

# 자기유도방식과 LC공진을 이용한 무선전력전송기기

## Wireless Power Transmission using Electromagnetic Inductive Coupling and LC Resonant

이 승 환\* · 김 현 민\*\* · 김 희 제\*\*\* · 김 수 원†

(Seung-Hwan Lee · Hyoen-Min Kimm · Hee-Je Kim · Su-Weon Kim)

**Abstract** - Wireless power transmission introduced by Tesla has instrumented by many scientists of the world. This technique first was utilized as wireless communications such as radio in long range transmission. And contactless transmission using inductive property was used on white goods. In 2007, MIT' lab introduced that new wireless power transmission by magnetic resonance which has about 50% efficiency and 2M transmission distances, it was a chance to refocus a new possibility of wireless power transmission. In this paper, using LC coupling compensate the short distances of contactless transmission, this simple method could transmit about 30cm distances. Using this approach, it can be solved the short transmission distances, a drawback of Electromagnetic inductive coupling method.

**Key Words** : Wireless power transmission, LC coupling, Electromagnetic inductive coupling, Resonant frequency

### 1. 서 론

테슬라는 1899년 무선 전신 시스템을 개발하기 위해 콜로라도에서 무선 전송 장치를 개발하게 되는데, 이것이 무선 전송 시스템의 시작으로 이후 세계의 많은 연구진에 의해서 연구가 진행이 되었고, 아직도 진행 중인 전력 전송의 꿈의 기술이다[1]. 이후, 1970년대에는 나사에 의해 진행된 에너지 전송은 우주공간에 설치된 태양전지 판에 의해 생성된 DC 전압을 마이크로파 전력으로 변환시켜 지상 공간으로 복사하고 지상에서 다시 마이크로파 전력을 DC전압으로 변환시켜 에너지원으로 이용하는 것으로 현재까지 지속적으로 연구가 진행이 되고 있다[2]. 2007년 MIT의 물리학과와 마린 소라치치(Marin Solijacic)교수팀에서 제안한 비방사(non-radiated)를 이용한 새로운 방식의 에너지 전송을 제안하고, 60W의 파워를 13.54Mhz대역에서 2m의 거리까지 50%의 효율로 에너지를 전송을 시연하였다[3, 4]. 이 새로운 에너지 전송 방식은 가정과 같은 소규모 실내 전력 시스템의 변화 가능성을 제시하면서 무선전력전송의 새로운 계기가 되었다. 하지만 자기 커플링을 형성하기 위해서는 복잡한 수식인한 재현성의 어려움과 지름 60cm 정도의 송/수신 중계 안테나가 추가로 시스템의 규모가 크다는 단점이 있다. 그리하여 본 논문에서는 LC 공진을 이용하여 수십 khz대역에서 무선 전송을 시도하였으며, MIT 랩보다 전송거리는 짧지만, 시스템이 간단하고, 재현성이 좋은 장점이 있다. 이 기술의

전송거리는 20~ 40cm 정도로 건물의 벽물의 벽에 두고 전송할 수 있는 가정용 태양열 발전 시스템, 차량용 무선 충전 장치, 모바일 핸드폰 같은 근거리용 무선충전기에 사용할 수 있을 것이다.



그림 1 무선 전력 송신의 응용 분야 (출처, 무선 전력 전송 기술 개발 및 표준 동향 2011.6.10.)

Fig. 1 Application of wireless power transfer.

### 2. 본 론

여기에서 사용된 무선 전송 방식은 비(非)접촉 방식과 LC 공진을 사용한 비방사형 무선 전력 전송 방식으로 비접촉식(수 cm 내외)보다는 더 멀리까지 전력을 수송을 할 수 있다. 비접촉식 전력 송신 방식과 LC공진 전력 송신 방식을 간단히 소개를 하면, 비접촉식 무선 전력 송신은 인덕턴스의 커플링을 이용한 방식으로 현재 Powercast, Philips 등의 많은 회사에서 제품을 만들어 실용화가 되었으며, 보통 125khz ~ 135khz에서 동작을 한다. 비접촉식은 전송 거리가 짧아 현재 전기면도기, 모바일 폰 무선 충전기 등에서 사용되고 있다[6, 10, 11].

\* Dept. of Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University

\*\* Dept. of Interdisciplinary Program in Robotics, Pusan National University

\*\*\* Electrical Engineering, Pusan National University

† Corresponding Author : Electrical Engineering, Pusan National University

E-mail : pusannu@naver.com

Received : October 4, 2012; Accepted : January 30, 2013



그림 2 TI의 새로운 무선전송 충전키트. 비접촉 방식을 사용한 제품.

Fig. 2 A new contactless charging kit from TI uses eCoupled technology to create a wireless power source

근거리 전송은 자기 공명 방식을 이용하여 비방사형으로 전력 무선 전송 방식으로 2007년 MIT의 마린 소라치치 교수팀에서 제안을 하였다. 이 기술은 수십 W를 2M까지 전송을 하면서 근거리 전송의 새로운 패러다임을 제시했다. 가정과 같은 소규모 전력 시스템에서 무선을 사용하여 전력을 전송할 경우 더 이상 전선이 필요가 없게 되는 새로운 전력 시스템을 제시했다. 현재 많은 연구진이 이 기술을 2015년 까지 개발을 하기 위해서 매진을 하고 있다.

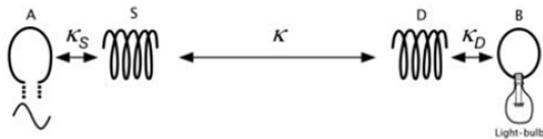


그림 3 MIT팀에서 제시한 커플 코일을 이용한 비방사형 자기 공진 방식의 무선 전력 전송 시스템.

Fig. 3 Using self-resonance Wireless Power Transmission system proposed by MIT

MIT에서 제시한 방식은 위의 그림 3과 같이 자기 공명을 이용한 비방사형 방법으로 추가적인 송/수신 코일을 이용하여 강력한 자기 공진을 일으켜 전력을 전송을 시키는 방법이다. 이런 강력한 커플링을 만들기 위해서는 아래와 같은 수식이 필요하며, 아래의 조건 식(1)을 만족할 때 강력한 자기 커플링을 발생하여 전력을 수송할 수 있다.

$$\frac{\kappa}{\sqrt{\Gamma_S \Gamma_D}} \gg 1 \quad \text{regime of strong coupling} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\Gamma_W |a_D|^2}{\Gamma_S |a_S|^2 + (\Gamma_D + \Gamma_W) |a_D|^2} \quad (2)$$

$$= \frac{\frac{\Gamma_W}{\Gamma_D} \frac{\kappa^2}{\Gamma_S \Gamma_D}}{\left[ \left( 1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D} \right) \frac{\kappa^2}{\Gamma_S \Gamma_D} \right] + \left[ \left( 1 + \frac{\Gamma_W}{\Gamma_D} \right) \right]}$$

이 시스템의 전력 전송의 효율은 식(2)와같이 나타난다. 이 시스템은 50%정도의 효율로 60W 전력을 2m까지 전송을 하는데 성공했지만, 거리에 따른 공진강도 Q 설정하여 자기 공명을 시키기 위해서는 많은 복잡한 과정을 거쳐야 되어 재현의 어려움이 있다.

## 2.1 시스템 구성

그래서 본 논문에서는 자기유도 방식과 간단한 LC공진을 이용한 근거리용 무선 전력 시스템을 제안한다. 시스템은 간단히 송신부와 수신부로 구성되며, 송신부는 풀 브리지(Full bridge circuits) 회로를 사용하였으며 스위치 드라이버는 IR215x 계열을 사용하여 병렬 LC공진을 유도하였다. 인덕턴스와 커패시턴스의 공진 주파수를 20~30kHz로 설정하여 커패시터와 인덕턴스의 값을 계산했다. 그리고 수신부는 정류회로를 거쳐 커패시터에 충전하는 간단한 구조로 되어 있다.

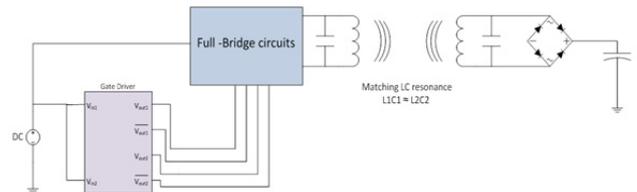


그림 4 무선전력전송 시스템 개략도

Fig. 4 Schematic of Wireless Power Transmission system

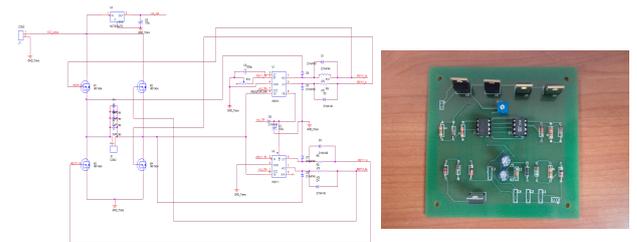


그림 5 무선 전력 송신부회로 도면과 실장 회로

Fig. 5 Transmitter of wireless power transmission system

송신부의 시스템을 회로도(그림 4)를 보며 간단히 소개하자면, 입력 전원은 전원공급 장치를 사용하였고, 스위치는 모스펫 IRF1404를 사용하였고, 스위칭 드라이버는 IR2151, IR2111를 사용하여 구성을 하였다. 그리고 LC 공진을 설정하기 위한 커패시턴스 값 설정과 주파수 설정을 위한 장치를 추가하였다.

## 2.2 무선전력전송 실험

### 2-2-1 LC 공진 주파수와 전송 거리와의 상호 인덕턴스 관계

비접촉식 전송 방식은 인덕턴스를 이용한 전력 전송이하면, 이는 트랜스포머 특성을 따를 것을 보이며 이를 알아보는 실험을 진행을 하였다. 100kHz, 1V에서 인덕터의 거리에 따른 인덕턴스 값 변화를 측정하였다. 총 4가지의 인덕터 샘플로 측정을 하였으며, 결과는 아래의 그림과 같다. 그림 5와 같이 인덕터의 인덕턴스 값은 역 이크스포넨셜 그래프와 같이 거리에 따라서 감소하며 일정 거리 이후에는 상호작용이 나타나지 않는 것이 보인다. 이 거리는 보통 6~10cm 사이로 이점까지는 트랜스포머의 특성이 보이지만 그 이상이 되면 트랜스포머의 특성을 잃어버려 더 이상 에너지를 2

차 측으로 보낼 수가 없는 상태로 바뀔 것으로 보인다. 실험 측정 결과도 이와 같이 나오는 것을 알 수 있을 것이다.

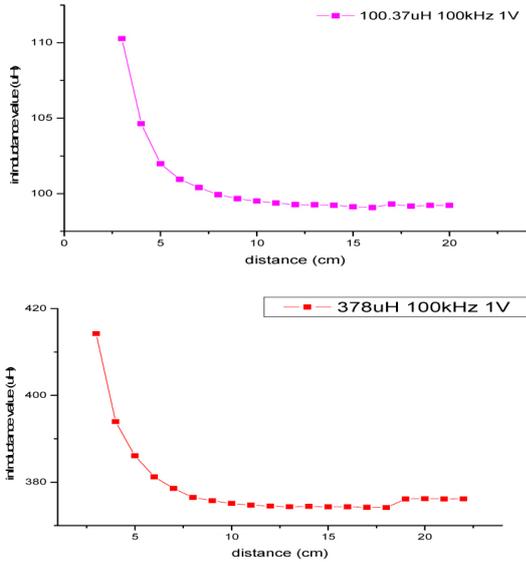


그림 6 거리에 따른 인덕턴스 값의 변화 I  
Fig. 6 Values of inductance change according to distance I

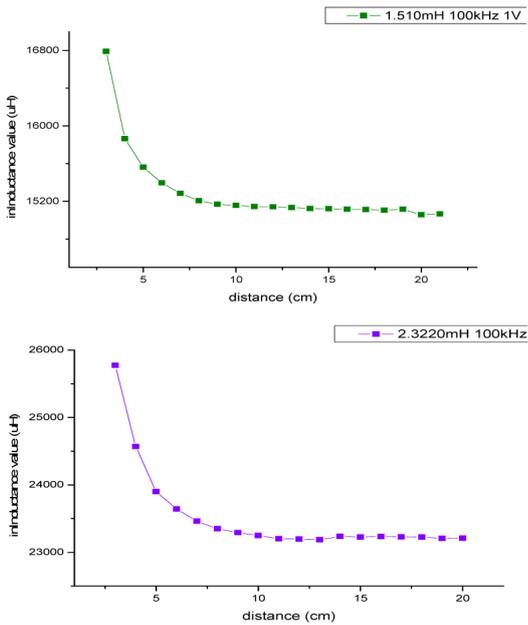


그림 7 거리에 따른 인덕턴스 값의 변화 II  
Fig. 7 Values of inductance change according to distance II

2.2.2 주파수 변화에 따른 2차측 전압, 전류의 변화

다음 실험은 1차 측의 풀 브리지 드라이버 스위치 주파수를 변경하여 인덕턴스와 커패시터간의 주파수 관계를 알아보고, 이때 2차 측에 전송되는 전압과 전류를 측정하여 입력 전력과 비교하면서 공진 주파수와와의 관계를 알아보는 실험이다. 인가전압은 전원공급 장치로 15.5V를 인가했으며, 2차

측 부하는 LED 사용하였으며, 전류 측정을 위해 LED 부하 밑에 직렬로 1kΩ를 달아 양단의 전압을 측정하였다. 거리는 5, 10, 15, 20cm로 변경을 하면서 1차 측 입력 파워 변화와 2차 측 전압과 전류를 측정하였다.

아래의 그림 8, 9에서 보여주듯이 특정 주파수에서 출력 전력이 가장 높게 나타나며 이는 이상적인 정규분포의 모양

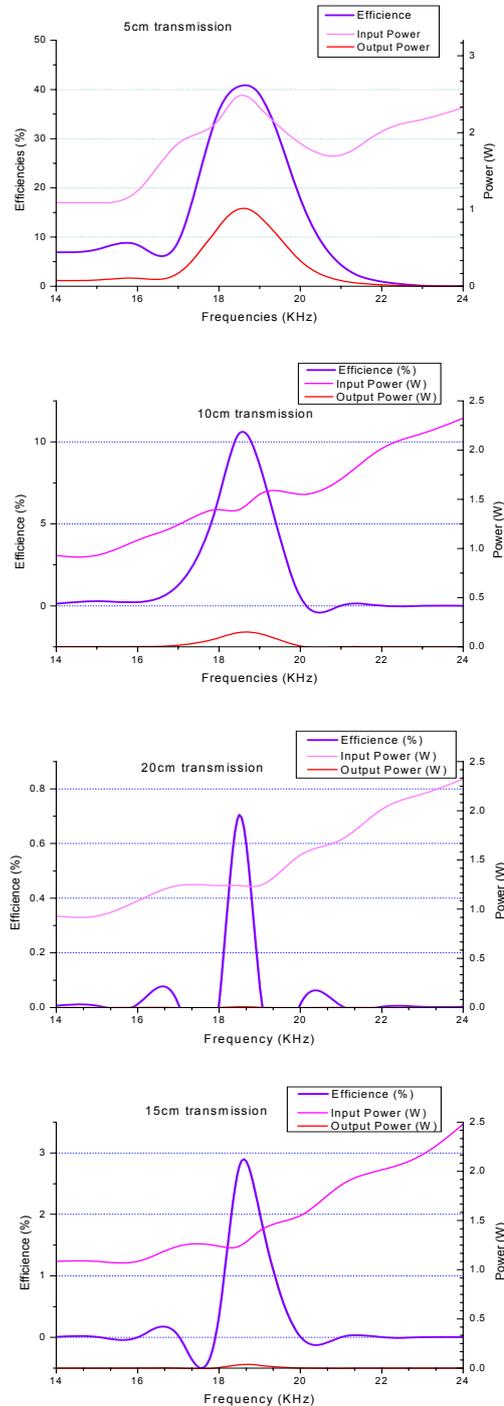


그림 8 특정거리에서 주파수 변화에 따른 전송 효율의 변화 그래프  
Fig. 8 Changed graphs according to variable frequencies in particular distances

의 따른다. 이 구간이 LC 공진 주파수 구간으로 상대적으로 거리가 먼 15cm, 20cm 구간에서는 공진 영역이 특징이 더 잘 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 2차 측으로 전력을 송신 할 때 입력 측 전력보다도 공진 주파수를 맞춰서 전송을 하는 것이 더 효과적이라는 것을 알 수 있으며, 이 때 전력의 효율이 올라가는 것을 알 수 있다. 따라서 효율을 위해서라면 공진 주파수 근처에서 드라이버 스위치 주파수를 동기화시켜야 된다.

위의 결과를 더 자세히 보기 위해서 입력 파워와 주파수와의 관계(그림 8 좌) 출력 전압의 그래프(우) 다시 정리하였다. 그림 8과 같이 특정 주파수에서는 입력 전력이 낮아지며 반대로 출력 전압이 높게 나오는 것을 알 수 있다. 이 주파수 대역이 LC 공진 지점이며, 이때 작은 전력으로 가장 많은 전압을 전송을 할 수 있으며, 이때 효율이 가장 높다.

그림 8의 우측 그래프에서 보면 출력 전압은 5cm, 10cm의 경우 트랜스포머와 같이 주파수가 낮을수록 전류가 많이 흘러 입력 측 전류가 많이 흘러 출력 측 전압이 많이 나오는 것을 알 수 있다. 하지만 15cm 이상에서는 입력 측 주파수가 낮아 전류는 많이 흐르지만 전송은 되지 않아 출력 측 전압이 나오지 않는 것을 알 수 있다. 이것으로 보면 무선

전송에서는 입력 측 전력도 중요하지만 송신부와 수신부의 공진 주파수대역에서의 전송이 입력 전력보다 더 상관관계가 높다는 것을 알 수 있다.

### 2.2.3 송/ 수신 공진 주파수 결정

위의 실험에서 공진 주파수의 중요성을 알았으며, 이를 설정하는 실험을 진행을 하였다. 기본적으로 우리가 아는 공진 주파수의 식은 다음과 같다.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3)$$

위의 식으로 1차 측과 2차 측 인덕턴스와 커패시턴스의 공진 값을 일치시키고 실험을 진행했다. 실험에서 사용된 송신부 커패시터와 인덕터의 값은 220nF, 378.78uH이며, 수신부의 값은 47nF, 1.51mH를 사용하였다. 위의 식으로 계산을 하면 공진 주파수( $f_c$ ) 17.45 khz이며 이 식이 맞는지 확인을 하는 실험을 하였다. 아래의 표 1은 실험 데이터를 정리한 표이다. 이때 입력은 전원공급 장치를 사용하였고, 전압은 15.5V, 전류는 가변으로 하고 측정을 하였다.

표 1 거리와 주파수 변화에 따른 입/출력 전력의 변화  
Table 1 variable input/output power according to changing distances and frequencies

Distance (cm)	5cm			10cm		
	input Power(W)	output power(W)	효율	input Power(W)	output	효율
14	1.085	0.0152	0.13%	0.93	0.00120	0.13%
15	1.085	0.0163	0.28%	0.93	0.00263	0.28%
16	1.24	0.0198	0.23%	1.085	0.00255	0.23%
17	1.86	0.0316	1.26%	1.24	0.01568	1.26%
18	2.17	0.0391	6.65%	1.395	0.09280	6.65%
18.5	2.48	0.0459	10.51%	1.395	0.14665	10.51%
19	2.325	0.0442	8.59%	1.55	0.13320	8.59%
20	1.86	0.0372	0.55%	1.55	0.00851	0.55%
21	1.705	0.0358	0.01%	1.705	0.00019	0.01%
22	2.015	0.0443	0.00%	2.015	0.00009	0.00%
23	2.17	0.0499	0.00%	2.17	0.00006	0.00%
24	2.325	0.0558	0.00%	2.325	0.00006	0.00%
Distance (cm)	15cm			20cm		
	input Power(W)	output power(W)	효율	input Power(W)	output	효율
14	1.085	0.00008	0.01%	0.93	0.00006	0.01%
15	1.085	0.00008	0.01%	0.93	0.00006	0.01%
16	1.085	0.00000	0.00%	1.09	0.00013	0.01%
17	1.24	0.00030	0.02%	1.24	0.00015	0.01%
18	1.24	0.00432	0.35%	1.24	0.00017	0.01%
18.5	1.24	0.03456	2.79%	1.24	0.00875	0.71%
19	1.395	0.02816	2.02%	1.24	0.00100	0.08%
20	1.55	0.00015	0.01%	1.55	0.00018	0.01%
21	1.86	0.00007	0.00%	1.71	0.00011	0.01%
22	2.015	0.00007	0.00%	2.02	0.00006	0.00%
23	2.17	0.00007	0.00%	2.17	0.00006	0.00%
24	2.48	0.00007	0.00%	2.33	0.00006	0.00%

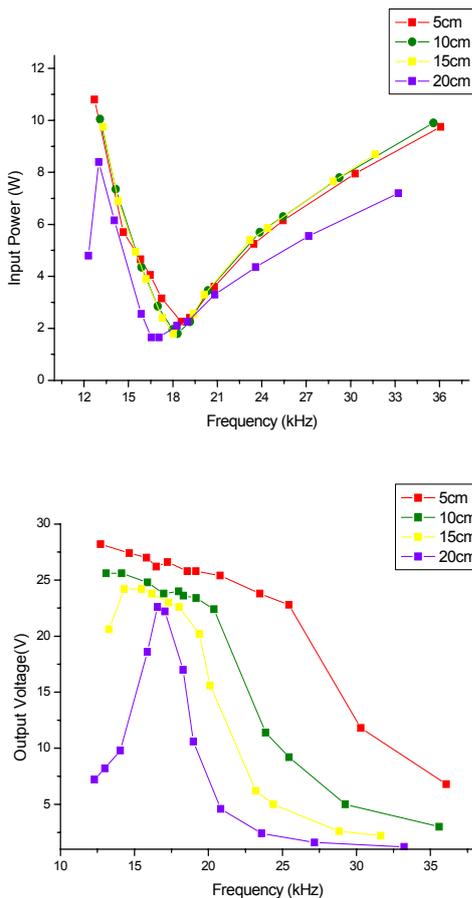


그림 9 주파수 변화에 따른 입력과 출력 전압의 변화. 입력 전압 변화(상), 출력 전압 변화(하)

Fig. 9 Variable Voltages of input and output according to changing frequencies. changes of input Voltages (top), changes of output Voltages (bottom)

표 1에의 실제 공진 주파수는 18.5KHz로 계산한 값인 17.45khz와는 다른 결과를 보였다. 전송 주파수에 따라서 입력측 전류 값과 출력측 전압·전류 값이 바뀌는 것을 알 수 있으며, 입력 파워가 많이 들어갈수록 출력 파워가 많이 나오지 않는 것으로 보아 입력파워와 출력파워의 상관관계는 주요한 관계는 아닌 것으로 보인다. 위의 표의 분홍색으로

표시된 부분은 공진 주파수 대역의 입력 출력 관계를 보여 주며, 이때 가장 효율이 좋고 전송이 잘되는 것을 알 수 있다. 아래의 그림 8은 거리에 따른 전송 효율을 나타낸 것이다. 전송 거리와 효율은 아주 밀접한 관계를 가지고 있었다. 전송 거리가 5cm일 때 40.65%로 가장 좋았으며, 거리가 멀어짐에 따라 급격하게 줄어드는 것을 알 수 있었다. 그리고 그 효율 곡선은 그림 5의 거리에 따른 상호인덕턴스변화의 그래프와 유사한 형태를 이루고 있었다. 이로 보아 코어를 사용한 무선 전력 전송은 코어의 상호 인덕턴스와 밀접한 관계를 가지고 있다고 생각되며, 이는 크기가 크고 자기력이 강한 코어를 사용하면, 전송 거리와 효율이 더 좋아 질 수 있다는 것을 의미한다. 그리고 자기력은 전류와 밀접한 관계를 가지므로 입력 측 전류가 올라갈수록 자기력이 올라가 전송 거리가 증가할 것으로 보인다.

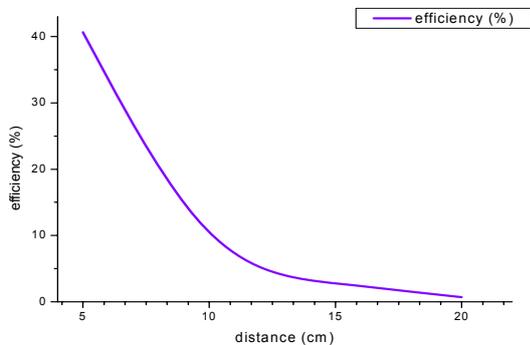


그림 10 전송거리에 따른 전송 효율 그래프  
**Fig. 10** Transmitted Efficiency graph according to Transmitted Distances

### 3. 결 론

본 논문은 풀 브리지회로를 이용하여 송신기를 만들어 송신부와 수신부의 LC공진 주파수 매칭(matching)을 하고 풀 브리지의 드라이버 스위치 주파수를 조정하면 공진 점에서의 전력 전송의 에너지 효율이 높아진다는 것을 알 수 있었다. 이것은 또한 수십 mm정도의 전송 거리를 가지는 자기 유도 방식의 한계를 20cm 이상 보낼 수 있는 방법을 제시했으며, 자기 유도 방식에도 공진을 이용하면 효율과 거리를 더 증가 시킬 수 있는 것을 알았다. MIT에서 제시한 송/수신을 위한 증계코일을 이용한 방법보다 간단히 만들 수 있는 장점이 있으며, 재현성도 상당히 높다. 하지만 아직 전송 거리와 효율에서는 많이 차이가 나며 아직 보완할 부분이 많이 남아있다. 자기 코어를 사용한 무선 전력 전송은 자기 코어의 특성과 밀접한 관계를 가지고 있다는 것을 알았으며, 특성이 좋은 자기 코어를 사용하면 전송거리와 효율이 증가할 것이다. 하지만 특성이 좋은 코어는 가격이 높아 가격경쟁력이 떨어진다. 그래서 다음시험에는 이것을 보완하여 공심 코어를 이용한 무선전력전송을 하여 지금보다 높은 전류와 전력을 이용하여 50W~ 100W급 무선전력전송을 진행하여 위의 시스템을 보완할 계획입니다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부정보통신산업진흥원 융복합로봇전문인력양성 특수환경 Navigation/ Localization 로봇기술연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2012-H1502-12-1002)

### References

- [1] N. Tesla, Apparatus for transmitting electrical energy, US patent number 1,119,732, issued in December 1914.
- [2] G. A. Landis, "Applications for Space Power by Laser Transmission," SPIE Optics, Electro-optics & Laser Conference, Los Angeles CA, 24 - 28 January 1994; Laser Power Beaming, SPIE Proceedings Vol. 2121, 252 - 255.
- [3] Aristeidis Karalis, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer" annals of physics 323(2008) pp 34-48
- [4] M. Soljacic, Andre Kurs, Aristeridis Karalis "wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances" Science 317 (2007) pp 83-86
- [5] Rohan Bhutkar, Sahil Sapre, "Wireless Energy Transfer Using Magnetic Resonance", IEEE Computer society, pp. 512-515, 2009.
- [6] 김정호, 장병준, 안준오, "무선전력전송 기술개발 및 표준화 동향", 한국전파진흥협회 6.10. 2011.
- [7] Hirohito Fnato, Yuki Chihu, Kenichi Harakawa, "Wireless Power Distribution with Capacitive Coupling Excited by Switched Mode Active Negative Capacitor", Electrical Machines and System (ICEMS), pp.117-122, 2010.
- [8] Joaquin J. Casanova, Zhen Ning Low, Jenshan Lin, and Ryan Tseng, "Transmitting Coil Achieving Uniform Magnetic Field Distribution for Planar Wireless Power Transfer System", Radio and Wireless Symposium, IEEE, pp.530-533, 2009.
- [9] Benjamin L. Cannon, James F. Hoburg, and Seth Copen Goldstein, "Magnetic Resonance Coupling As a Potential Means for Wireless Power Transfer to Multiple Small Receivers", IEEE Transactions on Power electronics, vol. 24, No.7, pp.1819-1829, 2009.
- [10] Seungyoung Ahn and Jongho Kim, "Magnetic Field Design for High Efficient and Low EMF Wireless Power Transfer in On-Line Electric Vehicle", Antennas and Propagation (EUCAP), pp.3979-3982, 2011.
- [11] 김진성, 박관수, "자기 유도방식을 이용한 550VA급 비접촉 전력전송기기 개발", Journal of the Korean Magnetics Society, Volume 22, Number 3, June 2012

## 저 자 소 개



### 이 승 환 (李丞桓)

부산대학교 학사(전기전자)  
現)부산대학교 석사과정  
(로봇관련협동과정)



### 김 현 민 (金珉珉)

인제대학교 학사(전기전자)  
現) 부산대학교 석사과정  
(로봇관련 협동과정)



### 김 희 제 (金熙濟)

부산대학교 학사 (전기공학)  
부산대학교 석사 (전기공학)  
규슈대학교 박사 (에너지 공학)  
한국전기연구원 선임연구원  
現) 부산대학교 교수(전기공학)



### 김 수 원 (金壽源)

부산대학교 전기공학과 졸업  
부산대학교 전기공학과 석사졸업  
現) 부산대학교 박사과정 (전기공학)