

# 투명 전극을 적용한 유리 유전체 커패시티브 커플링 무선 전력 전송에 관한 연구

이강현†

## Research on Glass Dielectric Capacitive Coupling Wireless Power Transfer Using Transparent Electrode

Kang-Hyun Yi†

### Abstract

This paper tests the feasibility of using the transparent electrode as the electrode of the capacitor in order to use the vehicle glass of the electric vehicle for a capacitive coupling wireless transfer (CCWPT). Large coupling capacitance can be obtained due to large area and high permittivity using the glasses of an electric vehicle. However, if an electrode is formed on a metal such as copper, then a view cannot be guaranteed and a transparent electrode can pose a solution. Therefore, the coupling capacitor is implemented by forming a glass dielectric with an ITO transparent electrode on one side through a semiconductor deposition process. The loss of the coupling capacitor is investigated, and a 200 W CCWPT prototype is fabricated and tested for its characteristics and power transfer.

**Key words:** CCWPT(Capacitive Coupling Wireless Power Transfer), Glass dielectric layer, Transparent electrode, Dielectric loss

### 1. 서 론

최근 IoT(Internet of Thing) 기기, 스마트 폰, 전기 자동차 등 배터리를 사용하는 전자기기들이 증가함에 따라, 충전의 편의성을 높이기 위한 연구가 진행되고 있다. 무선 전력 전송을 이용한 충전이 가장 사용자 편의성이 우수할 것으로 예상된다<sup>[1]</sup>. 이러한, 무선 전력 전송은 자기장을 이용하는 방법과 전기장을 이용하는 방법으로 구분할 수 있다. 자기장을 이용하는 인덕티브 커플링 방식은 코일에 생성되는 자기장을 이용한 전력 전달 방식으로 효율이 높고 상용화가 이루어졌으나, 대용량 전송 시 전자기파 노이즈, 금속에 대한 영향성, 위치 변화에 따른 에너지 전송효율 변화가 크다는 단점을 가지고 있다. 반면, 전기장을 이용하는 커패시티브 커플링 방식

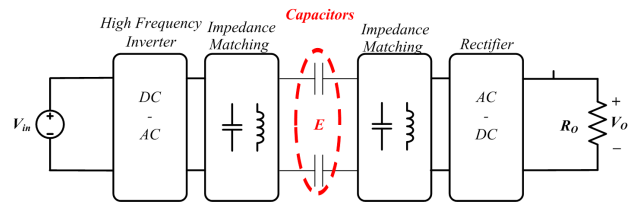


Fig. 1. Simple structure of the capacitive coupling wireless power.

은 유전체에 전극을 형성하여 전력을 전달하는 방식으로 전력 전송 자유도는 부족하지만 전기장을 이용하는 방식이기 때문에 인덕티브 방식에서 나타내는 문제점을 최소화시킬 수 있다<sup>[2]-[4]</sup>.

전기장을 이용한 커패시티브 커플링 무선 전력 전송 (Capacitive Coupling Wireless Power Transfer, CCWPT) 방식은 그림 1과 같이 공급된 DC 전압을 인버터를 통한 전력변환과 임피던스 매칭을 통해 1차 측으로 전달된다. 1차 측으로 전달된 에너지는 전기장의 형태로 2차 측으로 전달되고 전달된 에너지는 다시 임피던스 매칭과 정류기를 통해 사용되는 기기 충전을 위한 전력에너지로 변환된다<sup>[4]</sup>. 기존의 자기장을 이용한 무선

Paper number: TKPE-2018-23-4-8

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

† Corresponding author: khyi@daegu.ac.kr, School of Electronic and Electrical Engineering, Daegu University  
Tel: +82-53-850-6652 Fax: +82-53-850-6619  
Manuscript received Mar. 5, 2018; revised Apr. 10, 2018; accepted May 9, 2018

TABLE I  
RELATIVE PERMITTIVITY OF ACCORDING TO  
MATERIAL IN AN ELECTRIC DEVICE'S EXTERIOR

Material	Relative permittivity
Air	1.0005
Glass	4 - 7
Polypropylene	2.2~2.4
ABS Resin	2.3~2.5

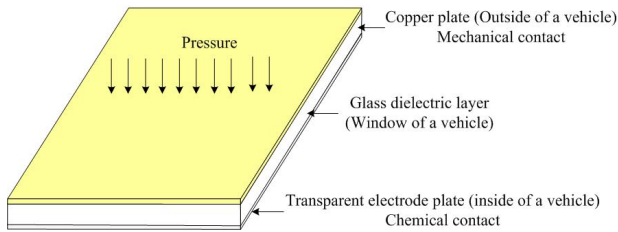


Fig. 2. Coupling capacitor implementation in a vehicle.

전력 전송 가운데, 전기자동차 충전을 위한 대 전력 전송을 위해 유리를 이용하여 커플링 커패시터를 얻었다. 하지만 구리동판을 이용하여 시야를 확보할 수 없는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 가시성 확보가 가능한 전극을 이용하여야 한다. Indium Tin Oxide (ITO) 투명전극은 통상 80% 이상의 높은 투명도와 면저항  $500\Omega/m^2$ 이하의 전도도를 가지는 전자 부품으로 LCD 전면 전극, OLED전극 등 디스플레이 터치스크린과 같이 가시성 확보가 필요한 응용분야에 많이 사용되고 있다<sup>[5]</sup>. CCWPT 시스템에도 투명전극을 이용하여 커플링 커패시터를 형성하면 시야를 확보할 수 있다.

본 논문은 투명전극을 이용한 커패시티브 커플링 무선전력전송에 관한 연구이다. 앞서 언급한 시야 확보의 문제점을 해결하기 위하여 가시광 영역에서 높은 투과율과 높은 전도도를 가지는 투명전극을 이용한다. 투명전극을 이용한 무선전력전송이 가능함을 검증하기 위하여 동일한 크기와 두께의 유전체에 동판과 투명전극을 이용하여 커플링 커패시터를 구성하였다. 투명전극의 경우 유리에 증착 반도체 공정 장비를 통하여 두께 10 Å로 증착하였으며 200W급 송 수신 회로를 제작하여 실험 하였다. 실험 결과를 통해 투명전극을 이용한 전력 전달이 가능함을 검증 하였으며 커패시티브 커플링 무선전력전송 방식을 이용한 다양한 응용분야에 사용 가능함을 보였다.

## 2. CCWPT 커패시터스

### 2.1 커플링 커패시터스 형성

표 1은 전자 장치의 외관을 형성하는 재료의 상대 유전율이다. 자동차의 전조등의 범퍼 또는 플라스틱 외장이나 주요 가전 기기의 외장은 폴리프로필렌 또는 ABS 수지로 만든다. 주목할 만한 재료는 자동차의 창이나 일

부 전자 장치에서 사용하는 유리이다. 표 1에서 볼 수 있듯이, 유리는 가장 큰 비유전율을 가지며 자동차의 유리에 전기장을 이용한 무선 전력 전송 시스템을 구현하는 경우 앞·뒤 유리창의 면적이 크기 때문에 큰 커플링 커패시터를 얻을 수 있다<sup>[4]</sup>. 예를 들어 자동차에 커플링 커패시터를 형성한다면, 그림 2와 같이 차량 외부의 한쪽 전극은 동판(copper plate)을 이용하고, 다른 쪽은 자동차를 충전하지 않을 때 가시성을 확보 할 수 있도록 투명한 전극으로 형성한다. 전기 자동차를 충전할 시 동판은 앞뒤의 창문 유리에 기계적으로 동판 전극을 접촉시키고 차량의 전방 및 후방 유리에 이미 반도체 공정을 통해 형성된 ITO 투명 전극을 통해 커플링 커패시터스가 형성된다. 이렇게 하면, CCWPT를 이용한 무선 충전도 가능하고, 가시성이 확보된 커플링 커패시터를 얻을 수 있다.

### 2.2 커플링 커패시터스의 손실

이상적인 커패시터 경우 에너지의 손실이 없는 소자이다. 참고문헌 [6]에 의하면, 커패시터에서 발생하는 손실은 도통 손실과 유전손실의 합으로 정의 할 수 있다. 전극에서 발생하는 도통 손실은 전극의 저항으로 볼 수 있다. 전극의 저항은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{copper} = \frac{1}{\sigma_c} \frac{b}{a} \quad (1)$$

위의 수식에서  $\sigma_c$ 는 전극 도체의 전도도이고, b는 도체의 두께 a는 전극의 면적이다. 유전 손실은 유전 분극으로 인한 유전체 내에서 발생하는 전력손실을 말한다. 유전체 재료의 손실을 나타내는 저항은 커패시터스와 dissipation factor를 사용하여 표현될 수 있고 dissipation factor는 물질에 의해서 정해지며 유전체 손실 저항은 식(2)와 같이 정해진다.

$$R_D = \frac{\tan\theta}{Cw} \quad (2)$$

위의 수식에서  $\tan\theta$ 는 dissipation factor이고, C는 커플링 커패시터스 w는 동작 주파수를 의미한다. 커플링 커패시터스의 기생 직렬 저항은 전극에 의한 도통 손실 저항과 유전체 손실 저항의 합으로 나타나며 저주파 동작에서는 참고문헌 [6]에서도 연구된 것처럼 유전 분극에 의한 유전체 손실 저항이 대부분을 차지한다.

## 3. 실험 결과

투명 전극을 통하여 커플링 커패시터를 형성하고, 전력이 전달됨을 확인하기 위하여 프로토타입을 제작하여 실험을 수행하였다. 유전체는 유리를 사용하였다. 특성

TABLE II  
PARAMETERS OF EXPERIMENT

Parameter	Value	Parameter	Value
$V_s$	200V	$L_r$	152uH
$P_o$	200W	$C_{c\_ITO}$	1.1151nF
$F_s$	126kHz	$R_{esr\_ITO}$	26.3Ω
$L_{m1}$	86m	$C_{c\_Cu}$	1.0798nF
$L_{m2}$	1000uH	$R_{ser\_Cu}$	27Ω
$n_1$	1/2.8	$n_2$	2.8/1

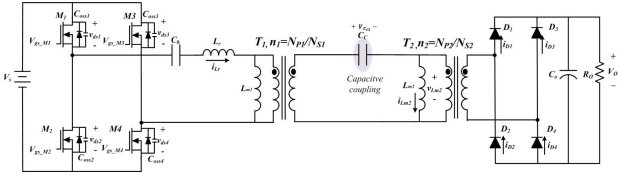


Fig. 3. Circuit diagram used in a prototype.

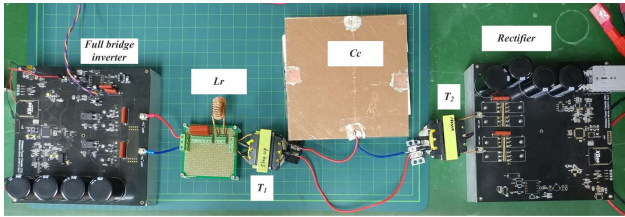


Fig. 4. Experimental set.

비교를 위하여 동판 전극과 투명 ITO 전극을 이용한 2 가지 커플링 커패시터를 제작하였다. 실험에 사용한 전력 변환 회로는 참고문헌 [4]에서 제안된 회로에서 그림 3과 같이 커플링 커패시터를 하나만 사용하였다. 실험 세트 사진은 그림 4이며, 스위치와 다이오드는 PCB 후면에 배치하였다. 표 2는 실험에 사용한 주요 값이다. 커플링 커패시터와 기생 직렬 저항은 LCR 미터로 측정된 결과이다. ITO 전극과 동판 전극을 이용하여 얻은 커패시터와 기생 직렬 저항은 거의 유사함을 알 수 있다. ITO 전극을 이용한 실험 파형은 그림 5와 같다. 부하에 따라서 동작 파형을 살펴보면 ITO 전극으로 커플링 커패시터를 형성한 CCWPT 시스템도 정상 동작을 확인할 수 있다. 동작 주파수가 125kHz인 경우 직렬 기생 저항이 매우 크다. 전극에서 발생하는 도통 손실 저항과 유전체 손실 저항의 합의 변화를 살펴보기 위해 주파수에 따른 기생 직렬 저항을 LCR 미터로 100kHz에서 10MHz까지 측정을 했다. 그림 6에서 보듯이 참고문헌 [6]에서 연구한 결과와 동일하게 전극의 도통 손실이 더 커지기 전까지의 주파수가 증가함에 따라 기생 직렬 저항이 감소하게 됨을 확인할 수 있다. 이는 저주파 동작에서는 전극의 도통 손실에 의한 저항 성분보다 유전체 분극에 의한 유전체 손실 저항 성분이 더 크다는 것을 확인할 수 있다. ITO 전극과 구리 동판 전극으로 형성된 두 커패시터를 이용하여 부하에 따른 효율 측정

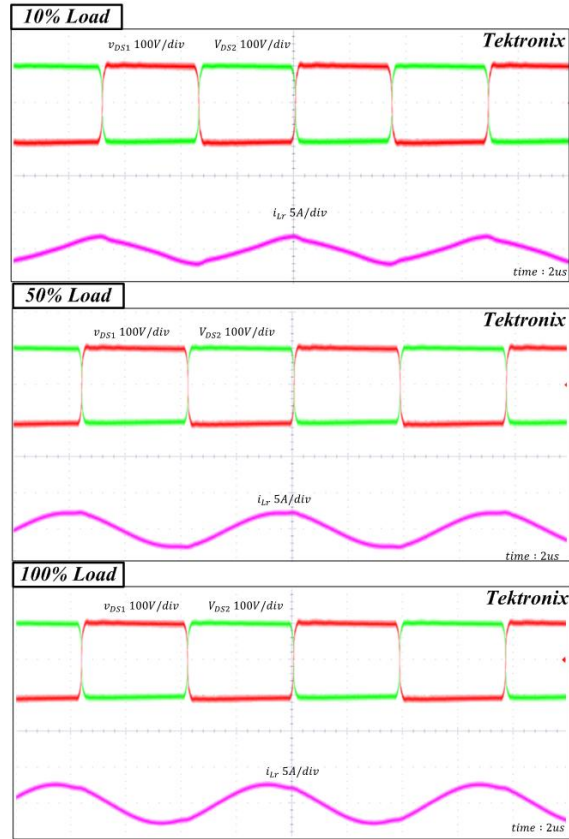


Fig. 5. Experimental waveform.

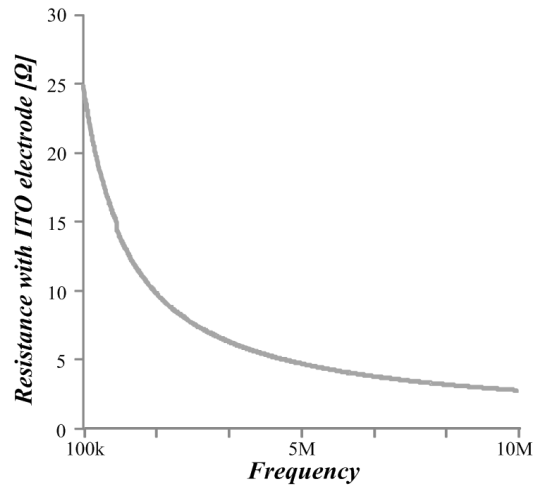


Fig. 6. Equivalent series resistance according to the frequency.

결과는 그림 7과 같다. 예상한 바와 같이 효율도 차이도 미비하다. 효율이 낮은 이유는 유전 분극 현상에 의한 커플링 커패시터에서 발생하는 손실이며, 이는 동작 주파수를 올리거나 커플링 커패시터의 면적을 넓게 하여 커패시터를 크게 설계하면 손실을 줄일 수 있다. 이와 같이 시야를 확보하기 위한 ITO 전극으로 커플링 커패시터를 형성하여도 전기장을 이용한 무선 전력 전송이 가능함을 실험적으로 입증하였다.

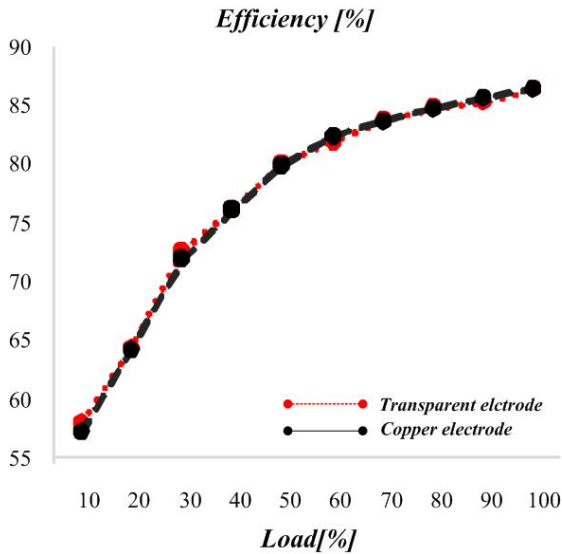


Fig. 7. Efficiency according to load variation.

#### 4. 결 론

불투명 전극을 이용한 CCWPT 방식의 경우 가시성이 필요한 응용분야에는 사용할 수 없다는 문제점을 가진다. 이를 해결하기 위하여 본 실험에서는 투명전극을 이용한 CCWPT를 제안하였다. 투명전극의 경우 높은 전도도와 가시광 영역에서 우수한 투과도를 나타내기 때문에 시야확보가 필요한 다양한 응용분야에 사용 가능성이 예측 된다. 성능 검증을 위해 실험을 통한 손실 분석과 동판과 투명전극으로 형성한 커플링 커패시터와 동판으로 형성한 커플링 커패시터를 이용하여 200W급 송 수신 회로에 적용한 결과 타당성을 입증하였다. 본 연구 결과로 투명 전극을 이용하여 다양한 전기 기기에 무선 전력 전송으로 사용가능함을 확인하였다.

본 연구는 2016년도 대구대학교 교내 연구비 지원에 의한 논문입니다.

#### References

- [1] F. Musavi, M. Edington, and W. Eberle, "Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies," *Proceeding of 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1804-1810, 2012.
- [2] J. Dai and D. C. Ludois, "A survey of wireless power transfer and a critical comparison of inductive and capacitive coupling for small gap applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 30, No. 11, pp. 6017-6029, Mar. 2015.
- [3] J. Dai and D. C. Ludois, "Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper," *Proceeding of 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 3307-3313, 2015.
- [4] Y. You and K. Yi, "Capacitive coupling LLC wireless power transfer converter through glasses of electric vehicles," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 21, No. 6, pp. 542-545, Dec. 2016.
- [5] M. H. Chung, S. Kim, D. Yoo, and J. H. Kim, "Materials and characteristics of emerging transparent electrodes," *Appl. Chem Eng.*, Vol. 25, No. 3, pp. 242-248, Jun. 2014.
- [6] B. Seguin, J. P. Gosse, A. Sylvestre, P. Fouassier, and J. P. Ferrieux, "Calorimetric apparatus for measurement of power losses in capacitors," in *Proceeding of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 602-607, May 1988.