

에너지전송의 패러다임 전환- 무선전력전송 기술

구 현 철

건국대학교

I. 서 론

우리 주변에는 스마트폰, 텔레비전, 컴퓨터, 조명기기, 공기청정기, 냉장고 등 다양한 전기·전자기기가 있으며, 우리는 이러한 기기들을 사용하며 일상을 살아간다. 모든 물체가 일을 하기 위해서 에너지가 필요하듯이 우리가 사용하는 전기·전자 제품들도 각각의 역할을 하기 위해서 전기에너지를 필요로 한다. 발전소에서 수력, 화력, 원자력 등의 다른 에너지로부터 생성된 전기에너지는 계통망에서 전선을 통하여 각 수요처에 전달되며, 콘센트에 플러그를 연결하여 각 전자제품에 공급된다. 위치가 고정된 냉장고의 경우는 유선으로 벽면 콘센트에 연결해서 전기에너지를 공급받는 것이 크게 불편하지 않다. 하지만 스마트폰과 같은 휴대용 기기는 미리 유선으로 충전한 배터리를 사용하지만, 제한된 배터리 용량 때문에 충전할 곳을 찾아 헤매거나, 보조배터리를 들고 다니는 불편함이 있다. 만약 스마트폰 배터리 충전을 무선으로 어디서나 쉽게할 수 있으면 충전할 곳을 찾아 헤매거나 보조배터리를 몇 개씩 들고 다닐 필요가 없을 것이다.

무선으로 전력을 보내는 것은 현대계의 이러한 응용뿐 아니라, 향후 다양한 분야에서 그 활용성이 크다. 5G, IoT (Internet of Things)와 같은 정보통신기술의 발전에 따라 우리의 일상에 사용되는 다양한 기기들이 전파를 통하여 서로 연결되는 초연결사회로 진화하고 있다. 향후 초연결된 기기의 수가 기하급수적으로 증가하게 될 것이며, 이러한 기기들에 유선으로 전원을 공급하는 것은 매우 비효율적이다. 무선전력전송은 초연결사회의 IoT 기기에 에너지를 전송하는 효율적인 방안이 될 것이다. 자율주행차의 경우도 전력을 무선으로 공급한다면 완전한 자율주행시스템을 구축할 수 있게 된다. 의료기술의 발전에 따라 인공심장박동기, 뇌심부자극기, 인공망막 등 다양한 인체삽입형 의료기기가 증가하고 있다. 인공심장박동기의 경우, 체내기기의 배터리 수

명에 따라 교체를 위한 수술이 필요한데, 무선전력전송을 이용하면 이러한 불필요한 수술을 없앨 수 있다. 이와 같이 무선전력전송 기술은 앞으로 다가올 초연결 사회의 IoT 기기, 전기차, 의료용기기 등 다양한 분야의 에너지전송의 패러다임을 전환시킬 수 있는 파급력이 큰 기술이다.

본 논문에서는 이와 같은 무선전력전송의 개요, 역사, 현황, 기본 원리 및 극복해야할 기술적 문제들에 대해 소개하고자 한다. 2장에서 무선전력전송 기술의 개요와 역사에 대하여 살펴보고, 3장에서는 현재 무선전력전송의 표준화 및 기술동향에 대해 소개한다. 4장에서는 무선전력전송에서 해결해야 할 주요 기술적인 사항에 대해 살펴보고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 무선전력전송 역사 및 개요

무선전력전송은 전기에너지를 한 지점에서 다른 지점으로 전기장, 자기장, 전파, 초음파, 레이저 등으로 전선을 이용하지 않고 전송하는 기술이다. 무선전력전송을 처음 주장한 사람은 20세기 초의 테슬라(Tesla)이다^[1]. 테슬라가 1906년에 쓴 글에 “선 없이 전력을 보내는 기술은 기존에 없던 혁신적 세상을 만들어 낼 것이다”라고 쓰고 있다. [그림 1]과 같이 테슬라 타워를 세우고 주변에 무선으로 전력을 전송하



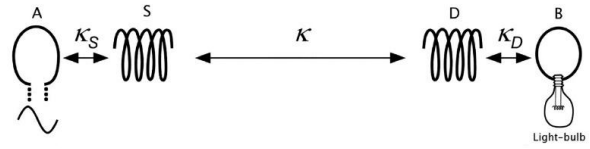
POWER TOWER: In the early 20th century, Nikola Tesla planned to use this immense tower to send power wirelessly. PHOTO TESLA WARDENCLIFF PROJECT

[그림 1] 20세기 초 테슬라 전송 타워와 실험실

고자 하였다^[2]. 그러나 테슬라의 시도는 기술적 어려움과 재정적 문제로 인해 계속되지는 못하였다.

이후 20세기 전반에 세계대전과 1960~1970년대 미소냉전시대의 우주개발을 거치며 전파 관련 기술들이 발전하게 되면서 20세기 후반에 [그림 2]와 같이 마이크로파를 이용한 무선전력전송에 대한 연구개발들이 행하여졌다^[3]. [그림 2]에서는 마이크로파를 이용하여 무인헬리콥터에 전력을 공급하거나, 수 km 및 떨어진 지점에 높은 전력을 전송하는 실험의 예를 보여준다.

20세기에 무선전력전송은 기술적 난이도, 고비용 등의 어려움 때문에 주로 군사용, 우주개발용으로 연구되어졌다. 21세기에 무선전력전송 분야가 새로이 각광을 받게 된 계기는 2007년 미국 MIT에서 제안한 자기공진형 무선전력전송 때문이다^[4]. 기존의 자기유도방식은 1 cm 이하의 짧은 거리에 대해 낮은 전력전송만 가능하였는데, 공진결합을 통해 [그림 3]과 같이 2 m 거리에 60 W급 전력을 무선으로 전송함으로써 무선전력전송에 대한 연구를 다시 활성화시키는

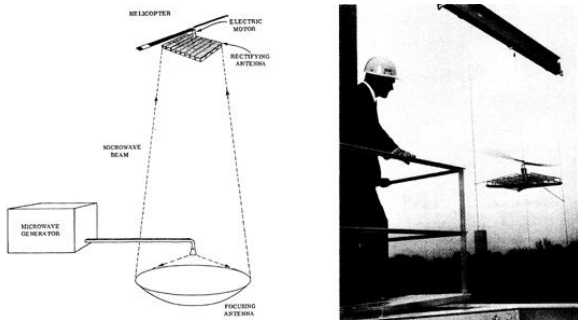


[그림 3] 2007년 MIT 자기공명 무선전력전송 개념도 및 연구자들^{[4],[5]}

계기가 되었다.

이후 현재까지 다양한 자기공진기법을 적용하는 제품에 대한 연구가 진행되고 있다. KAIST OLEV, 한국전자통신연구원(ETRI) E-cup 등은 자기공진기법을 이용한 대표적인 사례로서 국내의 연구기관들이 선도적으로 연구 성과를 이룬 결과들이다^{[6],[7]}. 무선전력전송에 대한 관심으로 최근에는 RF 기술의 발달과 함께 배열안테나를 통하여 RF 전력전송 효율을 향상시키는 제품들도 나오고 있다. WiTricity, Powercast, Ossia 등 많은 무선전력전송 기업이 생겨났고, [그림 4]에서와 같이 자기공진기법을 이용한 전기차 충전장치와 배열안테나를 통한 RF 무선전력전송을 통한 휴대폰 충전 제품 등을 선보이고 있다.

무선전력전송의 장점은 전원선을 제거함으로써 사용자 편의성 증대, 배터리를 소형화/제거함으로써 제품의 디자인과 제작을 용이하게 하고 제품의 전기접점을 제거함으로써 제품의 내구성 증대(방수, 방진 개선), 체내 이식형 센서 등에 적용시 배터리 교체 문제 제거, Charging on demand로 효율적이고 유연한 전원 관리 등이 있으며, 극복해야 할 점은 높은 제조비용, 유선에 비해 낮은 효율, 인체에 끼치는 영향, EMI/EMC 문제점들이다.



First Ground-to-Ground MPT Experiment in 1975 at the Venus Site of JPL Goldstone Facility

[그림 2] 20세기 후반의 무선전력전송 실험^[3]



Park and charge wirelessly and autonomously.



[그림 4] 최근 무선전력전송 기술 적용 제품(자기공진법을 이용한 전기차무선충전장치^[8]와 RF를 이용한 스마트폰 충전장치^[9])

현재까지 개발된 무선전력전송 기술을 분류해 보면 거리에 따라 원거리전송과 근거리전송으로 분류되며, 전송방식에 따라서는 전파나 레이저 등을 통한 방사형(Radiative) 방식과 자기장의 결합을 이용하는 유도형(Inductive) 방식으로 나뉘어진다. 유도형 방식은 일반적인 유도방식과 2007년 MIT 연구를 기반으로 공진특성을 이용하여 기존 유도방식에 비해 비교적 먼 거리에서 전력전송 효율을 높인 자기공진형 방식으로 나눌 수 있다. 대표적인 세 가지 무선전력전송 방식을 <표 1>에 비교하였다. 각 기법별 기본원리에 대해서는 다음 3장에서 설명한다.

현재 활발히 연구되고 있는 무선전력전송 기술에 대해 세계적 표준화가 이루어지고 있으며, 대표적인 표준화 단체는 Wireless Power Consortium(WPC)과 AirFuel Alliance이다^{[10],[11]}. WPC에서는 유도형 충전방식에 대해 Qi(Chee) 표준을 제정하고 있다. AirFuel Alliance는 기존의 Alliance for Wireless Power(A4WP)와 Power Matters Alliance(PMA)가 합쳐진 조직으로 유도형 방식과 자기공진형 방식에 대해 표준을 정립하고 있으며, 최근에는 RF 신호를 이용한 방사형 방

<표 1> 무선전력전송 기법 비교

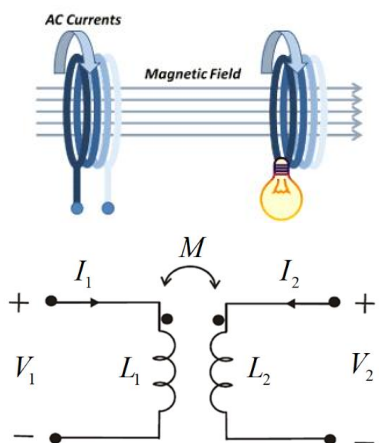
	자기유도방식	자기공진방식	RF전송방식
방식	자기장	자기장 (협대역공진)	전자기파
전송거리	매우짧음(~cm)	짧음(~m)	중장거리(~km)
효율	높음	중간	낮음
동작주파수	LF대역(~kHz)	HF대역 (6.78, 13.56 MHz)	RF신호 (2.4GHz, 5.8GHz 등)
장점	높은 효율	자기유도방식대비 거리 확장	장거리전송
단점	매우짧은 전송거리 오정렬시 효율 급감	시스템 민감성 오정렬시 효율 급감	매우 낮은 효율

식에 대한 표준 정립도 시도하고 있다. AirFuel의 기술분과(TSC)에는 자기공진위원회(Magnetic Resonant Working Committee), 비결합위원회(Uncoupled Working Committee), 인프라스트럭처위원회(Infrastructure Working Committee), 규제위원회(Regulatory Working Committee)를 두고, 각각 자기공진형 방식, 방사형 방식, 네트워크 및 통신 방식, EMI/EMC에 대해 연구하고 있다.

Ⅲ. 무선전력전송 기술 분석

본 장에서는 앞에서 기술한 무선전력전송 기술 중 자기장 결합을 이용하는 방식과 RF를 이용한 방식의 기본적인 원리와 무선전력전송 시스템의 구성 및 기술적 문제점에 대해 살펴본다. 우선 자기장결합 기반으로 전력을 전송하는 기법은 [그림 5]와 같이 송신 코일과 수신 코일간의 상호 인덕턴스에 의한 자기장 결합으로 전력이 전송된다. 송신측 1차 코일에서 암페어(Ampere) 법칙에 의해 교류전류에 의해 자기장이 공간에 발생되며, 시간에 따라 변하는 자기장은 2차측 수신 코일에 패러데이(Faraday) 법칙에 의해 기전력을 발생시키고, 2차측 코일에 발생된 기전력은 수신부에 연결된 부하에 전력을 전달하게 된다^[12]. 이를 전기회로를 통해서 도시하면 [그림 5]와 같다.

상호인덕턴스 M 은 코일의 형상, 코일의 상대적 위치에 의해서 결정되는 값으로 자기장결합 기법 무선전력전송 효율을 결정하는 가장 중요한 인자이다. 자기공진형 결합 기법은 [그림 5]의 기본적인 자기결합 회로에 공진회로를 추가하여 특정주파수 신호에서만 높은 자기장이 발생하며, 임



[그림 5] 자기결합 방식의 무선전력전송과 그 등가회로

계결합이 되는 거리지점보다 두 개의 코일간의 거리가 가까운 경우에는 과결합이 발생하여 임계결합이 되는 위치에서 공진주파수에 대해 효율이 최대가 되게 하는 기법이다. 특정주파수에 대해 공진이 발생하기 위해 커패시터를 이용하여 코일의 인덕턴스와 LC 공진을 발생시키는데, 직렬공진의 경우 그 등가회로는 [그림 6]과 같이 도식할 수 있다.

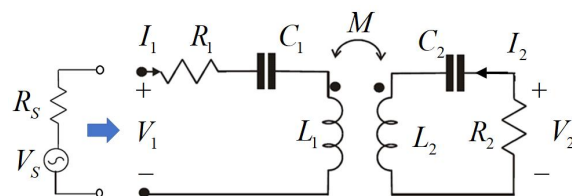
[그림 6]의 회로를 키르히호프의 법칙으로 분석하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= [R_1 + j\omega L_1 + 1/(j\omega C_1)]I_1 + j\omega MI_2 \\ 0 &= j\omega MI_1 + [R_2 + j\omega L_2 + 1/(j\omega C_2)]I_2 \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)로부터 공진 각주파수 ω_0 에서 R_1 에서 소비되는 전력 P_1 과 R_2 에서 소비되는 전력 P_2 의 비는 결합계수 k 와 품질계수 Q 를 이용하여 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{P_1} &= k^2 Q_1 Q_2 \quad \text{여기서,} \\ k &= \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad Q_j = \frac{\omega_0 L_j}{R_j} \quad (j=1,2) \end{aligned} \quad (2)$$

[그림 6]에서와 같이 1차 측에 저항 R_s 와 전압 V_s 의 전압원을 연결하고, 2차 측에는 부하저항 R_L 이 직렬로 연결되는



[그림 6] 자기공진 무선전력전송 기법 등가회로

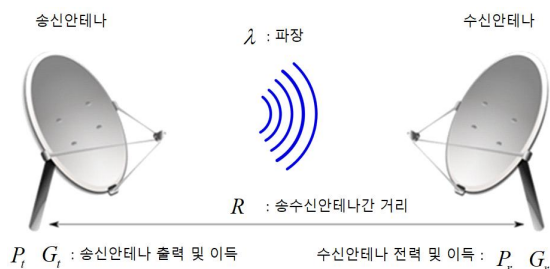
경우 전압원에서 생성되는 전력(P_s)과 부하저항에서 소비되는 전력(P_L)의 비(η)는 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{P_L}{P_s} = k^2 Q_{1e} Q_{2e} \left(\frac{R_s}{R_s + R_1} \right) \left(\frac{R_L}{R_L + R_2} \right) \quad \text{여기서,} \\ Q_{1e} &= \frac{\omega_0 L_1}{R_s + R_1}, \quad Q_{2e} = \frac{\omega_0 L_2}{R_L + R_2} \end{aligned} \quad (3)$$

자기공진결합 기법에는 구동 루프와 부하 루프를 가지는 구조, 병렬 공진을 가지는 구조, 다중송신코일, 다중수신코일, 중계코일을 가진 구조 등 다양한 구조가 있으며, 다양한 구조에 대해서도 유사한 방식으로 전력전송 전력 및 효율을 유도할 수 있다.

전파를 이용한 방사형 무선전력전송 기법은 [그림 7]과 같다. 송신안테나로부터 전달된 전력이 수신안테나에서 수신되는 값은 Friis의 전송식으로 표현된다^[13]. 수신전력은 두 개의 안테나 사이의 거리의 제곱에 반비례하고, 송신전력, 송신안테나 이득, 유효 안테나 애퍼처(A_e)에 비례한다.

$$P_r = \frac{P_t}{4\pi R^2} G_t A_e \quad \text{여기서,} \quad A_e = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_r \quad (4)$$



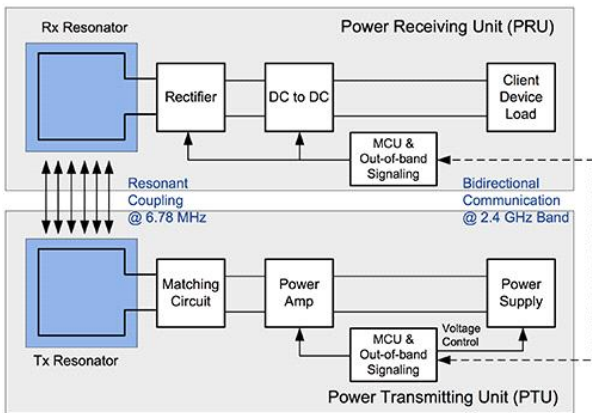
[그림 7] RF 방식 무선전력전송 개념도

A_e 는 수신안테나의 이득에 비례하고 파장의 제곱에 비례하므로 송신안테나출력대비 수신안테나의 전력 값의 비(η_{tr})는 다음과 같다.

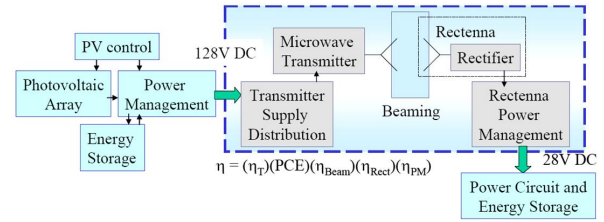
$$\eta_{tr} = \frac{P_r}{P_t} = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (5)$$

자기결합 기법, RF 기법 설계 시 주요 이슈는 식 (3)~(5)에서 표현된 수신 전력의 값 및 송신 전력 대비 수신 전력으로 표현되는 전력전송 효율 값을 어떻게 극대화시켜줄 것인가이다. 송신신호를 효율적으로 생성하여 송신코일/안테나에 보내고, 수신부 코일/안테나에서 수신한 전력을 최종 부하에 효과적으로 전달하기 위한 송수신 시스템을 설계하여야 한다. 자기공진형 무선전력전송, 전파기반 방사형 무선전력전송 시스템 블록도 예시를 [그림 8], [그림 9]에 각각 도시하였다. [그림 8]은 AirFuel Alliance에서 제시하는 자기공진형 기법의 시스템 블록도이며^[11], [그림 9]는 우주에서 태양광에너지를 기반으로 생성된 DC 전력을 이용하여 마이크로파를 생성하여 무선으로 에너지를 전송하는 시스템 블록도를 나타낸다^{[14],[15]}.

[그림 8], [그림 9]에서와 같이 무선전력전송 시스템은 송신기와 수신기로 구성되며, 송신기는 DC 전원을 공급하는 전원공급부와 DC 전원을 전력으로 공급받아 AC 또는 RF 신호를 증폭하는 전력증폭기부, 매칭회로부와 송신코일/안테나로 구성되며, 수신기는 수신코일/안테나와 수신 AC 또는 RF 신호를 정류해 주는 정류기부, 정류된 DC 신호를 원하는



[그림 8] 자기공진 무선전력전송 기법 시스템 구성도^[11]



[그림 9] RF 기반 무선전력전송 기법 시스템 구성도^{[14],[15]}

DC 값으로 변환해 주는 DC/DC 변환부 및 부하로 구성된다. 무선전력전송 시스템의 경우, 전체적인 효율은 송신기의 전원공급부에서 공급하는 전력대비 수신부 부하에서 소비하는 전력의 비율로 정의될 수 있는데, 이 경우 전체 효율은 시스템 각 부분들의 효율의 곱으로 표시된다. RF 기반 전력전송의 경우 송신기의 RF 전력증폭기의 효율을 η_{PA} , 정류기의 변환효율을 η_{REC} , 부하에 전력을 공급하기 위한 DC/DC 변환기의 효율을 $\eta_{DC/DC}$ 라고 하면, 무선전력전송 시스템의 전체 효율은 식 (5)의 효율 η_{tr} 과 각 시스템 블록의 효율의 곱으로 표시된다. 송신기의 전력증폭기 수신기 정류기, DC/DC 변환부 각각을 효율적으로 설계하여 각각 90%의 효율을 얻었다고 하더라도 이 경우 전체적인 효율은 0.72 η_{tr} 이 된다. 각 효율의 누적곱으로 결정되므로 무선전력전송의 상용화를 위해 각 부분의 효율을 극대화시켜주는 것이 필요하다.

IV. 무선전력전송 주요 이슈

20세기 초 테슬라는 곧 무선전력전송 기술이 세계를 바꿀 것이라고 말했지만, 그로부터 100년이 넘게 지난 지금에도 기대에 비해 느리게 진행되고 있는 것은 극복해야 할 주요 문제점이 있기 때문이다. 대표적인 문제는 낮은 전력전송 효율이며, 자기공진기법에서의 위치의 자유도 문제, 다중 디바이스 충전 문제 등이 있다. 이와 같은 사항들을 고려하여, 무선전력전송 분야가 성공하기 위해서 해결되어야 할 문제점들을 <표 2>에 정리하였다.

자기장결합 방식의 경우는 RF 전송방식에 비해 높은 효율을 가졌지만, 코일의 오정렬시에 효율이 급감하게 된다. [그림 10]은 자기공진 방식 무선전력전송의 예시로서 전력전송시 선을 없앴지만, 송수신코일간의 정렬을 필요로 하여

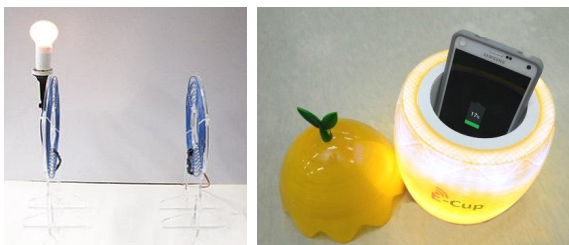
<표 2> 무선전력전송 주요 이슈

	자기장 결합 방식	RF전송방식
극복할 사항	시스템 민감성 오정렬시 효율 급감	매우 낮은 효율
주요 기술 이슈	위치 자유도 향상 기법 다중 기기 충전 기법	빔포밍을 통한 효율 향상 기법
		전력증폭기 효율 향상기법 정류기 효율 향상기법 무선전력전송 네트워크 구축 기법
환경적 이슈	인체영향 및 전파환경 분석	
경제적 이슈	시스템 및 구축 비용의 절감 방안	

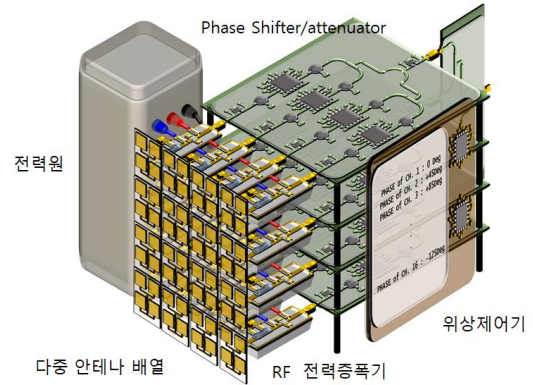
수신기의 위치자유도가 크게 떨어진다.

수신기의 위치자유도를 향상시키기 위해서는 다중코일을 가진 송신시스템을 구축하고, 각 코일의 교류신호를 제어하여 3차원 공간에 형성되는 자기장을 원하는 형태로 만들어주는 기술이 필요하다. 한국전자통신연구원(ETRI)에서 개발한 E-cup은 자기공진방식의 이러한 문제점을 다중코일로 해결한 결과이다^[7]. 자기결합 기법의 또 다른 단점은 [그림 10]에서와 같이 하나의 제품에 대해서만 전력을 효율적으로 전송할 수 있다는 것인데, 여러개의 제품을 동시에 무선으로 충전하는 것이 필요하다. 다중송신코일과 다중수신코일을 가지는 MIMO 시스템에서 3차원 자기장 형성 기술과 분할송신 기법 등을 이용하여 다중 무선전력전송을 하는 기법 등이 연구되어지고 있다^{[16],[17]}.

반면 전방향으로 신호가 나가는 RF 방식은 낮은 효율을 극복하는 문제가 우선 해결되어야 한다. 이를 극복하기 위해서는 식 (4)에서 송·수신 안테나의 이득을 향상시켜야 한다. 안테나 이득을 올려주면서 수신기의 위치자유도를 동시에 달성하기 위해서는 좁은 빔폭을 가진 신호를 안테나에서 발생시키며, 수신기의 위치에 따라 빔을 변경해 주는 빔포밍 기술이 필요하다^{[18],[19]}. 빔포밍을 위한 송신기는 [그림



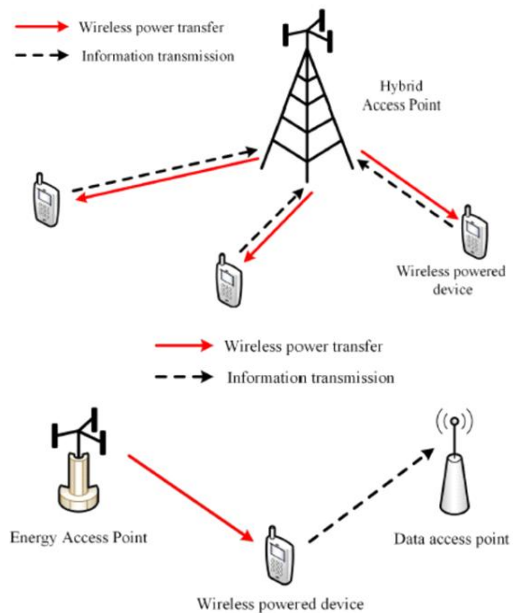
[그림 10] 자기장결합 방식에서 송수신 정렬 위치 자유도 문제



[그림 11] RF 방식에서의 빔포밍을 위한 송신기

11]과 같이 다중 안테나 및 RF 전력증폭기의 배열로 구성되며, 각 다중 송신채널의 신호의 크기와 위상을 제어하기 위해 위상제어기와 감쇠기 등을 가진다. 송신기에서 무선전력 수신기의 위치를 인식하고, 이를 기반으로 각 안테나의 위상을 제어하는 과정이 필요하다.

무선전력전송 시스템의 위치자유도, 효율이 점점 향상됨에 따라 많은 연구가 진행되어야 하는 부분은 무선전력전송 네트워크에 관한 부분이다. 무선전력전송이 향후 활용될 부분중 유망한 분야는 IoT 분야이다. 이 경우, 초연결된 IoT 기



[그림 12] 무선전력전송과 정보전송 네트워크 구축 예시^[20]

기들간의 통신 기능을 바탕으로 각 기기가 가지고 있는 에너지를 파악하고, 효율적으로 전송할 수 있는 기법 등에 대한 연구가 필요하다. [그림 12]와 같이 하이브리드 AP(Access Point)에서 전력과 정보를 동시에 보낼 수도 있으며, 에너지 AP와 데이터 AP를 따로 둘 수도 있다^[20]. 에너지와 데이터를 모두 고려하는 네트워크는 데이터만 고려한 네트워크에 비해 훨씬 복잡할 것이다.

V. 결 론

110여 년 전 천체과학자 테슬라의 ‘무선전력전송 기술이 곧 세계를 혁신적으로 바꿀 것이다’는 예측은 아직 달성되지 않았으며, 여전히 현재 진행형이다. 무선전력전송에서 전송 효율과 수신기 위치 자유도 문제는 상호 대립되는 해결하기 까다로운 문제이다. 하지만 기존의 에너지전송의 패러다임을 전환시킬 무선전력전송 기술은 전파기술의 발전에 따라 앞으로 빠르게 발전해 나갈 것이며, 다가올 초연결사회, 자율주행차, 발전된 의료기기, 우주개발을 한 단계 향상시키는 핵심 기술이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Zhang, R. G. Maunder, and L. Hanzo, "Wireless information and power transfer: From scientific hypothesis to engineering practice", in *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 8, pp. 99-105, Aug. 2015.
- [2] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou, and A. Lou, "Wireless power transfer and applications to sensor networks", in *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 140-145, Aug. 2013.
- [3] W. C. Brown, "The history of wireless power transmission", *Solar Energy*, vol. 50, no. 1, pp. 3-21. 1996.
- [4] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonance", *Science*, vol. 317, pp. 83-86, 2007.
- [5] <http://news.mit.edu/2007/wireless-0607> MIT news- Goodbye wires!
- [6] <https://olev.kaist.ac.kr/>
- [7] 김상원, 김성민, 문정익, 조인귀, 손수호, 이호진, "4차 산업혁명 Enabler 무선전력전송 기술 동향", 정보통신기술 진흥센터 주간기술동향, 2018년 1월.
- [8] <http://witricity.com/>
- [9] <https://www.ossia.com/>
- [10] <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>
- [11] <https://www.airfuel.org>
- [12] <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/ma1/>
- [13] <https://www.everythingrf.com/rf-calculators/friis-transmission-calculator>
- [14] J. McSpadden, J. Mankins, "Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology", *IEEE Microwave Magazine*, pp. 46-57, Dec. 2002.
- [15] 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).
- [16] G. Yang, M. R. V. Moghadam, and R. Zhang, "Magnetic beamforming for wireless power transfer", *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Shanghai, pp. 3936-3940, 2016.
- [17] S. Kisseleff, I. F. Akyildiz, and W. Gerstacker, "Beamforming for magnetic induction based wireless power transfer systems with multiple receivers", *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, CA, pp. 1-7, 2015.
- [18] P. S. Yedavalli, T. Riihonen, X. Wang, and J. M. Rabaey, "Far-field RF wireless power transfer with blind adaptive beamforming for internet of things devices", in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 1743-1752, 2017.
- [19] S. Lee, Y. Zeng, and R. Zhang, "Retrodirective multi-user wireless power transfer with massive MIMO", in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 54-57, Feb. 2018.
- [20] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless charging technologies: Fundamentals, standards,

and network applications", in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413-1452, 2016.

≡ 필자소개 ≡

구 현 철



1995년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2003년 12월: Georgia Institute of Technology, GA,
USA (공학박사)
1997년~1999년: KT 무선통신연구소 전임연구원
2004년~2005년: 삼성전자 무선사업부 책임연구
원

2005년~현재: 건국대학교 전기전자공학부 교수
[주 관심분야] RF 전력증폭기, 무선전력전송