

특집 : 무선전력전송 기술

무선전력전송의 애로기술

임 춘 택

(KAIST 원자력 및 양자공학과 부교수)

석유자원의 고갈과 친환경 에너지의 중요성이 증대됨에 따라 전기 에너지 이용이 보다 확대되고 있다. 휴대용 기기나 자동차 등 모든 움직이는 물체는 에너지 기근 (energy hungry) 문제를 안고 있다. 기존의 배터리를 대체하는 새로운 방법으로 무선전력전송이 주목받고 있다. 본 논문에서는 무선전력전송기술이 전기교통, 휴대기기, 로봇 및 의료분야에 걸쳐 어떻게 적용되고 있는지를 살펴보고, 실용화를 위해 해결되어야 할 과제를 살펴본다.

1. 무선전력전송기술 개요

배터리의 가격, 무게, 용량 문제와 배터리의 잦은 충전에 따른 수명단축, 충전 손실 등으로 인해 배터리에만 의존하여 모바일 기기를 작동하는 것은 실용성에 있어서 한계가 있다. 배터리를 유선으로 충전하고 이동 중에는 오프라인으로 배터리 에너지를 사용하는 기존의 방식 대신, 이동 중에 온라인으로 무선전력을 곧바로 받아쓰거나, 정지 중에 무선으로 배터리를 충전하는 방식이 활발히 연구되고 있는 이유다. 세계적으로, 충분한 이격거리로, 저렴한 가격에, 높은 에너지 효율로 전력을 무선으로 전송하는 기술이 경쟁적으로 개발되고 있다.

무선전력전송기술은 친환경 전기교통분야, 모바일 기기, 각종 로봇과 의료분야 등에 활용될 수 있다.^[1] 본 논문에서는 각 분야별로 애로기술을 자세히 살펴본다.

2. 무선 전기교통분야의 애로기술

무선전력전송기술은 미래 교통분야의 유력한 기술이다. 각종 전기자동차는 물론 전기기차에 널리 사용될 전망이고, 특수 목적의 무선 전기항공기와 전기선박에도 적용될 전망이다. 그림 2는 무선전력전송을 이용한 교통수단의 개발현황과 향후 개발대상이다.

2.1 무선 전기자동차

그림 3은 1989~1996년에 미국 버클리대학팀이 개발한 최

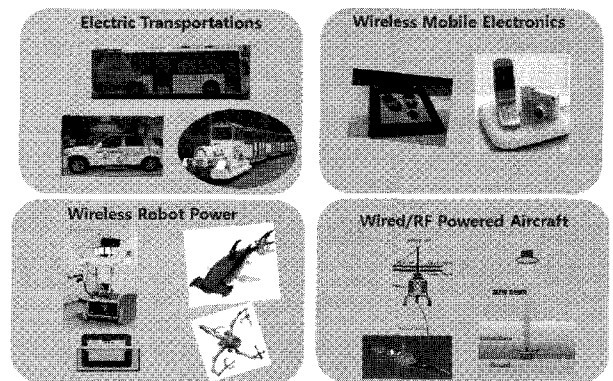


그림 1 무선전력전송기술의 일반적인 활용

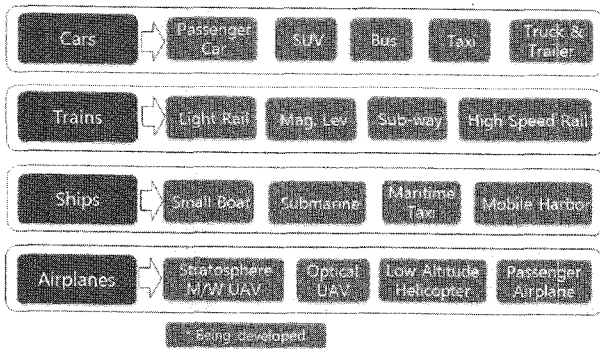


그림 2 무선전기 교통수단의 개발현황 및 향후 개발대상

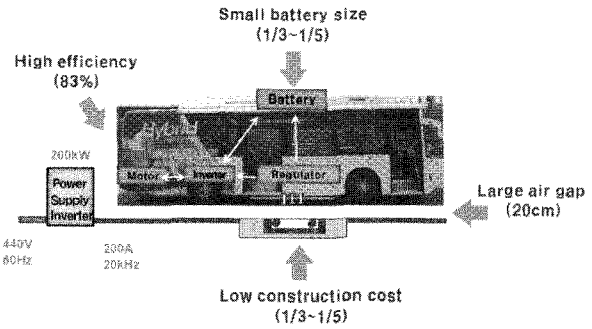


그림 4 KAIST에 의해 개발된 OLEV(On-Line Electric Vehicles)

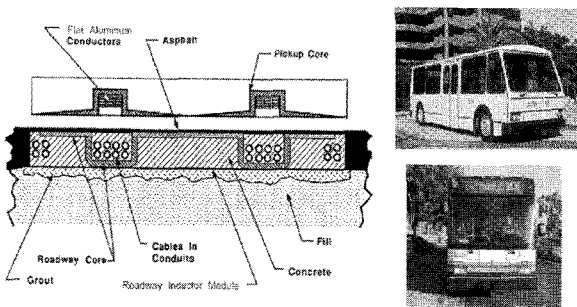


그림 3 미국의 RPEV (Road-way Powered Electric Vehicles)

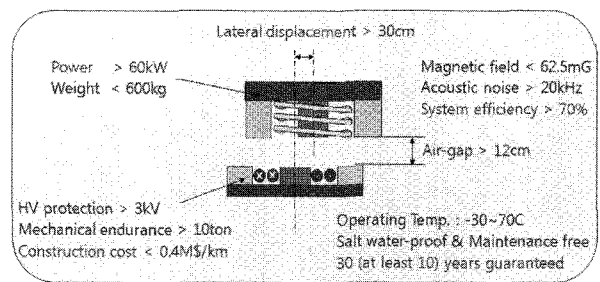


그림 5 무선 전기자동차의 애로기술

초의 도로기반 전기자동차(Road-way Powered Electric Vehicles)다.⁽²⁾ RPEV는 도로에 매설된 급전선에 의해 발생된 자기장으로부터 주행 중에 전력을 공급받을 수 있다. RPEV는 작은 공극간격과 높은 건설단가 등으로 인해 실용화되지 못하였다.

정차중 충전방식의 전기자동차도 널리 연구되고 있는데, 2002년부터 일본 와세다대학이 연구한 것이 대표적이다. 이 방식으로 공극간격 10 cm에서 30~150kW를 92~93 %의 높은 효율로 충전할 수 있다. 하지만, 하절기와 동절기의 차량 에어컨 과부하, 도로정체 등으로 인한 배터리 방전 우려 등으로 인해 배터리를 과다하게 탑재해야 하므로, 경제성이 낮아 실용화가 곤란하다.

한편, KAIST에서 2009년부터 개발되고 있는 OLEV (On-Line Electric Vehicles)는 RPEV와 기본원리가 동일하나, 혁신적인 구조의 급집전코일을 개발하여 20 cm 이상 공극간격에서 60 kW를 83 % 효율로 전달할 수 있으며, 미국에 비해 선로비용도 1/3이하로 낮추었다.⁽³⁾⁻⁽⁶⁾

그림 5는 무선전력전송기술을 전기자동차에 적용하기 위해 해결해야 할 과제들을 보여준다. 무선 급전장치와 집전장치 사이의 공극간격(Air-gap)을 12 cm 이상 확보해야 도로교통에 지장이 없으며, 70 %이상의 효율로 전력을 전달해야 예나

지 경제성이 높고 실질적인 CO₂감소효과가 크다. 또한 급전장치와 집전장치의 좌우편차를 30 cm 이상 확보해야 일반도로에서 연속적으로 전력을 받는데 지장이 없다. 또한 건설비용을 km 당 0.4 M\$ 이하로 줄이는 것이 전기자동차의 대중화에 유리하다. 도로구조는 적어도 10년 이상의 내구성을 가져야 하며, 소금물이나 눈비에 방수가 되어야하고, 수리가 불필요한 구조여야 한다. 이 외에도 보행자 위치에서의 전자기장(Electro-Magnetic Field)이 기준치 이하여야하고, 집전장치의 무게나 형상이 차량에 적합해야 한다. 아직 KAIST OLEV도 좌우편차 등 일부 해결과제가 남아있다.

2.2 무선 전기기차 및 물류 자동화

전기기차는 전기자동차와 달리 정해진 궤도를 달리기 때문에 급집전장치의 좌우편차를 크게 할 필요가 없다.

그림 6은 독일 봄바디어(Bombardier) 사에 의해서 개발중인 RPET (Road assisted powered Electric Trains)다. 이는 주행중에 무선으로 전력을 공급받을 수 있으며, 3상전원을 사용하고, 6.5 cm의 공극간격에서 92 %의 효율을 달성하였다. 무선 전기기차는 기존의 공중가선식 기차에 비해 가선설치비용을 절감하고 도시 미관에 유리하며 터널의 높이를 낮출 수 있는 장점이 있다.

뉴질랜드 오클랜드 대학에서도 정차중에 충전가능한 전기기차를 개발하였는데, 실험적인 수준이다. KAIST에서는 2010

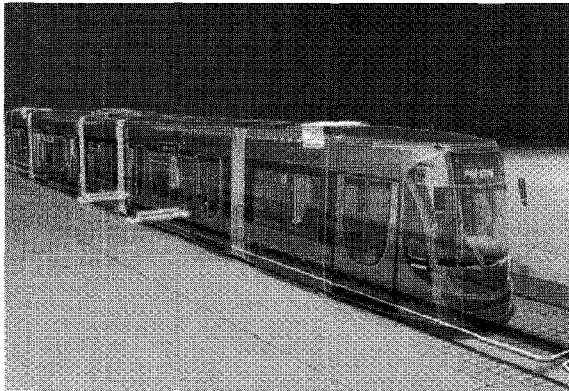


그림 6 독일 Bombardier의 무선 전기기차



(a)

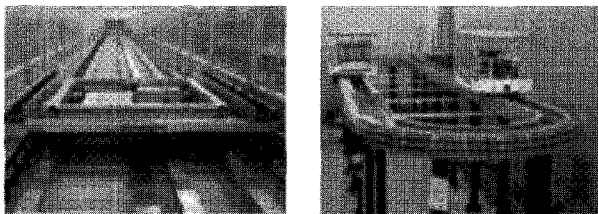
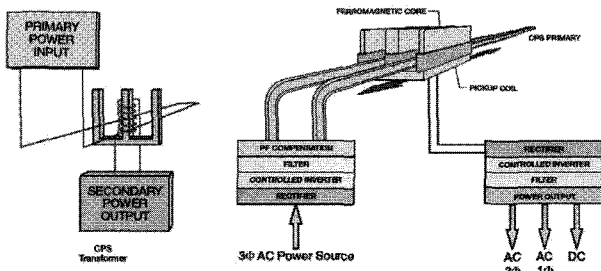
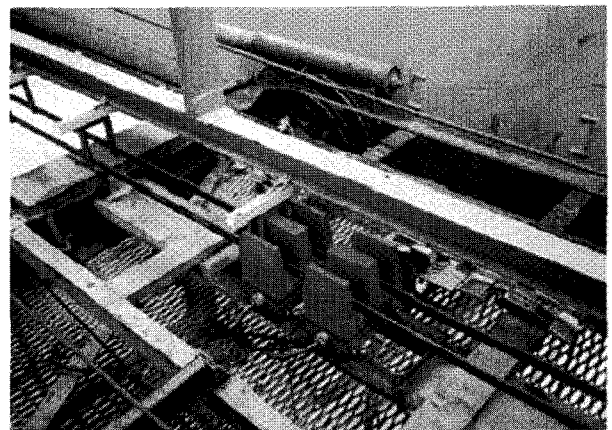


그림 7 클린룸 및 반도체 설비에 사용되는 무선전력전송 시스템



(b)

그림 8 (a) 무선전력전송을 이용한 컨테이너 크레인 (b) 크레인용 두 개의 25 kW급 집전장치

년 3월 서울대공원에 세계 최초로 정착중은 물론 주행중 충전이 가능한 OLEV 전기기차를 설치하여 시험운행중이다.

무선전력전송기술은 그림 7과 같이 반도체 공장과 클린룸에 사용되는 이동설비의 전력공급에도 사용되고 있다. 또한 그림 8과 같이 대전력이 필요한 동시에 전기 감전 등으로부터의 안전성이 요구되는 해상용 컨테이너 크레인 같은 대형 시스템에도 적용되고 있다.

그림 9는 전기기차 및 물류에 사용되는 급집전코일 관련 해결과제를 보이고 있다. 향후 경전철과 고속전철 등에 무선전력기술이 적용되려면 전력 규모가 0.3 ~ 20 MW 수준이 되어야 하며, 90 % 이상의 높은 효율을 보장해야 발열문제를 감소시킬 수 있다. 이를 위해서는 공극간격을 최소화 할 수 있는 새로운 코일구조의 개발이 필요하다. 또한 이러한 큰 전력을 감당할 수 있는 1 kHz 이상의 대전력 인버터와 콘버터

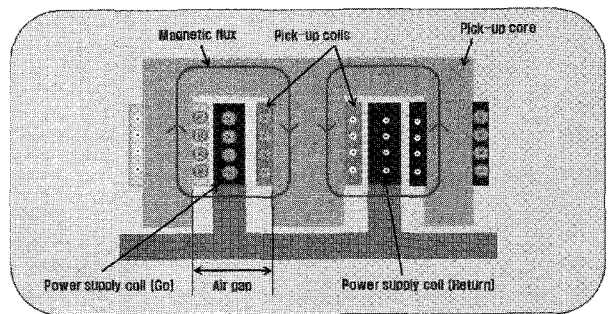


그림 9 전기기차 및 물류용 급집전코일 애로기술

개발도 필요하다.

2.3 무선 전기비행기

장시간 정점체공을 하는 특수목적으로 무선 전기비행기가

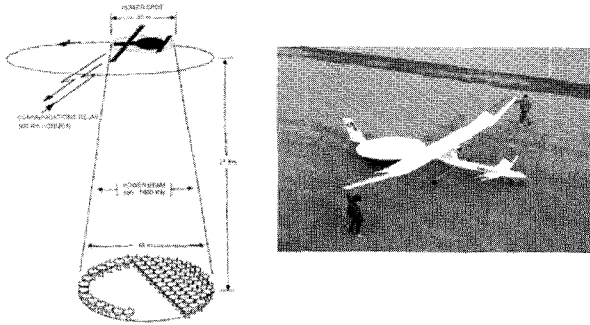


그림 10 캐나다의 SHARP 프로젝트

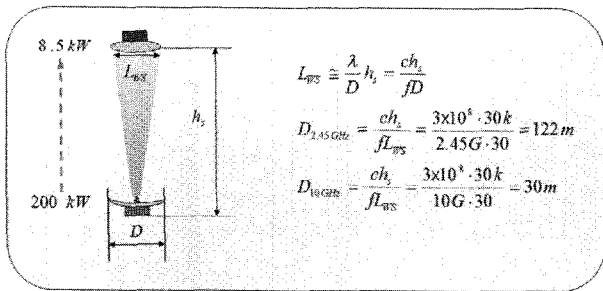


그림 11 마이크로파 전기비행기의 송수신장치 예

연구되고 있다. 그림 10은 1987년부터 진행된 캐나다 SHARP (Stationary High Altitude Relay Platform) 프로젝트의 마이크로파 비행기다. 2.45 및 5.8 GHz의 렉테나 (Rectenna)를 사용하였고, 지상에서 10 kW를 전송하여 150 m 상공에서 150 W의 에너지를 전송받았다.

그림 11은 마이크로파를 이용한 무선 전기비행기의 송수신 장치 설계 예다.

한편, 2003년 미국의 NASA 마셜 우주비행센터 (Marshall Space Flight Center)에 의해서 레이저 에너지 비행기 (Laser-powered Aircraft)가 개발 되었다. 지상에서 레이저를 상공의 비행기를 향해 조사하고, 비행기는 태양전지를 이용하여 에너지를 받는다.

무선 전기비행기의 실용화에 있어서 애로기술은 고효율의 마이크로파 혹은 레이저빔 송수신기의 개발이다. 특히 마이크로파 및 레이저빔 공히 송신 효율이 낮아 전체 송수신 효율이 아직은 5~8%에 불과하다. 실용화를 위해서는 총 효율이 20% 이상 되는 것이 바람직하다.

2.4 무선 전기선박

전기선박으로서 현재 상용화되어 있는 것은 배터리 탑재 소형 보트다. 군용으로는 잠수함이나 어뢰 등이 배터리 전원을 이용하고 있다.

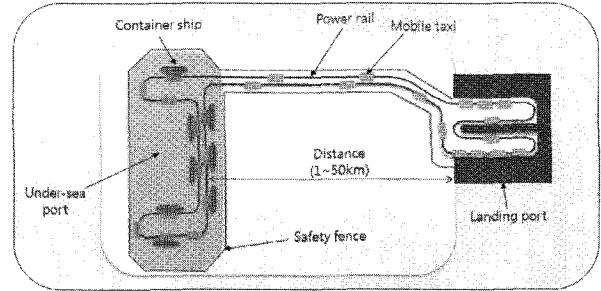


그림 12 모바일 택시에 적용한 해상 무선전력전송 시스템

미래의 수중 교통수단으로서 새롭게 조명받고 있는 모바일 하버 (Mobile Harbor)는 해상에서 정해진 궤도로 운행되기 때문에 무선으로 전력전송하기에 유리하다. 그림 12는 정해진 궤도만 운행하는 모바일 하버인 모바일 택시용 전력공급 시스템을 보이고 있다. 이 외에도 정해진 항로만을 이용하는 연안 선박이나 강에서 운행되는 선박 등에도 온라인 무선전력전송기술이 적용될 수 있다.

온라인 무선 전기선박의 실용화에 있어서 가장 큰 애로기술은 수중으로 고주파 대전력을 전달하는 것이다. 고주파 케이블을 수중 절연하면서도 고주파 근접자장을 형성시키는 기술은 현재 가용하지 않다. 또한 수중 누설자장으로 인한 전기발생과 이로 인한 수중 생태계와 환경에 미치는 영향도 연구되어야 한다. 무엇보다 이러한 제약을 극복하면서 모바일 택시에 필요한 1~2 MW 급의 대전력을 전달하는 것이 용이하지 않은 것으로 분석된다.

3. 무선 휴대기기분야의 애로기술

무선전력전송기술은 휴대폰, TV, 노트북 등 휴대용 기기에 무선으로 충전하거나 이동 중 전력을 공급하는데 사용될 수 있다. 휴대기기용 무선전력전송 방법은 크게 자기공명 방식과 자기유도 방식으로 나눌 수 있다.

3.1 자기공명 방식

자기공명 방식은 MIT에 앞서 국내에서 이형주 교수팀이 먼저 제안하여 앞서 특허출원한 것으로 알려지고 있다. MIT는 2007년 1 m에서 90 %, 2.2 m에서 40 %의 효율로 60 W를 전달하는 실험을 하여 발표했다. 이후 자기공명 방식은 현재 미국의 인텔, 쉘컴, 그리고 국내의 한림포스텍, 한국전기연구원 등 다수의 회사와 연구기관에서 활발히 연구되고 있다.

그림 13은 인텔이 개발한 자기공명을 이용한 전력 및 스테레오 신호전달 장치다. 쉘컴에서는 2010년 자기공명 방식을 이용한 휴대폰 배터리 충전장치를 선보였다.

자기공명 방식 무선전력전달은 그림 14에서 볼 수 있듯이

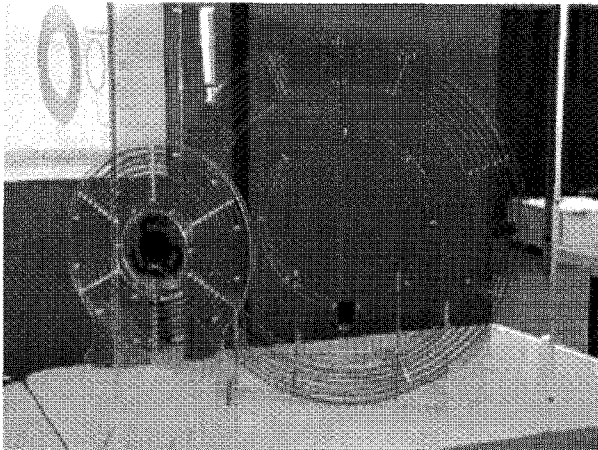


그림 13 미국 인텔의 자기공명을 이용한 전력 및 신호전달 장치



그림 15 일본 쇼와비행기회사의 비공진 자기유도 방식 무선전력전송

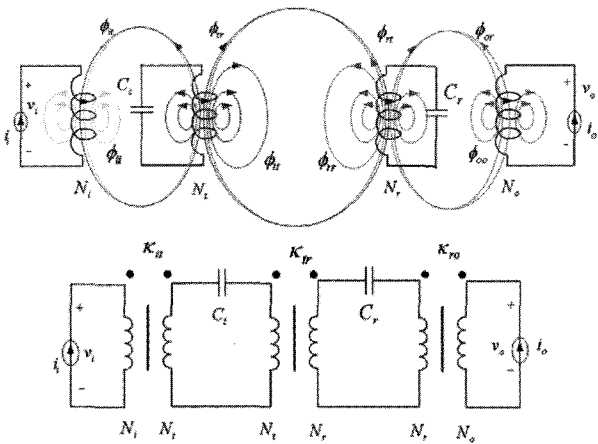


그림 14 자기공명 방식의 전력전달 원리

입력코일 (In), 송신코일 (Tx), 수신코일 (Rx), 출력코일 (Out)로 구성된다. 입력코일과 송신코일, 송신코일과 수신코일, 그리고 수신코일과 출력코일 사이에서는 각각 자기유도 방식과 동일한 원리로 전력전달이 이뤄지므로, 결합계수가 매우 낮은 등가의 변압기 회로가 된다. 다만, 송신코일과 수신코일이 각각 부착된 커패시터와 LC 공진을 하여, 큰 전류가 흐르면서 강한 자장결합 특성을 보이는 점이 자기유도 방식과 차이가 나는 점이다. 이를 통해 송신코일과 수신코일간 간격을 1 m 이상 이격시킬 수 있다는 점에서 장점을 갖는다.

자기공명 방식의 실용화를 위해 해결해야 할 과제는 산적하다. 통상 이 방식에서는 원거리 전력전달을 위해 송수신코일의 직경을 30 cm 이상으로 크게 하고, 이로 인해 인덕턴스 값이 증가하며, 결국 Q 값이 1000~2000으로 아주 크다. 따라서, 무효전력이 아주 크다. 예를 들어 Q가 2000일 경우, 100 W를 전달하기 위해서는 200 kVar를 필요로 한다. 따라서 실

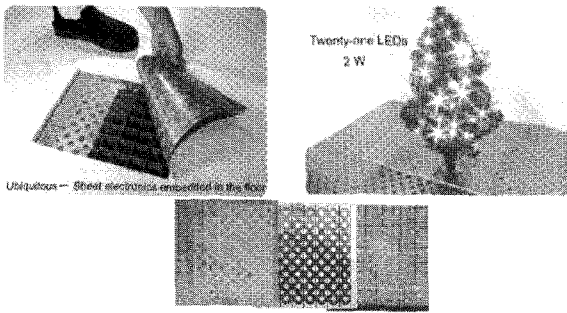
제로는 300 W 이하로 전달가능한 전력이 제한된다. 또한 높은 Q로 인하여 주파수 변동에 아주 민감한 특성을 보이게 된다. 통상 0.05% 이하로 주파수 변동이 억제되어야 한다. 송수신코일에 흐르는 전류가 크고, 통상 동작주파수가 수백 kHz~13.5 MHz로 높아 표피효과 (skin effect)에 의한 저항손실이 크다. 발표되는 40~90%대의 '높은' 효율은 대부분 코일-코일 전달효율로서, 입력전원과 출력정류기를 포함한 전체효율은 크게 떨어져서 20~60%대만 되어도 좋은 편이다. 송수신코일 또는 중계코일의 크기는 원칙적으로 줄이기 어려울 뿐만 아니라, 코일선의 굵기를 얇게 하기 어렵다. 별도의 송수신코일용 공진 커패시터를 부착하지 않고 코일구조상의 분포 커패시턴스를 이용하는 경우, 기계적으로 정교하고 온도변화나 충격에 강인한 코일구조를 개발하는 것도 쉽지 않은 과제다. 송수신코일 부근에서 큰 자장이 발생하여 EMF 규격을 충족하는 것도 쉽지 않으며, 해결해야 할 과제다. 높은 Q와 낮은 공진회로 저항, 다중 LC 공진으로 인해 전원을 켜거나 부하변동이 발생했을 때 큰 과도전류나 전압이 발생하므로 이를 억제하는 제어기법을 개발하는 것도 과제다.

반경 3~10 m 정도의 광역 전력전송을 위해 새로운 방식의 무선전력 기술개발이 필요한 이유다.

3.2 자기유도 방식

자기유도 방식은 급전코일과 집전코일만으로 이뤄지므로 구조가 간단하지만, 전력전송거리는 자기공명 방식보다 다소 짧다. 그림 15는 일본의 쇼와비행기회사 (Showa Aircraft Industry)가 시연한 자기유도 방식이다. 이를 이용하여 1 m 거리까지 3 kW를 전달했다.

자기유도 방식으로 휴대기기에 10 W 미만의 소규모 전력을 전달하는 것들이 다양하게 개발되고 있는데, 그림 16(a)



(a)



(b)

그림 16 (a) 일본 도쿄대학에 의해 개발된 평판형 무선전력전달장치 (b) 국내 한림포스텍에 의해 개발된 휴대폰 무선 충전기

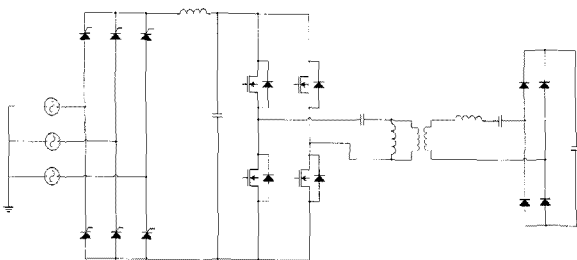


그림 17 자기유도 방식의 무선전력전송을 위한 전체 회로도 예

는 일본의 도쿄대학에 의해서 개발된 평판형의 무선전력전달 장치다. 바닥에 급전코일을 구비한 패드를 깔고 이를 MemS 스위치로 제어함으로써 트리가 올라온 부분만을 활성화시켜 효율적으로 에너지를 전달할 수 있다. 그림 16(b)는 국내의 한림포스텍에 의해서 개발된 휴대폰 무선충전기 예다.

그림 17은 비교적 대용량의 자기유도 방식 무선전력전송을 위한 전체 회로도 예다. 상용전원을 정류한 후, 인버터를 통하여 급전선로에 정현파 형태의 전류를 흘려주며, 급전선로 및 집전코일의 누설 인덕턴스는 공진 커패시터를 이용하여 임피던스를 보상한다.

자기유도 무선전력전송에 있어서 애로사항은 전력전달 특성이 급전측과 집전측간 공극간격과 좌우편차의 영향을 크게

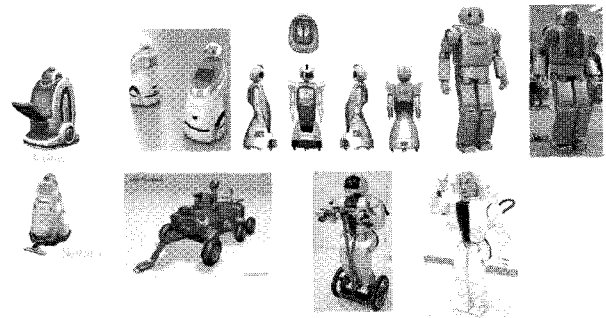


그림 18 한국에서 개발 중인 다양한 지상 로봇

받는다는 것이다. 이 영향을 최소화 할 수 있는 급집전 코일 설계가 필수적이다. 또한 코일과 인버터의 손실과 발열을 최소화하기 위해서 최적 코일설계와 인버터 및 콘버터의 고효율을 설계가 필요하다. 효율적인 에너지 전달을 위해서 집전측 휴대기기 위치를 센싱하는 것이 경우에 따라 필요하며, 휴대기기의 충전 정도를 급전측으로 전달할 수 있는 통신기능도 필요하다. EMI와 EMF를 최소화 하는 것도 해결과제다. 무선전력 휴대기기는 가격과 편의성, 소형화 등이 실용화의 관건이다.

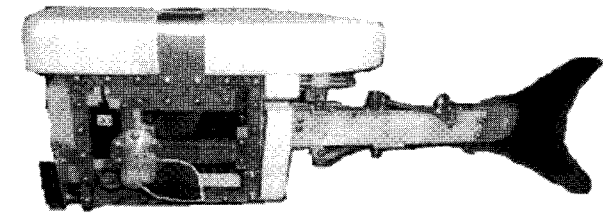
4. 무선 로봇 및 의료분야의 애로기술

4.1 로봇

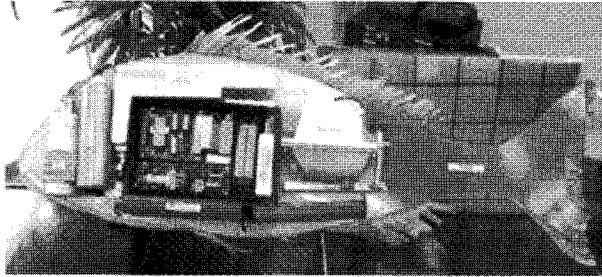
현재 다양한 로봇들이 개발되고 있으며, 한국은 일본에 뒤이어 로봇강국으로 불릴 만큼 로봇 상용화가 활발하다. 지상형 로봇 뿐만 아니라 그림 19에서 볼 수 있듯이 영국, 일본 등에서 수중형 로봇 또한 개발되고 있다.

현재 로봇의 실용화에 있어서 큰 걸림돌은 로봇에 장착된 대용량 배터리와 이의 충전문제다. 그림 20은 일본의 혼다에서 개발한 아시모 로봇으로서, 상당히 큰 배터리를 등에 지고 다녀야한다. 이를 충전하기 위한 별도의 배터리 충전기가 로봇만큼 크며, 매 30~60 분마다 배터리 충전을 위해 약 1시간 정도 동작을 멈춰야 한다. 즉, 24시간 연속 어디서나 활동 가능한 유비쿼터스 로봇이 될 수 없는 것이다. 수중 로봇의 경우에도 배터리 충전이 문제가 된다. 수중에서 로봇 물고기의 배터리를 안전하게 충전하기 위해서는 비접촉식 무선전력 전송이 가장 적합하다.

그림 21은 지상형 로봇의 배터리 문제 해결을 위해 KAIST 테슬라연구실에 의해 제안된 "전력신발 (Power Shoes)"이다. 이 방법은 바닥에 급전판 (Power plate)을 깔아 자기유도 방식으로 전력을 공급하고, 로봇 발에 집전코일을 부착하여 전력을 공급받는 방법이다. 이렇게 온라인 접촉식으로 집전을 하게 되면, 배터리는 보행간 짧은 비접촉구간이나 전원공



(a)



(b)

그림 19 (a) 영국 에섹스 대학에서 개발된 수중 로봇
(b) 일본 키티큐슈 대학에서 개발된 수중 로봇

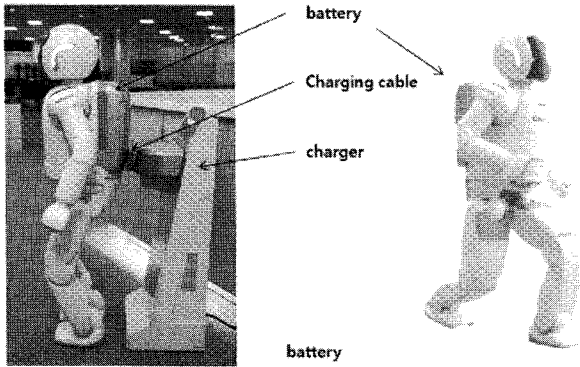


그림 20 로봇의 배터리 문제

급 차단 등 비상시만 사용하게 되므로, 아주 적은 용량만 탑재하면 된다. 전력전달효율을 높이고 EMF를 최소화하기 위해서는 전력신발이 닿은 곳만 급전을 하고, 로봇신발 밖으로는 자장이 나오지 않게 제어하는 것이 필요하다.

그림 22는 로봇이 특정 급전판을 밟으면 급집전코일이 공진되어 전력전달이 이뤄지고, 그렇지 않으면 공진으로부터 벗어나서 전력이 차단되도록 한 것이다.

4.2 의료

그림 23은 의료서비스와 IT기술이 결합한 유비쿼터스 헬스케어 시스템이다. 이를 실현하기 위해서는 모든 이동하는 의료장비나 인체에 전기에너지를 공급해야 한다.

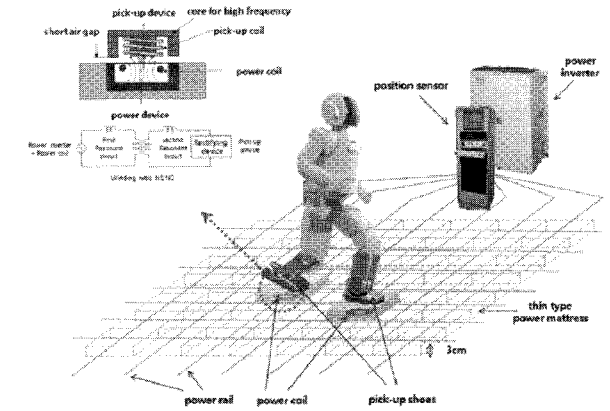


그림 21 로봇의 배터리 문제 해결을 위한 "전력신발"

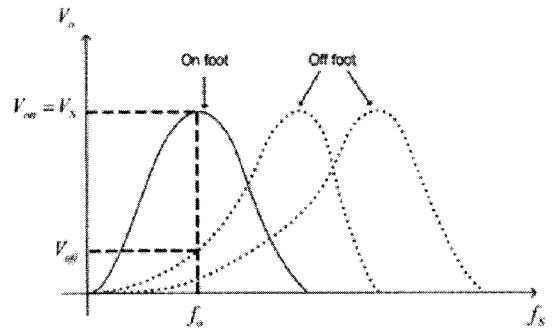


그림 22 로봇 발의 위치에 따른 공진 주파수의 변동

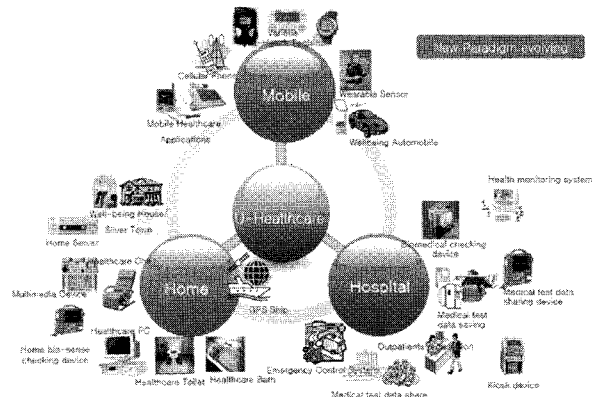


그림 23 유비쿼터스 헬스케어

가장 널리 연구되고 있는 것이 그림 24의 인공심장 박동기다. 배터리를 내장한 인공심장 박동기의 경우 인체에 안전하게 무선으로 배터리를 충전하는 것이 관건이다.

최근 체내이식 청각보조장치나 인공망막, 인체부착이나 삼입 의료전자장치의 사용이 늘어가고 있다. 통신, 센서, 증폭, 신호처리 등 필요한 기술들이 대부분 개발되어가고 있으나,

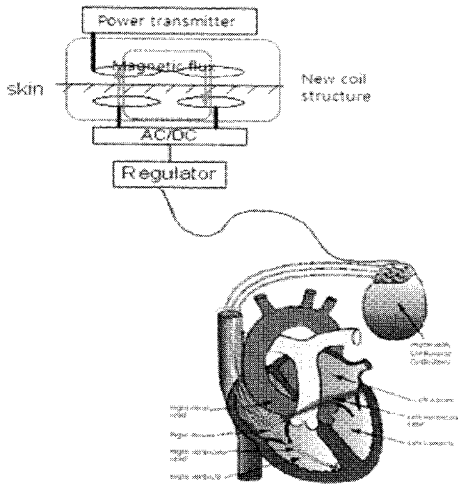


그림 24 인공심장 박동기

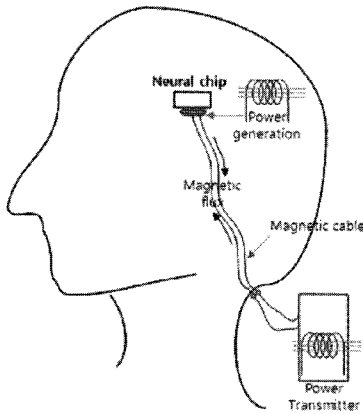


그림 25 인체용 무선전력전달 기술

이에 필요한 전기에너지 문제는 아직 제대로 해결되지 않고 있다. 이 때문에, 체내이식한 배터리가 방전되면, 단지 배터리 교체 때문에 외과수술을 해야 하는 경우도 발생하고 있다.

그림 25와 같이 체내 또는 체외부착 의료장비에 무선으로 전력을 전달하려면, 자기장의 인체 유해성 문제가 해결되어야 한다. 자기장의 인체부위별 영향이 아직 명확히 밝혀지지 않았기 때문에, 이에 대한 객관적인 기초연구도 필요하다. 자장을 효과적으로 차폐할 수 있는 기술이 필요하다. 또한 인체에 삽입하기 위해서는 집진코일을 포함한 임플란트 장치의 크기가 최소화되어야 한다. 그리고 체내에서 집진시 발생하는 발열 문제 또한 해결되어야 할 과제다.

5. 결론

무선전력전송기술은 움직이는 전자장치에 효과적으로 에너

지를 공급할 수 있는 방법이다. 현재 세계적으로 여러 국가에서 대학과 기업들이 활발히 연구에 나서고 있으나, 국내에서도 온라인 전기자동차나 자기공명식 휴대기기 충전장치, 비접촉 공장 물류자동화 등에 있어서 세계적인 수준의 기술을 보유하고 있어서 충분히 경쟁력이 있다고 판단된다. 향후 경전철, 고속전철, 특수 비행기와 배, 공항과 물류기지, 지상 및 수중로봇, 휴대기기와 의료장비 등으로 이 기술이 확대 적용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] C.T. Rim, "What are the issues of Wireless Power Transfer?", Proceedings of the International Workshop on EEWS 2010.
- [2] PATH team, "Roadway Powered Electric Vehicle Project Parametric Studies: Phase 3D Final Report," California Partners for Advanced Transit and Highways Research Report, Oct. 1996.
- [3] J. Huh, E. H. Park, G. H. Joung, C. T. Rim, "High efficient inductive power supply system implemented for On Line Electric Vehicles," 2009 KPES pp.159-163, Nov. 2009.
- [4] N. P. Suh, D. H. Cho, C. T. Rim, "Design of On-Line Electric Vehicle (OLEV)," Plenary lecture at the 2010 CIRP Design Conference, April 2010.
- [5] J. Huh, S. Lee, C. Park, G.H. Cho, and C.T. Rim, "High Performance Inductive Power Transfer System with Narrow Rail Width for On-Line Electric Vehicles," in IEEE Energy Conversion Congress & Expo, 2010, accepted.
- [6] 서남표, 조동호, 조규형, 임춘택, 조정구, "전기자동차용 초박형 급전장치와 집전장치" 대한민국 특허, 출원번호 10-2009-0029671, 2009. 4. 6.

〈 필 자 소 개 〉



임춘택(林春澤)

1963년 2월 11일생. 1984년 기술고등고시 합격. 1987년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 졸업(공학박). 1989년~1995년 국방부 대위. 1995년~2003년 ADD 선임연구원. 2003년~2007년 청와대 행정관. 2007년~현재 KAIST 원자력 및 양자공학과/항공우주공학과(겸) 부교수.