

IoT를 위한 에너지 하베스팅 및 무선 충전 동향 및 기술

1. 서론

최근 사물 인터넷 (IoT) 기반의 지식 서비스가 급증함에 따라 이와 연관된 다양한 제품 및 기술이 선보이고 있다. 사물 인터넷 시장은 2025년까지 최대 연간 11.1조 달러로 전망되고 있으며 공장, 의료, 자동차, 홈 네트워크 등 다양한 분야에서 우리의 삶을 변화시킬 것으로 보인다. 이러한 변화속에서 소형 및 경량의 제품을 위한 반도체 기술은 IoT 기반의 서비스의 근간을 이루고 있으며 특히 사용 시간을 결정하는 전원 관련 기술은 서비스의 성공을 결정하는 핵심 기술 중 하나로 여겨진다. 특히 웨어러블 디바이스, 바이오 센서, 무전원 센서 등의 분야에서 연구개발이 활발히 이루어지고 있는 무선 충전 및 에너지 하베스팅 기술은 제품의 사용시간을 좌우하는 핵심 요소 기술로서 관련 제품의 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

무선 충전 기술의 경우 기존의 전동 칫솔과 같은 소규모의 제품에 제한적 적용이 되었으나 최근 대규모 상업화에 성공하여 그 범위를 확대해 나가고 있다. 무선 충전 전력 크기도 초기 5W급에서 최근 고속 충전을 지원하는 10W급이 출시되고 있으며 향후 15W급 및 웨어러블 디바이스형의 저전력 무선 충전 기술도 표준화 및 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 충전 전력이 증가할수록 반도체 기술의 측면에서는 고출력을 감당하는 트랜지스터의 개발 및 칩에서 발생하는 피할 수 없는 열 문제를 극복하기 위한 다양한 회로 기법 및 패키징 연구가 동시에 진행되어야 한다. 한편 에너지 하베스팅 기술의 경우 기존에 널리 이용되고 있는 태양광 발전에 이어 전파 에너지, 압전 에너지, 열전 에너지, 마찰력 에너지 등의 다양한 에너지원에서 에너지를 얻기 위한 소자 및 회로 측면에서 연구개발이 활발히 진행 중에 있다. 이러한 에너지 하베스팅 기술은 소자와 하베스팅 회로 연구로 크게 두 가지로 나뉘어져 있으



이성호
전자부품연구원



안현석
전자부품연구원

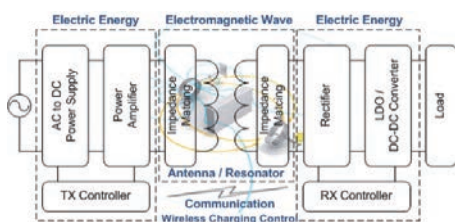
며 소자 측면에서는 소자 구조의 변경을 통한 에너지 효율 향상 및 향후 웨어러블 디바이스로 적용을 위한 유연 기관 기반의 소자 연구가 진행되고 있으며 회로 연구의 경우 외부 소자를 최소화 하면서 효율을 극대화하기 위한 회로의 고집적화 및 고효율에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 이러한 IoT 기반의 다양한 제품을 위한 핵심 요소기술인 기술로서 무선 충전 기술 및 에너지 하베스팅 기술에 관하여 반도체 측면에서 개발 동향 및 핵심 설계 기술을 소개하는 자료로서 2장에서는 무선 충전 기술의 동향과 관련 회로 기술을 3장에서는 에너지 하베스팅의 다양한 기술 중 압전, 전파, 마찰력을 중심으로 개발 동향 및 관련 설계 기술을 소개한다. 마지막으로 4장에서 결론 및 향후 연구방향으로 끝을 맺는다.

II. 무선 충전 기술

1. 무선 충전 기술 분류 및 동향

무선 전력 전송을 통한 무선 충전 기술은 전력 전송 방식에 따라 자기유도방식, 자기공진방식, 전자기파방식 등으로 구분할 수 있다. 현재 스마트폰, 스마트워치 등의 IoT기기에 적용되어 상용화된 무선충전기술은 자기유도 방식이 대부분이며, 자기공진방식과 전자기파방식을 이용한 무선 충전 기술은 아직까지는 기술 구현 가능성 확인 및 기술 시연을 목적으로 하는 프로토타입 제품이 시장에 출시되는 정도이다. 무선 전력 전송 방식에 따라 구현 회로는 다를 수 있으나, 무선 충전 시스템은 <그림 1>



<그림 1> 무선 충전 송수신 시스템 구성도

와 같은 구성을 가진다.

자기 유도 방식 무선 충전은 송신 안테나에 흐르는 전류에 의해 수신 안테나에 전류가 유도 되는 전자기 유도 현상을 이용한다. 이러한 현상을 이용하기 위해서는 두 안테나 사이의 물리적 거리가 근접해야 하므로 무선 충전 거리가 짧고 한 개의 송신기에 한 개의 수신기만 충전이 가능한 제약이 있으나, 충전 효율이 상대적으로 높고, 높은 전력을 전송하는데 유리하다. 근접거리에서만 충전이 되기 때문에, 충전 기기의 위치 자유도가 크지 않은 단점이 있다. 자기 유도 방식의 무선 충전 기술 표준화를

무선 충전 기술은 전송 방식에 따라 자기 유도방식, 자기공진방식으로 구분되며, 최근 멀티모드 무선충전 등 서로 다른 방식의 무선충전을 지원하는 기술 및 두 방식이 공존하는 기술 표준 개발이 진행되고 있다.

진행하고 있는 곳은 WPC(Wireless Power Consortium)^[2], PMA (Power Matters Alliance) 두 단체가 있다. 각 단체의 기술 표준을 따르는 기기간 무선 충전 호환성이 보장되며, 최근 모바일기기를 비롯한 IoT 기기에 적용되는 사례가 늘고 있다. WPC, PMA 각 표준을 지

원하는 무선 충전 IC 솔루션은 물론 두 표준을 모두 지원하는 멀티 모드 무선 충전 IC도 시장에 공급되어 실제 제품에 적용되고 있다. 최근 삼성의 갤럭시 S6가 두 표준을 모두 지원하는 모델의 대표적 예이다. 이러한 IC 솔루션을 제공하는 대표적인 회사로는 TI(Texas Instrument), IDT(Integrated Device Technology)등이 있으며 특히 TI는 10W급 Qi 무선 충전 IC 솔루션을 2015년 초에 내놓았으며^[4], Qi 1.2를 만족하는 15W급 무선 충전 지원 IC의 경우 테스트 단계이며 곧 시장에 출시될 예정이다. 또한 웨어러블 디바이스를 비롯하여 소형 IoT기기 무선 충전 지원을 위한 2.5W이하의 저전력 무선 충전 솔루션도 제공하고 있다.

자기 공진 방식 무선 충전은 송수신 안테나의 공진 주파수를 일치시켜 두 안테나 사이의 자기장 공명 현상을 이용한 것으로서 자기 유도와 달리 두 코일이 공간적으



<그림 2> 웨어러블기기에 적용된 Qi 무선 충전

로 이격된 상태뿐만 아니라 다수의 안테나가 존재할 시에도 공명 현상이 발생 및 유지되는 특성이 있다. 이러한 특성으로 수 m 거리에서도 무선 충전이 가능하고, 한 개의 송신기에 다수의 수신기 무선 충전이 가능한 1:N 무선 충전 지원이 가능한 기술이다. 자기 유도 방식과 비교하여 상대적으로 충전 기기의 위치 자유도가 높은 장점이 있으나, 충전 효율이 떨어지고 공간적으로 이격된 송수신 안테나 사이에서 일부 자기에너지 손실이 발생하여 송수신기기의 자기장 차폐에 어려움을 야기 시키며, 높은 전력 무선 충전 시 이러한 누설 자기장은 더욱 커져 EMI/EMC 등 전파 안전성 및 인체 안전성 기준을 만족시키는데 어려움이 존재한다. 이러한 이유로 아직 실제 제품에 적용되어 상용화된 사례는 없다. 자기 유도 방식과 비교할 때, 안테나의 공명 현상 발생 시 송수신단의 입출력 전압/전류의 값이 큰 값을 가지며, 송수신 안테나 이격 거리에 따른 전압/전류 변동폭 또한 크다. 이는 IC로 기술 구현 시 높은 전압을 견딜 수 있는 회로 설계 및 추가적인 보호회로가 필요하다. 자기 공진 방식의 기술 표준을 진행하는 단체는 A4WP 한 곳이 존재한다. 현재 A4WP 표준과 호환되는 IC는 시장에 샘플 칩이 공급되는 단계이며, 아직 상용 제품에 적용되지 않았다. 자기 공진 무선 충전 IC를 개발한 대표적인 회사로는 IDT, MediaTek, 맵스 등이 있다. 최근 A4WP는 웨어러블기기등의 IoT기기에 적용 가능한 1W이하의 저전력 무선 충전 기술로의 확장을 시도하고 있다.

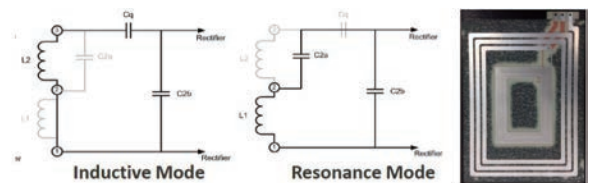
자기 유도 방식과 자기 공진 방식의 무선 충전은 위에 살펴본 바와 같이 무선 충전 주파수 및 무선 충전이 일어날 때의 물리적 현상에 차이가 존재하나, 근본적인 기술 원리는 안테나에 흐르는 전류와 이에 의해 형성되는 전자기장을 이용한다는 점이 동일하다. 따라서 자기 유도 방식과 자기 공진 방식을 하나의 시스템 안에서 모두 구현하려는 움직임이 일어나고 있다. WPC는 기존의 Qi 표준과 호환 가능하면서 자기 공진 무선 충전을 지원하도록 proxis의 주도하에 Qi 표준을 확장하고 있으며,

A4WP와 PMA는 기술 전략적 제휴 관계를 맺고 AirFuel Alliance를 설립하여^[3], 자기 유도 및 자기 공진 방식 무선 충전을 하나의 기술 표준에 담으려고 하고 있다. 이는 초기 자기 유도 및 자기 공진 방식의 무선 충전 표준이 양립하였으나 현재는 두 기술이 공존하는 쪽으로 기술 개발이 진행되고 있음을 의미한다.

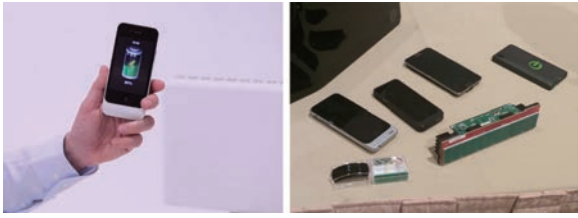
이러한 자기 유도 방식과 자기 공진 방식의 무선 충전 기술 동향은 무선 충전 IC의 기술 개발 진행 방향과 동일하다. 자기 유도 방식의 멀티 표준 지원이 아닌 자기 유도 방식과 자기 공진 방식의 멀티 모드 무선 충전과 급속 무선 충전을 지원하는 IC들이 시장에 출시될 것으로 예상된다. MediaTek은 WPC, PMA, A4WP 표준을 모두 지원하는 멀티 모드 무선 충전 IC 솔루션을 시장에 내놓았다^[5]. 이러한 3개의 표준은 무선 충전 주파수가 모두 상이하여 3개의 주파수를 모두 지원 가능하면서 무선 충전 효율을 좋게 만드는 것이 기술의 핵심이라고 볼 수 있다.

마지막으로 전자기파 방식의 무선 충전은 송수신 안테나를 통해 전자기파를 직접 송수신 하는 방식이다. 전파가 이동하는 거리 내에서 무선 충전이 가능하여 수 km, 까지 전력 전송이 가능하나, 전송 효율이 좋지 않아 원하는 전력을 얻기 위해 많은 전력을 송신하고, 수신 효율을 높이기 위해 많은 안테나를 이용하여 전자기파를 수집한다. 주로 산업용으로 사용하는 방식이나, 최근 IoT 기술 발전과 함께 저전력으로 동작하는 센서 및 모듈들이 사용되어, 적은 전력을 송신하는 것만으로도 원거리에 존재하는 IoT기기들을 동작 시키는 것이 가능하다. 이들을 구동하기 위한 방식의 하나로 RF기반 원거리 무선 충전 기술이 각광받고 있으며 기술 개발 및 시제품을 통한 기술 시

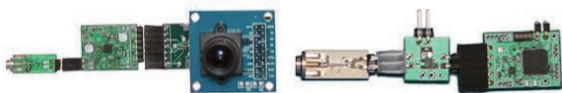
RF기반 무선 충전 기술은 낮은 전력 전송 효율을 가지나, 원거리 전력 전송이 가능하며, 향후 무전원 센서를 비롯하여 저전력으로 동작하는 IoT 기기의 에너지원으로 사용 가능한 기술로 부각되고 있다.



〈그림 3〉 MediaTek社 멀티표준호환 수신기



〈그림 4〉 Energous社 RF 무선 충전 송수신기

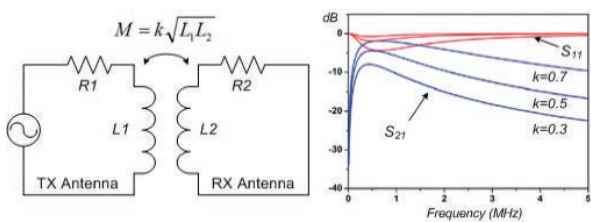


〈그림 5〉 UW PoWiFi 적용한 무전원 카메라 및 센서

현재까지 진행되고 있다. 해당 기술은 3장에서 소개될 전파에너지 하베스팅 기술과 함께 원거리에서 전송되는 적은 RF 에너지를 이용하여 기기를 동작 시키거나, 에너지를 축적하여 기기 동작시 사용한다. 최근 Energous사는 5.7~5.8GHz의 주파수 대역을 이용하여 6m에서 1W의 무선 충전 및 최대 12개까지 무선 충전이 가능한 Wattup 기술을 시현하였으며^[6], Ossia사는 RF 에너지를 이용하여 9m거리에서 1W 전력을 수신하는 기술을 선보였다. 이외에 TechNovator사의 XE기술 또한 RF 에너지를 이용한 무선 충전 방식이다. 미국 위싱턴대학(UW)에서는 ‘Power over Wi-Fi(PoWiFi)’ 기술을 선보이며^[7], Wi-Fi 신호를 이용하여 에너지를 수집하여 저전력 카메라 및 센서를 동작시키는 기술 시현을 하였다. 이러한 RF 기반 무선 충전 기술은 낮은 전력 전송 효율을 가지나, 원거리 전력 전송이 가능하여, 향후 무전원 센서를 비롯하여 저전력으로 동작하는 IoT기기의 에너지원으로 사용 가능한 기술로 최근 부각되고 있다.

2. 무선 충전 핵심 기술

무선 충전 시스템은 〈그림 1〉과 같이 크게 무선 충전



〈그림 6〉 자기 유도형 무선 충전 회로 모델 및 S21

송수신 안테나, 송신부, 수신부, 통신부로 나눌 수 있으며 각 세부 블록의 특징 및 주요 기술은 다음과 같다.

1) 무선 충전 송수신 안테나 : 무선 충전 안테나는 전기에너지를 전자기파에너지로 변환하여 무선으로 에너지를 전달하는 기능을 한다. 이 때 안테나의 특성이 무선 충전 효율에 미치는 영향은 무선 충전 방식에 따라 다르다. 〈그림 6〉은 자기 유도형 무선 충전 시스템을 전기적 신호로 분석하기 위해 회로 모델로 간략화하여 표시한 것이다. 안테나 등가모델은 인덕터로 표시되며, 송수신 안테나 사이의 상호 인덕턴스 M은 결합계수 k에 비례한다. 결합계수는 두 안테나 사이의 간격이 멀어질수록 작아진다.

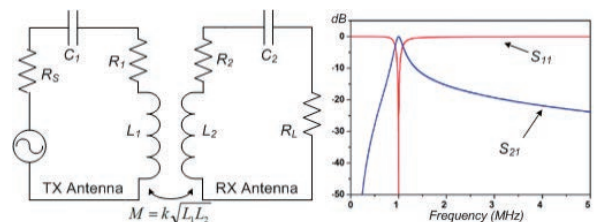
입출력 전압의 비를 나타내는 S21값을 이용하여 무선 충전 효율 분석을 통해 최대 전력 전송이 일어나는 조건과 효율을 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{L_1}{R_1} = \frac{L_2}{R_2}$$

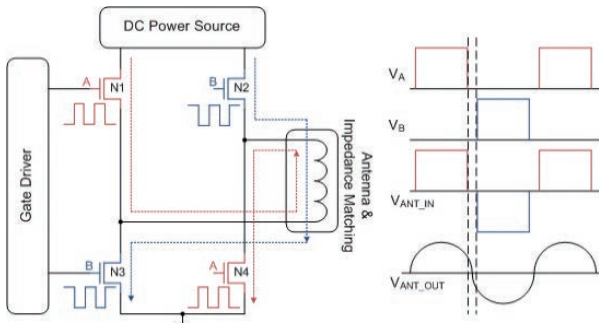
$$|S_{21}| = \left[\frac{4\omega^2 k^2 L_1 L_2 R_2 R_1}{R_2 R_1 - \omega^2 L_1 L_2 (1 - k^2)^2 + \omega^2 (R_2 L_1 + R_1 L_2)^2} \right]^{1/2} \propto \frac{1}{k}$$

송신부 인덕턴스와 임피던스의 비가 수신부 인덕턴스와 임피던스의 비와 같을 때 최대 무선 전력 전송이 가능하다. 이 조건에 맞게 자기 유도형 무선 충전 시스템을 설계해야 한다. 최대 전력 전송 조건에서 결합계수 k에 따른 S21의 값은 〈그림 6〉의 그래프와 같다. k의 값이 작을수록 전송 효율은 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 두 안테나 사이의 거리가 멀어지면 무선 충전 효율이 떨어짐을 의미하며 자기 유도 무선 충전은 근접 거리에서만 무선 충전이 가능함을 알 수 있다.

〈그림 7〉은 자기 공진형 무선 충전 시스템을 회로 모델로 간략하게 표시한 것이다. 동일한 방식으로 S21 값을



〈그림 7〉 자기 공진형 무선 충전 회로 모델 및 S21



〈그림 8〉 무선 충전 송신 인버터

이용하여 최대 전력 전송이 일어나는 조건과 효율을 계산하면 다음 수식과 같다.

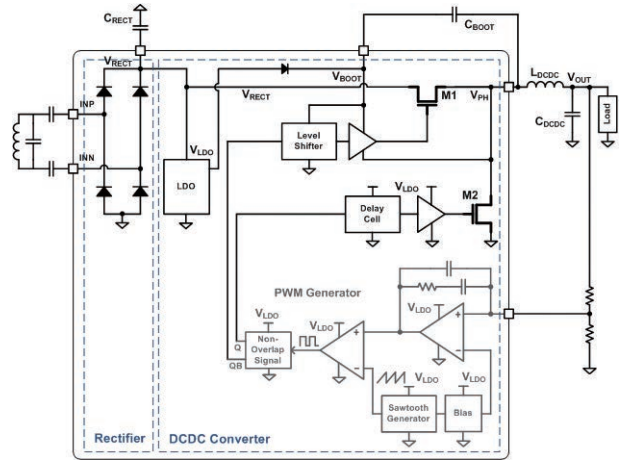
$$R_s = R_1 \sqrt{1 + \frac{k^2 w_0^2 L_1 L_2}{R_1 R_2}}$$

$$|S_{21}| = \frac{w_0 \sqrt{L_1 L_2}}{\sqrt{R_1 R_2} + \sqrt{R_1 R_2 + w_0^2 k^2 L_1 L_2}} \quad k \approx 1$$

최대 전력 전송이 이뤄지기 위해서 공진 주파수에서 임피던스 매칭이 필요하며, 인덕터의 기생저항 R1과 R2의 값이 매우 작을 때, 즉 안테나의 Q값이 매우 높을 때, 전력 전송 효율 S21의 값은 결합계수에 영향을 받지 않을 수 있다. 즉 송수신 안테나의 거리가 멀어져도 무선 전력 전송이 가능함을 의미한다. 따라서 자기 공진형 무선 충전 시스템 설계시 공진 주파수에서의 임피던스 매칭과, 안테나와 매칭부의 캐패시턴스의 기생저항을 최대한 줄여 안테나의 Q값이 크도록 설계 하는 것이 중요하다.

2) 무선 충전 송신부 : 자기 유도 및 자기 공진 방식의 A4WP, WPC, PMA 표준의 무선 충전 주파수에서는 〈그림 8〉과 같이 Full-Bridge 인버터 타입으로 구현이 가능하다. 4개의 스위치중 N1, N4와 N2, N3가 각각 동시에 켜져 안테나에 순방향과 역방향 전류를 한 번씩 흘려주어 AC 신호를 생성한다.

고효율 무선 충전 송신부 설계를 위해서는 인버터의 전력 변환 효율이 중요하다. 전력 변환 효율을 높이기 위해서는 인버터 스위치 ON 저항이 낮아야하며, N1, N4가 켜지는 시간과 N2, N3가 켜지는 시간이 겹치지 않도록



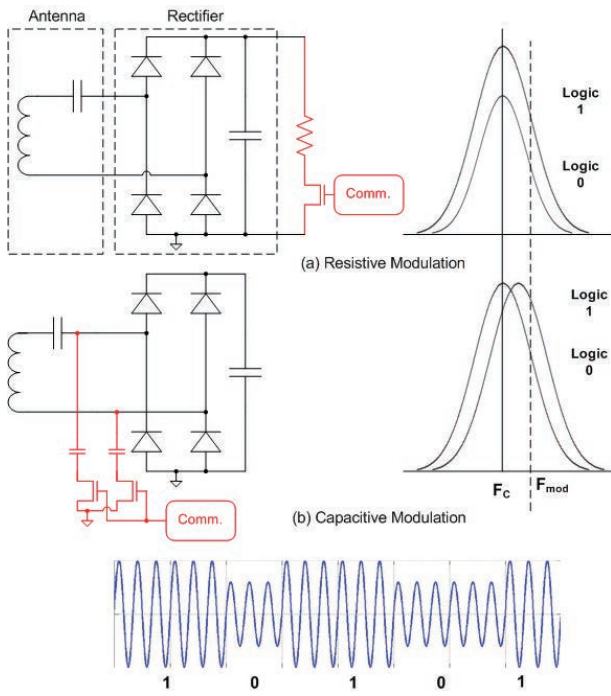
〈그림 9〉 무선 충전 수신부

록 모든 스위치가 꺼져있는 Dead Time을 주어야 한다. N1과 N2, N3, N4가 동시에 켜지는 경우 안테나가 아닌 VDD와 GND사이에 전류가 흐르게 되어 곧바로 전력 손실로 이어지기 때문에 송신부 설계시 이러한 현상이 일어나지 않도록 하는 것이 중요하다.

3) 무선 충전 수신부 : 무선 충전 수신부는 정류기와 정전원 생성 블록인 LDO 또는 DC-DC 변환기로 구성된다. 〈그림 9〉는 수동형 소자인 다이오드를 이용한 브릿지 정류기와 DC-DC 변환기로 이루어진 수신부를 나타낸다. 정류 효율을 높이기 위해서는 FET를 이용한 동기식 정류기를 사용하기도 하며, 자세한 정류회로의 특성 및 종류는 3장에서 다루기로 한다. 수신부 설계시 수신 안테나에 의해서 인가되는 전압의 범위에 따라 정전원 생성 블록 설계가 달라진다. 정전원 생성 블록의 입력력 전압의 차이가 작은 경우에는 LDO를 사용해도 무방하나, 입력력 전압의 차이가 큰 경우에는 DC-DC 변환기가 효율 면에서 유리하다. 수신 안테나에 인가되는 전압 범위와 수신부 출력 전압 값에 따라 정전원 블록의 구조를 선택해야한다. 일반적으로 자기 공진형 무선 충전이나 급속 무선 충전의 경우 DC-DC 변환기를 사용하며, 넓은 입력 전압 범위를 갖는 DC-DC 변환기 설계가 중요하다.

무선 충전 수신부는 동작 전원을 안테나에 인가되는 전

무선 충전 수신부는 초기 동작 전후와 무선 충전 기기의 사용 상황에 따라 수신부의 부하가 계속 변하기 때문에, 수신부의 부하 상황에 따른 최적 충전 효율 설계 및 보호 회로 설계가 중요하다.



〈그림 10〉 무선 충전 통신 제어 블록

력에 의해서 생성하므로, 초기 동작에 문제가 없도록 설계되어야 한다. 초기에는 회로들이 동작하지 않는 상태에 있다가 안테나에 신호가 인가되면 전원이 생성되어 동작되도록 설계된다. 수신부 동작 이전에는 안테나의 부하가 크게 보여 높은 전압이 회로에 인가되고, 수신부가 동작하면, 실제 무선 충전 부하가 보여 급격히 낮아지는 현상을 가진다. 따라서 수신부 회로의 경우 BCDMOS와 같이 높은 정격 전압을 갖는 소자를 사용하여 설계하는 것이 일반적이다. 또한 정격 전압 이상이 인가될 시 회로를 보호해 주기 위한 전압 리미터와 같은 추가적인 회로가 필요하다. 또한 수신부가 동작하는 상황에도 무선 충전 기기의 상황에 따라 수신부의 부하가 계속 변하기 때문에, 부하의 상황에 따라 최적의 충전 효율을 갖도록 설계하는 것이 중요하다.

4) 무선 충전 통신부: 무선 충전시 충전 기기의 상황에 따라 전력 전송 제어가 되어야한다. 따라서 송수신기기는 지속적으로 충전 상황을 모니터링하는 통신 기능이 필

요하다. 통신 방식에는 무선 충전 전파를 이용하여 충전과 통신을 동일한 주파수를 사용하는 인밴드 통신과 무선 충전 전파와 다른 주파수의 전파를 이용한 아웃밴드 통신 방식이 있다. WPC, PMA의 자기 유도 무선 충전 표준에서는 인밴드 통신을 사용하며, A4WP의 자기 공진 방식의 무선 충전 표준에서는 Bluetooth Low Energy를 이용한 아웃밴드 통신을 사용한다. 인밴드 통신의 경우 무선 충전 주파수와 동일한 주파수를 이용하기 때문에 별도의 통신 전용 블록 없이 간단한 회로의 추가로 통신 기능을 구현할 수 있는 장점이 있으나, 통신하는 동안에는 무선 충전 효율이 저하되거나, 충전이 되지 않는 단점이 있다.

〈그림 10〉은 AM(Amplitude Modulation) 방식이 이용된 인밴드 통신을 구현한 회로이다. 저항 또는 캐패시터를 안테나에 연결하여 부하 변조를 통해 송신부에서 송신되는 전파가 수신부 부하에 따라 변화되는 반송파를 이용하여 통신을 한다. 부하의 변화에 따라 〈그림 10〉과 같이 전파의 진폭이 변하여 데이터를 구별 가능케 한다. WPC, PMA는 이와 같은 방식을 사용한다. 아웃밴드 통신의 경우 부가적인 통신 전용 블록이 들어가는 단점이 있으나, 무선 충전 진행 여부와 상관없이 지속적으로 송신기와 통신이 가능하고, 무선 충전시 통신에 따른 충전 효율 저하가 없는 장점이 있다. 수신 기기가 방전되어 전력이 없는 경우에는 통신 블록 또한 동작하지 않기 때문에 무선 충전 송신부에서 통신을 위한 전력 전송이 필요하다. 이 경우에는 인밴드 통신 방식과 유사하게 송신부에서 파워 비콘을 전송하여 통신 블록이 동작 되도록 한 후, 무선 충전을 시작하도록 설계 한다.

무선 충전시 충전 기기의 상황에 따라 전력 전송 제어가 가능토록 송수신기간 통신 기능이 필요하며, 수신부가 방전되어 전력이 없는 상황에서도 초기 동작 및 통신 블록 구동이 가능토록 설계 하는 것이 중요하다.

Ⅲ. 에너지 하베스팅 기술

1. 에너지 하베스팅의 종류 및 동향

1) 압전 에너지 하베스팅: 1880년 Jacques Curie와 Pierre Curie가 압전효과를 발견한 이래 소자 및 공정 기술의 연구 개발을 통해 상업화가 점차 진행중에 있으며

최근에는 Micro fiber composite 등의 신소재를 통한 효율 향상 및 웨어러블 디바이스를 목표로 유연소자를 이용한 연구 개발이 활발히 진행중에 있다. 압전 에너지는 외부에 기계적인 에너지를 받아 압전소자의 유전 성질에 영향을 주어 발생하는 전압을 에너지원으로 사용한다. 압전소자의 물질로는 PZT, PVFD, Quick Pack 등이 있으며 Q (Quality factor)가 높을수록 더 많은 에너지를 생성하는데 유리하며 최근에는 MFC(Micro fiber composite)의 경우 입력 기계 에너지의 65% 까지 전기 에너지로 생성할 수 있다. 몇 가지 소자의 특징을 정리하면 다음과 같다.

1. 소자의 모양에 따라 특성이 변화하며 tapered된 형태가 더 많은 에너지를 생성한다.
2. 입력으로 주어진 기계 에너지가 공진 주파수에 가까울수록 에너지 생성에 유리하다.
3. 로드 임피던스가 공진 주파수에서 발생하는 전기적인 소스 저항과 일치해야 에너지 효율이 최대가 된다.

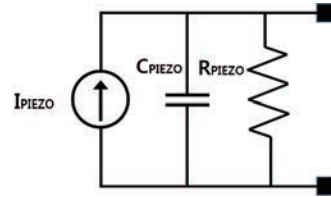
압전소자로부터 발생하는 에너지는 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$P = \frac{m\eta A^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3 \omega^3}{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\eta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}$$

m 은 질량, η 는 댐핑 계수, ω_n 은 공진 주파수, A는 압전소자의 물리적 진폭, 그리고 ω 는 실제 동작 주파수이다. 위의 식에서 보듯이 압전소자로부터 발생하는 에너지는 압전소자의 공진 주파수에 가까울수록 얻을 수 있는 최대 파워는 증가하므로 압전소자를 적용하여 에너지 하베스팅을 할 경우에는 적용할 환경의 기계적인 진동수에 가까운 압전소자를 구하는 것이 높은 에너지를 구하는데 유리하다.

$$I_{PIEZO} = mA\omega_n^2$$

$$Z_i = \frac{1}{\omega_n^2 C_{PIEZO}}$$



〈그림 11〉 공진시 압전소자의 모델

〈그림 11〉는 압전소자의 공진시 모델을 나타낸다. 압전소자의 기본 특성이 캐패시턴스를 이용하기 때문에 회로 구조의 소스 모델이 적합하며 대부분의 압전소자의 경우 소스 임피던스의 경우 수백 킬로옴에서 수메가에 이르는 큰 저항 성분을 가지게 된다. 따라서 압전 하베스팅의 효율은 로드단의 임피던스의 경우 압전소자의 소스 임피던스와 같아질 때 최대 효율을 얻을 수 있게 된다. 일반적으로 압전소자의 전압은 4개의 브릿지를 통하여 정류하게 된다. 가해지는 물리적인 힘의 크기에 따라서 발생하는 정현파 신호에 대한 정류를 거쳐서 DC전압이 생성되기 때문에 초단에 존재하는 정류기의 설계가 특성을 좌우하게 된다^[8-9].

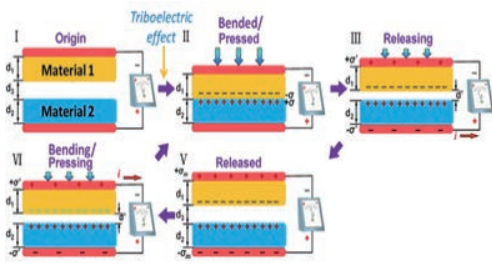
2) 마찰력 에너지 하베스팅: 마찰력 에너지 하베스팅은 마찰 전기의 극성이 다른 두 개의 물질사이의 접촉으로 인하여 표면 전하의 이동이 발생함으로 인해서 생기는 전기 에너지를 하베스팅하는 기술이다. 마찰력에서는 접촉의 의미를 크게 늘리는 힘인 프레싱으로 생기는 전기,

미끄러지는 힘인 슬라이딩으로 생기는 전기, 그리고 구부러지는 힘은 벤딩으로 인해 생기는 전기를 보통 얘기하며 주로 소자의 특성 및 배치를 통하여 최대의 에너지를 얻기 위한 연구가 진행되고 있으며 초기에는 uW/cm² 수준이었으나 최근에는

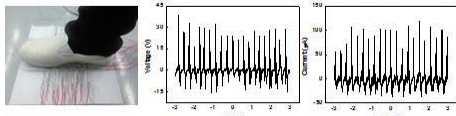
마찰력 에너지 하베스팅은 마찰 전기의 극성이 다른 두개의 물질사이의 접촉으로 인하여 표면 전하의 이동이 발생함으로 인해서 생기는 전기 에너지를 하베스팅하는 기술이다.

수십 mW/cm² 으로 까지 출력을 나타내는 기술이 소개되고 있다. 또한 웨어러블 디바이스에 적용 가능한 섬유 기반의 마찰력 소재도 연구되고 있으며 상대적으로 전류에 비하여 높은 전압의 급격히 나타나고 사라지는 마찰전기의 특성을 개선하여 전류 및 전압의 크기를 조절 가능한 마찰력 센서를 연구 개발중에 있다.

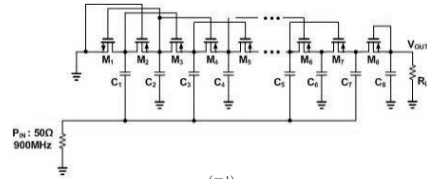
3) 전파 에너지 하베스팅: 무선 통신 기술의 급격한 발



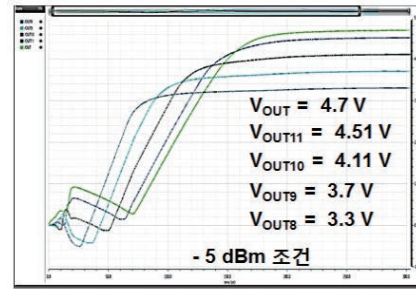
〈그림 12〉 마찰력 에너지의 생성 원리



〈그림 13〉 마찰전기의 실험 모습 및 전압, 전류 파형



(가)



(나)

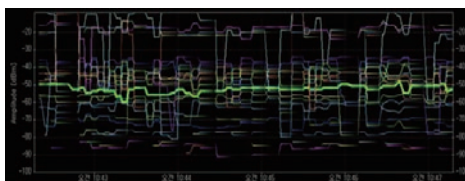
〈그림 15〉 RF 에너지 하베스팅을 위한 전하 펌프 및 시뮬레이션 결과

전과 일상 생활에 다양한 적용 제품이 나오에 따라 일반인의 생활 환경은 다양한 전파 환경에 놓여져 있으며 밀집된 도시의 경우 그 정도는 더 심하다고 볼 수 있다.

〈그림 14〉는 도심 실내 사무실에서 측정된 다양한 전파 분포를 나타내고 있다. 전파의 주파수 및 크기도 매우 다양한 전파가 다양하게 분포되고 있음을 알 수 있다.

전파 에너지 하베스팅의 경우 미국의 파워 캐스트 사에서 P2110으로 이름으로 900MHz 대역에서 에너지를 능동 및 수동으로 수집할 수 있는 제품을 출시하였으며 리니어 테크놀로지사에서 유사한 하베스팅 제품을 출시하고 있다.

〈그림 15〉는 전파 에너지 하베스팅을 위한 전하 펌프 회로 및 시뮬레이션 결과를 보여준다. 미세한 작은 전압을 연속적인 전하 펌프를 사용하여 전압을 상승시켜 발생하는 에너지를 배터리로 공급해야 하므로 고효율의 전압 상승 회로가 요구되며 RF 입력 정합을 함께 구현해야 하므로 하베스팅 효율을



〈그림 14〉 실내에서 측정된 전파 분포의 예

정류기의 경우 가장 간단한 형태의 다이오드 형태의 정류기와 트랜지스터의 스위칭을 통한 능동형태의 정류기로 나뉘 수 있으며 트랜지스터를 사용할 경우 역방향 전류로 인하여 효율이 저하될 수 있기 때문에 신호의 진폭을 보고 역방향 전류가 흐르지 않도록 스위칭 동작을 조절하는 기법이 중요하다.

결정하는 주요한 회로 블럭이 된다. 〈표 1〉은 최근 발표된 전파 에너지 하베스팅 논문을 비교한 표로서 아직까지는 송신기가 별도로 있지 않는 일상 생활에서의 외부 전파를 이용한 에너지 하베스팅은 그 감도가 -20dBm 부근에 제한이 되어있으며 성능 향상을 위해서는 안테나 구조 및 입력 신호의 고효율 정류기의 회로 개발이 이루어져야 가능할 것으로 보인다.

〈표 1〉 최근 발표된 전파 하베스팅 기술 비교

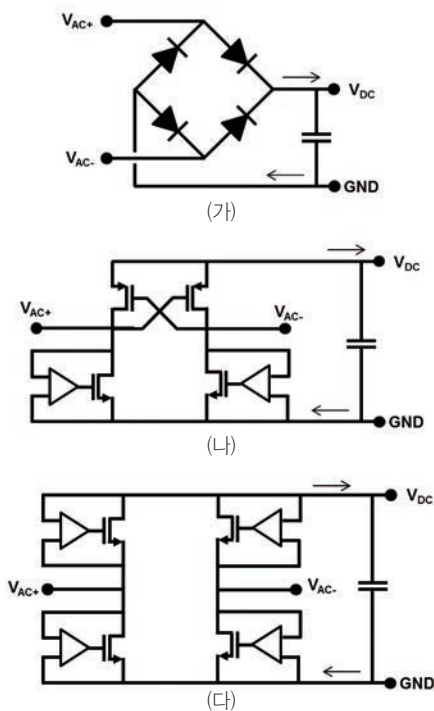
	Ref. [12]	Ref. [13]	Ref. [14]	Ref. [15]	Ref. [16]
하베스팅 주파수	830 MHz	904.5 MHz	-	902-928 MHz	915 MHz
최대 수신 효율	35.7% @ -15 dBm	4.5% @ -15 dBm 52% @ -34 dBm (Rectifier)	61% @ 1.2V input	32% @ -15 dBm	22.6% @ -16.8 dBm
출력 전압	2V @ -15 dBm	1V	1V	3.2 V @ -15 dBm 1V @ -20.5 dBm	2.2 V @ -16.8 dBm 2.4 V @ -15 dBm
최소 감지 신호	-17 dBm for 2V	-20 dBm	-	-20.5 dBm for 1 V	-21.6 dBm for 1 V
로드	RL = 1 MO	RL = 1 MO	IL = 1 µA	RL = 1 MO	RL = 1 MO
사용 공정	180 nm	65 nm	250 nm	130 nm	130 nm
칩크기	0.275 mm ²	2 mm ²	0.39 mm ²	0.4 mm ²	0.44 mm ²

2. 에너지 하베스팅의 핵심 기술

1) 정류기 설계: 정류기의 경우 가장 간단한 형태의 다이오드 형태의 정류기와 트랜지스터의 스위칭을 통한 능동형태의 정류기로 나뉠수 있으며 트랜지스터를 사용할 경우 역방향 전류로 인하여 효율이 저하될 수 있기 때문에 신호의 진폭을 보고 역방향 전류가 흐르지 않도록 스위칭 동작을 조절하는 기법이 중요하다.

〈그림 16〉는 대표적인 풀 브릿지 기반의 3가지 정류기를 나타낸다. 전파 하베스팅의 경우 매우 작은 전파 신호를 감지해야 하므로 연속적인 전하 펌프를 통하여 신호 처리가 가능한 전압 수준까지 올려준다는 점에서 다소 다른 구조를 가지고 있으나 대부분의 하베스팅의 경우 〈그림 16〉와 같은 형태의 정류기를 사용한다. (가)에 있는 다이오드 형태의 정류기는 가장 기본적인 구조로서 구조가 간단하고 수동소자만을 사용함으로써 추가적인 전류소모가 없기 때문에 안

밴드갭이나 증폭기와 같은 아날로그 회로의 경우 nW 수준의 소모 전력을 가지도록 설계되어야 하며 디지털 회로의 경우 문턱전압 이하에서 동작하도록 설계해야 한다.



〈그림 16〉 대표적인 정류기 회로도 : (가) 다이오드를 이용한 브릿지 회로, (나) NMOS와 PMOS를 모두 사용한 회로, (다) NMOS만을 사용한 회로

정적인 동작이 가능한 장점이 있는 반면에 다이오드의 문턱 전압으로 인하여 전압이 100% 전달이 안돼 효율이 떨어지는 단점이 존재한다. 또한 CMOS 공정을 사용하여 설계할 경우 선택할 수 있는 다이오드의 종류가 제한적이므로 공정에 따른 사용이 제한적일 수 있다^[9]. (나)의 경우 입력과 그라운드사이의 전압을 비교하여 입력신호가 더 클 경우에만 스위치가 동작하게 됨으로 그라운드와의 경로에서 별도의 문턱 전압이 필요없게 되므로 효율이 향상되나 출력으로 신호 경로에서는

PMOS를 다이오드 형태의 구성으로 사용하게 됨으로서 여전히 문턱 전압이 존재 하게 되어 전체 효율의 향상은 제한적이게 된다.

또한, NMOS에 비하여 특성이 나쁜 PMOS를 사용하게 됨으로 인하여

전도 저항 및 면적이 증가하는 단점이 존재한다. (다)의 정류회로는 그라운드 경로 및 출력 경로 모두 NMOS를 사용하게 되어 별도의 문턱전압이 필요하지 않고 낮은 스위치 저항을 이용하게 되어 효율 향상이 제일 큰 구조이다. 그러나 4개의 NMOS를 구동하기 위한 스위치 드라이버가 각각 필요하게 되고 출력 경로에 있는 NMOS를 구동하기 위해서는 VDC보다 높은 전압을 필요로 하게 되어 전압 부스팅과 같은 추가적인 회로가 필요하게 되어 주변 회로가 증가하게 되는 단점이 존재한다. 그러므로 출력 전력이 작은 응용에서는 주변 회로에서 소모하는 파워가 증가하게 되어 오히려 전체 시스템 효율이 나빠지는 결과가 나올 수 있으므로 정류하는 전력의 크기를 감안하여 적절한 정류기의 구조를 선택해야 한다^[9-10].

2) DC-DC 변환기의 설계: 일반적으로 최종 출력 노드에 연결되는 부품은 슈퍼 캐패시터 혹은 Li 배터리가 된다. 따라서 출력에 연결되는 에너지 소모원이 요구하는 일정한 전압을 생성시켜주는 회로가 필요하게 되며 보통 LDO 혹은 DC-DC 변환기가 이 역할을 담당하게 된다. 에너지 하베스팅의 경우 에너지의 효율이 매우 중요하게 되므로 일반적으로 효율이 떨어지는 LDO 대신 대부분의 경우 DC-DC 변환기가 이 역할을 담당하게 된다. DC-DC 변환기의 경우 정류기에서 만들어지는 에너지를 출

력에 필요한 전압으로 변환을 해야 하며 에너지 하베스팅의 종류에 따라서 높은 입력 전압이 발생하는 압전 및 마찰력 하베스팅에서는 전압을 내리는 Buck 구조를 사용하거나 열전, 태양열, 전파 에너지 하베스팅과 같이 발생 전압이 낮은 경우에는 출력 전압을 올리는 boost 타입의 DC-DC 변환기를 사용하게 된다. 경우에 따라서는 이 두가지 기능을 모두 필요로 하는 buck-boost 구조를 이용하기도 한다^[11].

〈그림 17〉은 에너지 하베스팅에 이용되는 DC-DC 변환기의 회로도의 예를 보여준다. 수 uW에서 mW 수준의 저전력의 에너지를 하베스팅하기 위한 DC-DC 변환기는 회로 내부에서 에너지 소모를 최소화 함으로서 효율을 극대화 하기 위한 다양한 회로 기법이 적용된다. 밴드갭이나 증폭기와 같

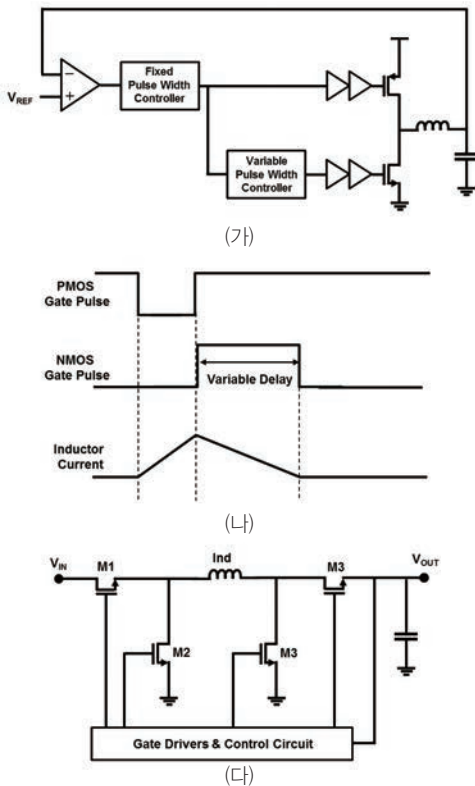
은 아날로그 회로의 경우 nW 수준의 소모전력을 가지도록 설계되어야 하며 디지털 회로의 경우 문턱전압 이하에서 동작하도록 설계해야 한다. 또한 DC-DC 변환기의 동작도 고출력 고전압에서 사용되어진 구조와 달리 극단적으로 간단한 구조를 사용하고 있다. 〈그림 17(가)〉의 회로의 경우 일반적인 Buck 타입의 DC-DC변환기와 구조는 유사하지만 펄스 주파수 변조 방식을 기반으로 하며

일반적으로 에너지 하베스팅 회로에서는 최대의 파워를 수집하기 위한 최적의 임피던스를 조정 해주는 기능이 들어가야 하며 이를 위해 Hill-climbing과 같은 알고리즘을 적용하여 수신단의 수집 에너지를 모니터링 함으로서 고효율의 에너지 수집이 가능하게 한다.

DCM(Discontinuous Conduction Mode)에서 스위치의 턴 온 시간을 디지털로 조절함으로써 인덕터의 전류를 조절하는 방식을 채택하여 원하는 출력 전압을 조절하는 방식을 이용하였다. 〈그림 17(다)〉는 Buck구조와 Boost 구조를 결합한 Buck-Boost DC-DC변환기의 회

로도를 보여주고 있으며 두 가지 모두를 모두 지원하기 위하여 4개의 스위치가 필요하게 된다. 스위치 M1과 M2는 Buck 구조로 동작하고 M3와 M4는 Boost 변환기로 동작하게 된다. 이러한 형태의 변환기는 출력전압과 무관하게 넓은 입력전압 영역을 가질 수 있는 장점이 있는 반면에 하나의 모드에서 불필요한 스위치 경로가 추가되어 전도 저항으로 인한 효율 감소는 피할 수 없는 단점이 존재한다.

3) MPPT (Maximum Power Point Tracking) 기술: 정류기와 DC-DC 변환기와는 별도로 에너지 하베스팅의 경우 하베스팅하는 입력 소스에 대한 최적의 로드 임피던스를 최적화해야 되는 중요한 기능이 필요하다. 가령 전파 하베스팅의 경우 안테나 임피던스와 매칭이 되어야 하며 압전 하베스팅의 경우 압전소자의 공진 주파수에 해당하는 임피던스를 가져야 하베스팅 전력의 효율의 극대화가 된다. 따라서 일반적으로 에너지 하베스팅 회로에서는 최대의 파워를 수집하기 위한 최적의 임피던스를 조정 해주는 기능이 들어가야 하며 이를 위해 Hill-climbing과 같은 알고리즘을 적용하여 수신단의 수집 에너지를 모니터링 함으로서 고효율의 에너지 수집이 가능하게 한다. 이러한 회로를 MPPT라고 부르며 최근 다양한 알고리즘을 기반으로 하는 연구가 진행되고 있다.



〈그림 17〉 DC-DC변환기의 회로 : (가) 저전력 Buck 구조의 변환기의 예 및 (나) 게이트 구동 신호 및 인덕터 전류의 파형, (다) Buck-boost DC-DC 변환기의 기본 회로



VI. 향후 연구 및 결론

지금까지 증가하는 IoT 기반의 서비스를 위한 무선 충전 및 에너지 하베스팅의 동향 및 관련 회로 기술에 대하여 살펴보았다. 스마트폰 시장 이후 다양한 웨어러블 디바이스를 지원하는 무선 충전 기술 및 무전원 센서 및 사용 시간 최대화를 위한 다양한 에너지원을 이용한 에너지 하베스팅 기술을 향후 IoT의 전원관리 기술의 핵심 요소가 될 것으로 보이며 응용 서비스에 따른 최적의 수신 전력에 맞는 회로 및 하베스팅 종류와 소재의 최적화 및 고성능화를 위한 폭넓은 연구 개발이 필요한 분야로 확신한다.

참고 문헌

[1] S-A. El-Hamamsy, "Design of High-Efficiency RF Class-D Power Amplifier," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 9, No. 3, pg. 297-308, May 1994

[2] WPC, <http://www.wirelesspowerconsortium.com/>

[3] Airfuel, <http://airfuel.org/>

[4] TIDA-00329 by Texas Instrument, <http://www.ti.com/tool/TIDA-00329>

[5] Multi-Mode Receiver by Mediatek, <http://www.mediatek.com>

[6] Wattup by Energous, <http://www.energous.com/overview>

[7] PoWiFi by University of Washington, <http://netlab.cs.washington.edu/>

[8] G K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt and G. A. Lesieutre, "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply," IEEE Trans. Power Electronics, vol 17, no. 5, pp. 669-676, Sep. 2002.

[9] S. Guo and H. Lee, "An efficiency-enhanced CMOS rectifier with unbalanced-biased comparators for transcutaneous-powered high-current implants," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 44, no. 6, pp. 1796-1804, Jun. 2009.

[10] J. Colomer-Farrarons, et al., "Power conditioning circuitry for a self-powered system based on micro PZT generators in a 0.13-um low-voltage low-power technology," IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55, no. 9, pp. 3249-3257, Sept.

2008.

[11] Y. K. Ramadass and A. P. Chandrakasan, "Minimum energy tracking loop with embedded DC-DC converter enabling ultra-low-voltage operation down to 250 mV in 65 nm CMOS", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 43, no. 1, pp. 256-265, Jan. 2008.

[12] Ping-Hsuan Hsieh, Chih-Hsien Chou, and Tao Chiang, "An RF Energy Harvester With 44.1% PCE at Input Available Power of -12 dBm", IEEE Trans. Circuits Syst. II: REGULAR PAPERS, VOL. 62, NO. 6, Jun. 2015.

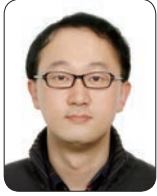
[13] Lingli Xia, Jiao Cheng, Neil E. Glover, and Patrick Chiang, "0.56 V, -20 dBm RF-Powered, Multi-Node Wireless Body Area Network System-on-a-Chip With Harvesting-Efficiency Tracking Loop", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 49, no. 6, Jun. 2014.

[14] Tzu-Chi Huang, Chun-Yu Hsieh, Yao-Yi Yang, Yu Huei Lee, Yu Chai Kang, Ke Horng Chen, Chen Chih Huang, Ying-Hsi Lin, and Ming-Wei Lee, "A Battery-Free 217 nW Static Control Power Buck Converter for Wireless RF Energy Harvesting With α -Calibrated Dynamic On/Off Time and Adaptive Phase Lead Control", IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 47, no. 4, April 2012.

[15] Zohaib Hameed, Kambiz Moez, "A 3.2 V -15 dBm Adaptive Threshold-Voltage Compensated RF Energy Harvester in 130 nm CMOS", IEEE Trans. Circuits and Systems-I: Regular Papers, Vol. 62, No. 4, April 2015.

[16] Zohaib Hameed, Kambiz Moez, "Hybrid Forward and Backward Threshold-Compensated RF-DC Power Converter for RF Energy Harvesting.", IEEE J. ON Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 4, no. 3, Sept. 2014.

본 논문은 산업통상부의 산업현장 핵심기술 수시 개발사업 [10054640, 웨어러블 디바이스용 사용시간 최대화를 위한 다중에너지 충전 IC 및 모듈 개발] 과제의 연구개발의 일부 결과임.



이성호

- 1998년 2월 서강대학교 전자공학 학사
- 2000년 2월 서강대학교 전자공학 석사
- 2011년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학 박사
- 2001년 4월~2009년 12월 GCT Semiconductor
아날로그팀 책임연구원
- 2010년 1월~현재 전자부품연구원 지능형SoC연구센터
책임연구원

〈관심분야〉

RF/Analog/Mixed 모드 회로 설계, IoT기반 센서
인터페이스



안현석

- 2005년 2월 고려대학교 전기전자전파공학 학사
- 2007년 2월 서울대학교 전기컴퓨터공학 석사
- 2007년 3월~2012년 12월 GCT Semiconductor
선임연구원
- 2013년 1월~현재 전자부품연구원
스마트네트워크연구센터 선임연구원

〈관심분야〉

Analog & RF 회로 설계 기술, 무선 통신 및 통신 융합
기술, 무선 전력 전송 및 에너지 하베스팅 기술