

# 자기 유도방식을 이용한 550 VA 급 비접촉 전력전송기기의 개발

김진성 · 이유기 · 김세룡 · 이재길 · 박관수\*

부산대학교 전자전기공학과, 부산시 금정구 부산대학로 63번길, 609-735

(2012년 3월 10일 받음, 2012년 6월 8일 최종수정본 받음, 2012년 6월 8일 게재확정)

본 논문은 전선을 통하여 전력을 전달하는 일반적인 전력전송방식이 사용될 수 없는 환경에서 무선으로 전력을 전송하는 비접촉 전력전송기기 개발에 관한 것이다. 전력전송 방식은 자기공명방식보다 큰 전력을 전송하기에 적합한 전자기유도방식을 이용하였다. 전력전송기기의 설계 방법은 전기장하(Electirc loading)와 자기장하(Magnetic loading)의 비율로 코어와 코일을 설계하는 장하분배법>Loading Distribution Method)으로 설계 하였고 유한요소법(Finite Elements Method)으로 기기에 발생하는 전자기장을 해석하여 설계한 전력전송기기의 적합성을 판단하고 적절한 설계치를 보정하였다. 본 연구를 통하여 개발된 전력전송방식은 비접촉식으로 수 mm 거리를 가지는 근거리에서 무선으로 전력을 전송하기에 적합함을 보였다.

**주제어** : 전자기유도방식, 비접촉 전력전송, 장하분배법, 전류밀도, 유한요소해석

## I. 서 론

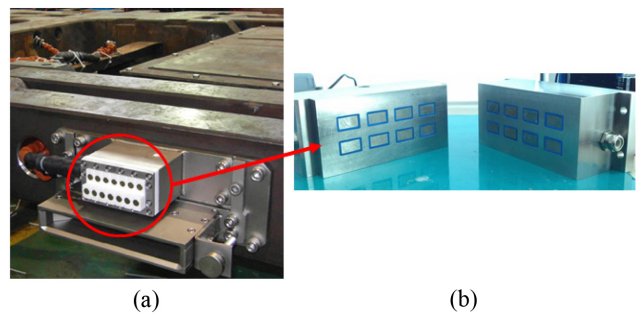
무선전력전송기술(WPT: Wireless Power Transfer)이란 가정용 혹은 산업용전력기들에게 전원선 없이 무선으로 전력을 공급하는 기술을 말한다.

무선전력전송은 전력 전송 방식에 따라 전자기 유도 방식(Electromagnetic inductive coupling method), 자기공명 방식(Magnetic resonance method), 전자파 방식(Electromagnetic Radiation)으로 나눌 수 있다.

전자파 방식은 수 km 거리에 전력전송이 가능하지만 전송할 수 있는 전력의 크기가 작다. 자기공명 방식은 수 m 이 내에서 전력전송이 가능하나 효율과 전송량이 떨어진다. 반면, 전자기 유도 방식은 수 mm 이하의 근거리에서 대전력 전송에 적합하고 다른 무선 전력전송 방식보다 상대적으로 효율이 높다[1].

본 논문에서는 수 mm 거리의 무선전력전송에 적합한 전자기유도방식을 이용하여 비접촉식으로 전력을 전송 할 수 있는 기기를 개발하였고 Fig. 1에 나타내었다. 본 논문에서 개발된 비접촉 전력 전송기기는 산업기기의 배터리에 전력을 전송하는 특수용도에 사용되는 기기로서 전선을 이용한 전력전송 방식이 부적합한 곳에 사용된다.

전력전송기기의 설계는 기기의 용량에 맞춰 전기장하와 자기장하의 비율로 코어와 코일을 설계하는 장하분배법>Loading Distribution Method)을 사용하였다. 그리고 유한요소해석으로 기기에 발생하는 전자기장을 해석하여 설계된 전력전송기기의 적합성을 판단하고 목표한 출력전압에 맞는 코일 권선수



**Fig. 1.** (Color online) (a) Existing power socket, (b) suggested non-contact power transfer machine.

의 설계치를 보정하였다.

## II. 비접촉 전력전송기기의 설계

### 1. 설계사양

비접촉 전력전송기기를 Table I과 같은 기준 사양으로 설계하였다. 장착되는 기기의 공간제약을 고정조건으로 두어 전체 크기를 허용 공간 안에 적합하도록 설계 하였다. 설계된

**Table I.** Specifications of design model.

Type	Non contact electric power transfer machine
Power capacity	550 VA
Electric power source	AC 220 V
Output	28 V
Frequency	60 Hz
Air gap length	2 mm
	No air gap design
Design comparison group	Flux density per 1.1 T
	Flux density per 0.7 T

\*Tel: (051) 510-2788, E-mail: gspark@pusan.ac.kr

기기의 비교를 위해 공극이 없는 기기와, 동일한 공극을 가지지만 기준자속밀도는 0.7 T, 1.1 T로 다르게 설계한 기기 등 총 세 가지의 비접촉 전력전송기기를 설계하고 비교하였다.

2. 비접촉 전력전송기기의 설계

본 논문은 비접촉 전력전송기기를 설계하는데 사용한 장하 분배법(Loading Distribution Method)은 하나의 극에 대해 감겨있는 턴 수와 코일에 흐르는 전류의 관계를 전기장하(Electric loading), 이로 인해 발생하는 극 자속을 자기장하(Magnetic loading)라 하여, 전기장하와 자기장하, 그리고 한 극의 용량과의 관계를 이용한 방법이다.

비접촉 전력전송기기의 자기장하를 계산하기 위해 기기의 비용량과 장하의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{S}{f \times 10^{-2}} = \sqrt{2} \pi (A \times 10^{-3}) (\phi \times 10^2) \quad (1)$$

여기서  $S/(f \times 10^{-2})$ 는 비용량이며,  $A$ 는 암페어 턴,  $\phi$ 는 자속을 나타내며, 위 식을 통해 비용량은 전기장하와 자기장하의 곱에 비례한다[2, 3].

비접촉식 전력전송기기의 코일의 권선 수를 결정하기 위해서는 공극의 길이를 고려해야한다. 일반적인 변압기는 1차 측과 2차 측의 공극 없이 전력의 전송 및 변환이 이루어지는 반면 비접촉식 전력전송기기는 자속이 공극을 통과하여 2차 측 코어에 유도 전압을 일으키기 때문에 공극의 길이에 따라 코일의 턴 수가 정해진다.

본 논문에서는 공극 없이 1차, 2차 코어 연결되어 있는 전력전송 기기와 2 mm의 공극을 가지고 기준 자속밀도를 0.7 T, 1.1 T로 설정한 전력전송기기를 설계 하였다. 3가지의 설계 기기 중 1.1 T를 기준자속밀도 설정한 기기의 2차 측 코일 권선수를 계산하기 위해 코어와 공극의 기자력을 구하고 두 기자력의 합을 통해 2차 측 코일의 권선 수를 구하였다. 나머지 기기들도 같은 과정으로 계산한다[4].

$$F_c = H_c l_c = 125 \times 0.33 = 41 \quad (2)$$

$$F_g = \frac{B}{\mu_0} \times 2l_g = 3501 \quad (3)$$

$$F = F_c + F_g = 3542 \quad (4)$$

$$T_2 = \frac{F}{I_2} = 316[\text{turns}] \quad (5)$$

여기서  $F_c$ 와  $F_g$ 는 코어와 공극에서 발생하는 기자력(Magneto-motive-force),  $H_c$ 는 코어의 자계의세기(Magnetic field intensity),  $B$ 는 기준자속밀도를 나타내며  $l_c$ 와  $l_g$ 는 코어

와 공극의 길이이다. 2차의 권선수를  $T_2$ 라 하고 그 수를 316 턴 일 때 1차의 권선 수  $T_1$ 은 식(6)과 같다.

$$T_1 = T_2 \times \frac{E_1}{E_2} \approx 2484[\text{turns}] \quad (6)$$

철심은 와전류로 인한 손실을 줄이기 위해 규소강판을 적층한 적층코어로 설계하였다. 코어 적층 판 사이에는 접합물질 삽입되어 본래의 설계 단면적보다 넓어진다. 이러한 설계 변수를 설계 기법 내에 추가하여 철심 단면적을 계산하면 다음과 같다.

$$Q_F = \frac{\phi}{0.9 \times B} = 335.9708[\text{mm}^2] \quad (7)$$

철심의 단면적과 코일의 굵기를 포함하는 전력전송기기의 창면적은 환선 코일이 감기는 만큼 코일과 코일사이에 공간이 발생한다. 이러한 코일 점적률을 고려하여 전력전송기기의 전체 창면적을 설계한다.

$$Q_c = T_1 \times q_1 + T_2 \times q_2 = 1948.7[\text{mm}^2] \quad (8)$$

식(8)에서  $T_1, T_2$ 는 1, 2차 코일의 권선 수이며  $q_1$ 과  $q_2$ 는

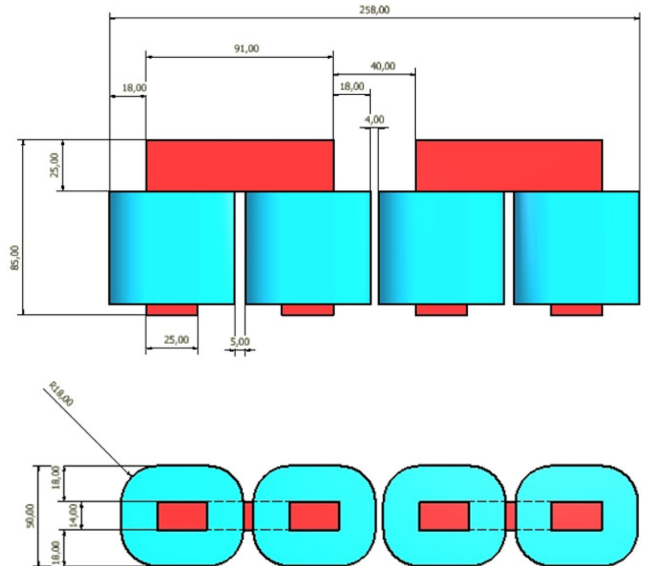


Fig. 2. (Color online) Schematic of non-contact power transfer machine in case of 1.1 T.

Table II. Designed to the specifications of each the model.

	$T_1$	$T_2$	$I_1$ (A)	$I_2$ (A)	$F_2$ ( $\times 10^{-4}$ Wb/m <sup>2</sup> )	$E_2$ (V)
Non air gap	692	88	1.25	9.82	12.02	28
1.1 T	2484	316	1.25	9.82	3.354	28
0.7 T	1760	286	1.25	9.82	4.767	28

코일의 단면적을 나타낸다.

Table II는 장하분배법(Loading Distribution Method)을 이용한 비접촉 전력전송기기 설계 결과를 각 설계 기준에 따른 권선 수, 전류 및 자속의 계산 값으로 나타내었다.

### III. 비접촉 전력전송기기의 특성 해석

#### 1. 비접촉 전력전송기기의 전자기장 해석

공극 2 mm를 통해 전달되는 자속의 크기로 2차 측에 유기되는 전압을 계산하였다. 자속의 크기를 계산하기 위해 유한요소 프로그램을 사용하였다. 유한요소프로그램은 COBHAM사의 OPERA-2D/3D로 계산하였다. 설계한 전력전송기기의 2차 측 자속의 크기는 Table II에 나타내었다. 자속밀도와 자속을 계산하기 위해 2D 모델링 유한요소해석을 하였다.

유한요소 해석을 이용하여 비접촉 전력전송기기의 자속과 자속밀도를 확인하였다. 1차 측 코일에서 발생하는 전류로 인해 자속이 발생하고 공극을 지나 2차 측 자속의 전달을 확인하였다.

2차 측에 발생하는 자속밀도의 크기를 통해 유기되는 전압의 크기를 계산하였다. 기준자속밀도를 0.7 T로 설계 한 경우 2차원 유한요소 해석 결과 공극에서 발생하는 자속밀도의 양은 약 0.62 T이었고, 1.1 T를 기준설계 한 경우는 2차원 유한요소 해석 결과 약 0.78 T임을 확인하였고, 2차 측 코어에서 발생하는 자속밀도의 크기는 각각 0.71 T, 0.96 T임을 시뮬레이션 결과 확인하였다. 계산된 자속밀도의 값을 바탕으로 2차 측 코일에 유기되는 전압을 계산하였다[5].

$$E_2 = 4.44 \times \Phi_2 \times T_2 \times f = 28.24 [V] \quad (9)$$

자속의 크기는 유한요소 해석으로 계산한 자속밀도의 크기에 단면적을 곱하여 계산 할 수 있고, 2차 측에 유기되는 기

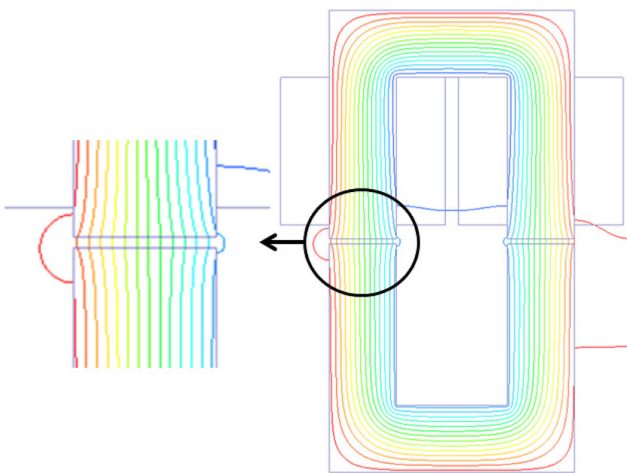


Fig. 3. (Color online) Flux line of 2D analysis.

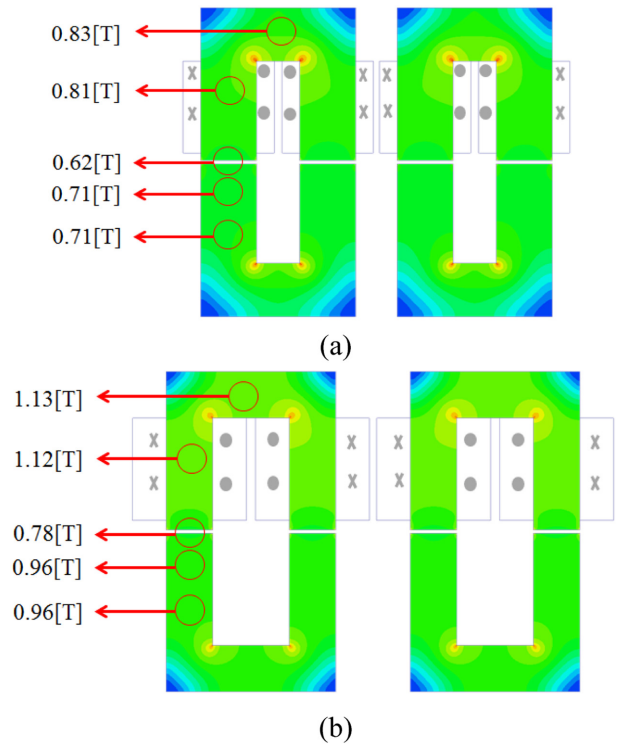


Fig. 4. (Color online) (a) Magnetic flux density using the 2D FEM analysis in case of 0.7 T (b) in case of 1.1 T.

전력의 크기  $E_2$ 는 설계 시 요구되어진 출력 전압의 값을 만족하는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 2차원 해석은 비접촉 전력전송 기기의 코어 단면적 전체를 요소로 나누어 계산되지 않기 때문에 단면적의 종 방향에 따른 자속의 분포 및 누설 자속으로 인한 손실이 고려되지 않는다. 또한 비접촉 전력전송기기는 공극을 통해 전달되는 2차 측 코어의 자속의 크기가 2차 측 코어에 유기되는 기전력에 가장 중요한 요소가 된다. 이로 인해 시제품 제작 전 정확한 기전력의 계산을 위해 3차원 유한요소법으로 해석하였다[6].

Fig. 5에서 1차 측 코일에서 입력되는 전압으로 인해 코어에 자속이 발생하고 이 자속은 2차 측 코어에 전달 되게 된다. 자속이 집중 될수록 붉은색 계열로 표시 되었고 1차 측 코어의 자속이 공극을 지나면서 2차 측 코어로 전달되면 상대적으로 자속의 크기가 줄어드는 것을 확인 할 수 있으며, 공극을 거쳐 전달되는 자속은 Fringing 효과로 인해 코어 단면적 모서리 부분에 집중됨을 볼 수 있다[7].

Fig. 6는 공극의 자속밀도 분포를 나타내었다. 총 2쌍의 코어 공극에서 발생하는 평균 공극자속밀도는 0.7 T 기준 설계 시 3차원 유한요소법 해석 결과 약 0.337 T이고, 1.1 T 기준 설계 시에는 약 0.468 T이다. 이는 2차원 유한요소 해석으로 확인한 공극자속 밀도 보다 작은 값이다. 2차 코어의 코일 권선수를 2차원 유한요소 해석과 같은 권선 수로 적용하여

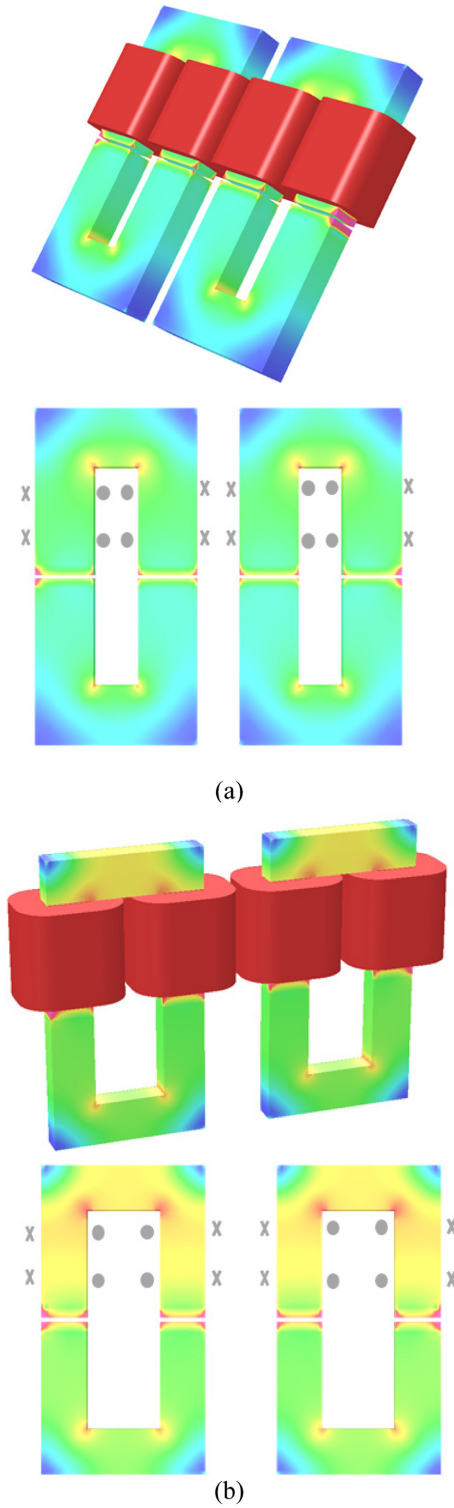


Fig. 5. (Color online) (a) Magnetic flux density using the 3D FEM analysis in case of 0.7 T (b) in case of 1.1 T.

계산하면 2차 측 코어에 유기되는 기전력은 감소한다. 따라서 2차 측에 유기 기전력을 키우기 위해서 식(9)에서 확인한 바와 같이 권선의 횟수를 0.7T 기준으로 설계 한 기기는

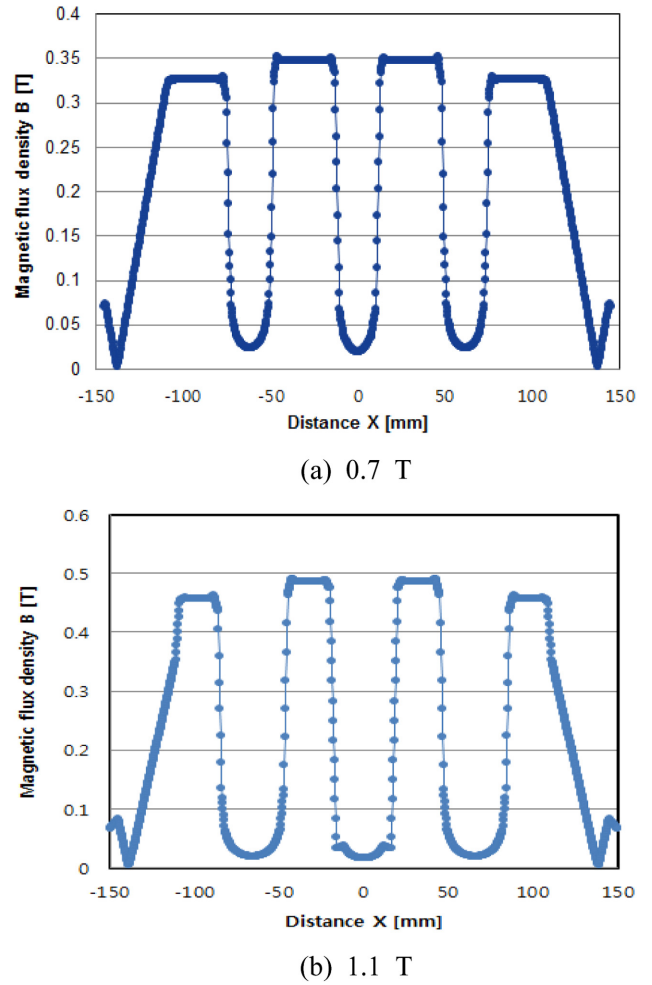


Fig. 6. (Color online) Gap flux of each machine.

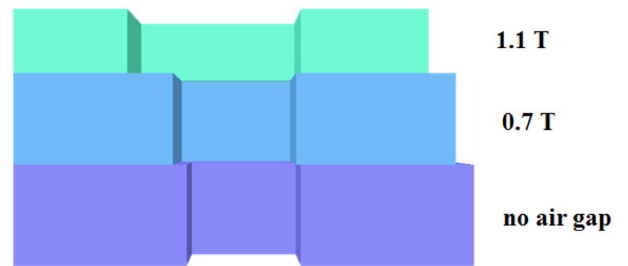


Fig. 7. (Color online) Comparison of cross-sectional area.

기존 244 턴에서 286 턴으로, 1.1 T를 기준으로 설계 한 기기는 316 턴에서 350 턴으로 변경하였다.

Fig. 7은 각각의 설계 변수에 따라 설계 된 코어의 단면적을 비교한 그림이다. 그림을 통해 코어의 자속밀도를 높이기 위해 코어의 단면적이 작아진 것을 확인하였다. 공극이 없을 경우에는 같은 기준자속밀도에도 넓은 단면적으로 설계가 가능하나 공극이 존재하는 기기일 경우 단면적을 줄이고 코일의 권선 수를 증가시켜 자속밀도를 높여 2차 코어에 전송



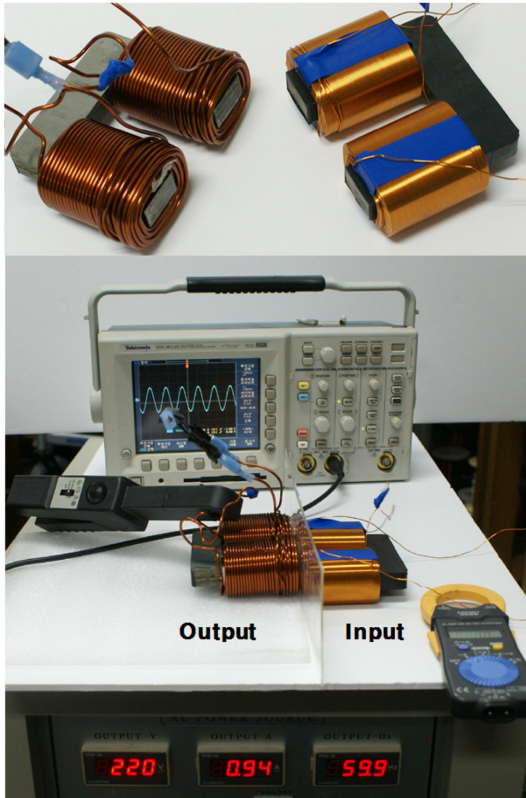


Fig. 8. (Color online) Measurement system of non-contact electric power transfer machine.

하게 된다[8].

Fig. 8은 비접촉 전력전송기기 실제 제작된 모습과 출력 시험을 진행한 모습이다. Input core에는 220 V, 60 Hz 전원을 입력하였을 때 2차 코일에서 발생하는 전압 출력은 약 28.7 V임을 확인 하였다.

Table III에서는 계산한 2차 코어 자속밀도의 크기와 2차원, 3차원 유한요소해석을 통해 계산한 자속밀도의 크기를 비교

Table III. Flux densities of 2<sup>nd</sup> core.

	Flux density (calculation) (T)	Flux density (2D analysis) (T)	Flux density (3D analysis) (T)
Gap flux	1.44	-	-
0.7 T	0.68	0.71	0.54
1.1 T	0.96	0.955	0.88

Table VI. Comparison of the design variable.

	$T_1$ (turns)	$T_2$ (turns)	$\Phi_2$ ( $\times 10^{-4}$ Wb/m <sup>2</sup> )	$E_2$ (Vrms)	Core cross-sectional area (mm <sup>2</sup> )
Gap flux	692	88	12.02	28.18	38 × 22
0.7 T	1760	286	4.767	28.79	35 × 20
1.1 T	2484	350	3.354	28.71	25 × 14

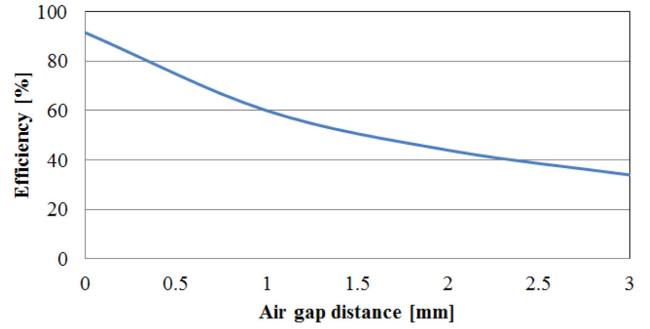


Fig. 9. (Color online) Electric power efficiency in respect of air gap distance.

하였다. 각각의 계산 결과의 값을 식(15)에 대입하여 2차 측에 유기되는 전압을 계산한 결과는 Table IV에 정리 비교하였다. 3차원 해석결과를 통해 2차 측에 전달되는 자속의 크기를 파악 후 2차 코일의 기전력을 28 V 출력을 얻기 위하여 2차 코어의 코일 권선 수를 조정하였다. 코일의 굵기는 입력전력이 인가되는 1차측에는 0.8 mm이며, 2차측에는 2 mm이다.

#### IV. 결 론

본 논문은 전선으로 전력을 전송하기에 적합하지 않은 환경에 사용하는 비접촉 전력전송기기를 설계하였다. 장하분배법>Loading Distribution Method)을 이용하여 공극이 없는 기기와 기준자속밀도 0.7 T, 1.1 T인 기기를 기초설계 하고 2차원, 3차원 전자기 유한요소해석을 통해 기기의 특성을 계산하고 설계 검증 및 보완하였다.

유한요소해석을 통해 공극의 자속밀도 및 2차코어의 자속밀도를 구해 코일의 권선수를 보완하고 2차 코일에 유기되는 기전력을 계산하였다. 또한 각각의 모델 해석 결과를 비교하여 공극의 유무와 기준자속밀도에 따른 비접촉 전력전송기기 특징을 연구하였다. 향후 비접촉 전력전송기기의 시험 모델을 통하여 실험 검증을 하며 효율 향상과 전압변동을 감소를 위한 연구가 필요하다.

#### 감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2011-0006080).

#### 참고문헌

[1] William C. Brown, IEEE Trans. Micro. **30**, 1230 (1984).  
 [2] G-T. Kim, G-H. Kang, and T-H. Choi, Trans. Kiee. **42**, 11

- (1993).
- [3] 竹内壽太郎 著元鍾洙, 大學課程 電機設計學 (1994) pp. 35~45.
- [4] Charles I. Hubert, *Electric Machines*, Prentice Hall, Englewood Cliffs (2003) pp. 46~48.
- [5] P. Morin, R. H. Nochetto, and K. G. Siebert, *SIAM* **44**, 631 (2002).
- [6] Kausumi Yamazaki, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **14**, 698 (1999).
- [7] Grigore Alexandru Cividjian, *IEEE Trans. Magn.* **45**, 694 (2009).
- [8] Massimo Barcaro and Nicola Bianchi, *IEEE Trans. Magn.* **46**, 121 (2010).

## Development of a Non-contact Electric Power Transferring System by Using an Inductive Coupling Method

**Jin Sung Kim, Yuki Lee, Se Ryong Kim, Jae Gil Lee, and Gwan Soo Park\***

*Dept. of Electrical Engineering, Pusan National University, Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan 609-735, Korea*

(Received 10 March 2012, Received in final form 8 June 2012, Accepted 8 June 2012)

In this paper, a non-contact power transferring has been performed. Power Transferring by using an electromagnetic inductive coupling is more suitable for high power transmission than by using a magnetic resonance method. Power transferring system has been designed with Loading Distribution Method to divide the electric and magnetic loading for designing the magnetic core and electric coil. To design optimum shapes of magnetic yoke, 3D finite element analysis has been performed. Experimental results show good agreement with numerical ones. So, it could be adopted in the electric power transferring system for a short-distance wireless electric power transferring machine.

**Keywords :** inductive coupling method, wireless power transfer, loading distribution method, current density, finite elements method analysis