

# 고주파용 평면 트랜스포머의 설계와 응용

김 철 진

(한라대 제어계측공학과 교수)

## 1. 서론

최근 디스플레이 장치를 비롯한 전자 산업분야의 발전과 휴대전화, 디지털카메라 등의 정보기기 산업분야에서 기기의 고기능화와 소형화의 진전으로 초소형 코일의 수요가 증가하고 있다.

자성재료는 일반적으로 보자력 300(Oe)을 기준으로 경자성과 연자성으로 구분하고 있으며, 트랜스포머나 인덕터의 원료가 되는 연자성 재료의 경우는 주로 10(Oe) 이하의 재료가 사용된다.

연자성재료는 연질 페라이트, 연자성 박막소자, 비정질 등을 포함하며, 특히 높은 자속밀도를 갖는 분말 코어는 역률 개선회로(PFC), 인덕터, 노이즈 필터, 스위칭 트랜스포머 등 고주파에서 저손실을 필요로 하는 많은 분야에 응용이 가능하다.

스위칭 전원장치에는 권선과 페라이트를 사용한 트랜스포머 및 인덕터가 전자에너지 변환을 위해 필수적으로 사용되지만, 이들 유도성 부품은 고효율 스위칭 전원장치의 소형화에 중요한 제한요소로 작용하여 왔다.

이러한 문제점에 대한 대안으로 전력 변환을 위한 트랜스포머(transformer)나 유도성 임피던스를 얻기 위한 인덕터(inductor) 소자의 높이를 낮게 설계하는 평면화(planar) 기술이 개발되게 되었다.

최근의 컨버터 회로는 안정된 출력 전압을 얻고 에너지 변환효율을 향상하기 위하여 공진회로를 적용하고, PCB 기판에 비교적 용이하게 적용 가능하며 전력밀도와 부품의 신뢰성 향상을 기한 평면 트랜스포머의 적용이 두드러지게 증가하는

경향을 나타내고 있다.

다층 PCB의 평면 코어를 사용하면 기존의 권선형 방식과 비교하여 체적에 대한 표면적의 비가 현저히 개선되어 열저항이 약 50% 정도 저감되며, 온도상승 범위 내에서 높은 출력 전력밀도를 가지므로 부품의 물리적인 높이(profile)를 낮추고, 누설 인덕턴스를 저감할 수 있으며 우수한 반복동작 특성과 열 특성을 기대할 수 있다.

평면형 트랜스포머는 소형의 다층 PCB를 사용한 단일소자로 구성되거나 또는 전원공급장치(SMPS)의 다층 PCB에 직접 설계하여 사용하며, 최근 'Planar', 'Flat', 'Frame & Bar' 등의 명칭을 사용하여 상용화가 진행되고 있다.

## 2. 평면 트랜스포머의 설계 과정

자성부품의 소형화 대응 방안으로는 극세선을 사용하여 정밀권선을 실시하거나 평면 코어와 다층 PCB를 적용한 자기회로의 최적설계 등을 통한 고효율화 등이 소형화의 중요한 요소라 할 수 있다.

평면 코어와 다층 PCB를 적용한 트랜스포머의 경우 약 1(MHz)의 스위칭 주파수 대역에서도 기존의 권선형 소자에 비해 체적면에서 약 1/2 정도의 소형화를 기할 수 있으며, 코어 재료는 미소분말의 에폭시(epoxy)를 첨가하여 코어 손실을 최소화하고 고온특성(약 130℃) 및 절연내력 특성이 우수한 특징을 갖는다.

다음의 그림 1에 평면형 트랜스포머의 내부구성과 PCB 기판에 적용된 예를 나타내고 있으며, 그림 2에는 각종 평면 트랜스포머의 형태와 PCB에 적용된 예를 나타내고 있다.

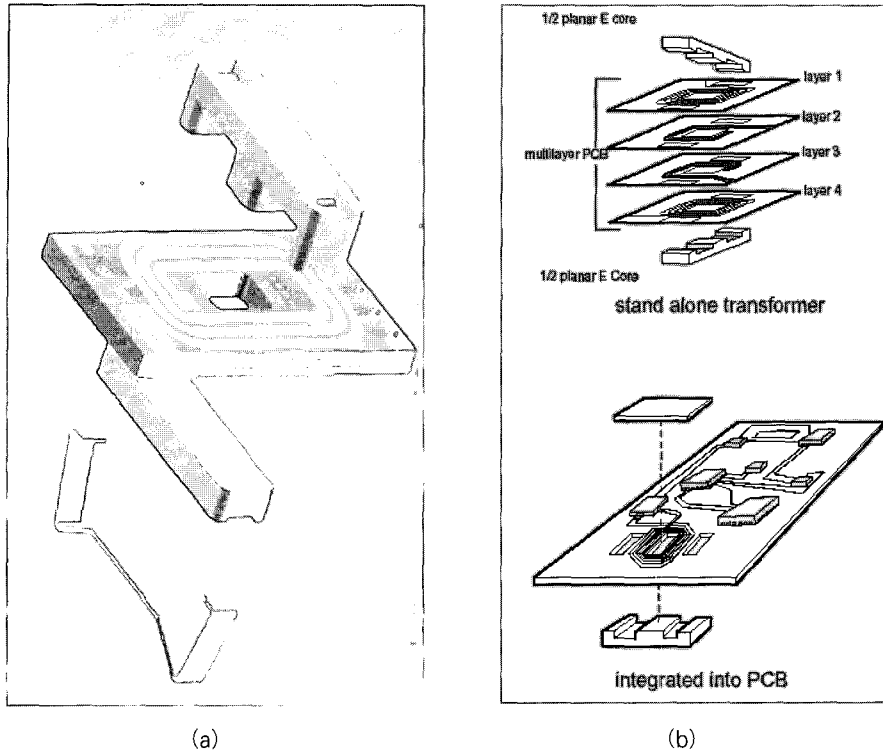


그림 1 평면형 트랜스포머의 형상 및 PCB 구성

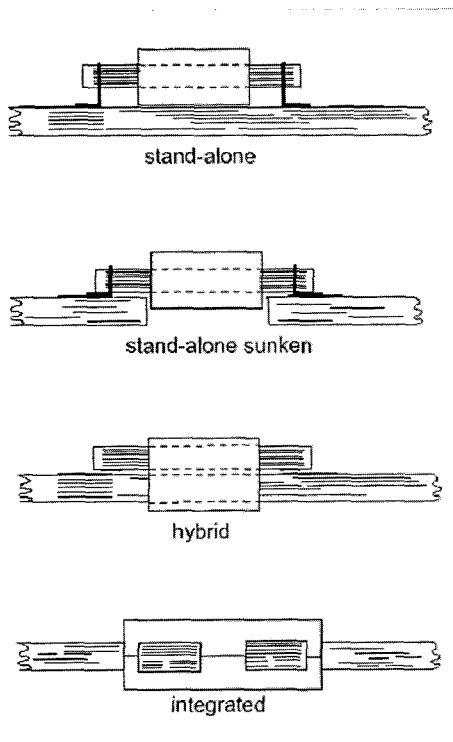


그림 2 각종 평면 트랜스포머의 형태와 PCB 적용 예

### 2.1 최대 자속밀도의 계산

트랜스포머에는 철손과 동손으로 인하여 온도상승이 발생하므로 온도상승을 최대 허용치 이하로 설계할 필요가 있다. 온도상승은 코어의 자속밀도의 함수로 추정할 수 있으며, 열평형을 고려한 총손실  $P_{loss}$  은 트랜스포머의 냉각능력과 유관하며 일반적으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{loss} = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (1)$$

$\Delta T$  : 온도상승,  $R_{th}$  : 트랜스포머의 열저항

트랜스포머 손실의 1/2을 코어 손실로 가정하면 최대 코어 손실 밀도  $P_{core}$  는 실험적으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_{core} = \frac{(12) \cdot \Delta T}{\sqrt{V_c} (\text{cm}^3)} \quad [\text{mW/cm}^3] \quad (2)$$

전력손실은 주파수  $f[\text{Hz}]$ , 최대 자속밀도  $B[\text{T}]$ , 온도  $T[^\circ\text{C}]$ 의 함수에 비례하며 제조 업체에서 제공하는 데이터 시트로부터 코어의 손실밀도  $P_{core}$  와 최대 허용자속밀도  $B_{peak}$  를 계산할 수 있다.

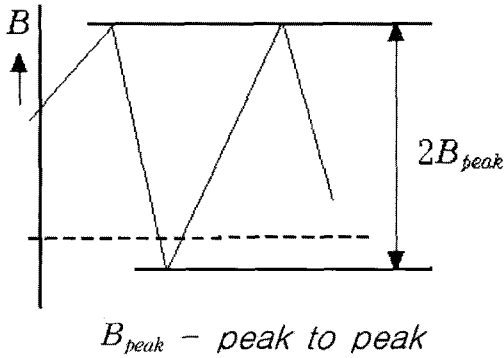


그림 3 자속밀도

### 2.2 권선 분포

허용자속밀도  $B_{peak}$  를 계산한 후 적절한 컨버터 방식을 선정하고 에너지 변환방식에 따라 트랜스포머에 적합한 1, 2 차 권수를 계산하기 위한 관계식을 검토하여 권선을 층으로 나누는 방법을 결정한다.

트랙에 흐르는 전류에 따라 PCB 의 온도상승을 예상할 수 있으므로 열확산을 고려하여 내외부 층의 권수를 대칭적으로 분포하도록 하며 이때 근접효과와 자기적 결합을 고려하여 1-2 차의 층을 샌드위치 모양으로 배치하는 것이 바람직하다.

가능한 권선의 높이와 필요한 권수의 결정은 권선 온도상승의 중요한 원인이 되므로 비용을 고려하여 동박면(copper layers)의 표준 두께를 기준으로 선택한다.(35-70[ $\mu\text{m}$ ]이 일반적)

IEC 950 에서는 1, 2 차 권선간의 주절연을 위하여 FR2, FR4 등의 PCB 재료를 사용하는 경우 요구 이격거리는 400[ $\mu\text{m}$ ]이며, 주절연이 아닌 경우는 층간의 이격거리는 200[ $\mu\text{m}$ ]으로 또한 PCB 상하부의 약 50[ $\mu\text{m}$ ]의 solder mask 층을 고려할 것을 규정하고 있다.

전류와 최대허용 전류밀도의 예측으로부터 권선의 트랙폭을 결정한 후 권선간의 공간을 결정하는 것이 적절하나 실용적으로는 동박이 35[ $\mu\text{m}$ ]인 경우 트랙폭은 150[ $\mu\text{m}$ ]이상으로, 70[ $\mu\text{m}$ ]이면 200[ $\mu\text{m}$ ]이상으로 한다. PCB의 트랙폭  $W_t$  는 그림 4를 기준으로 하여 다음의 관계로 나타낼 수 있다.

$$W_t = \frac{[b_w - (N_1 + 1) \cdot s]}{N_1} \quad (3)$$

$N_1$  : 층간의 턴수,  $s$  : 권선간의 공간,  $b_w$  : 권선의 폭, 단위: [mm]

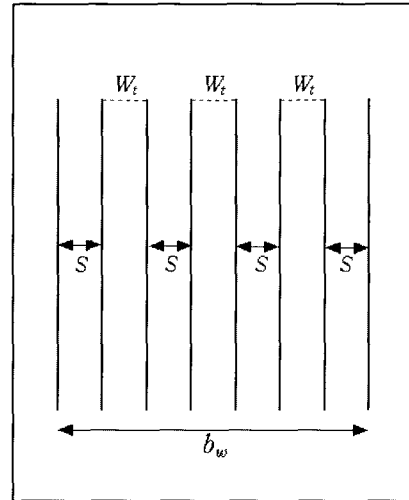


그림 4 트랙폭  $W_t$ , 공간면  $s$  및 권선폭  $b_w$  의 상관관계

주 절연에 대한 조건을 충분히 만족해야 하는 경우에는 코어를 1차의 일부로 간주할 수 있으므로 2차 층으로 부터 400[ $\mu\text{m}$ ] 정도를 이격하고, 내외부의 각(leg)과 코어에 인접한 2 차 권선간의 연면거리(creepage distance)는 400[ $\mu\text{m}$ ] 을 유지한다. 따라서, 권선폭에서 800[ $\mu\text{m}$ ] 정도를 감산하여 트랙 폭을 결정한다.

### 2.3 PCB의 온도상승

최종단계로 실효전류에 의해서 발생하는 동박면의 온도상승을 고려해야 하며, 실효전류와 PCB 도체단면의 온도상승과의 상관관계를 그림 5에 제시한다.

이때, 단일도체나 멀리 배치된 인덕터의 경우는 제시한 표를 이용하여 도체의 폭, 두께, 단면적 및 설정 온도상승에 대한 최대허용전류를 결정하고, 병렬 인덕터나 배치가 가깝게 된 경우는 등가단면과 등가전류를 사용하여 온도상승을 예측할 수 있다. 여기서, 등가단면은 병렬도체 단면의 합이며, 등가전류는 인덕터전류의 합을 의미한다.

이러한 설계과정에서 권선에서 발생한 열은 DC전류에 의한 것으로 가정하고 있으나 실제의 경우에 존재하는 표피효과와 근접효과의 발생원인이 되는 AC전류 성분을 고려할 필요가 있다.

### 2.4 기타의 고려사항

도체자체의 전류에 의해 발생하는 내부의 자계로 인하여 도체에는 표피효과가 나타나며, 고주파 신호와 같은 빠른 전류의 변화는 와전류의 원인이 되는 교번자속을 발생한다.

주전류에 포함된 이 와전류는 주전류의 방향과 반대이며, 이로 인해 도체의 중앙부의 전류는 상쇄되고 전류의 분포는

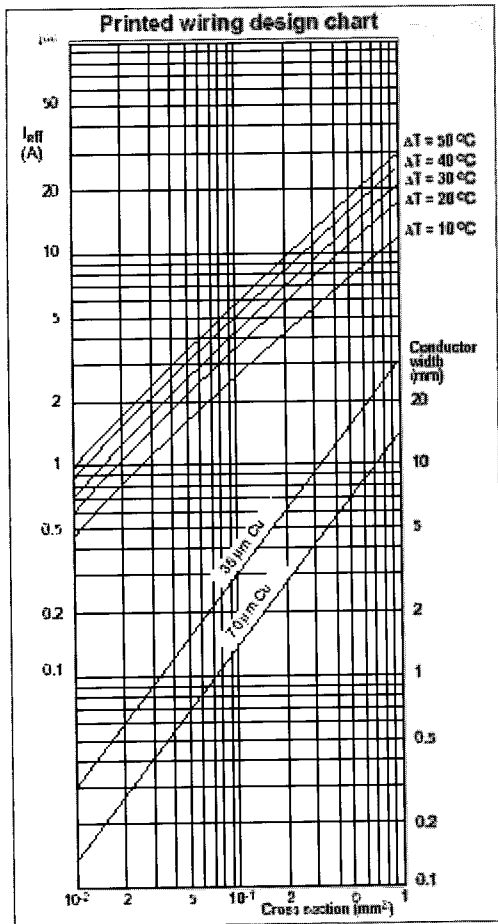


그림 5 PCB 와 온도상승의 상관관계

도체표면으로 이동하여 전류밀도는 도체의 표면에서 중심을 향하여 지수함수 적으로 감소한다.

전류밀도가 도체 표면에서 중앙까지  $e^{-1}$ 의 계수로 감소하는 침투깊이(skin depth)  $\delta$ 는 도전율이나 투자율과 같은 재료의 특성에 따라 다르고, 주파수의 제곱근에 반비례 한다.

60 (°C) 에서 동 의 침투 깊이는 대략 다음과 같다.

$$\delta[\mu\text{m}] = \frac{2,230}{\sqrt{f(\text{kHz})}} \quad (4)$$

도체폭  $W$  가  $2\delta$  보다 작을 때는 이 효과를 방지 할 수 있으며, 500 [kHz] 의 주파수에서 트랙폭이 200 [ $\mu\text{m}$ ] 이하를 의미한다. 만약 계산한 권수에 비해 보다 큰 권선폭  $b_w$  가 적용되어야 하는 경우에는 자기적인 관점에서 가장 좋은 해결책은 병렬 트랙을 사용하여 권선을 분할하는 것이다.

실제는 권선 자체의 전류에 의한 교번자계 뿐만 아니라 인접한 다른 도체의 자계로 인하여 도체내에 와전류가 나타나

는 근접효과 (proximity effect)를 최소화하기 위하여 1, 2차 권선을 샌드위치 권선으로 처리하는 방안이 적절한 대책이 될 수 있다.

또한, AC전류가 공급되는 다층 PCB의 설계에서는 DC전류의 경우와 비교하면 주파수 1 [MHz]까지는 주파수가 100 [kHz] 증가할 때마다 PCB에서의 온도상승이 약 2°C씩 증가하는 상관관계를 나타낸다.

### 3. 설계 예

다음은 에너지 변환 방식으로서 절연형 포워드(Forward) 방식을 선택한 경우를 나타낸 예로서, 표 1은 Philips 사의 Planar E 코어중 가장 일반적으로 사용되는 3C90 재료의 특성을 나타낸 것이다.

표 2 및 3에 포워드 트랜스포머의 설계사양(specification) 과 기본적인 관계식을 각각 제시한다.

언급한 과정에 따라 설계한 E14 코어 적용 10 층의 포워드 컨버터 트랜스포머의 설계 데이터 및 실제 PCB의 설계 결과를 표 4에 제시하고 있다.

다음의 그림 6은 설계과정에 따른 10층의 포워드컨버터용

표 1 3C90 재료의 특성

SYMBOL	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$\mu_i$	25 °C; ≤10 kHz; 0.1 mT	2300 ±20%	
$\mu_a$	100 °C; 25 kHz; 200 mT	5500 ±25%	
$B$	25 °C; 10kHz; 250 A/m	≥430	mT
	100 °C; 10kHz; 250 A/m	≥340	mT
$P_v$	100 °C; 25 kHz; 200mT	≤80	kW / m <sup>3</sup>
	100 °C; 100 kHz; 100 mT	≤80	
	100 °C; 100 kHz; 200 mT	≈450	
$\rho$	DC, 25 °C	≈5	Ωm
$T_c$		≥220	°C
density		≈4800	kg / m <sup>3</sup>

표 2 포워드 트랜스포머의 설계사양

설계 항목	데이터
출력 전력 $P_o$	18(W)
스위칭 주파수 $f$	500(KHz)
듀티비 (최대) $d$	0.5
입력/출력 전압 $V_i / V_o$	48 / 5.0(V <sub>DC</sub> )
주위온도(최대)	40°C
허용온도상승 $\Delta T$	50°C

표 3 설계 관계식(Forward)

파라미터	관계식
1 차 권선	$N_1 = \frac{V_{i\min} d_{\max}}{2fB_{peak} A_e}$
2 차 권선	$N_2 = N_1 \frac{V_o}{V_{i\min} d_{\max}}$
1차 인덕턴스	$L_p = \frac{\mu_o \mu_a N_1^2 A_e}{l_e}$
출력전류(실효치)	$I_{o(rms)} = \frac{P_o}{V_o} \sqrt{d}$

표 4 10층 설계의 예(Forward)

Layers	turns	70 μm
solder mask		50
tracks layer		70
insulation		200
primary de-mag	7	70
insulation		200
primary	7	70
insulation		200
secondary	3	70
insulation		200
secondary	2	70
insulation		200
secondary	2	70
insulation		200
secondary	3	70
insulation		200
primary	7	70
insulation		200
primary de-mag	7	70
insulation		200
tracks layer		70
solder mask		50
Total		2600

트랜스포머의 실제 층별 PCB 패턴을 나타낸 것이며, 그림 7은 스위칭 컨버터에서 입력필터, 트랜스포머, 초크 인덕터 등에 평면형 자성체를 적용한 PCB의 구성 예를 나타낸 그

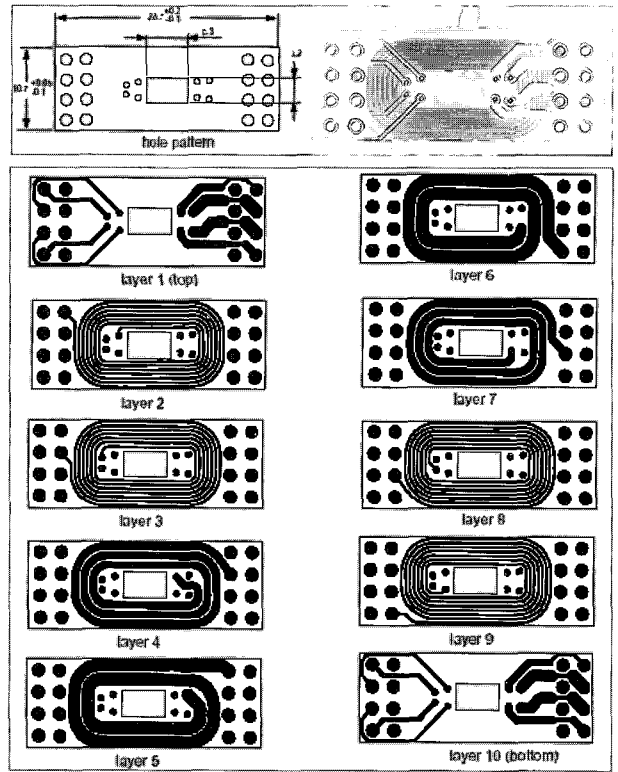


그림 6 설계과정에 따른 10층 PCB의 실제 구성

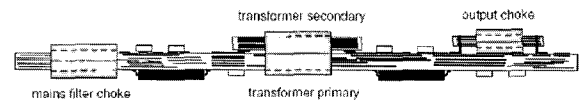


그림 7 평면형 자성체를 적용한 PCB 구성 예

림이다.

#### 4. 응용

평면 코어의 대표적인 응용분야로는 전력변환을 위한 트랜스포머를 들 수 있으며 자성체는 주로 페라이트를 사용한다. 그림은 노트북 PC의 LCD 백라이트용 CCFL을 구동하기 위한 평면형 트랜스포머를 고주파 인버터에 적용한 예를 나타낸 것이다.

그림 9는 Philips사에서 개발한 Frame & Bar 및 Planar E 코어를 사용한 LCD 모니터의 백라이트용 인버터의 평면 트랜스포머를 나타낸 그림이다.

최근 신광원의 일종으로 사회적 관심을 끌고 있는 외부전극 형광램프(EEFL) 또는 무전극 램프는 밀폐된 유리관에 가스를 봉입한 뒤 램프 외부에 전극을 형성함으로써 전극이 가스

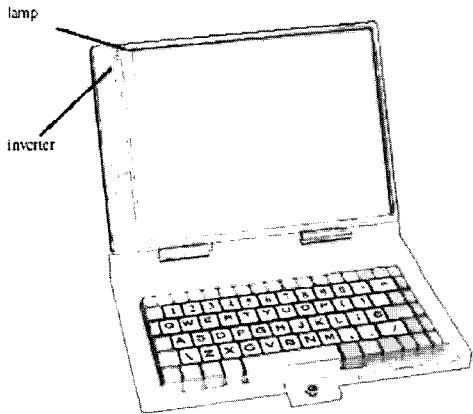


그림 8 Notebook PC 의 고주파 인버터에 적용한 예

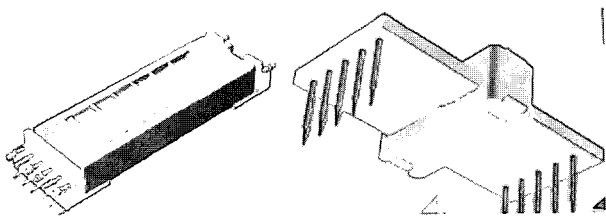


그림 9 Philips 사의 평면트랜스포머 (Frame & Bar Core)

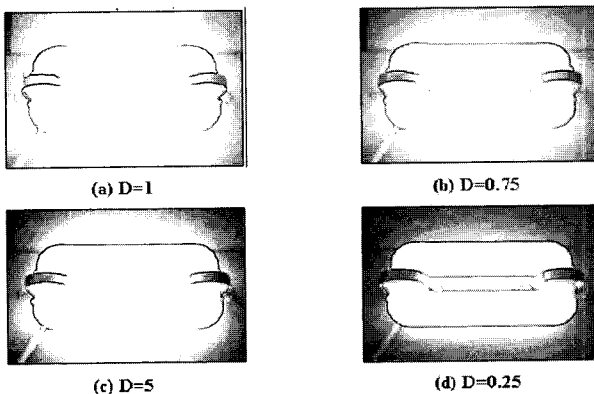
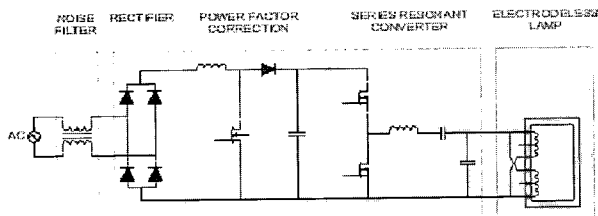


그림 10 무전극 램프 구동회로와 램프의 조도제어

방전공간에 노출되지 않고 방전동작으로 플라즈마(Plasma)를 발생하는 원리를 가지며, 단일 인버터로 다수의 램프를 구

표 5 평면코어의 응용

분류	응용분야
Component	Transformer, Filter choke
AC/DC Converter (Main-fed)	SMPS, Battery Charger (Mobile Phone, Notebook PC)
DC/DC Converter (Battery-fed)	Power Converter Module, Telecommunication Network, Electric car
AC/AC Converter (Main-fed)	CCFL, Induction heating, Welding
DC/AC Inverter (Battery-fed)	LCD Backlight (Mobile Phone, Notebook PC), Car electric devices

동할 수 있고 이론적으로 효율이 높고 장수명의 장점을 갖는다.

무전극 램프는 중대형의 TV, 모니터 등 LCD 표시장치를 비롯한 디스플레이 산업의 발전과 국가적 에너지 절약의 차원에서 향후 큰 시장을 형성할 것으로 전망된다.

그림 10은 평면형 자성부품의 적용이 요구되는 무전극 램프 구동용 인버터회로의 기본구성과 듀티비 제어에 따른 램프의 조도제어 현상을 나타낸 그림이다. 평면형 코어의 적용이 가능한 주요 응용분야를 표로 나타내면 다음의 표 5와 같다.

### 5. 결론

최근 노트북 컴퓨터, LCD 모니터 및 휴대용 정보단말기 등 백라이트용 램프를 적용한 정보산업(IT) 분야의 급속한 성장이 진행되고 있다. 특히 고주파 인버터로 동작하는 CCFL, EEFL 등의 형광램프는 플리커 현상이 없고 높은 발광효율을 갖는 장점이 있다.

배터리로 구동되는 노트북 컴퓨터의 경우는 배터리 전원의 50% 이상의 전력이 백라이트(BLU) 용으로 사용되는 것을 감안하면 컨버터의 에너지 변환효율은 매우 중요하며, 전력 밀도가 높은 평면 트랜스포머를 적용하는 것이 소형화와 효율향상에 좋은 대안이 된다.

각종 스위칭 전원에서 트랜스포머의 최적설계는 중요한 요소기술이라 할 수 있으며, 평면 트랜스포머를 적용하는 경우 설계가 간편해 지고 저손실의 실현이 가능하며, 고전압 및 대전류에 대한 내 특성이 우수한 장점을 갖는다.

평면 트랜스포머의 경우는 권선을 다층의 PCB 패턴으로 처리함으로써 동일한 체적을 갖는 기존의 권선형 트랜스포머에 비해 열저항을 약 50% 이상 저감할 수 있는 장점을 갖는다.

소형 경량으로서 특히 높이가 극히 낮은 트랜스포머, 인덕터 등의 자기부품이 필요한 경우에는 평면형 자성체의 적용이 바람직하며, 현재 Philips, Ferroxcube 등 일부 제조업체를 중심으로 상용화가 진행되고 있다.

향후 멀티미디어 산업의 성장과 정보통신기술의 비약적인 발전에 따라 소형 경량화의 장점을 갖는 평면형 자성재료의 설계 및 응용기술 또한 큰 발전이 있을 것으로 기대할 수 있다. ■

### 참고 문헌

- [1] S.A. Mulder, "Application note on the design of low profile high frequency transformers", Ferroxcube Components, 1990.
- [2] S.A. Mulder, "Loss formulas for power ferrites and their use in transformer design", Philips Components, 1994.
- [3] Th. Durbaum, M Albach, "Core losses in transformers with an arbitrary shape of the magnetizing current", 95 EPE Sevilla, 1995
- [4] Ferroxcube Components technical note, "25 Watt DC/DC converter using integrated Planar Magnetics.", 1996.
- [5] Keith Billings, "Switchmode Power Supply Handbook", 2nd ed., Mc Graw-Hill, 1998.
- [6] James L. Lau, K. Kit Sum, "Flat Transformer Power Converter for Low Voltage, High Current Applications", 1999.
- [7] S. Glozman and S. Ben-Yaakov, "Dynamic interaction of high frequency electronic ballasts and fluorescent lamps". IEEE Trans. on Ind. Appl. Vol. 37. 2001.

### 《 저 자 소 개 》



#### 김철진(金澈珍)

1980년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1991년~1995년 생산기술연구원, KETI 제어기기 연구실장. 1995년~현재 한라대 제어계측공학과 교수.