

# 루프-다이폴 하이브리드 타입 장거리 무선전력시스템 설계 연구

김혜연, 김재준, 표기현, 이은수  
 한양대학교 에리카 전자공학부

## Loop-Dipole Hybrid-type Coil Design for Long distance Wireless Power System

Hye Y. Kim, Jae J. Kim, Gi H. Pyo, and Eun S. Lee  
 Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

### ABSTRACT

본 논문에서는 고전력 장거리 자기유도 무선전력전송 구현을 위해, 종래 루프 코일과 다이폴 코일을 합친 새로운 형상의 코일 구조를 제안하였다. 450mm 거리에 700W급 전력을 전송하기 위해, 송신 코일 구조는 자기장을 수신부로 가이드할 수 있는 루프 코일과, 장거리 환경하에 수신부에 많은 자속을 채교하기 위한 다이폴 코일 구조를 합친 하이브리드 형식을 적용하였다. 본 논문에서는 비선형 특성을 갖는 자기유도 무선전력시스템의 최적 설계 방법론을 제안하였으며, 제안하는 방법론을 통해 거리 450 mm에 700W 전송시 약 80 % 수준의 DC-to-DC 효율을 달성할 수 있음을 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다.

### 1. 서 론

종래 상용화된 무선전력시스템의 경우 루프코일 형상의 송수신코일을 주로 적용하며, 거리가 가까운 어플리케이션에서는 고효율 구동이 가능하다. 하지만, 루프 코일은 코일 길이 수준 만큼 송수신 코일이 떨어진 환경에서는 급격한 자기결합도  $k$  감소로 인해 전력전송 및 효율이 크게 감소한다는 단점이 있다 [1]. 루프 형상 대비 장거리 환경에서 전력을 전송하기 위해 다이폴 코일구조가 제안된 바 있으나, 360도 전방위 자기장 방사로 인한 EMF 문제, 코어 내부 높은 자속밀도로 인한 저효율 등의 단점으로 현재 상용화에 어려움이 있다 [2].

본 논문에서는 송신부에서 발생한 자기장을 수신부로 최대한 가이드하여 채교되되, 다른 주변으로 자기장을 최대한 방사하지 않는 루프 코일과 장거리로 자기장을 발생시킬 수 있는 다이폴 코일의 장점만을 가진 새로운 코일 구조를 제안하였다. 또한 제안하는 코일 구조를 최적화하기 위한 유한요소해석(FEM) 기반 설계 방법론을 제안하였으며, 이를 통해 장거리 환경하 최적화된 송수신 코일 구조를 설계하였으며, 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 성능을 검증하였다.

### 2. 제안하는 송수신부 코일 구조

제안하는 코일은 그림 1과 같이 송신부의 센터 코어측에 16턴의 다이폴 코일과 사이드측에 12턴의 루프 코일을 적용하였다. 수신부의 경우 송신부에서 발생하는 자속을 최대한 수신하기 위해 다이폴 코일 구조를 적용하였으며, 센터로 갈수록 자속이 커지므로 중앙부 코어는 더 두껍게 배치하였다. 추가적으로 송신부 하단으로 누설되는 자속을 억제하고 송신코어 내부 자속밀도 감소를 통한 손실 저감을 위해, 송신코일 하단에 알루미늄 판을 포함하였다 [3]. 제안하는 무선전력시스템의 코일 설치 공간은 한정되어 있으며, 본 논문에서는 송수신부 길이  $w_{cl} = w_{c2} = 200\text{mm}$ ,  $l_{cl} = l_{c2} = 1400\text{mm}$ , 송수신부간 거리  $d_c$

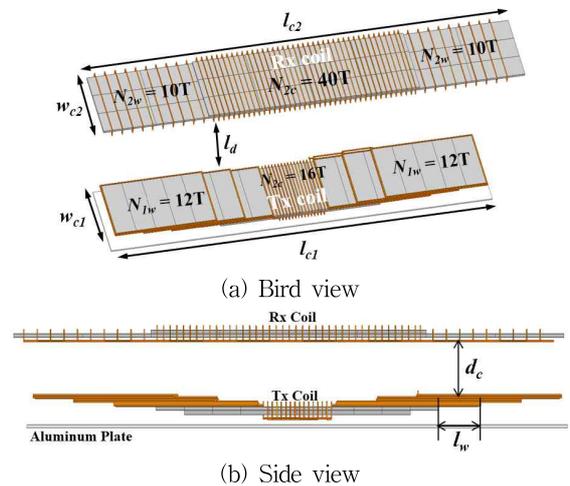


그림 1. 제안하는 송수신부 코일 구조

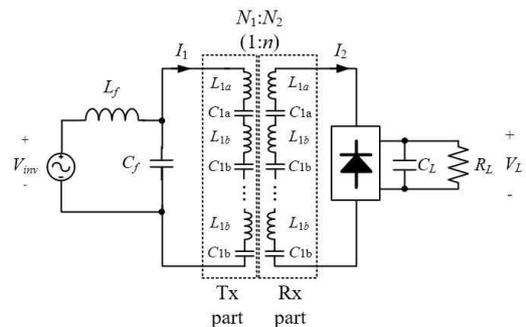


그림 2. 제안하는 무선전력시스템 회로

= 450mm이며, 제안하는 무선전력시스템에 대한 물리적/전기적 목표치를 표 1에 요약하였다. 제안하는 무선전력시스템 토폴로지는 그림 2와 같이 LCC-S를 사용하였으며, 이를 통해 부하 및 주변환경과는 상관없이 일정한 송신전류를 생성하도록 하였다. 제안하는 코일구조의 경우, 장거리 전력전송을 위한 Ampere-Turn을 증가시키기 위해 그림1과 같이 많은 턴수를 적용하였으며, 이로 인한 코일↔코어간 절연이 심각한 문제가 된다. 이를 위해 그림 2와 같이 송수신 코일 중간중간마다 분할 공진 커패시터를 적용함으로써 절연문제를 해결하였다.

### 3. 제안하는 코일 설계 및 특성 분석

그림 1-2에 제시된 제안하는 무선전력시스템을 최적화하기 위한 코일 설계 방법론을 그림 3에 제시하였다. 표 1에 제시된 목표치를 달성하기 위해, FEM 모델링을 통해 기본적인 코일과

표 1 제안하는 코일의 물리적/전기적 목표

$W_{w2}$	200mm	$w_{c1}$	200mm	$P_L$	700W
$l_{c2}$	1,400mm	$l_{c1}$	1,400mm	$\eta_{dc}$	80%

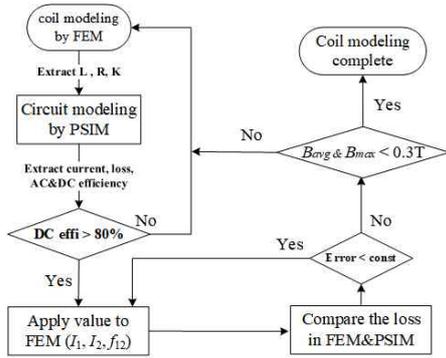


그림 3. 제안하는 무선전력시스템의 최적화 프로세스

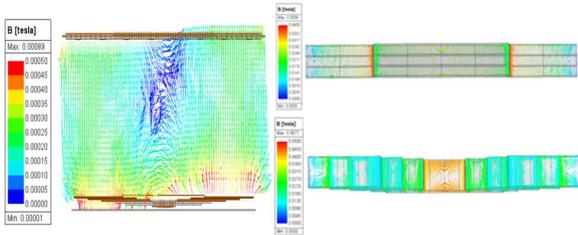


그림 4. 제안하는 송수신 코일의 FEM 시뮬레이션 결과

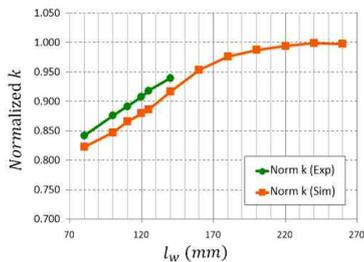


그림 5. 송신 코일의 사이드 코어부 간격에 따른 k

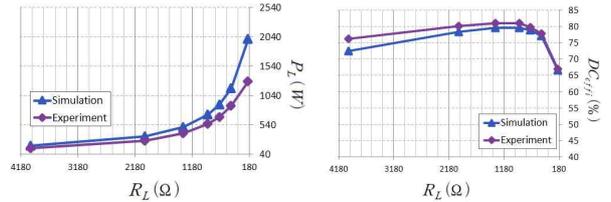
라미터(R, L, k)를 추출하고 이를 회로 시뮬레이션 모델링을 통해 손실과 효율을 판단한다. 만일 목표로 하는 효율을 만족하지 못하는 경우, 이를 만족할 때까지 코일을 재설계하며, 효율목표를 만족하는 경우 회로 시뮬레이션에서 도출된 송수신부 코일전류  $I_1$ ,  $I_2$ 와 코일전류의 위상차  $\phi_{12}$ 를 다시 FEM에 적용한다. 만일 최대효율 조건을 만족하는 수신코일 공진 조건을 완전히 만족한다면  $\phi_{12}$ 는 90도가 된다. FEM 시뮬레이션 결과에서 도출된 코어손실 및 권선손실 합이 회로 시뮬레이션의 손실과 유사하다면, 제안하는 무선전력 시스템의 손실분석은 신뢰할만하며, 그렇지 않다면 FEM 시뮬레이션 상에서의 Magnetic loss tangent 및 Steinmetz 상수들을 코어 특성에 맞게 재튜닝하는 과정이 필요하다. 그 이후 코어의 평균자속밀도가 0.3T 또는 코어부분별 최대자속밀도가 0.3T 이하를 만족하는지를 그림 4와 같이 확인하였다면 제안하는 코일구조가 최적화된다고 볼 수 있다.

제안하는 송신코일 구조에서의 루프 코일형상을 갖는 사이드 코일간 간격에 따른 k값을 그림 5에 제시하였다. 제안하는 송신코일 구조의 사이드 코일간 간격  $l_w$ 가 증가할수록 k값이 증가하나, 어느 순간부터는 다시 감소함을 알 수 있다. 본 논문에서는 표1과 같이 물리적 제약조건이 정해져 있으므로  $l_w = 120\text{mm}$ 를 선정하였다.



그림 6. 제안하는 무선전력시스템 실험세트 및 주요 파라미터

$L_1$	850 uH	$L_2$	1,900 uH
$L_f$	100 uH	$C_f$	11.0 nF
$N_1$	40 T	$N_2$	60 T



(a) Load Power (b) Efficiency

그림 7. 제안하는 무선전력시스템 성능 검증 결과

#### 4. 실험을 통한 성능 검증

제안하는 무선전력시스템을 그림 6과 같이 제작하였으며, 주요 파라미터 또한 그림 6에 요약하였다. 입력전압 400V 하에 송신전류  $I_1 = 4\text{A}$  수준으로 생성하기 위해  $L_f = 100\text{ uH}$ 를 선정하였으며, 동작 주파수는 150kHz로 구동한다. 그림 2에 제시된 것처럼 송수신부 코일 사이에 분할 공진 커패시터를 적용하였으며, 해당 공진 커패시터는 코일 임피던스가 150kHz 부근 공진점에서 최소가 되도록 값을 선정하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과, 그림 7과 같이 부하저항이 증가할수록 전력이 증가하며, 약 900Ω 부하에서 최대효율이 됨을 확인할 수 있다. 결과적으로, 약 700W 전력전송시 DC-to-DC 효율은 약 80%가 되며, 이는 그림3에서 제안한 설계 방법론이 유효하다는 것을 확인하였다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 450mm 거리에서 700W급 전력전송을 위한 새로운 코일 구조와 이를 최적화하는 설계 방법론을 제안하였다. 제안하는 방법론을 통해 루프 다이폴 하이브리드 타입의 송신코일을 최적설계 하였으며, 시뮬레이션 및 실험 결과 700W에서 약 80% 수준의 효율로 전력을 전송할 수 있음을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Eun S. Lee, Byeung G. Choi, Myung Y. Kim, and Seung H. Han, "Optimal Number of Turns Design of the IPT Coils for Laptop Wireless Charging," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 19545-19561, Jan. 2021.
- [2] B. H. Choi et al., "Dipole Coil Based Wide Range Inductive Power Transfer Systems for Wireless Sensors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 5, pp. 3158-3167, May 2016.
- [3] Eun S. Lee, Yeong H. Sohn, Byeong G. Choi, Seung H. Han, and Chun T. Rim, "A Modularized IPT with Magnetic Shielding for a Wide-range Ubiquitous Wi-Power Zone," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 11, pp. 9669-9690, Nov. 2018.