

# 무선전력 전송을 위한 RF 송신기 기술 동향 및 설계 기법

강원실·임종균·박희수·구현철 (건국대학교)

## I. 서론

전력을 무선으로 전송하고자 하는 연구는 19세기말~20세기 초 Tesla 에서부터 시작하여, 1960~1970년대 Brown 의 Rectenna 발명 등으로 진행되어 왔다.<sup>[1-2]</sup> 무선으로 전력을 전송하는 기법은 전력 전송 효율이나 안정성 면에서 유선으로 전송하는 기법에 비해 단점이 있다. 이러한 단점으로 20세기 후반까지 무선전력 전송에 대한 연구 및 활용은 국방 및 우주 개발 분야 등에 제한적이었다. 20세기말 무선통신 기술의 급속한 발전에 따라 신호 전송을 위한 유선 케이블이 대부분 무선으로 대체되었다. 전자기기에서 데이터 전송을 위한 유선 케이블은 무선으로 대체된 반면, 전원은 여전히 유선을 이용하고 있는 상황이어서, 전원 케이블은 Last Cable이라 불리고 있다. Last Cable을 제거하여 시스템의 이동성을 최대화하고자 하는 욕구는 최근 무선전력 전송(Wireless Power Transfer: WPT)에 대한 관심을 증대시키고 있다.<sup>[3-4]</sup>

무선전력 전송을 실용화하기 위해서는 해결하여야 할 문제들이 산재해 있다. 이 중 기술적으로 해결하여야 할 주요 문제는 전력 전송 효율의 향상이다. 에너지가 도선에 집중되는 유선전력 전송에 비하여 공간에서 무선으로 전파되는 무선 전송의 효율은 송신기와 수신기의 거리가 멀어짐에 따라 크게 떨어지게 된다. 무선의 장점에 비해 에너지 효율의 문제가 크게 대두되어 실제 제품에 적용이 어렵다. 무선전력 전송의 효율 향상은 전력 전송 시스템의 주요 서브시스템인 송신기, 안테나, 수신기 각각의 효율 향상을 통하여 달성될 수 있다. 본 원고의 2장에서는 무선전력 전송 시스템의 연구 동향을 살펴보고, 시스템의 주요 구성 요소 및 설계 요소에 대하여 고찰한다. 3장에서는 무선전력 전송 시스템 중 송신기 설계시 고려할 소자 특성, 회로 기법 등을 살펴본다. 4장에서는

송신기의 효율 향상을 위한 스위치 모드 기법을 이용한 고효율 전력증폭기 설계 기법 및 관련 연구에 대하여 소개하였다.

## II. 무선전력 전송 시스템

### 1. 연구 동향

전력을 무선으로 전력 수요처에 공급하는 혁명이 진행되고 있다. 세계 유수의 연구기관 및 사업체에서 무선전력 전송 사업 분야의 가능성을 인지하고 혁신적인 이론과 다양한 시제품들을 제시하고 있다. 최근 다양한 무선전력 전송 제품들이 출시됨에 따라 세계적으로 무선전력에 대한 기술 표준화의 필요성이 대두되었고, 2008년 무선전력 표준화 단체인 무선전력협회(Wireless Power Consortium: WPC)가 결성되었다. 세계 각국의 연구기관, 기업들이 회원사로 참여하고 있으며 국내에서는 ETRI, 삼성전자, LG전자, KT, LS전선 등이 활동하고 있다. WPC는 자기유도 방식의 표준 제품에 대해서 'Qi'인증을 시행하고 있다. 국내에서도 무선전력 전송의 표준화 등의 필요성에 의해 2011년 12월에 방송통신위원회와 국내 주요 가전사 및 무선충전 관련 기업 및 전문가들이 참여해 '한국무선전력전송 포럼'을 출범시켰다.

무선전력 전송 시스템은 기본적으로 자기유도 방식과 마이크로파 등을 이용한 원거리 신호 전송을 통한 전자기파 방식으로 구분될 수 있다. 최근 2007년에 MIT(매사추세츠공대)의 마린 솔라시치(Soljagic) 교수팀에 의해서 자기공명 방식을 이용하여 기존의 일반 자기유도 방식에 비해 높은 효율로 상대적으로 원거리 전송이 가능함이 Science지등에 소개되었다<sup>[5-6]</sup>. 2m 거리에서 60와트의 전력을 전송하는 실험을 수

행하였다. 이후 자기공명 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, WiTricity 같은 관련 회사들도 생겨나고 있다.

최근에는 기존의 자기유도 방식과 공명 방식을 분리하여 무선전력 전송 기술을 일반적으로 자기유도 방식, 자기공명 방식, 전자기파 방식의 세가지로 분류한다. <그림 1>에서 3가지 방식의 무선전력 전송 시스템의 예를 도시하였다. (a)에서는 휴대폰, MP3플레이어와 같은 휴대용 개인 전자기기를 충전패드에 올려놓고 자기유도 방식을 이용하여 충전을 하는 제품, (b)에서는 자기공명 방식을 이용하여 수 m 내에 위치한 전구를 켜는 것(Intel사 자료), (c)에서는 Microwave Power Transmission (MPT) 을 이용하여 2.45GHz 대역의 RF 신호를 차량에서 UAV (Unmanned Aerial Vehicle)로 무선으로 전력을 전송하는 실험을 보여준다.

자기유도 방식은 충전용 패드 등의 일차측 코일에서 발생된 자기장이 휴대폰 등 전자기기의 전력 수신부의 이차측 코일에 유도되어 전류를 공급하는 구조로서 패러데이의 전자기 유도 현상을 이용한다. 이 방식을 활용할 경우 충전기와 전자기기를 직접 연결할 필요가 없다. 하지만 이 방식으로 스마트폰을 충전하기 위해서는 충전용 패드와 별도 커버가 필요하고, 패드와 단말이 수 mm내에 놓여야 한다.

자기공명 방식은 두 개의 코일을 같은 자장에서 공진토록 파장을 맞춰 전력을 전송하는 방식이다. 송신부와 수신부에 전송 주파수에서 공진을 일으키는 공진기가 포함되고, 이 공진기간 신호의 공진 주파수가 일치할 경우 높은 효율의 전송이 가능하다. 이 방식은 자기유도 방식의 거리 문제를 개선하여 폭넓은 쓰임새가 기대된다. 향후 소형 자기공명 방식을 활용한 스마트 기기의 충전기 제품이 증대할 것으로 예상된다. 자기공명 방식에 대한 연구를 수행한 MIT 연구팀은 다수의 특허를 미국 및 세계 각국에 출원하였다. 국내의 경우에도 무

<표 1> 무선전력 전송 기술별 비교

분류	자기유도	자기공명	전자기파
전송거리	mm~cm	cm~m	m~km
사용주파수	125kHz 13.56MHz	수십 kHz~ 수백 MHz	수 GHz (2.4, 5.8GHz ISM 대역)
전송전력	mW~수W	mW~수십W	uW, mW~수KW
기술성숙도	성숙기	도입기	도약기
문제점	짧은 거리	송수신 코일크기, 인체 유해성	전송 효율 문제, 송수신기 구현, 인체 유해성
활용	무선 충전기술, 교통카드, 근거리충전	무선 TV전원, 무선 자동차충전	무선센서, 소형발전, SSPS
표준화정도	상	하	하
모듈/시스템 단가	저렴	중	고가
주요해외업체 및 연구기관	TI, Powermat, Duracell, Energizer	WiTricity, WiPower, Qualcomm, Intel, Fujitsu	NASA, PowerCaster

선 에너지 전달 시스템 [출원 번호: 10-2011-7009635, 출원일: 2009년 9월 25일, 출원인: 메사추세츠 인스티튜트 오브 테크놀로지], 간접 강화를 포함하는 무선 에너지 전달 [출원 번호: 10-201-7028149, 출원일: 2009년 5월 14일, 출원인: 메사추세츠 인스티튜트 오브 테크놀로지]등이 출원되어 있다. 향후 국내에서 자기공명 방식을 이용한 제품 개발시 관련 기술 사용에 따라 발생할 문제에 대한 고려가 필요할 것이다. 또한 자기공명 방식을 실생활 제품에 상용화하기 위해서는 표준화 문제, 인체 유해성 문제, 전파 잡음 문제 등에 대한 해결이 필요하다.

전자기파 방식은 자기유도, 자기공명 방식에 비해 원거리의 전력 전송이 가능하다. 1960년대 Brown이 Rectenna를 개발하여 무인 헬리콥터에 전력을 전송하는 경우가 전자기파를 이용하여 전력을 공급하는 방식이다. 우주 태양광 발전소 (Space Solar Power System: SSPS)는 우주에서 지표면보다 10배 가량 태양광이 강한 점을 이용하여 3만 6000km 상공에 태양광 발전 위성에서 전기를 생산하고 이를 마이크로파를 이용하여 지상으로 전송하는 시스템이다. SSPS에서도 전자기파 방식의 무선전력 전송을 이용한다<sup>[7-8]</sup>. 그러나 전자기파 방식의 경우 효율, 인체 유해성, 전파 잡음 등의 문제로 인하여 실생활에 사용하기는 제약이 많다. 전자기파 방식은 우주, 국방 분야의 대용량 전력전송 및 무선센서, 저전력 기기의 소용량 전력전송으로 활용분야를 넓힐 것으로 예상된다. <표 1>에서 각 무선전력 기술별 특성을 비교하였다.

## 2. 무선전력 전송 하드웨어 및 설계요소

상기 기술한 무선전력 전송 시스템의 하드웨어 구성 예를 <그림 2>에 도시하였다. (a)는 WPC의 무선전력전송 시스템 기술 문서 Ver 1.1에 기술되어 있는 기본 시스템 구성도이며 (b)는 SSPS 경우 우주에서 생성된 태양광 발전 에너지를 전자파를 이용해서 지구로 전달하는 전자파 방식에 대한 시스



<그림 1> 무선전력 전송 방식별 예시

템 구성을 나타낸다.

〈그림 2〉(b) 시스템에서는 마이크로파를 이용하여 전력을 무선으로 전송한다. 태양 전지판으로부터 받은 태양광 에너지를 전기 에너지로 변환한 이후 DC 전원을 마이크로파로 변환하고 이를 어레이 안테나와 빔포밍 기술을 이용하여 narrow beam을 형성한 후 송신하며, 이를 수신부의 Rectenna에서 다시 DC 전원으로 변환하는 구조를 가지고 있다<sup>[7-8]</sup>. 다른 무선 전력 전송 시스템도 〈그림 2〉에 기술된 시스템과 유사한 구조를 가지고 있다.

상기의 무선전력 전송 시스템을 구현하고 실생활에 활용하기 위하여 고려하여야 할 설계 요소들을 기술하면 〈표 2〉와 같다.

기술적으로는 고효율로 전력을 송신할 수 있는 송신기가 필요하며, 이를 공간에서 원하는 방향으로 보내기 위한 빔포밍 /포커싱 기술, 수신한 무선전력을 전원으로 변환해주는 고효율 수신부가 필요하다. 환경적으로는 고출력의 전력을 무선으로 송신하는 경우의 인체 유해성, EMI, EMC 문제 등에 대한 고려가 필요하다. 경제적으로는 시스템의 가격 및 이러한 무선 전력 전송 시스템을 설치, 유지 보수하기 위한 비용 등에 대한 고려가 필요하다.

본 원고에서는 〈표 2〉에서 기술한 무선전력 전송 시스템 설계 고려 요소 중 효율, 특히 송신기의 효율 측면에서 기술한다. 〈그림 2〉(b) 에서 기술된 무선전력 전송 시스템의 전체 전력 전송 효율은 송신기의 효율, 전력 결합 효율 (Power Combining Efficiency: PCE), 빔 효율과 수신기 측의 효율의 곱으로 표현된다. 각 부분의 효율을 표현하고, 현재 최대 달

〈표 2〉 무선전력 전송 시스템 구현을 위한 설계 이슈

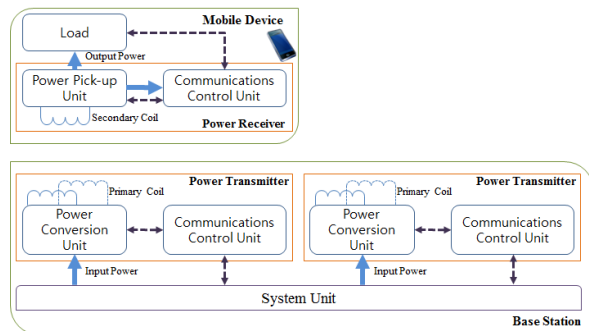


〈표 3〉 무선전력 전송 시스템의 효율

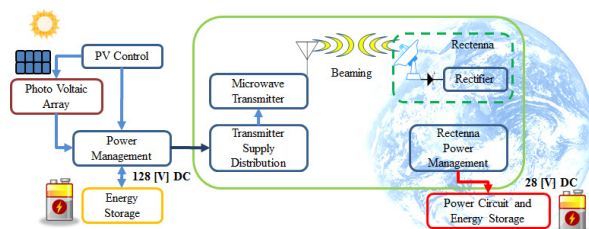
효율	설명	최대 효율 값
$\eta_T = \frac{P_{RF,Out}}{P_{DC,In}}$	송신기에서 DC-RF 변환 효율 $P_{RF,Out}$ : 송신기에서 RF 출력 전력 $P_{DC,In}$ : 송신기에 인가되는 DC 전력	70~80% [전력 및 주파수에 따라 상이함]
$\eta_{PCE}$	송신기에서 전력 결합기의 효율 (Power Combining Efficiency)	80~90% [결합기 특성에 따라 상이함]
$\eta_{Beam} = \frac{P_{RF,Rec}}{P_{RF,Trans}}$	송신단 안테나(코일)와 수신단 안테나(코일) 사이의 빔 효율 (공간에서 전송 손실을 포함) [빔포커싱시 far-field 최대 달성 경우]	80%
$\eta_R = \frac{P_{DC,Rectified}}{P_{RF,Rec}}$	수신기에서 RF-DC 변환 효율 수신단 Rectenna의 정류 효율	80%
$\eta_{PM} = \frac{P_{DC,Out}}{P_{DC,Rectified}}$	수신단에서 원하는 품질을 가지는 DC 신호 생성을 위한 DC-to-DC 변환 효율	85~95% [Rectenna의 수와 전력 등에 따라 상이]
$\eta_{Total}$	전체 시스템의 전력전송 효율 $\eta_{Total} = \eta_T \cdot \eta_{PCE} \cdot \eta_{Beam} \cdot \eta_R \cdot \eta_{PM}$	43.8%

성 가능한 부분별 효율들을 정리하면 〈표 3〉과 같다.

상기 기술한 각 시스템의 효율을 최대화 하는 것은 무선전력 전송 시스템의 성능, 경제성 등을 향상시키기 위한 핵심적인 요구 사항이다. 각 부분별 현재 기술로서 최대 달성 가능한 효율을 보면 송신기의 효율이 70~80%, PCE 효율이 80~90%, 빔 효율 80%, 수신부 정류 효율 80%, Rectenna Power Management 효율이 85~95% 가량이다. 전체 시스템의 무선전력 효율은 각 효율 값을 곱해서 구할 수 있다. 〈표 3〉에서 기술된 각 부분별 최대 달성 효율값을 곱하더라도 송신기의 전력원으로부터 최종 수신부의 전력까지 전력전달 효율은 43% 가량이다. 위의 경우는 전자기파 방식을 기준으로 한 경우이나 자기유도, 자기공명 방식의 경우도 유사한 방식으로 효율을 정의하고 시스템의 전체 효율을 계산할 수 있다. 무선전력 전송의 실용화를 위해서는 〈표 3〉에서 기술한 각 부분의 효율을 최대화할 수 있도록 지속적인 연구, 개발이 필요하다. 다음 장에서는 무선전력 시스템 중 송신기 부분에 대하여 살펴본다.



(a) WPC에서 자기유도 방식 시스템 구성도



(b) SSPS에서 전자기파 방식 시스템 구성도

〈그림 2〉 무선전력 시스템 구성 사례

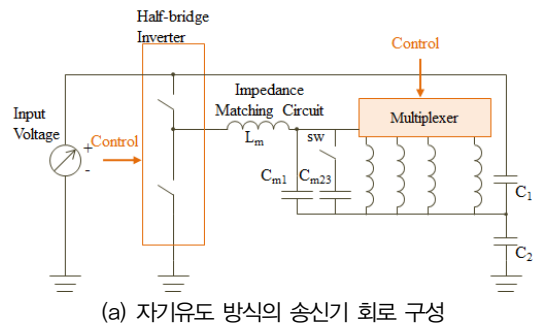
### Ⅲ. 무선전력 전송 송신기

#### 1. 무선전력 전송 송신기 구성

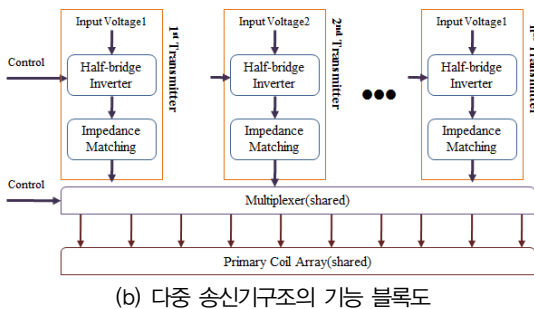
송신기의 주요 기능은 전력원의 전력을 RF 전력으로 효율

적으로 변환하여 일차측 코일이나 안테나로 보내는 것이다. 무선전력 전송 송신기 구성의 복잡도는 전력 용량이나 전송 방식, 사용처에 따라 달라진다. 무선전력 전송 송신기 구조 사례를 <그림 3>에 도시하였다.

<그림 3>에서 (a)는 WPC 기술표준에 나타난 전력 송신기의 회로의 하나로서 다중의 일차측 코일을 동시에 구동시키기 위한 전력 송신기 회로의 예이다. 인버터는 DC의 입력 신호를 AC의 파형으로 변환하여 코일과 커패시턴스로 구성된 공진회로를 구동시킨다. 인버터의 전력소자는 제어 신호에 따라 on/off 스위치로 동작한다. 제어신호의 동작 주파수 및 Duty에 의해서 AC 신호의 주파수 및 출력값 등이 결정된다. (b)에서는 (a)에서 도시한 송신기가 다수가 있으며, 이 다수의 송신기가 멀티플렉서 및 일차측 코일 어레이를 공유하는 경우의 송신기 기능 블록도를 도시한 것이다. <그림 3>의 송신기는 수백 kHz의 자기 유도 방식에 대한 표준 자료이다. 자기 공명 방식이나 수 GHz대역의 전자기파 방식 송신기의 경우에는 용어 및 구조에서 일부 차이가 있을 수 있지만, <그림 3>의 시스템과 유사한 송신기 구조를 가지고 있다. 높은 주파수를 가지는 자기공명 또는 전자기파 방식에서는 DC 전력을 RF 전력으로 변환하는 역할을 RF 전력증폭기에서 수행한다. 무선전력 전송 시스템에서 RF 전력증폭기의 기능은 <그림 3>의 인버터와 동일하다. IV장에서 기술할 스위치 모드 RF 전력증폭기의 구조 및 설계 방법은 전력전자 분야의 인버터와 대동소이하다. 효율을 포함한 송신기의 성능은 RF 전력증폭기(인버터)의 성능의 영향이 크다. 그리고 RF 전력증폭기(인버터)의 성능은 사용하는 전력소자에 의해서 결정된다.



(a) 자기유도 방식의 송신기 회로 구성



(b) 다중 송신기구조의 기능 블록도

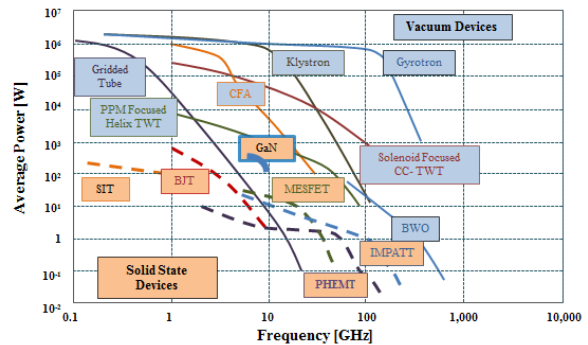
<그림 3> 무선전력 송신기 구축 사례

## 2. 무선전력 전송 송신기용 전력 소자

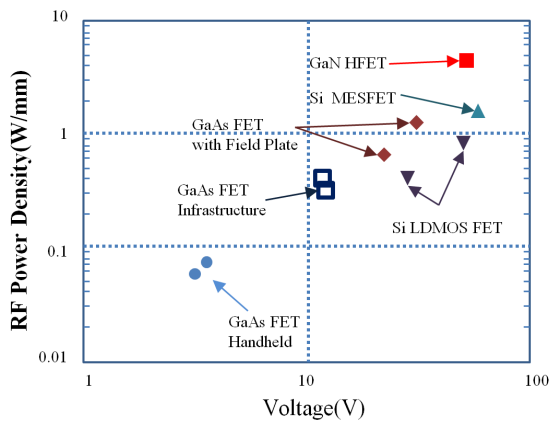
무선전력 전송용 전력소자로 Magnetron, Klystron 등의 진공관 소자 또는 고체상(Solid-State) 소자가 사용된다. <그림 4>에서는 진공관 및 고체상 소자별로 주파수별 허용 평균 전력을 도시하였다<sup>[9]</sup>.

진공관 소자는 높은 주파수 대역에서 높은 전압과 출력, 높은 효율을 낼 수 있는 소자이다. 고체상 소자의 경우 최근 발전한 반도체 기술을 이용하여 진공관 소자에 비하여 경제 적이며, 크기 및 무게도 훨씬 작아 시스템 구성에 용이하다. <그림 5>에서는 RF 전력증폭기에 사용되는 고체상 소자의 전압 및 전력 밀도 특성을 비교하였다.

자기유도 등의 낮은 주파수대역의 인버터의 전력소자로서는 MOSFET이 주로 활용되고 있다. 이동통신 기지국의 전력 증폭기용으로 LDMOS FET이 널리 사용되고 있다. GaAs 소자는 높은 주파수 특성을 가지므로 수GHz~수십GHz의 통신용 전력증폭기에 사용되고 있다. 최근 GaN 소자의 높은 항복 전압 특성 및 주파수 특성에 의하여 다양한 분야에서 쓰임새가 커지고 있다. 무선전력 전송에서도 GaN 소자의 활용이 증가하고 있다.



<그림 4> 진공관 및 고체상 소자의 전력, 주파수 특성

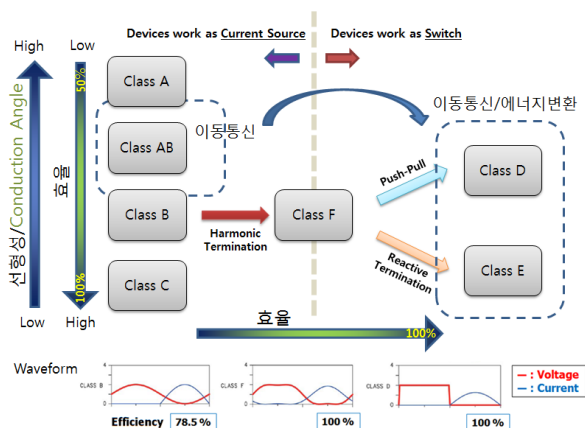


<그림 5> 고체상 소자의 전압, 전력 특성

### 3. 송신기 전력증폭기 설계기법

송신기 설계시 출력 전력, 주파수, 전력 효율, 신호 대 잡음 비, 고조파 잡음 등을 고려한다. 이 중 송신기의 효율 특성은 무선전력 전송 시스템의 전체 효율에 영향을 미칠 뿐 아니라 송신기부의 열처리 시스템의 크기 및 용량을 결정하는 중요한 요소이다. 송신기의 DC-to-RF 변환을 하는 전력증폭기의 드레인 효율은 공급되는 DC 전력 대비 출력되는 RF 전력의 비율로 결정된다. 송신기의 효율은 DC 전력을 RF 전력으로 변환하는 RF 전력증폭기의 효율에 의해 결정된다. RF 전력증폭기의 효율은 RF 전력증폭기에 사용되는 전력소자 및 설계 기법 (Class A, Class AB, Class B, Class C, Class D, Class E, Class F 등) 에 의해서 결정된다. <그림 6>에서는 전력증폭기를 Conduction angle 및 회로 설계 기법에 따라 Class를 분류하는 방식과 파형, 효율 특성을 비교 도시하였다.

이동통신시스템의 전력증폭기 경우는 통신신호의 선형성을 확보하기 위하여 주로 Class AB 급으로 설계된다. 스펙트럼 효율을 올리기 위해 만들어진 송신 신호는 높은 평균 대비 첨두 전력비를 가지므로, 전력증폭기의 최대출력지점에서 back-off 해서 사용하여 전력효율이 크게 저하된다. 반면 무선전력전송에서는 back-off 없이 최대 출력지점에서 동작시킬 수 있으며 이 경우는 Class B로 동작시킬 경우 최대 78%의 효율을 얻을 수 있다. 전력소자는 <그림 6>에서와 같이 Class와 입력신호의 크기에 따라 전류원 또는 스위치로 동작한다. 전력소자를 전류원으로 사용하는 경우 중 Class C로 사용하면 효율을 최대화할 수 있으나 이 경우에는 전력증폭기의 이득 및 선형 특성 등의 문제로 인하여 사용이 제한적이다. 최근에는 Class D,E,F 급의 스위치 모드로 동작시켜 전력증폭기의 효율을 향상시키기 위한 연구가 이동통신 분야에서 활발히 진행되고 있다. 스위치 모드의 경우에는 전력소자에 인가되는 전압 및 전류를 시간상 어긋나게 하여 전력소자에서 소모되는 전력값을 제거시켜 이론적으로 100%의 전력 효



<그림 6> 전력증폭기 Class 별 분류 및 특성

율을 달성하는 기법이다. 이러한 기법은 최근 무선전력 전송의 송신기 설계에 광범위하게 적용되고 있다.<sup>[11-21]</sup> 다음장에서는 Class D,E,F 스위치모드 RF 전력증폭기에 대하여 살펴본다.

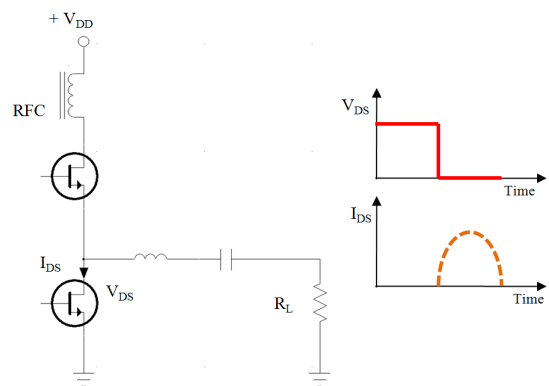
## IV. 스위치 모드 RF 전력증폭기

전력 증폭기의 효율 개선을 위한 기법 중 하나가 스위치 모드 전력 증폭기 (Switch-Mode Power Amplifier, SMPA)를 이용하는 방법이다. SMPA를 이용하면 트랜지스터에서의 전류와 전압값의 곱이 0이 되어 이론적으로 100 %의 효율을 얻을 수 있다.

### 1. Class D 전력증폭기

Class D 전력증폭기는 두 개 이상의 트랜지스터를 <그림 7>에서와 같이 스위치로 사용하여 구형파 형태의 드레인 전압 또는 전류를 생성한다. 전압, 전류의 파형에 따라 전압 모드 (Voltage-Mode Class D: VMCD), 전류 모드 Class D (Current-Mode Class D: CMCD) 전력증폭기로 구분 된다.

Class D 전력증폭기의 전류 전압의 위상 차이는 180° 이



(a) 전압모드 Class D 전력증폭기

(b) 전류모드 Class D 전력증폭기

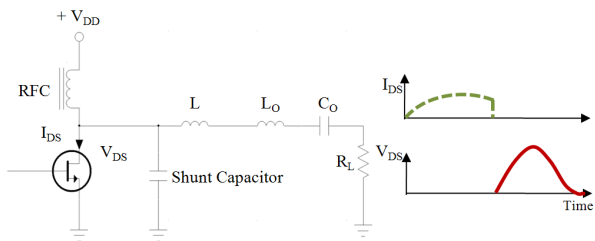
<그림 7> Class D 전력증폭기

며 두 스위치가 번갈아 가며 “On”, “Off”가 된다. CMCD 경우 드레인 단의 전압 파형에는 짝수차 고조파 성분들로 구성되어 있으며, 드레인 단의 전류 파형에는 홀수차 고조파 성분들로 구성되어 있다. 실제 Class D 전력증폭기 구성 시 전력 소자인 트랜지스터의 제한적 스위칭 속도 및 기생 커패시턴스의 영향으로 이론치인 100%의 효율을 얻을 수 없다. 특히 기생 성분은 동작 주파수가 높아짐에 따라 그 영향이 더욱 커져 두 트랜지스터가 모두 ‘On’ 또는 “Off”되는 현상을 초래하여 과도 전류 발생에 따른 선형성 감소 및 급격한 효율 저하를 초래한다. CMCD 전력 증폭기 구조에서 스위치로 동작하는 트랜지스터의 드레인-소스간 기생 커패시턴스인  $C_{DS}$  성분은 공진기와 병렬로 연결된다.  $C_{DS}$ 는 트랜지스터에서 손실을 유발하는 가장 치명적인 기생 성분이지만, CMCD의 회로 구조에 의해  $C_{DS}$ 는 신호 복원에 이용되는 대역 저지 필터의 일부 분으로 활용될 수 있어 VMCD에 비해 높은 주파수에서 동작하는 SMPA를 구현할 수 있다.

### 2. Class E 전력증폭기

1975년 Sokal에 의해 처음 제안된 Class E 전력증폭기는 Class D 전력증폭기와는 달리 단일 트랜지스터를 스위치로 사용한다. Class E 전력증폭기의 출력 단은 <그림 8>과 같이 병렬 커패시터, 직렬 공진기로 구성된다.

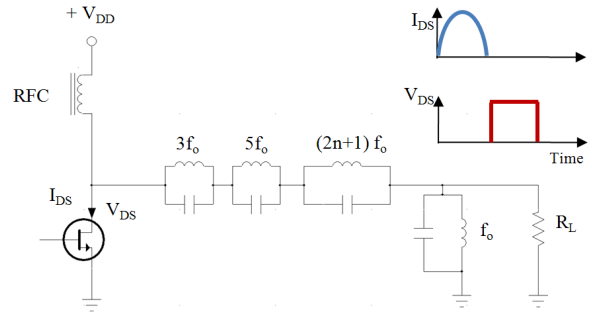
트랜지스터가 ‘On’ 이 되면 병렬 커패시터에 충전되는 전류는 없고, 트랜지스터가 ‘Off’되어 병렬 커패시터에 전류가 흘러 충전이 된다. 따라서 <그림 8>과 같이 스위칭 상태에서 전류나 전압 둘 중의 하나는 반드시 ‘zero’ 상태가 되어 이상적으로 100%의 효율을 달성 할 수 있다. Class E 전력증폭기는 다른 SMPA 전력증폭기에 비해 드레인-소스간의 기생 커패시턴스의 사용이 용이하며 회로 구성이 비교적 단순함과 동시에 고효율로 동작하는 장점을 가지고 있어, 무선전력용 전력 증폭기에 많이 사용되고 있다.<sup>[13-20]</sup>



<그림 8> Class E 전력증폭기

### 3. Class F 전력증폭기

Class F 전력증폭기의 출력 단은 <그림 9>의 회로와 같이



<그림 9> Class F 전력증폭기

고조파를 제어 할 수 있는 공진기(일반적으로 L/C 필터나 Stub 사용)를 추가로 사용하여 Class E 전력증폭기와 비슷한 성능을 보여준다. 구형파 형태의 전압 파형에는 홀수차 고조파 성분이 포함되어 있으며, 정현파 형태의 전류 파형에는 짝수 차 고조파 성분이 포함되어 있다. 역 Class F 전력증폭기의 경우 전압 전류 파형은 Class F 전력증폭기와 정반대의 파형의 형태를 가지고 있다. Class F 전력증폭기는 모든 고조파 성분을 제어할 수 없기 때문에 실제로 100%의 효율을 달성하기는 힘들다. 일반적으로 Class E 전력증폭기에 비해 높은 출력 전력을 구현 할 수 있다는 장점을 가지고 있지만 회로의 구성이 복잡하다는 단점이 있다.<sup>[10]</sup>

### 4. 현황 및 향후 연구

최근 무선 전력 전송용 증폭기로 Class D, E 전력증폭기가 많이 사용되고 있다. <표 4>에서 최근 무선전력 전송에 활용 가능한 스위치 모드 전력증폭기의 성능을 비교하였다.

<표 4>의 전력증폭기의 효율 성능은 주파수, 출력, 사용 소자 등에 따라 상이한 특성을 보여준다. 실제 스위치 모드 전력증폭기를 구현하였을시, 현재 RF/마이크로파 대역에서 달성 가능한 효율은 80% 가량으로서 Class B급의 전력증폭기 효율특성과 유사하다. 앞서 기술하였듯이 스위치 모드의 경우는 이론적으로 100%이나 실제 구현시에 효율이 낮아지는

<표 4> 최근 무선전력 전송용 SMPA 특성 비교

저자[참고논문]	Class	주파수 (MHz)	전력증폭기 효율 (%)	전력증폭기 출력파워 (W)
J. Garnica [11]	D	0.5085	76	40
M. C. Seo [12]	D	13.56	84.6	27.7
Z. N. Low [13]	E	0.134	75.7	295
J. J. Casanova[14]	E	0.24	95	5.6
G. B. Hmida [15]	E	13.56	90.4	0.134
J. W. Choi[16]	E	13.56	80	10
W. Chen[17]	E	13.56	93.6	26.8
J. B. Jeon[18]	E	13.56	84.2	323.6
A. N. Laskovski[19]	E	27	80	0.013
S. K. Kim[20]	E	915	55.9	19.9
S. M. Kim[21]	F	1.9	92	130

것은 고주파 대역에서 발생하는 소자내의 기생성분에 의하여 이상적인 스위치로 동작하지 않아서 발생하는 손실 때문이다. 향후 무선전력용 고효율 송신기 개발을 위해서는 낮은 Ron 값과 빠른 스위칭 속도를 가지는 전력소자의 연구/개발, 기생성분을 고려한 전력소자의 정확한 특성 모델링 기법 연구, 기생성분을 고려한 향상된 SMPA 설계 기법 연구, 고효율 전력 결합 기법 연구, 빔포밍을 위한 송신기에서 정밀 위상 제어 기법 연구, 가변 임피던스 매칭 및 고조파 제어 기법 연구 등이 필요하다.

## V. 결론

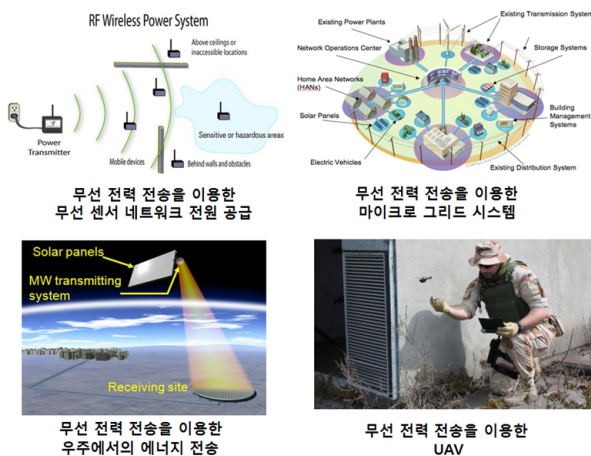
전력을 무선으로 공급하는 무선전력 전송에 대한 요구가 증대하고 있으며, 관련 연구가 활발히 수행되고 있다. 무선전력 전송은 현재 실용화되고 있는 자기유도방식 뿐만 아니라 향후 자기공명 방식, 전자기파 기반 방식 등을 포함하며 <그림 10>에서와 같이 다양한 응용분야를 만들어 나갈 것으로 예상된다. 무선전력 전송이 실생활에 광범위하게 사용되기 위해서는 극복해야 할 다양한 문제점들이 있지만, 20세기말의 무선통신 분야의 기술 발전이 현대인의 생활을 혁신적으로 변화시킨 바와 같이 21세기초의 무선전력 전송 분야의 기술 발전은 향후 인간 생활의 다양한 측면에서 큰 변화를 가져올 것이다.

본 원고에서는 무선전력 전송 시스템을 살펴보고, 무선전력 전송을 위한 송신기에 대하여 살펴보았다. 무선전력 전송의 실용화를 위해 전력 전송 효율의 극대화가 필요함을 언급하고, 이러한 송신기 동향 및 설계 기법에 대하여 살펴본 후, 향후 무선 전력 전송 송신기 구현을 위해 필요한 연구들에 대하여 기술하였다. 무선전력 전송의 실용화를 앞당기기 위해서는 고효율 무선 전력 전송용 송신기 분야에서 RF용 전력

소자 개발 및 고효율 회로 설계 기법 등에 대한 지속적인 연구 개발이 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- [1] W.C. Brown, "The history of power transmission by radio waves," IEEE Trans. Microwave Theory and Techn., Vol.32, No.9, pp.1230-1242, Sep., 1984.
- [2] W. C. Brown, "The history of wireless power transmission," Solar Energy, Vol.56, No.1, pp3-21, 1996.
- [3] J. Lin, "From far-field wireless power transmission to near-field wireless charging," IMS2010 Workshop WFB: Wireless power transmission, June, 2010.
- [4] 장병준, "근거리 무선 전력 전송 기술의 재고," 전자파 기술, 23권 2호 2012년 3월, pp.15~20.
- [5] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljagic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," Science, Vol.317, No.6, pp.83-86 July, 2007.
- [6] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljagic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics, 323 pp34-48, 2008.
- [7] J. McSpadden and J. Mankins, "Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology," IEEE Microwave Magazine, pp.46~57, Dec., 2002.
- [8] Z. Popovic, D Beckett, S. Anderson, D Mann, S Walker, S. Fried, Lunar Wireless power transfer feasibility study, DOE/NV/25946-488([http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti\\_id=934452](http://www.osti.gov/bridge/product.biblio.jsp?osti_id=934452))
- [9] V. L. Granatstein, R. K. Parker, C M. Armstrong, "Vacuum Electronics at the Dawn of the Twenty-First Century," Proceedings of the IEEE, Vol.87. No.5 pp.702-716, May, 1999.
- [10] F. H. Raab, "Maximum Efficiency and Output of Class-F Power Amplifier," IEEE Trans. MTT-S, Vol.49, No.6, pp.1162-1166, June, 2001.
- [11] J. Garnica, J. Casanova, and J. Lin, "High Efficiency Midrange Wireless Power Transfer System" IEEE MTT-S International, pp.73-76, May, 2011.
- [12] 서민철, 정인오, 이취섭, 양영구, "Transmission - Line Transformer와 Harmonic Filter를 이용한 13.56MHz 고효율 전류 모드 D급 전력증폭기 설계," 한국전자파 학회논문지, 23(5), pp.624-631, 2012년 5월.
- [13] 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. Industrial Electronics, Vol.56, No.5, pp.1801-1812, May, 2009.



<그림 10> 무선전력 시스템의 향후 활용 분야

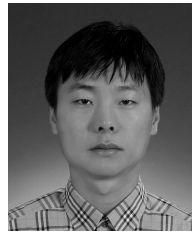
- [14] J. J. Casanova, Z. N. Low, and J. Lin, "Design and Optimization of a Class-E Amplifier for a Loosely Coupled Planar Wireless Power System," IEEE Trans. Circuit and Systems, Vol.56, No.11, pp.830-834, Nov., 2009.
- [15] G. B. Hmida, H. Ghariani, and M. Samet, " Design of Wireless Power and Data Transmission Circuits for Implantable Biomicrosystem," Biotechnology, Vol.6, No.2, pp.153-164. 2007.
- [16] J. W. Choi, and C. H. Seo, "Wireless Energy Transmission High-Efficiency DC-AC Converter Using High-Gain High-Efficiency Two-Stage Class-E Power Amplifier," Journal of the Korea Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol.11, No.3, pp.161-165. Sep., 2011.
- [17] W. Chen, R. A. Chinga, S. Yoshida, J. Lin, C. Chen, and W. Lo, "A 25.6W 13.56MHz Wireless Power Transfer System with a 94% Efficiency GaN Class-E Power Amplifier," IEEE MTT-S, pp.1-3, June, 2012.
- [18] 전정배, 서민철, 김형철, 김민수, 정인오, 최진성, 양영구, "13.56MHz, 300Watt 고효율 Class E 전력 송신기 설계," 한국전자파학회논문지, 22(8), pp.805-808, 2011년 8월.
- [19] A. N. Laskovski, and M. R. Yuce, "Class-E Oscillators as Wireless Power Transmitters for Biomedical Implants," Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies, pp.1-5. Nov., 2010.
- [20] 김상규, 박희정, 임세미, 정원재, 김형석, 박준석, "RF 무선전력전송용 전력증폭기 설계," 정보통신설비 학술대회, pp.57-60, 2011년 8월.
- [21] S. M. Kim, I. K. Cho, J. I. Moon, J. H. Yoon, W. J. Byun, and J. I. Choi, "1.9MHz Wireless Power Transmission system using Coupled Magnetic Resonance," Macrowave Radar and Wireless Communications, Vol.2, pp.519-522, May, 2012.

**강 원 실**

2008년 2월 건국대학교 전자공학과 (공학사)  
 2009년 9월~현재 건국대학교 전자공학과(공학석사)  
 통합 과정)  
 <관심분야> Digital RF, 비선형 시스템 해석 및 선형화,  
 원격 계측 시스템

**임 증 군**

2009년 2월 서울대학 정보전자전공 및 학점은행 (공학사).  
 2011년 2월 건국대학교 전자공학과 (공학석사).  
 2011년 3월~현재 건국대학교 전자공학과 (공학박사과정).  
 <관심분야> 무선 통신 시스템, RF 전력증폭기, Digital RF

**박 희 수**

2012년 2월 건국대학교 컴퓨터공학과 (공학사).  
 2012년 3월~현재 건국대학교 전자공학과 (공학석사과정).  
 <관심분야> 무선 전력 전송, 무선 통신 시스템

**구 현 철**

1995년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 (공학사).  
 1997년 2월 서울대학교 공과대학 전기공학과 (공학석사).  
 2003년 12월 Dept. ECE, Georgia Institute of Technology,  
 Atlanta, USA (공학박사).  
 1997년 2월~1999년 7월 KT 연구개발본부 전임연구원.  
 2004년 1월~2005년 2월 삼성전자 무선사업부 책임연구원.  
 2005년 3월~현재 건국대학교 전자공학부 부교수.  
 <관심분야> RF 전력증폭기, Digital RF, 비선형 시스템  
 해석 및 선형화, CR/SDR, 무선전력 전송 등