

고밀도 SMPS용 변압기의 제조와 특성

Fabrication and Characteristics of Transformers for High Power Density SMPS

김현식*, 김종령*, 허정섭*, 오영우**, 송재성***

Hyun-Sik Kim, Jong-Ryung Kim, Jung-Sub Huh, Yong-Woo Oh, Jae-Sung Song

Abstract

We designed the flyback planar transformer, which had 8W capacity, with 70V input voltage and 8.2V output voltage for the establishment of design method and the confirmation of application possibility. The numerical value of inductance measured under the switching frequency of 120 kHz was 1650 μ H, which was the inductance efficiency of 85~87% against theoretical value. The A.C. resistance of primary and secondary coil was 4.2 Ω and 0.25 Ω respectively, On the other hand, the quality factor for each wound numbers showed quite a high value of 158 and 75 respectively. And the Coupling Factor was 0.96~0.97 under 120 kHz switching frequency. And the shape of the output wave of the planar transformer at 70V input voltage was a stable square wave.

Key Words : Planar Transformer, Skin Effect, Inductance, Coupling Factor, Proximity Effect

1. 서 론

전력·전자분야에서 에너지 절약과 효율의 증대에 대한 관심이 고조됨에 따라 에너지 저장·변환 장치의 고성능화, 고효율화, 소형·경량화 등에 대한 중요성이 인식되고 있다. 하지만 현재 전자통신 기기에 있어 전원부분은 에너지 축적 또는 변환용 소자인 변압기 및 커패시터의 존재로 인해 기대만큼의 소형·경량화가 이루어지지 못하고 있다¹⁻²⁾.

변압기의 소형화는 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 가능하지만, 소형화에 따른 방열면적이 감소하여 손실이 증가하며, 이 손실량은 스위칭 주파수의 증가에 따라 비례적으로 증가하고, 권선형 3차

원 변압기는 100 kHz 이상의 주파수대역에서 표피 효과(Skin effect)와 근접효과(Proximity effect)에 의한 손실의 증가로 인해 고주파의 스위칭 주파수를 갖는 전원장치에는 응용하기가 어렵다. 반면 넓은 유효 단면적을 가진 평면 코어와 평평하고 넓은 도체를 권선으로 이용한 평면변압기(Planar Transformer)는 고주파 손실을 감소시켜 고주파대역용 전원장치에의 채용이 가능하여 소형화와 고효율화를 동시에 이룰 수 있다는 특징이 있다³⁾.

평면변압기는 1990년대 초에 특성, 모델링 그리고 평면자성체의 적합성에 대한 연구가 시작되었으며²⁾, 현재 국외에서는 2 MHz의 스위칭 주파수와 25 kW의 용량까지의 평면변압기가 개발되어 있다. 하지만 국내에서는 현재의 기초 기술 부족으로 인해 기술 개발이 늦어지고 있으며, 현재 몇몇 업체에서 이루어지고 있으나, 설계 및 제조기술의 범위는 선진업체에 비해 낙후된 형편이다.

* (주) 매트론 기술연구소
(마산시 월영동 449, Fax: 055-248-5033
E-mail : hskim@matttrone.com)

** 경남대학교 재료공학과

*** 한국전기연구원 전자기소자그룹

따라서 본 연구에서 고밀도 전원장치의 소형, 고성능화를 이루기 위해 평면 코어와 평면 코일로 이루어진 평면변압기의 설계 및 제조기술을 개발하고자 플라이-백(Flyback) 평면변압기를 설계 및 제조하였으며, 입력력 신호에 대한 전·자기적 특성 등의 기초특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2-1. 평면변압기의 설계

본 연구의 평면변압기 설계 및 특성평가에 대한 실험에 대한 설계사양은 표 1에 나타난 바와 같으며, 평면코어는 스위칭주파수, 최소손실온도 및 손실-주파수-자속밀도 등을 고려하여 Philips E18-3F3 코어를 사용하였다.

변압기의 허용상승온도 45°C에 대한 평면코어의 P_{core} 는 551mW/cm²이었고, 최대 허용자속밀도(B_{peak})는 162 mT이었다. 코일의 권선수는 자속 ϕ 이 $\phi \sin\omega t$ 로 변할 때 유기되는 기전력을 통해 산출되며, 일반적인 변압기 설계방법으로 산출하였다^{3, 11)}. 산출된 1, 2차 권선수는 각각 24회, 3회였으며, 이때의 입력전류에 대한 1차 코일과 2차 코일의 인덕턴스는 각각 1900 μ H, 118 μ H이었다. 권선수, 임피던스 및 출력전류 등의 결과는 표 1에 나타내었다.

그리고 평면 구리 박판의 두께는 상용되고 있는 35 μ m을 사용하였고 선간격과 선폭을 제어는 온도 상승의 억제를 위해 >200 μ m으로 하였으며, 선폭은 식 1의 표피효과에 의해 전류가 침투할 수 있는 표면으로부터의 깊이 D_{skin} 에 의해 <2 D_{skin} 가 되도록 하였다.

$$D_{skin} = \frac{2230}{\sqrt{f [kHz]}} \quad [\mu m] \quad (\text{식 1})$$

한편 24회의 1차 코일의 권선은 4.6 mm라는 권선 창에서 위의 조건을 만족하는 조건으로 권선하는 것은 공간적으로나 온도상승측면에서 불 때 불가능하다. 따라서 4개의 6회 권선 레이어로 분할하고 직렬 연결하여 온도상승폭을 최소화하였다. 즉 1차 코일의 선간격과 선폭을 각각 300 μ m, 405 μ m으로 6회 권선하여 설계조건을 모두 만족시켰다.

그리고 IC와 2차 코일의 경우 선간격과 선폭을 각각 300 μ m, 1140 μ m으로 설계하였다. 이 때 구리막의 두께는 35 μ m으로 하였다. 이와 같은 설계결과를 토대로 한 패턴 설계 결과를 그림 1에 나타내었다.

표 1. 설계사양과 설계 결과

Table 1. The design Specifications and results

설계조건		설계결과	
항목	사양	항목	결과
형태	Flyback	입/출력전압	70/8.2V
용량	8 W	1차/2차권선수	24/3 회
입/출력전압	70/8.2V	IC용 권선수	3 회
듀티사이클	0.48/0.5	1차 입력전류	190 mA
주파수	120 kHz	2차 출력전류	1593 mA
상승온도	45°C	상승온도	40.4°C

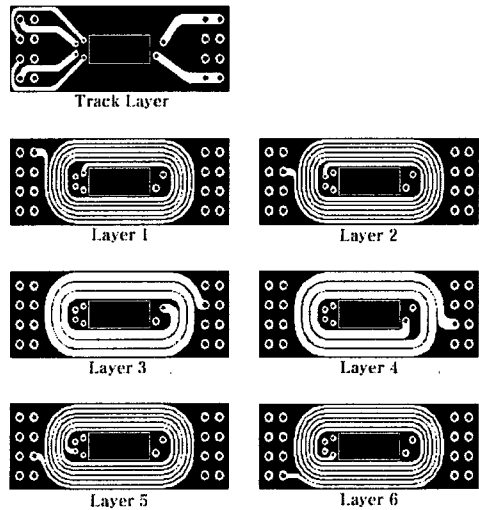


그림 1. 평면변압기 레이어 설계

Fig. 1. Layer design for the planar transformer

3. 결과 및 고찰

그림 2는 1차 코일자기인덕턴스(L_p)와 2차 코일 자기인덕턴스(L_s) 그리고 상호 인덕턴스(L_M) 이론치와 실제 측정치를 나타낸 것으로서, 평면변압기의 모든 권선 레이어에서 스위칭 주파수 120 kHz 이상까지 아주 균일한 인덕턴스 특성을 나타내었다. 1차 코일과 2차 코일의 자기 인덕턴스 측정치는 각 이론치 1900 μ H, 29.7 μ H에 대하여 각각 1650 μ H, 25.3 μ H이었으며, 이는 약 87 %와 85 %의 인덕턴스 효율을 나타내는 것이다. 손실된 약 13~15 %의 인덕턴스는 두 개의 E-코어 사이에서

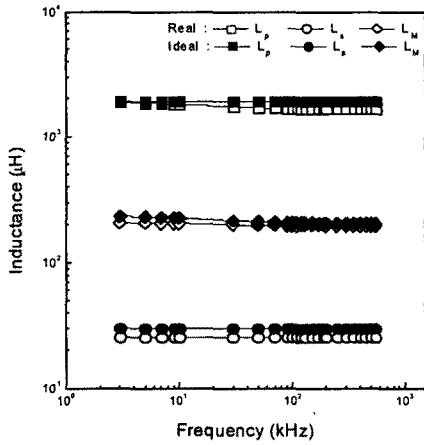


그림 2. 코일의 자기인덕턴스와 상호 인덕턴스
Fig. 2. Self(L_p) and Mutual Inductance(L_s) of coils

미세한 공극에 의한 누설 인덕턴스가 발생했기 때문인 것으로 판단된다.

그러나 일반적인 변압기의 인덕턴스 효율이 75% 이하이므로, 10% 이상의 손실이 감소되어 기존의 변압기보다 우수한 효율특성을 나타내었다.

그림 3은 1차 코일과 2차 코일의 주파수에 따른 직류저항(R_{DC})과 공심과 자심일 경우의 교류저항(R_{AC}) 특성을 나타낸 것이다. 선폭이 405 μm 일 때 동선의 직 저항은 1.2 Ω 이었고, 선폭이 1050 μm 인 2차 코일의 직류저항은 0.075 Ω 으로 나타났다. 이것은 도체의 직류저항이 도체의 길이에 비례하고, 도체의 단면적에 반비례하므로 선폭의 증가는 도체 단면적의 증가를 의미하므로 직류저항이 감소하게 된 것이다.

그리고 1차 코일과 2차 코일의 공심에서의 교류저항은 주파수 증가에 따라 증가하여 200 kHz 부근의 변곡점을 기준으로 저항의 증가폭이 크게 증가하였다. 이것은 근접효과에 의한 저항(R_p)과 표피효과에 의한 저항(R_s)을 나타내는 것으로서, 선폭이 충분하도록 설계하여 표피효과는 최소화하였으므로 200 kHz까지는 근접효과에 의한 저항부분으로 판단되며, 200 kHz 이상에서는 근접효과와 표피효과에 의한 저항증가가 동시에 발생하여 증가폭이 상승한 것으로 사료된다. 또한 공심과 자심의 저항차이는 주파수에 따른 히스테리시스손실(R_h)과 와전류손실(R_e)을 나타내는 것으로서, 일반적인 페라이트 코어의 교류 특성과 같이 변곡점을

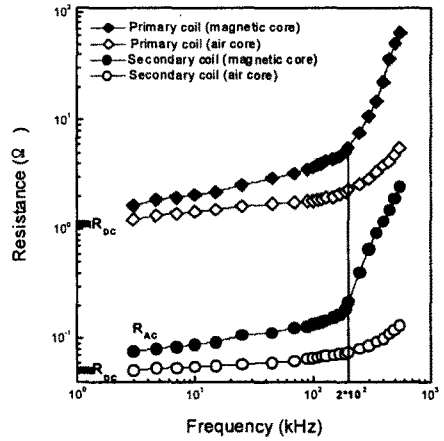


그림 3. 1차 코일과 2차 코일의 저항특성
Fig. 3. Resistance of Primary and secondary coils

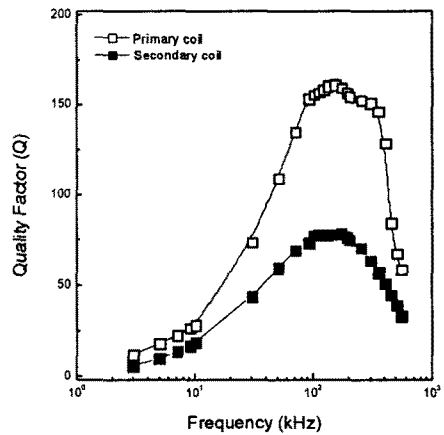


그림 4. 평면변압기의 품질계수
Fig. 4. Quality factor of the planar transformer

기준으로 200 kHz 이하의 주파수에서는 R_h 가 지배적으로 작용하고, 그 이상에서는 R_e 에 의한 저항증가가 지배적으로 작용하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 200 kHz 이상에서는 R_p 와 R_s 가 포함되어 저항의 증가폭은 크게 상승하였다. 하지만 스위칭 주파수 120 kHz에서 각각의 교류저항은 200 kHz까지 완만한 저항증가를 나타내어 비교적 안정한 저항-주파수 특성을 나타내었다. 그림 4는 1차 코일과 2차 코일의 성능지수특성의 주파수 의존성을 나타낸 것으로서 1차, 2차 코일에 대한 성능지수는

200 kHz까지 비교적 큰 폭으로 증가하였고, 스위칭 주파수 120 kHz에서의 성능지수는 각각 158, 75로 높은 값을 나타내었다. 그리고 200 kHz 이상의 주파수 대역에서는 감소하는 경향을 나타내었는데, 이것은 그림 3에서 200 kHz 이상부터 교류 저항의 급속한 증가로 인해 발생하는 결과이다.

그림 5는 본 연구에서 제작된 평면변압기의 결합인자(k)-주파수 특성을 나타낸 것으로서, k값은 주파수 증가에 따라 비교적 일정한 값을 나타내었으며, 스위칭 주파수 120 kHz에서 0.96~0.97 범위의 높은 값을 나타내었다.

그림 6은 본 연구에서 제작된 평면변압기의 스위칭 주파수에서 입력전압과 출력 파형을 나타낸 것으로서, 70V 입력전압에 대하여 8.1V의 안정한 구

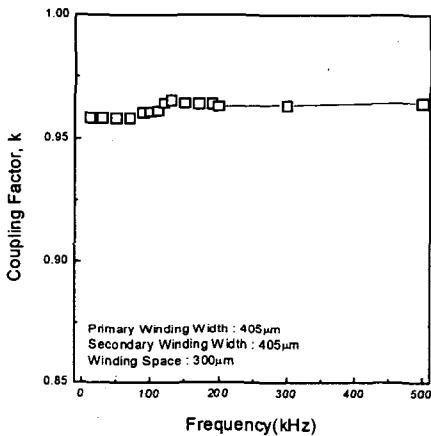


그림 5. 주파수에 따른 결합인자 특성
Fig. 5. Coupling factor(k) as a function of frequency

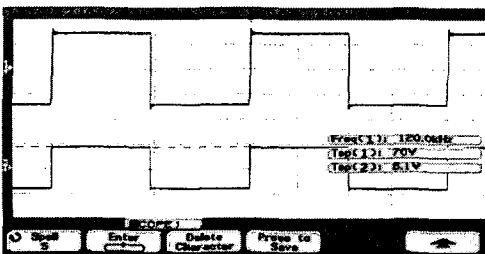


그림 6. 평면변압기의 입·출력 파형
Fig. 6. Input and Output waveforms of planar transformer

형과의 출력파형이 나타났다. 이 안정적인 평면변압기의 구동은 본 연구에서 제작된 평면변압기의 설계조건이 오류없이 설계되었음을 나타내며, 본 연구의 목적과 일치하는 것이라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서 평면 코어와 평면 코일로 이루어진 8W급 플라이-백 평면 변압기를 설계 및 제조하였으며, 입출력 신호에 대한 전·자기적 특성 등을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 상승온도가 40.4°C이고 입/출력 전압과 용량이 각각 70V/8.2V, 8W인 평면변압기를 설계 및 제작할 수 있었다.
2. 인덕턴스 효율은 120 kHz에서 약 85~87 %를 나타내었고 성능지수는 각각 158, 75로 나타났다. 결합인자 k는 주파수 증가에 따라 비교적 일정한 값을 나타내었으며, 스위칭 주파수 120 kHz에서 0.96~0.97 범위의 값을 나타내었다.
3. 70V 입력전압에 대하여 8.1V의 안정한 구형파의 안정한 출력파형을 나타내어 평면변압기의 설계방법을 확립하였으며, 평면변압기의 응용 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] 김현식, "Co-계 비정질 자성 박막을 이용한 평면 인덕터의 제조와 특성", 경남대, 1998, pp.1-4
- [2] 이배원, "고효율 변압기를 이용한 포워드 컨버터 설계", 중앙대, 1999, pp.1-18
- [3] Ferroxcube, "Design of Planar Power Transformer"
- [4] Conor Quinn, Karl Rinne, "A review of Planar Magnetic Techniques and Technologies", 2001 IEEE
- [5] 김희준, "스위치모드 파워스플라이", 성안당, 2000, pp.3-48
- [6] PHILIPS, "Soft Ferrites and Accessories", 2000 Data Handbook, pp.7-38
- [7] 윤희중, 정명희, "저전력, 고주파, 고효율 자성박막 변압기설계 및 제작에 대한 연구", 대한전기학회지, 2001. 11, vol. 50C, No. 11, p555-561
- [8] 김현식, 허정섭, 김종령, 민복기, "초소형 고효율 평면변압기의 기술동향", 전력전자학회지, 2001. 10, vol. 6, No. 5, p22-27