

# 자기유도방식 무선전력전송 시스템 송수신 코일의 Multi-layer 구조에 따른 자기결합 특성

김철민, 유재곤, 김종수†  
대진대학교 전기공학과

## Multi-layer Structure of Transceiver Coils Magnetic Coupling Characteristics for Inductive Power Transfer System

Cheol Min Kim, Jae Gon Yoo, Jong Soo Kim†  
Department of Electrical Engineering, Daejin University

### ABSTRACT

본 논문에서는 자기유도방식 무선전력전송(Inductive Power Transfer, IPT) 시스템에 적용되는 송수신 코일의 Multi layer 구조의 자기결합 특성에 대하여 분석한다. 기존에 제안된 Single layer 구조의 코일과 Multi layer 구조의 코일이 가지는 차이점을 자기결합도 측면에서 비교 분석하고 이를 Simulation 및 실험을 통해 검증한다.

### 1. 서론

자기유도방식 무선전력전송(IPT)은 가지고 있는 높은 자유도와 전자기기 및 전기자동차, IoT 기술의 확대에 따라 최근 4차 산업 혁명에서 신에너지 공급 기술로 각광받고 있는 추세이다.

이러한 무선전력전송 시스템에서 송수신 코일의 설계는 전력 전송 거리와 효율에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다.

일반적인 자기유도방식 무선전력전송 시스템에서 사용되는 코일의 형태는 Single layer 구조의 나선형 코일이지만 이를 Multi layer 구조로 구성할 경우 공간 활용도 및 적용 가능성이 높아 전력을 보다 효과적으로 전달하는 것이 가능해진다.

본 논문에서는 IPT 시스템에서 송수신 코일의 형태를 Single layer 나선형 구조와 Multi layer 나선형 구조로 구성하여 자기결합도 측면에서 비교 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증한 뒤 이를 기반으로 송수신 코일을 제작하여 실험한다.

### 2. IPT 시스템의 송수신 코일

본 논문에서는 그림 1과 같은 무선전력전송 시스템의 송수신 코일을 구성하여 실험한다.

코일의 구조는 그림 2에 나타내었다. 두 개의 코일은 모두 직경 3.6mm의 리츠와이어를 사용하였으며 내경 2.5cm, 외경 6.1cm의 조건으로 구성하였다. Single layer 구조의 경우 송수신 측과 수신측을 모두 10턴의 나선형 코일로 구성하였으며, Multi layer 구조의 경우 각 층당 10턴의 나선형 코일을 2층으로 구성하였다.

Single layer로 이루어진 송수신 코일의 인덕턴스  $L_{SL}$ 은 식(1)과 같이 계산이 가능하고 식(1)에서  $N$ 은 턴 수,  $a_n$ 은 각 단일 원형 코일 루프의 반지름,  $d_w$ 는 권선의 직경,  $M_{11}$ 은 단일 원형 루프간 상호 인덕턴스를 의미한다.<sup>[1]</sup>

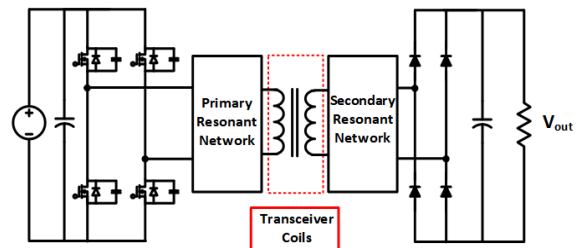


그림 1 IPT 시스템 회로도  
Fig. 1 Circuit diagram of IPT system

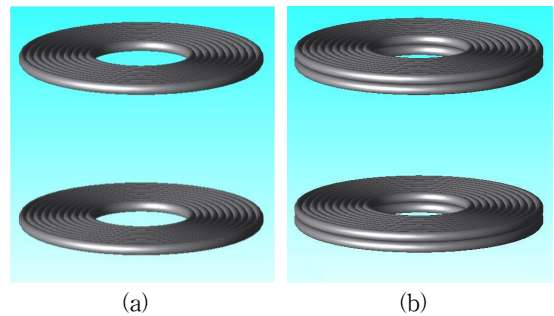


그림 2 송수신 코일의 Single & Multi Layer 구조  
Fig. 2 Various structure of Transceiver coils

$$L_{SL} = \sum_{i=1}^N L(a_i, d_w) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{11}(a_i, a_j, \rho=0, d=0)(1 - \delta_{i,j}) \quad (1)$$

Multi layer로 이루어진 송수신 코일의 인덕턴스  $L_{ML}$ 은 식(2)와 같이 계산 가능하고 식(2)에서  $N_L$ 은 Layer의 개수,  $L_{SL}$ 은 각 Layer 코일의 인덕턴스,  $k_s$ 은 각 Layer의 결합계수,  $s$ 는 Layer 간의 거리를 의미한다.<sup>[2]</sup>

$$L_{ML} = -N_L L_{SL} + 2L_{SL} \sum_{s=0}^{N_L} (N_L - s) k_s \quad (2)$$

송수신 코일간 자기결합도  $k$ 는 상호 인덕턴스  $M$ 과 송수신 코일의 자기인덕턴스  $L_P$  및  $L_S$ 에 의해 식(3)과 같이 결정된다.<sup>[1]</sup>

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_P L_S}} \quad (3)$$

### 3. 시뮬레이션

표 1 자기 인덕턴스 및 상호인덕턴스  
Table 1 Self inductance and mutual inductance

Parameter	Single Layer	Multi Layer
Self Inductance	9 $\mu$ H	34.2 $\mu$ H
Mutual Inductance (이격거리 5cm)	1.3 $\mu$ H	5.82 $\mu$ H

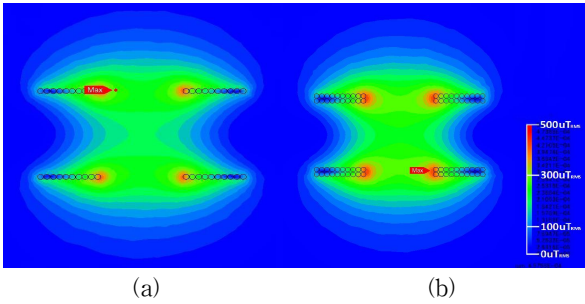


그림 3 코일 구조에 따른 자속 밀도  
Fig. 3 Magnetic flux density according to coil structure

시뮬레이션은 유한요소법(Finite element method, FEM) 전 자장 해석 프로그램인 J MAG을 사용하였다. 그림 3은 Single layer 및 Multi layer 코일의 자속밀도를 시뮬레이션을 통해 나타낸 것으로 그림 3(a)의 Single layer 구조 코일의 자속밀도보다 그림 3(b)의 Multi layer 구조 코일의 자속밀도가 더 크게 나타난다.

Single layer 구조의 코일이 Multi layer와 동일한 인덕턴스를 가지기 위해서는 외경이 커지게 되어 필요한 단면적이 더 커지게 된다. 따라서 공간 활용도가 필요한 시스템에는 Single layer의 구조를 가지는 송수신 코일보다는 Multi layer 구조의 송수신 코일을 적용하는 것이 더 적합하다.

### 4. 실험내용

그림 4는 실제 리즈와이어를 이용하여 송수신 코일을 구성한 모습이다. 코일은 아크릴판을 사용하여 고정하였으며 그림 4(a)는 송수신코일 모두 Single layer 구조로, 그림 4(b)는 송수신 코일 모두 Multi layer 구조로 구성하였다. 실험은 각 송수신 코일 구조별로 이격거리를 증가시키며 자기 인덕턴스 및 누설 인덕턴스를 측정하여 자기결합도를 계산하여 진행하였다.

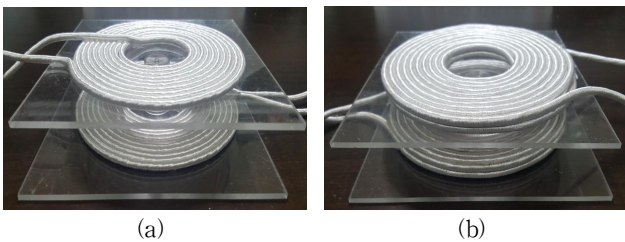


그림 4 실험용 송수신 코일  
Fig. 4 transceiver coils for experiment

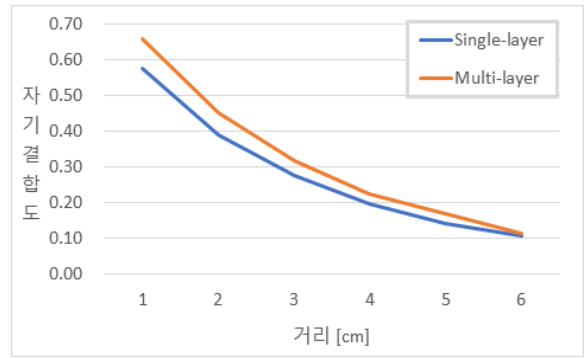


그림 5 이격거리에 따른 코일 구조별 자기결합도  
Fig. 5 Coupling coefficient vs distance

그림 5는 이격거리에 따른 코일 구조별 자기결합도를 나타낸 그림이다. 각각의 곡선은 Single layer와 Multi layer 구조의 코일 간에 자기 결합도를 나타내고 그림에서 볼 수 있듯이 Multi layer로 구성된 코일의 자기결합도가 Single layer구조의 코일보다 크게 나타난다.

### 5. 결론

본 논문에서는 자기유도형 무선전력전송(IPT) 시스템에서 기존에 제안되는 Single layer 구조의 코일과 Multi layer 구조의 코일이 가지는 차이점을 자기결합도 측면에서 비교분석하였다.

코일의 구조에 따라 나타나는 차이점을 확인하기 위해 코일의 형태가 자기 결합도에 미치는 영향에 대해 분석하였으며, 분석한 내용을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였고 이를 통해 Single layer 구조의 코일보다 Multi layer 구조의 코일이 공간 활용도가 높고 자기결합도가 뛰어나다는 것을 확인하였다.

추후, 연구된 송수신 코일을 기반으로 IPT 시스템에 적용하여 송수신 코일의 구조가 전력 전송 효율 미치는 영향에 대하여 연구를 진행할 예정이다.

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업 임.(NO.NRF 2017R1D1A1B03033140)

### 참고 문헌

- [1] Dong Gyun Woo, "Optimal Design and Control Strategy of Inductive Power Transfer Charging System for Electric Vehicles", Sungkyunkwan University, Ph.D Thesis paper, 2015.
- [2] Jihoon Kim, Kangwook Kim, Bobae Kim and Jihun Kang, "Experimental Validation of Multi Layer Coil Inductance Estimation Method", Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017, pp. 1303 1304