

## 코어없는 초박형 PCB 변압기를 이용한 무접점 전력변환 회로

차헌녕, 최병조, 안태영\*

경북대학교 전자공학과, \*청주대학교 첨단공학부

### A Contactless Energy Transfer Circuit Using Coreless Low-profile PCB Transformer

Hon-Nyong Cha, Byung-Cho Choi, Tae-Young Ahn\*

Kyungpook National University, \*Chongju University

#### ABSTRACT

A coreless printed circuit board (PCB) transformer is employed in a contactless energy transfer circuit that achieves an efficient power conversion at the presence of a considerable airgap between the source and the load side. A half-bridge series resonant converter is selected as the contactless energy transfer circuit, in order to minimize the detrimental effects of large leakage inductance, small magnetizing inductance and poor coupling coefficient of the coreless PCB transformer. The operation and performance of the proposed contactless power converter are verified on a 7 W experimental circuit that provides an 18V/0.4A output from a 210-370 V input source.

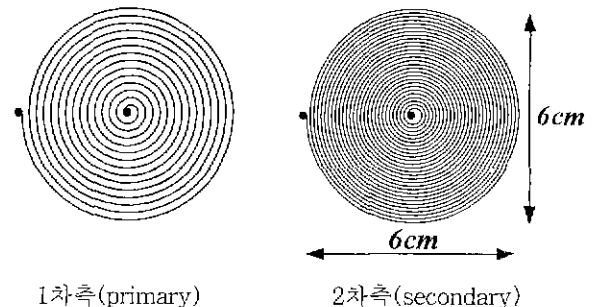


그림 1 PCB 변압기 구조

컨버터를 채택하였다. 출력이 7 W인 컨버터를 설계, 제작하여 입력전압과 부하전류 변화시 최대 72%의 효율을 얻었다.

## 2. PCB 변압기 구조 및 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터 설계

### 1. 서 론

전기적 접촉 없이 에너지를 전달하는 무접점 전력변환 방식은 에너지 전달요소로서 변압기를 이용하여 전기적인 에너지를 자기적인 에너지로 변환시킨다. 현재 널리 사용되고 있는 무접점 전력변환 방식은 코어를 사용하여 1차와 2차를 분리한다. 이 경우 코어를 포함하는 구조이므로 기계적 강도가 약하고, 코어의 물리적 크기 및 모양에 의해 시스템의 형태가 커다란 제약을 받는다.

본 논문은 제작이 간단한 코어없는 초박형 PCB 변압기를 이용하여 이러한 문제점을 없앤 새로운 형태의 전력변환 방식을 제안한다. 코어를 사용하지 않으므로 변압기의 결합계수는 낮아지고 누설 인덕턴스가 커지므로 에너지 전달의 비효율성을 유발한다 이러한 문제점을 극복하고 에너지를 효율적으로 전달하기 위하여 Half-Bridge 직렬 공진

### 2.1 PCB 변압기 구조

PCB 변압기는 동판 위에 권선(winding)을 제작하여 변압기의 역할을 한다. 권선의 모양으로는 사각형과 원형 구조를 고려할 수 있는데 권선 저항과 권선 사이에 존재하는 기생 용량을 줄이기 위해 원형 구조를 채택하였다. 본 논문에서는 동일한 PCB 변압기를 공극 (airgap) 이 서로 다른 경우에 대하여 고려하였다. 변압기의 형태와 인덕턴스 값들을 그림 1과 표 1에 나타내었다. 사용된 PCB의 두께는 1.6 mm이며 동 (copper) 의 두께는 75  $\mu\text{m}$ 이다. 1차측과 2차측의 권선수는 14:28로 하였고 1차측 권선의 폭이 1.86 mm이며 권선저항은 0.65  $\Omega$ 이고, 2차측 권선의 폭은 0.92 mm이며 권선저항은 2.7  $\Omega$ 이다 표 1에 나타난 파라미터 값들은 공극이 서로 다른 경우에 대해서 임피던스 분석기를 사용하여 500kHz에서 측정하였다. 그림 2는 PCB 변압기를 이용한 응용 예이다.

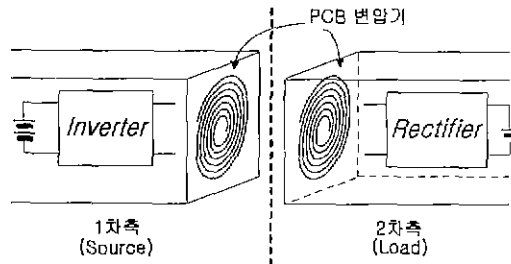


그림 2 PCB 변압기를 이용한 무접점 전력변환 개념도

표 1 PCB 변압기의 공극과 파라미터

airgap(mm)	Lk1(uH)	Lm(uH)	Lk2(uH)	k
3.2	1.3	3.73	5.17	0.74
4.9	1.88	3.15	7.5	0.63
5.8	2.05	2.98	8.2	0.59

## 2.2 PCB 변압기의 등가회로 및 주파수 특성

그림 3에 PCB 변압기의 등가회로를 나타내었다. 본 논문에서는 권선간에 존재하는 기생용량과 1차측과 2차측 사이에 존재하는 기생용량은 고려하지 않았다.<sup>[1][2]</sup> 그림 3에서 제시한 등가회로 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 임피던스 분석기로 10 kHz에서 2 MHz까지 저항 부하 ( $R_L=1K\Omega$ ) 시의 PCB 변압기의 주파수 특성을 비교하여 그림 4에 나타내었다. 권선 저항의 오차로 저주파에서 오차가 있고 권선 사이에 존재하는 기생 용량으로 인해 고주파에서 오차가 있으나 전반적으로 시뮬레이션과 측정 결과가 일치함을 알 수 있다.

## 2.3 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터

그림 5에 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터의 전체 회로가 나타나 있다. PCB 변압기의 경우 자화 인덕턴스 ( $L_m$ ) 가 아주 작기 때문에 PCB 변압기에 인가되는 전압이 클수록 자화 전류 ( $i_m$ ) 가 커진다. 본 논문에서는 이러한 PCB 변압기의 단점을 보완하고 상용 전원을 입력으로 하는 시스템에 적용하기 위해 PCB 변압기 앞단에 추가로 권선비가 15:1인 코어를 사용한 변압기를 이용하여 입력전압을 낮추었다.

### 전압 이득

Half-Bridge 직렬 공진 컨버터의 전압 이득은 그림 6의 등가회로로부터 구할 수 있다. 입력단에서는 2개의 MOSFET을 통해 만들어진  $V_i$ 의 기본파 성분만을 고려하였고 출력단의 정류 다이오드와 필터 커패시터는 등가저항 ( $R_e$ ) 으로 대신하였다.<sup>[3]</sup> 그림 6의 등가회로를 사용하면 식(1), (2)와 같이 전압이득 ( $M$ ) 을 구할 수 있다.

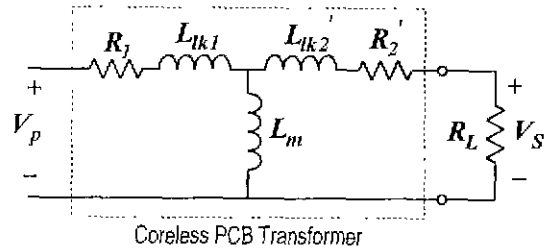


그림 3 PCB 변압기의 등가회로 모델

- $R_1$  : 1차측 권선저항
- $R_2'$  : 1차측에선 본 2차측 권선저항
- $L_{k1}$  : 1차측 누설 인덕턴스
- $L_{k2}'$  : 1차측에서 본 2차측 누설 인덕턴스
- $L_m$  : 1차측 자화 인덕턴스
- $R_L$  : 부하 저항

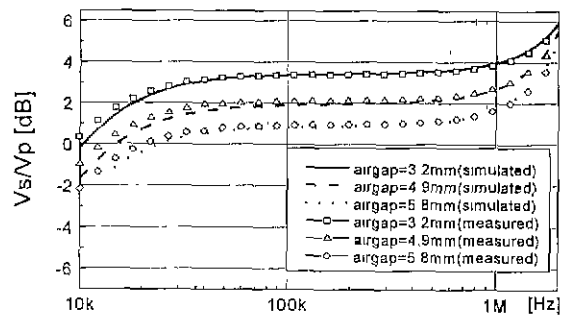


그림 4 PCB 변압기의 주파수 특성

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{\pi}{4} V_o, peak}{2 \cdot \frac{\pi}{4} V_i, peak} = \frac{V_o, peak}{2 V_i, peak} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{1}{N} \left| \frac{Z_m // Z_2}{Z_1 + Z_m // Z_2} \right| \left| \frac{Re}{j\omega L_2 + Re} \right|$$

$$M = \frac{1}{2N} \left[ \left( \frac{Q}{k} \omega_N \left( 1 - \frac{1}{\omega_N^2} \right) \right)^2 + \left( \frac{1}{k} - \frac{1-k^2}{k} \frac{1}{\omega_N^2} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

where,  $Q = \frac{\omega_o L_c}{Re}$ ,  $\omega_N = \frac{\omega}{\omega_o}$ ,  $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_c C_1}}$   
 $L_v = L_1 + L_m // N^2 L_2 = (1+k) L_1$

### 전류 이득

변압기 2차측으로 흐르는 전류의 피크값 ( $I_2$ ) 에 대한 변압기 1차측 전류의 피크값 ( $I_1$ ) 의 비를 전류 이득으로 정의한다. 전류 이득이 크면 같은 부하 전류를 공급할 때 변압기 1차측 전류가 커진다는 것을 의미하므로 효율은 낮아지게 된다. 따라서 효율을 높이기 위해서는 전류 이득을 작게 하여야 한다. 그림 6의 등가회로로 전류 이득을 계산할 수 있다. 부하 전류 ( $i_2$ ) 를 식(3)과 같이 가정하면  $V_r$ 와 자화전류 ( $i_m$ ) 는 식(4),(5)와 같다. 두 전류의 합으로

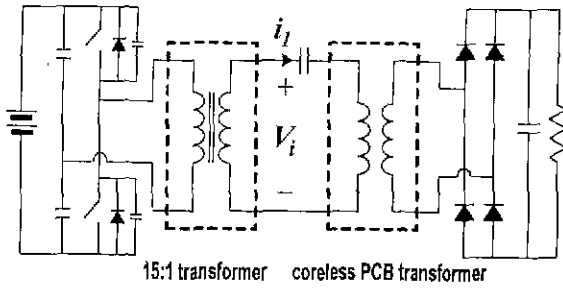


그림 5 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터

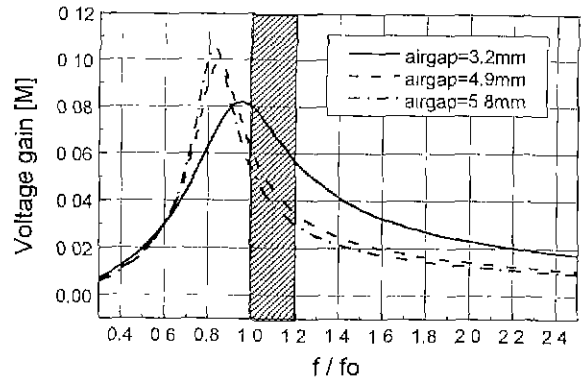


그림 7 공극의 변화에 따른 전압 이득

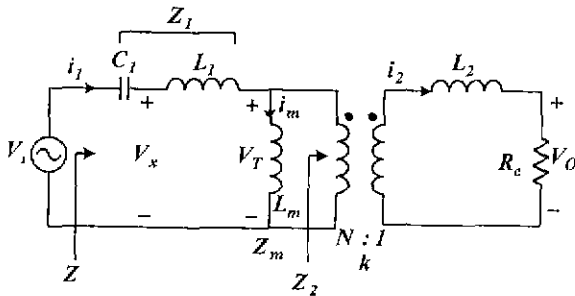


그림 6 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터 등가회로

ii 을 식(6)과 같이 계산할 수 있다. 계산결과는 식(7)과 같으며  $Q$ ,  $\omega_N$ 은 식(2)에서와 같이 정의한다.

$$i_2 \triangleq I_2 \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$v_T = -\frac{Z_2}{N} i_2 \quad (4)$$

$$i_m = \frac{v_T}{Z_m} = \left( -\frac{Z_2}{N Z_m} \right) I_2 \sin(\omega t) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} i_1 &= i_m + \frac{1}{N} i_2 \\ &= \left( \frac{Z_2}{N Z_m} + \frac{1}{N} \right) I_2 \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{I_1}{I_2} &= \frac{1}{N} \left| 1 + \frac{Z_2}{Z_m} \right| \\ &= \frac{1}{N} \left[ \frac{1}{k^2} + \left( \frac{1-k^2}{k} \frac{1}{Q \omega_N} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7) \end{aligned}$$

### 컨버터 설계

표 1에 보이대로 PCB 변압기는 공극을 크게 할수록 누설 인덕턴스는 커지고 자화 인덕턴스는 작아진다. 이로 인하여 변압기의 결합계수(k)는 낮아진다. 실험결과 권선수를 크게 할수록 자화 인덕턴스가 커지고 마주보는 PCB 변압기의 면적이 넓을수록 결합 계수도 커진다. 그러나 시스템이 허용할 수 있는 변압기의 부피가 제한되므로 변압기 설계시 이들을 고려하여야 한다.

PCB 변압기 권선비는 효율을 향상시키기 위해 2차측을 1차측의 2배로 하였다. 식(2)에서 구한 전압 이득 공식을 이용하여 그림 7에 공극이 변할 때 주파수에 대한 전압 이득을 나타냈다. Half-Bridge 직렬 공진 컨버터가 영전압 (ZVS) 스위칭이 되도록 하기 위해 스위칭 주파수를 공진 주파수 보다 높은 곳에 위치 시킨다. 그림 7의 빗금친 부분에서 알 수 있듯이 스위칭 주파수를 가장 작은 공극(3.2mm)을 가진 변압기의 공진 주파수(473kHz)부근에 위치 시켜야 공극이 커져도 영전압 스위칭이 실현될 수 있다. 이 경우  $C_1=50$  nF이 된다. 그림 7에서 보듯이 공극이 커질수록 전압 이득은 작아진다.

### 3. 실험 결과

Half-Bridge 직렬 공진 컨버터를 공극이 가장 작은 경우를 기준으로 설계하였고 공극이 변화할때의 PCB 변압기의 입력 전압 변화에 따른 효율 그래프와 부하 전류 변화에 따른 효율 그래프를 그림 8과 그림 9에 나타내었다.  $I_o=400$ mA이고 입력 전압이 210V~370V로 변할 때, 공극이 3.2mm인 경우 효율이 68%~72%이지만 공극이 커질수록 자화 전류가 커지기 때문에 효율은 낮아진다. 입력 전압이 290V이고 부하전류가 200mA~800mA로 변화할 때의 효율은 65%~72%이지만 공극이 커질수록 효율은 낮아진다. 그림 10과 그림 11은 입력이 300V, 출력 전류가 400mA 인 컨버터의 PCB 변압기 1차측과 2차측의 전압 파형을 시뮬레이션과 실험으로 나타냈다. 그림 12와 그림 13에 PCB 변압기의 1차측과 2차측의 전류 파형을 시뮬레이션과 실험으로 나타냈다.

### 4. 결 론

코어를 사용하지 않는 초박형 PCB 변압기를

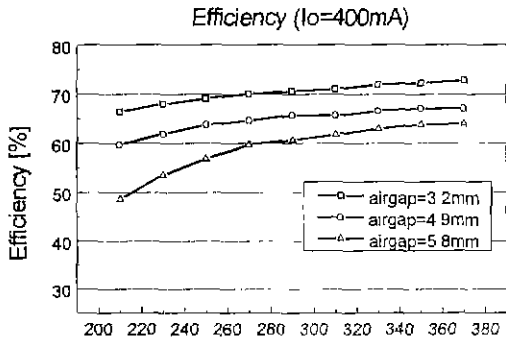


그림 8 입력전압 변화에 따른 효율

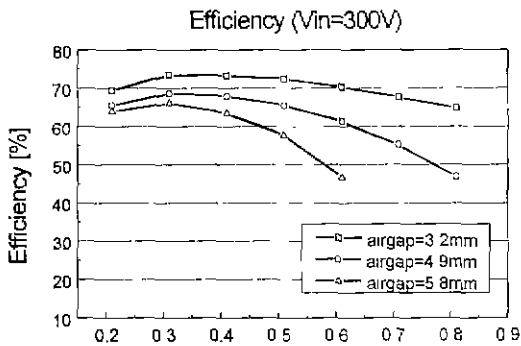


그림 9 부하 전류 변화에 따른 효율

이용하여 전기적 접촉이 없는 전력변환 회로를 설계하고 실험으로 성능을 확인하였다. PCB 변압기의 등가회로 모델을 이용하여 PSpice 시뮬레이션과 실제 측정 결과를 비교 분석하였다. 공극이 가장 작은 경우를 기준으로 하여 컨버터를 설계, 제작하여 입력 전압과 부하 전류 변화시 최대 72%의 효율을 얻었다.

### 참 고 문 헌

- [1] S.Y.R.Hui, S.C.Tang, and H.Chung, "An accurate circuit model for coreless PCB-based transformers," European Power Electronics Conference, Trondheim, Norway, September, 1997.
- [2] S.Y.R.Hui, H.Chung, and S.C.Tang, "Coreless printed circuit board(PCB) transformers for power MOSFET/IGBT gate drive circuits," IEEE Trans. Power Electron., vol.14, pp.431-437, May 1999
- [3] R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies," IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 3, No.2, April, 1988



그림 10 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터 시뮬레이션 파형 PCB 변압기 1차측 전압(위),2차측 전압(아래)



그림 11 PCB 변압기 1차측 전압(10V/div), 2차측 전압(10V/div) 파형

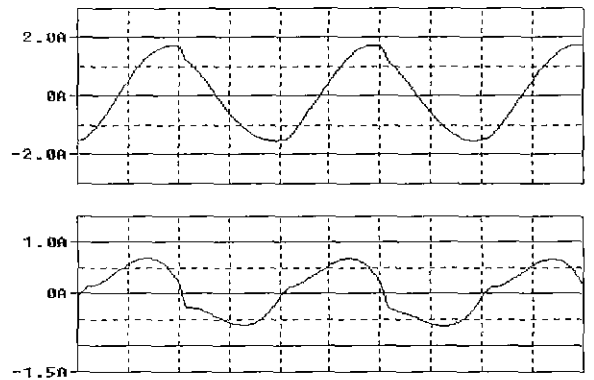


그림 12 Half-Bridge 직렬 공진 컨버터 시뮬레이션 파형 PCB 변압기 1차측 전류(위),2차측 전류(아래)

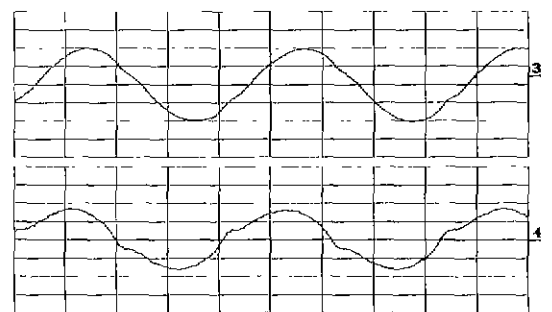


그림 13 PCB 변압기 1차측 전류(1A/div), 2차측 전류(0.5A/div) 파형