

3차원 유한요소법을 이용한 비접촉 전력 전달 장치 특성 해석

우경일<sup>a</sup>, 박한석<sup>a</sup>, 조운현<sup>b</sup>  
 부경대학교<sup>a</sup>, 동아대학교<sup>b</sup>

Characteristic analysis of contact-less energy transmission system using 3D finite element method

Kyung il Woo<sup>a</sup>, Han Seok Park<sup>a</sup>, Yun Hyun Cho<sup>b</sup>  
 Pukyong National University<sup>a</sup>, Dong A University<sup>b</sup>

**Abstract** - This paper proposes the calculation method of magnetic coupling coefficient of the contact-less energy transmission system by 3D finite element method with a variation of the secondary core positions. The primary, secondary self and leakage inductances and the capacitances of a resonant circuit are calculated by the finite element analysis results. From these values, the magnetic coupling coefficients are obtained. The secondary voltages and currents at the secondary core positions are calculated by using the resonant circuit and compared.

1. 서 론

최근 변압기의 전자 에너지 변환 원리를 이용한 비접촉식 전력전달 장치(Contact-less Energy Transmission System : CETS)에 대한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 일반적인 정지된 변압기와 다른 점은 이동하는 시스템에 전력을 전달 할 수 있도록 1차측은 고정되어 있고 2차측은 이동을 하게 된다는 것이다. 1차측은 이동하는 시스템 옆에 붙어서 어느 위치에서도 전력 전달이 이루어지는 장점이 있는 반면, 1차측의 길이가 증가되면 누설 자속으로 인하여 2차측과의 결합계수가 줄어들어서 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이런 단점을 줄이기 위해서 공진 회로를 사용하고 전력전달 장치는 고주파 변압기를 사용한다. 이러한 고주파 변압기는 현재 전력전자 소자에 사용되고 있지만 개략적인 설계를 통하여 설계하고 있기 때문에 손실이 많이 발생하고 있다. 따라서 유한요소법을 이용한 전력 전달 장치의 정확한 특성 해석이 필요하다.

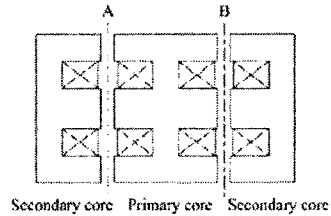
따라서 본 논문에서는 비접촉 전력 전달 장치의 3차원 유한요소 특성 해석에 대하여 설명한다. 전력 전달 장치의 2차측 위치에 따른 자기 및 누설 인덕턴스 그리고 자기 결합계수를 3차원 유한요소해석으로부터 구한다. 전력 전달 장치의 구동회로에 필요한 커패시턴스를 3차원 유한요소해석 결과인 누설 인덕턴스와 상호인덕턴스를 사용하여 구한다. 전력전자 시뮬레이터를 이용하여 전력 전달 장치의 2차측 위치에 따른 특성을 비교 검토한다.

2. 특성 해석

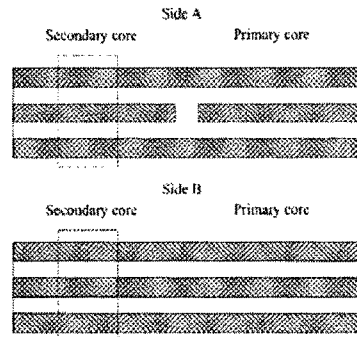
2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 채택한 해석 모델을 나타낸다. 그림 (a)에서 나타내었듯이 전력 전달 장치를 2개를 설계하였다. 1차측에 교류 전류를 가하면 발생한 자속이 2차측에 채워져서 2차측 단자에 전압을 발생하는 전자유도 현상을 이용한다. 그림 (b)에서와 같이 1차측의 코일 이해서 발생하는 누설자속의 영향을 줄이기 위하여 1

차측의 한면을 2부분으로 나누어 설계하였다. 표 1은 해석 모델의 제원을 나타내며, 자성체는 S45C를 사용하였다. 그림 2는 해석모델의 3차원 형상을 나타낸다.



(a) 정면도



(b) 측면도

그림 1 해석 모델

표 1 해석 모델의 제원

	Parameter	Value
Primary	Lamination depth	300[mm]
	Turn of coil	45
Secondary	Lamination depth	60[mm]
	Turn of coil	100
Frequency		1000[Hz]
Air gap		0.5 [mm]

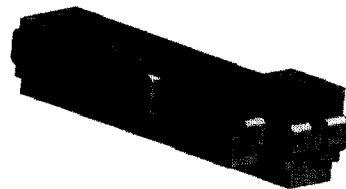


그림 2 해석모델의 3차원 형상

## 2.2 지배 방정식

3차원 유한요소법을 이용한 자계의 기본적인 수식은 자기벡터 포텐셜을 사용하여 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = J_0 + J_e \quad (1)$$

여기서  $\nu$  는 자기저항률,  $J_0$  는 전류밀도 그리고  $J_e$  는 와전류 밀도를 나타낸다.

Galerkin 법을 이용하면 (2)와 (3)을 얻을 수 있다.

$$G_i = \int_V \text{rot} N_i \cdot (\nu \text{rot} A) dV - \int_V N_i \cdot J_0 dV + \int_V N_i \cdot \left\{ \sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) \right\} dV - \int_S N_i \cdot \{ (\nu \text{rot} A) \times n \} dS = 0 \quad (2)$$

$$G_e = \int_V \nabla N_i \cdot \sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) dV + \int_S N_i \cdot \left\{ -\sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + \nabla \phi \right) \right\} \cdot n dS = 0 \quad (3)$$

여기서  $N_i$  는  $A$ 를 위한 벡터 보간함수,  $N_i$  는  $\phi$  를 위한 스칼라 보간함수,  $V$  는 해석 영역,  $V_e$  는 와전류를 갖는 도체 영역,  $S$  와  $S_e$  는 해석 영역의 경계와 와전류 해석 영역의 경계를 나타낸다.  $n$  는 면적  $S$  와  $S_e$ 의 단위 벡터를 나타낸다. 유한요소법의 행렬은 CG법을 이용하여 해석하였고, Newton-Raphson을 이용하여 비선형 해석을 하였다. 해석에 필요한 회로 방정식은 다음과 같다.

$$[U] = [R][I] + [L_0] \frac{d[I]}{dt} + [E], \quad (4)$$

$$[E] = \frac{d[\lambda_s]}{dt}. \quad (5)$$

여기서  $[U] = (U_a, U_b, U_c)^T$  : 상전압,  
 $[I] = (i_a, i_b, i_c)^T$  : 상전류,  
 $[R] = \text{diag}(R_a, R_b, R_c)$  : 일차권선저항,  
 $[L_0] = \text{diag}(L_{a0}, L_{b0}, L_{c0})$  : 누설인덕턴스  
 $[E] = (E_a, E_b, E_c)^T$  : 유기기전력  
 $[\lambda_s] = (\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c)^T$  : 쇄교자속

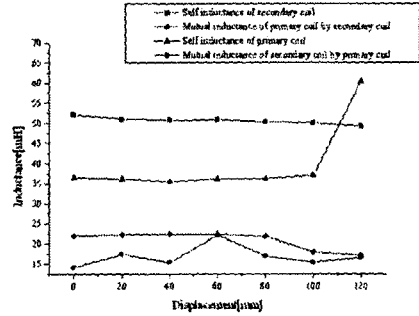
## 2.3 해석 결과 및 고찰

그림 3과 그림 4는 2개(왼쪽,오른쪽)의 비접촉 전력 전달 장치에 대한 2차측 위치에 따른 인덕턴스 프로파일과 자기결합계수를 나타낸다. 그림에서 displacement는 1차측의 왼쪽으로부터 2차측의 위치를 나타낸다. 그림 3(a)는 왼쪽 비접촉 전력전달장치의 인덕턴스 프로파일이며, 120[mm]에서 1차 코일의 자기인덕턴스는 다른 위치에서 보다 매우 큰 값을 가진다. 이것은 그 위치에서 1차측의 2코일이 동시에 여자되기 때문이다. 또한 2차 코일에 의한 1차 코일의 상호인덕턴스가 중간 위치에서 다른 위치에서보다 큼을 알 수 있다. 이것은 2차 코일의 길이가 1차 코일의 길이보다 상대적으로 짧아서 발생하게 된다. 그림 3(b)는 오른쪽 비접촉 전력 전달장치의 인덕턴스 프로파일이며, 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스가 거의 같은 값을 가짐을 알 수 있다. 그림 4에서 왼쪽 전력전달 장치의 자기 결합계수가 오른쪽 전력전달 장치보다 크지만 각 위치에서의 값이 매우 차이가 큼을 알 수 있다.

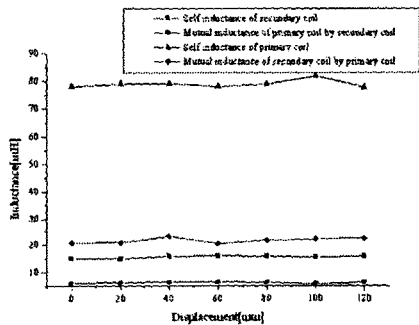
특히, 2차측의 위치가 120[mm]에서 매우 작아짐을 알 수 있는데 이것은 그 위치에서 1차측 2코일의 동시여자로 인하여 누설자속이 크게 되기 때문이다. 자기 결합계수는 식 (6)으로부터 구할 수 있다.

$$k = \sqrt{\frac{L_{12}L_{21}}{L_{11}L_{22}}} \quad (6)$$

여기서  $L_{12}, L_{21}$ 은 상호 인덕턴스,  $L_{11}, L_{22}$ 는 각각 1차측 코일과 2차측 코일의 자기 인덕턴스를 나타낸다.



(a)왼쪽 비접촉 전력전달 장치



(b)오른쪽 비접촉 전력전달 장치

그림 3 인덕턴스 프로파일

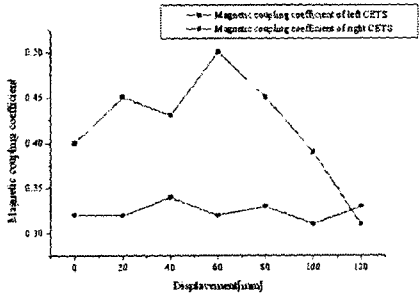
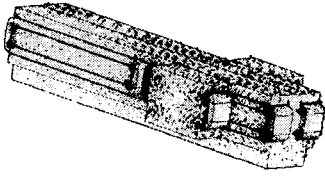
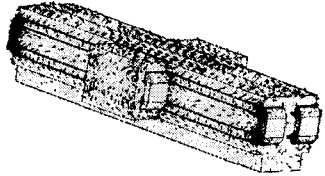


그림 4 자기결합계수

그림 5 (a), (b)는 2차측 위치가 60[mm], 120[mm]에서의 자속 선도를 보여준다. 그림 5 (a)에서 알 수 있듯이 60[mm]에서는 왼쪽 전력전달 장치에서는 1차측 코일 하나만 여자되기 때문에 오른쪽 전력전달 장치보다는 누설 자속이 적게 발생된다. 2차측의 위치가 120[mm]인 경우에는 왼쪽 전력전달 장치에서 1차측의 2코일이 동시에 여자되기 때문에 누설 자속이 증가하게 됨을 알 수 있다.



(a) 2차측의 위치가 60[mm] 일 경우



(b) 2차측의 위치가 120[mm] 일 경우  
그림 5 2차측의 위치에 따른 자속 선도

### 2.4 구동회로

그림 6은 비접촉 전력전달 장치의 구동회로를 나타낸다. 1차측의 누설 자속으로 인하여 공진회로를 사용하고 있으며, 필요한 주파수를 발생하기 위하여 인버터가 필요하다. 1, 2차측 누설 인덕턴스를 보상하기 위한 커패시턴스  $C_p$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$C_p = 1 / (4\pi^2 f^2 (L_{1s} + L_{2s}')) \quad (7)$$

여기서  $L_{1s}$ 는 1차측의 누설 인덕턴스,  $L_{2s}'$ 는 1차측으로 환산된 2차측 누설 인덕턴스를 나타낸다. 2차측에 병렬로 결합되어 있는  $C_s$ 는 여자 인덕턴스를 보상하기 위하여 도입되었고 다음 식으로 구할 수 있다.

$$C_s = 1 / (4\pi^2 f^2 L_m'') \quad (8)$$

여기서  $L_m''$ 은 2차측으로 환산된 여자 인덕턴스를 나타낸다. 그림 7은 2개의 비접촉 전력전달 장치의 구동회로에 필요한  $C_p$ ,  $C_s$ 의 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 왼쪽 비접촉 전력전달 장치의 커패시턴스 특성이 2차측의 위치에 따라서 값이 일정하지 않음을 알 수 있으며, 이것은 구동회로를 구성할 때 단점이 될 수 있음을 알 수 있다.

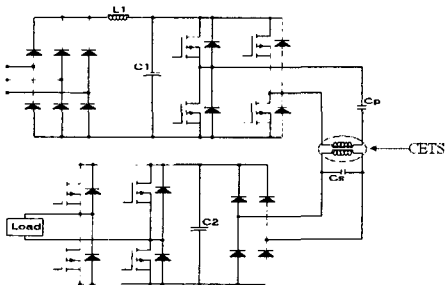


그림 6 비접촉 전력 전달 장치 구동회로

그림 8은 왼쪽 비접촉 전력전달 장치의 2차측의 위치에 따른 2차측 전압, 전류 특성을 나타낸다. 누설 자속의 영향으로 인하여 위치가 120[mm]의 전류가 60[mm]에서의 전류보다 크기가 적어짐을 알 수 있다.

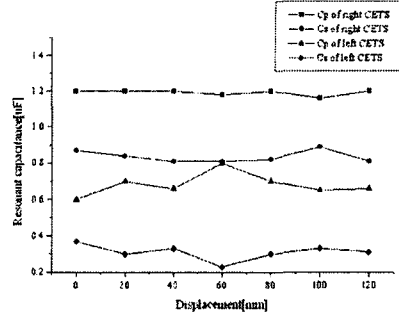
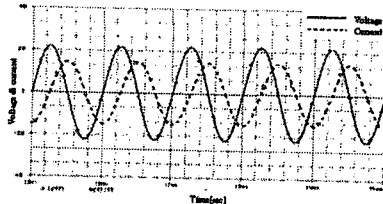
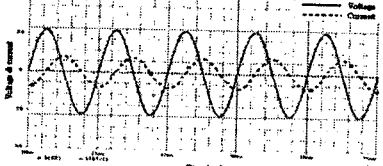


그림 7 공진 커패시턴스 특성



(a) 2차측 위치가 60[mm] 일 경우



(b) 2차측 위치가 120[mm] 일 경우

그림 8 2차측 위치에 따른 2차 전압 전류 특성

### 3. 결 론

본 논문에서는 비접촉 전력 전달 장치의 3차원 유한요소 특성 해석에 대하여 설명하였다. 해석결과 왼쪽 전력 전달 장치의 자기 결합계수의 값이 오른쪽 전력전달 장치보다 크기는 하지만 2차측의 위치에 따라서 크게 달라짐을 알 수 있었다. 공진회로에 필요한 커패시턴스의 크기 또한 왼쪽의 전력전달 장치의 특성이 오른쪽 전력전달 장치의 특성보다 좋지 않음을 알 수 있었다. 2차측 위치에 따른 왼쪽 전력전달 장치의 2차 전압 전류 특성 결과 누설 자속의 영향으로 60[mm]에서의 전류가 120[mm]에서의 전류보다 더 큼을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 비접촉 전력전달 장치의 1차측의 길이를 선정 하는데 있어서 유의할 필요가 있을 것으로 생각된다.

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B-272-0 00) 주관으로 수행된 과제임.

### [참 고 문 헌]

[1] Jacobus M. Barnard, Jan A. Ferreria, Jacobus Daniel van Wyk, "Sliding Transformer for Linear Contactless Power Delivery", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 44, No. 6, December 1997.  
 [2] Dae Hyun Koo, Pyo Jung Hong, Yun Hyun Cho, Koon-Seok Chung, "Design and Simulation of a Contactless Power Transmission System", *Automotive Electrical Equipment Optimization of Electronic Equipment*, pp. 377-382, Brasov, 2002.  
 [3] D. A. G. Pedder, A. D. Brown and J. A. Skinner, "A Contactless Electrical Energy Transmission System", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 46, No. 1, pp. 23-30, 1999.