 체배기의 임피던스가 10 dBm 에서 55Ω 을 가지면서 $0 \sim 20 \text{ dBm}$ 의 입력전력범위에서 $-j25 \sim j25 \Omega$ 의 허수부를 가져 넓은 입력 전력 범위에서 소스 임피던스에 정합되도록 구현하였다.

그림 1과 같이 전압 체배기의 정합을 위한 두 개의 전송선로는 서로 가까이 배치하여 트랜스포머 형태로 최종적으로 구성되었다^[10]. 패러데이의 법칙에 따라서 두 전송선로 간의 주변 자기장에 의해 신호 교류가 일어나게 되며, 이 때 두 전송선로의 전류방향에 따라 상호 인덕턴스의 크기가 결정된다. 이번 설계에서는 두 전송 선로에 흐르는 전류가 서로 반대 방향으로 보이도록 배치되어 상호 인덕턴스가 커지는 방향으로 결합되었다. 이에 따라서 따로 떨어진 직렬 전송선로에 비해 트랜스포머 형태의 전송선로는 길이 당 인덕턴스를 증가시킬 수 있어 상대적으로 삽입손실을 줄일 수 있다. 그림 3은 제안한 정류기의 입력 임피던스를 나타낸 결과이며, 서로 떨어진 전송선로가 연결된 전압 체배기의 입력 임피던스와 비교할 때 전송선로 트랜스포머 기반 전압 체배기의 입력 임피던스는 인덕턴스가 증가한 것을 확인하였다.

최종적으로 DC 차단 커패시터를 포함하는 정류기의 임피던스를 정확히 조정하기 위해서 트랜스포머 형태로 구성하면서 얻어진 추가적인 인덕턴스 성분과 함께 직렬

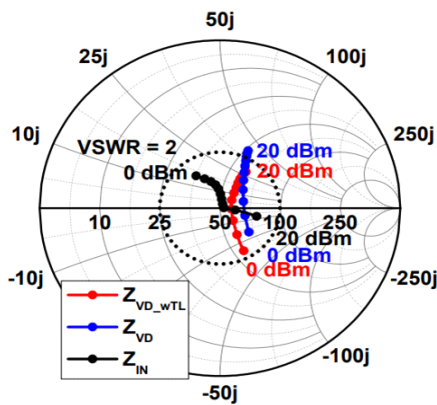


그림 3. 2.45 GHz에서 입력전력에 따른 제안한 정류기의 입력 임피던스 시뮬레이션 결과 ($R_L = 680 \Omega$)

Fig. 3. Simulated input impedance of the proposed rectifier with input power at 2.45 GHz ($R_L = 680 \Omega$).

전송선로 TL_3 를 구성하여 정합하였으며, 그림 3과 같이 $0 \sim 20 \text{ dBm}$ 의 넓은 입력 전력 범위에서 안정적으로 $VSWR=2$ 내부에 정류기 임피던스가 정합된 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 고정된 입력전력 16.5 dBm 에서 주파수에 따른 제안된 정류기의 입력 임피던스 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이며, $2 \sim 3 \text{ GHz}$ 의 초 광대역 범위에서 $VSWR=2$ 를 만족하는 것을 확인하였다.

그림 5는 제안된 전송선로 트랜스포머 기반 정류기의

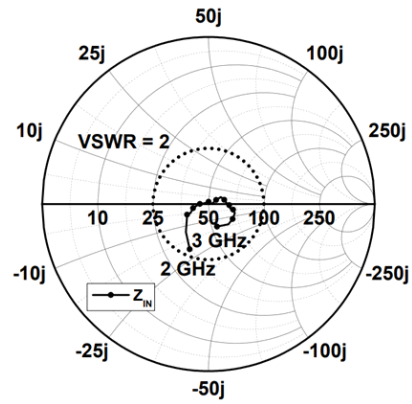


그림 4. 16.5 dBm 전력 입력 시 주파수에 따른 제안한 정류기의 입력 임피던스 시뮬레이션 결과 ($R_L = 680 \Omega$)

Fig. 4. Simulated input impedance of the proposed rectifier with frequency at 16.5 dBm ($R_L = 680 \Omega$).

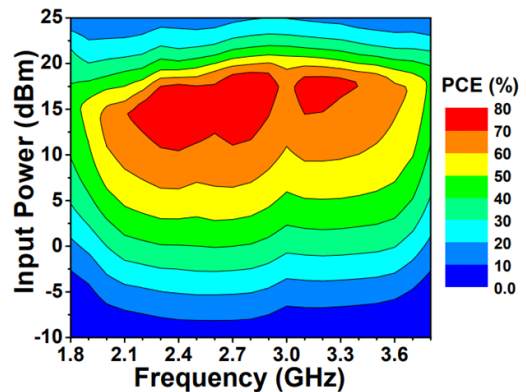


그림 5. 입력 전력 및 주파수에 따른 제안된 정류기의 PCE 시뮬레이션 결과 ($R_L = 680 \Omega$)

Fig. 5. Simulated PCE of the proposed rectifier with input power and frequency ($R_L = 680 \Omega$).

주파수 및 입력 전력에 따른 PCE (power conversion efficiency, 전력 변환 효율) 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이며, 제안된 회로는 15 dBm에서 30 dBm까지 입력 전력이 변할 때 1.8~2.4 GHz의 초광대역에서 50 % 이상의 PCE를 갖는 것을 확인하였다.

III. 측정 결과

제안된 정류기는 3.2의 유전율, 0.003의 손실 탄젠트를 갖는 0.813 mm 두께의 Taconic사의 TLC-32 기판을 이용하여 제작하였다. 제작된 정류기의 레이아웃 및 PCB (printed circuit board)는 그림 6과 같으며, 제작된 회로의 크기는 34.4×12.8 mm²이다. 전압 체배기의 정류 다이오드는 높은 항복 전압을 지님과 동시에 높은 DC 전압이 출력 가능한 Avago 사의 HSMS-286C 쇼트키 다이오드를 사용하였다. 로드 저항은 최대 변환 효율을 갖도록 최적화를 통해 680 Ω으로 값을 결정하였고, 5 pF의 DC 차단 커패시터와 3개의 100 pF의 DC 통과 필터용 커패시터를 사용하였다. 제작된 정류기의 성능 확인을 위해 N58182A의 신호 발생기를 사용하여 신호를 생성 및 인가하였으며, 파워 센서 및 디지털 멀티미터를 통해 정류기의 RF 입력 및 DC 출력 전압을 측정하였다. 측정된 RF 입력과 DC 출력 전압을 기반으로 $V_{OUT}^2/(P_{IN} \cdot R_L)$ 의 식을 통해 PCE값을 계산하였다.

그림 7은 제안된 정류기의 2.45 GHz에서 입력 전력에

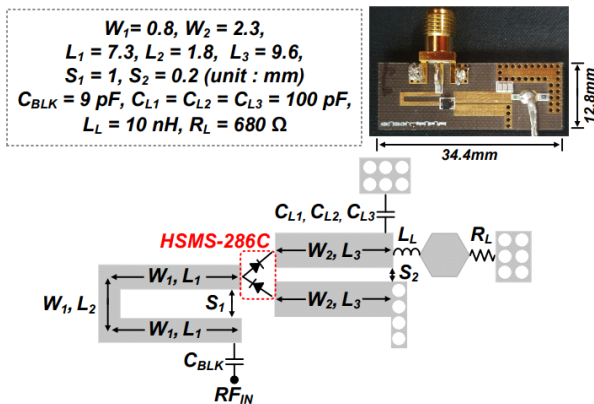


그림 6. 제작된 정류기의 레이아웃 및 사진
Fig. 6. Layout and photograph of the implemented rectifier.

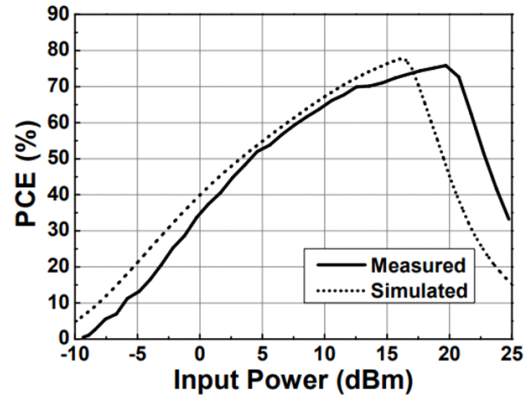


그림 7. 제안된 정류기의 2.45 GHz에서 입력 전력에 따른 PCE 시뮬레이션 및 측정 결과 ($R_L=680 \Omega$)
Fig. 7. Simulated and measured PCE of the proposed rectifier versus input power at 2.45 GHz ($R_L=680 \Omega$).

따른 PCE 측정결과를 나타낸 것이며, 19.7 dBm의 입력 전력에서 최대 75.9 %의 PCE를 가지며, 4.6~22.8 dBm의 넓은 입력 전력 범위에 대해 50 % 이상의 PCE를 유지하는 것을 확인하였다. 주파수 특성 측면에서 제안한 정류기는 그림 8과 같이 2.0~2.8 GHz의 넓은 대역폭에서 70 % 이상의 PCE를 유지하는 것을 확인하였다. 그림 7과 8에서 보이는 시뮬레이션과 측정의 오차는 다이오드 모델링의 오차와 PCB 공정상의 오차에 의해서 발생하였다.

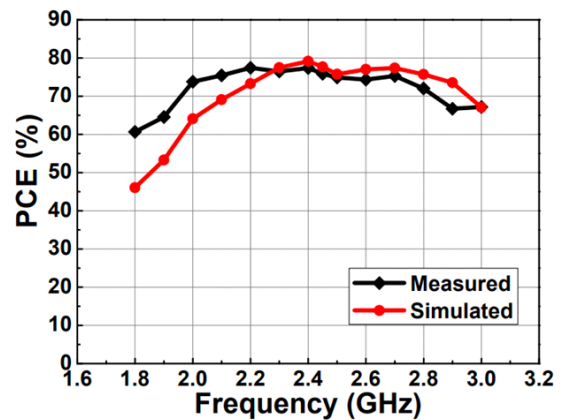


그림 8. 주파수에 따른 최대 PCE 시뮬레이션 및 측정 결과 ($R_L=680 \Omega$)
Fig. 8. Simulated and measured peak PCE versus frequency ($R_L=680 \Omega$).

표 1. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교

Table 1. Comparison with the previously reported works.

		Ref. [6]	Ref. [7]	Ref. [8]	This work
Eff. over operating band	Peak PCE >70 % [GHz]	2.0~3.05	0.57~0.9	2.3~2.42*,**	2.0~2.8
	Fractional BW [%]	41.5	44.9	5	32.7
Power range for PCE>50 % [dB]		11	N/A	11.5**	4.6~22.8
Peak Eff.	Eff. [%]	75.8	75.5**	75	75.9
	Input power [dBm]	14	15**	6	19.7
	Freq. [GHz]	2.5	0.7	2.38	2.45
Size [mm ²]		36×25	0.15×0.22 [λ ²]	35×34	34.4×12.8 (0.28×0.11 [λ ²])
Matching network structure		Multi-stage transmission-line	Coupled transmission-line	Coupled transmission-line	Transmission-line transformer

*Frequency range for PCE > 50 % (GHz).

**Graphically estimated.

표 1은 기존 정류기의 연구결과와 본 논문에서 제안한 정류기의 연구결과를 비교한 표이며, 동작 주파수에서 더 넓은 입력 전력 범위에서 정류 특성이 우수함과 동시에 넓은 동작 주파수 특성을 가지는 것을 통해 본 논문에서 제안한 기법을 적용한 정류기의 효율성을 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전송 선로 트랜스포머 기반의 넓은 입력 전력 및 주파수 범위를 갖는 WPT용 고효율 정류기를 제안하였다. 사용된 전압 체배기의 임피던스 정합을 위해 직렬 전송선로를 연결하였으며, 길이 당 상대적으로 높은 인덕턴스를 가짐으로서 낮은 삽입 손실을 갖기 위해 전송선로가 반대 방향의 전류로 결합되도록 전송선로를 결합하여 트랜스포머 형태로 구현하였으며, 길이 및 간격 조정을 통해 광대역 및 넓은 입력 전력 범위에서 고효율 특성을 갖도록 최적화 하였다. 제안된 전송 선로 트랜스포머 기반 정류기는 2.45 GHz의 동작 주파수에서 4.6~22.8 dBm의 넓은 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 효율을 가졌을 뿐만 아니라, 2.0~2.8 GHz의 광대역에서 70 % 이상의 PCE를 유지하는 것을 측정결과를 통해서, 제작된 정류기의 아이디어를 검증하였다.

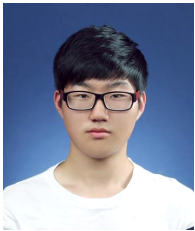
References

- [1] L. Li, X. Zhang, C. Song, W. Zhang, T. Jia, and Y. Huang, "Compact dual-band, wide-angle, polarization-angle-independent rectifying metasurface for ambient energy harvesting and wireless power transfer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 3, pp. 1518-1528, Mar. 2021.
- [2] P. Wu, Y. Chen, W. Zhou, Z. H. Ren, and S. Y. Huang, "A wide dynamic range rectifier array based on automatic input power distribution technique," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 437-440, Apr. 2020.
- [3] J. Kim, J. Oh, "Compact rectifier array with wide input power and frequency ranges based on adaptive power distribution," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 5, pp. 513-516, May. 2021.
- [4] S. Zheng, W. Liu, and Y. Pan, "Design of an ultra-wideband high-efficiency rectifier for wireless power transmission and harvesting applications," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 6, pp. 3334-3342, Jun. 2019.

- [5] W. Liu, K. Huang, T. Wang, J. Hou, and Z. Zhang, "A compact high-efficiency RF rectifier with widen bandwidth," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 1, pp. 84-87, Jan. 2022.
- [6] P. Wu, S. Y. Huang, W. Zhou, W. Yu, Z. Liu, and X. Chen, et al., "Compact high-efficiency broadband rectifier with multi-stage-transmission-line matching," *IEEE Transaction on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 66, no. 8, pp. 1316-1320, Aug. 2019.
- [7] Y. L. Lin, X. Y. Zhang, Z. X. Du, and Q. W. Lin, "High-efficiency microwave rectifier with extended operating bandwidth," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 7, pp. 819-823, Jul. 2018.
- [8] F. Zhao, D. Inserra, G. Gao, Y. Huang, J. Li, and G. Wen, "High-efficiency microwave rectifier with coupled transmission line for low-power energy harvesting and wireless power transmission," *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 1, pp. 916-925, Jan. 2021.
- [9] D. Lee, J. Oh, "Broad dual-band rectifier with wide input power ranges for wireless power transfer and energy harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, to be published. doi: 10.1109/LMWC.2022.3145879
- [10] J. Sevick, "A simplified analysis of the broadband transmission line transformer," *High Frequency Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 48-53, Feb. 2004.

김 빛 찬 [숭실대학교/석사과정]

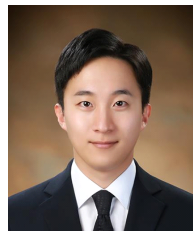
<https://orcid.org/0000-0001-7127-4234>



2016년 3월~2022년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 (공학사)
 2022년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF 무선전력 전송 기술, RF 전력 증폭기 등

오 준 택 [숭실대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-4694-8545>



2010년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 2012년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2016년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)
 2018년 8월: 한국전기연구원 첨단의료기

기연구본부 선임연구원

2020년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 조교수

2020년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 조교수

[주 관심분야] 밀리미터파 집적회로, 레이더 송수신 하드웨어, RF 무선전력전송 기술 등

이 다 주 [숭실대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-4614-4248>



2017년 3월~2021년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 (공학사)
 2021년 3월~현재: 숭실대학 전자정보공학부 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 레이더 송수신 하드웨어, RF 무선전력 전송 기술 등