

평면변압기적용 Forward DC/DC Converter

최선호, 박진영, 박성수, 김은수, 이해연*, 김현식*
 전주대학교, 매트론(주)*

Forward DC/DC Converter Using Planar Transformer

S.H Choi, J.Y Park, S.S Park, E.S Kim, H.Y Lee*, and H.S Kim*
 Jeonju University, Mattron Co.Ltd

ABSTRACT

In this paper, the design and implementation of a high power(300W) forward converter using a planar transformer is presented. The overall size and volume of the converter is decreased by replacing a planar transformer in stead of using a conventional winding transformer. Due to the decreased size and volume, power density of the applied forward converter is increased. Also, in this paper, the 300W ZVS forward converter with active clamp snubber circuit is compared to the 300W hard switching forward converter.

1. 서 론

산업용 기기에 적용되는 전원장치의 고 집적화 및 고 기능화를 통한 소형화 기술수요가 증가하고 있다. 이러한 전원장치에 있어서 중요한 부분이 고주파변압기와 인덕터의 소형화를 들 수 있다. 본 논문 내용에서는 컨버터의 고 집적화와 소형, 경량화를 구현하기 위하여 Low Profile의 평면변압기(Planar Transformer)를 설계하고 이를 적용한 300W급 Single Switch 방식 Forward 컨버터와 Active Clamp를 적용한 ZVS Forward 컨버터를 제작 및 실험한 내용을 발표하고자한다.

2. Single Switch Forward 컨버터 와 Active Clamp ZVS Forward 컨버터

그림 1은 Single Switch Forward 컨버터 회로도로 스위칭소자 S_1 이 턴-오프(Turn-off)시 스위칭소자의 양단에 인가되는 전압은 입력전압과 변압기 1차측에 유도된 전압의 합 전압($V_i + \frac{N1}{N3} \cdot V_i$)이

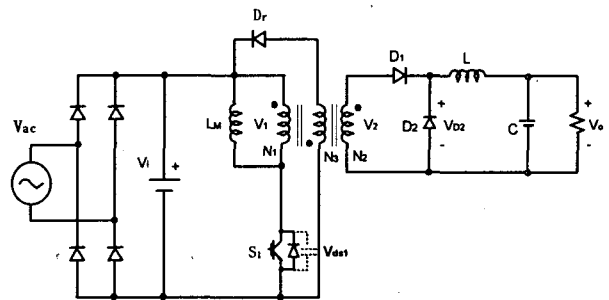


그림 1 싱글 스위치 포워드 컨버터
 Fig. 1 Single Switch Forward Converter

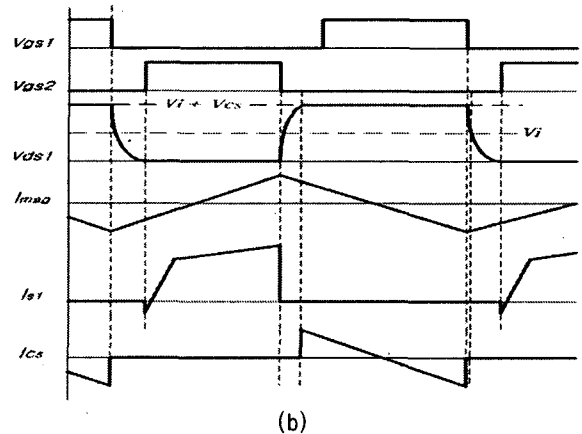
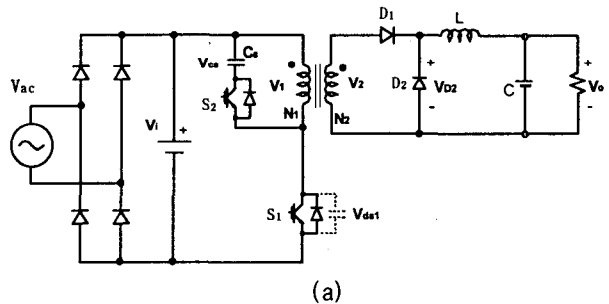


그림 2 액티브 클램프 ZVS 포워드 컨버터
 (a) 주회로도 (b) 동작파형
 Fig. 2 Active Clamp ZVS Forward Converter
 (a) Main circuit (b) Operating waveforms

인가되고, 변압기에 자화된 여자전류가 리셋코일을 통해서 리셋이 된 후 스위칭소자에는 입력전압(V_i)만이 인가된다. 이때 스위칭소자가 턴-온(Turn-on)을 하게 되면 스위칭소자의 기생 커패시턴스(C_s , Stray Capacitance)에 따른 피크(Peak) 방전 전류가 스위칭소자 S_1 에 흐른다. 이러한 피크 방전전류에 따라 턴-온 손실이 발생하고 입력전압이 높을수록, 스위칭주파수가 높을수록 스위칭소자의 전류스트레스 및 손실은 증가한다. 그리고, 턴-오프시에 있어서도 변압기 누설인덕턴스에 따른 서지전압이 발생하고 턴-오프 스위칭손실이 발생한다. 이러한 스위칭손실 및 서지전압을 억제하기 위해 그림 1에 나타낸 300W급 Single Switch 방식 Forward 컨버터에 Low Profile의 평면변압기(Planar Transformer)를 적용함으로써 변압기 누설인덕턴스를 저감에 의한 서지전압을 억제하고자 하였고 또한, 그림 2에서처럼 턴-온 손실저감 및 서지전압을 클램프하기 위해 Active Clamp 회로를 적용한 300W급 ZVS Forward 컨버터를 실험 적용하였다.

그림 2의 Active Clamp 회로를 적용한 ZVS Forward 컨버터는 턴-오프시 변압기의 누설인덕턴스 및 자화 인덕턴스에 축적된 에너지가 보조스위칭소자 S_2 에 보디(body) 다이오드를 통해 Active Clamp Snubber 커패시터(C_s)로 흐르면서 서지전압을 억제(Clamp)해 준다. 이때 Active Clamp Snubber 커패시터(C_s)의 값은 커서 커패시터의 전압은 일정한 값을 갖는다. 또한, 주스위칭소자가 턴-오프동안 보조스위칭소자 S_2 의 보디다이오드를 통해 흐르는동안 보조스위칭소자 S_2 는 영전압(ZVS)에서 턴-온이 되어 Active Clamp Snubber 커패시터 C_s 에 변압기 누설인덕턴스 및 자화 인덕턴스에 축적된 에너지를 충전시켰다가 다시 변압기로 방전하면서 변압기의 자화를 리셋시킨다. 주스위칭소자 S_1 이 턴-온에 앞서 보조스위칭소자 S_2 를 턴-오프하면 변압기를 통해 방전하던 전류는 주스위칭소자의 기생커패시터의 전압을 변압기를 통해 입력전원(V_i)으로 방전시키면서 주스위칭소자 S_1 의 기생커패시터의 전압을 영(Zero)으로 만든 후 주스위칭소자를 턴-온 시키면 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching)을 하게 되어 하드스위칭에서 발생했던 턴-온 손실을 저감시킬 수 있다. Active Clamp 회로를 적용한 DC/DC 컨버터를 사용함으로써 리셋권선을 적용하지 않음으로 고집적 평면변압기 적용에 유리한 면도 있지만, 안정된 영전압 스위칭을 얻기위해 변압기의 자화인덕턴스를 Single Switch Forward 컨버터에 비해 상대적으로 상당히 낮은 값을 적용해야 함으로 실제 사용에 있어서는 변압기의 Flux Swing이 커서 코어의 히스테리손실 및 Eddy Current 손실이 증가하는 문제가 있지만 전체적인 효율특성 및 주스위칭소자 S_1 의 전압스트레스 저감 측면에서 많은 이점이 있으리라 생각된다

3. 평면변압기 및 인덕터 설계

A. 평면변압기 턴수 및 코어선정

코일의 권선수는 자속(Φ)이 $\Phi \sin \omega t$ 로 변할 때 유기되는 기전력을 통해 산출되며, 자속이 전압과 시간에 대한 전류의 변화이므로 식(1)와 (2)을 적용하여 1, 2차 권선수를 산출하였다.

$$N_1 = \frac{V_i \cdot D}{f_s \cdot B_{peak} \cdot A_e} \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot V_o}{V_i \cdot D} \quad (2)$$

여기서 V_i 은 입력전압, V_o 는 출력전압, D 는 듀티 사이클 그리고 A_e 는 코어의 실효 단면적이다.

산출된 값에 의해 1차 권선과 리셋코일 그리고 2차 권선수를 각각 13회, 13회, 2회로 적용하였다. 또한 1차 코일의 자기 인덕턴스(L_m)는 식(3)에 의해서 계산하였다. 식(3)에서 A_e 의 단위는 [m^2]이고 l_g , l_e 의 단위는 [m]이다.

$$L_m = \frac{\mu_o \cdot N^2 \cdot A_e}{l_g + \frac{l_e}{\mu_e}} \quad (3)$$

표 1 평면변압기 설계
Table 1 Design of planar transformer

항목	사항	항목	사항
core	Planar EI43	μ_e	≈ 1560
A_e	229 mm ²	μ_o	$4\pi \cdot 10^{-7}$
l_e	50.4 mm	N	13
Single Switch H/S Forward DC/DC Converter		Active Clamp ZVS Forward DC/DC Converter	
l_g	≈ 0 mm	l_g	≈ 0.45 mm
L_m	1.40 mH	L_m	100 uH
측정된 L_m	1.24 mH	측정된 L_m	114 uH
leakage inductance	1.78 uH	leakage inductance	3.98 uH

B. 권선두께

평면 코일에 고주파 전압, 전류가 인가되면 권선의 온도가 상승하게 되므로 평면 구리 박판의 두께는 전류-상승온도를 고려하였다, 1차는 직경이 0.6

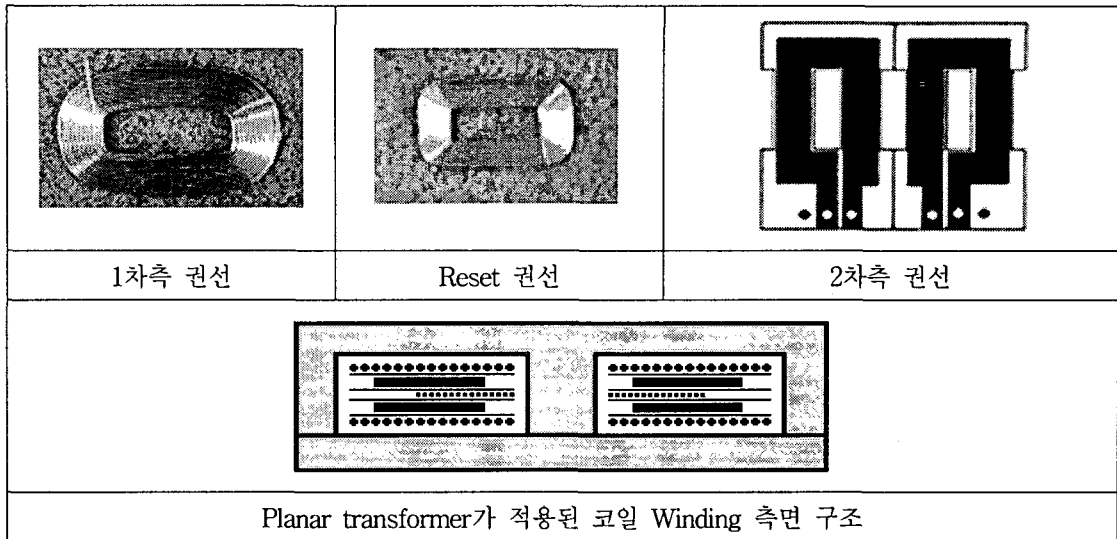


그림 3 평면변압기에 적용된 권선 및 구조
Fig. 3 Coil winding and structure of planar transformer

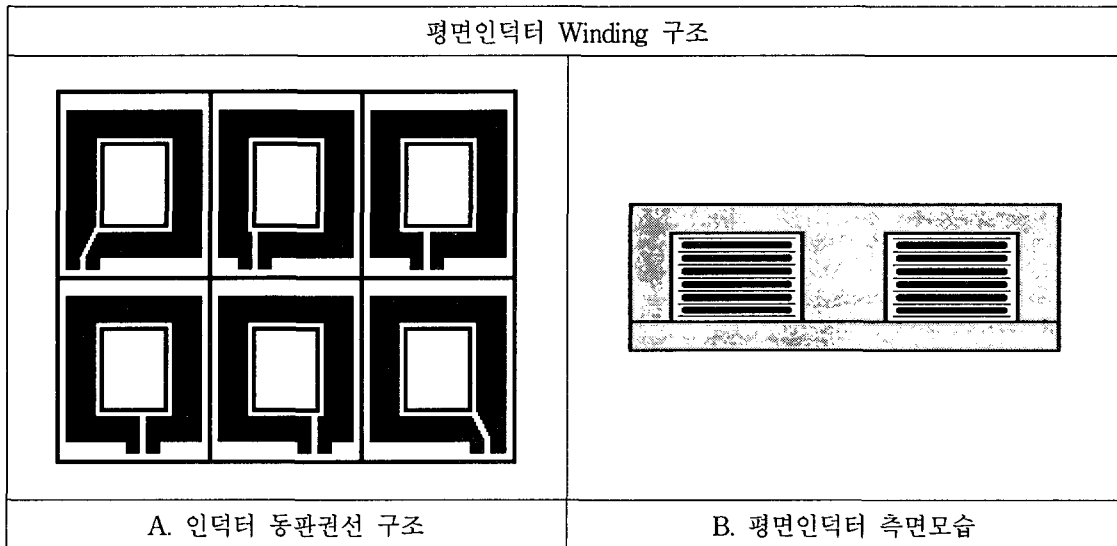


그림 4 평면인덕터에 적용된 권선 및 구조
Fig. 4 Coil winding and structure of planar inductor

mm코일을 2겹으로 사용했으며 2차측은 표피효과로 인한 skin depth를 고려하여 식(4)의 표피효과에 의해 전류가 침투할 수 있는 표면으로부터의 깊이 D_{skin} 에 의해 $2 \cdot D_{skin} = 257.5 \mu m$ 이하가 될 수 있도록, 그러나 대전류에 의한 온도상승이 지배적이기 때문에 표피효과에 의한 손실을 감수하여 두께 $300 \mu m$, 폭 $9.42mm$ 를 사용하였다.

$$D_{skin} = \frac{2230}{\sqrt{f [kHz]}} [\mu m] \quad (4)$$

여기서 D_{skin} 는 권선의 침투깊이이다.

그림 3은 평면변압기에 실제로 적용된 권선의 사진 및 구조이다.

출력인덕터에도 그림 4에서 보는바와 같이 평면인덕터를 적용하기 위해 일반 코일이 아닌 동판(두께 $300 \mu m$, 폭 $9.4mm$)을 6회 적용하였다.

4. 실험결과

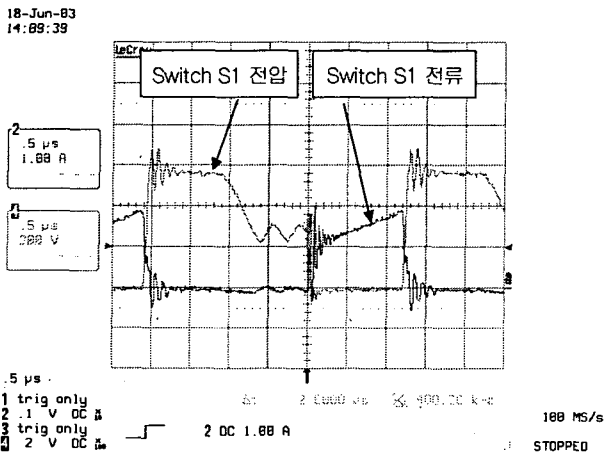
평면변압기적용 300W급 Single Switch Forward 컨버터 및 Active Clamp Forward 컨버터를 제작하여 실험하였고, 제작한 전원장치 시제품 사양은 표 2와 같다.

표 2 컨버터 동작조건 및 사용된 소자

Table 2 Operating conditions and devices

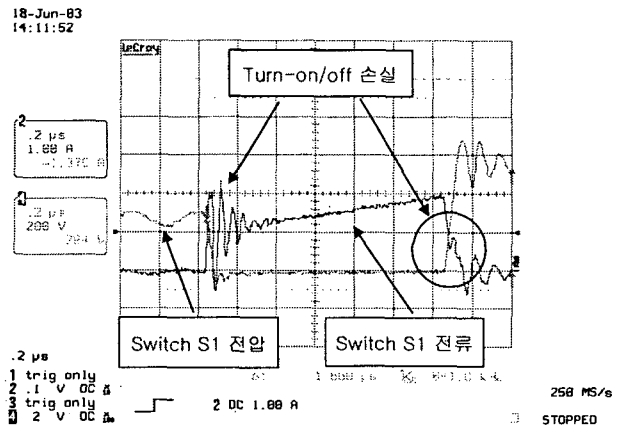
항 목	사 양
주회로	Single Switch Forward DC/DC Active Clamp Forward DC/DC
입력전압	DC 250V(220AC 정류)
출력전압	DC 15V
출력전류	DC 20A
스위칭 주파수(fs)	300 kHz
스위칭 소자	Power Mosfet 1000V,10A (IXFR12N100F)
출력정류다이오드 D ₁ , D ₂	Schottky Diode 100V, 60A(63CPQ100)
Reset 다이오드 D _r	Ultra Fast Diode 1000V, 1A (UF4007)

그림 5은 표 2의 사양에 의해 제작된 실험파형으로 그림 5(a)는 50%부하에서(180W) 스위칭소자 S₁의 양단 전압과 소자에 흐르는 전류 파형을 나타낸 것이고, 그림 5(b)는 스위칭 소자의 턴-온, 턴-오프시의 파형을 상세히 보기 위하여 확대한 파형이다. 그림 5의 (a)와 (b)의 사진을 좀 더 살펴보면 턴-온시 기존의 변압기를 사용한 것 보다 서지 전압 및 발진이 적게 일어나는 것을 볼 수 있는데 이는 평면변압기(Planar Transformer)를 사용함으로써 1.8uH의 적은 누설(Leakage) 인덕턴스에 의해서 나타나는 현상으로 볼 수 있다.(기존변압기의 누설인덕턴스는 10uH이상) 또한 실험파형에서 보는 바와 같이 적용 스위칭소자(Power Mosfet 1000V, 10A [IXFR12N100F])의 아주 적은 기생 출력 커패시턴스 및 스위칭소자의 빠른 상승 및 하강시간(30ns 이하) 특성에 따라 턴-온 및 턴-오프시 스위칭손실이 보다 크지 않음을 볼 수 있다.



(a) 스위칭소자 S₁의 전압 및 전류파형

(a) Voltage and current waveforms of switch S₁

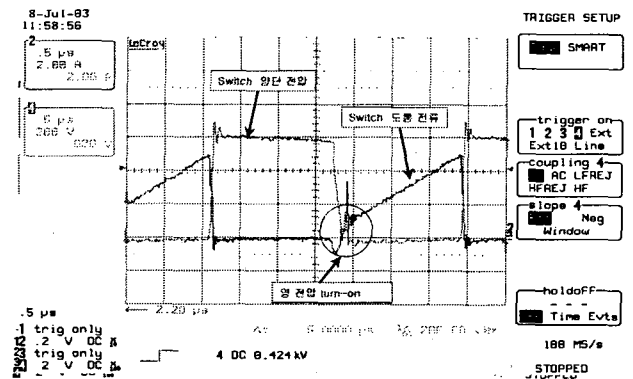


(b) 그림(a)의 확대파형

(b) Detailed waveforms of Fig. 6 (a)

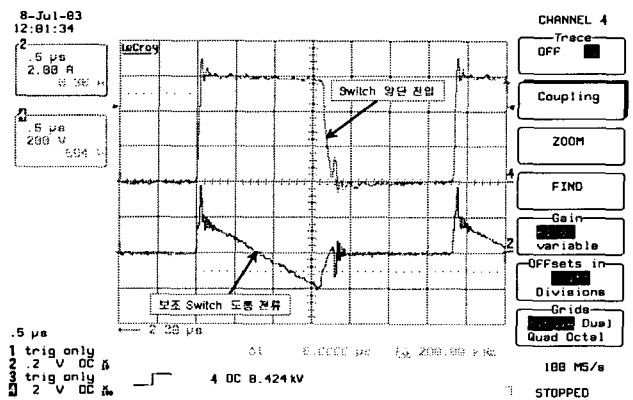
그림 5 싱글 스위치 포워드 컨버터의 실험파형(180W)

Fig. 5 Experimental waveforms for single switch forward converter(at 180W)



(a) 주스위칭소자 S₁의 양단전압 및 전류파형

(a) Voltage and current waveforms of main switch S₁



(a) 주스위칭소자 S₁의 양단전압 및 보조스위치 S₂의 전류파형

(a) Voltage waveform of main switch S₁ and current waveform of auxiliary switch S₂

그림 6 액티브 클램프 포워드 컨버터 실험파형(180W)

Fig. 6 Experimental waveforms for active clamp forward converter(at 180W)

그림 6은 Active Clamp Forward 회로도의 실험파형으로 그림 6(a)는 주스위칭소자 S_1 의 전압 및 전류파형으로 그림에서 보는 바와 같이 영전압 턴-온이 구현되고 있다. 그림 6(b)는 주스위칭소자 S_1 의 전압파형 및 보조스위칭소자 S_2 에 흐르는 전류파형으로 턴-오프시 Active Clamp Snubber 커패시터(C_s)의 전압에 의해 주스위칭소자 S_1 의 전압이 일정하게 제한되고 있으며 planar transformer의 자화인덕턴스의 여자전류도 보조스위칭소자 S_2 를 통하여 C_s 에 충전되면서 리셋 되는것을 확인할 수 있다.

그림 7은 Single Switch Forward 컨버터와 Active Clamp Forward 컨버터의 효율을 측정하여 비교한 그래프로 Active Clamp Forward 컨버터의 경부하에서 효율은 Single Switch Forward 컨버터에 비해 오히려 낮은 효율을 볼 수 있는데 이는 Active Clamp Snubber 회로를 구성하는 보조스위칭소자(S_2)의 도통손실에 의한 손실 때문이라 효율이 저감되었지만 중부하를 넘어서면서 Active Clamp Forward 컨버터의 효율이 높아지는데 이는 보조스위칭소자(S_2)의 도통손실보다 Single Switch Forward 컨버터의 하드스위칭의 손실이 더 크게 작용함을 보여주고 있다. 본 실험에서는 Single Switch Forward 방식과 Active Clamp Forward 방식을 비교하기 위하여 동등한 스위칭소자(Power Mosfet 1000V,10A [IXFR12N100F])를 사용하였으나 실제 Active Clamp Forward 컨버터의 스위칭소자의 전압스트레스는 그림 6에서 보여주는 바와 같이 일정전압으로 제한되기 때문에 보다 낮은 정격을 갖는 스위칭소자를 사용함으로써 낮은 도통저항(R_{ds})으로 인하여 보다 높은 효율특성을 가질것으로 생각되어진다.

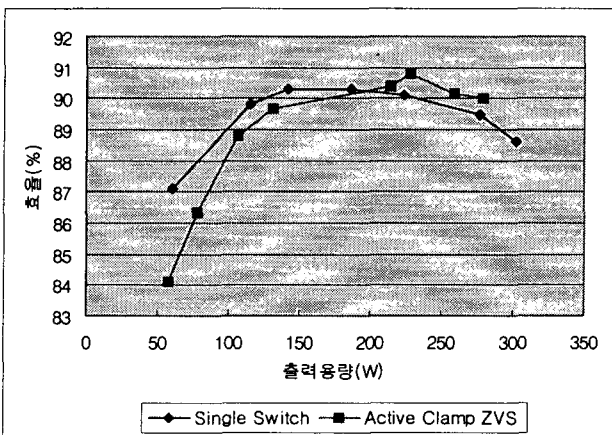
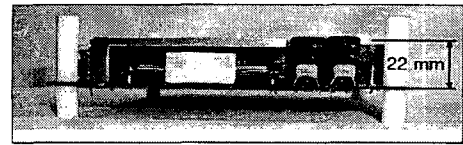


그림 7 싱글 스위치 파워드 컨버터와 액티브 클램프 ZVS 파워드 컨버터의 효율특성

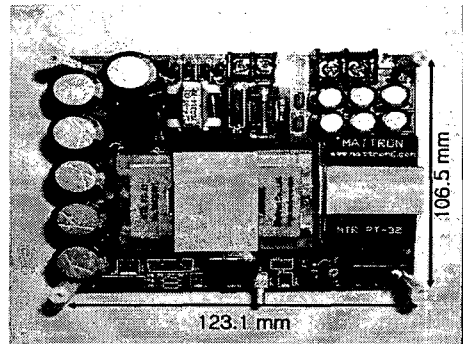
Fig. 7 Efficiency characteristics of the single switch forward converter and the active clamp ZVS forward converter

그림 8은 본 실험을 위해 제작된 300W급 Single Switch 방식 및 Active Clamp Forward 컨버터의 실험

시작품 사진으로 일반 변압기 대신에 평면변압기(Planar transformer) 및 평면인덕터(Planar inductor)를 적용함으로써 컨버터의 전체적인 높이를 줄일수 있고 이로 인해서 집적화를 가능하게 함을 보여주고 있다.



(a)



(b)

그림 8 평면변압기를 사용한 300W급 파워드 컨버터 사진 (a) 측면모습 (b) 윗면모습

Fig. 8 Photography of the 300W forward converter using planar transformer (a) Side view (b) Top view

5. 결 론

스위칭 전원장치의 소형화 기술을 구현하기 위해 Low Profile의 평면변압기(Planar Transformer)를 설계하고 이를 적용한 300W급 Single Switch Forward 컨버터방식 및 Active Clamp Forward 컨버터를 제작 및 실험 적용하였으며 비교분석하였다.

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-002-D00081)

참 고 문 헌

- [1] G.C. Hua, W.A. Tabise, C.S. Leu, N. Dai, R. Watson, F.C. Lee: "Development of a DC Distributed Power System", Applied Power Electronics Conference '94, pp.763-769
- [2] Qiong Li, Fred C. Lee: "Design Consideration of the Active-Clamp Forward Converter with Current Mode Control during Large-Signal Transient", Applied Power Electronics Conference '2000, pp.966-972