

# 비접촉 전력전송 시스템을 위한 'ㄱ' 형 코어 설계 및 분석

論 文  
57-1-9

## Design and Analysis of A Rectangular Type Core for A Contactless Power Transmission system

陳康煥\* · 金知珉\*\* · 金洙弘\*\* · 金倫鎬<sup>†</sup> · 金恩洙\*\*\*  
(Kang-Hwan Jin · Ji-Min Kim · Soo-Hong Kim · Yoon-Ho Kim · Eun-Soo Kim)

**Abstract** - In the transformer that is used for the contactless power transmission system, the primary and secondary sides are separated structurally unlike general transformers. When the contactless transformer is built, it forms relatively bigger air gap than the general transformer. Thus it is difficult to transfer energy from the primary side input to the secondary side output with high power efficiently because of low coupling coefficient. This paper proposes a contactless transformer using the rectangular type core that maintains high coupling coefficient even when it has relatively large air gap. The performance characteristics of the proposed transformer are compared with the transformer using general EE core to the air gap variation. The proposed contactless system using rectangular type core and dc-dc full bridge converter, and the system using EE core type and dc-dc full bridge converter are respectively implemented and their performance characteristics are verified by the simulation and experiment.

**Key Words** : Contactless Transformer, EE Core, Rectangular Core

### 1. 서 론

최근 비접촉으로 전력을 전달하는 시스템이 많은 관심을 받고 있다. 비접촉 시스템은 기존의 전력선에 의한 전력 공급 대신 변압기의 자기 결합을 이용하여 기계적 접촉점 없이 전력을 전달하게 된다. 이러한 시스템은 장기간 사용 시 발생하는 접촉 불량 문제를 해결하고 다습한 환경에서도 안전하게 전력을 전달할 수 있다[1]. 그러나 비접촉 시스템에 사용되는 변압기는 일반적인 변압기에 비하여 상대적으로 큰 공극이 필요하고 결합계수가 낮아져 누설 인덕턴스가 증가하여 전력 전달의 비효율성을 유발하게 된다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 큰 공극에도 높은 결합계수를 유지할 수 있는 'ㄱ' 형 코어가 제안되었고[7], 비접촉 변압기의 큰 누설인덕턴스에 의한 영향을 줄이고 효율을 높이기 위하여 여러 형태의 공진 컨버터를 이용한 연구가 활발히 이루어지고 있다[2-6].

본 논문에서는 큰 공극에서도 높은 결합계수를 유지하여 누설인덕턴스를 줄이고, 추가적인 장치 없이 1차측 권선과 2차측 권선을 안정적으로 고정할 수 있는 'ㄱ' 형 코어를 제안하였다. 제안된 'ㄱ' 형 코어의 우수함을 확인하기 위해 일반적인 EE 코어를 사용한 비접촉 변압기와 비교하였다. 각각에 대하여 공극 변화에 따른(1mm ~ 10mm) 특성을 비

교 분석하고 dc-dc full bridge converter를 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 타당성을 증명하였다.

### 2. 비접촉 변압기 설계와 특성 분석

#### 2.1 비접촉 변압기 설계

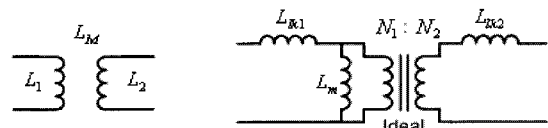


그림 1 변압기 등가모델

Fig. 1 Equivalent circuit of transformer

그림 1은 변압기 등가모델을 나타내며 결합계수(coupling coefficient,  $k$ ), 자기인덕턴스 (self inductance,  $L_1$ ,  $L_2$ ), 상호인덕턴스(mutual inductance,  $L_M$ ), 누설인덕턴스(leakage inductance,  $L_{lk1}$ ,  $L_{lk2}$ ), 자화인덕턴스(magnetizing inductance,  $L_m$ )와 변압기의 권선 비( $N_1 : N_2$ ) 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$L_M = L_m \left( \frac{N_2}{N_1} \right), \quad k = \frac{L_M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

$$L_{lk1} = L_1 - L_m, \quad L_{lk2} = L_2 - \left( \frac{N_2}{N_1} \right) L_M \quad (1)$$

변압기의 1차측 전압은  $L_{lk1}$ 과  $L_m$ 으로 전압 분배되고  $L_m$ 에 걸리는 전압이 이상적인 변압기의 1차측에 인가되어

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 中央大 電子電氣工學部, 正教授

E-mail : yhkim@cau.ac.kr

\* 學生會員 : 中央大 電子電氣工學部, 碩士課程

\*\* 正會員 : 中央大 電子電氣工學部, 博士課程

\*\*\* 正會員 : 全州大 電氣工學科 副教授

接受日字 : 2007年 10月 5日

最終完了 : 2007年 11月 5日

권선 비에 의해 2차측으로 전달된다. 이상적인 변압기의 2차측 전압은  $L_{lk2}$ 와 부하의 전압 분배에 의해 부하에 전압이 전달되기 때문에, 결합계수가 낮으면  $L_{lk1}$ 과  $L_{lk2}$ 가 증가하여 전압이득이 낮아짐을 알 수 있다. 전류이득 측면에서 보면 결합계수가 낮아짐에 따라 상대적으로 변압기의  $L_m$ 은 작아지고 누설인덕턴스는 증가하게 되어  $L_{lk2}$ 를 거쳐 2차측으로 전달되는 전류는 감소하고,  $L_m$ 을 통하여 흐르는 순환전류는 증가하게 된다. 즉, 부하가 요구하는 전류를 공급하기 위해서는 입력전류가 커져야 하고 그로인해 스위치 등의 도통손실이 증가하여 시스템의 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다.

누설인덕턴스를 줄이기 위해 본 논문에서는 ‘ㄱ’형 코어를 제안하고 그것의 형태를 그림 2 (c), (d)에 나타내었다. 그림 2는 일반적인 EE 코어와 ‘ㄱ’형 코어를 사용한 비접촉 변압기의 형태를 나타낸다.

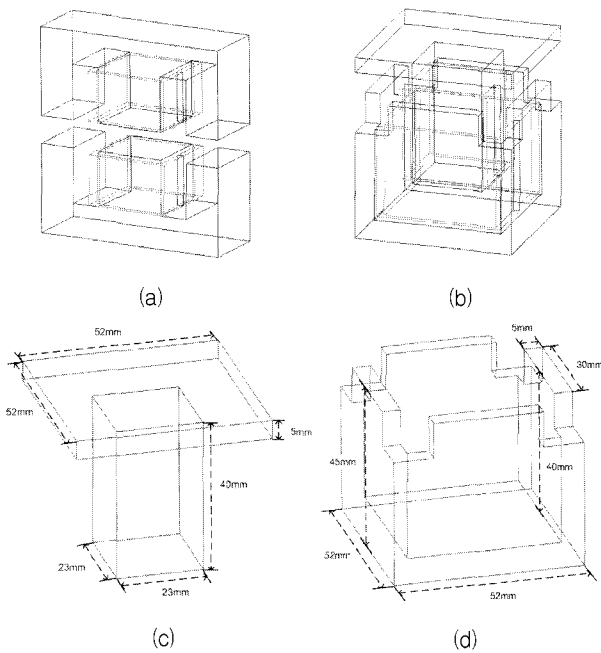


그림 2 EE 코어와 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 비접촉 변압기  
 (a) EE 코어 (b) ‘ㄱ’ 코어  
 (c) ‘ㄱ’ 코어 1차측 (d) ‘ㄱ’ 코어 2차측

Fig. 2 Contactless transformers using EE core and Rectangular core  
 (a) EE core (b) Rectangular core  
 (c) Primary side of Rectangular core  
 (d) Secondary side of Rectangular core

2.2 비접촉 변압기 특성 분석

Maxwell 3D를 사용하여 EE core, ‘ㄱ’ core의 자속 흐름과 자속 분포에 대하여 비교하고, 실제 제작된 각 코어를 사용한 비접촉 변압기 파라미터를 분석하였다.

그림 3(a)와 그림 3(b)는 EE 코어와 ‘ㄱ’ 코어를 지나는 자속 흐름을 각각 나타낸다. 화살표의 두께와 길이는 자속의 세기를 나타내며 코어 내의 자속 흐름을 파악할 수 있다. 그림 3 (c), (d)는 EE와 ‘ㄱ’ 코어 자속밀도의 단면도를 나타낸다. 코일이 감겨있는 center leg에서 자속의 분포가 ‘ㄱ’

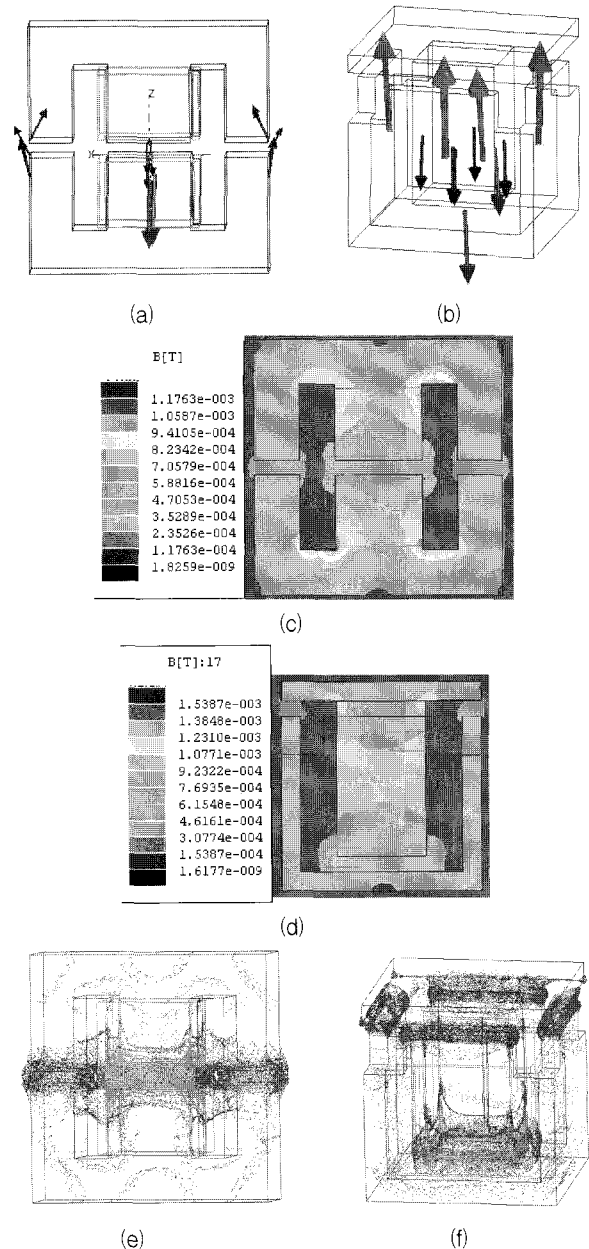


그림 3 자속 벡터와 자속 분포

- (a) EE 코어 자속벡터
- (b) ‘ㄱ’ 코어 자속벡터
- (c) EE 코어 단면 자속밀도
- (d) ‘ㄱ’ 코어 단면 자속밀도
- (e) EE 코어 자속분포
- (f) ‘ㄱ’ 코어 자속분포

Fig. 3 Magnetic flux vector and density

- (a) Magnetic flux vector of the EE core
- (b) Magnetic flux vector of the Rectangular core
- (c) Magnetic flux density on the EE core cross section
- (d) Magnetic flux density on the Rectangular core cross section
- (e) Magnetic flux distribution on the EE core
- (f) Magnetic flux distribution on the Rectangular core

코어에서 더 많음을 알 수 있다. 그림 3 (e), (f)는 EE와 ‘ㄱ’ 코어의 자속분포를 나타낸다. EE 코어에서는 코어를 통한 자기경로를 벗어나는 자속이 많이 분포하나 ‘ㄱ’ 코어에서는 상대적으로 적은 것을 볼 수 있다. 이는 EE 코어를 사용한 비접촉 변압기의 1차 2차 권선이 위 아래로 나누어져 감겨있기 때문에 권선이 밀접하게 결합되지 않아 누설 인덕턴스가 크게 발생하게 된다. 반면 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 비접촉 변압기는 1차 권선을 2차 권선이 감싸고 있고 나란히 위치하기 때문에 공극이 일정 부분 증가 되어도 높은 자기 결합을 하게 되어 EE 코어보다 누설 성분이 적고 결합계수를 높게 유지할 수 있게 된다.

표 1 공극에 따른 EE 코어를 사용한 비접촉 변압기 파라미터 (12턴 1:1)

Table 1 Parameters of contactless transformer using the EE core with respect to air gap (12turns 1:1)

	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm
$L_1(\mu H)$	70.55	48.81	37.03	32.83	30.8	29.63
$L_2(\mu H)$	66.76	47.2	36.38	32.58	30.83	29.76
$L_m(\mu H)$	49.91	28.6	16.38	11.21	8.85	7
$L_{lk1}(\mu H)$	20.65	20.21	20.65	21.62	21.95	22.63
$L_{lk2}(\mu H)$	16.86	18.6	20	21.37	21.98	22.76
k	0.7272	0.5958	0.4463	0.3428	0.2872	0.24

표 2 공극에 따른 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 비접촉 변압기 파라미터 (12턴 1:1)

Table 2 Parameters of contactless transformer using the Rectangular core with respect to air gap (12turns 1:1)

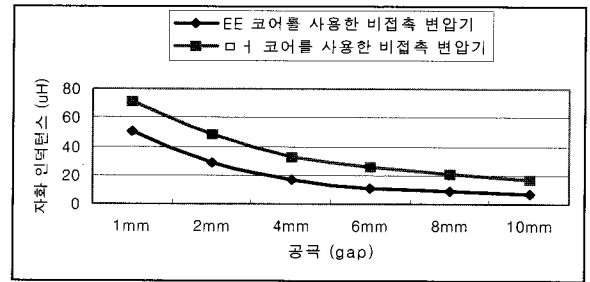
	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm
$L_1(\mu H)$	77.45	53.48	39.98	34.67	31.39	29.3
$L_2(\mu H)$	76.80	53.18	37.28	30.16	25.48	21.83
$L_m(\mu H)$	70.70	47.95	32.58	25.64	20.90	17.02
$L_{lk1}(\mu H)$	6.75	5.53	7.40	9.03	10.49	12.28
$L_{lk2}(\mu H)$	6.10	5.23	4.70	4.52	4.58	4.81
k	0.9167	0.8991	0.8438	0.793	0.7989	0.6729

표 1과 2는 공극 변화에 따른 EE 코어와 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 비접촉 변압기를 제작하여 측정된 변압기 파라미터이다. 제작된 비접촉 변압기에 대하여 최소 공극 1mm, 최대 공극 10mm를 가정하여 공극에 따른 변압기 파라미터를 측정하였다. 인덕턴스 측정은 임피던스 분석기(RLC meter)를 사용하였으며 식 (1)과 함께 각 파라미터를 구하기 위해 사용된 수식은 다음과 같다[8].

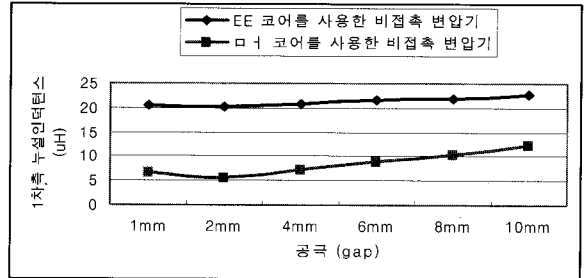
$$L_M = \frac{L_{par} - L_{ser}}{4} \quad (2)$$

여기서,  $L_{par}$ 은 비접촉 변압기 1차측과 2차측을 병렬 연결하여 측정된 인덕턴스이고  $L_{ser}$ 은 직렬 연결하여 측정된 인덕턴스이다.

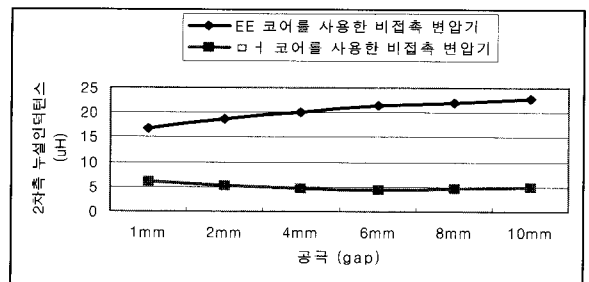
그림 4는 공극 변화에 따른 측정된 비접촉 변압기 파라미터 값을 나타낸 그래프이다. 그림 4 (a)에서 공극의 변화에



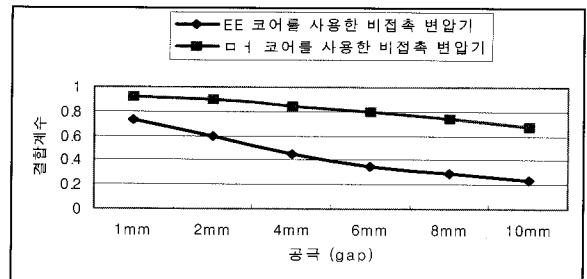
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4 공극에 따른 비접촉 변압기 파라미터 비교

- (a) 자화인덕턴스
- (b) 1차측 누설인덕턴스
- (c) 2차측 누설인덕턴스
- (d) 결합계수

Fig. 4 Comparison of contactless transformer parameters with air gap variation

- (a) Magnetizing inductance
- (b) Primary leakage inductance
- (c) Secondary leakage inductance
- (d) Coupling coefficient

따라서 자화인덕턴스가 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 경우 1mm 공극에서 약  $20\mu H$ , 10mm 공극에서 약  $10\mu H$  더 높게 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 그림 4 (b)와 (c)는 1차측 누

설인덕턴스와 2차측 누설인덕턴스의 변화를 보여준다. EE 코어를 사용한 경우보다 'ㄱ' 코어의 경우가 더욱 낮은 누설성분이 발생하는 것을 확인하였다. 결과적으로 그림 4 (d)에서 볼 수 있듯이 결합계수는 EE 코어의 경우 공극 가변에 따라 0.727 -0.24로 급격하게 낮아지나 'ㄱ' 코어를 사용한 경우는 0.917-0.673로 10mm의 공극에서도 높게 유지되어 큰 공극을 갖는 비접촉 시스템에 사용되는 변압기 코어 형태로써 'ㄱ' 코어가 훨씬 좋은 성능을 나타낼 수 있음을 확인하였다.

### 3. 시스템 시뮬레이션

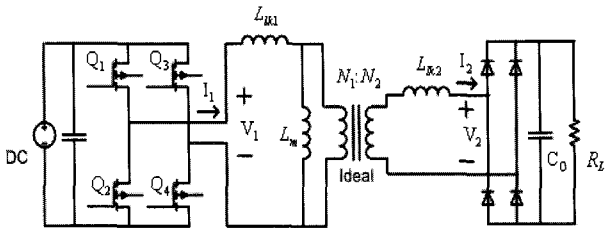


그림 5 비접촉 변압기를 적용한 DC-DC 풀 브리지 컨버터  
Fig. 5 DC-DC full bridge converter using contactless transformer

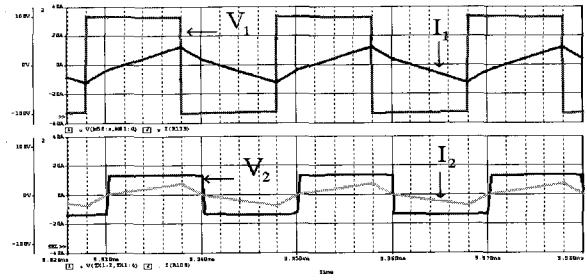
그림 5는 시뮬레이션에 사용된 비접촉 변압기를 적용한 dc-dc 풀 브리지 컨버터의 회로도이다. 입력 전압을 100V로 고정하고 스위칭 주파수는 50kHz로 설정하였다. EE 코어와 'ㄱ' 코어를 사용한 비접촉 변압기의 실측 데이터를 적용하여 공극 1mm와 10mm의 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 6은 공극에 따른(1mm, 10mm) EE 코어를 사용한 비접촉 변압기, 그림 7은 'ㄱ' 코어의 파라미터 사용 시의 결과 시뮬레이션이다. 각각의 코어를 사용한 비접촉 변압기의 1차측 전압, 전류와 2차측 전압, 전류를 표 3에서 비교하였다. 표 3의 모든 경우에서 변압기 1차측 전압  $V_{1rms}$ 는 약 98V로 동일하지만 2차측 전압  $V_{2rms}$ 는 1mm 공극 EE 코어의 경우 40V, 'ㄱ' 코어의 경우 71.6V로 'ㄱ' 코어를 사용한 비접촉 변압기가 높은 전압이득을 나타내고 10mm 공극에도 마찬가지임을 알 수 있다. 또한 1mm 공극 EE 코어를 사용한 비접촉 변압기 1차측 전류  $I_{1rms}$ 는 6.9A, 2차측 전류  $I_{2rms}$ 는 4.4A이나 'ㄱ' 코어의 경우 10A와 7.9A로 더욱 높은 전류이득을 나타냄을 알 수 있고 10mm 공극에서도 같은 결과가 나타남을 확인하였다.

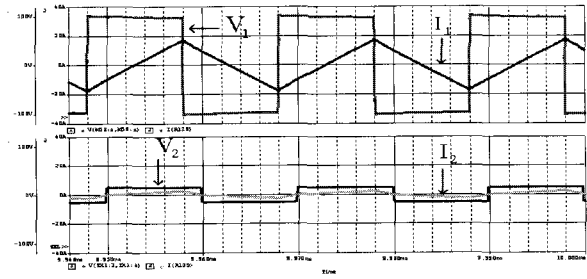
표 3 시뮬레이션으로 구한 1차측 전압, 전류와 2차측 전압, 전류의 rms 값

Table 3 rms values of primary voltage, current and secondary voltage, current with simulation

공극(gap)	EE 코어 사용		'ㄱ' 코어 사용	
	1mm	10mm	1mm	10mm
$V_{1rms}$ (V)	98	98	97.7	98
$I_{1rms}$ (A)	6.9	10	10	12
$V_{2rms}$ (V)	40	15	71.6	46
$I_{2rms}$ (A)	4.4	1.5	7.9	5



(a)



(b)

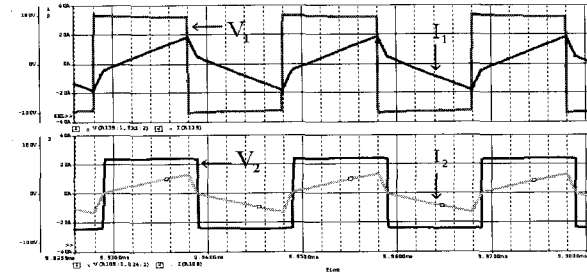
그림 6 EE 코어 파형

(a) 공극 1mm (b) 공극 10mm

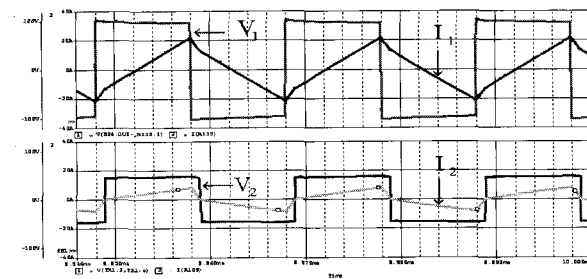
Fig. 6 Waveforms using the EE core

(a) gap 1mm (b) gap 10mm

$V_1$ [60V/div],  $I_1$ [20A/div],  $V_2$ [60V/div],  $I_2$ [20A/div]



(a)



(b)

그림 7 'ㄱ' 코어 파형

(a) 공극 1mm (b) 공극 10mm

Fig. 7 Waveforms using the Rectangular core

(a) gap 1mm (b) gap 10mm

$V_1$ [60V/div],  $I_1$ [20A/div],  $V_2$ [60V/div],  $I_2$ [20A/div]

4. 실험 결과

제안된 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 비접촉 변압기의 우수성과 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 풀 브리지 컨버터를 제작하고 각각의 비접촉 변압기를 적용하여 실험하였다. 시뮬레이션과 마찬가지로 100V 입력 DC 전압으로 고정하고 스위칭 주파수를 50kHz로 설정하였으며 비접촉 변압기를 제외한 다른 모든 시스템은 동일한 조건에서 실험되었다.

그림 8은 EE 코어 비접촉 변압기를 적용한 시스템의 변압기 1차측 전압과 전류, 2차측 전압과 전류를 나타내고, 그림 9는 제안된 ‘ㄱ’ 코어 비접촉 변압기를 적용한 실험 파형이다. 실험 결과를 가지적으로 비교할 수 있도록 전압 파형은 50V/div, 전류 파형은 12.5A/div으로 동일한 간격으로 측정하였다. 그림 8과 9를 비교하면, 공극 1mm일 때 EE 코어를 사용한 2차측 전압의 rms 값은 39V, 공극 10mm일 때는 15V이나 ‘ㄱ’ 코어의 경우는 공극 1mm일 때 70V, 10mm일 때 45V가 측정되어 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 비접촉 변압기가 높은 전압이득을 나타냄을 확인하였다. 또한 공극 1mm일 때 EE 코어를 사용한 비접촉 변압기 2차측 전류 rms 값은 3.7A, 공극 10mm인 경우의 2차측 전류는 1.3A이나 ‘ㄱ’ 코어의 경우는 공극 1mm일 때 7.1A, 공극 10mm일 때 4.2A로 더욱 높은 전류이득이 나타남을 알 수 있었다.

그림 10은 공극에 따른 비접촉 변압기의 출력 전력과 효율을 나타낸 것으로 ‘ㄱ’ 코어를 사용한 경우가 EE 코어보다 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

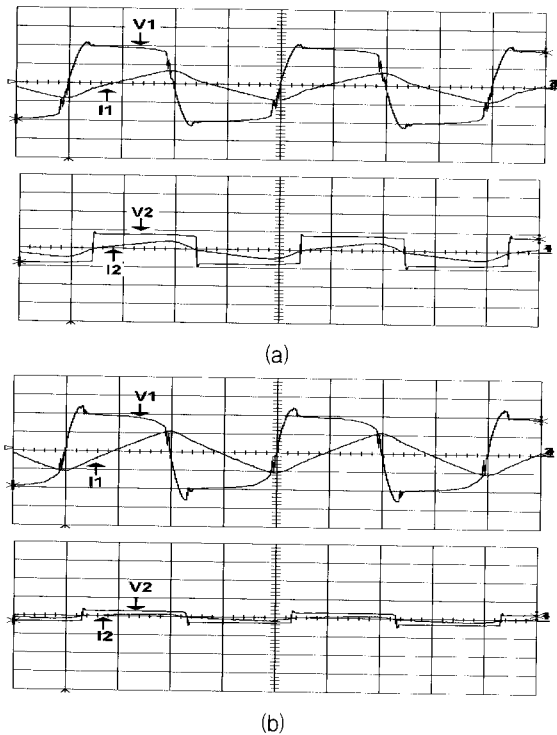


그림 8 EE 코어 비접촉 변압기를 적용한 실험 파형  
(a) 공극 1mm (b) 공극 10mm

Fig. 8 System experimental waveforms of contactless transformer using the EE core  
(a) gap 1mm (b) gap 10mm  
 $V_1$ [50V/div],  $I_1$ [12.5A/div],  $V_2$ [50V/div],  $I_2$ [12.5A/div]

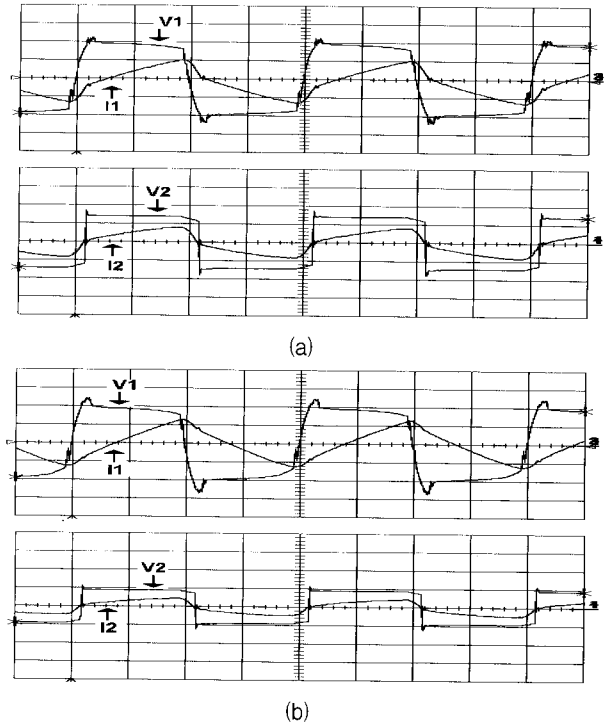


그림 9 ‘ㄱ’ 코어 비접촉 변압기를 적용한 실험 파형  
(a) 공극 1mm (b) 공극 10mm

Fig. 9 System experimental waveforms of contactless transformer using the Rectangular core  
(a) gap 1mm (b) gap 10mm  
 $V_1$ [50V/div],  $I_1$ [12.5A/div],  $V_2$ [50V/div],  $I_2$ [12.5A/div]

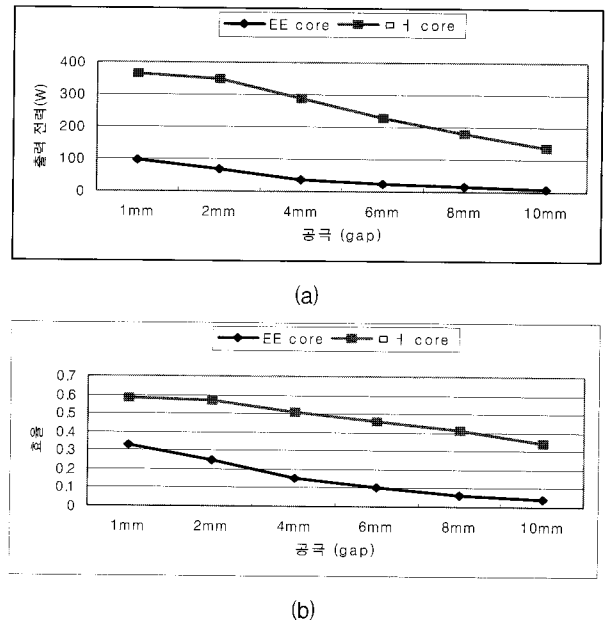


그림 10 공극에 따른 비접촉 변압기의 출력전력과 효율 변화  
(a) 출력 전력 (W) (b) 효율

Fig. 10 Output power and efficiency variation of contactless transformers with air gap variation  
(a) output power (b) efficiency

## 5. 결 론

본 논문에서는 큰 공극에도 높은 결합계수를 유지하여 전력전달 특성이 우수한 'ㄱ'형 코어를 이용한 비접촉 변압기를 제안하였다. 제안된 'ㄱ'형 코어와 일반적인 EE 코어를 사용한 비접촉 변압기를 제작하여 공극에 따른 변압기 특성을 분석하였고 제안된 'ㄱ'형 코어가 더욱 높은 결합계수를 유지하는 것을 확인하였다. 실험 결과 10mm 공극을 갖는 'ㄱ'형 코어를 사용한 비접촉 변압기의 출력 전력과 효율이 최소 공극 1mm를 갖는 EE 코어를 사용한 비접촉 변압기의 출력 전력과 효율보다 더 높아 양호한 성능을 보임을 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

이 논문은 한국과학재단 특정기초연구 (R01-2005-000-11173-0) 지원으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] Feezor, M.D.; Yates Sorrell, F.; Blankinship, P.R, "An interface system for autonomous undersea vehicles", Oceanic Engineering, IEEE Journal of , Vol. 26 Issue: 4 , Oct. 2001, pp. 522 -525
- [2] C. G. Kim, D. H. Seo, J. S. You, J. H. Park and B. H. Cho, "Design of a Contactless Battery Charger for Cellular Phone", IEEE Trans, Industrial Electrics, Vol. 48, 2001
- [3] 공영수, 김은수, 이현관, "낮은 커플링 변압기를 갖는 비접촉 전원의 개선된 고효율 공진컨버터", 전기학회 논문지, 제 54B권, 제 1호, pp. 33-39, 2005. 1
- [4] G. B. Joung, B. H. Cho, "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of transcutaneous transformer", IEEE Trans. PE, Vol. 13, pp.1013-1022, 1998. 11.
- [5] Esser, A., "Contactless charging and communication system for electric vehicles", Industry Applications Society Annual Meeting, 1993, Conference Record of the 1993 IEEE 2-8 Oct. 1993 Page(s):1021 - 1028 vol.2
- [6] Sakamoto, H.; Harada, K. "A novel circuit for non-contact charging through electro-magnetic coupling", Power Electronics Specialists Conference, 1992. PESC '92 Record., 23rd Annual IEEE, 29 June-3 July 1992 Page(s):168 - 174 vol.1
- [7] 전성준 외, "비접촉식 충전 장치를 위한 ㄱ 형 코어에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제8권, 제5호, pp.407-417, 2003
- [8] Myunghyo Ryu, Honnyong Cha, Yonghwan Park, Juwon Back, "Analysis of the contactless power transfer system using modelling and analysis of the

contactless transformer", Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 32nd Annual Conference of IEEE, 6-10 Nov. 2005

## 저 자 소 개



### 진 강 환 (陳康煥)

1979년 6월 29일생. 2006년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 현재 중앙대 대학원 전자전기공학부 석사과정.



### 김 지 민 (金知珉)

1975년 9월 23일생. 2001년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2004년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.



### 김 수 홍 (金洙弘)

1976년 8월 11일생. 2002년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2004년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.



### 김 윤 호 (金倫鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(공학). 2003년 전력전자학회 회장역임. 현재 중앙대 전자전기공학부 교수.



### 김 은 수 (金恩洙)

1964년 3월 26일생, 1986년 중앙대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 동 대학원 전기공학과 박사졸업. 1989년 ~ 2001년 한국전기연구원, 전력전자연구그룹 선임연구원, 2001년 9월~현재 전주대학교 공과대학 전기전자정보통신공학부 부교수, 현재 당 학회 편집위원.