

# 자계결합형 무선전력전송 시스템 내 자계결합계수의 산출에 대한 연구

김주희  
한화시스템

## Study on the Calculation method of a coupling coefficient for magnetically coupled wireless power transfer systems

Juhui Kim  
Hanwha Systems

### ABSTRACT

본 논문은 수치 해석적 연산을 통해 자계결합형 무선전력전송 시스템의 자계결합계수의 연산 방법을 제안하였다. 한 변의 길이가 각각 20cm, 10cm인 정사각 루프타입 공진기 간의 자계결합계수를 산출하고, 이를 시뮬레이션을 통해 추출된 값과 비교하여 제안된 연산 방법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

중계 공진기가 적용된 무선전력전송시스템과 같이 다수의 공진기가 적용되고 배치가 다양한 무선전력전송시스템에 대한 연구가 활발하다.<sup>[1]</sup> 해당 시스템의 경우 여러 배치에 따라 많은 수의 전력 효율 분석 계산을 수행하여야 한다. 이 때 변경된 배치에 따른 공진기 간 자계결합계수의 확보가 필요하다.

본 논문은 두 개의 정사각 루프타입 공진기 간 배치가 변화할 때 자계결합수를 연산하여 산출하는 방법을 제안하고 있다. 이러한 산출 연산은 다수의 공진기가 적용된 다양한 배치의 무선전력전송시스템의 효율의 산출적 연산의 처리속도 향상에 기여할 것이다.

제안된 연산 방법을 한 변의 길이가 각각 20cm, 10cm인 정사각 루프타입 공진기 간의 자계결합계수 산출에 적용하였다. 그리고 이를 시뮬레이션을 통해 추출한 값과 비교하여 연산을 통한 산출값의 타당성을 입증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 자계결합계수 수치 해석적 연산방법

먼저 그림 1과 같이 가는 도선으로 구성된 2개의 정사각 루프 사이의 상호 인덕턴스를 산출하였다.

도선 흐르는 전류를 각각 균등한 값의  $I_1, I_2$ 라고 가정하고 2개의 정사각 루프 한 변의 크기가 각각  $a, b$ 이며,  $z$  방향으로  $d$  만큼 떨어져서 배치된 경우 2개의 루프 사이에 발생하는 상호 인덕턴스는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$M_{12} = \frac{\int_{S_2} \vec{B}_z|_{z=d} \cdot dS_2}{I_1} = \frac{1}{I_1} \sum_{x=-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sum_{y=-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} B_z|_{z=d} \Delta x \Delta y \quad (1)$$

이 때  $\Delta x, \Delta y$ 는 정사각 루프 한 변을  $m$ 개로 분할한 미소 크기이며 각각  $a/m, b/m$ 과 같다.

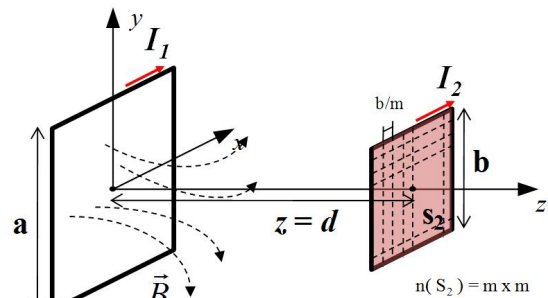


그림 1 2개의 가는 도선 정사각 루프 사이 자계 결합  
Fig. 1 Magnetic coupling between two square loops with thin wire

(1)의 식에 따라 사각 루프 내부 면적을  $m \times m$  개로 나누어 각 단위 면적당 계산된 상호인덕턴스 값을 더하여 전체  $M_{12}$ 를 계산 하였다.

그리고 각 루프의 자기 인덕턴스  $L_1, L_2$ 는 (2), (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$L_1 = \frac{\int_{S_1} \vec{B}_z|_{z=d} \cdot dS_1}{I_1} = \frac{1}{I_1} \sum_{x=-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} \sum_{y=-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} B_z|_{z=d} \Delta x \Delta y \quad (2)$$

$$L_2 = \frac{\int_{S_2} \vec{B}_z|_{z=d} \cdot dS_2}{I_2} = \frac{1}{I_2} \sum_{x=-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} \sum_{y=-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} B_z|_{z=d} \Delta x \Delta y \quad (3)$$

그리고 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는  $\kappa_{12} = M_{12}/(L_1 L_2)^{1/2}$ 의 관계이므로, 자계결합계수  $\kappa_{12}$ 에 대해 수치 해석적으로 연산이 가능하다.

그림 2와 같이 두께  $t$  및 너비  $w$ 를 가지는 도체 정사각 루프 사이의 자계결합계수는 (1)~(3) 식을 활용하여 계산할 수 있다.

먼저 그림 2의 정사각 루프를 여러 개의 가는 도선으로 이루어진 정사각 루프의 다발의 구성으로 모사한다. 그리고 각각의 가는 도선으로 된 정사각 루프들에 대한 상호 인덕턴스 및 자기인덕턴스를 산출한다. 그림 2의 정사각 루프에 대한 상호

인덕턴스와 자기 인덕턴스를 구하기 위해 산출된 값들을 각각 합산한다. 마지막으로 상호 인덕턴스와 자기 인덕턴스, 자계결합계수 간의 관계식을 이용하여 얻고자 하는 자계결합계수를 얻을 수 있다.

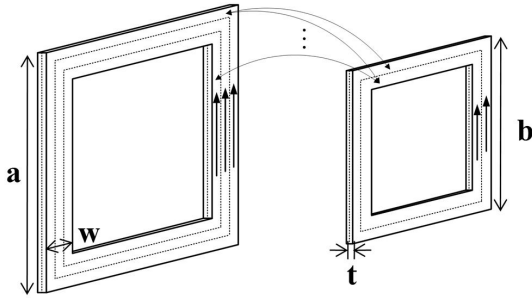


그림 2 두께가 있는 도체 정사각 루프 사이의 자계 결합

Fig. 2 Magnetic coupling between two square loops with thickness of  $t$

그리고 해당 연산 과정들은 산출의 편의성을 위해 Matlab 으로 코드화하여, 크기를 알고 있는 두 도체 정사각 루프 사이의 자계결합계수를 변화하는 거리에 대해 일괄로 산출할 수 있도록 한다.

## 2.2 연산 결과 및 시뮬레이션 결과 비교

연산방법에 따라 작성한 Matlab 코드의 산출 값이 타당한지 확인하기 위해 시뮬레이션을 통해 추출한 값과 산출값을 비교하였다. 비교를 위해 구성한 두 도체 정사각 루프는 그림 2의 구성과 같으며, 표 1의 변수에 해당하는 값을 가진다.

표 1 정사각 루프의 크기 변수값

Table 1 Parameter values of the size for each square loop

$a$	20cm	$b$	30cm
$t$	0.2cm	$w$	2cm

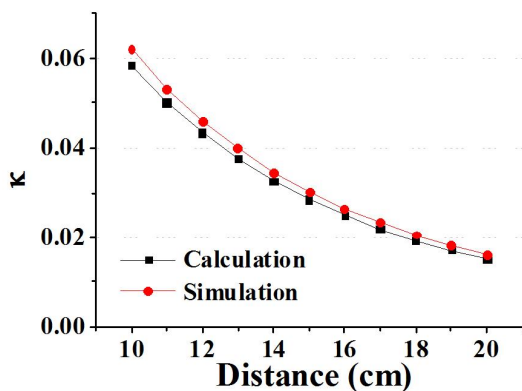


그림 3 두 도체 정사각 루프 사이의 자계결합계수 계산 및 시뮬레이션 결과

Fig. 3 Calculation and simulation results of coupling coefficient between two square loops

상기 조건과 같은 두 도체 정사각 루프 사이 거리는 28cm 부터 38cm 까지 1cm 씩 변화할 경우에 대해 Matlab 코드를 통해 산출하였다.

그림 3과 같이 계산된 자계결합계수의 경우 정사각 루프 공진기의 Quality factor와 곱함으로써 효율 계산이 가능하다.

이 때 그림 3에 제시된 자계결합계수는 소수점 2째자리 이하의 유효값을 가지는 수치이다. 해당 산출값이 시뮬레이션을 통해 추출한 자계결합계수와 계산치의 오차가 약 6% 발생하지만, 해당 자계결합계수를 전력 계산을 위해 사용하여도 효율계산시 발생하는 오차는 미미하다. 그리고 통상적인 전자기기 정격소비전력에 대한 효율은 오차범위 10% 이내로 관리되므로,<sup>[2]</sup> 해당 추출한 자계결합계수를 사용하여 무선전력전송 시스템의 효율 분석하여도 오차 10%를 넘지 않을 것이다. 따라서 본 논문에서 제시한 연산 방법에 따른 자계결합계수 산출 결과를 시스템 효율 분석에 유효하게 사용할 수 있음을 검증하였다.

## 3. 결론

본 논문에서는 다수의 공진기와 여러 배치 조건이 적용된 무선전력전송시스템의 효율 계산의 편의성을 위해 자계결합계수의 수치해석적 연산 방법을 제안하고 한 변의 길이가 각각 20cm, 10cm인 정사각 루프타입 공진기 간의 자계결합계수 산출하였다. 그리고 이를 시뮬레이션을 통해 추출한 값과 비교하여 제안된 연산 방법을 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] J.H. Kim, B.C. Park, J.H. Lee, "Optimum Design of WPT Relay System by Controlling Capacitance", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 56, No. 7, pp. 1658-1661, 2014, July.
- [2] 산업통상자원부, 2018, "효율관리기자재 운용규정", 산업통상자원부, 고시 제2018-183호