

가변 전력 분배 기반 다중 모드 고효율 정류기 배열

A High-Efficiency Multi-Mode Rectifier Array Based on
Variable Power Distribution

김빛찬 · 이다주 · 김지수 · 오준택

Bitchan Kim · Daju Lee · Jisu Kim · Juntaek Oh

요 약

본 논문은 가변 전력 분배 기반의 다중 전력 모드를 갖는 고효율 정류기 배열을 설계 및 제작한 결과를 제시한다. 제안한 정류기 배열은 저전력 모드용 정류부, 고전력 모드용 정류부, 가변 전력 분배기로 구성된다. 2개의 분기선 결합기 기반 4포트 전력분배기와 가변 임피던스단으로 구성되어있는 가변 전력 분배기는 가변 임피던스 단의 입력 임피던스에 따라서 전력 분배율이 결정된다. 이를 이용하여 정류기 배열을 입력 전력에 따라서 2개의 정류부로 향하는 전력을 차등 분배하면 입력 전력에 따라서 정류기 배열의 정류 효율을 높게 유지할 수 있다. 제안한 정류기 배열은 67.7 mm×47.4 mm의 크기로 제작되었으며, 측정을 통해 제작된 회로를 검증하였다. 제작된 정류기는 2.45 GHz에서 저전력 모드 및 고전력 모드에서 각각 최대 80.2 %, 68.7 %의 효율과 함께 4.4~23.1 dBm, 13.9~28 dBm의 전력 범위에서 50 % 이상의 power conversion efficiency를 유지하는 것을 확인하였다. 입력 전력에 따른 적절한 모드 선택에 따라서 정류기 배열은 최대 4.4~28 dBm의 넓은 입력전력 범위에서 50 % 이상의 높은 power conversion efficiency를 유지할 수 있다.

Abstract

This study proposes a high-efficiency rectifier array with multiple power modes based on variable power distribution. The proposed rectifier array comprises of rectifier cell 1 for low-power mode, rectifier cell 2 for high-power mode, and a variable power divider. The variable power divider, composed of two branch line couplers and a variable impedance stage, determines the power-dividing ratio by controlling the variable impedance stage. If the input power is adaptively distributed in the rectifier array according to the input power, the rectifier array can maintain high efficiency over a wide input power range. The size of the proposed circuit is 67.7 mm×47.4 mm. The measurements obtained during experimentation show that proposed rectifier array has high power conversion efficiency of 80.2 % and 68.7 % in the low and high-power modes, respectively. The circuit can maintain high power conversion efficiency of over 50 % over an input power range of 4.4–28 dBm depending on the selected mode at 2.45 GHz.

Key words: Power Distribution, Wide Input Power Range, Wireless Power Transfer, Rectifier Array

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

승실대학교 전자정보공학부(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received April 26, 2022 ; Revised May 9, 2022 ; Accepted May 9, 2022. (ID No. 20220426-042)

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

I. 서론

RF 무선전력전송은 전기에너지를 전자기와 형태로 변환 및 전송하는 기술로서, 기존 자기유도 및 자기공진 방식 무선전력전송 기술과 다르게 대상 전자기기의 이동 유무에 상관없이 원거리까지 자유롭게 전력 전송이 가능하다. 이에 따라서 전자기기의 배터리의 크기를 줄일 수 있어 다양한 전자기기의 소형화가 가능하기 때문에, 이를 위해 RF 무선전력전송에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. RF 무선전력전송 시스템에서는 전력 전송 거리에 따라서 수신되는 입력 전력의 크기가 크게 달라지기 때문에, 입력 전력 변화에 상관없이 높은 효율을 유지하는 정류기를 통해 전력 전송 거리에 관계없이 시스템의 높은 효율을 유지하는 것이 필요하다. 최근 이러한 무선전력전송 시스템에서 적용 가능한 넓은 입력 전력을 갖는 다양한 정류기에 대한 연구가 발표되었다^{[1]~[6]}.

전압 체배기의 각 다이오드를 정합하여 넓은 입력 전력에서 높은 효율을 유지하는 정류기 설계 기법은 작은 크기로 구현 가능하다는 장점이 있다^[1]. 정합 기능과 함께 입력 전력에 따라서 차등적으로 전력 분배 가능한 적응형 전력 분배 기반 정류기 배열은 입력 전력 범위를 확장시킬 수 있으나, 설계 복잡도가 커진다는 단점이 있다^{[2],[3]}. 분기선 결합기 기반의 정류기 배열은 입력 전력에 따른 정합도에 관계없이 전력을 재사용함으로써 넓은 입력 전력 범위에서 높은 효율을 가질 수 있으나, 동일한 정류기를 배열로 사용하기 때문에 입력 전력 범위의 확장하는데 제한이 있다^{[4]~[6]}.

본 논문에서는 넓은 입력 전력 범위를 갖는 가변 전력 분배 기반 정류기 배열을 제안하였다. 제안한 정류기 배열은 저전력 모드 및 고전력 모드에서 동작 가능한 정류기와 전력 분배기로 구성하였으며, 전력 분배기는 저전력 모드 정류부와 고전력 모드 정류부 중 하나의 정류부로 전력을 전달 가능하기 때문에, 입력 전력에 따라서 정류부를 선택하여 각 정류부에서 효과적으로 정류하게 할 수 있으며, 입력 전력에 따른 적절한 모드 선택 시 넓은 입력전력 범위에서 높은 효율을 유지할 수 있다.

II. 회로 설계

그림 1은 제안하는 정류기 배열의 도식도를 나타낸 그

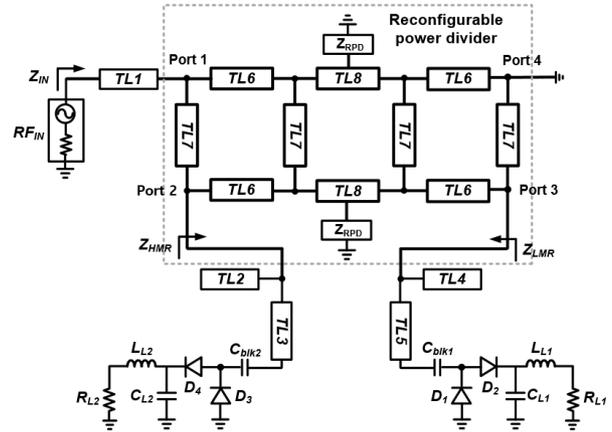


그림 1. 제안하는 정류기 배열 도식도
Fig. 1. Schematic of proposed rectifier array.

림이며, 제안하는 정류기 배열은 저전력 모드용 정류부, 고전력 모드용 정류부, 가변 가능한 전력 분배부로 구성 되어 있다. 가변 전력 분배부의 포트 2에는 고전력 모드 정류부를 연결하고, 포트 3에 저전력 모드 정류부를 연결 하였다.

먼저 정류부를 살펴보면, 각 정류부는 상대적으로 높은 출력 전압을 정류하고, 입력 전력에 따른 임피던스 변화가 적은 전압 체배기 구조를 사용하였다. 저전력 모드용 정류부의 전압 체배기 다이오드는 7 V의 항복 전압을 갖는 HSMS 286C를 사용하였으며, 고전력 모드용 정류부의 전압 체배기 다이오드는 15 V의 항복 전압을 갖는 HSMS 2822를 사용하였다. 그림 2는 저전력 모드용 정류부 및 고전력 모드용 정류부의 입력 임피던스 Z_{LMR} , Z_{HMR} 를 나타낸 것이며, 병렬 오픈 스텝과 직렬 전송선로 기반 L-형 정합단을 각각 구성하여 넓은 입력 전력에서 정합하였다. 저전력 모드 정류부는 $-1.5 \sim 22.5$ dBm에서 입력 임피던스 Z_{LMR} 가 $VSWR=2$ 내부에 위치하며, 고전력 모드 정류부는 $8 \sim 34$ dBm에서 입력 임피던스 Z_{HMR} 가 $VSWR=2$ 내부에 위치하는 것을 확인하였다.

그림 1의 재구성 가능한 전력 분배부는 2개의 분기선 결합기 기반 4포트 전력 분배기와 가변 임피던스단으로 구성되었다. 포트 1은 입력 포트이며, 포트 4는 그라운드로 연결하여 포트 2, 3에서 반사되는 전력이 포트 4로 향할 때, 포트 4에서 전력을 다시 반사하여 포트 2, 3으로

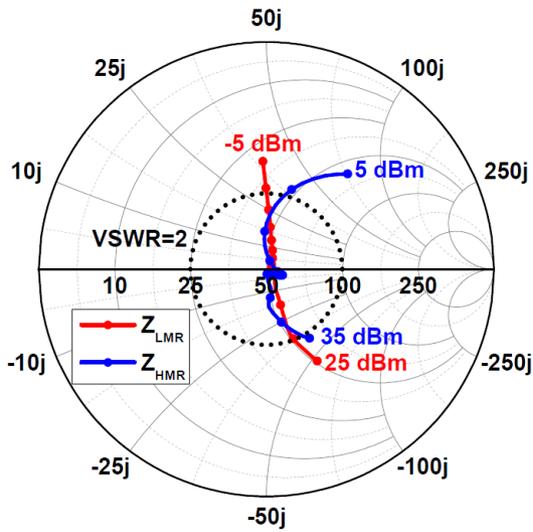


그림 2. 2.45 GHz에서 입력 전력에 따른 저전력 모드용 정류부 및 고전력 모드용 정류부의 입력 임피던스 시뮬레이션 결과($R_{L1}=R_{L2}=680 \Omega$)

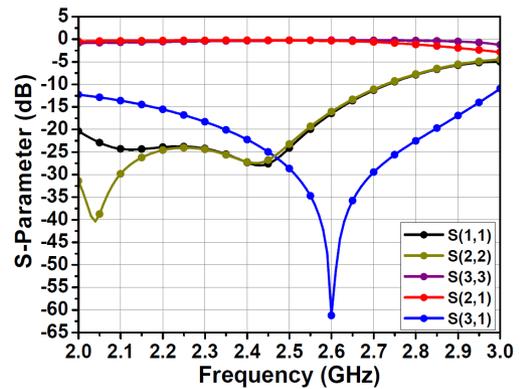
Fig. 2. Simulated input impedance of the rectifier cell 1 for low-power mode and the rectifier cell 2 for high-power mode with input power at 2.45 GHz ($R_{L1}=R_{L2}=680 \Omega$).

재사용되도록 하였다⁶⁾. 포트 2와 포트 3은 출력 포트이며, 제안된 재구성 가능한 전력 분배부는 가변 임피던스 단의 입력 임피던스 Z_{RPD} 가 변하게 되면 포트 2와 포트 3으로 나뉘는 전력 분배율이 변하게 된다. 예를 들어 Z_{RPD} 가 $j1$ 에서 $j1000$ 까지 변하게 되면 S_{21} 이 -28 dB에서 -0.01 dB까지 가변하고, S_{31} 이 -0.002 dB에서 -32 dB까지 가변되고, 극단적으로 Z_{RPD} 가 무한대인 경우는 포트 3으로만 전력이 전달되며, 0Ω 인 경우는 포트 2로만 전력이 전달된다⁷⁾. 본 설계에서는 이를 활용하여 저전력 모드 선택 시 포트 3으로만 전력이 전달되고, 고전력 모드 선택 시 포트 2로만 전력이 전달되는 2가지 모드만을 고려하였다.

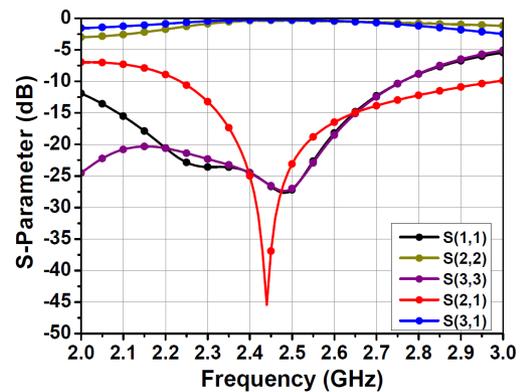
제안한 구조와 제안한 구조의 동작 방식에 대한 효율성을 살펴보기 위해, 가변 임피던스 단의 삽입 손실 및 입력 전력에 따른 임피던스 변화가 최소화되어야 한다. 따라서 본 설계에서는 커패시터와 전송 선로를 직렬로 연결하여 가변 임피던스 단을 구현하였으며, 가변 임피던스 단의 입력 임피던스 Z_{RPD} 가 각각 0Ω 과 무한대로 표현 가능하도록 하기 위해서, 시뮬레이션 및 측정상에서 커패시터의

연결 및 제거를 통해 동작 검증을 하였다. 그림 3은 구현된 가변 전력 분배부의 시뮬레이션 결과이며, 2.45 GHz에서 저전력 모드 선택 시 S_{21} 이 -37 dB, S_{31} 이 -0.23 dB를 가졌으며, 고전력 모드 선택 시 S_{21} 이 -0.21 dB, S_{31} 이 -25 dB를 가졌다.

구성한 전력 분배부 및 정류부를 통합한 정류기 배열의 PCE(power conversion efficiency, 전력 변환 효율) 시뮬레이션 결과는 그림 4와 같다. 제안한 정류기 배열은 2.45 GHz의 동작 주파수에서 저전력 모드 선택 시 17 dBm의 입력전력에서 75.8 %의 PCE를 가지며, 4~19 dBm의 입



(a) 고전력 모드
(a) High-power mode



(b) 저전력 모드
(b) Low-power mode

그림 3. 모드에 따른 제안한 전력 분배부의 S-parameter 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulated S-parameter of the proposed power divider according to mode.

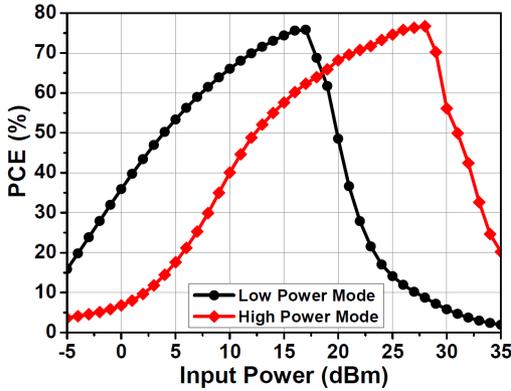


그림 4. 2.45 GHz에서 제안된 정류기 배열의 입력 전력 및 주파수에 따른 PCE 시뮬레이션 결과($R_{L1}=R_{L2}=680 \Omega$)

Fig. 4. Simulated PCE of the proposed rectifier array with input power and frequency at 2.45 GHz ($R_{L1}=R_{L2}=680 \Omega$).

력 전력 범위에서 50 % 이상의 PCE를 유지한다. 고전력 모드 선택 시 28 dBm의 입력 전력에서 76.7 %의 PCE를 가지며, 13~30 dBm의 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 PCE를 유지한다. 모드 선택에 따라서 이상적으로 정류부 배열은 4~30 dBm의 넓은 입력전력 범위에서 50 % 이상의 PCE를 가질 수 있는 것을 확인할 수 있다.

III. 측정 결과

그림 5는 제안한 정류기 배열을 제작한 그림이며, 3.2의 유전율, 0.003의 손실 탄젠트를 갖는 0.813 mm 두께를 가지는 Taconic사의 TLC-32 기판을 이용하여 제작하였다. 정류기 배열에서 저전력 및 고전력 모드용 정류부에 사용된 로드 저항은 680 Ω을 동일하게 사용하였으며 DC 통과 필터용 커패시터는 30 pF, 20 pF를 각각 사용하였다. 제작된 정류기 배열의 정류 특성을 확인하기 위해 N58182A의 신호발생기와 파워센서 및 디지털 멀티미터를 사용하여 정류기 배열의 RF 입력 전력과 DC 출력 전압 특성을 확인하였으며, 측정된 값을 이용하여 정류기 배열의 PCE를 $(V_{OUT1}^2/R_{L1}+V_{OUT2}^2/R_{L2})/P_{IN}$ 의 식을 통해 계산하였다. 측정 시, 모드 선택에 따라서 가변 임피던스단의 입력 임피던스 Z_{RPD} 가 0 Ω과 무한대로 최대한 보일 수 있도록 커패

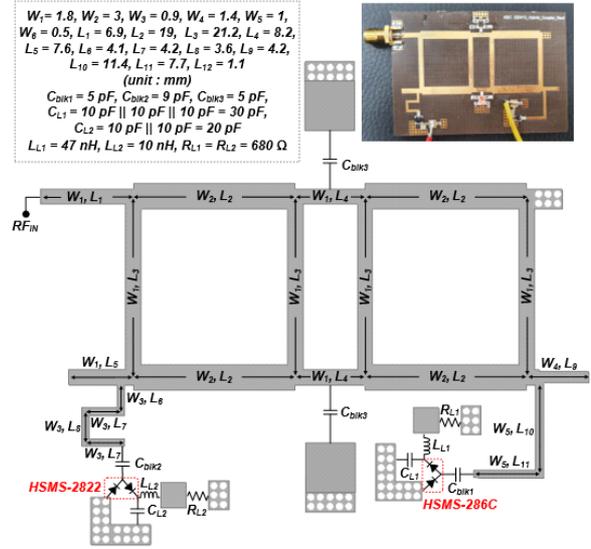


그림 5. 제작된 정류기 배열의 레이아웃 및 사진

Fig. 5. Layout and photograph of the implemented rectifier array.

시터의 부차 및 탈착을 통해 측정을 진행하였다. 추후 스위치를 통해서 선택적으로 임피던스를 가변할 수 있도록 설계할 예정이다.

그림 6은 2.45 GHz의 동작 주파수에서 제작된 정류기 배열의 모드에 따른 측정된 정류 특성을 나타낸 그래프이며, 저전력 모드 선택 시 19.3 dBm의 입력 전력에서 최대 80.2 %를 가지며, 4.4~23.1 dBm의 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 PCE를 유지하는 것을 확인하였다. 고전력 모드 선택 시 25.2 dBm의 입력 전력에서 최대 68.7 %의 PCE를 가지며, 13.9~28 dBm의 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 PCE를 유지하는 것을 확인하였다. 이에 따라서 제안한 정류기 배열은 모드 선택에 따라서 이상적으로 4.4~28 dBm의 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 PCE를 유지할 수 있다. 그림 4와 그림 6을 통해 정류기 배열의 시뮬레이션 및 측정결과를 비교할 수 있으며, 두 결과의 오차는 다이오드 및 커패시터의 모델링의 부정확성과 함께 고전력 모드 시 0 Ω이 아닌 약 7 Ω의 임피던스가 가변 임피던스단에서 보임으로써 발생한 오차이다.

표 1은 기존 정류기 배열과 제안한 정류기 배열의 측정결과를 비교한 표이며, 제안한 정류기 배열은 입력 전력

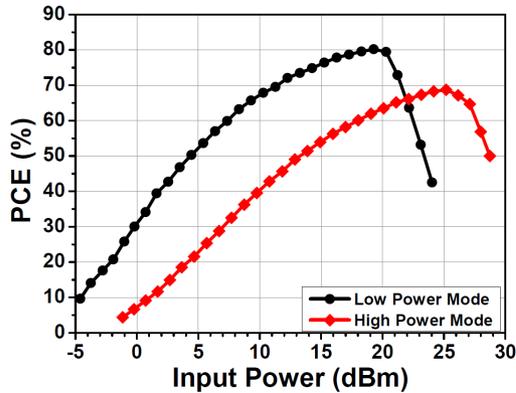


그림 6. 제안된 정류기 배열의 2.45 GHz에서 입력 전력에 따른 PCE 측정 결과($R_{L1}=R_{L2}=680 \Omega$)

Fig. 6. Measured PCE of the proposed rectifier array versus input power at 2.45 GHz ($R_{L1}=R_{L2}=680 \Omega$).

표 1. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교

Table 1. Comparison with the previously reported works.

	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	This work
Freq. [GHz]	2.45	5.8	2.45	2.45
Power range for PCE>50 % [dB]	24	15.5	19	18.7*, 14.1**
Peak PCE [%]	63	81	74.5	80.2*, 68.7**
No. of branches	3	2	2	2
Size [λ^2]	N/A	0.48×1.08	0.65×0.24	0.55×0.39

* Low power mode selection.

** High power mode selection.

에 따라서 모드 가변 시 기존 연구결과, 대비 훨씬 더 넓은 입력 전력 범위에서 높은 PCE를 유지하는 것을 확인하였으며, 그와 동시에 최대 PCE가 동일한 수준을 유지하는 것을 확인하였다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 가변 가능한 전력 분배 기반 정류기 배열의 효율성을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 넓은 입력 전력 범위를 갖는 가변 전력 분배 기반 정류기 배열을 제안하였다. 제안된 가변 전력 분배기는 저전력 모드 및 고전력 모드용 정류기를 결합

하며, 입력 전력에 따라서 전력 분배율을 선택하여 넓은 입력 전력에서 높은 효율을 가질 수 있도록 설계하였다. 제안한 정류기 배열은 2.45 GHz에서 저전력 모드와 고전력 모드에서 4.4~23.1, 13.9~28 dBm의 전력 범위에서 50% 이상의 높은 효율을 유지하기 때문에, 입력전력에 따라서 적절한 모드 선택 시 이상적으로 4.4~28 dBm의 전력 범위에서 50% 이상의 높은 효율을 유지할 수 있다. 또한, 저전력 모드와 고전력 모드에서 각각 최대 80.2%, 68.7%의 높은 최대 효율을 얻는 측정결과를 통해서, 제작된 정류기 배열의 아이디어를 검증하였다.

References

- [1] B. Kim, D. Lee, and J. Oh, "Highly efficient rectifier based on a matched voltage doubler with wide input power and frequency range," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 2, pp. 160-163, Feb. 2022.
- [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] Y. Y. Xiao, Z. X. Du, and X. Y. Zhang, "High-efficiency rectifier with wide input power range based on power recycling," *IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs*, vol. 65, no. 6, pp. 744-748, Jun. 2018.
- [5] S. C. Wang, M. J. Li, and M. S. Tong, "A miniaturized high-efficiency rectifier with extended input power range for wireless power harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 6, pp. 617-620, Jun. 2020.
- [6] D. Lee, K. Kim, J. Park, and J. Oh, "Highly efficient rectifier array using a two-section branch-line coupler for

simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT)," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 7, pp. 670-673, Jul. 2021.

[7] J. Kim, J. R. Yang, and J. Oh, "Reconfigurable hybrid matrix-based power divider with variable power-dividing ratios and frequencies," *Electronics Letters*, vol. 56, no. 17, pp. 889-891, Aug. 2020.

김 빛 찬 [승실대학교/석사과정]

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



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

김 지 수 [승실대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8633-9253>



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

이 다 주 [승실대학교/석사과정]

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



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

오 준 택 [승실대학교/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: 승실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 조교수

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