

300 W급 평면 변압기의 설계 및 분석

Design and Analysis of the 300 W Planar Transformer

이해연^{1,a}, 김현식¹, 김종령², 오영우², 김은수³, Ustinov Evgeniy¹
(Hae-Yon Lee^{1,a}, Hyun-Sik Kim¹, Jong-Ryung Kim², Young-Woo Oh², Eun-Soo Kim³, and Ustinov Evgeniy¹)

Abstract

The forward planar transformer, which had power capacity of 300 W, input voltage of 220 V, output voltage of 15 V, and switching frequency of 300 kHz, was designed and manufactured by using the planar core with large effective area and the flat copper leadframes for miniaturization and high efficiency of the switching mode power supply (SMPS). As well as, a forward converter equipped with the above mentioned planar transformer was manufactured and electromagnetic characteristics were investigated.

The numerical value of turns for 1st and 2nd winding were 15 and 2 respectively. The self inductance of 1st winding was 1.592 mH, very low leakage inductance of 2.7 μ H, and the coupling factor of 0.928 were obtained at switching frequency of 300 kHz. The high efficiency of 88.62 % for the SMPS equipped with planar transformer was obtained at power capacity of 300 W.

Key Words : Planar transformer, SMPS, High efficiency, Planar core, Factory automation

1. 서론

현재 전자통신기기 및 산업자동화기기에 있어서 시스템 부분은 반도체 집적회로의 발전에 수반하여 소형·경량화 및 고효율화가 이루어지고 있는 반면 전원 부분은 에너지 축적 또는 변환용 소자인 변압기 및 커패시터 때문에 소형·경량화에 한계를 드러내고 있으며, 특히 전원장치는 크기가 큰 페라이트 코어를 이용한 변압기 때문에 소형화와 고효율화에 많은 제약을 받는다. 그림 1에 나타난 것과 같이 평면 변압기는 넓은 유효 단면적을 가진 평면코어와 권선 동에 비해서 높은 정밀도를 갖는 평면 구리 박판을 조합하고 한 개 혹은 그

이상의 얇은 절연층을 적층하는 구조를 갖는다. 이 때문에 고주파 손실을 감소시켜 적은 누설 인덕턴스, 우수한 열적 특성, 최소의 표피효과 특성을 갖으며, 경량, 박형, 고전력 밀도로 인한 소형화와 고효율화를 동시에 이룰 수 있다[1-5].

따라서, 본 연구에서는 전원장치의 소형, 고성능화를 위해서 핵심 기술인 변압기를 소형화하고자 300 W급 파워드 평면 변압기를 설계·제조하였으며, 제조된 평면 변압기가 적용된 전원장치를 제작하여 전·자기적 특성을 조사하였다.

2. 평면 변압기의 설계

2.1 설계 사양

최적의 전력용 변압기를 구성하기 위해서, 본 연구에서는 표 1의 사양과 같이, 스위칭 주파수 300 kHz, 입출력 전압이 각각 220 V, 15 V인 300 W급의 파워드형 평면 변압기를 설계·제작하고, 그림 2에 전체 제조 공정을 나타내었다.

1. (주)매트론 기술연구소
(경남 마산시 중리 1121-9 경남정보기술센터 711)
2. 경남대학교 신소재공학부
3. 전주대학교 전기전자공학부
a. Corresponding Author : hylee@mattrone.com
접수일자 : 2003. 9. 29
1차 심사 : 2004. 1. 20
심사완료 : 2004. 3. 22

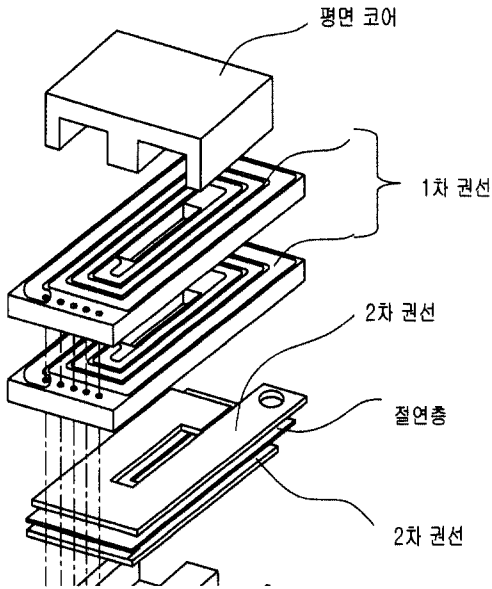


그림 1. 평면 변압기의 구조.
Fig. 1. Structure of planar transformer.

표 1. 평면 변압기 설계 사양.

Table 1. Design specifications for planar transformer.

항 목	사 양
Topology	Forward
용 량	300 W
입 력 전 압	220 V
출 력 전 압	15 V
듀 티 비	40 %
스위칭 주파수	300 kHz
주 위 온 도	25 °C
허용 상승온도	50 °C

2.2 코어선택

코어 손실과 권선 손실을 고려하여 포화되지 않으면서 2차 전압을 제공할 수 있는 코어를 선택해야 한다. 이는 여러 가지 시도에 따른 반복적 과정에 의해 성취될 수 있지만 식(1)과 식(2)는 코어 면적(Area Product A_p)의 추정 값을 제공할 수 있다. 식(1)은 ΔB 가 포화에 의해 제한될 때 적용되고, 식(2)는 코어 손실에 의해 제한될 때 적용한다. 적용 시 가장 큰 A_p 값을 사용하며, 계산 값보다 큰 A_p 값을 갖는 코어를 선택한다[6]. 본 연구에서는 스위칭 주파수, 최소 손실온도 및 손실-주파수-

자속밀도 특성을 고려하여 약 1 MHz까지 안정한 주파수 특성과 투자율 특성을 갖는 Philips E43-3F3 코어를 사용하였으며, 표 2에 기본 특성을 나타냈다[7].

$$A_p = \left[\frac{11.1 P_{in}}{K \Delta B f_t} \right]^{1.31} \text{ cm}^4 \quad (1)$$

$$A_p = \left[\frac{P_{in} 10^4}{120 K 2f_t} \right]^{1.58} \cdot (K_H f + K_E f^2)^{0.66} \text{ cm}^4 \quad (2)$$

여기서 P_{in} = 용량/효율, f_t = 스위칭 주파수, K_H = 히스테리시스 계수, K_E = 와전류 손실계수이다.

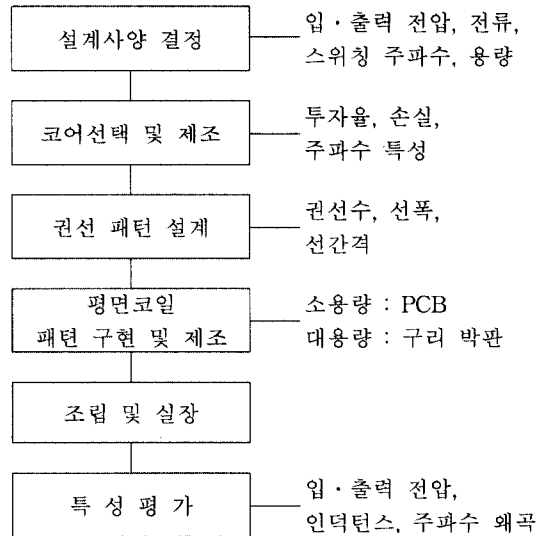


그림 2. 평면 변압기 제조 공정.
Fig. 2. Manufacturing process for planar transformer.

2.3 권선설계

변압기의 전체 손실 중에서 코어의 손실이 50% 이상이며, 변압기의 온도상승을 발생시키고 효율을 저하시키는 지배적인 요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서 목표한 변압기 허용 상승온도 50 °C에서의 최대 코어손실과 자속밀도를 식(3)과 (4)로 각각 산출하였으며[1], P_{core} 는 376 mW/cm³, B_{peak} 는 156 mT의 값을 얻었다.

$$P_{core} = \frac{12 \cdot \Delta T}{\sqrt{V_e} (\text{cm}^3)} \quad [\text{mW/cm}^3] \quad (3)$$

표 2. E43-3F3 평면 코어 사양

Table 2. Specifications for E43-3F3 planar core

기호	조건	특성	단위
μ_i	25°C; ≤10 kHz; 0.1 mT	2000±20%	-
μ_a	100°C; ≤25 kHz; 200 mT	≈ 4000	-
B	25°C; ≤10 kHz; 250 A/m 100°C; ≤10 kHz; 250 A/m	≥ 400 ≥ 330	mT
Pv	100°C; ≤100 kHz; 100 mT 100°C; ≤400 kHz; 50 mT	≥ 80 ≥ 150	kW/m ³
Ae	-	2.26	cm ²
Aw	-	1.44	cm ²

$$B_{peak} = \left[\frac{P_{core}}{A \cdot f^X} \right]^Y [T] \quad (4)$$

여기서 3F3의 재료상수 A, X, Y는 각각 2.5×10⁻⁴, 1.63, 0.41이다[7].

코일의 권선수는 자속(Φ)이 Φsinωt로 변할 때 유기되는 기전력을 통해 산출되며, 자속이 전압과 시간에 대한 전류의 변화이므로 식(5)와 (6)을 적용하여 1, 2차 권선수를 산출하였다[2].

$$N_1 = \frac{U_{in} \cdot \delta}{2 \cdot f \cdot B_{peak} \cdot A_e} \quad (5)$$

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot U_o}{U_{in} \cdot \delta} \quad (6)$$

여기서 U_{in} = 입력전압, U_o = 출력전압, δ = 듀티 사이클, 그리고 A_e = 코어의 실효 단면적이다.

산출된 1, 2차 권선수는 각각 12.5회, 1.7회이며 권선수의 정수화를 위해 설계 값의 1, 2차 권선비를 기준으로 1차 권선수와 탈자 코일, 그리고 2차 권선수를 각각 15회, 15회, 2회로 결정하였다. 또한 1차 코일의 자기 인덕턴스 설계치는 식(7)에 의해서[1] 약 1.6 mH를 얻었고 이때 진폭 투자율(μ_a)은 1500으로 적용하였다.

$$L_{Prime} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_a \cdot N_2 \cdot A_e}{l_e} \quad (7)$$

평면 코일에 전압, 전류가 인가되면 권선의 온도가 상승하게 되므로 도체의 두께는 전류-상승온도를 고려하여, 식(8)의 표피효과에 의해 전류가 표면에 침투할 수 있는 깊이 D_{skin}에 의해 2D_{skin} =

257.5 μm 이하가 되도록 1차 코일은 50 μm, 대전류로 온도상승이 지배적인 2차 코일은 표피효과에 의한 손실을 감소하고 300 μm를 사용하였다.

$$D_{skin} = \frac{2230}{\sqrt{f [kHz]}} [\mu m] \quad (8)$$

평면코일 패턴 구현은 일반적 PCB의 도체 두께가 35, 70 μm이기 때문에 구리 박판을 식각하여 권선 패턴을 구현하였으며, 50°C의 변압기 허용 상승 온도를 고려하여 1차 15회 권선은 5개의 3회 권선층을 직렬 연결하였고, 2차 2회의 권선은 2개의 1회 권선층을 직렬연결 하여 변압기를 구성하였다. 그리고 근접효과를 최소화하기 위해서 각각의 1, 2차 권선을 샌드위치(sandwich) 구조로 적층함으로써 서로의 자장 방향이 반대가 될 수 있도록 하였다[1]. 표3에 설계결과를 나타냈고, 각 층에 대한 권선 패턴 결과를 그림3에 나타냈다.

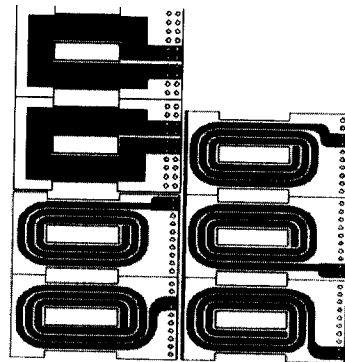


그림 3. 평면 변압기 권선 패턴.

Fig. 3. Winding patterns for planar transformer.

표 3. 평면 변압기 설계 결과.

Table 3. Design results for Planar transformer.

항 목	사 양
1,2차 권선 두께	50, 300 μm
1,2차 권선 폭	2.3, 10 mm
1차 권선수	15 회
2차 권선수	2 회
탈자 권선수	15 회
1차 코일 인덕턴스	1.6 mH

3. 결과 및 고찰

그림 4는 1차 코일 자기 인덕턴스(L_{Prime})를 나타낸 것이다. 본 연구의 설계 스위칭 주파수인 300 kHz에서 약 1.592 mH의 값을 얻었으며 이것은 식 (7)에 의해 산출된 이론치 1.6 mH와 거의 같으며, 손실된 부분은 두 개의 E-코어 사이에서 미세한 공극에 의해 자속이 누설되었기 때문인 것으로 생각된다. 자기 인덕턴스는 코일에서 유도 기전력의 유도능력을 나타내는 것으로써, 일정한 외부 에너지에서 자성체의 형상과 재질에 의한 자속의 발생과 코일에서의 에너지유도에 대한 해석이므로 정확한 설계가 중요하다[1].

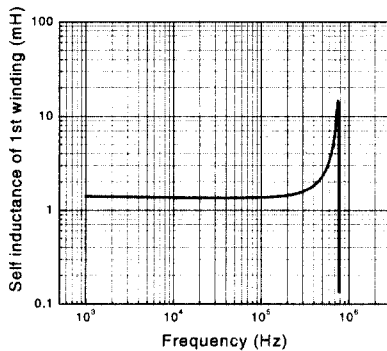


그림 4. 1차 코일의 자기 인덕턴스.

Fig. 4. Self inductance for 1st winding.

그림 5는 평면 변압기(PT)와 일반 변압기(CT)의 누설 인덕턴스를 측정된 결과이다. 누설 인덕턴

스는 1차 코일에서 발생하는 자속이 2차 코일에 완전히 여자되지 못하고 일부가 누설되는 것으로써, 2차 코일을 연결시킨 상태에서 1차 코일의 인덕턴스를 측정하였고 전체적으로 평면 변압기가 일반 변압기보다 약 3배 이상 낮은 누설 인덕턴스 값을 나타냈다. 스위칭 주파수 300 kHz에서 약 2.7 μH 로, 이는 1차 코일 자기 인덕턴스의 0.16 %에 해당하는 아주 작은 값이다.

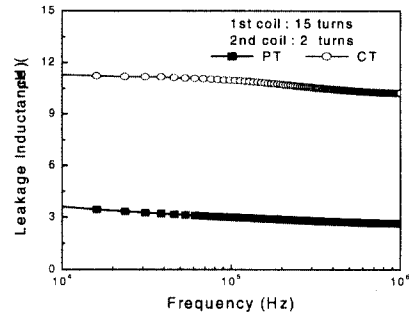


그림 5. 평면 변압기와 일반 변압기의 누설 인덕턴스 특성.

Fig. 5. Leakage inductances of conventional and planar transformer.

그림 6은 식(9)와 (10)에 의해 산출된 변압기 결합계수(k)의 주파수 특성을 나타낸 것으로써 300 kHz까지는 비교적 일정하게 유지하여 스위칭 주파수 300 kHz에서 0.93의 아주 높은 값을 가지며, 그 이상의 주파수 대역에서는 L_{Prime} , $L_{\text{Secondary}}$ 의 급격한 증가로 인하여 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 그림 5의 결과와 일치하는 것으로써 누설 인덕턴스가 아주 낮기 때문에 전체적인 결합도가 높은 것으로 판단되며 전체적인 변압기 효율이 증가 될 것으로 사료된다.

$$M = \frac{L_{p+s} + L_{p-s}}{4} \quad (9)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (10)$$

여기서, L_{p+s} 와 L_{p-s} 는 각각 극성이 같은 방향과 반대 방향으로 1, 2차 코일을 연결하여 측정된 인덕턴스 값이고, M은 상호 인덕턴스이다[8].

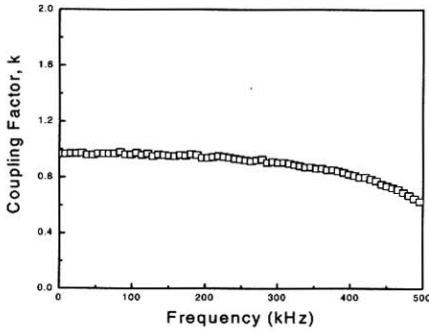


그림 6. 평면 변압기의 결합계수.
Fig. 6. Coupling factor of planar transformer.

그림 7은 본 연구를 통해 설계 및 제조된 평면 변압기를 적용하여 제작된 300 W Single Switch 방식 Forward 컨버터의 주 회로도이고 표 4에 컨버터의 사양을 나타냈다.

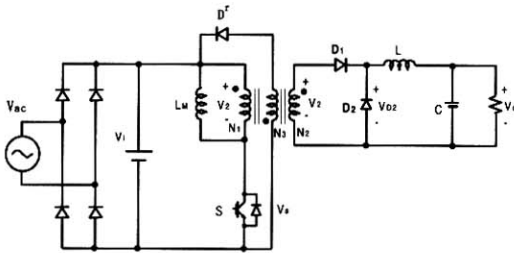


그림 7. Forward 컨버터의 주 회로도.
Fig. 7. Circuit diagram of forward converter.

표 4. 평면 변압기가 적용된 컨버터의 사양.
Table 4. Specifications of converter equipped with planar transformer.

항 목	사 양
Topology	Forward
용 량	300 W (최대 400 W)
입 력 전 압	220 VAC ± 10 %
출 력 전 압	15 VDC
출 력 전 류	20 A
스위칭 주파수	300 kHz

그림 8은 본 연구에서 제작된 300 W급 Single Switch 방식 Forward 컨버터 사진으로, 권선형의 일반 변압기와 인덕터를 평면변압기(Planar transformer)와 평면 인덕터로 대체 적용함으로써 컨버터 전체의 높이를 2 cm까지 줄일 수 있고 고집적화 할 수 있었다. 이것은 LCD, PDP와 같은 슬림형 전원장치가 요구되는 첨단 디스플레이 산업에도 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

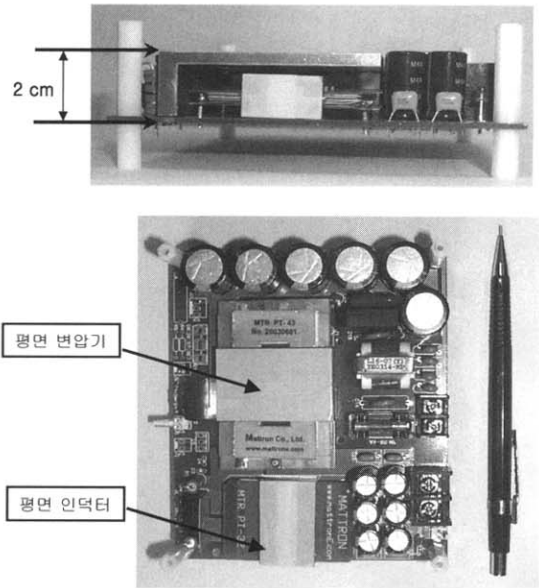


그림 8. 평면 변압기가 채용된 파워드 컨버터.
Fig. 8. Forward converter equipped with planar transformer.

그림 9는 주 스위칭 소자의 양단 전압과 소자에 흐르는 전류파형을 나타낸 것으로서 Turn-on 구간에서 기존의 변압기를 사용한 것 보다 서지 전압 및 발진이 적게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이것은 고집적 평면변압기(Planar Transformer)의 사용으로 2.7 μH의 적은 누설(Leakage) 인덕턴스에 때문에 기인하는 것으로 판단된다.

그림 10은 입력전압 220VAC, 출력 15VDC 출력에서 320 W 까지 측정된 효율특성을 나타낸 것으로, 전 영역에서 88 % 이상의 높은 효율특성을 갖고 있으며, 특히 150 W ~ 250 W구간에서는 90 % 이상의 높은 효율을 나타냈다.

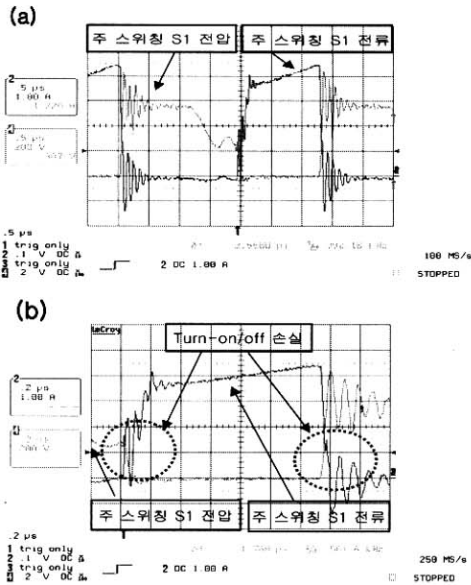


그림 9. 주 스위칭소자의(S) 전압 및 전류 파형:
(a) 한 주기, (b) 확대 파형(360 W).
Fig. 9. Voltage and current wave of switching device at 360 W : (a) one cycle, (b) magnification wave.

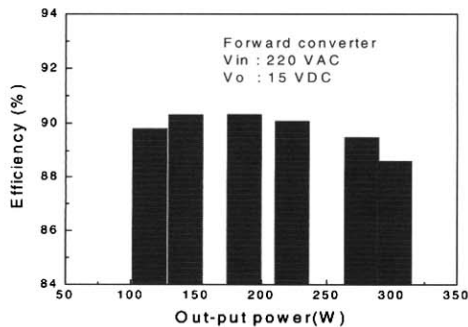


그림 10. 컨버터의 효율.
Fig. 10. Efficiency of converter.

4. 결론

300 W급 포워드 평면 변압기를 설계·제작하고 전원장치에 적용하여 전·자기적인 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1차, 2차 코일의 권선수를 각각 15회, 2회, 선폭을 2.3 mm, 10 mm 그리고 구리 박판 두께를 50 μ m, 300 μ m로 하여 300 W급 평면 변압기를 설계·제작 하였다.
- 스위칭 주파수 300 kHz에서 1.59 mH의 1차 코일 인덕턴스 값을 얻었으며, 일반 변압기에 비해서 1/3 이하인 약 2.7 μ H의 아주 낮은 누설 인덕턴스 값을 얻었다.
- 결합계수 k는 주파수 300 kHz 까지는 거의 일정한 값을 나타냈고, 300 kHz에서 0.93의 아주 높은 값을 얻었으며, 평면 변압기의 설계방법 확립과 응용 가능성을 확인하였다.
- 평면 변압기가 채용된 300 W급 포워드 컨버터를 제작하여, 300 W에서 88.62 %의 높은 효율을 얻었다.

참고 문헌

- [1] 김현식, 이해연, 김종령, 오영우, "평면 변압기의 설계와 전자기적 특성", 한국자기학회지, 12 권, 3호, p. 109, 2002.
- [2] 이해연, 허정섭, 김현식, 김종령, 오영우, "300 W급 평면 변압기의 설계 및 분석", 한국전기전자재료학회 2003 춘계학술대회 논문집, p. 46, 2003.
- [3] 김종령, 오영우, 이태원, 김현식, 이해연, 송재성, "평면코어용 Mn-Zn 페라이트의 물성", 한국전기전자재료학회 2003 춘계학술대회 논문집, p. 96, 2003.
- [4] 김종령, 오영우, 안용운, 김현식, "공정에 따른 Mn-Zn 페라이트의 자성손실 거동", 한국전기전자재료학회 2003 하계학술대회 논문집, p. 541, 2003.
- [5] 김현식, 허정섭, 김종령, 민복기, "초소형 고효율 평면변압기의 기술동향", 전력전자학회지, 6 권, 5호, p. 22, 2001.
- [6] C. T. Mclyman, "Magnetic core selection for transformers and inductors", Marcel Dekker, p. 7, 1997.
- [7] Ferroxcube, "Design of Planar Power Transformer", Application note, 2000.
- [8] 윤희중, 정명희, "저전력, 고주파, 고효율 자성박막 변압기 설계 및 제작에 대한 연구", 대한전기학회지, Vol. 50C, No. 11, p. 555, 2001.