

# 최대 결합 성능을 위한 원형 송수신패드 설계

변중은\*, 김민국\*, 우동균\*, 유승희\*, 고정민\*\*, 이병국\*\*<sup>†</sup>

\*성균관대학교 정보통신대학, \*\*창성

## Design of circular transmitter and receiver pads for maximum coupling performance

Jong Eun Byeon\*, Min Kook Kim\*, Dong Gyun Woo\*, Seung Hee Ryu\*, Jeong Min Ko\*\*, and Byoung Kuk Lee\*\*<sup>†</sup>

\*College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University

\*\*ChangSung Corporation

### ABSTRACT

본 논문에서는 무선 전력 전송용 원형 송수신패드의 결합계수 최대화 설계 기법을 제안한다. 원형 송수신패드의 기하학적 구조에 따른 자속 분포 분석에 기반한 인덕턴스 계산식을 활용하여 원형 송수신패드의 다양한 설계 인자들 (도선직경, 선간 간격, 턴 수, 내경, 외경)이 결합계수에 미치는 영향을 분석한다. 또한 분석 결과를 바탕으로, 다양한 크기의 원형 송수신 패드에 적용 가능한 결합계수 극대화 설계 방안을 제안한다.

### 1. 서 론

최근 전기자동차에 대한 관심이 높아지면서 효율적인 충전 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 특히 다양한 충전시스템 중 간편하게 충전이 가능한 무선전력전송 충전시스템에 대한 관심이 증대되고 있다. 이러한 무선충전시스템이 유선충전시스템과 같은 수준의 높은 충전 효율을 제공하기 위해서는 송수신패드 간 전력 전송 효율의 개선이 필수적으로 요구된다. 송수신패드의 효율은 결합계수와 Q factor에 의해 결정되기 때문에, 높은 결합계수와 Q factor를 갖도록 코일을 구성하는 것이 중요하다<sup>[1]</sup>. 특히 송수신패드의 결합계수는 코일의 기하학적 구조에 의해 결정되므로 이에 대한 최적화 과정이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 원형 송수신패드의 최대 결합 성능을 위한 코일 설계 방안을 제시한다. 이를 위하여 원형 송수신패드 간의 결합계수를 수식적으로 계산하고, 원형 송수신패드의 설계 인자와 결합계수의 상관관계를 분석한다. 분석한 결과를 토대로 원형 송수신패드의 최대 결합계수를 위한 코일 구성 방안을 일반화하여 제안한다.

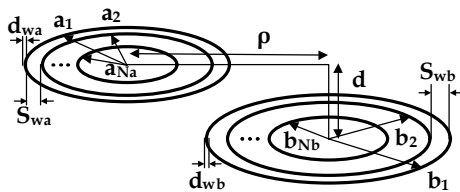


그림 1 원형 송수신패드 설계 인자

Fig. 1 Design factors of circular transmitter and receiver pads.

### 2. 원형 패드 설계 인자별 결합계수 영향도 분석

송수신패드의 기하학적 배치에 따른 결합계수는 식 (1) (5)를 이용하여 도출 가능하다. 그림 1은 식 (1) (5)의 주요 파라미터를 나타낸다<sup>[2]</sup>. 식 (1)은 송수신패드 간 결합계수, 식 (2)는 상호인덕턴스, 식 (3)은 코일 한 턴에 대한 자기 인덕턴스, 식 (4)와 식 (5)는 각각 코일의 턴 수를 반영한 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스 값을 나타낸다.

$$k = \frac{M_{ab}}{\sqrt{L_a L_b}} \quad (1)$$

$$M(a, b, \rho, d) = \pi \mu_0 \sqrt{ab} \int_0^\infty J_1 \left( x \sqrt{\frac{a}{b}} \right) J_1 \left( x \sqrt{\frac{b}{a}} \right) \times J_0 \left( x \frac{\rho}{\sqrt{ab}} \right) \exp \left( -x \frac{d}{\sqrt{ab}} \right) dx \quad (2)$$

$$L(a, d_w/2) = \mu_0 a \left( \ln \left( \frac{8a}{d_w/2} \right) - 2 \right) \quad (3)$$

$$L_a = \sum_{i=1}^{N_a} L(a_i, R) + \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_a} M(a_i, a_j, 0, 0) (1 - \delta_{ij}) \quad (4)$$

$(i=j; \delta_{ij}=1, i \neq j; \delta_{ij}=0)$

$$M_{ab} = \sum_{i=1}^{N_a} \sum_{j=1}^{N_b} M(a_i, b_j, \rho, d) \quad (5)$$

설계 인자와 결합계수간 영향도 분석을 위해 원형패드의 주요 설계 인자인 도선직경 ( $d_{wa}$ ,  $d_{wb}$ ), 선간간격 ( $S_{wa}$ ,  $S_{wb}$ ), 턴 수 ( $N_a$ ,  $N_b$ ), 내경 ( $a_{min}$ ,  $b_{min}$ ), 외경 ( $a_{max}$ ,  $b_{max}$ )에 관한 5가지 case를 설정하고 수직 ( $d$ ), 수평 ( $\rho$ ) 이격에 따른 결합계수 양상을 살펴보았다. 표 1은 설계 인자 평가를 위한 송수신패드의 사양과 평가 Case를 나타낸다. Case 1은  $S_{wb}$ 를, Case 2는  $d_{wb}$ 를 고정하고  $N_b$ 를 가변하였다. 이 때 내외경은 일정하게 유지하였기 때문에  $N_b$ 를 가변하면서 Case 1에서는  $d_{wb}$ , Case 2에서는  $S_{wb}$ 를 함께 가변하였다. 그 결과  $d_w$ ,  $S_w$ ,  $N$ 은 결합계수에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 확인할 수 있다. 그림 2는 Case 1, 2에 대한 결과를 나타낸다. Case 1, 2의 결과를 바탕으로 Case 3 5는  $d_w$ ,  $S_w$ ,  $N$ 의 영향을 고려하지 않았다. Case 3에서는 송수신패드의 내외경비율 ( $b_{min}/b_{max}$ )에 상관없이 수신패드의 내외경비율 ( $a_{min}/a_{max}$ )이 0.6일 때 최대 결합계수를 가지는 것을 보여준다. 이때 0.6은 표 1의 조건에서 수신패드가 가질 수 있는 최대 내외경비율로서  $a_{min}$ 과  $b_{min}$ 을 거의 동일하

표 1 설계 인자 평가를 위한 원형 송수신패드 사양 및 Cases  
Table 1 Specification and Cases of circular transmitter and receiver pads for design factor evaluation.

Factor	Value	Case	평가 항목
$a_{\min}, a_{\max}$	44mm, 110mm	Case 1	$d_{wb}, N_b$
$b_{\min}, b_{\max}$	84mm, 210mm	Case 2	$S_{wb}, N_b$
$N_a, N_b$	10턴, 20턴	Case 3	$a_{\min}$
$S_{wa}, S_{wb}$	4.33mm, 1mm	Case 4	$b_{\min}$
$d_{wa}, d_{wb}$	3mm	Case 5	$a_{\max}$

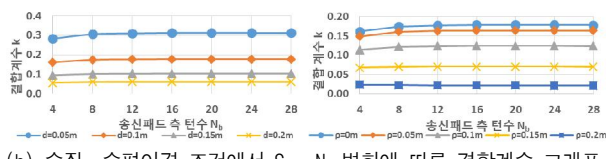
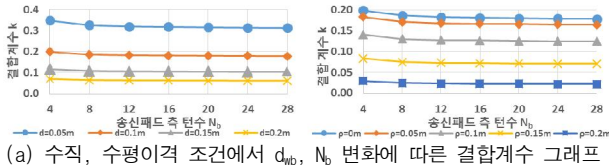


그림 2 송수신패드의 도선직경 ( $d_{wb}$ ), 선간격 ( $S_{wb}$ ), 턴 수 ( $N_b$ ) 변화에 따른 결합계수 그래프

Fig. 2 Coupling coefficient graphs of a transmitter pad according to variation of coil diameter ( $d_{wb}$ ), space between coils ( $S_{wb}$ ) and the number of turn ( $N_b$ ).

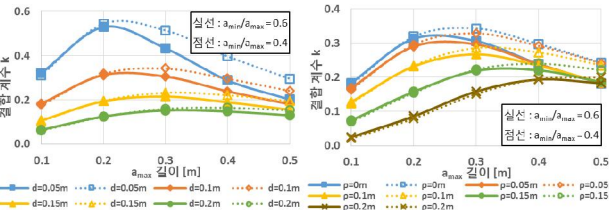


그림 3 수신패드의 외경 ( $a_{\max}$ ) 변화에 따른 결합계수 그래프  
Fig. 3 Coupling coefficient graphs of a receiver pad according to the outer radius ( $a_{\max}$ ) variation.

계 설정했을 때 결합 성능이 좋은 것을 확인 할 수 있다. Case 4에서는 Case 3에서 도출된  $a_{\min}/a_{\max}$ 을 고정 조건으로,  $b_{\min}/b_{\max}$ 을 가변하여  $b_{\min}/b_{\max}$ 이 0.4일 때 최대 결합 성능이 나타남을 확인하였다. Case 5는  $b_{\min}/b_{\max}$ 이 0.4인 경우에 대하여  $a_{\min}/a_{\max}$ 을 두 가지 (0.4, 0.6)로 설정하고  $a_{\max}$ 의 영향을 살펴본다. 최대 결합계수는  $a_{\max}=b_{\max}$ 이고  $a_{\min}/a_{\max}=b_{\min}/b_{\max}=0.4$  일 때 나타남다. Case 5의 결과는 또한 수신패드가 송수신패드에 비해 커지게 되면 수신패드를 송수신패드로 같이 해석이 가능함을 보여준다. 이는 상호결합계수 측면에서 코일 간의 상호인덕턴스는 쇄교하는 자속에 의해 결정되기 때문이다. 그림 3은  $a_{\max}$ 의 변화에 따른 결합계수 변화를 나타낸다.

### 3. 원형 송수신 패드 최적 설계 방안

위의 분석 결과에 기반하여 원형 송수신패드 코일의 결합계수 최적화 설계방안을 순서대로 나타내면 그림 4와 같다. 그림 5는 제안한 송수신패드 설계 방안을 검증하기 위해 그림 4의 설계 과정에 따라 시뮬레이션을 진행하였다. 송수신패드의 외경이 225mm일 때, 송수신패드의 내외경비율을 0.4로 설정하고 수

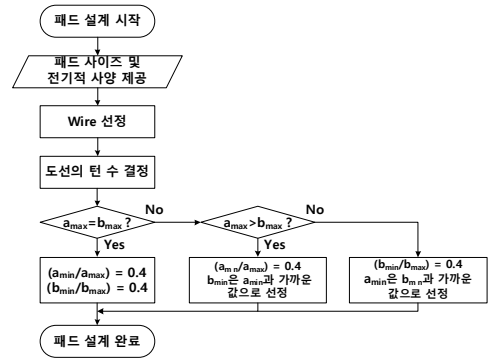


그림 4 원형송수신 패드 코일 설계 순서도  
Fig. 4 Design flowchart of circular transmitter and receiver pads.

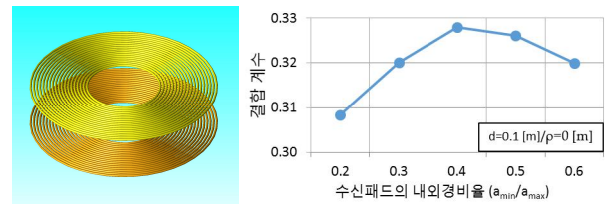


그림 5 설계 방안 검증을 위한 모델 및 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 Simulation model and result of the proposed design method for verification.

신패드의 내경을 가변한 결과, 송수신패드의 내경이 일치하는 경우 최대 결합계수가 나타남을 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 설계 방안의 타당성을 검증하였다.

### 4. 결론

본 논문에서는 원형 송수신패드의 최대 결합계수 성능을 위한 코일 설계 방안을 제안하였다. 설계 방안의 이론적 접근을 위해 송수신패드의 결합계수 계산식을 이용하여 설계 인자와 결합계수의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해, 도선직경, 선간격, 턴 수는 결합계수에 큰 영향을 미치지 않으며, 코일의 내경과 외경은 코일 외형 크기에 따라 특정 값에서 최대 결합계수 성능이 나타남을 확인하였다. 최종적으로 코어와 알루미늄 실드가 없는 원형송수신 패드의 최적 설계 방안을 제시하였으며 향후 코어와 알루미늄 실드를 고려한 원형 송수신패드의 설계 방안을 연구할 계획이다.

Acknowledgement  
본 논문은 (주)창성의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

[1] R. Bosshard, J. Mühlethaler, J. W. Kolar and I. Stevanovic, "Optimized Magnetic Design for Inductive Power Transfer Coils", *The Applied Power Electronics Conference (APEC)*, pp. 1812-1819, March, 2013  
[2] C. M. Zierhofer and E. S. hochmair, "Geometric Approach for Coupling Enhancement of Magnetically Coupled Coils", *IEEE Trans. Biomed. Eng.* Vol. 43, No. 7, pp. 708-714, July, 1996