저손실 자심재료를 이용한 평면변압기 제조 및 동작특성

이해연*, 허정섭*, 김현식*, 박혜영**, Evgeniy Ustinov*
(주)매트론 기술연구소*, 경성대학교**

Manufacture and Characteristics of the Planar Transformer using low power loss magnetic materials

Hae-Yon Lee, Jeong-Seob, Hyun-Sik Kim*, Hye-Young Park** and Evgeniy Ustinov*
MATTRON Co., Ltd. R&D Center*, KyungSung Uni.**

Abstract

The resonant planar transformer, which had power capacity of 300 W, input voltage of 220 V, output voltage of 15 V, and switching frequency of 500 kHz, was designed and manufactured by using the planar core with large effective area and the flat copper lead frames for miniaturization and high efficiency of the switching mode power supply (SMPS). As well as, a resonant 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 12 and 2 respectively. The self inductance of 1st winding was 33.2 μH, very low leakage inductance of 1.27 μH, and the coupling factor of 0.98 were obtained at switching frequency of 300 kHz. The high efficiency of 88.21 % for the SMPS equipped with planar transformer was obtained at power capacity of 300 W.

Key Words : Planar transformer, SMPS, high efficiency, planar core, miniaturization

1. 서 론

전기전자 통신기기의 핵심적인 부품인 전원장치는 에너지 축적 또는 변환용 소자인 변압기 및 커패시터 때문에 소형·경량화에 한계를 드러내고 있으며, 특히 크기가 큰 페라이트 코어를 이용한 변압기 때문에 소형화와 고효율화에 많은 제약을 받는다. 그림 1에 나타낸 것과 같이 평면 변압기는 넓은 유효 단면적을 가진 평면코어와 일반적인 wound copper에 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[1-2].

따라서, 본 연구에서는 전원장치의 소형, 고성능화를 위해서 핵심 기술인 변압기를 소형화하고자 300 W급 공진형 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 공진형 평면 변압기를 설계·제작하고, 그림 2에 전체 제조 공정을 나타내었다.

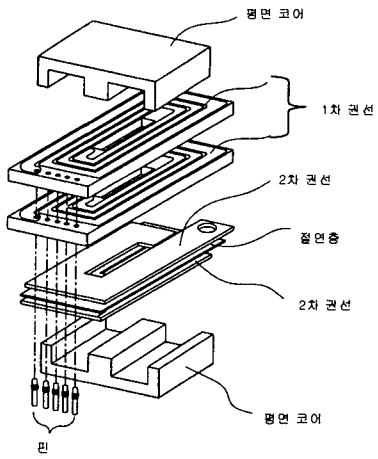

그림 1. 평면 변압기의 구조

표 1. 평면 변압기 설계 사양

항 목	사 양
Topology	Resonant
용 량	300 W
입 력 전 압	220 V
출 력 전 압	15 V
스위칭 주파수	300 kHz
주 위 온 도	25 ℃
허용 상승온도	50 ℃

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 Ap)의 추정 값을 제공할 수 있다. 식(1)은 ΔB가 포화에 의해 제한될 때 적용되고, 식(2)는 코어 손실에 의해 제한될 때 적용한다. 적용 시 가장 큰 Ap 값을 사용하며, 계산 값보다 큰 Ap 값을 갖는 코어를 선택한다[3]. 본 연구에서는 스위칭 주파수, 최소 손실온도 및 손실-주파수-자속밀도 특성을 고려하여 약 1 MHz까지 안정한 주파수 특성과 투자율 특성을 갖는 Philips E32-3F3 코어를 사용하였으며, 표 2에 기본 특성을 나타냈다[4].

$$Ap=[\frac{11.1\ P\ in}{K\ \Delta B\ f_t}]^{1.31}\ cm^4 \quad (1)$$

$$Ap=[\frac{P_{in}10^4}{120\ K2f_t}]^{1.58}\cdot(K_Hf+K_Bf^2)^{0.66}cm^4 \quad (2)$$

여기서 Pin = 용량/효율, f_t = 스위칭 주파수, K_H = 히스테리시스 계수, K_E = 와전류 손실계수이다.

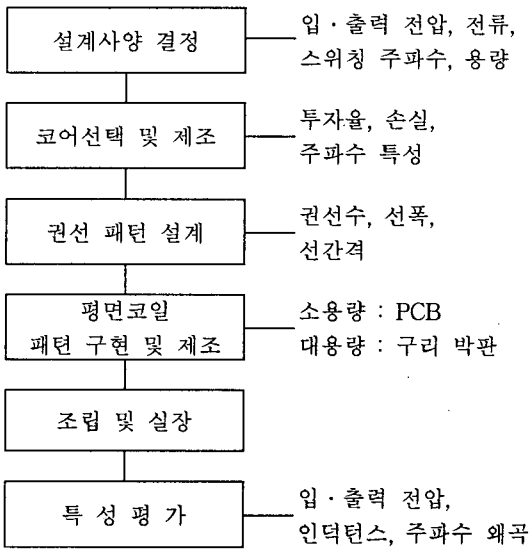

그림 2. 평면 변압기 제조 공정

표 2. EE32-3F3 평면 코어 사양

기호	조 건	특 성
μ_i	25℃; ≤10 kHz; 0.1 mT	2000±20%
μa	100℃; ≤25 kHz; 200 mT	≒ 4000
B (mT)	25℃; ≤10 kHz; 250 A/m	≥ 400
	100℃; ≤10 kHz; 250 A/m	≥ 330
Pv (kW/m^3)	100℃; ≤100 kHz; 100 mT	≥ 80
	100℃; ≤400 kHz; 50 mT	≥ 150
Ae (cm^2)	-	1.3
Aw (cm^2)	-	0.59

2.3 권선설계

변압기의 전체 손실 중에서 코어의 손실이 50 % 이상이며, 변압기의 온도상승을 발생시키고 효율을 저하시키는 지배적인 요인으로 작용한다. 따

라서 본 연구에서 목표한 변압기 허용 상승온도 50 ℃에서의 최대 코어손실과 자속밀도를 식(3)과 (4)로 각각 산출하였으며[1], P_{core} 는 259 mW/cm^3, B_{peak}는 80 mT의 값을 얻었다.

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

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

여기서 3F3의 재료상수 A, X, Y는 각각 2.5×10-4, 1.8, 0.4이다[4].

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].

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

$$N_2 = \frac{N_1 \cdot U_O}{U_{in} \cdot \delta} \qquad (6)$$

여기서 Uin = 입력전압, Uo = 출력전압, δ= 듀티 사이클, 그리고 Ae = 코어의 실효 단면적이다.

산출된 1,2차 권선수는 각각 12회, 2회이며 권선수의 정수화를 위해 설계 값의 1,2차 권선비를 기준으로 12회, 2회로 결정하였다.

평면 코일에 전압, 전류가 인가되면 권선의 온도가 상승하게 되므로 도체의 두께는 교류손실과 전류-상승온도를 고려해야 한다. 따라서 식(7)의 표피효과에 의해 전류가 표면에 침투할 수 있는 깊이 D_{skin}에 의해 $2D_{skin}$ = 257.5 ㎛ 이하가 되도록 1차 코일은 직경 200 ㎛의 일반 권선을 사용하였고, 대전류로 온도상승이 지배적인 2차 코일은 표피효과에 의한 손실을 감수하고 300 ㎛ 두께의 구리 박판을 사용하였다.

$$D_{skin} = \frac{2230}{\sqrt{f\,[kHz]}} [\mu m] \qquad (7)$$

50℃의 변압기 허용 상승 온도를 고려하여 1차 권선은 8개의 12회 권선층을 병렬 연결하였고, 2차 권선은 2개의 1회 권선층을 직렬 연결하여 변압기를 구성하였다. 그리고 근접효과를 최소화하기 위해서 1, 2차 권선을 샌드위치(sandwich) 구조로 적층 함으로써 서로의 자장 방향이 반대가 될 수 있도록 하였다[1]. 표3에 설계결과를 나타냈고, 각 층에 대한 2차 권선 패턴 결과를 그림3에 나타냈다.

표 3. 평면 변압기 설계 결과

항 목	사 양
1,2차 권선 두께	200, 300 ㎛
2차 권선 폭	7.4 mm
1차 권선수	12 회
2차 권선수	2 회
1차 코일 인덕턴스	30 ~ 35 μH
누설 인덕턴스	1 ~ 2 μH

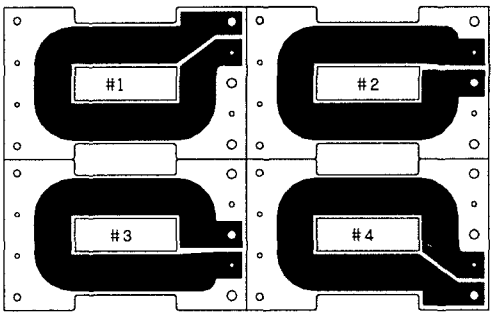

그림 3. 평면 변압기 2차 권선 패턴

3. 결과 및 고찰

그림 4는 평면 변압기(PT)와 일반 변압기(CT)의 누설 인덕턴스를 측정한 결과이다. 누설 인덕턴스는 1차 코일에서 발생되는 자속이 2차 코일에 완전히 여자되지 못하고 일부가 누설되는 것으로써, 전체적으로 평면 변압기가 일반 변압기보다 약 7배 이상 낮은 누설 인덕턴스 값을 나타냈다. 스위칭 주파수 300 kHz에서 약 1.27 μH로, 이는 1차 코일 자기 인덕턴스의 3.84 %에 해당하는 아주 작은 값이다.

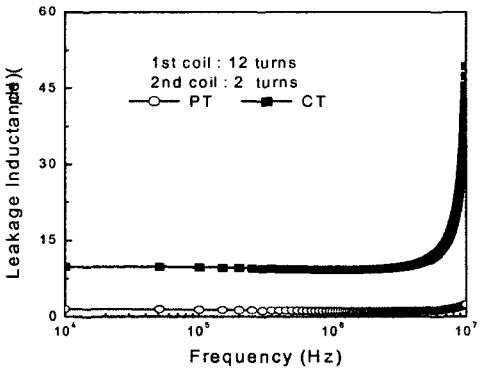

그림 4. 평면 변압기와 일반 변압기의 누설 인덕턴스 특성

그림 5는 식(8)과 (9)에 의해 산출된 변압기 결합계수(k)의 주파수 특성을 나타낸 것으로써 스위칭 주파수 300 kHz에서 0.982의 아주 높은 값을 가지며, 500 kHz의 주파수 대역까지 상호인덕턴스의 증가 때문에 결합계수가 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 4의 결과와 일치하는 것으로써 누설 인덕턴스가 아주 낮기 때문에 전체적인 결합도가 높은 것으로 판단되며 전체적인 변압기 효율이 증가될 것으로 사료된다.

$$M = \frac{L_{p+s} + L_{p-s}}{4} \quad (8)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (9)$$

여기서, L_{p+s}와 L_{p-s}는 각각 극성이 같은 방향과 반대 방향으로 1, 2차 코일을 연결하여 측정한 인덕턴스 값이고, M은 상호 인덕턴스이다[5].

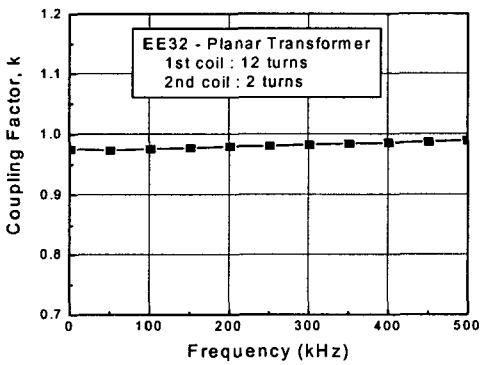

그림 5. 평면 변압기의 결합계수

그림 6은 제조된 평면 변압기를 탑재하여 입력전압 220VAC, 출력 15 VDC의 공진형 컨버터를 제작하고 300 W 까지 측정된 컨버터의 효율특성을 나타낸 것으로, 전 영역에서 88% 이상의 높은 효율특성을 갖고 있으며, 특히 100 W~ 200 W구간에서는 90 %이상의 높은 효율을 나타냈다.

4. 결 론

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

1. 1, 2차 권선수를 각각 12회, 2회 그리고 200 ㎛ 직경의 일반 권선과 300 ㎛ 두께의 구리 박판을 이용하여 평면 변압기를 설계·제작 하였다.

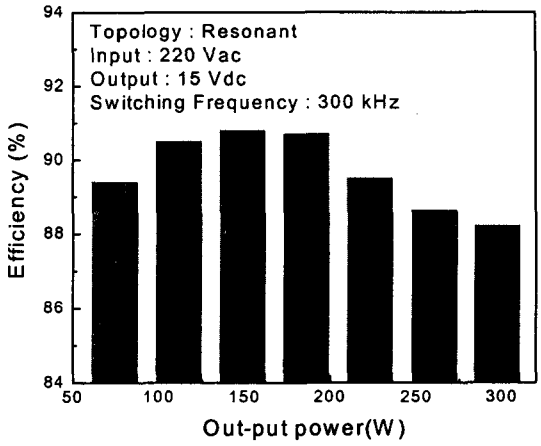

그림 6. 컨버터의 효율

2. 스위칭 주파수 300 kHz에서 일반 변압기에 비해서 1/7 이하인 약 1.27 μH의 아주 낮은 누설 인덕턴스 값을 얻었다.

3. 결합계수 k는 주파수 300 kHz에서 0.98의 아주 높은 값을 얻었으며, 평면 변압기의 설계방법 확립과 응용 가능성을 확인하였다.

4. 평면 변압기가 채용된 300 W급 포워드 컨버터를 제작하여, 300 W에서 88.21%의 높은 효율을 얻었다.

참고 문헌

[1] 김현식, 이해연, 김종령, 오영우, "평면 변압기의 설계와 전자기적 특성", 한국자기학회지, 12권, 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] C. T. Mclyman, "Magnetic core selection for transformers and inductors", Marcel Dekker, p. 7, 1997.

[4] Ferroxcube, "Design of Planar Power Transformer", Application note, 2000.

[5] 윤회중, 정명희, "저전력, 고주파, 고효율 자성박막 변압기 설계 및 제작에 대한 연구", 대한전기학회지, Vol. 50C, No. 11, p. 555, 2001.