

## 무선전력전송 시스템을 위한 커플러의 음영지역 분석 및 개선방법

## Null-Power Point Analysis of Coupler for Wireless Power Transfer System and Improvement Method

방 경 원<sup>1</sup> · 박 상 욱<sup>2</sup> · 배 흥 국<sup>3\*</sup>Kyeung-Won Bang<sup>1</sup> · Sang-Wook Park<sup>2</sup> · Hong-Guk Bae<sup>3\*</sup>

## 요 약

본 연구에서는 무선전력전송 시스템의 음영지역(null-power point) 현상의 발생 요인을 분석하고, 이를 설계 및 극복하는 방법에 대해 논의한다. 음영지역은 커플러 간 결합 수준을 요인으로 발생하며, 커플러의 모양에 의해 설계될 수 있다. 음영지역 극복을 위해 90 %의 앞면 판 면적비를 가지는 적층형(stacked) CPT 커플러가 제안되었으며, 이는 다중송신 단일수신(MISO, multiple input single output) CPT 시스템의 구현에 효과적으로 이용될 수 있다.

## Abstract

In this study, the null-power point phenomenon, which occurs in a wireless power transfer system, was analyzed. The null-power point occurs because of the coupling level between the couplers and can be designed based on the shape of the coupler. To overcome this null-power point, we propose a stacked capacitive power transfer (CPT) coupler with a front panel area ratio of 90 %, which can be effectively used in the implementation of a multiple-input single-output CPT system.

Key words: Wireless Power Transfer, Null-Power Point, Stacked CPT Coupler, Multiple Input Single Output, Misalignment

## I. 서 론

유도성 무선전력전송(IPT, inductive power transfer)과 용량성 무선전력전송(CPT, capacitive power transfer)은 각각 자기장과 전기장을 사용하여 무선으로 전력을 전송하는 방법이다<sup>[1]</sup>. 두 방식의 커플러에서는 수신기가 특정 비정렬(misalignment)을 가질 때, 수신기가 충분히 유효한 충전영역에 있음에도 불구하고 전력이 전송되지 않는 음영지역(null-power point)이 불가피하게 발생한다. 이는 수

신기의 위치 자유도 확보를 위하여 반드시 극복해야만 하는 특성이다. 하지만 기존의 음영지역에 관한 연구는 IPT 커플러에 대해서만 이루어진 반면<sup>[2]</sup>, CPT 커플러에 대해서는 음영지역 극복을 위한 연구가 미흡하다.

본 연구에서는 동일한 크기를 가지는 IPT 및 CPT 커플러의 음영지역의 원인을 분석한다. 또한, 적층형(stacked) 구조를 이용하여 CPT 커플러 음영지역 특성을 설계 및 개선하는 방법을 제안한다. 제안된 커플러는 결과적으로 지름의 50 % 비정렬 길이까지 음영지역이 발생하지 않

†본 과제는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(2021RIS-004).‡

§본 과제는 순천향대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.‡

순천향대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Soonchunhyang University)

\*대구대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Daegu University)

1: 연구원(<https://orcid.org/0000-0001-9817-9990>), 2: 조교수(<https://orcid.org/0000-0001-6996-5853>), 3: 석사(<https://orcid.org/0000-0002-0040-6831>)

· Manuscript received October 16, 2023 ; Revised November 6, 2023 ; Accepted December 26, 2023. (ID No. 20231016-086)

· Corresponding Author: Sang-Wook Park (e-mail: wave@sch.ac.kr)

며, 다중송신 단일수신(MISO, multiple input single output) CPT 시스템에 효과적으로 이용할 수 있다.

## II. 커플러 제작 및 시뮬레이션 검증

음영지역을 검증하기 위해 그림 1 같이 실제 커플러를 구현하였다. 그림 1(a) 및 그림 1(b) 우측 하단의 그림은 각각의 정합회로 구성 및 SMA 커넥터를 보여주며, 커플러의 사양은 표 1과 같다<sup>[3]</sup>.

그림 2는 두 커플러의 정합회로 구성과 기생성분을 나타낸 것이다. 표 2는 LCR Meter를 사용하여 측정된 소자 및 기생성분의 크기를 보여주며, 무시 가능한 작은 크기의 기생성분은 고려하지 않았다. IPT의 경우 송수신기 사이의 거리가 145 mm의 경우에 대해서, CPT의 경우 30 mm의 경우에 대해서 매칭 및 실측이 이루어졌다.

그림 3은 각각 제작된 커플러의  $S_{21}$ 를 VNA로 측정된 실측값을 해석툴(HFSS) 및 회로해석 시뮬레이션 결과(EC)와 함께 나타낸 것이다. 가용한 정합소자의 제한으로 인해, IPT 및 CPT 시스템의 커플러는 각각 17 MHz와 15

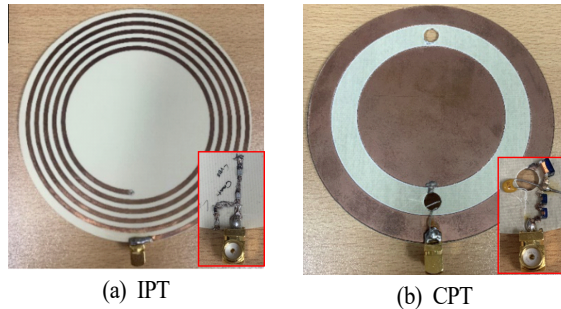
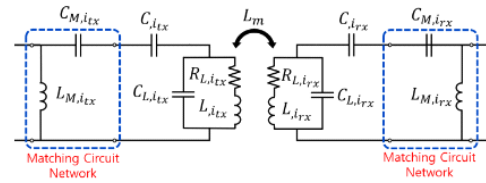


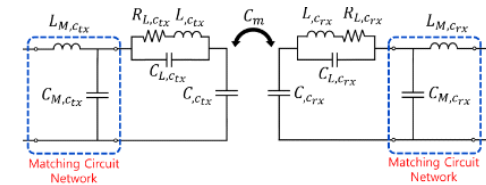
그림 1. IPT 및 CPT 커플러 제작  
Fig. 1. Fabricated IPT and CPT coupler.

표 1. 제작된 IPT 및 CPT 커플러의 사양<sup>[3]</sup>  
Table 1. Specification of fabricated coupler<sup>[3]</sup>.

Parameters	IPT coupler		CPT coupler	
Substrate	IS680-320C1-30A			
Diameter	100 mm			
Design specifi- cation	Winding	5 turns	Outer plate width	10 mm
	Wire width	2 mm	Inner plate diameter	60 mm
	Winding space	2 mm	Plate spacing	10 mm



(a) IPT



(b) CPT

그림 2. 등가 회로 모델  
Fig. 2. Equivalent circuit model.

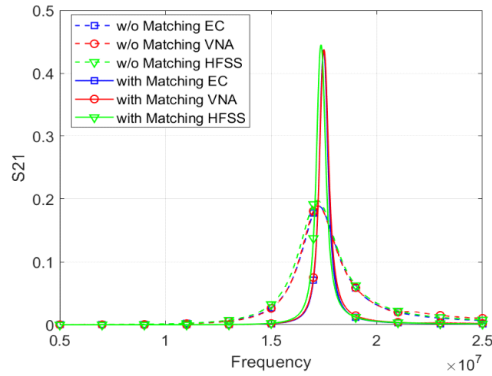
표 2. 등가회로 소자 실측값  
Table 2. Measurement value of equivalent circuit.

IPT coupler		CPT coupler	
Parameter	Value	Parameter	Value
$L_{i_{tx}}$	3.3 $\mu$ H	$C_{c_{tx}}$	4.5 pF
$C_{L_{i_{tx}}}$	3.5 pF	$L_{i_{rx}}$	18 $\mu$ H
$R_{L_{i_{tx}}}$	1.6 $\Omega$	$R_{L_{c_{tx}}}$	2 $\Omega$
$C_{i_{tx}}$	22 pF	$C_{L_{c_{tx}}}$	2.3 pF
$L_{M_{i_{tx}}}$	160 nH	$L_{M_{c_{tx}}}$	2.4 $\mu$ H
$C_{M_{i_{tx}}}$	680 pF	$C_{M_{c_{tx}}}$	47 pF

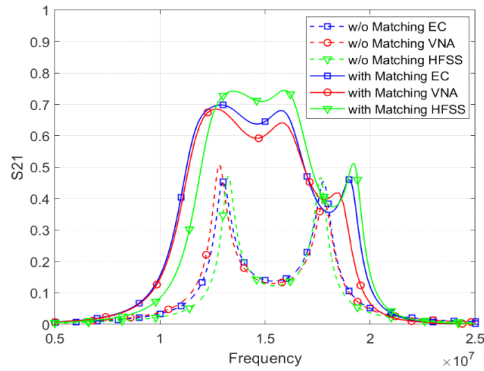
MHz에서 공진한다. 하지만 공진주파수는 커플러의 구조로 인한 전송 특성 변화에 큰 영향을 끼치지 않으므로, 두 커플러의 전송 특성을 비교하기에는 충분하다. 각 커플러에서 측정된 실측값은 두 종류의 시뮬레이션 결과와 크게 합치하며, 시뮬레이션 결과를 충분히 신뢰할 수 있음을 보여준다. 따라서 다양한 비정렬 거리에 대해 각각 최적의 매칭이 이루어진 IPT 및 CPT 커플러의 송수신 특성을 시뮬레이션을 통해 효율적으로 얻을 수 있다.

## III. MISO를 위한 커플러 음영지역 분석

그림 4는 IPT 및 CPT 커플러의 결합성분( $L_m$  및  $C_m$ ) 크기 및 최적매칭 전후 최고  $S_{21}$  수치를 비정렬 거리(0~200 mm)에 따라 나타낸 것이다.



(a) IPT



(b) CPT

그림 3.  $S_{21}$  파라미터 비교

Fig. 3. Comparison of  $S_{21}$  parameter.

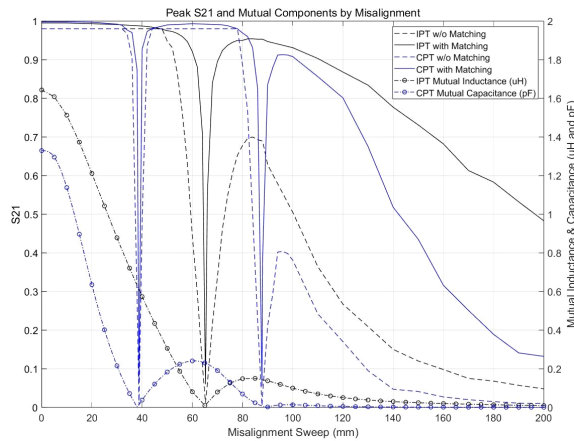


그림 4. 비정렬 거리에 따른 IPT 및 CPT 커플러의 최고  $S_{21}$  및 결합성분 크기

Fig. 4. The Mutual components value and the  $S_{21}$  parameters for IPT and CPT Coupler.

IPT 커플러의 경우,  $S_{21}$ 이 0이 되는 음영지역이 한 번 발생(65 mm)하며, CPT 커플러의 경우 두 번 발생(38 mm, 86 mm)한다. 또한 음영지역의 발생 위치는 송수신기의 상호 결합성분( $L_m$  및  $C_m$ )이 0이 되는 지점과 완전히 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 음영지역이 비정렬로 인한 시스템의 임피던스 변화 때문이 아닌, 송수신기가 공유하는 장(field)의 결합 계수(coupling coefficient,  $k$ )로 인해 결정된다는 사실을 시사한다<sup>[4]</sup>.

그림 5는 일반적인 MISO 무선전력전송 시스템을 보여준다. 일반적으로 커플러 지름의 50 % 비정렬 거리까지 가장 가까운 송신기를 활성화하는 제어 방법을 사용하며, 그 이상의 비정렬에서는 활성화 송신기가 변경된다. 따라서 지름의 50 %를 넘어가기 이전에 음영지역이 발생하는 커플러는 MISO 시스템에 적합하지 않다.

적층형(stacked) 구조 CPT 커플러는 그림 6과 같이 두 개의 금속 플레이트 P1, P2가 수 mm의 간격( $d$ )을 두고 적층 형태로 배치되어 있는 구조를 가진다. 기존 연구의 적층형 CPT 커플러는 음영지역 개선을 위한 설계기준이 명확하지 않으므로, 본 연구는 아래와 같은 시도를 통해 최

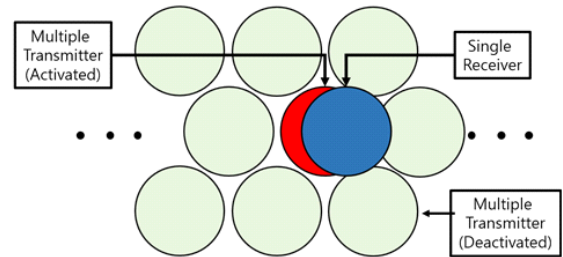


그림 5. MISO 무선전력전송 시스템

Fig. 5. MISO wireless power transfer system.

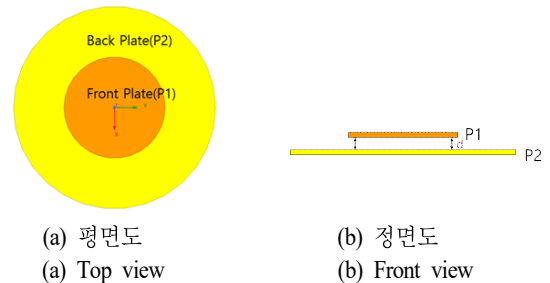


그림 6. 적층형 CPT 커플러  
Fig. 6. Stacked CPT coupler.

적의 적층형 CPT 커플러 설계를 찾고자 한다.

그림 7은 적층형 CPT 커플러의 뒷면 판 대비 앞면 판의 면적비(ratio)를 50 %부터 90 %까지 변화시켰을 때의  $C_m$  값 변화를 비정렬 거리에 따라 보여준다. 면적비가 커질수록 먼 거리의 비정렬 상황에서 주 결합을 유지할 수 있으므로, 음영지역의 발생 위치가 달라진다. 결론적으로, 90 % 이상의 면적비를 가질 경우 음영지역이 커플러 지름의 50 % 지점 이후(57.5 mm)에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 15 MHz의 동일한 공진주파수를

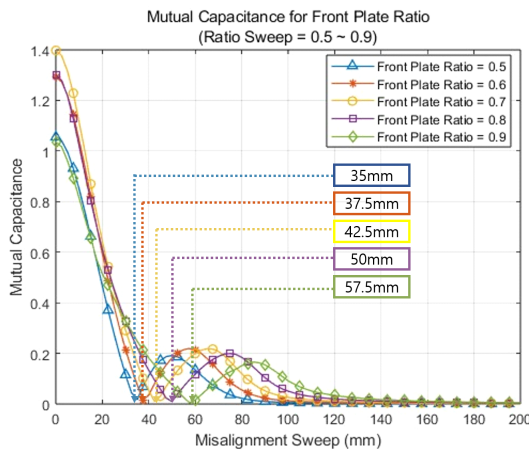


그림 7. 앞면 판 면적비 변화에 대한  $C_m$  비교  
Fig. 7. Comparison of  $C_m$  for front plate ratio.

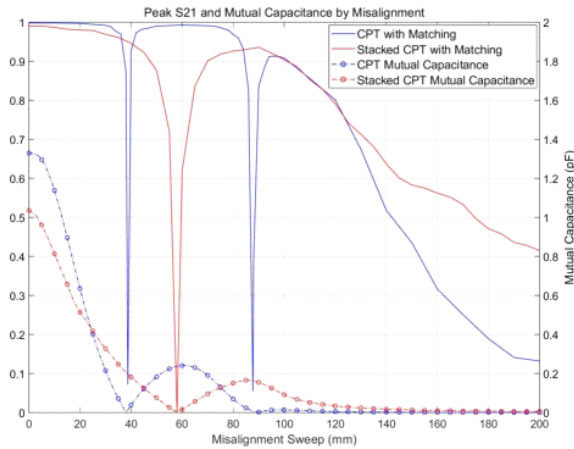


그림 8. 비정렬 거리에 따른 CPT 및 적층형 CPT 커플러의  $S_{21}$  및  $C_m$  크기  
Fig. 8. The  $C_m$  value and the  $S_{21}$  parameters for conventional and stacked CPT coupler.

가지는 면적비가 90 %인 적층형 CPT 커플러와 기존 CPT 커플러가 각 비정렬 거리에 대해 최적 매칭이 이뤄졌을 때의 최고  $S_{21}$  및  $C_m$ 을 비정렬 거리(0~200 mm)에 따라 비교한 것이다. 적층형 CPT 커플러는 단 한 번의 음영지역이 발생함을 알 수 있으며, 이는 기존 CPT 커플러와는 달리 주 결합과 교차 결합이 비정렬 거리에 따라 한번만 역전되었음을 의미하며, 적층형 커플러가 기존 커플러보다 음영지역 발생지점 및 발생빈도를 크게 완화 시켰음을 보여준다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 기존의 WPT 시스템의 커플러에서 발생하는 음영지역의 발생 요인을 분석하고, 발생 위치를 설계 및 완화하는 방법에 대하여 논의한다. 결과적으로 음영지역의 발생은 송수신기의 결합 계수에 의해 결정되며, 적절한 설계의 커플러를 통해 완화할 수 있다. 음영지역 현상 완화를 위해 앞면 판 면적비가 90 %인 적층형 CPT 커플러가 제안되었으며, 일부 송신기를 부분적으로 활성화 하는 MISO 시스템 구현에 적용할 수 있다.

## References

- [1] K. Detka, K. Górecki, "Wireless power transfer: A review," *Energies*, vol. 15, no. 19, p. 7236, 2022.
- [2] M. Bertoluzzo, G. Buja, and H. Dashora, "Avoiding null power point in DD coils," in *2019 IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer (WoW)*, London, Jun. 2019, pp. 11-15.
- [3] S. Hyun, H. Bae, and S. Park, "Characteristics analysis of resonance-based wireless power transfer using magnetic coupling and electric coupling," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 42, p. 101419, Jun. 2023.
- [4] K. Bang, H. Bae, and S. Park, "Resonant-based wireless power transfer system using electric coupling for transparent wearable devices and null power points," *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1535, Jan. 2023.