

PCB 변압기 및 인덕터를 이용한 ZVS Forward DC-DC 컨버터

황 선 민, 안 태 영, 최 병 조[^], 김 희 준[§]

청주대학교 첨단공학부, [^]경북대학교 전기·전자공학부, [§]한양대학교 전자·컴퓨터공학부

ZVS Forward DC-DC Converter using PCB Transformer and Inductor

Sun Min Hwang, Tae Young Ahn, Byung Cho Choi[^], Hee Jun Kim[§]

Chongju University, [^]Kyungpook National Univ., [§]Hanyang University

ABSTRACT

In his paper, the principle of using coreless printed circuit board (PCB) based transformer in 2.3MHz, 12W class ZVS Forward DC-DC converter has been successfully demonstrated. With no core loss, coreless PCB transformer and inductor are found to have favorable characteristics at high frequency operations. The maximum power conversion efficiency is 80%. Even for high operating frequency, an efficiency greater than 70% can be obtained with under 0.7% regulation error.

1. 서 론

최근 휴대형 전자 기기의 급속한 발달과 함께 안정된 전원을 공급하는 스위칭 전원장치에서도 시장 규모가 점차 확대됨과 동시에 제품의 소형화, 경량화가 강하게 요구되고 있다. 특히 전원장치의 핵심이 되고 있는 DC-DC 컨버터의 소형·경량화와 함께 온-보드형 전원장치 등에서 요구되고 있는 박형화 (Low Profile)는 전체 시스템의 밀도를 향상시키기 때문에, 중요한 연구 개발 목표 중의 하나가 되고 있다. 그러나 스위칭 방식의 DC-DC 컨버터에서는 에너지를 변환시키는 과정에서, 변압기 및 인덕터와 같은 코어를 사용한 권선형 소자를 필수적으로 이용하고 있기 때문에 장치의 높이기 제한되고, 개발기간이 길어지며, 제품의 원가에 많은 영향을 미치게 된다.

한편 전원장치가 소용량인 경우, 박형(Low Profile) 전원을 구성 할 수 있는 방법으로 현재 두 가지 방법이 주로 사용되고 있다. 우선 첫 번째 방법으로는 집적회로의 박막 기술(thin film technology)을 이용하여 전력변환회로 구성에서 필요한 인덕터 및 변압기 등을 주변 소자와 함께 한 개의 IC에 집적하는 것이다[1]. 두 번째 방법으로는, 후막 기술(thick film technology)을 이용하는 것이다. 즉, 인쇄회로기판(PCB)의 패턴과 페라이트 코어를 한 조로 구성하여 인덕터와 변압기를 구성하는 것이다[2]. 그

러나 첫 번째의 경우, 권선의 선 폭과 두께, 사용할 수 있는 코어의 재질이 한정되기 때문에 용량이 매우 한정된다는 단점이 있고, 두 번째의 경우에서도 페라이트 코어를 사용하기 때문에 제품의 두께가 코어에 의해 제한을 받는 단점이 있다. 한편 이러한 문제점을 해결하기 위한 한 가지 방법으로, 코어를 사용하지 않는 PCB 변압기에 대한 연구가 최근 활발히 논의되고 있다[3, 4]. 코어를 사용하지 않는 PCB를 이용한 변압기 및 인덕터를 전원장치에 적용시키는 경우, 다음과 같은 장점이 있다.

- 최대 동작 주파수가 코어의 재질에 의해 제한을 받았던 기존의 변압기에 비해, 코어를 사용하지 않는 PCB 변압기 및 인덕터는 고주파 동작에 적합하다.
- 권선과 코어를 사용하지 않기 때문에 변압기 및 인덕터 제조 공정이 단순해지며, 제조 가격과 시간이 절약된다.
- 기본적으로 공심 코어이기 때문에 전류에 의해 포화되지 않는다.
- 양면의 PCB로 쉽게 1, 2차 변압기가 가능할 뿐만 아니라, 변압기 절연 내압을 약 15-40kV 이상으로 키울 수 있다.
- 변압기 및 인덕터의 높이를 PCB 두께로 낮출 수 있다.

본 논문에서는 한정된 용도에서만 적용되었던 기존의 코어를 사용하지 않는 PCB 변압기를 DC-DC 컨버터에 적용시킨 실험 결과 및 실용 가능성에 대해 보고한 것이다. 회로방식은 안정성이 우수하고, 고주파 스위칭에 적합한 영전압 스위칭(ZVS) Forward DC-DC 컨버터를 사용하였으며, 특히 컨버터의 필터로 사용되고 있는 평활 인덕터도 코어를 사용하지 않고 PCB 패턴만으로 구성하였으며, 결과적으로는 회로 내부에 자성 코어를 전혀 사용하지 않았다. 실험 컨버터의 최대출력은 12W, 최대 스위칭주파수는 2.3MHz, 입력전압은 24V이다.

2. PCB 변압기 및 인덕터

일반적으로 PCB 변압기의 권선 방법은 나선형(spiral), 미로형(meander), 망형(mesh) 등이 있으며, 이 중에서 큰 자화 인덕턴스를 얻기 위해서는 나선형 권선 방법이 유리하다고 보고 되어 있다. 특히 나선형 권선 방법 중에서도 각형과 원형이 있는데 본 논문에서 사용된 변압기는 나선 구조에 원형 패턴을 사용하였다. 그림 1에는 본 논문에서 사용한 PCB 변압기의 구조를 보여주고 있다. 1차 측 권선은 양면 기판의 윗면에, 2차 측은 기판의 아래 면에 구성하였다. 권선 구조는 지름이 50mm 인 나선형(spiral)이며, 권선비는 14:10, 사용된 PCB는 산업 현장에서 사용되는 표준기판을 사용했다. 즉, PCB 재질은 에폭시이며, PCB 두께 및 동박의 두께는 각각 1.6mm, 70um (2.0oz/ft²) 이다. 그림 1과 같은 나선 구조에 원형 패턴을 사용한 PCB 변압기는 각형 구조에 비해, 권선의 길이가 짧아지기 때문에 권선 저항이 작아지며, 따라서 손실이 적어지는 특징이 있다.

그림 2에서는 그림 1의 PCB 변압기에 대한 1, 2차 자화 인덕턴스를 보여주고 있다. 변압기의 인덕턴스는 주파수에 의존한다는 것을 알 수 있으며, 2MHz의 주파수에서 측정된 인덕턴스는 1차가 약 5uH, 2차가 약 2.2uH이었다. 또한 1차와 2차의 도체가 기판을 매개로 마주보고 있기 때문에 용량성분이 존재하고, 따라서 이러한 기생용량과 인덕턴스에 의한 공진 주파수가 존재하게 된다. 그림 1의 PCB 변압기에 대한 공진 주파수는 약 19.05MHz 이었다.

본 논문에서 기본 회로로 채택한 ZVS Forward DC-DC 컨버터는 변압기 이외에도 출력필터에 인덕터를 필요로 한다. 그림 3은 출력 필터에서 사용한 코어 없는 PCB 인덕터의 기본 구조를 보여주고 있다. 그림 3의 인덕터는 그림 1의 변압기와 동일한 재질로 구성하였으며, 솔레노이드형(solenoid) 권선 구조를 하고 있다. 즉, 양면의 PCB에 앞면(Top)과 뒷면(Bottom)에 엇갈리게 권선을 구성한 다음, 권선의 가장자리에 홀을 만들고, 위 면과 아래 면을 연결하는 방법으로 인덕터를 구성하였다. 인덕터의 크기는 가로37mm, 세로 27mm이다.

이러한 구조는 그림 1의 나선구조에 비해 권선의 굵기와 권선 수를 자유롭게 조절 할 수 있을 뿐만 아니라, 주어진 공간을 효율적으로 이용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 인덕터를 구성 할 수 있는 공간이 제한 된 경우, 권선 수와 권선의 선 폭은 서로 반비례하기 때문에 적절하게 조절하지 않으면 안 된다. 그림에서의 인덕터 권선은 비교적 큰 출력전류가 흐르기 때문에, 전력변환 효율을 높이기 위해서는 전류밀도를 낮출 필요가 있고, 따라서 본 논문에서는 권선 수보다 선 폭을 우선 하여 구성하였다.

그림 4는 그림 3의 인덕터에 대한 인덕턴스를 나타낸 것이다. 그림으로부터, 인덕턴스는 측정 주파수에 대해 비교적 일정하다는 것을 알 수 있고, 권선간에 존재하는 기생용량 성분이 무시 할 수 있을 정도로 작기 때문에 공진 특성이 없다는 것을 알 수 있었다. 측정 주파수가 2MHz인 경우, 인덕턴스는 약 225nH이었고, 직렬 등가 저항은 약 0.38Ω이었다.

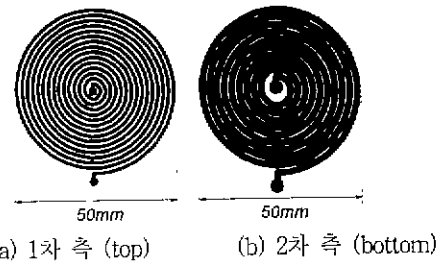


그림 1. PCB 변압기의 구조

Fig. 1 Structure of PCB transformer

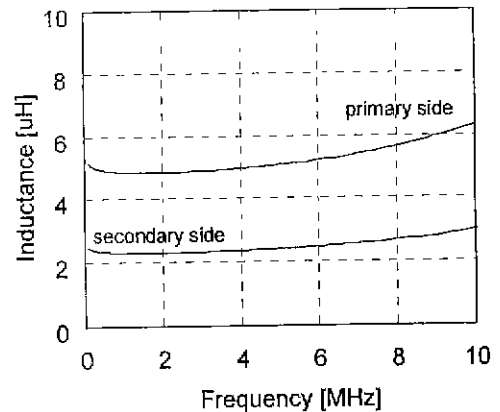


그림 2. PCB 변압기의 자화 인덕턴스

Fig. 2 Magnetizing inductance of PCB transformer

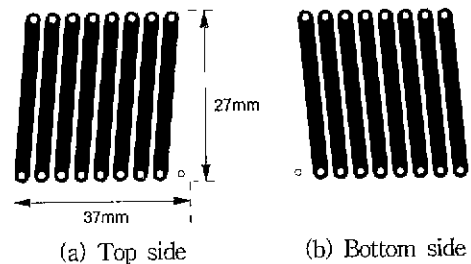


그림 3. PCB 인덕터의 구조

Fig. 3 Structure of PCB inductor

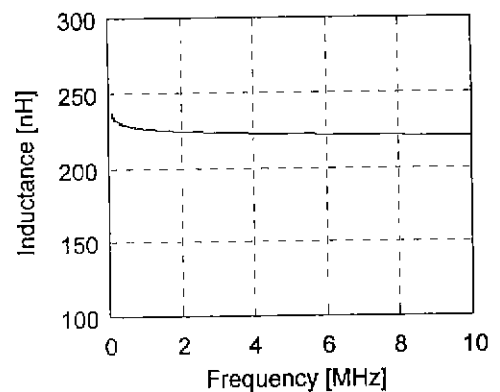


그림 4. PCB 인덕터의 인덕턴스

Fig. 4 Inductance of PCB inductor

3. 실험결과

본 논문에서는 PCB 변압기 및 인덕터를 효율적으로 이용하기 위해서 높은 스위칭 주파수에서도 동작이 가능한 ZVS (Zero voltage switching) Forward 컨버터를 기본 회로방식으로 채택하였다. 그림 5에 실험에 사용된 컨버터의 기본회로가 나타나 있다. 이 회로는 입출력이 절연되어 있는 대표적인 절연형 회로이며, 기본적으로는 강압형(Buck)과 같은 구조이기 때문에 안정성이 우수하고, 변압기의 누설 인덕턴스와 스위치의 기생 커패시턴스를 공진 요소에 포함시킬 수 있는 소프트 스위칭 방식 중의 하나이기 때문에 고주파 스위칭 동작에 적합하다는 특징이 있다.

그림의 회로에서 1, 2차 절연을 위한 변압기는 그림 1에서 구성한 PCB 변압기를 사용하였다. 또한 출력 필터에서 필요한 인덕터는 그림 3에서 구성한 PCB 인덕터를 이용하였다. 이러한 PCB 변압기 및 인덕터는 모두 한 장의 PCB에 구현할 수 있으며, 또한 동일한 PCB 위에 회로구성에 필요한 소자를 부착할 수 있었고, 결과적으로는 전원의 높이를 크게 낮출 수 있다. 또한 ZVS를 위한 공진 소자 중, 공진 인덕터는 외부에 별도로 추가하지 않고, 변압기 내부의 누설 인덕터만으로 구성하였고, 공진 커패시터는 스위치로 사용된 FET와 병렬로 커패시터를 추가하였다. 표 1에는 실험회로에서 사용된 전기적 특성을 나타내고 있다.

표 1. 실험 컨버터의 전기적 특성

항 목	값	단 위	비 고
입력전압 범위	22 - 26	V	
출력전압	12.0	V	오차 1% 이내
출력전류 범위	0.2 - 1.0	A	
최대전력	12	W	
스위칭 주파수	1.5 - 2.5	MHz	

그림 6은 실험회로에 대한 주요 부분의 파형을 나타내고 있다. 그림 6 (a)는 부하전류가 1A인 경우이고, 그림 6 (b)는 부하전류가 0.2A인 경우이다. 위에서부터, 스위치 전압, 게이트 전압, 변압기의 1차 측 전류를 나타내고 있다. 그림 6 (a)의 파형으로부터 스위칭 주파수가 약 1.67MHz 이고, 전형적인 ZVS Forward 컨버터의 영전압 스위칭 파형과 일치하고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 6 (b)에서는 스위칭 주파수가 약 2MHz로 높아지지만, 스위치 전압 파형으로부터 알 수 있듯이 완전한 영전압 스위칭이 되지 않는다. 이것은 영전압 스위칭 범위가 식 (1)에서 보는 것처럼 부하전류의 함수이기 때문이다

$$V_s \leq \frac{Z_o I_o}{n} \quad (1)$$

단, $Z_o = \sqrt{L_R / C_R}$ 는 특성임피던스이다. 즉, 부하전류가 적을수록 ZVS 영역에서 벗어나며, 따라서 최소부하전류가 제한된다. 그림 7은 부하전류에 대한 스위치 전압의 스트레스

를 측정하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 스위치 전압은 부하 전류에 비례하며, 전압 스트레스는 최소 약 50V에서 최대 약 125V까지 변화한다는 것을 알 수 있다.

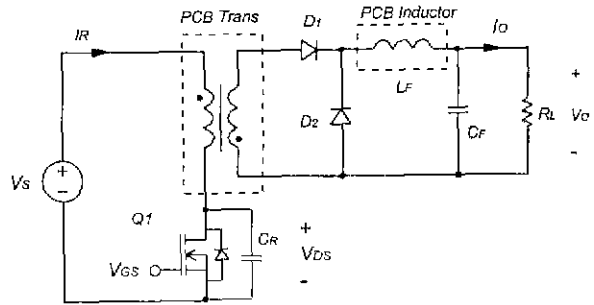
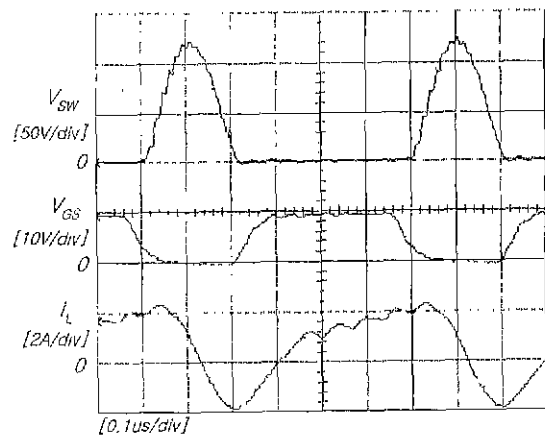
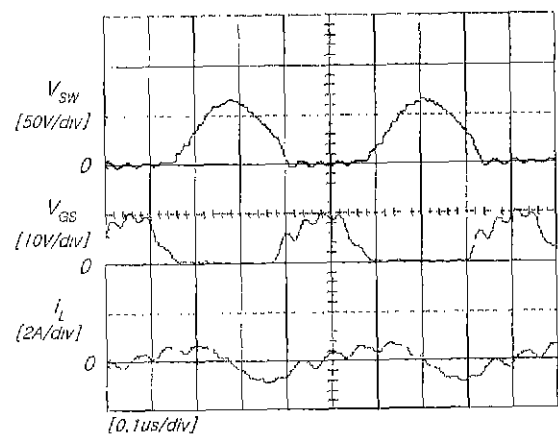


그림 5. PCB 변압기 및 인덕터를 이용한 ZVS Forward 컨버터
Fig. 5 ZVS Forward converter using PCB transformer and inductor



(b) 출력전류가 1A인 경우 ($V_s=24V$, $V_o=12V$, $I_o=1A$)



(b) 출력전류가 0.2A인 경우 ($V_s=24V$, $V_o=12V$, $I_o=0.2A$)

그림 6. 실험 파형
Fig. 6 Experimental waveforms

그림 8은 출력전압이 12V로 안정하게 유지될 때, 출력전류에 대한 스위칭 주파수의 변화를 측정하여 나타낸 것이다. 이때 스위칭 주파수는 최소 1.5MHz에서 최대 2.3MHz까지 변화한다는 것을 알 수 있다. 그림 9에서는 실험회로의 전력변환 효율을 측정하여 나타내었다. 그림으로부터 정상동작 범위 내에서 효율이 70% 이상을 나타내고 있으며, 최대 80%를 나타내고 있다는 것을 알 수 있었다. 이때 출력전압은 약 0.7% 이내에서 안정되었다.

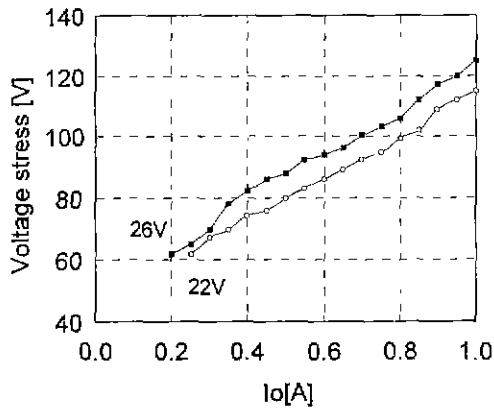


그림 7. 스위치 전압 스트레스
Fig. 7 Voltage stress of switch

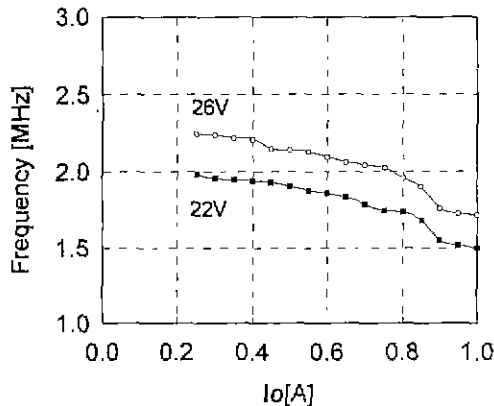


그림 8. 부하전류와 스위칭 주파수
Fig. 8 Load current and switching frequency

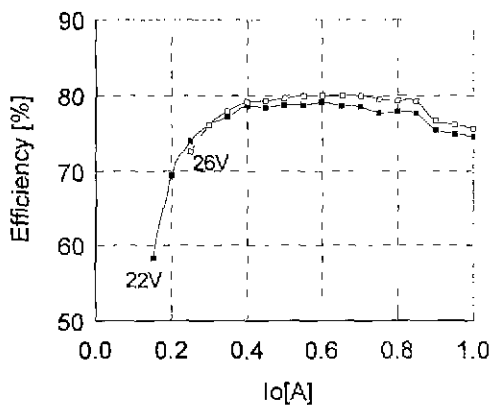


그림 9. 전력변환효율
Fig. 9 Power conversion efficiency

4. 결 론

본 논문에서는 PCB 변압기 및 인덕터를 DC-DC 컨버터에 적용시킨 실험 결과 및 실용 가능성에 대해 보고한 것이다. 회로방식은 안정성이 우수하고, 고주파 스위칭에 적합한 영진압 스위칭(ZVS) Forward DC-DC 컨버터를 사용하였으며, 특히 컨버터의 필터로 사용되고 있는 평활 인덕터도 코어를 사용하지 않고 PCB 패턴만으로 구성하였으며, 결과적으로는 회로 내부에 자성 코어를 전혀 사용하지 않았다. 실험 컨버터의 최대출력은 12W, 최대 스위칭주파수는 2.3MHz, 입력전압은 24V이었고, 출력전압은 0.7% 이내에서 안정되었다. 실험 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 본 논문에서 검토한 PCB 변압기 및 인덕터는 주어진 동작 주파수 및 범위 내에서 기본적인 변압기 및 인덕터의 특성을 만족시켰다.

둘째, 실험회로에서 측정된 전력변환 효율은 최저 70% 이상, 최대 80%를 나타내었고, 따라서 PCB 변압기 및 인덕터를 DC-DC 컨버터에 적용하는 경우, 실용화 가능성이 있다.

셋째, PCB 변압기의 경우 1, 2차 절연 내압이 약 15-40kV로 충분히 크고, 코어를 사용하지 않기 때문에 전원의 두께를 충분히 낮출 수 있으며, 따라서 초박형 전원 등에 이용될 수 있다.

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 청주대학교 정보통신연구센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] A. M. Niknejad, etc., "Analysis, design, and optimization of spiral inductors and transformers for Si RF IC's", IEEE Journal of Solid-state circuits, vol. 33, no. 10, pp. 1470-1481, October, 1998.
- [2] J. M. Lopera, etc., "Design of integrated magnetic elements using thick-film technology", IEEE Trans. Power electron, vol 14, no. 3, pp. 408-413, May, 1999.
- [3] 황선민 등, "코어 없는 PCB 변압기를 이용한 DC-DC 컨버터" 대한전자공학회 하계종합학술대회, June, 2000.
- [4] S. C. Tang, etc., "Coreless printed circuit board (PCB) transformers with multiple secondary windings for complementary gate drive circuits", IEEE Trans. Power electron., vol. 14, no 3, pp. 431-437, May, 1999.