

웨어러블 기기 응용을 위한 플렉서블 무선 전력 수신 시스템

Wireless Power Receiving System Implemented on a Flexible Substrate for Wearable Device Applications

이 용 완* · 임 종 식** · 한 상 민†
(Yongwan Lee · Jongsik Lim · Sang-Min Han)

Abstract - In this paper, a flexible wireless power receiving system is proposed for wearable device applications. The proposed system is designed with printable component configuration to be integrable to textile material. While the defected ground structures(DGSs) are utilized for planar printable filter designs, direct impedance matching technique is considered for flexible circuit performance. The proposed system has been implemented on a flexible substrate with a thickness of 5 mils, and experimented for power conversion efficiencies and converted voltages. In order to evaluate the hardware flexibility, the system performance are measured a bended circuit board at a radius of curvature of 5 cm. The system performance is analyzed for the degradation due to the curvature. The proposed system has shown the excellent capability of far-field wireless power transfer systems in flexible device environments.

Key Words : Wireless Power Transfer, Rectennas, Flexible substrates, Wearable devices, Defected Ground Structures (DGSs)

1. 서 론

최근 무선 통신 서비스의 주요 이슈는 단순히 타 단말에 메시지나 음성을 전달하는 기능에서 이동 중에 원격의 기기를 동작시키는 사물인터넷 (IoT: Internet of Things) 기반의 유비쿼터스 실현으로 변화하고 있다. 이에 새로운 관심의 초점이 무선의 터미널 또는 고정된 디바이스에 전원 플러그를 제거하고, 이동 중인 객체에도 전기 에너지를 전달하는 것에 대한 관심이 높아지고 있다. 무선전력전송 기술은 이처럼 전선을 사용하지 않고 전기 에너지를 자기장 혹은 전자기파 형태로 변형하여 근·원거리의 디바이스에 전력을 전달하는 기술을 의미한다[1]-[5]. 방식으로 수 m 에서 수 km 이상의 원거리에 전력을 전송하는 마이크로웨이브 방식[6]-[11]과 수 m 이내의 근거리 전송 또는 접촉 방식에 의해 코일 간의 자기 유도, 공명 현상을 이용하는 자기 유도 방식[12]-[16]으로 나누어질 수 있다. 각각의 방식들에 대해 마이크로웨이브의 발전과 정류 회로, 자기 유도 기술을 이용한 무선 충전과 전력 공급 시스템을 구축하는 연구가 꾸준히 이루어

지고 있다. 전자에 소개한 마이크로웨이브 방식은 원거리에 일정한 전력을 공급할 수 있는 현재까지의 유일한 방법으로 지난 수십 년간 관련 연구가 꾸준히 진행되어 오고 있다. 특히 최근 대용량의 우주 공간 발전 전원을 지상으로 전송하는 프로그램을 추진하면서 다시금 연구가 활발히 진행되고 있으며, 중·근거리에서 모바일 단말과 W-BAN(Wireless Body Area Network) 응용을 위한 다양한 성능이 요구되고 있다.

본 논문에서는 웨어러블(wearable) 기기 응용을 위해 피복 등의 섬유 소재에 적용할 수 있는 유연 기판에 rectenna 시스템을 설계 및 구현하였다. 이 시스템 성능에 중요한 역할을 하는 입·출력단 마이크로파 여파기는 결함접지구조(DGS; Defected Ground Structure)를 적용한 평면형 설계로 다른 소자들과 집적성이 용이하고, 프린팅에 의해 간편하게 구현이 가능한 구조로 제작되었다. 제작된 rectenna 시스템은 수신 변환 성능뿐만 아니라, 유연 기판의 구부러짐에 따른 성능 변화를 관찰함으로써 실제 섬유 소재에 응용되었을 경우의 성능에 대한 평가를 수행하였다. 본 논문의 구성은 서론에 이어 제2장에서 유연 기판에 rectenna 설계에 관해 기술하였고, 제3장에서는 rectenna의 변환 동작 성능과 구부러진 기판 상태에서의 성능 평가를 통해 제안된 시스템의 성능을 평가하였으며, 끝으로 제4장에 결론을 맺었다.

2. 무선 전력 수신 시스템 설계

2.1 플렉서블 rectenna 시스템 설계

본 장에서는 웨어러블 기기 응용을 위해 5 mils의 두께를 갖

† Corresponding Author : Dept. of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang University, Korea.
E-mail: smhan@sch.ac.kr

* Dept. of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang University, Korea.

** Dept. of Electrical Engineering, Soonchunhyang University, Korea

Received : December 15, 2014; Accepted : April 20, 2015

는 유연 기판에 마이크로웨이브 전력 수신 rectenna 시스템을 설계하였다. Rectenna 시스템은 정류기와 안테나의 합성어로 그림 1에서 보는 바와 같이 수신 안테나, 대역노치 여파기, 정합 회로, Schottky 다이오드, DC 통과 여파기, 부하저항으로 구성되어 있다. 수신 안테나를 통해 마이크로웨이브 전력을 수신 받게 되고, Schottky 다이오드의 정류 과정을 거쳐 부하에 DC 전력을 공급하게 된다. 여기서 비선형 다이오드에 의해 발생하는 DC 전력 이외의 고조파(harmonics) 전력이 안테나로 재방사 되거나 부하 저항에 의해 손실되는 것을 막고, 다시 다이오드의 정류과정을 반복함으로써 전력 변환 효율을 극대화 할 수 있다. 따라서 다이오드 양 단에 해당 주파수 대역별 우수한 성능을 갖는 여파기를 설계하는 것은 rectenna의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 먼저 안테나와 다이오드 사이에 대역통과 여파기 또는 대역저지 여파기가 사용되는데, 이는 다이오드에 의해 생성된 DC (0 Hz) 와 수신 주파수(f_0), 고조파 주파수($2f_0, 3f_0$) 중, 수신 주파수 성분만을 통과시키고, DC와 고조파 주파수 대역을 차단함으로써 안테나에 의한 마이크로웨이브 에너지의 재방사를 저지하는데 사용된다. 다이오드와 부하 저항 사이에 위치하는 여파기는 일반적으로 DC 만을 통과시키는 저역통과 여파기로서 부하에 DC 성분 이외의 수신 주파수와 고조파 주파수 성분을 차단하게 된다. 본 논문에서는 에너지 변환 과정 중 손실을 최소화하고, 프린팅 공정이 용이한 평면형 분산소자를 이용하여 설계하였으며, 여파기의 크기를 줄이고 효과적인 특성을 갖는 DGS를 이용한 여파기를 유연 기판 상에 설계하였다. 유연 기판 상에 분산소자를 설계할 경우, 기판의 두께가 얇은 특성으로 인해 설계 선폴이 좁고, 공정 조건에 매우 민감한 특성을 나타내므로 여파기 설계에 어려움이 따른다. 그러나 이로 인해 집적화가 가능한 회로를 구현할 수 있어, 추후 섬유 소재에 적용한 웨어러블 기기에 응용이 가능할 것으로 예측된다.

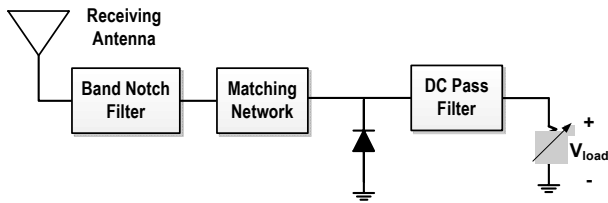


그림 1 무선 전력 수신 시스템 구성도
 Fig. 1 System configuration of the wireless power receiver

2.2 Rectenna 시스템 회로 설계

제안된 rectenna 시스템을 2.4 GHz의 RF 주파수 대역에서 설계되었다. 본 절에서는 유연 기판에 설계된 대역노치 여파기, 정합 회로, DC 통과 여파기 등에 대해 기술하였다. 아래 그림 2는 수신 안테나와 비선형 다이오드 사이에 배치될 대역노치 여파기와 성능을 나타내고 있다. 일반적으로 수신 주파수인 2.4 GHz를 통과대역으로 하고, 고조파 주파수를 제거하는 대역통과 여파기로 설계되나, 본 논문에서는 효과적인 고조파를 제거함과 동시에 통과대역의 특성을 유지할 수 있는 2단의 대역노치 여파기로 설

계하였다. 또한 평면형 구조를 유지하면서 소형화 특성을 갖는 DGS를 이용하였다[17].

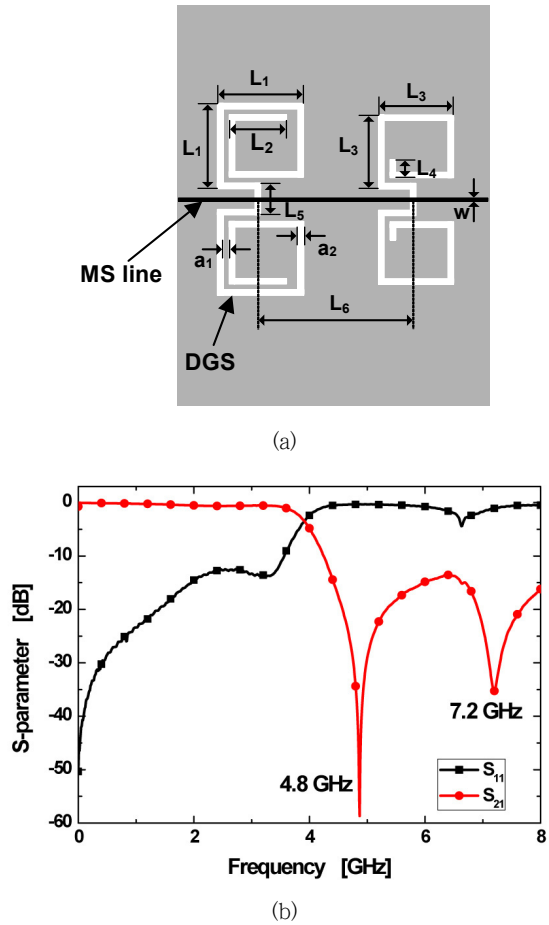


그림 2 DGS를 이용한 평면형 대역노치 여파기 (a) 여파기 레이아웃 (b) 여파기 성능
 Fig. 2 Planar band notch filter using DGSs (a) layout (b) performance

DGS는 접지면에 회로를 식각 방식에 의해 구현함으로써 접지면 전류의 지연 효과 및 공진 특성으로 여파기를 구현하게 된다. 따라서 회로가 실장 되는 면에는 마이크로스트립 라인만으로 구현되게 된다. 본 논문에서는 대역노치 특성을 위해 맴돌이형(spiral type) DGS를 구현하였다. 맴돌이형 DGS는 기존 아령형(dumbbell type) DGS에 비해 높은 인덕턴스와 캐패시턴스 성분을 가지고 우수한 차단 특성을 갖도록 설계될 뿐만 아니라, 병렬 공진에 의한 대역노치 특성을 나타낸다[18,19]. 맴돌이 선로의 선폭 및 간격에 의해 대역 저지 특성이 결정되며, 전체 크기에 의해 주파수가 결정된다. DGS의 크기가 커질수록 낮은 주파수에서 저지대역이 형성되고, 크기가 작아질수록 높은 주파수에서 저지대역이 형성되게 되는데, 그림 2 (a)의 좌측 DGS가 4.8 GHz 대역노치를 형성하며, 우측 DGS가 7.2 GHz 대역 노치를 형성하게 된다. 설계된 맴돌이형 DGS는 $L_1 = 3 \text{ mm}$, $L_2 = 2 \text{ mm}$, $L_3 = 2.6 \text{ mm}$, $L_4 =$

0.65 mm, $L_5 = 1.1$ mm 의 크기를 가지며, 각 식각선의 폭 $a_1 = a_2 = 0.2$ mm, 두 DGS 간의 거리 $L_6 = 10$ mm이다. 50 Ω라인의 선폭 W 의 폭은 0.37 mm로 설계되었다. 두 DGS 공진기 간의 거리 L_6 은 각 DGS의 부하 양호도 (loaded Q-factor)에 영향을 주게 되어, 통과대역인 2.4 GHz 주파수에서의 차단주파수(f_c)에 영향을 주게 된다. 따라서 적절한 공진기간 거리의 조절에 의해 2.4 GHz 신호의 통과 손실을 최소화하면서 저지대역의 차단 특성을 향상시키는 설계가 요구된다. 그림 2 (b)는 설계된 대역노치 여파기의 측정 성능 결과를 나타내고 있다. 통과대역인 2.4 GHz에서 -0.6 dB의 삽입 손실을 갖고, 저지 대역인 4.8 GHz와 7.2 GHz에서 각각 -38 dB, -32 dB의 저지 특성을 나타내었다.

대역노치 여파기 후단에 연결하게 되는 비선형 다이오드는 매우 낮은 임피던스를 가지므로 직접 연결할 경우, 2.4 GHz 대역의 마이크로파 입력 전력이 다이오드로 충분히 전달되지 않을 뿐만 아니라, 50 Ω로 설계된 대역노치 여파기의 포트 임피던스 또한 맞지 않아 여파기가 정상적으로 동작하지 않게 된다. 따라서 두 회로 사이에 2.4 GHz 대역에서 효과적인 정합이 이루어지는 것이 효율적인 전력 변환을 가능하게 한다. 여기서 사용된 Schottky 다이오드는 임피던스가 매우 낮아 1개의 다이오드를 사용할 경우 정합하기에 어려움이 있고, 변환 전압 또한 낮게 형성되므로 본 논문에서는 2단의 Schottky 다이오드를 사용하여 회로의 임피던스 정합 회로를 설계하였다. 2.4 GHz 대역에서 L-section 정합회로를 설계하였으며, 설계된 회로의 다이오드로부터의 직렬 선로 길이는 15.5 mm 이며, 개방형 스텐브 라인은 16.0 mm로 설계되었다. 정합 회로에 의한 임피던스 변화의 측정 결과를 아래 그림 3에 나타내었다.

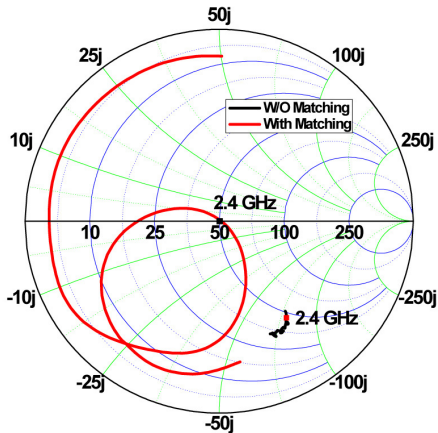


그림 3 정합회로에 의한 임피던스 정합특성
 Fig. 3 Impedance matching characteristic from the matching circuit

Schottky 다이오드와 부하 저항 사이에 위치하여 다이오드에서 정류되어진 DC 성분만을 부하 측으로 전송 할 수 있도록 DC-pass의 역할을 수행 할 수 있는 저역통과 여파기를 설계하였다. 저역통과 여파기는 비선형 다이오드에서 생성된 4.8 GHz와 7.2 GHz 주파수의 고조파 에너지와 수신 전력인 2.4 GHz 대역 에너지가 부하 저항으로 전달되어 손실되는 것을 막고, 비선형

다이오드에 의해 재사용됨으로써 전환 효율을 높이는 역할을 하게 된다. 본 논문에서는 평면형 분산소자를 이용하기 위해 H-head 아령 형태의 DGS로 저역통과 여파기를 설계하였다. 설계된 레이아웃은 그림 4 (a)에 나타내었다. 설계된 H-head 아령 구조는 L_1 과 L_2 의 DGS가 인덕턴스를 생성하고, L_3 와 마이크로스트립 병렬 개방 스텐브 라인인 L_4 가 캐패시턴스의 역할을 수행함으로써 저역통과 특성을 나타내도록 설계되었다[20]. H-head 아령 형태의 DGS는 접지면 식각에 의해 제작되었으며, 개방 스텐브는 마이크로스트립 선로에 구현되었다. 그림 4 (a)에서 설계된 여파기 구조는 $L_1 = 3.15$ mm, $L_2 = 1.92$ mm, $L_3 = 4.20$ mm이며, H형으로 식각된 선간 폭 $D_1 = 0.3$ mm, 식각된 폭 $D_2 = 0.5$ mm이다. 또한, 병렬 개방 스텐브의 길이인 $L_4 = 29.3$ mm이며, 폭 $W = 2$ mm이다. 50 Ω라인의 선폭 W_m 의 폭은 0.37 mm이다. 그림 4 (b)에서 측정된 저역통과 여파기의 DC 통과 특성을 나타내었다. 통과 대역인 DC 부근에서 0 dB의 삽입 손실을 갖고, 저지 대역인 2.4 GHz와 고조파 성분인 4.8 GHz와 7.2 GHz에서 각각 -42 dB, -26 dB, -25 dB의 저지특성을 나타내었다. 고조파 성분인 4.8 GHz와 7.2 GHz 신호 성분 또한 설계된 저역통과 여파기에 의해 부하 측으로의 전달이 차단되어 부하 저항에 의한 에너지 손실을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

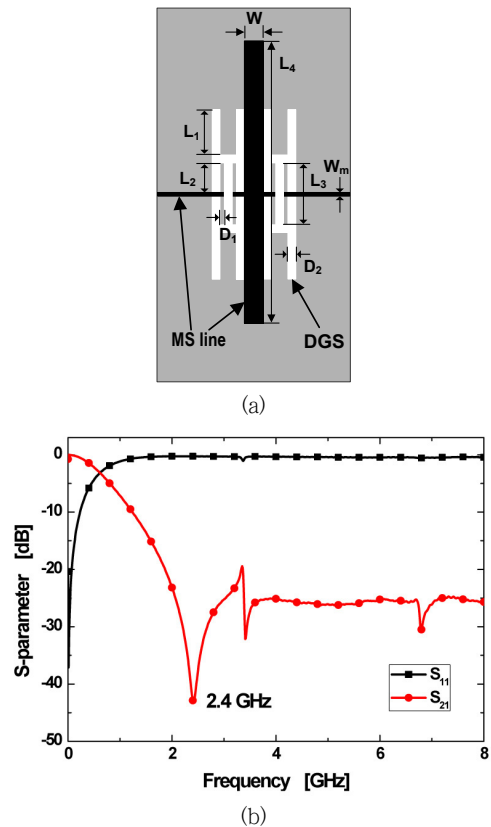


그림 4 DGS를 이용한 평면형 저역통과 여파기
 (a) 여파기 레이아웃 (b) 여파기 성능

Fig. 4 Planar lowpass filter using DGSs
 (a) layout (b) performance

3. Flexible rectenna 시스템 제작 및 성능 평가

앞 장에서 설계된 회로에 의해 에너지 변환 수신 시스템을 유연 기판에 구현하였다. 유연 기판은 유전율이 2.2이고, 두께는 5 mils인 RT/Duroid 5880 기판을 사용하였으며, Schottky 다이오드는 Avago Technologies사의 HSMS-2850이 사용되었다. 변환 전압에 의한 회로 동작을 용이하게 하기 위해, 2단의 직·병렬 전압 체배기 구조를 사용하였으며, 이는 매우 낮은 임피던스를 갖는 다이오드의 입력 임피던스를 증가시켜 입력 정합회로 구현을 용이하게 하는 장점도 가지도록 설계되었다.

제작된 무선전력 수신 시스템의 성능 측정을 위해 아래 그림 5와 같이 측정 셋업을 구성하였다. 측정 시 외부의 전파 신호에 의한 영향을 배제하고, 송수신 안테나의 반사 신호에 의한 불확실성을 제거하기 위해 전자파 흡수체 (electromagnetic absorber)로 둘러싸인 무반향실 환경에서 실험을 진행하였다. 송신부에서 공급되는 마이크로웨이브 전력원은 2.4 GHz 구면파 (CW; Continuous Wave)를 사용하였으며, 충분한 전력 변화에 대한 측정을 위해 34 dB의 이득과 35 dBm의 P_{1dB}를 갖는 고출력 전력증폭기 (ZVE-3W-83+, Mini-Circuits사)를 신호 발생기에 연결하여 사용하였다. 또한, 송신측 안테나는 10 dBi의 이득을 갖는 표준 이득 지향성 안테나를 사용하였다. 송수신 안테나 간의 거리는 원거리계 조건의 최소 거리 0.13 m 이상으로 설정되었으며, 수신측의 안테나 이득은 2.5 dBi로 설정되었다. 수신된 마이크로웨이브 전력 변화에 따른 변환 전압과 효율을 측정하기 위해 수신 안테나와 수신 시스템 사이에 10 dB의 방향성 결합기를 연결하여 전력 측정기(power meter)를 통해 rectenna의 수신 전력을 실시간으로 확인하였다.

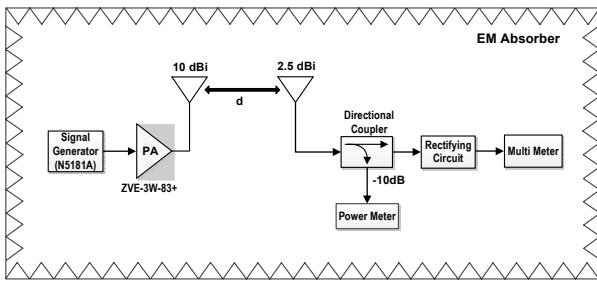
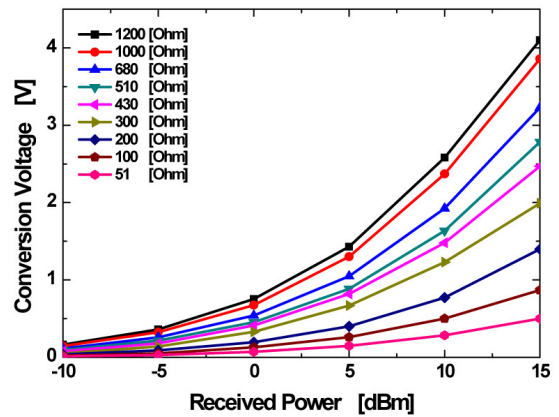


그림 5 변환 효율 및 전압 측정 셋업
Fig. 5 Measurement setup for conversion efficiency and conversion voltage

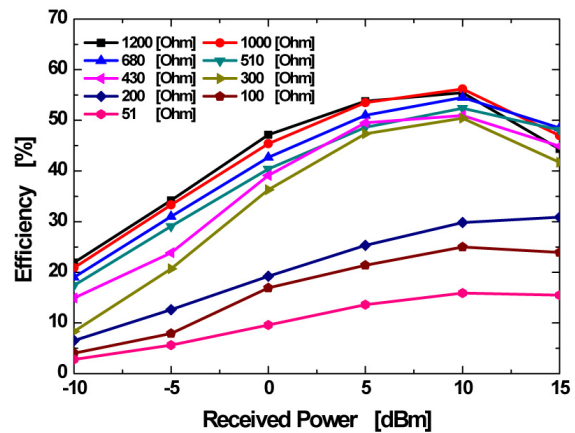
제작된 플렉서블 rectenna 시스템의 성능평가는 평면 회로 상태와 곡면 회로 상태를 갖는 2가지 시스템 장착 상태에 대해 수행되었으며, 각각의 상태에 대해 각각 변환 전력 효율과 변환 전압에 대해 측정되었다. 다양한 부하 저항에 대한 변환 특성을 검증하기 위해 51 Ω에서 1.2 kΩ까지 9단계의 부하 변화에 대한 특성을 측정하였다. 변환 전압은 부하의 구동에 필요한 전압을 측정하기 위해 전압 측정기를 이용하여 측정되었으며, 변환 전력 효율 (η_{eff})은 수신된 마이크로웨이브 전력으로부터 출력 DC 전력으로의 변환 효율을 아래 식 (1)을 이용하여 도출하였다.

$$\eta_{eff} = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \times 100 = \frac{V_{DC}^2 / R_L}{P_{RF}} \times 100 \quad (1)$$

아래 그림 6에서 평면 상태의 rectenna 시스템 변환 효율과 변환 전압을 다양한 부하저항 값과 입력 마이크로웨이브 전력에 대해 측정하였다. 변환 전압은 1.2 kΩ에서 최대값을 나타내며 약 4.1 V의 변환 전압을 얻을 수 있었다. 변환 효율은 부하의 변화에 따라 증가하는 일관된 특성을 나타내었으며, 최대 약 57 %의 효율을 나타내었다. 300 Ω 이상의 부하에서는 거의 일정한 변환 효율로 변환되는 특성을 나타내었다.



(a)



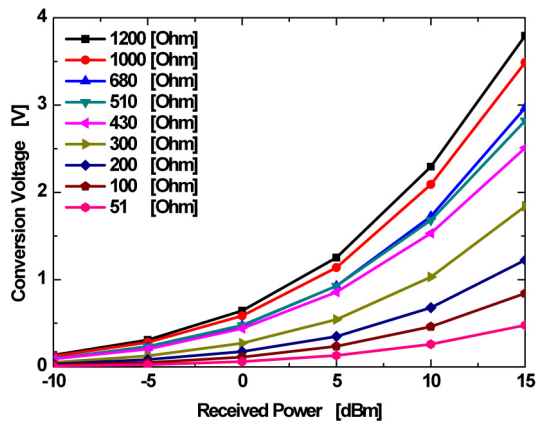
(b)

그림 6 평면 기판에서의 전력 변환 특성 (a) 변환 전압 (b) 변환 효율

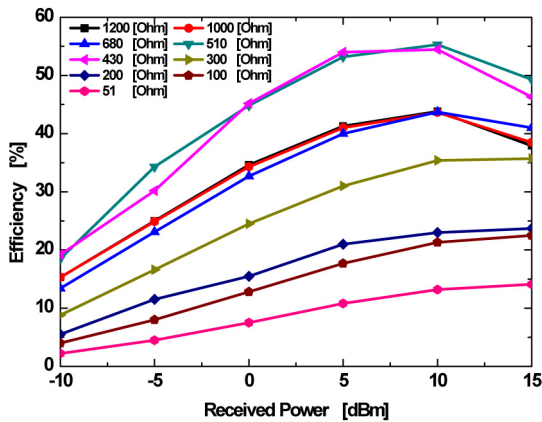
Fig. 6 Power conversion performance on a planar substrate (a) conversion voltage (b) conversion efficiency

제작된 플렉서블 시스템은 섬유 집적이나 웨어러블 기기 적용을 위한 성능 평가가 요구된다. 따라서 곡면 상태에서의 시스템 성능이 중요한 시스템 스펙으로 요구될 것이다. 본 논문에서는 곡면 상태에서의 시스템 성능 측정을 위해 반지름이 5 cm인 스티로폼 반원통을 제작하고, 그 곡면 위에 시스템을 실장 하여 일

정 곡률을 갖는 상태에서 시스템 성능을 측정 비교하였다. 측정의 정확성을 위해 측정 시 송신부 안테나와 수신부 안테나의 개구면이 동일면 상에 위치하도록 기울기를 맞추며 측정하였다. 측정된 변환 전압과 변환 전력 효율을 그림 7에 나타내었다. 변환 전압은 1.2 k Ω 부하 저항에서 최대 3.8 V의 DC 전압을 얻을 수 있었으며, 평면형 기판 상태와 비교하여 300 mV 정도의 전압이 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 이는 변환 효율을 비교함으로써 명확히 확인할 수 있다. 그림 7 (b)에서 보이는 바와 같이 변환 효율은 평면형 기판 상태와 비교하여 효율이 최대 34.5 % 까지 감소하였으며, 변환 전압도 10 - 20% 감소함은 나타내었다. 회로 기판의 곡률 변화는 회로의 임피던스를 변화시켜 각 소자간 정합 상태를 변화시키는 것으로 나타났다. 실험에서 200 Ω 의 부하 저항을 연결한 회로의 경우, 평면 회로에서는 정합을 위한 최적 조건을 만족하는 부하가 아니었으나, 5 cm의 곡률 반경으로 적인 경우 임피던스가 50 Ω 에 더 접근하는 것이 관찰되었으며, 변환



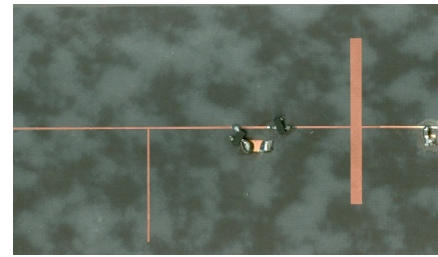
(a)



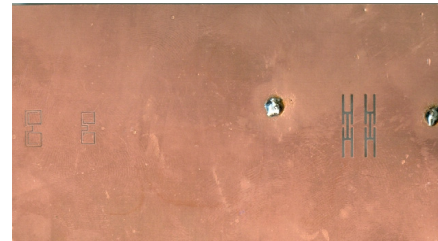
(b)

그림 7 곡률반경 5cm를 갖는 곡면 기판에서의 전력 변환 특성 (a) 변환 전압 (b) 변환 효율

Fig. 7 Power conversion performance on a bended substrate with a radius of curvature of 5cm (a) conversion voltage (b) conversion efficiency



(a)



(b)

그림 8 유연 기판에 제작된 rectenna 사진 (a) 앞면 (b) 뒷면
Fig. 8 Photographs of the rectenna implemented on a flexible substrate (a) front side (b) rear side

효율과 변환 전압이 오히려 증가하는 결과를 나타내었다. 제작된 플렉서블 레테나 시스템의 사진을 아래 그림 8에 보이고 있다. 시스템 부분은 81.5×45×0.127mm³의 크기로 제작되었으며, 실장된 비선형 다이오드를 제외하고는 평면형 프린팅 제작이 가능한 구조로 제작되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 웨어러블 기기 응용을 위한 무선 전력 수신 시스템을 유연 기판에 구현하였다. 이는 기판의 평면 구현을 위해 모든 여파기의 구조를 DGS를 이용하여 설계하였으며, 섬유 소재에 부착할 수 있도록 기판의 유연성이 높은 매우 얇은 기판을 사용하였다. 이를 통해 섬유 소재에 집적된 웨어러블 기기에 적용하여 디바이스의 원격 전력 공급 등에 응용이 가능한 시스템으로 구현되었다. 제안된 시스템은 평면 상태와 곡면 상태에서의 전력 변환 성능을 평가하였으며, 곡면 상태에서 회로의 임피던스 변화에 의한 변환 효율 및 변환 전압의 대체적인 감소 특성을 확인하였다. 따라서 플렉서블 시스템 설계의 최적화는 곡률에 따른 시스템 임피던스 변화 등을 고려하여 최적의 효율과 출력을 얻을 수 있도록 수행되어야 하며, 다양한 기판 소재의 곡률 특성에 대한 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다. 본 논문에서 제안된 원격 무선 에너지 전송 시스템의 전력 수신 시스템은 추후 다양한 웨어러블 기기의 전력 공급 및 구동 회로를 위한 기반 기술로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 순천대학교 학술연구비와 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음(2010-0009211).

References

- [1] S. K. Yoon, S. J. Kim, and U. K. Kwon, "A new circuit structure for near field wireless power transmission," *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, Seoul, Korea, pp. 982-985, May 2012.
- [2] T. Sun, X. Xie, G. Li, Y. Gu, Y. Deng, and Z. Wang, "A two-hop wireless power transfer system with an efficiency-enhanced power receiver for motion-free capsule endoscopy inspection," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 59, no. 11, pp. 3247-3254, Nov. 2012.
- [3] H.-D. Lang, A. Ludwig, and C. D. Sarris, "Convex optimization of wireless power transfer systems with multiple transmitters," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 9, pp. 4623-4636, Sep. 2014.
- [4] Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, and J. Lin, "Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 5, pp. 1801-1812, May 2009.
- [5] N. Shinohara and S. Kawasaki, "Recent wireless power transmission technologies in Japan for space solar power station/satellite," *Proc. IEEE Radio and Wireless Symp.*, San Diego, USA, pp. 13-15, Jan. 2009.
- [6] Y.-J. Ren and K. Chang, "5.8-GHz circularly polarized dual-diode rectenna and rectenna array for microwave power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 4, pp. 1495-1502, April 2006.
- [7] S.-M. Han, J. Park, and T. Itoh, "A self-biased receiver system using the active integrated antenna," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E89-B, no. 2, pp. 570-575, Feb. 2006.
- [8] J.-Y. Park, S.-M. Han, and T. Itoh, "A rectenna design with harmonic-rejecting circular-sector antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 3, no. 1, pp. 1536-1225, Dec. 2004.
- [9] C. Liu, Y.-X. Guo, H. Sun, and S. Xiao, "Design and safety considerations of an implantable rectenna for far-field wireless power transfer," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 11, pp. 5798-5806, Nov. 2014.
- [10] J. Benford, "Space applications of high-power microwaves," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 569-581, June 2008.
- [11] J. O. Mcspadden and J. C. Mankins, "Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 46-57, Dec. 2002.
- [12] M. Dionigi and M. Mongiardo, "A novel resonator for simultaneous wireless power transfer and near field magnetic communications," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Montreal, Canada, pp. 1-3, June 2012.
- [13] A. P. Sample, D. A. Meyer, and J. R. Smith, "Analysis, experimental results, and range adaptation of magnetically coupled resonators for wireless power transfer," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 2, pp. 544-554, Feb. 2011.
- [14] V. Jiwariyavej, T. Imura, T. Koyanagi, Y. Moriwaki, and Y. Hori, "Basic experimental study on effect of bentonite to efficiency of wireless power transfer using magnetic resonance coupling method," *Proc. IEEE Int. Telecommun. Energy Conf.*, Amsterdam, Netherlands, pp. 1-4, Oct. 2011.
- [15] R. Bansal, "Near-field magnetic communication," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 46, no. 2, pp. 114-115, April 2004.
- [16] K. Sasaki, S. Sugiura, and H. Iizuka, "Distance adaptation method for magnetic resonance coupling between variable capacitor-loaded parallel-wire coils," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 4, pp. 892-900, April 2014.
- [17] D. Ahn, C.-S. Kim, J. Kim, Y. Qian, and T. Itoh, "A design of the low-pass filter using the novel microstrip defected ground structure," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 1, pp. 86-93, Jan. 2001.
- [18] C.-S. Kim, J.-S. Lim, S. Nam, K.-Y. Kang, J.-I. Park, G.-Y. Kim, and D. Ahn, "The equivalent circuit modeling of defected ground structure with spiral shape," *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Seattle, USA, pp. 2125-2128, June 2002.
- [19] C.-S. Kim, J. Lim, S. Nam, K.-Y. Kang, and D. Ahn, "Equivalent circuit modelling of spiral defected ground structure for microstrip line," *Electron. Lett.*, vol. 38, no. 19, pp. 1109-1110, Sep. 2002.
- [20] M. K. Mandal and S. Sanyal, "A novel defected ground structure for planar circuits," *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 16, no. 2, pp. 93-95, Feb. 2006.

저 자 소 개



이 용 완(Yongwan Lee)

2013년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사), 2013년 7월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] RF System, RF/Microwave 회로 설계, RF Front-End System



임 종 식(Jongsik Lim)

1991년 2월: 서강대학교 전자공학과(공학사)
1993년 2월: 서강대학교 전자공학과(공학석사), 2003년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사), 1993년 2월~1999년 3월: 한국전자통신연구원 위성통신기술연구단 선임연구원, 2003년 3월~2003년 7월: 서울대학교 BK21 정보기술사업단 박사후 연구원, 2003년 7월~2004년 9월: 특허청 특허심사관, 2004년 9월~2005년 2월: 한국전자통신연구원 디지털방송연구단 전파기술연구그룹 선임연구원, 2005년 3월~현재: 순천향대학교 전기통신공학과 부교수
[주 관심분야] 초고주파 무선 회로/부품 설계, 능동/수동 소자 모델링 및 회로 응용, 주기 구조의 모델링 및 회로 응용 등



한 상 민(Sang-Min Han)

1996년: 고려대학교 전파공학과(공학사)
1998년: 고려대학교 전파공학과(공학석사)
2003년: 고려대학교 전파공학과(공학박사)
2003년 10월~2004년 11월: 미국 University of California, Los Angeles(UCLA), Post-Doc. Research Fellow
2005년 1월~2007년 8월: 삼성종합기술원 전문연구원, 2013년 8월~2014년 7월: 미국 Georgia Institute of Technology, Research Faculty, 2007년 9월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 부교수
[주 관심분야] RF Systems, Low-Power Transceivers, Active Integrated Antennas