



RF 무선전력전송 기술과 관련 무선통신 연구 동향

I. 서론

최근 무선통신의 발달로 언제 어디서나 끊임없이 정보의 접근을 가능하게 하는 유비쿼터스(Ubiquitous)의 시대가 열리고 있다. IoT(Internet of Things), 사물 통신, 차량 간 통신 등서 기존의 사용자 간의 서비스뿐만 아니라 사물간의 수많은 응용 서비스가 가능해질 것으로 기대되고 있다. 이러한 흐름에 따라 5세대(5G) 무선 표준에서는 좀 더 빠르고 안정적으로 거대 연결 통신을 구현하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. 결과적으로 5G가 상용화될 경우 가까운 시기에 다양한 사용자, 사물, 기기들이 이제는 복잡한 선 없이도 무선으로 서로 소통하고 정보를 전달 공유하게 될 것이다^[1].

이처럼 그동안 무선통신의 발달은 전자 및 통신기기에 선을 없애면서 이동성과 상시 휴대성을 제공하였다. 그러나 이동기기의 전원을 공급하기 위하여 배터리를 사용하고 배터리 충전을 위해서는 전원선을 연결해야 하는 번거로움이 남아있다^[1-2]. 이러한 배터리 충전의 문제를 해결하기 위하여, 저전력 기술 및 고효율 집적 배터리 등의 다양한 시도들이 있어왔다. 하지만 배터리 기술의 비약적인 발전에도 불구하고, 최근 무선기기는 더 많은 계산 복잡도와 집적화를 요구하며 결과적으로 배터리 유지시간은 이전에 비해 그리 많이 늘어나지 못했고 여전히 배터리 충전을 위한 시간이 필요한 상황이다. 최근에는 충전선을 연결해야 하는 불편함을 해결하기 위하여 무선충전 기술에 대한 관심이 점차 높아지고 있다^[1-2].

무선전력전송은 전력 도달 거리에 따라 다양한 방법이 연구되어져 왔으며, 단거리용으로는 자기유도 방식과 자기 공명 방식을 이용한 무선 전력 전송이 기술적으로 성숙되어 상용화 및 표준화가 진행되고 있다^[1-3]. 원거리 전력 전송의 경우 무선 전자파 RF(Radio Frequency)



이 경 재
한밭대학교
전자·제어공학과



김 동 완
동아대학교 전자공학과



임 용 석
전자부품연구원
스마트네트워크연구센터



신호에 담겨져 전달되는 에너지를 수확하여 이용하는 방법으로 최근 실용화를 위하여 다양한 관점의 노력이 지속되고 있다^[3-5]. 전자파를 이용한 원거리 무선 전력 전송은 이동 중에도 언제 어디서나 충전이 가능하기 때문에 무선 통신 기기의 이동성을 배가시킨다는 점에서 매우 주목되는 기술이다. 특히 최근 전자 부품들의 경우 고도의 집적화가 가능하지만, 에너지 저장장치의 경우는 소형화가 어려워 이동통신 단말의 무게와 부피를 줄이는데 있어서 가장 큰 어려움 중 하나이다. 원거리 무선 전력 전송이 가능할 경우 상시 충전이 가능하여 에너지 저장장치의 용량을 획기적으로 줄일 수 있어 이동통신 기기의 소형화도 앞당길 수 있을 것으로 보인다^{[2],[4]}.

한편 전자파의 주파수 자원은 원거리 무선전력전송에 사용되면서 동시에 무선 통신의 자원으로도 활용될 수 있다^[3]. 따라서 무선 통신 시스템에서 무선으로 전송된 전자파의 전력을 이용하여 통신과 무선전력전송을 동시에 구현하고자 하는 연구가 활발히 진행되었다^[6-8]. 본 논문에서는 무선전력전송 기술의 최근 개발 동향과 문제점 및 극복 방향을 분석하고, 주로 이론적으로 관심이 집중되었던 무선전력전송과 결합된 무선통신 연구의 최신 흐름을 소개하려고 한다.

II. 무선전력전송 기술 동향

휴대전화, 웨어러블 디바이스(Wearable Device), 가전, 가구, 자동차 등의 다양한 분야에서 유선충전으로부터 무선충전 방식으로 적용 기술이 점차 변화하고 있다. 최근 상용화되어 실제 사용되고 있는 다양한 무선충전 기



〈그림 1〉 무선전력전송 충전 기술의 다양한 상용화 예

기들의 예들을 〈그림 1〉에서 볼 수 있다. 그러나 현재까지 실용화된 대부분의 기술은 비방사 방식으로 주로 거치대 위에 매우 한정된 영역에서만 충전되는 경우가 대부분이었다. 이러한 방식은 전원선을 연결하지 않고 단순히 거치대에 올리기만 하면 충전이 되는 편리함을 가지고 있다. 그러나 긴 충전선을 이용하면 충전 중에도 어느 정도 위치이동과 사용이 가능한 유선 충전과는 달리 충전 중에는 위치이동을 할 수 없는 불편한 점도 있었다. 무선이기는 하지만 유선보다도 이동에 제약을 가지는 비방사 방식의 단점으로 인해 무선충전 기술의 확산은 한계가 있었던 것이 사실이다.

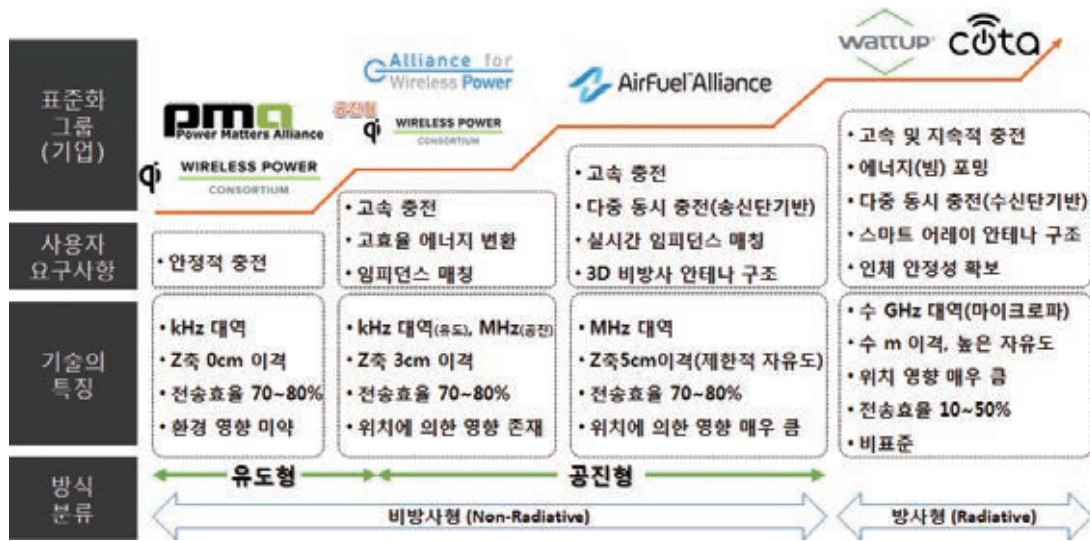
1. 비방사형 무선전력전송

〈그림 2〉에서처럼 비방사형 무선충전 방식은 상대적으로 저주파수대역인 KHz를 이용하는 자기유도기술과 MHz 대역을 이용하는 자기공진 기술을 주로 활용한다. 이와는 달리 방사형 무선전력전송 기술에는 전자파를 이용하는 마이크로파 기술과 레이저를 이용한 방식이 존재한다. 전자파의 특성상 주파수가 높을수록 자유공간에서 직진성이 강하기 때문에 원거리 전송에 사용되고 낮으면 근거리 전송에 사용되게 된다.

상용화된 대표적인 무선충전 기술인 자기 유도 방식은 스마트폰 및 전기 자동차의 비접촉 전원장치로 가장 많이 활용되고 있으며, 수 mm 거리 안에서 두 개의 코일이 유도 전류를 일으켜 전력을 전송한다. 이 기술은 전송 효율이 매우 높고 구현이 쉬운 장점을 가지지만, 전송거리가 짧고 코일이 서로 정렬되어 있지 않는 경우 전송 효율이 크게 감소하는 단점을 가지고 있다^[3]. 자기유도 방식의 표준화는 WPC(Wireless Power Consortium)에서 주도하고 있으며, 전송전력을 높여서 충전시간을 단축시키는 방향으로 기술이 발전하고 있다^[2].



〈그림 2〉 주파수에 따른 무선전력전송 기술의 분류



〈그림 3〉 무선전력전송 기반 충전 기술의 최신 흐름

자기공진 방식은 수십 cm 내외로 인접한 근거리 자기장을 통해 공진주파수를 가지는 두 개의 코일 사이에 전력이 전달되는 공명현상을 이용하여 전력을 전송한다. 자기유도 방식에 비해 원거리 전송이 가능하고 송수신 코일의 방향성의 자유도가 높으나 상대적으로 전송 효율이 낮고 전자기파에 대한 인체 영향을 피할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요한 상황이다^[3]. 표준화는 주로 A4WP(Alliance for Wireless Power)에 의해 진행되었으나, 최근에는 자기유도방식 표준 단체인 Power PMA(Matters Alliance)와 합병하여 AirFuel Alliance를 만들어서 주도하고 있다^[2]. 자기유도 기반 단체인 WPC 역시 45mm의 이격 거리에서 작동하는 공진형 표준을 진행하고 있다. 이처럼 최근 비방사형 무선충전기술의 경우에도 거리를 증가하고 충전 방향의 자유도를 개선하려는 방향으로 연구가 계속 진행되고 있다.

2. 방사형 무선전력전송

마이크로파 무선전력전송 방식은 원거리 충전이 가능하고 기기사용 중에 충전할 수 있는 자유도를 제공하여 배터리 수명 등 통신, IoT 기기의 한계를 극복할 수 있는 기술로 크게 주목을 받고 있다. 특히 기존에 문제가 되었던 1mW 이하의 낮은 에너지 수확량과 전자파 인체 노출 등의 안전성 문제를 해결하기 위한 노력이 진행되었고,



〈그림 4〉 방사형 무선전력전송 기반 충전 기술의 최근 상용화에

최근에는 1W 이상의 전력을 수 m의 원거리에서 전송하는 기술이 구현되어 상용화 시제품들이 나오고 있는 상황이다. 〈그림 3〉에서는 자기유도형, 자기공진형 방식 기반의 비방사형 기술과 마이크로파 기반의 방사형 기술의 차이점과 특징을 요약하여 설명하였다.

〈그림 4〉는 최근 몇 개의 선도 기업에서 선보인 마이크로파 기반의 방사형 무선전력전송 송수신기의 시제품들을 보여준다. 특히 미국의 신생기업인 Ossia사는 일본의 통신기업인 KDDI와 함께 COTA라는 이름의 무선충전시스템을 개발하였다. COTA 시스템은 2.4GHz의 ISM 대역을 이용하여 충전기에서 무선충전 수신칩이 부착된 스마트폰, 태블릿, 노트북 등의 이동기기에 최대 1W의 전력을 충전할 수 있도록 설계되었다.

또한 Energous사는 WattUp이라는 기술을 개발하여 무선 충전 수신 지역에 무선기기가 들어가면 자동으로 충전이 되며, 시스템 사양에 따라서 최대 12개의 장치를 동시에 무선충전할 수 있는 제품을 선보이고 상용화를 준비 중이다. 이들 기술들은 대부분 다중 어레이 안테나(Array

Antenna)를 사용한 빔포밍(Beamforming) 기술을 사용하여 충전 단말에 에너지를 집중하여 효율을 향상시킨다.

TechNovator사의 XE란 모델은 큐브 모양의 RF 송신기와 스마트폰 케이스 형태의 수신기 제품으로 5m 거리에서 스마트폰을 충전할 수 있다. 이 제품들은 단말이 이동하는 경우 전송 빔의 방향이 적응적으로 맞춰지면서 상시 충전하는 것이 가능해서 무선충전의 개념을 근본적으로 변화시킬 기술로 평가되고 있다.

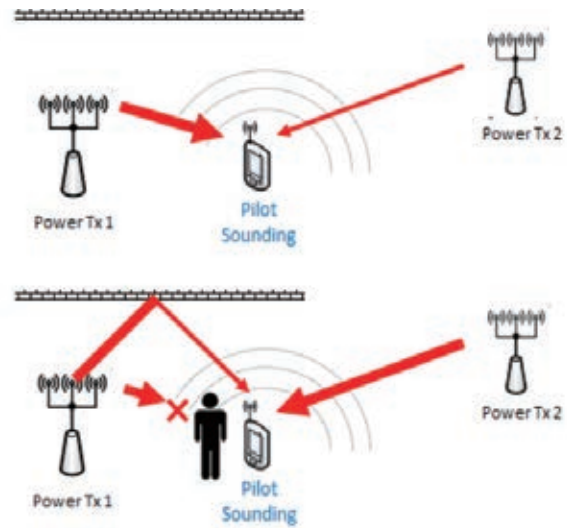
그러나 마이크로파 무선전력 송수신기의 잇따른 개발에도 불구하고 폭발적인 시장 확산을 위해서는 여전히 전송 효율과 이동성, 인체 안전성에 대한 면밀한 검증과 추가연구가 필요한 상황이다.

III. RF 무선전력전송 관련 연구

마이크로파 기반의 방사형 RF 무선전력전송을 구현하기 위한 기반 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 다중 안테나를 이용한 빔포밍 기술은 방사형 방식의 낮은 효율을 극복하기 위하여 가장 중요한 기술 중 하나이다. 다중 어레이 안테나 빔포밍 기술은 무선통신에서도 매우 중요한 요소기술로 이용되어져 왔던 만큼 기술적인 성숙도는 이미 매우 높다고 할 수 있다. 본 장에서는 먼저 마이크로파 기반의 무선전력전송에서 효율성 및 인체안전성을 증대하기 위한 연구들을 소개한다. 또한 마이크로파 기반 무선전력전송과 무선통신을 접목한 “무선 전력 및 정보 동시전달” 기술과 “무선전력전송 기반 통신네트워크”와 관련된 최근 연구들을 살펴본다.

1. 마이크로파 무선전력전송

방사형 마이크로파 기반 무선전력전송의 낮은 전송 효율을 높이기 위하여 다중 안테나 빔포밍은 반드시 필요한 기술 중 하나이다. 무선통신 다중안테나 MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 기법에서 채널추정을 기반으로 MRT(Maximum Ratio Transmit) 혹은 Maximum Eigenvalue 빔포밍을 통해 수신단에서의 전력 크기를 최대화할 수 있다. 무선 송수신 채널의 대칭성을 이용하면 수신단에서 보낸 비콘(Beacon) 또



〈그림 5〉 분산 송신단에서 효율성과 인체안전성 증대를 위한 빔 전력 할당의 예

는 파일럿(Pilot) 신호를 송신단이 받아서 송신단에서 수신단까지의 MIMO 채널을 추정할 수 있다^[3]. 수신단 안테나가 하나일 때 송신단 기저대역에서 추정된 채널의 Conjugate Transpose를 곱하여 전송하면 MRT 기법을 적용할 수 있다. 이러한 방식을 RF단에서 구현하면 수신 신호의 위상을 계산하여 단순히 Conjugate된 위상을 곱하여 전력신호를 보내면 되고, 이러한 전력 빔포밍 방식을 레트로 빔포밍(Retro Beamforming)이라고 한다^{[3],[8]}.

레트로 빔포밍에서는 수신단에 빔을 집중시키기 위하여 보내지는 비콘 신호가 매우 중요한 역할을 하게 된다. 비콘 신호를 자주 크게 보낼수록 전력의 전송효율은 높아지게 될 것이지만, 수신단에서 에너지를 소모하게 되어 결과적으로 순수 수확되는 에너지는 줄어들 수 있다. 또한 다중 사용자를 고려하는 경우 다중 사용자간에 비콘 신호를 효율적으로 전송하는 프로토콜을 만드는 것이 중요하다. 최근 [9]에서는 다중 사용자 동시 충전을 위한 무선 빔포밍 비콘 신호의 최적화를 다루었고, 또한 무선전력전송을 위한 채널 추정에 대한 모델링 및 효율적인 기법 연구가 [10]에서 수행되었다.

[3]에서는 실제 무선전력 수신회로에서의 효율이 선형적이지 않은 점을 밝히고, 단일 사용자뿐만 아니라 다중 사용자를 고려하는 상황에서 전송 빔과 전력 할당을 최적화하는 연구를 수행하였다. 또한 모의실험을 통해 다중

분산 송신단 시스템이 수신전력의 Outage 확률을 낮출 수 있다는 사실을 보여준다. [11]에서도 분산 에너지 송신단을 고려한 피드백 설계가 연구되었다.

비콘 신호를 이용하는 레트로 빔포밍은 전력전송 효율을 높일 뿐만 아니라, 전자파 빔이 인체에 의해 가로막히는 경우 신속히 다른 경로를 채택할 수 있게 하여 인체 안전성을 높일 수 있는 기술로 고려되고 있다. 특히 인체 안전성을 높이기 위하여 분산 에너지송신단도 중요한 역할을 할 것으로 보인다^[11]. <그림 5>에서처럼 분산 송신단을 이용하면 한 송신단의 빔 경로가 인체에 의해 막힐 경우 다른 송신단의 빔을 사용할 수 있어 효율성과 안전성을 동시에 확보할 수 있게 된다. 이 때 분산 송신단의 위상 동기를 통해 빔포밍 신호들이 수신단에서 결합될 수 있도록 하는 기술이 중요할 것으로 예상되며 이에 대한 심도 깊은 추가 연구가 필요할 것으로 보인다.

2. 무선전력 및 정보 동시전달

무선 RF 신호는 무선으로 정보뿐만 아니라 전력을 동시에 전송할 수가 있다. 무선통신 수신단에서는 송신단에서 받은 신호로부터 송신 정보를 검출하고 동시에 수신 신호에 담겨 있는 전력을 모을 수 있다^[6]. 이를 무선전력 및 정보 동시전달(SWIPT: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) 기법으로 부르며, 수신 RF 신호의 전력을 나누거나 시간을 분할하는 방법을 이용한다^{[6],[7]}. 이 때 분할되는 수신 전력 또는 시간의 비율을 조정하여 수신 데이터 용량과 전력 수확량 사이에서 최적의 값을 찾을 수 있다^[7].

이러한 SWIPT 기법은 기존의 다양한 무선통신 시스템에 적용하여 확장할 수 있다. [7]에서는 다중 사용자 하향 전송 채널에서의 데이터 용량 및 전력 수확량 사이의 최적화 알고리즘이 제안되었다. 또한 간섭 채널에서 SWIPT를 적용한 상황에서의 최적 전송기법이 연구되었고^{[12],[13]}, [14]에서는 MMSE(Minimum Mean Square Error) 관점에서 MIMO 다중사용자 채널에서 에너지 수확 조건을 가지는 문제를 풀었다.

한편 릴레이 시스템에서 무선전력전송 방식을 도입하는 연구도 많은 관심을 받고 있다. 특히 IoT에서 고려되

는 D2D(Device to Device) 통신에서는 다양한 기기들이 릴레이의 역할을 하는 네트워크 환경이 고려될 수 있다. 그러나 신호 중계를 도와주는 단말은 배터리 에너지를 사용하는 손해를 감수해야만 한다. 이러한 경우 SWIPT 방식을 통해 협력 노드에 전력과 정보를 동시에 공급한다면, 휴지기에 있는 단말들에게 전력을 공급하는 대신 중계 통신에 참여하도록 유도할 수 있게 된다^{[15],[16]}. 또한 SWIPT를 이용하여 하향 채널에서 송신단에서 수신단으로 정보와 전력을 동시에 전송하고, 이 때 수신단에서 수확된 전력으로 상향 통신까지 수행하는 방식을 고려할 수 있다. 이 때 하향 통신과 상향 통신 데이터 용량을 동시에 최적화하는 문제를 풀 수 있다.

3. 무선전력전송 기반 통신네트워크

무선 전력과 무선 통신을 동일 주파수와 시간동안 동시에 하지 않고 먼저 무선전력전송을 수행한 후 얻어진 전력을 이용하여 정보를 전송하는 방식을 무선전력 전송 기반 통신네트워크(WPCN: Wireless Powered Communication Network)라고 부른다. [18]에서는 셀룰러 시스템에서 랜덤하게 분포하고 있는 무선 전력 송출기를 이용한 에너지 수확 특성을 확률기하이론을 이용하여 분석하였다. [19]에서는 다중 사용자들을 고려할 때 시간분할 다중 접속 방식을 이용한 무선 전력 전송 기반의 통신 방식이 연구되었고, [20]에서는 에너지 저장 장치의 특성에 따라서 전송 시간과 전송 전력을 최적화하는 문제를 고려하였다. 또한 전력 신호의 경우 정보를 포함하지 않기 때문에 미리 약속된 고정된 신호를 송출하면 되고 수신단에서 채널 정보만 정확히 추정할 수 있다면 간섭 신호를 수신 신호에서 제거할 수 있다. 이렇게 전력 신호 간섭제거 기법에 기반한 full duplex 통신이 가능하게 되며, 이에 대한 연구가 [19]에서 진행되었다. [21]에서는 다중사용자 다중안테나 상향 무선전력전송과 하향 통신채널을 가지는 시스템에서 송신단 프리코더 및 최적 시간 할당 문제의 솔루션이 도출되었다.

4. 향후 연구 방향

기본적으로 방사형 무선전력전송에 기반한 통신



시스템 연구는 다중 안테나를 이용하는 MIMO 상황과 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 적용하여 다른 채널 환경으로의 확장이 고려될 수 있다. 방사형 무선전력전송의 낮은 효율을 극복하기 위하여 Massive MIMO를 고려하는 상황에서 SWIPT 또는 WPCN에 대한 연구가 필요하다. 특히 비콘 신호의 최적화 설계가 실제 수확되는 순수 전력량을 크게 좌우할 수 있기 때문에 다중 사용자, 채널 환경 등 다양한 상황에서 비콘 신호를 최적화하는 연구는 중요한 의미를 가질 것이다.

또한 기존에 강한 간섭 신호를 가지는 통신 환경은 오히려 무선전력전송 관점에서는 유리하게 동작할 수 있고, OFDM의 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)나 Cyclic Prefix 등의 경우 통신 관점에서는 성능열화의 원인이 되지만 무선전력전송 관점에서는 전력수확을 증대시킬 수 있게 된다. 이를 이용한 다양한 채널 환경에서의 연구가 흥미로울 것으로 보인다.

RF 신호를 이용한 무선전력전송에 있어서 가장 큰 문제점 중 하나는 높은 전력을 송출하는 전자파로 인한 인체유해성 문제이다. 인체가 전자파를 흡수하는 정도를 나타내는 SAR(Specific Absorption Rate) 등을 모델링하고, 이를 제약조건으로 제한하면서 데이터 용량 또는 전력수확량을 최대화하는 전송기법에 관한 연구가 요구되어진다.

또한 실제 무선전력전송시에 배터리를 통해 수확되는 전력량은 비선형적인 특성을 가진다^[3]. 이러한 비선형성을 고려한 연구가 여러 상황에서 추가적으로 이루어질 수 있을 것이다. 마지막으로 무선전력전송은 배터리의 용량을 비약적으로 줄일 수 있는 가능성을 가진 기술이기 때문에 배터리 용량과 무선전력전송 관련 문제들의 연관관계를 푸는 것도 의미가 있을 것이다.

IV. 결론

본 고에서는 무선전력전송 기술의 동향과 마이크로파를 이용한 RF 방사형 무선전력전송과 통신을 결합하는 연구에 대하여 살펴보았다. 마이크로파 기반의 원거리 무

선전력전송은 전자기기의 이동성 관점에서 이용의 편의성을 증대시킬 뿐만 아니라, 에너지 저장장치의 수명을 개선시킬 수 있어 셀룰러 시스템뿐만 아니라 센서 네트워크 등의 다양한 분야에서 기대되는 기술 중 하나이다. 현재 세계적으로 무선전력전송에 대한 연구와 개발이 활발히 이루어지고 있으며 국내에서도 이에 대한 관심과 연구가 지속적으로 필요하다고 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 부분적으로 한국전력공사의 2016년도 선정 기초연구개발과제 연구비에 의해 지원되었고(과제번호: R17XA05-71), 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.10079984, 웨어러블 디바이스용 무구속 멀티모달 무선에너지공급 기술 개발)

참고문헌

- [1] K. Huang and X. Zhou, "Cutting the Last Wires for Mobile Communications by Microwave Power Transfer," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 6, pp. 86-93, June 2015
- [2] S. M. Kim, S. W. Kim, J. I. Moon, and I. K. Cho, "Trends and Future Directions of Wireless Charging," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 31, no. 3, pp. 32-41, June 2016
- [3] Y. Zeng, B. Clerckx, and R. Zhang "Communications and Signal Design for Wireless Power Transmission," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 5, pp. 2264-2290, May 2017
- [4] M. M. Tentzeris and Y. Kawahara, "Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits," *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, pp. 24-33, March 2012.
- [5] M. Piuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn, "Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.

- 61, pp. 2715–2726, July 2013.
- [6] C. K. Ho and R. Zhang, “Optimal Energy Allocation for Wireless Communications With Energy Harvesting Constraints,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, pp. 4808–4818, September 2012.
- [7] R. Zhang and C. K. Ho, “MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, pp. 1989–2001, May 2013.
- [8] R. Y. Miyamoto and T. Itoh “Retrodirective Arrays for Wireless Communications,” *IEEE Microwave Magazine*, vol. 3, no. 1, pp. 71–79, March 2002
- [9] S. Lee, Y. Zeng, and R. Zhang, “Retrodirective Multi-User Wireless Power Transfer with Massive MIMO,” submitted to *IEEE Wireless Communications Letters*, Online: <https://arxiv.org/abs/1706.07549>.
- [10] K. W. Choi, D. I. Kim, and M. Y. Chung “Received Power-Based Channel Estimation for Energy Beamforming in Multiple-Antenna RF Energy Transfer System,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 6, pp. 1461–1476, March 2017.
- [11] S. Lee and R. Zhang, “Distributed Wireless Power Transfer With Energy Feedback,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 7, pp. 1685–1699, April 2017
- [12] J. Park and B. Clerckx, “Joint Wireless Information and Energy Transfer in a Two-User MIMO Interference Channel,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, pp. 4210–4221, August 2013.
- [13] H. Lee, S.-R. Lee, K.-J. Lee, and I. Lee, “Optimal Beamforming Designs for Wireless Information and Power Transfer in MISO Interference Channels,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 9, pp. 4810–4821, Sept. 2015.
- [14] C. Song, J. Park, B. Clerckx, I. Lee, and K.-J. Lee, “Generalized Precoder Designs Based on Weighted MMSE Criterion for Energy Harvesting Constrained MIMO and Multi-user MIMO Channels,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 12, pp. 7941–7954, December 2016.
- [15] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, “Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, pp. 3622–3636, July 2013.
- [16] S. Mahama, D. K. P. Asiedu, and K.-J. Lee, “Simultaneous Wireless Information and Power Transfer for Cooperative Relay Networks With Batter,” to appear in *IEEE Access*, August 2017
- [17] H. Lee, K.-J. Lee, H. Kim, and I. Lee, “New Communication Protocol for Energy-constrained Communication Systems with Wireless Information and Power Exchange”, submitted to *IEEE Transactions on Wireless Communications*, March 2017
- [18] K. Huang, “Enabling Wireless Power Transfer in Cellular Networks: Architecture, Modeling and Deployment,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 2, pp. 902–912, February 2014
- [19] H. Ju and R. Zhang, “Optimal Resource Allocation in Full-Duplex Wireless-Powered Communication Network,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 62, no. 10, pp. 3528–3540, October 2014.
- [20] H. Lee, K.-J. Lee, H. Kim, B. Clerckx, and I. Lee, “Resource Allocation Techniques for Wireless Powered Communication Networks with Energy Storage Constraint”, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 2619–2628, April 2016
- [21] H. Lee, K.-J. Lee, H.-B. Kong, and I. Lee, “Sum Rate Maximization for Multi-user MIMO Wireless Powered Communication Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 11, pp. 9420–9424, Nov. 2016.



이경재

- 2005년 8월 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
- 2011년 2월 고려대학교 전자전기공학과 박사
- 2011년 3월~2011년 9월 고려대학교 전자전기공학과 연구교수
- 2011년 10월~2012년 8월
The University of Texas at Austin
전기컴퓨터공학과 박사후연구원
- 2012년 9월~현재 한밭대학교 전자·제어공학과 부교수

〈관심분야〉

5G Communications, Wireless communications, MIMO, Cooperative communications, Wireless power transfer



임용석

- 2001년 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
- 2003년 고려대학교 전자공학과 석사
- 2017년 고려대학교 전자공학과 박사
- 2007년~현재 전자부품연구원 스마트네트워크센터 책임연구원

〈관심분야〉

무선전력전송, 자기장 통신, 통신 SoC, Embedded System 설계



김동완

- 2003년 8월 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
- 2006년 2월 포항공과대학교 정보통신학과 석사
- 2015년 2월 고려대학교 전기전자전파공학과 박사
- 2006년 2월~2017년 2월 삼성전자 네트워크 사업부 책임연구원
- 2017년 3월~현재 동아대학교 전자공학과 조교수

〈관심분야〉

Low power embedded system design, High efficient communication protocol