

# 3차원 유한요소법을 이용한 비접촉 전력 전달 장치 특성 해석

論 文
54B-1-4

## Characteristic Analysis of Contactless Energy Transmission System using 3D Finite Element Method

禹 旻 一<sup>\*</sup> · 朴 瀚 錫<sup>\*</sup> · 曹 允 鉉<sup>\*\*</sup>  
(Kyung-Il Woo · Han-Seok Park · Yun-Hyun Cho)

**Abstract** - This paper proposes the calculation method of magnetic coupling coefficient of the contactless 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 according to the secondary core positions are calculated by using the resonant circuit and compared.

**Key Words** : Contactless Energy Transmission System, Leakage Inductance, Magnetic Coupling Coefficient

### 1. 서 론

최근 변압기의 전자 에너지 변환 원리를 이용한 비접촉 전력전달 장치(Contactless Energy Transmission System : CETS)에 대한 연구가 진행되고 있다[1-6]. 일반적인 정지된 변압기와 다른 점은 이동하는 시스템에 전력을 전달 할 수 있도록 1차측은 고정되어 있고 2차측은 이동을 하게 된다는 것이다. 1차측은 이동하는 시스템의 길이만큼 길이가 증가 되고 2차측은 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 공진회로를 사용하고 전력전달 장치는 고주파 변압기를 사용한다. 이러한 고주파 변압기는 현재 전력전자 소자에 사용되고 있긴 하지만 개략적인 설계를 통하여 설계 하고 있기 때문에 손실이 많이 발생하고 있다. 따라서 유한 요소법을 이용한 전력 전달 장치의 정확한 특성 해석이 필요하다.

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 상용 3차원 유한요소해석 프로그램(Magnet6)으로부터 구한다. 전력 전달 장치의 구동회로에 필요한 커패시턴스를 3차원 유한요소해석 결과인 누설 인덕턴스와 상호인덕턴스를 사용하여 구하고, 전력전자 시뮬레이터(Orcad)를 이용하여

전력 전달 장치의 2차측 위치에 따른 특성을 비교 검토 한다.

### 2. 특성 해석

#### 2.1 내장된 차체 테스트

그림 1은 본 논문에서 채택한 해석 모델을 나타낸다. 그림 (a)에서 나타내었듯이 전력 전달 장치 2개(왼쪽, 오른쪽)를 설계하였다. 1차측에 교류 전류를 가하면 발생한 자속이 2차측에 쇄교되어 2차측 단자에 전압을 발생하는 전자유도 현상을 이용한다. 그림 (b)에서와 같이 1차측의 코일에 의해서 발생하는 누설자속의 영향을 줄이기 위하여 1차측의 한 면을 2부분으로 나누어 설계하였다. 표 1은 해석 모델의 제원을 나타낸다. 그림 2 (a)는 해석모델의 3차원 형상을 나타내며 그림 2 (b)와 그림 2 (c)는 제작된 모델을 나타낸다.

#### 2.2 지배 방정식

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

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

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

Galerkin 법을 이용하면 (2)를 얻을 수 있다.

$$G_i = \int_V \text{rot} N_i \cdot (\nu \text{rot} A) dV - \int_S N_i \cdot \{(\nu \text{rot} A) \times n\} dS = 0 \quad (2)$$

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 釜慶大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博  
E-mail : cogging@pknu.ac.kr

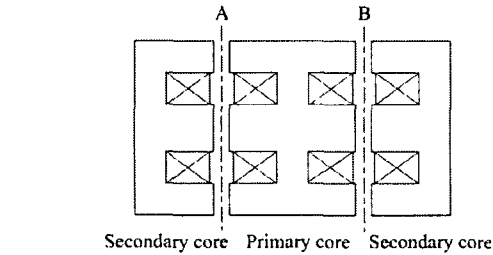
<sup>\*</sup> 正會員 : 釜慶大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

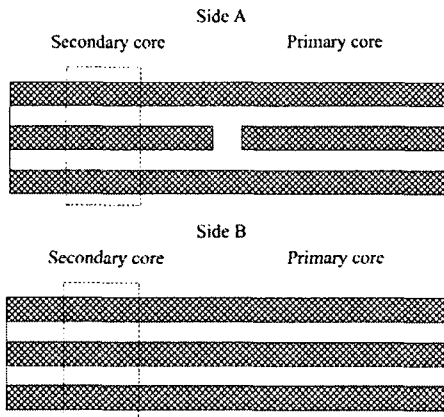
接受日字 : 2004年 10月 17日

最終完了 : 2004年 11月 24日

여기서  $N_i$  는  $A$ 를 위한 벡터 보간함수,  $N_j$  는  $\phi$  를 위한 스칼라 보간함수,  $V$  는 해석 영역,  $S$  는 해석 영역의 경계를 나타낸다. 유한요소법의 행렬은 CG법이 이용되었고, 비선형 해석을 위해서 Newton-Raphson법이 사용되었다. 해석을 위해서 외부회로를 고려 할 때 3차원 해석은 프로그램 자체에서 누설 자속이 고려가 되기 때문에 누설자속을 고려하지 않았다. 본 논문에서는 전류원으로 해석 모델을 해석하였다.



(a) 정면도



(b) 측면도

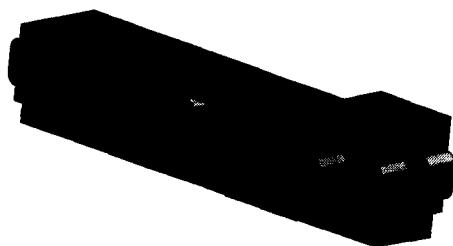
그림 1 해석 모델

Fig. 1 Analysis model

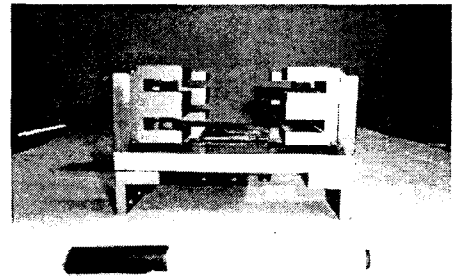
표 1 해석 모델의 제원

Table 1 Specification of analysis model

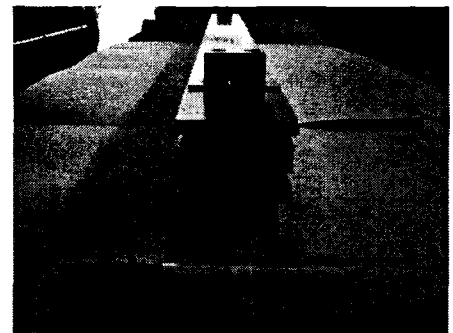
	Parameter	Value
1차측	적층 폭	300[mm]
	코일 턴 수	45
2차측	적층 폭	60[mm]
	코일 턴 수	100
주파수	1000[Hz]	
공극	0.5 [mm]	
재질	S45	



(a) 해석 모델의 3차원 형상



(b) 전력 전달 장치 2차측 정면도



(c) 전력 전달 장치 1차측 정면도

그림 2 해석모델의 3차원 형상

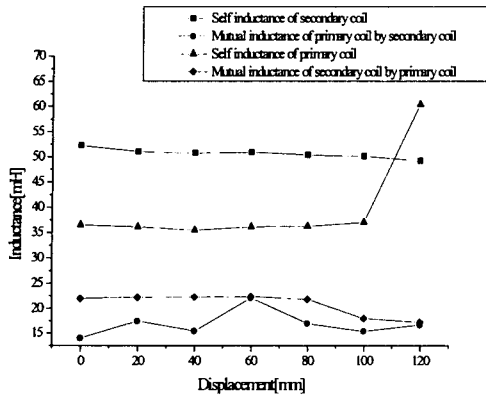
Fig. 2 3D shape of analysis model

### 2.3 해석 결과 및 고찰

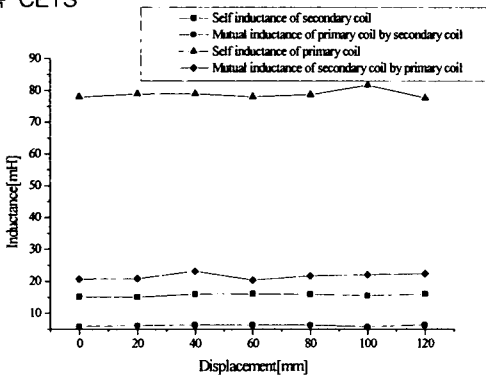
그림 3과 그림 4는 2개(왼쪽, 오른쪽)의 비접촉 전력 전달 장치에 대한 2차측 위치에 따른 인덕턴스 프로파일과 자기 결합계수를 나타낸다. 그림에서 displacement는 1차측의 왼쪽으로부터 2차측의 위치를 나타낸다. 그림 3(a)는 왼쪽 비접촉 전력 전달 장치의 인덕턴스 프로파일이며, 120[mm]에서 1차 코일의 자기인덕턴스는 다른 위치에서보다 매우 큰 값을 가진다. 이것은 그 위치에서 1차측의 2코일이 동시에 여자가 되기 때문이다. 또한 2차 코일에 의한 1차 코일의 상호인덕턴스가 중간 위치에서 다른 위치에서보다 큼을 알 수 있다. 이것은 2차 코일의 길이가 1차 코일의 길이보다 상대적으로 짧아서 발생하게 된다. 그림 3(b)는 오른쪽 비접촉 전력 전달 장치의 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 결합 계수는 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$k = \sqrt{\frac{L_{12}L_{21}}{L_{11}L_{22}}} \quad (3)$$

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



(a)좌측 CETS



(b)우측 CETS

그림 3 인덕턴스 프로파일  
Fig. 3 Inductance profile

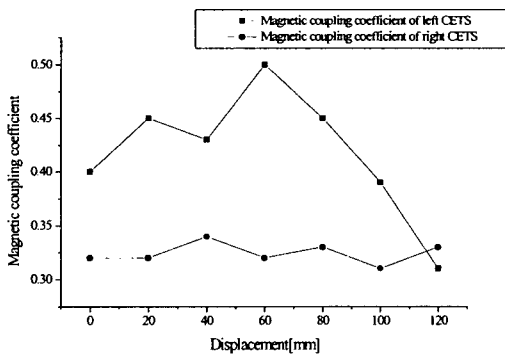
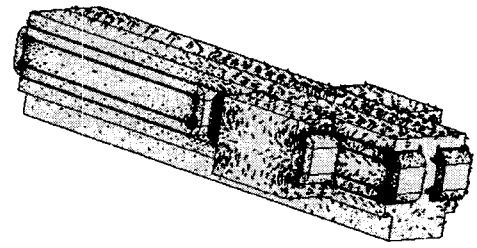
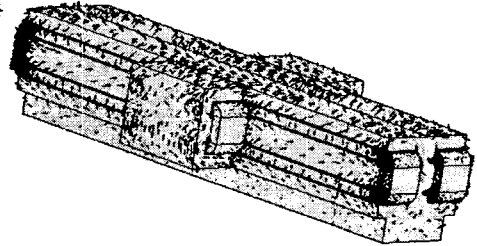


그림 4 자기결합계수  
Fig. 4 Magnetic coupling coefficient

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 누설자속이 적게 발생된다. 2차측의 위치가 120[mm]인 경우에는 왼쪽 전력전달 장치에서 1차측의 2코일이 동시에 여자되기 때문에 누설 자속이 증가하게 됨을 알 수 있다.



(a)이차



(b)이차측의 위치가 120[mm]일 경우

그림 5 2차측의 위치에 따른 자속 선도

Fig. 5 Flux plot according to the secondary positions

## 2.4 구동회로

그림 6은 비접촉 전력전달 장치의 구동회로를 나타낸다 [1]. 1차측의 누설 자속으로 인하여 공진회로를 사용하고 있으며, 필요한 주파수를 발생하기 위하여 인버터가 필요하게 된다. 시뮬레이션을 위해서 Orcad를 사용하였으며, 전력 전달 장치 부분은 그림 4에서 구한 자기 결합 계수로 대체 할 수 있다. 1, 2차측 누설 인덕턴스를 보상하기 위한 커패시턴스는 다음 식으로 구할 수 있다.

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

$$L_{1s} \quad L_{2s} \quad (4)$$

여기서  $L_{1s}$ 는 1차측의 누설 인덕턴스,  $L_{2s}$ 는 1차측으로 환산된 2차측 누설 인덕턴스를 나타낸다.

2차측에 병렬로 결합되어 있는  $L_m''$ 는 여자 인덕턴스를 보상하기 위하여 도입되었고 다음 식으로 구할 수 있다.

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

$$L_m' \quad (5)$$

여기서  $L_m'$ 은 2차측으로 환산된 여자 인덕턴스를 나타낸다.

그림 7은  $C_p, C_s$ 개의 비접촉 전력 전달 장치의 구동회로에 필요한 커패시턴스의 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 8은 왼쪽 비접촉 전력 전달 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.

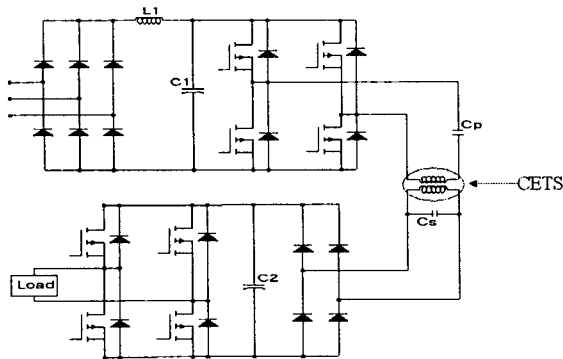


그림 6 비접촉 전력 전달 장치 구동회로  
Fig. 6 Driving circuit of CETS

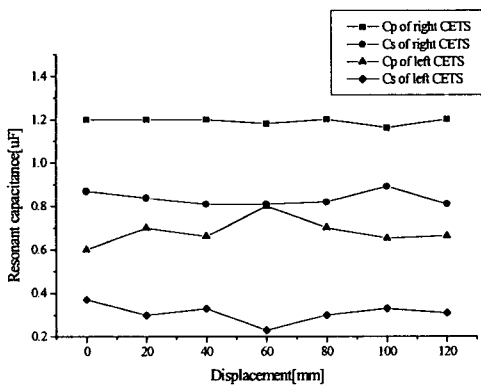
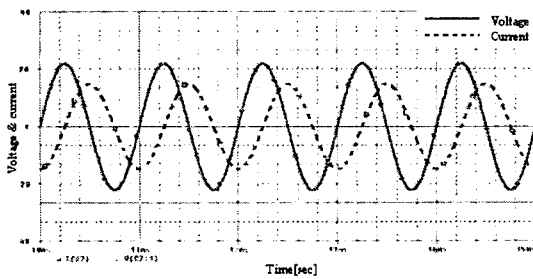
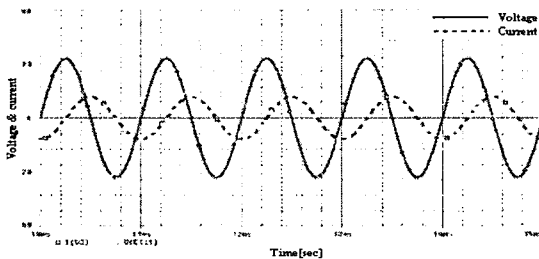


그림 7 공진 커패시턴스 특성  
Fig. 7 Characteristics of resonant capacitance



(a) 이차측의 위치가 60[mm]일 경우



(b) 이차측의 위치가 120[mm]일 경우

그림 8 2차측 위치에 따른 2차 전압 전류 특성  
Fig. 8 Secondary voltage and current characteristics according to the secondary positions

### 3. 결 론

본 논문에서는 비접촉 전력 전달 장치의 3차원 유한요소 특성 해석에 대하여 설명하였다. 해석결과 왼쪽 전력전달 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 해석 결과 누설 자속의 영향으로 60[mm]에서의 전류가 120[mm]에서의 전류보다 더 큼을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 비접촉 전력전달 장치의 1차측의 길이를 선정하는데 있어서 유의할 필요가 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2003-B-272-0-00)주관으로 수행된 과제로

### 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.
- [4] J. M. Barnard, J. A. Ferreria, J. D. van Wyk, "Optimizing sliding transformers for contactless power transmission systems", *IEEE PESC*, Vol. 1, pp. 245-251, June 1995.
- [5] Junji Hirai, Tae-Woong Kim, Atsuo Kawamura, "Study on Crosstalk in Inductive Transmission od Power and Information", *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 46, No. 6, PP. 1174-1182, Dec. 1999.
- [6] Arthur W. Kelley, William R. Owens, "Contactless Power Supply for an Aircraft-Passenger Entertainment System", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 4, No. 3, pp. 348-353, July 1989.

저 자 소 개



우 경 일 (禹 鏡 一)

1969년 9월 6일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년-현재 부경대학교 전기제어계측 공학부 조교수.

Tel : (051) 620-1427

Fax : (051) 620-1425

E-mail : cogging@pknu.ac.kr



조 윤 현 (曹 允 鉉)

1960년 2월 27일생. 1984년 한양대 전기공학과 졸업(공학사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년-1988년 삼성종합기술원 선임연구원. 1990년-1995년 한국전기연구소 선임연구원. 1995-현재 동아대학교 전기공학과 부교수.

Tel : (051) 200-7742

Fax : (051) 200-7742

E-mail : yhcho@daunet.donga.ac.kr



박 한 석 (朴 澣 錫)

1955년 3월 23일생. 1981년 중앙대 전기공학과 졸업(공학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 한국해양대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년-현재 부경대학교 전기제어계측공학부 교수.

Tel : (051) 620-1436

Fax : (051) 620-1425

E-mail : phanseok@pknu.ac.kr