

다중 수신안테나로 구성된 RF 무선 전력 카메라 시스템 구현

연 규 양*, 황 사 일*, 최 계 원^o

Implementation of RF Wireless Powered Camera System Composed of Multiple Receive Antenna

Gyu Yang Yeon*, Sa Il Hwang*, Kae Won Choi^o

요 약

카메라 기기들의 급속한 보급과 데이터 전송 기술의 발전으로 영상의 촬영 및 전송이 쉽게 가능하나 전력 공급 시 내장형 배터리나 유선 방식을 사용하여 지속적인 동작이 어려운 문제점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 RF 무선전력전송(WPT: Wireless Power Transfer) 시스템에 적용할 수 있는 무선 카메라 시스템을 제안하며, 다중 수신 안테나로 구성된 5.8 GHz 수신단 회로 및 제어와 유지보수 없이 지속해서 동작 가능한 능동형 무선 카메라 시스템 설계를 주제로 연구한다. 본 논문에서 제안하는 시스템의 수신단은 ADS(Advanced Design System)를 통해 시뮬레이션 후 제작되었으며, 테스트베드 제작을 통해 WPT 기반의 지속적인 동작이 가능함을 검증하고 시스템 성능을 확인하였다.

Key Words : RF Energy Harvesting, Wireless Power Transfer, Rectifier, DC-DC Converter, Wireless Camera System

ABSTRACT

The rapid spread of camera devices and the development of data transmission technology make it easy to capture and transmit images. However, there is a problem that continuous operation is difficult by using an internal battery or a wired method when supplying power. Therefore, in this paper, we propose a wireless camera system that can be applied to RF Wireless Power Transfer (WPT) system and focus on the design of an active wireless camera system capable of continuously operating without maintenance with 5.8GHz receiver circuit based on multiple receive antenna and control. The receiver of the system proposed in this paper was fabricated after simulation through ADS (Advanced Design System), and it is verified that the system can be continuously operated by WPT through the testbed fabrication.

※ 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A2C1014693).

• First Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, rbdid369@skku.edu, 학생(석사), 학생회원

^o Corresponding Author : Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, kaewonchoi@skku.edu, 부교수, 종신회원

* Sungkyunkwan University, Department of Electrical and Computer Engineering, fortyone@skku.edu, 학생(석사), 학생회원
논문번호 : 202003-062-D-RU, Received March 24, 2020; Revised April 3, 2020; Accepted April 9, 2020

I. 서론

최근 카메라를 내장한 스마트 디바이스 및 센서들의 발달과 더불어 5G의 초연결 기술을 통해 실시간 제어 및 통신 서비스가 가능해졌으며 교통량 모니터링, 일상생활 모니터링, 보안 및 자연과학 분야 등 특정 분야에 국한되지 않고 다양한 분야에서 정보 수집 시스템으로 활용되고 있다. 이러한 요구는 더 많은 데이터 수집을 위해 여러 기기의 필요성을 가지고 왔으며 소비자들의 요구에 맞추어 소형화 및 경량화되고 있다. 그러나 제품의 크기가 작아짐에 따라 배터리의 크기 및 동작 지속성에 대한 한계가 존재한다. 기존의 전원공급 방식은 배터리의 교체 또는 유선 연결을 통해 전원을 공급하는 형식이다. 이러한 방식은 접근하기 어려운 지역이나 모니터링을 위해 대량으로 밀집되어 설치된 환경일 경우 배터리 교체 작업에 소모되는 시간과 유지보수 비용이 많이 든다는 단점 때문에 앞으로 늘어나는 기기들을 위한 적합한 솔루션이 될 수 없다.

무선전력전송(WPT: Wireless Power Transfer) 기술은 이러한 문제점을 해결해줄 방안으로 주목받고 있으며 자연 에너지원, 유도전력 혹은 전자기파 등 다양한 에너지원을 활용하여 무선전력 공급이 가능하다. 자연 에너지원을 활용한 에너지 하베스팅 같은 경우 날씨, 장소와 환경의 영향을 받으며, 유도전력은 근거리 무선 충전 시에만 효율이 높은 단점이 있다. 전자기파는 RF 신호를 활용할 경우, 원거리 전력공급이 가능하나 수신부 안테나에서 대기 중에 퍼져 나간 전자기 에너지 일부만을 수확하기 때문에 하베스팅 효율이 낮은 특징이 있다. 이러한 단점은 다중 수신안테나로 구성하여 낮은 효율을 보완할 수 있으며, 접근하기 어려운 지역 혹은 밀집되어 설치된 지역에서 RF 신호를 효과적으로 사용할 수 있다. 또한, RF에 기반을 둔 무선전력 전송 기술을 통해 배터리 지속성의 한계를 극복하게 해줄 대안으로 활용될 수 있으며, 센서의 자율성을 높임과 동시에 전력 및 비용 절감 효과도 기대해 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같은 구성을 갖추며 100~300MHz 이상의 고주파 신호인 RF에 기반을 둔 WPT 카메라 시스템에 관해 연구한다. 그중에서도 ISM 밴드 대역의 중심에 위치하여 비교적 낮은 손실 및 저렴한 부품 가용성으로 주목받고 있는 5.8GHz 대역에서의 WPT Receiver Stage와 지속적인 동작이 가능한 카메라 Application Stage 디자인을 주제로 설명한다. 또한, 대기 중에 퍼져나가는 RF의 일부만 수확하여 발생하는 낮은 에너지 하베

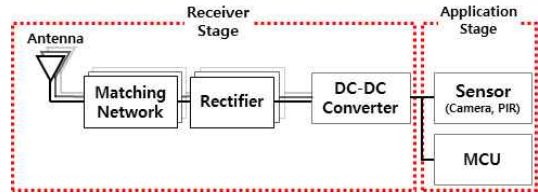


그림 1. 무선 전력 카메라 시스템
Fig. 1. Wireless powered camera system

스팅 효율의 단점을 보완하기 위해 다중 어레이 안테나 구성을 적용하여 수신 시스템을 구현한다.

제안하는 WPT 카메라 시스템의 Receiver Stage의 정류기는 Stub 매칭을 이용하여 직접 디자인하였으며, DC-DC Converter는 Texas Instruments(TI)사의 BQ25570 EVM을 기반으로 설계되었다. 카메라와 PIR 센서는 Robotdyn과 TI사의 TIDA-00489 디자인을 참고하여 본 무선전력 카메라 시스템에 맞도록 수정하여 Application Stage 모델을 구성하였으며, 각장에서 더욱 자세히 설명한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서 WPT의 수신단의 정류기 파트를 설명하며, III장에서는 수확된 에너지를 DC 레벨로 변환 및 저장하기 위한 DC-DC 컨버터 설계와 제작된 테스트베드의 Receiver Stage 디자인을 보인다. IV장에서는 테스트 베드의 Receiver Stage인 카메라 시스템을 설명하며, 시스템 제어는 V장에서 다룬다. 마지막으로 제작된 테스트베드의 성능 평가와 검증은 VI장에서 다루며 VII장에서 결론짓는다.

II. 정류기

2.1 에너지 하베스팅

에너지 하베스팅에는 수많은 에너지원이 있으며, 진동 에너지 수확은 [1]에 제시되었고, 주변 RF 에너지 수확은 [2]에서 연구되었다. 광 에너지 하베스팅의 경우 다른 후보 에너지원 중에서 가장 높은 에너지 밀도를 지니는 핵심 사례 중 하나이며, 이를 통한 에너지 하베스팅 및 전력 공급은 [3]에서 제시되었다.

다양한 에너지 하베스팅 중에서도 RF를 에너지 하베스팅은 장거리에서도 동작이 가능하다는 특징 덕분에 저전력 IoT 장치의 전원 공급에 적합한 솔루션으로 주목받고 있다.

RF 에너지 하베스팅의 핵심은 수확한 RF 신호를 사용 가능한 DC 전원으로 변환하는 것이다. RF 에너지 하베스팅 시스템에서 이러한 핵심 기능을 담당하는 서브시스템은 정류기이다. 정류기에는 수많은 유형

이 존재하며, 각각의 정류기는 용도에 따라 장점 및 단점을 지닌다. 일반적으로 정류기 모델의 선택은 사용 가능한 입력 전력, 부하 요건, 효율, 장치 크기 및 설계 복잡성과 같은 요인에 따라 달라진다.

에너지 하베스팅 시스템의 경우, 정류기 효율이 주요한 설계 고려사항이며 다이오드의 비선형 특성은 시스템 성능에 큰 영향을 끼친다. 이 장의 나머지 부분에서는 정류기 설계 과정을 보다 자세하게 설명한다.

2.2 다이오드 선정

입력 RF 신호를 받아들이는 정류기에서 저전력 RF 애플리케이션에 적합한 다이오드의 선정은 중요한 요소이다. 다이오드의 비선형 특성은 입력 임피던스를 입력 전력의 함수로 변화시키며 설계 프로세스의 복잡성을 증가시키는 원인이 되며, 다이오드를 선정할 경우 고려해야 할 사항은 크게 2가지이다. 1) 작은 입력 RF 전력으로 작동할 수 있어야 하며, 2) 고주파수에서 동작하는 에너지 수집 회로의 특성을 고려하여 매우 빠른 스위칭 속도를 지녀야 한다. 이러한 사항을 고려할 때, 반도체 - 반도체 접합 대신에 금속 - 반도체 접합을 사용하는 쇼트키 다이오드는 접합부가 훨씬 빠르게 동작하고, 0.15V의 낮은 순방향 전압 강하를 제공하므로 적합하다고 볼 수 있다.

다이오드 파라미터 가운데 정류기 회로의 성능을 결정하는 주요 파라미터는 Saturation current(I_S), Series resistance(R_S), Zero-bias Junction Capacitance(C_{j0}), Breakdown Voltage(B_V)를 뽑을

수 있다⁴⁾. 높은 I_S 를 갖는 다이오드는 높은 순방향 전류를 발생시키므로 부하 구동에 유리하며, 낮은 R_S , C_{j0} 를 가지는 다이오드가 전력 손실이 적다. 또한 B_V 는 다이오드가 포함된 정류 회로의 입력 전력 범위를 가늠하는 척도가 되며 B_V 가 높을수록 더 높은 입력 전력을 수용할 수 있다. 따라서 주요 파라미터 값과 더불어 납땜의 용이성, 가격 등의 종합적인 사항을 고려하여 수신단에서는 Avago Technologies사의 HSMS-2862가 사용되었으며, 표 1은 해당 제품의 다이오드 파라미터 값을 보인다.

2.3 Charge Pump 회로 및 커패시터 선정

Charge Pump는 정류기의 서브시스템의 일환으로 다이오드와 커패시터를 활용하여 신호의 전압 레벨의 조절을 위하여 사용된다. 본 논문에서 수신단 정류기에 적용된 모델은 Heinrich Greinacher에 의해 발명된 Voltage multiplier를 기반으로 한다. 대표적인 Voltage multiplier 모델은 Villard multiplier와 Dickson charge pump가 있으며, 두 모델 간 성능에는 큰 차이가 없다⁵⁾. 따라서 테스트베드 정류기 회로의 간결성 및 크기를 고려하여 1단 Dickson charge pump를 적용하였다.

Charge Pump에 쓰이는 커패시터 선정 시 용량은 정류기 변환 효율에 거의 영향을 미치지 않으며 RF 주파수에서 낮은 임피던스를 가지도록 충분히 큰 값으로 선정해야 한다⁶⁾. 다만 커패시터 용량이 클수록 출력 전압 리플 현상은 줄어들지만, 충전 시간이 길어지는 상관관계를 염두에 두고 적절한 용량 선택이 필요하다. 또한, SRF(Self Resonant Frequency) 보다 더 큰 주파수를 사용 시 의도한 정류기 역할을 수행하기 어려우므로 SRF를 고려한 선정도 중요하다. 일반적인

표 1. 다이오드 SPICE Model 파라미터
Table 1. Diode SPICE Model parameters

Param	Unit	HSMS2862
Is	A	5.00E-08
Rs	Ohm	6
N	-	1.08
TT	sec	-
Cj0	pF	0.18
M	-	0.5
Eg	eV	0.69
Xti	-	2
Fc	-	-
Bv	V	7
Ibv	A	1.00E-05
Vj	V	0.65

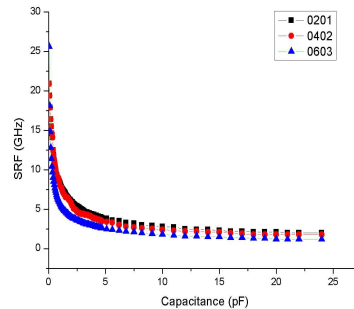


그림 2. 커패시터 용량과 크기에 따른 SRF
Fig. 2. SRF according to capacitor capacity and size

커패시터의 경우 0.2pF ~ 2pF에서 5.8GHz보다 높은 SRF를 가지며, 커패시터 용량과 크기에 따른 SRF는 그림 2에 나와 있다. 커패시터 크기의 경우 EIA(inch) 크기에 따른 SRF의 차이가 크지 않으며, 본 논문에서는 테스트베드의 전송선로 폭을 고려하여 Johanson Technology 사의 0603 S-Series 2pF 커패시터가 사용되었다.

2.4 부하

정류기의 부하 값은 에너지 수확 회로의 효율에 영향을 끼친다⁷⁾. 그림 3은 이러한 관계를 보기 위하여 ADS를 활용하여 임피던스 값이 정류기 효율에 미치는 영향을 보여주는 시뮬레이션 결과를 보인다. 입력 RF 전력은 0.1 mW ~ 10 mW, 부하 값의 경우 100 Ohm ~ 1 kOhm 파라미터 스weep을 하여 부하 값의 크기에 따른 효율을 관찰하였으며, 특정 부하 값에서 최적의 효율을 보인다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 입

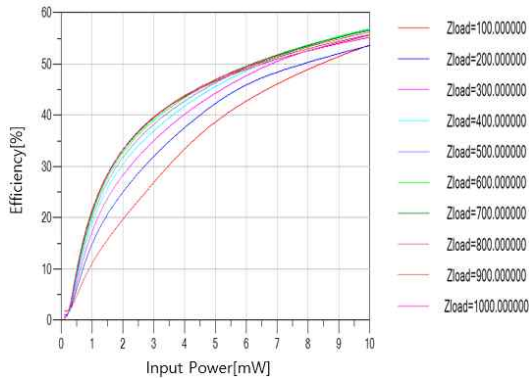


그림 3. 입력전력 및 부하(ohm)에 따른 정류기 효율
Fig. 3. Rectifier efficiency according to input power and load(ohm)

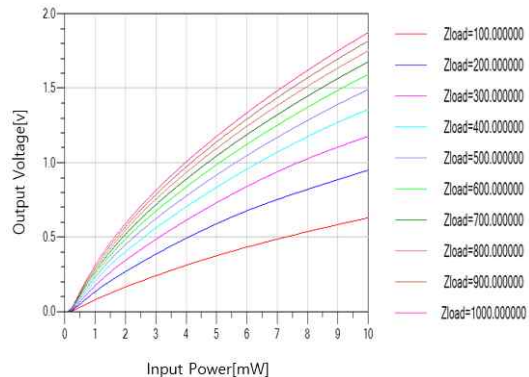


그림 4. 입력전력 및 부하(ohm)에 따른 정류기 출력 전압
Fig. 4. Rectifier output voltage according to input power and load(ohm)

력전력 및 부하에 따른 출력 전압을 나타낸다.

부하 값은 시뮬레이션 결과 및 카메라 시스템에 사용될 전압 범위를 고려하여 1 kOhm으로 선정되었으며, 이때 최대효율은 입력 전력 10mW에서 약 55% 효율과 1.8V의 출력 전압을 가진다.

2.5 전송선로

전송선로는 소자 이외에 회로 생성에서 발생하는 손실 및 영향을 고려하기 위해서 제작하였다. RF 신호의 전송 선로에는 다양한 방법이 있지만 Microstrip과 GCPW(Grounded Coplanar Waveguide)가 대표적이다. 두 구조 간의 가장 뚜렷한 차이점은 PCB 윗면의 신호 라인 주위에 Ground 유무이다. 본 논문에서 소개하는 Receiver Stage 회로의 RF 신호 전송 선로에는 집적화에 유리하며, 어레이 안테나로 구현이 용이한 Microstrip 구조를 적용한다.

Microstrip의 구현을 위한 첫 번째 고려 사항은 기판 재료를 결정하는 것이다. 흔히 사용되는 기판 재료는 FR4, RO4003C, RT/duroid 5880, F4B-2 등이 있으며, FR4의 경우 가격 대비 성능이 우수하여 가장 일반적으로 사용되나 주파수가 높아질수록 손실이 심해 고주파 회로로는 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서 제안하는 Receiver Stage 정류기에서는 3.55의 유전 상수를 가지는 Rogers RO4003C 기판을 사용하기로 결정되었다. 두 번째 고려 사항은 Microstrip의 선포이다. 이때 기판의 두께는 유전 상수와 더불어 Microstrip의 선포의 결정에 주된 요인이 된다. 소자와 선로 사이의 불연속성을 최소화하기 위해서 소자의 크기와 선포의 비교가 필요하다. 앞서 선정된 0603 패키지의 Charge pump stage 커패시터, SOT23 패키지의 다이오드 사이즈를 고려할 때, 0.508 mm의 기판 두께를 선택할 경우 소자 폭과 가까운 1.09638mm로 Microstrip 선포가 결정된다. 이는 ADS(Advanced Design System)의 Line Cal 기능을 통해 계산되었다.

2.6 매칭 네트워크

매칭을 위한 방법은 LC 매칭, Stub 매칭 등 여러 가지 방법이 존재하지만 5.8GHz에서 Lumped 소자를 통한 매칭은 필요한 소자 값의 부재, 연결 선로의 복잡성 등의 이유로 인해 적합하지 않다. 그러므로 본 논문에서 제안하는 시스템에서는 전송 선로를 통한 매칭을 고려한다.

매칭 네트워크는 입력 전력 5mW를 기준 시 입력 임피던스 $Z_{in} = 11.159 - j25.193$ 에 맞춰 설계되었다. 설계를 위해 ADS의 Smith chart matching을 이용하

며, 안테나와 매칭 네트워크 간 연결을 위해 사용되는 SMA connector를 고려하여 최적화를 수행하였다. 이는 ADS의 Optimization을 사용하였으며 S11이 최소화될 수 있도록 Gradient 기법을 활용하였다. 설계된 매칭 네트워크의 레이아웃은 그림 5에 나타나 있으며, S 파라미터는 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 또한, 그림 6에서는 SMA connector를 고려하기 전과 고려한 후의 S11값을 보이며 connector를 고려하여 최적화를 수행하였을 때 파라미터 값이 더 개선되었음을 확인할 수 있다.

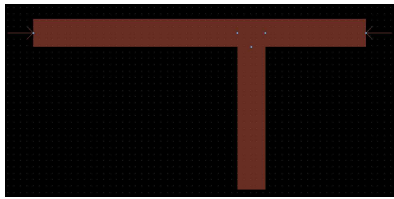


그림 5. 매칭 네트워크 레이아웃
Fig. 5. Matching network layout

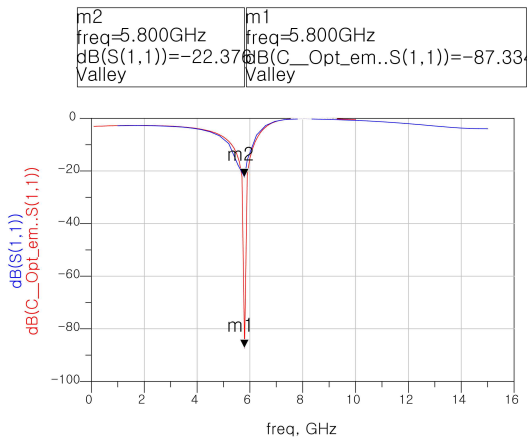


그림 6. 최적화 전후의 매칭 네트워크 S 파라미터
Fig. 6. Matching network S parameters before and after optimization

2.7 정류기 최종회로

그림 7 및 8에 매칭 네트워크 및 정류기가 합쳐진 최종설계 회로도 및 레이아웃을 나타냈다. 최종회로 사이즈는 18 x 18mm 이며, 안정적인 접지 형성을 위해서 전송 선로 주변에 via 어레이를 구성하였다. SMA connector와 매칭 네트워크의 연결을 위한 L1의 길이는 8mm, 임피던스 매칭을 위한 Stub L2 및 L3의 길이는 각각 5.594 mm, 3.945 mm이며, 출력을 위한 L4의 길이는 3.096 mm이다. 선로의 폭 W는 모두 1.09638mm로 동일하며, 표 2에서는 제작된 정류

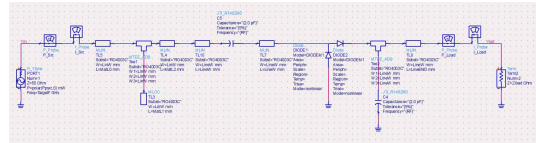


그림 7. 매칭 네트워크를 포함한 정류기 회로도
Fig. 7. Rectifier circuit diagram with matching network

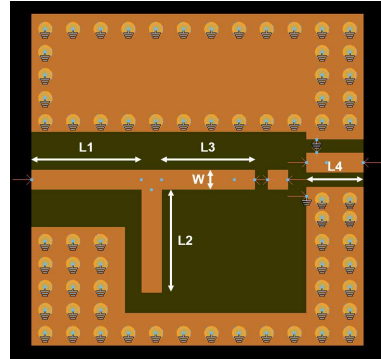


그림 8. 매칭 네트워크를 포함한 정류기 레이아웃
Fig. 8. Rectifier layout including matching network

표 2. 정류기 사양
Table 2. Rectifier specifications

Freq	Substrate	ϵ_r	Thickness	Diodes	Cap
5.8 GHz	Rogers RO4003C	3.55	0.508 mm	HSMS-2862	2pF

기의 사양을 보인다.

실제 회로를 제작하기에 앞서 설계된 회로의 성능 검증을 위해 ADS Harmonic Balance를 통해 시뮬레이션을 수행하였으며, 출력 전압과 효율을 통해 정류기 성능을 살펴본다. 그림 9는 입력 전력의 함수로써 설계한 정류기에 대한 정류된 출력 전압을 나타낸다. 해당 데이터는 1 kohm의 부하 저항을 사용하여 수집되었으며, 출력 전압은 쇼트키 다이오드의 역방향 항복 전압을 초과할 때까지 입력 전력이 증가함에 따라 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 최고 출력 전압 6.423V는 입력 전력 27 dBm에서 확인할 수 있다. 그림 10은 측정된 정류기의 효율을 나타내며, 식 (1)과 같이 정의된 RF-DC 변환 효율(η)에 따라 구해졌다.

$$\eta(\%) = \frac{P_{Load}}{P_{RF}} \times 100 \quad (1)$$

정류기의 효율은 쇼트키 다이오드 항복 전압까지 입력 전력의 증가에 따라 증가하며 입력 전력 17dBm

에서 최고의 효율인 70%를 달성하였다. 그림 9와 그림 10을 볼 때, 출력 전압이 증가율이 감소하는 지점과 효율이 급격하게 떨어지는 지점이 일치하며, 해당 지점에서 다이오드 항복 전압이 초과함을 추측할 수 있다.

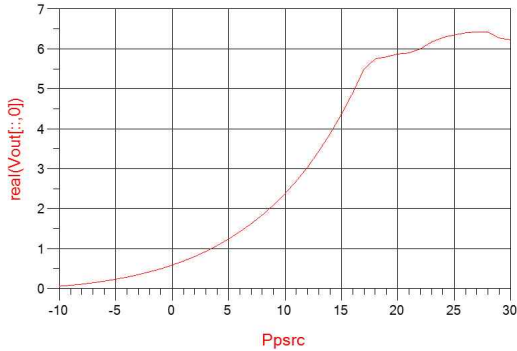


그림 9. 입력 전력에 따른 정류기 출력 전압
Fig. 9. Rectifier output voltage according to input power

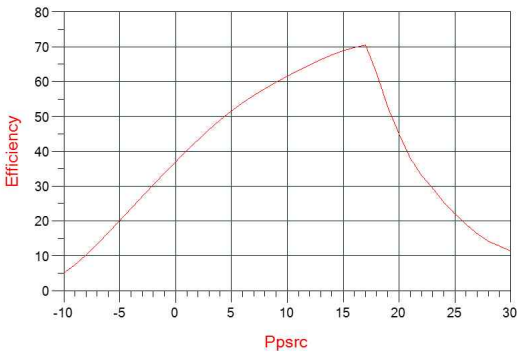


그림 10. 입력 전력에 따른 정류기 효율
Fig. 10. Rectifier efficiency according to input power

III. DC-DC 컨버터 및 Receiver 디자인

DC-DC 컨버터로는 Texas Instruments 사의 BQ25570을 사용하며, 승압하기 이전에 MPPT (Maximum Power Point Tracking)를 통해 일정하지 않은 입력에 대해서도 최대 효율을 유지할 수 있다. 얻어진 최대 전력 전압 레벨은 승압을 거쳐 에너지 저장소를 충전하고 각 내부 소자의 작동 전압 레벨을 충족시키기 위해 감압의 과정을 거친다. 에너지 저장소의 잔여 에너지는 주기적인 모니터링이 가능하며, 잔여 에너지가 일정 수준 밑으로 떨어지면 알람을 통해 송신단에 추가적인 전력 요청을 할 수 있으므로 수신

단에서 능동적으로 에너지 관리가 가능하다. 정류기와 DC-DC 컨버터 사이에 있는 스위치는 Open Circuit Voltage의 측정을 위해 추가된다. TI사의 TS5A3167 스위치는 전기적 제어가 가능하며, 입력으로 들어오는 RF 신호 전력의 Open Circuit Voltage 측정을 가능하게 한다. 이를 통하여 정류기를 거친 입력 RF 신호의 VI 특성을 알 수 있으며, 입력 신호가 충분하지 못할 때 송신단에 추가적인 전력 전송을 요청할 수 있도록 설계하였다.

영상 촬영의 경우 이미지 당 수십 혹은 수백 mJ이 필요하며, 짧은 시간 동안 높은 전류를 소비한다. 따라서 RF 수확기의 최대 출력보다 더 큰 전력을 소비하기 때문에 카메라 시스템에 안정적인 동작을 위하여 에너지 저장 소자를 BQ25570 내에서 사용한다. 에너지 저장 소자는 충전용 배터리 또는 슈퍼커패시터가 대표적으로 사용되며, 충전용 배터리는 충전 및 방전 사이클을 통한 배터리 지속성이 슈퍼커패시터보다 짧음으로 본 연구에서는 0.1F 슈퍼커패시터를 에너지 저장 소자로 사용한다.

BQ25570 칩의 경우, 에너지 저장소 전체의 전압을 관리하고 저장소자의 충전을 최적화하기 위한 내부 회로를 가지고 있으며 외부 저항을 사용하여 목적에 맞게 출력 전압 및 배터리 관리를 위한 전압을 프로그래밍 할 수 있다.

정류된 전압을 카메라 시스템에 활용할 수 있도록 설정하는 DC-DC Converter의 출력 전압(V_{OUT})은 식 (2)를 따르며 칩 내부의 Buck 컨버터를 통해서 안정적인 전압 공급이 가능하도록 해준다. 과전압 임계값 ($V_{BAT.OV}$) 레벨 설정은 식 (3)과 같으며, 배터리의 과충전을 방지하기 위해 충전 임계값을 설정해주는 파라미터이다. 누적 전압이 과전압 임계값을 초과할 경우 Boost 컨버터가 비활성화 되도록 동작한다.

본 수신단에서는 카메라 시스템의 동작전압을 고려하여 4.178V로 임계값을 설정하였으며, 이를 위해 외부 저항 값은 $R_1 = R_{OV2} = 7.5M\Omega$, $R_2 = R_{OV1} = 5.76M\Omega$ 으로 설정하였다.

$$V_{OUT} = V_{BIAS} \left(\frac{R_{OUT2} + R_{OUT1}}{R_{OUT1}} \right) \quad (2)$$

$$V_{BAT.OV} = \frac{3}{2} V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{OV2}}{R_{OV1}} \right) \quad (3)$$

더욱 철저한 배터리 전압 레벨을 관리하기 위하여

추가로 배터리 전압 감소 임계값 ($V_{BAT_OK_PROG}$)과 배터리 전압 증가 임계값 ($V_{BAT_OK_HYST}$)도 설정하여 활용하였으며, 이를 통해 배터리의 전압이 허용 가능한 수준인지 판단 가능하며 불안정할 때 발생하는 문제를 예방할 수 있다. 따라서 배터리 전압 허용 (V_{BAT_OK}) 신호는 배터리 전압이 전압 증가 임계값 ($V_{BAT_OK_HYST}$)을 넘는 시점부터 배터리 전압 감소 임계값 ($V_{BAT_OK_PROG}$)보다 작아지는 시점까지 유지되며 식 (4)와 (5)를 통해 설정할 수 있다.

$$V_{BAT_OK_PROG} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}} \right) \quad (4)$$

$$V_{BAT_OK_HYST} = V_{BIAS} \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}} \right) \quad (5)$$

수식에 주어진 V_{BIAS} 전압 값은 모두 1.21V로 고정 값이며, DC-DC 컨버터의 전반적인 레이아웃은 TI사의 BQ25570 EVM을 모티브로 설계되었다⁸⁾. DC-DC 컨버터의 회로도도 그림 11에 나타나 있으며 표 3은 설계된 외부저항을 보여준다. 이러한 설정은 에너지 저장 소자의 전압을 3.321V~4.178V로 유지해 주며, 0.1F 슈퍼커패시터를 사용 시 $E = \frac{1}{2} CV^2$ 에 따라 최대 872.784mJ 에너지를 수확하여 저장한다.

앞 장에서 언급한 정류기와 DC-DC 컨버터 회로 설계를 바탕으로 테스트베드의 Receiver Stage를 그림 12와 같이 제작하였으며, 크게 2가지 파트로 구분 지을 수 있다. 하단부의 정류기 파트는 16개로 구성되어 있으며 각 요소의 안테나를 통해 들어오는 RF 신호의 정류를 수행하며 안테나의 수신 전력을 파악하며, 상단부의 DC-DC 컨버터 파트는 수확된 전력을 관리하기 위하여 사용되었다.

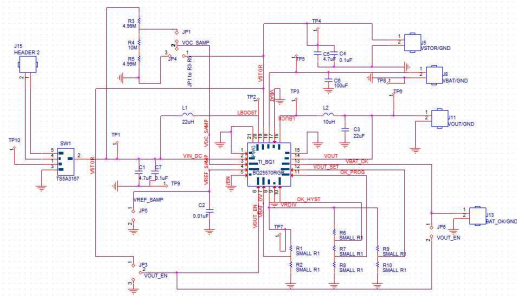


그림 11. DC-DC 컨버터 회로도
Fig. 11. DC-DC converter circuit diagram

표 3. 저항 설계에 따른 DC-DC 컨버터 전압 값
Table 3. DC-DC converter voltage values according to resistor design

$V_{BAT_OK_PROG}$	3.321 V	R_{OK1}	4.7 Mohm
$V_{BAT_OK_HYST}$	3.414 V	R_{OK2}	8.2 Mohm
		R_{OK3}	0.36 Mohm
V_{OUT}	3.321 V	R_{OUT1}	4.7 Mohm
V_{BAT_OV}	4.178 V	R_{OUT2}	8.2 Mohm

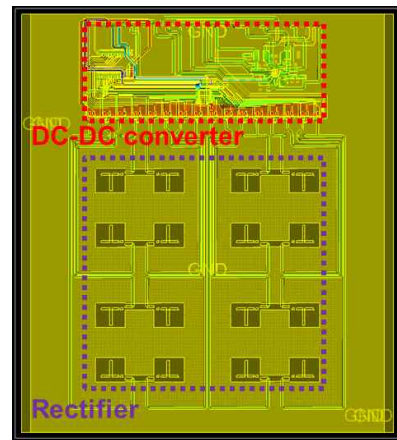


그림 12. 서브시스템들이 통합된 수신단 레이아웃
Fig. 12. Receiver layout with integrated subsystems

IV. Camera Application Design

RF WPT에 기반을 둔 저전력 카메라 시스템은 대량의 데이터 처리가 필요하므로 다음과 같은 고려사항이 있다^{9,10)}.

1) 영상 데이터 및 코드 제한: 저전력 MCU 내 RAM 용량은 영상 데이터보다 작을 수 있으며, 이에 대한 방안으로 비휘발성 메모리 (FLASH)에 저장하는 것은 코드 Text의 제한과 접근 시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 목표 애플리케이션의 요구를 고려하여 시스템 처리 속도와 카메라 데이터양의 크기를 균형 있게 조절해야 한다.

2) 제한된 동작 시간: RF 전력 수확은 수신 전력량과 송신단과의 거리에 따라 수확량이 달라지며 1m 이상 떨어지면 평균 수확 전력량은 5% 정도로 낮다. 따라서 이렇게 수집된 전력을 최대한 효율적으로 관리하기 위하여 회로 내 누설전류 성분을 줄이거나 에너지를 소비하는 장치들의 전력 요구량을 줄여야 한다. 특히, 데이터 전송 시 소비되는 전력량을 줄이기 위해

주로 Bluetooth, Zigbee 그리고 WIFI 통신을 활용하여 저전력 통신을 수행한다.

3) 무선 전력 전송 거리의 한계: WPT 수신부의 안테나는 EM 에너지의 일부만을 수확하여 타겟 애플리케이션의 전력 요구량이 클수록 거리제한이 커진다는 단점이 있다. 따라서 하베스팅 효율을 증가시키거나 수확되는 전력량을 증가시키기 위한 대책이 필요하다.

4) 누설 전류 최소화: 카메라 센서는 영상을 캡처하려면 이미지 캡처 당 수십 mJ이 필요하며 짧은 시간 동안 높은 전류를 소비한다. 따라서 RF 수확기의 최대 출력보다 더 큰 전력을 필요로 하며, 이를 위해 수확기와 시스템 사이에 충분한 에너지를 공급하기 위하여 3장에서 언급한 슈퍼커패시터를 사용한다.

본 논문에서는 제안하는 테스트베드의 Application Stage 모델은 언급된 고려사항들을 참고하여 그림 13에 자세하게 표현되어 있다. DC-DC Converter에 의해 설정된 출력 전압(V_{OUT}) 3.321V를 활용하여 센서와 MCU에서 활용하며, 센서와 MCU의 동작과 기능 설명은 소단원에서 다룬다.

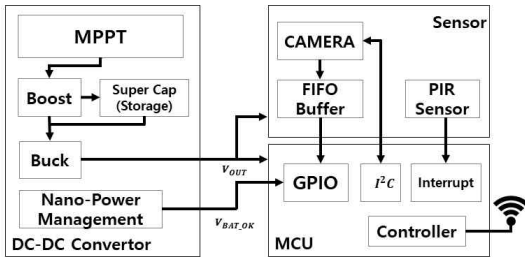


그림 13. Application Stage 시스템 구조
Fig. 13. Application Stage system structure

4.1 MCU

128KB Flash 메모리와 20KB Synchronous dynamic Random Access Memory(SRAM) 메모리를 가지고 있으며, ARM Cortex-M3를 탑재한 Texas Instruments사의 저전력 CC2650를 활용한다. 또한, 테스트베드의 제작 시간을 절약하기 위하여 본 논문에서는 Evaluation Module을 사용한다. 더불어 RF 안테나를 가지고 있어 저전력 Bluetooth Low Energy(BLE) 통신을 지원해주며, 센서 제어 모듈을 통해 주변장치의 값을 읽고 쓸 수 있다. 또한, 센서 제어 모듈은 슬립 모드에서도 외부 장치의 데이터를 수집할 수 있어서 저전력 구동에 강점이 있다.

4.2 FIFO Buffer/ Camera

저전력 MCU는 전력 소비를 최소화하여 태스크 작

업을 수행할 수 있으나 작은 메모리 저장소를 가지고 있는 단점이 있으므로 이를 보완하기 위하여 FIFO Buffer를 사용한다. 선정된 MCU의 128KB Flash 메모리는 코드 및 데이터 코드를 저장하며, 20KB SRAM은 데이터 저장, 코드 실행 그리고 BLE 통신을 위한 Protocol Stack과 Kernel 함수들을 포함한다. 따라서 카메라 시스템에서 촬영된 QQVGA(Quarter Quarter Video Graphics Array) 영상을 저장하기 위한 메모리 공간은 38.4K Byte가 필요하며, SRAM 크기를 넘어간다. 또한, Flash 메모리에 저장하는 방식은 긴 Read-Write 작업 시간과 코드 길이에 제한이 생기는 문제가 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 영상을 버퍼링할 수 있는 Averlogic사의 3M-bits FIFO field 메모리 AL422를 활용한다.

카메라는 Omnivision사의 OV7670을 활용하며 160 * 120(QQVGA)에서 640 * 480(Video Graphics Array, VGA)까지의 해상도와 RGB, YUV, YCbCr의 영상 포맷을 지원하는 CMOS 카메라이다. 영상 촬영 및 전송 시 소비되는 에너지를 최소화하기 위하여 QQVGA 해상도와 YCbCr 4:2:2 포맷을 사용하며, 캡처된 영상(38.4K Byte)은 앞서 언급한 FIFO 버퍼에 버퍼링 된 후 MCU 요청에 따라 읽고 쓰인다.

본 논문에서는 Application 테스트베드의 제작 시간을 절약하기 위하여 Robotdyn사에서 AL422와 OV7670을 사용하여 제작한 CAMERA Module을 활용한다.

4.3 PIR Sensor

영상 촬영 시 이벤트 감지를 위해 PIR 센서를 사용하며, Mutra사의 IRS-B210ST01-R1를 사용한다. 센서는 초전 물질로 구성되어 있으며 열에너지 흐름에 따른 전하 흐름을 만들고, 이를 통한 전압 차이로 센서 앞에 인체를 감지하게 된다. 또한, 저전력으로 구동하기 위해서 TI사의 TIDA-00489 디자인을 참고하며^[11], 그림 14와 같이 디자인하였다. TI사의 PIR 센

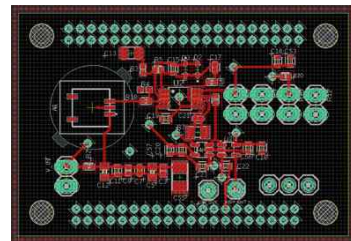


그림 14. 모션 감지를 위한 PIR Sensor 회로 디자인
Fig. 14. PIR sensor circuit design for motion detection

서 디자인의 특징은 소모되는 전력을 최소화하기 위하여 센서 내 JFET Source-GND 사이에 수십 M ohm 이상의 저항을 사용하여 센서 민감도를 향상하게 시키지만, 저전력 구동이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

V. 무선전력카메라 시스템 회로 제어

카메라 시스템은 다음과 같은 2가지의 동작 프로파일 정책을 따른다.

1) Shutdown Mode : 제어회로의 주요 임무는 카메라 시스템의 올바른 기능을 보장하면서 수명을 최대화하는 것을 목표로 한다. 따라서 특정 이벤트(동작 감지, 영상 촬영 혹은 데이터 전송)가 발생하지 않을 때 초저전력 소비를 위하여 메인CPU 및 RF Core의 클럭 공급을 중단하며 PIR에 의한 인터럽트 핀할 활성 후 Shutdown Mode로 동작한다.

2) Active Mode : Mode Switching은 PIR 센서의 동작감지 신호와 타이머 인터럽트에 의해 트리거 된다. Active 상태로 동작하게 되면 IV장에서 언급한 DC-DC 컨버터의 배터리 전압 허용(V_{BAT_OK}) 신호 레벨을 MCU가 활용하여 내부 전력량이 충분한지 판단을 한다. 그 후 충분한 내부 전력량이 있으면 카메라와 제어기 초기화를 수행하며 완료 시에는 영상 촬영 후 다시 Shutdown Mode로 들어간다. 이와 반대로 내부 전력량이 충분하지 않을 때는 송신측에 빔 요청 패킷을 전송하며, 그와 동시에 타이머 인터럽트를 설정 및 Shutdown Mode로 Switching 하여 충분한 전력이 모일 때까지 기다린다. 이러한 일련의 동작 알고

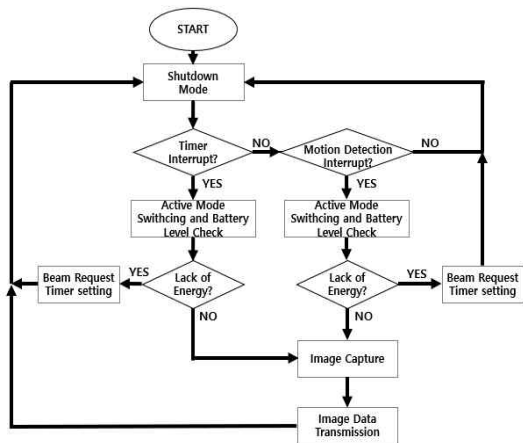


그림 15. 카메라 시스템 제어 흐름도
Fig. 15. Camera system control flow chart

리즘은 그림 15에서 확인할 수 있다.

VI. 실험결과

6.1 설계된 정류기 성능평가

테스트 베드의 16개의 정류기는 3.55의 유전 상수 (ϵ_r), 0.508 mm 두께(H), 0.0027의 Loss tangent를 갖는 Rogers RO4003C로 설계하였다. 그림 16은 16개 정류기 회로 제작에 앞서 설계된 정류기 성능평가를 위해 제작된 단일 정류기를 보여주며, 매칭 네트워크는 커패시터와 다이오드로 구성된 Dickson charge pump 회로의 입력 임피던스와 일치하도록 설계되었다.

단일 정류기의 성능평가는 그림 17과 같이 구성되었다. 입력 RF 신호를 위한 신호발생기(SMB 100A)와 부하를 위한 저항 박스, 출력 전압의 측정을 위한 디지털 멀티미터를 사용하여 측정하였으며, 그림 18과 19를 통해 5.8 GHz RF 입력 신호의 변화에 따른 출력 전압 및 효율의 시뮬레이션 결과와 비교하여 보여준다.

실험은 부하 저항 1 kOhm에서 -10 dBm ~ 20 dBm의 입력 전력(P_{RF})을 스윙하며 진행하였으며, 회로 시뮬레이션 결과 값은 검은색, 측정 결과 값은 빨간색 라인으로 도시되었다.

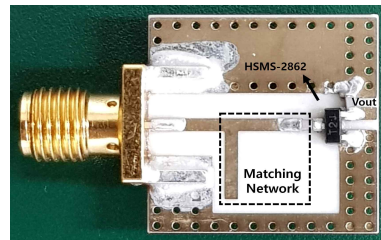


그림 16. 설계된 단일 정류기
Fig. 16. Designed single rectifier

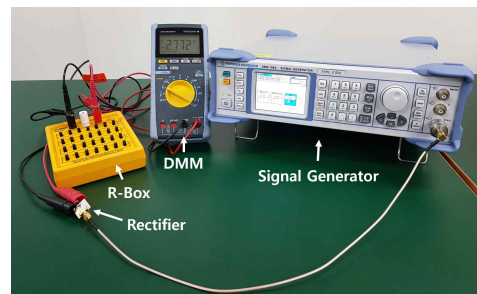


그림 17. 단일 정류기 실험 환경
Fig. 17. Single rectifier experiment environment

그림 18에서는 측정된 출력 전압과 시뮬레이션 출력 전압 값을 보여준다. 출력 전압의 경우 입력 전력이 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 만약 다이오드 항복 전압을 초과할 경우 영구적 손상이 발생할 수 있으므로 입력 전력을 더 높은 수준까지 증가시키지 않았다. 대체적으로 시뮬레이션 및 측정 결과 값이 일치함을 볼 수 있으며, 입력 전력 20 dBm에서 최대 출력 전압 7.19V를 얻을 수 있다.

그림 19에서는 측정된 출력 전압을 기반으로 계산된 정류기 효율을 보여준다. 정류기의 전력(P_{Load})은 식 (6)에 의해 계산되었으며, 입력 전력 19 dBm에서 정류기의 최대 효율 55%를 보인다. 입력전력이 낮을 수록 정류기의 수확 효율도 낮아지는 특성이 확인 가능하며 이러한 부분은 16개의 다중 어레이 안테나 구

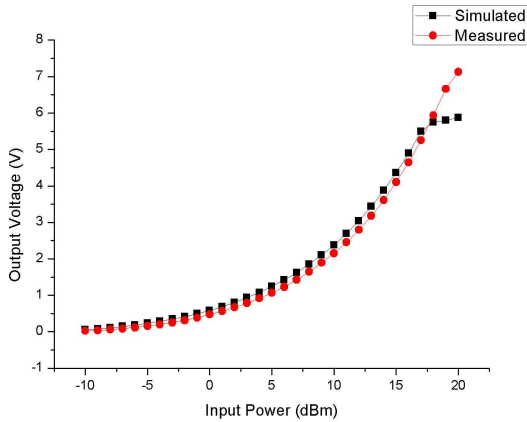


그림 18. 입력 전력에 따른 정류기 출력 전압 비교
Fig. 18. Rectifier output voltage comparison according to input power

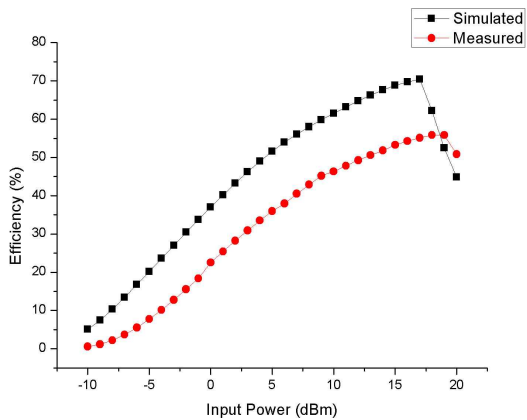


그림 19. 입력 전력에 따른 정류기 효율 비교
Fig. 19. Rectifier efficiency comparison according to input power

성을 통해 보완될 수 있음을 짐작할 수 있다.

$$P_{Load} = \frac{V_{Load}^2}{R_{Load}} \quad (6)$$

6.2 카메라 시스템의 전력 소비 프로파일

설계된 Application Stage의 전력소비 분석은 MCU, FIFO를 내장한 카메라 그리고 PIR 센서를 분석하였다. 또한 데이터 값 측정을 위하여 DC power supply와 디지털 멀티 미터기를 활용하였으며, 데이터 값에 평균을 내어 분석하였다.

MCU의 경우 특정 이벤트 발생 전까지 Shut down 모드에서 91.14uW를 소비함을 확인하였다. 이와 반대로, Active 모드 시 PIR 인터럽트 감지는 63.5uJ(0.02초 동안 3.175mW), 빔 요청 시 2.17mJ(0.33초 동안 6.57mW) 그리고 영상 촬영 및 데이터 전송 시에는 33.63mJ(3.06초 동안 10.99mW)의 에너지가 필요함을 확인하였으며, 그림 20에서 확인할 수 있다.

카메라는 초기 동작 시 RGB VGA 모드이며 145mW가 필요하였으며, YCbCr QQVGA 모드로 초

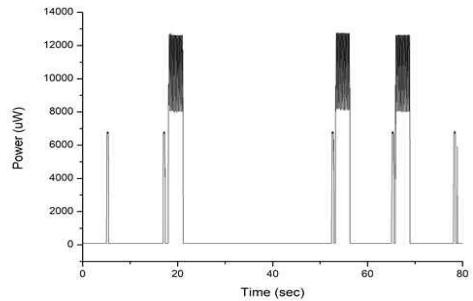


그림 20. MCU 전력 소비량
Fig. 20. MCU power consumption

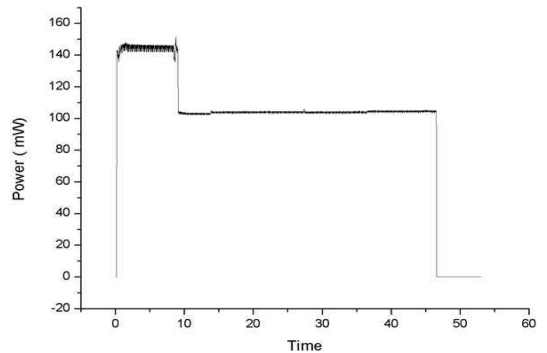


그림 21. 카메라 전력 소비량
Fig. 21. Camera power consumption

기화 후에는 103mW가 필요함을 그림 21에서 확인할 수 있다. 따라서 MCU의 제어 하에 Active 모드 영상 촬영 시 315.18mJ(3.06초 동안 103mW)이 필요함을 예상할 수 있다.

그림 22는 PIR 센서의 전력 소비 그래프이며, 물체 감지가 일어나기 전까지 4.76uW를 소비하였다. 물체 감지가 일어나면 신호는 로우-하이로 피크를 찍으며 12.34uJ(2.54초 동안 4.86uW)이 필요함을 확인할 수 있다.

MCU 동작에 따른 에너지 필요량은 표 4에서 확인 가능하며, III장에서 언급한 수확된 에너지를 저장하는 슈퍼 커패시터가 최대 872.754mJ까지 유지하는 것을 고려할 때 시스템 전력 소비량 및 필요 에너지양이 가용범위 내에 있음을 확인할 수 있다.

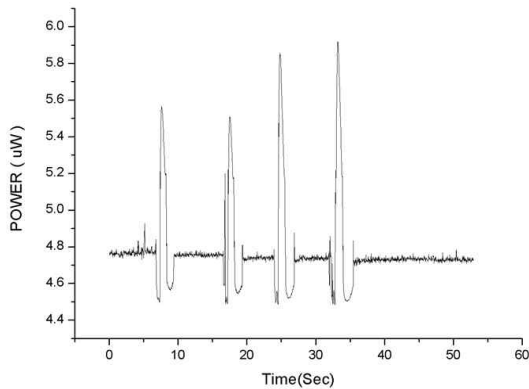


그림 22. PIR 센서 전력 소비량
Fig. 22. PIR sensor power consumption

표 4. MCU 동작에 따른 에너지 프로파일
Table 4. Energy profile according to MCU operation

	Shutdown	Active, PIR	Active, Image Capture Transmission	Active, Beam Request
Energy	91.14uW per Sec	75.84uJ	348.81mJ	2.17mJ

6.3 제작된 테스트베드 성능평가

본 실험에 사용한 테스트 베드의 Receiver Stage와 Application Stage는 그림 23, 24와 같으며, 그림 25와 같이 구성된 실험환경에서 진행하였다. 전력 송신측은 Horn 안테나(WR-159), 신호발생기(SMB 100A), 앰프(Ophir 5291)를 사용하여 1W를 출력하도록 설정하여 실험을 진행하였으며, 수신측은 테스트베드, R-Box, Virtual Bench 그리고 PC를 사용하여 실험하였다.

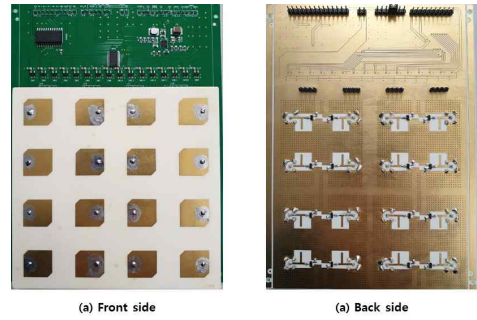


그림 23. 테스트베드 Receiver Stage
Fig. 23. Testbed Receiver Stage

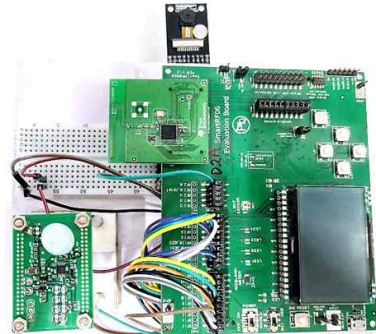


그림 24. 테스트베드 Application Stage
Fig. 24. Testbed Application Stage

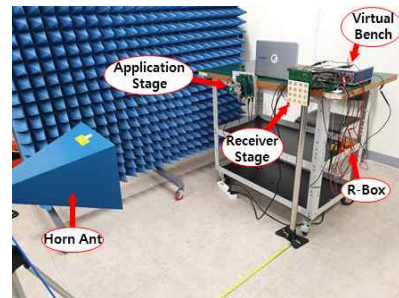


그림 25. 무선 전력 카메라 시스템 실험 환경
Fig. 25. Wireless power camera system experiment environment

성능 평가는 거리에 따른 전력 수확량과 카메라 동작에 따른 슈퍼커패시터 누적 전압 변화량을 통해 시스템 성능을 확인하였으며, 그림 26과 27에서 확인할 수 있다.

거리에 따른 전력 수확량은 5cm-160cm까지 진행하였으며, 가장 가까운 거리에서 31.87mW로 에너지 수확 효율이 3.18%로 크지 않다. 다만 실험 시 송신측 Horn 안테나 손실을 고려하지 않은 점과 송수신 측의 안테나 편파가 LP (Linear Polarization)/CP(Circular

Polarization) 환경임을 고려할 경우 낮지 않으며, 이러한 부분을 고려하여 개선한다면 더 높은 효율과 먼 거리에서 원활한 전력 수확이 일어날 수 있음을 짐작할 수 있다.

무선전력 카메라 시스템의 지속적인 동작 가능성은 그림 27에서 확인할 수 있다. 테스트베드 측 슈퍼커패시터의 충전 시간을 고려하여 Horn 안테나에서 50cm 떨어져 진행하였으며, 슈퍼커패시터는 DC-DC 컨버터의 제어 하에 최대 4.178V까지 충전되는 것이 확인할 수 있다. PIR 센서에 의해 물체 감지 이벤트 발생 시에는 V_BAT_OK 신호를 통해 영상 촬영 및 전송을 수행하기에 충분한 에너지가 모였는지 판단하며, 충분할 경우 영상 촬영 및 전송을 수행한다. 촬영된 영상은 그림 28을 통해 확인 가능하며, 이와 반대로 충분하지 않으면 송신측에 빔 요청을 하며 충전된다. 이러한 일련의 동작들은 카메라 노드가 배터리 없이 1년 내내 지속적인 동작이 가능할 수 있음을 확인할 수



그림 28. 카메라에 의해 촬영된 영상
Fig. 28. Images taken by the camera

있다.

VII. 결 론

본 논문에서는 WPT Receiver Stage 디자인과 무선 전력 시스템의 확장 및 활용 방안으로 카메라 Application Stage 모델을 제안한다. RF를 활용한 WPT의 경우 대기 중 손실 때문에 에너지 하베스팅 효율이 낮은 단점이 있으며, 이를 보완하기 위하여 다중 수신 안테나 구성을 적용하였다. Receiver Stage의 정류기의 경우 Dickson charge pump 모델을 적용하고 다양한 변수를 고려하여 임피던스 매칭을 수행하였으며, 입력 전력 20dBm에서 최대 출력 전압 7.19V, 입력 전력 19dBm에서 최대 55%의 변환 효율을 달성하였다. 또한 DC-DC 컨버터를 활용하여 과충전 임계값과 출력 전압을 조절하도록 설계하였으며, 수확된 에너지의 전압 상태를 지속해서 모니터링하는 컨버터의 배터리 허용 레벨 신호를 통해 카메라 시스템의 안정성을 높였다. Application Stage는 저전력으로 구동되는 TI사의 CC2650과 촬영 이벤트를 수행하기 위한 주변 장치들을 설계하여 전력 소비를 최소화하였으며, 효율적인 전력 관리를 위해 제어기의 동작 알고리즘을 설계하였다. 이와 같은 테스트베드의 디자인은 5.8GHz 대역에서 WPT를 통해 지속해서 카메라 시스템이 동작할 수 있음을 보이며, 다음에는 수신단과의 통신 기능을 활용하여 빔포밍 요청 및 수행 단계를 통해 더욱 능동적으로 에너지 유지가 가능한 시스템을 구현할 예정이다

References

- [1] G. M. Park, Y. S. Jeong, C. H. Lee, and C. Y. Joh, "Analysis of electrical power of vibration energy harvesting circuit using MFC sensor," in *Proc. IEIE ICC 2018*, pp. 670-672,

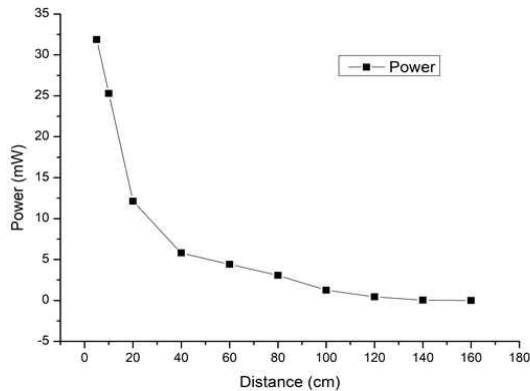


그림 26. 거리에 따른 전력 수확량
Fig. 26. power harvesting according to distance

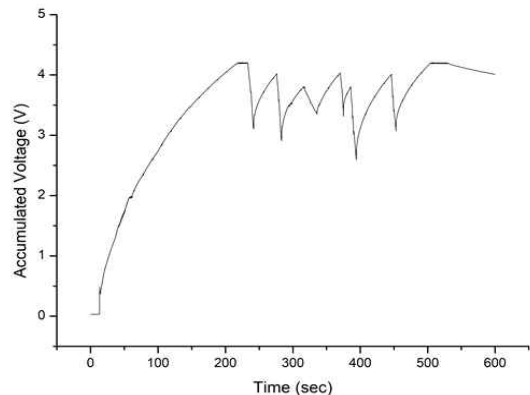


그림 27. 카메라 동작에 따른 슈퍼커패시터 누적 전압
Fig. 27. Cumulative voltage of supercapacitor according to camera operation

Jeju Island, Korea, Nov. 2018.

- [2] D. Bouchoucha, F. Dupont, M. Latrach, and L. Ventura, "Ambient RF energy harvesting," in *IEEE ICREPQ'10*, pp. 486-495, Mar. 2010.
- [3] K. Lin, J. Yu, J. Hsu, S. Zahedi, D. Lee, J. Friedman, A. Kansal, V. Raghunathan, and M. Srivastava, "Heliomote: Enabling long-lived sensor networks through solar energy harvesting," in *3rd Int. Conf. Embedded Netw. Sensor Syst.*, p. 309, Nov. 2005.
- [4] J. O. McSpadden, T. W. Yoo, and K. Chang, "Theoretical and experimental development of 10 and 35 GHz rectennas," *IEEE Trans Microwave Theory and Tech.*, vol. 40, no. 6, pp. 1259-1266, Jun. 1992.
- [5] H. Yan, J. G. M. Montero, A. Akhnoikh, L. C. N. de Vreede, and J. N. Burghart, "An integration scheme for RF power harvesting," presented at the *8th Annu. Workshop Semiconductor Advances Future Electron. Sensors*, Veldhoven, The Netherlands, 2005.
- [6] B. R. Marshall, M. M. Morys, and G. D. Durgin, "Parametric analysis and design guidelines of RF-to-DC dickson charge pumps for RFID energy harvesting," in *Proc. IEEE Int. Conf. RFID*, pp. 32-39, 2015.
- [7] D. Wang and R. Negra, "Design of a dual-band rectifier for wireless power transmission," in *Proc. 2013 IEEE WPT*, pp. 127-130, Perugia, Italy, May 2013.
- [8] TI, *User's Guide*, Aug. 2014, from <https://www.ti.com/lit/ug/slouaa7a/slouaa7a.pdf>.
- [9] L. Gasparini, R. Manduchi, M. Gottardi, and D. Petri, "An ultralow-power wireless camera node development and performance analysis," in *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol. 60, no. 12, Dec. 2011.
- [10] S. Naderiparizi, A. N. Parks, Z. Kapetanovic, B. Ransford, and J. R. Smith, "WISPCam : A Battery - Free RFID Camera," in *IEEE Int. Conf. RFID*, Apr. 2015.
- [11] TI TIDA-00489, [Online]Available: <http://www.ti.com/lit/df/tidri03b/tidri03b.pdf>.

연 규 양 (Gyu Yang Yeon)



2018년 2월 : 한국산업기술대학교 메카트로닉스 공학과 졸업
 2018년 9월~현재 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> 무선전력전송, 무선통신

[ORCID:0000-0002-7785-6670]

황 사 일 (Sa Il Hwang)



2018년 2월 : 한국산업기술대학교 메카트로닉스 공학과 졸업
 2018년 3월~현재 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 석사과정
 <관심분야> 무선전력전송

[ORCID:0000-0002-9411-8987]

최 계 원 (Kae Won Choi)



2007년 8월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
 2010년 9월~2016년 8월 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 조교수
 2016년 9월~현재 : 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 부교수

<관심분야> 무선통신, 무선전력전송

[ORCID:0000-0002-3680-1403]