

결합된 전송선로 네트워크 기반 초광대역 초소형 정류기

Ultra-Wideband Compact Rectifier Based on Coupled Transmission-Line Network

박 현 아 · 김 빛 찬 · 오 준 택

Hyunah Park · Bitchan Kim · Juntaek Oh

요 약

본 논문은 결합된 전송선로 네트워크 기반 초광대역 고효율 정류기를 제작한 결과를 제시한다. 제안된 정류기는 정류된 첨두 전압을 증가시키기 위한 전압 체배기와 결합된 전송선로 네트워크로 구성하였으며, 제안된 결합된 전송선로 네트워크를 최적화하여 다른 추가 임피던스 매칭네트워크 없이 다이오드의 입력 임피던스를 초 광대역에서 정합함으로써 0.2~4.3 GHz 범위에서 50 % 이상의 높은 정류 효율을 얻도록 설계하였다. 제안된 전송선로 네트워크를 적용한 정류기를 검증하기 위해서 제작 및 측정을 진행하였으며, 제작된 정류기의 크기는 16.1 mm × 19.4 mm이다. 제안된 정류기는 0.6~2.6 GHz의 초 광대역에서 70 % 이상의 정류 효율을 가지는 것을 측정 결과를 통해 확인하였으며, 2.45 GHz에서 최대 74.9 %의 높은 최대 정류 효율을 가지는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this study, we propose the design and fabrication of a compact ultra-wideband high-efficiency rectifier based on a coupled transmission-line network. The proposed rectifier consists of a coupled transmission-line network and a voltage multiplier that increases the rectified peak voltage. The coupled transmission-line network was optimized to match the input impedance of the voltage multiplier without additional matching components, thus achieving a high power conversion efficiency of over 50 % in the ultra-wideband of 0.2-4.3 GHz. To verify its performance, the proposed rectifier was implemented and measurements were conducted. The dimensions of the implemented rectifier were 16.1 mm × 19.4 mm. The measurement results indicated that the proposed rectifier obtained a PCE of over 70 % in the ultra-wideband of 0.6-2.6 GHz. Furthermore, it achieved a maximum PCE of 74.9 % at 2.45 GHz.

Key words: Coupled Transmission Line, Wideband, Wireless Power Transfer, Rectifier

I. 서 론

최근 RF 기반 WPT(wireless power transfer, 무선전력 전송) 기술에 대한 관심이 높아짐에 따라 이를 구성하기 위

한 다양한 시스템의 개발이 진행되고 있다^[1]. WPT 시스템에서 성능을 좌우하는 가장 큰 단위 회로 중 하나는 정류기이며, 다양한 주파수 및 입력 전력 범위를 갖는 WPT 시스템들에 적용 가능한 광대역 정류기에 대한 연구가

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

승실대학교 전자정보공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received January 26, 2022 ; Revised February 10, 2022 ; Accepted March 3, 2022. (ID No. 20220126-012)

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

활발하다^{[2]~[12]}.

다중 전송선로 기반 매칭 네트워크를 정류용 다이오드 앞단에 배치하는 설계 방식은 임피던스 변환이 직관적인 방식으로 광대역 정류기를 구성하는 쉬운 방식 중 하나이다^{[2],[3]}. 하지만 단의 개수에 따라서 대역폭과 정류기의 크기가 이율배반의 관계에 있다는 제한적인 요소가 존재한다. 정류기를 구성하는 다른 방식으로 집중 소자를 이용한 방식은 별도의 EM(electromagnetic) 정보를 이용한 시뮬레이션 없이 간단하게 설계할 수 있다는 장점이 존재하지만, 소자 값의 허용 오차에 따라서 정류기의 효율 감소 예측이 어렵다는 단점이 존재한다^[4]. 최근 기본과뿐만 아니라 고조파 주파수를 정합하여 이를 피드백하는 방식이 발표되었으며, 이러한 방식을 적용하여 정류기의 대역폭을 효과적으로 증가시켜 약 150 %의 상대적 대역폭을 갖도록 설계되었지만 회로의 크기가 커진다는 단점이 있다^[5].

본 논문에서는 다양한 주파수 대역에서 동작하는 WPT 시스템에 적용 가능한 초 광대역 고효율 정류기를 제안하였다. 결합된 전송선로 네트워크만을 이용하여 광대역에서 다이오드의 임피던스를 정합함으로써, 정류기의 초 광대역 특성을 달성하고자 하였다.

II. 회로 설계

그림 1은 제안하는 정류기의 도식도를 나타낸 그림이며, 정류 다이오드는 정류된 침두 전압을 증가시키기 위해 전압 체배기 방식을 적용하여 구현하였다. DC 통과 필터는 로드 커패시턴스 C_L 이 다이오드 D_2 에 연결되며 로드 저항과 로드 커패시턴스 사이에 RF choke(choke)를 삽입하였다. 이러한 구성방식은 다이오드 D_1 과 D_2 로 보이는 입력 임피던스가 서로 같은 값을 유지하도록 하며, 이에 따라서 전압 체배기에 높은 전력 입력 시 D_1 과 D_2 의 전압을 동등하게 분배하여 항복전압(breakdown) 방지와 함께 전압 체배기에서 얻을 수 있는 최대 효율 특성을 갖도록 한다^[13].

광대역 정류기 설계를 위해서 먼저 주파수에 따른 전압 체배기의 입력 임피던스 Z_{ID} 를 확인하였으며, 그림 2와 같이 0.6~4.0 GHz 범위에서 95-j20 Ω 의 임피던스를

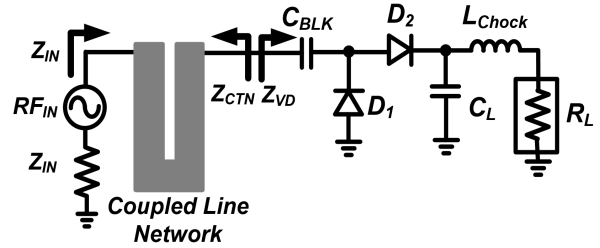


그림 1. 제안하는 정류기 도식도

Fig. 1. Schematic of proposed rectifier.

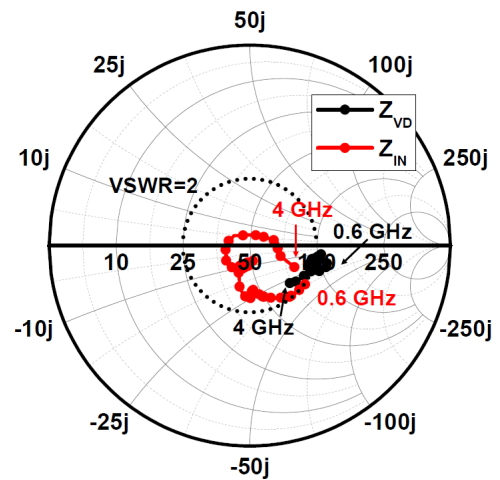


그림 2. 17.5 dBm의 입력 전력에서 주파수에 따른 전압 체배기와 매칭된 정류기의 임피던스 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Simulated input impedance of the voltage doubler and the proposed rectifier with frequency at 17.5 dBm of input power ($R_L=470 \Omega$).

중심으로 VSWR=2 선에 걸쳐 있는 것을 확인하였다. 이번 설계에서는 이중대역 및 광대역 매칭 네트워크로 알려진 결합된 전송선로 네트워크를 적용하여, 전압 체배기의 광대역 특성을 유지하면서 광대역에서 전압 체배기의 입력 임피던스가 소스 임피던스(50 Ω)에 근접하도록 설계하여 높은 효율을 갖도록 하였다.

기존 결합된 전송선로 네트워크를 이용한 정류기 연구^[14]에서는 결합된 전송선로를 이용하여 광대역 범위의 가장 낮은 주파수 f_1 과 가장 높은 주파수 f_2 에서 실수부로 정합된 전압 체배기의 입력 임피던스를 소스 임피던스로 변환을 하여 정류기의 초광대역 특성을 얻었다. 하지만

전압 체배기를 f_1, f_2 에서 허수부를 제거하고 실수부만을 남기기 위해서 병렬 단락 스테브와 직렬 전송선로 기반의 매칭단을 추가로 구성하였기 때문에 회로의 사이즈가 커지고 설계가 복잡해진다는 단점이 있다.

본 연구에서는 정합 목표 주파수 f_1 과 f_2 인 1.5, 3.0 GHz의 Z_{VD} 가 102-j12 Ω 과 95-j13 Ω 으로 거의 동일 함을 이용하였으며, Z_{VD} 의 중심 임피던스인 95-j20 Ω 에 공액 정합이 가능하도록 하면서, 동시에 1.5, 3.0 GHz에서 Z_{VD} 의 허수부 제거가 가능하도록 결합된 전송선로 수식^{[14],[15]}을 기반으로 정합된 전송선로 네트워크를 최적화하였다. 그림 3은 최적화된 전송선로 네트워크의 입력 임피던스 Z_{VD} 를 나타낸 그래프이다. 그림과 같이 Z_{CTN} 이 80+j20의 중심 임피던스를 가지며 Z_{VD} 의 중심 임피던스와 공액 정합이 가능하도록 하였으며, 이와 동시에 1.5, 3.0 GHz에서 57+j14.5 Ω , 80+j16.5 Ω 을 갖도록 하였다.

구현된 결합된 전송선로 네트워크를 적용한 정류기의 입력 임피던스 Z_{IN} 은 그림 2와 같이 0.6~4.0 GHz의 초 광대역에서 VSWR=2 근처 및 내부에 위치하였으며, 특히 2.2~3.0 GHz의 주파수 범위에서 VSWR=1.4 내부에 위치하는 좋은 정합 특성을 가졌다. 그림 4는 제안한 정류기의 2.45 GHz에서 입력 전력에 따른 입력 임피던스를 스미스차트로 나타낸 그래프이며, 입력 전력이 0 dBm에서

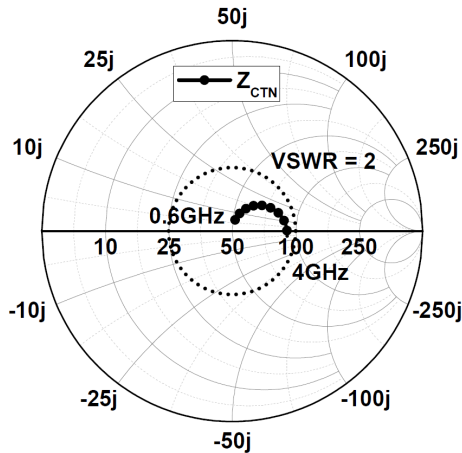


그림 3. 결합된 전송선로 네트워크의 입력 임피던스 Z_{CTN} 시뮬레이션 결과

Fig. 3. Simulated input impedance Z_{CTN} of the proposed coupled transmission-line network.

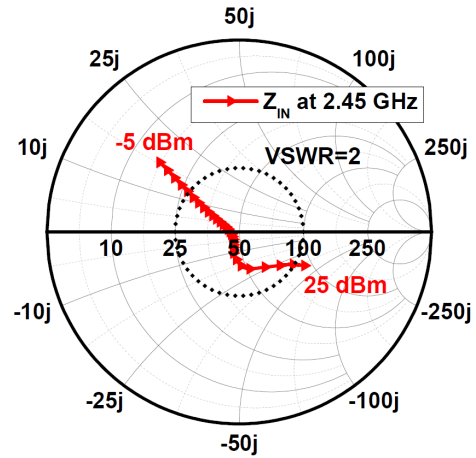


그림 4. 제안한 정류기의 2.45 GHz에서 입력 전력 따른 입력 임피던스 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Simulated input impedance of the proposed rectifier with different input power levels at 2.45 GHz ($R_L=470 \Omega$).

23.5 dBm의 넓은 입력 전력 범위에서 입력 임피던스가 VSWR=2 원 안에 자리하는 것을 통해 입력 전력에 따른 좋은 정합 특성을 확인할 수 있다.

그림 5는 입력 전력 및 주파수에 따른 제안된 정류기의 PCE(power conversion efficiency, 전력변환효율) 시뮬레이션 결과이며, PCE가 0.3~3.6 GHz의 광대역에서 입력 전

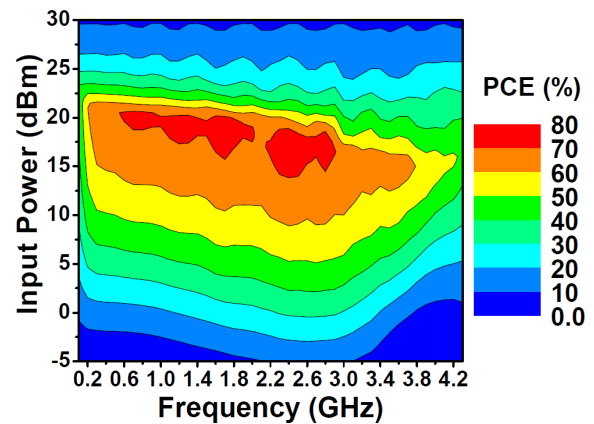


그림 5. 입력 전력 및 주파수에 따른 PCE 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Simulated PCE with frequency and input power ($R_L=470 \Omega$).

력이 11 dBm에서 17.5 dBm의 범위에서 50 % 이상의 PCE를 가지는 것을 통해 결합된 전송선로 네트워크만을 이용하여 광대역 정류기 특성을 확인하였다.

III. 측정 결과

제안된 정류기는 그림 6과 같이 3.2의 유전율, 0.003의 손실 탄젠트를 갖는 0.813 mm 두께의 Taconic사의 TLC-32 기판을 이용하여 제작하였다. 정류 다이오드는 HSMS-2862 쇼트키 다이오드를 사용하였으며, 이 때 최대 효율을 갖기 위한 로드 저항으로 470 Ω 을 선택하였다. DC 차단 커패시터와 두 개의 DC 통과 커패시터는 각각 15 pF와 100 pF를 사용하였다. 최종 제작된 회로의 크기는 16.1×19.4 mm이다. 회로는 ADS(advanced design system)을 이용하여 EM 시뮬레이션과 함께 최적화를 하였다. 측정을 위해서 E8247C 신호 생성기와 ZHL-4220W+ 증폭기를 이용하여 신호를 생성 및 증폭하여 인가하였으며, 전력센서 및 디지털 멀티미터를 이용하여 RF 입력 전력 P_{in} 과 함께 DC 출력 전압 V_{out} 을 측정하여 PCE를 $V_{out}^2/P_{in}R_L$ 의 식을 이용하여 계산하였다.

그림 7은 제작된 회로의 주파수에 따른 최대 PCE 시뮬레이션 및 측정결과를 나타낸 그래프이며, 최대 PCE가 0.6~2.6 GHz 초 광대역에서 70 % 이상의 효율을 유지하는 결과를 얻었다. 그림 8은 입력 전력에 따른 PCE 시뮬레이션 결과 및 측정결과를 나타낸 그래프이며, 2.45 GHz

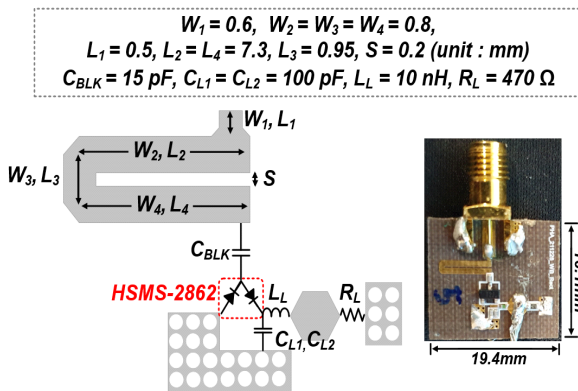


그림 6. 제작된 정류기의 레이아웃 및 사진
Fig. 6. Layout and photograph of the implemented rectifier.

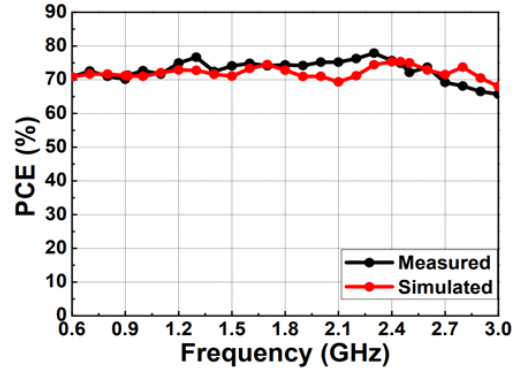


그림 7. 주파수에 따른 최대 PCE 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 7. Simulated and measured peak PCE versus frequency ($R_L=470 \Omega$).

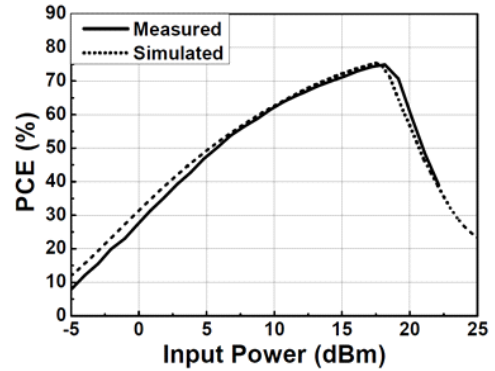


그림 8. 2.45 GHz에서 입력 전력에 따른 PCE 시뮬레이션 및 측정 결과
Fig. 8. Simulated and measured PCE versus input power at 2.45 GHz ($R_L=470 \Omega$).

에서 최대 PCE가 74.9 %의 값을 가지며 50 % 이상의 범위가 14.4 dBm을 확인하였다. 그림 7과 그림 8의 그래프를 통해서 넓은 주파수 범위 및 넓은 입력 전력 범위에서 시뮬레이션 결과와 측정결과가 일치함을 알 수 있으며, 이에 따라서 EM 시뮬레이션이 정확히 반영됨을 확인하였다.

표 1은 기존 발표된 정류기의 연구결과와 제안된 회로의 연구결과를 비교한 표이다. 제안된 회로가 기존 연구결과 대비 더 넓은 주파수 범위 특성을 얻음과 동시에 특징적인 주파수에서 최대 PCE 또한 높은 것을 통해, 제안된 회로 구성 기법의 우수성을 확인하였다.

표 1. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교

Table 1. Comparison with the previously reported works.

		Ref. [3]	Ref. [4]	Ref. [5]	This work
Freq. range for PCE > 50 % (GHz)		0.91~2.55	0.4~2.6	0.9~1.7	0.6~2.6*
Power range for PCE>50 % (dB)		10**	N/A	16.3	14.4
Eff.	Peak Eff. (%)	65	64.2	74	74.9
	Power (dBm)	10	8	5	18.1
	Freq. (GHz)	1.8	1.4	1	2.45
Size [mm×mm]		24×36	37×15	16×11	16.1×19.4

* Freq. range for PCE > 70 % (GHz).

** Graphically estimated.

IV. 결 론

본 논문에서는 초 광대역에서 동작 가능한 고효율 정류기를 제안하였다. 제안한 정류기는 결합된 전송선로만을 이용하여 전압 체배기로 이루어져 있는 정류부를 정합하는 방식을 이용하여, 최종적으로 초 광대역에서 높은 PCE를 갖도록 설계하였다. 검증을 위해서 제작된 정류기는 0.6~2.6 GHz의 초 광대역 범위에서 70 % 이상의 최대 PCE를 갖는 것을 확인하였고, 2.45 GHz의 대역에서 최대 74.9 %의 넓은 효율을 갖는 것을 확인함으로써 제안된 정류기의 효용성을 검증하였다.

References

[1] H. Zhang, Y. X. Guo, Z. Zhong, and W. Wu, "Cooperative integration of RF energy harvesting and dedicated WPT for wireless sensor networks," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 4, pp. 291-293, Apr. 2019.

[2] W. Liu, K. Huang, T. Wang, Z. Zhang, and J. Hou, "A broadband high-efficiency RF rectifier for ambient RF

energy harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1185-1188, Dec. 2020.

- [3] S. D. Joseph, Y. Huang, and S. S. H. Hsu, "Transmission lines-based impedance matching technique for broadband rectifier," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 4665-4672, Dec. 2020.
- [4] B. H. Zeng, S. Y. Zheng, B. K. W. Leung, and M. H. Xia, "An ultrawideband high-efficiency rectifier based on harmonic feedback topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 96, no. 8, pp. 7974-7983, Aug. 2022.
- [5] G. Le, N. Nguyen, N. D. Au, and C. Seo, "A broadband high-efficiency rectifier for mid-field wireless power transfer," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 31, no. 7, pp. 913-916, Jul. 2021.
- [6] S. Zheng, W. Liu, and Y. Pan, "Design of an ultrawideband high-efficiency rectifier for wireless power transmission and harvesting applications," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 6, pp. 3334-3342, Jun. 2019.
- [7] S. F. Bo, J. H. Ou, J. W. Wang, J. Tang, and X. Y. Zhang, "Polarization-independent rectifier with wide frequency and input power ranges based on novel six-port network," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 11, pp. 4822-4830, Nov. 2021.
- [8] 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.
- [9] Z. Du, X. Y. Zhang, "High-efficiency single- and dual-band rectifiers using a complex impedance compression network for wireless power transfer," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 6, pp. 5012-5022, Jun. 2018.
- [10] M. M. Mansour, S. Yamamoto, and H. Kanaya, "Reconfigurable multistage RF rectifier topology for 900 MHz ISM energy-harvesting applications," *IEEE Microwave*

- and *Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1181-1184, Dec. 2020.
- [11] Y. Y. Xiao, Z. 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.
- [12] 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)," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 7, pp. 670-673, Jul. 2021.
- [13] 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
- [14] 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.
- [15] Y. Wu, W. Sun, S. W. Leung, Y. Diao, and K. H. Chan, "A novel compact dual-frequency coupled-line transformer with simple analytical design equations for frequency-dependent complex load impedance," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 134, pp. 47-62, Jan. 2013.

박 현 아 [숭실대학교/학사과정]

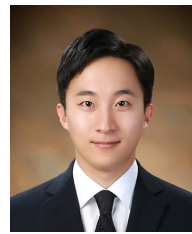
<https://orcid.org/0000-0002-7534-0179>



2019년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보
공학부 IT융합전공
[주 관심분야] RF 전력 증폭기, 무선전력
전송 기술 등

오 준 택 [숭실대학교/조교수]

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



2010년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학사)
2012년 1월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학과 (공학석사)
2016년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자
공학부 (공학박사)
2018년 8월: 한국전기연구원 첨단의료기

기연구본부 선임연구원

2020년 2월: 영남대학교 로봇기계공학과 조교수

2020년 3월~현재: 숭실대학교 전자정보공학부 IT융합전공 조
교수

[주 관심분야] 밀리미터파 집적회로, 레이더 송수신기, 무선전
력전송 기술 등

김 빛 찬 [숭실대학교/석사과정]

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



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