

Flat TR용 페라이트 코아의 고주파 동작 특성

한세원, 조한구, 류동욱, 최광보*

한국전기연구원 신소재응용연구그룹, (주)창성*

Study on operating characteristics of Ferrite cores for Flat TR in high frequency

Han Se-Won, Cho Han-Goo, Choi Kwang-Bo*

Advanced Electrical Materials Group KERI, Chang Sung Co.*

Abstract

In contrast to a conventional transformer, the flat transformer is made using a number of small ferrite cores. Two cores for transformer and one core for inductor, which composed one module. Many modules can be connected together to form a flat matrix transformer. This structural arrangement eliminates the single hot spot problem in conventional transformers and permits high current density pertains at high frequency. In this study, the ferrite magnetic cores of Mn-Zn system for the Flat transformer were manufactured and the electrical and magnetic characteristics of its tested. The power loss of sample FO2(Mn-Zn ferrite) sintered at 1350°C was 350kW/m² in test conditions of 250kHz, 200mT and 100°C, which showed the good power loss property in high frequency. The power loss of FO2 samples has been studied as a function of magnetic flux density and frequency. Steinmetz exponent was 2.82 at 250kHz and 2.73 at 500kHz. These results illustrated the switching of power loss mechanism in ferrite core from hysteresis losses to eddy current losses or others.

Key Words : Mn-Zn Ferrite Core, The Flat Transformer, High Frequency, Power Loss, Hysteresis Loss, Eddy Current Loss, SMPS

1. 서론

시스템의 크럭 주파수 증대에 따른 대전류(수십A급), 저전압(수V급), 고응답(2 μ s이하), 집적화(30~100W/in³) 및 고효율화된 고밀도형 전원은 컴퓨터, 통신, 가전기기 및 자동화 분야, 산업, 수송, 우주, 군사용 등의 전원 공급 장치의 핵심 부품으로 급격히 성장하고 있다. 최근 전원장치의 고집적화, 고효율화 및 고기능화를 통한 소형화 기술의 수요가 꾸준히 증가하고 있고 선진 외국의 경우 Power Packaging 기술과 Low Profile Magnetic 설계 기술을 접목한 고밀도 전원용 고주파 Transformer 기술 개발이 핵심 기술로 부상되고 있다.

SMPS(Switching Mode Power Supply)의 구성 요소 중에서 가장 큰 부피를 차지하고 있는 것은 변압기이며, SMPS의 소형화를 실현하기 위해서는 변압기

의 부피를 최소화하는 것이 필요하다. 변압기의 소형화는 스위칭 주파수를 증가시킴으로 가능하지만, 소형화에 따른 방열 면적이 감소하여 손실이 증가하게 되며 이 손실량은 스위칭 주파수의 증가에 따라 비례적으로 증가하게 된다. FLAT 변압기는 페라이트 코아를 매트릭스로 설계 적용하여 주권선의 권선수를 줄여서 제작하기 때문에 매우 낮은 누설 인덕턴스를 가지게 되고 탁월한 고주파 응답특성을 나타낸다. 자성 코아는 어느 정도의 동작 주파수까지 증가시키면 이에 반비례하여 크기가 감소하여 소형 및 경량화가 가능하다. 현재 연자성체의 고주파화는 약 300kHz 영역까지 실용화 단계에 접어들고 있으며 이를 더 높이기 위해서는 저손실형 페라이트 코아의 개발이 필요하다. Mn-Zn계 페라이트 코아는 높은 포화 자속 밀도와 비저항을 가지고 있어 고주파 SMPS용 자심으로 각광받고 있다.

본 연구에서는 대전류 출력형 Flat Transform으로 적용이 가능한 페라이트 코어를 제조하여 100kHz 이상의 고주파에서의 동작 특성을 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

표 1. 페라이트 코어 제조를 위한 기본 조성.

Compounds	[ZnO-MnO-Fe ₂ O ₃]-SiO ₂ -X	
Calcining	850 °C	
Homogenization	Attrition Milling(50% spinel)	
Pressing	Density 4.8 kg/m ³	
Sintering	1350 °C(grain size ~5µm)	
Samples	F01	X : 0.24wt%
	F02	X : 0.50wt%
	F02	X : 1.0wt%

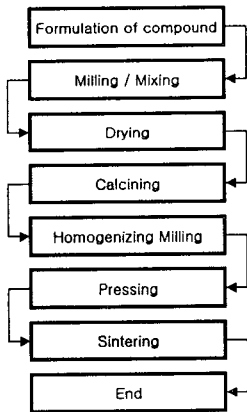


그림 1. Flat TR용 페라이트 코어 제조과정.

Flat TR용 페라이트를 제조하기 위한 기본 조성은 표 1과 같다. 일반적으로 Mn-Zn계 페라이트로 Fe₂O₃ 외의 첨가물을 사용하여 소결성과 입자크기 및 전기적 특성을 제어하였다. 제조방법은 그림 1과 같은 전형적인 성형 후 소결하는 공정을 채택하여 제조하였으며, 이때 최대 소결온도는 성형밀도 및 입자의 평균크기 등이 최적의 상태가 얻어지는 1350°C로 하여 제조하였다.

제조된 페라이트 코어 시편의 미세조직은 SEM, XRD 측정 장비를 사용하여 소결된 시편의 평균 입자 크기와 결정상의 상태 등을 분석하였다. 기본적인 자성 특성은 B-H 측정 장비를 이용하여 투자율 및 포화 지속 밀도 등을 측정하였다. 주파수에 따른

전기적, 자기적 특성은 LCR 측정 시스템을 사용하여 상용 주파수에서 최대 수MHz까지 온도를 변화시키면서 특성을 비교 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

표 2는 페라이트 시편의 고주파 및 온도에 따른 자성 특성을 비교한 것이다. 시편의 차이는 첨가물의 조성 변화에 의한 것이다. 여기서는 포화 자속 밀도와 초기 투자율 및 손실 특성이 안정된 FO2 시리즈를 최적의 시편으로 선택하여 검토하였다. 250 kHz, 200mT에서 FO2 시편의 경우 100°C에서 약 350 kW/m²의 양호한 손실 특성을 나타내었다.

표 2. Mn-Zn계 페라이트 코어의 자성 특성.

Properties	Test Conditions			Values		
	Freq. kHz	Flux Density mT	Temperature °C	F01	F02	F03
Initial Permeability, µi	10	0.1	25	2500	2700	3000
Power Loss, P _v [kW/m ²]	250	200	25	600	550	550
			100	440	350	350
			25	510	510	490
Saturation Flux Density, B _s [mT]	1	H=1000A/m	25	510	510	490
			100	400	400	360
			25	60	120	100
Remanence Flux Density, B _r [mT]	1	H=1000A/m	25	40	70	90
			100	40	70	90
			25	5.5	13.5	24
Corecivity, H _c [A/m]	1	H=1000A/m	25	5.5	13.5	24
			100	-	8.9	10

페라이트 코어는 동작 온도의 범위가 넓을수록 유리하다. 그러나 손실에 의한 발열로 인해 최적의 동작 온도, 즉 낮은 동작 온도에서 손실이 최소화되는 특성을 설정하게 된다. 그림 2는 사용 주파수를 250 kHz로 하고 온도에 따른 코어 손실 특성을 측정할 결과이다. FO2-1에서 FO2-3로 가면서 코어 손실이 최소화되는 동작 온도가 낮아진다. 일반적으로 저발열 설계를 하기 위해서는 100°C이하에서 최소 손실을 갖는 코어를 선택하는 것이 유리하다. FO2-2의 경우 동작 온도가 약 80°C정도에서 가장 낮은 손실값을 가지고 있어 적절한 조성을 판단된다.

일반적으로 코어의 손실(P_v)은 $P_v = k \cdot B^x \cdot f^y$ 의 관계를 갖는다. 여기서 k는 관계상수, x는 Steinmetz 상수, y는 주파수 상수를 나타낸다. 코어의 손실 특성은 주로 히스테리시스손과 와전류손에 의해 주로 영향을 받게 되는데 히스테리시스손이 크게 작용하는 경우 Steinmetz 상수는 거의 3승에 가까운 값을 갖는다. 그림 3은 주파수를 높이는 경우 자속 밀도에 따른 손실의 변화를 시험한 결과이다.

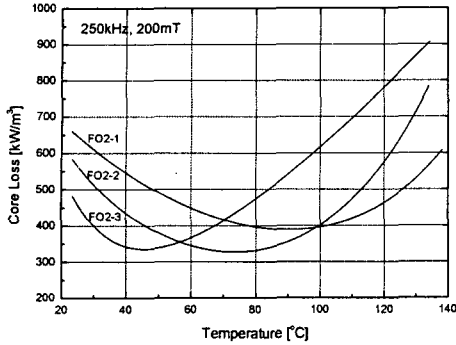


그림 2. 동작 온도에 따른 손실 특성.

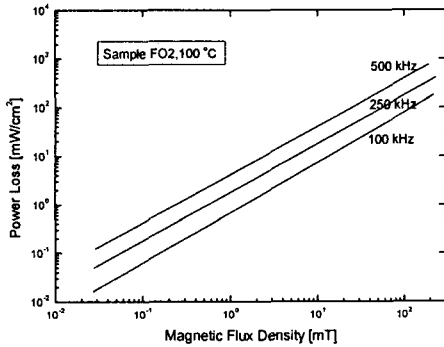


그림 3. 자속밀도에 따른 손실의 주파수 동작 특성.

표 3은 주파수에 따른 Steinmetz 상수의 변화를 비교 정리한 것이다. 100kHz에서는 x값이 2.95로 거의 3에 가깝지만 동작 주파수가 250kHz, 500kHz로 높아지면서 그값이 2.82, 2.73으로 낮아졌다. 이러한 현상은 고주파화 되면서 손실의 주된 메카니즘이 히스테리시스손(hysteresis loss)에서 와전류손(Eddy current loss) 등의 또 다른 손실로 전환되는 것을 설명한다.

표 3. 주파수에 따른 Steinmetz 상수(x) 변화.

Frequency	Steinmetz Exponent [x]	Power Loss Mechanism Change : Hysteresis Loss to Eddy Current Loss or Residual Loss
100 kHz	2.95	
250 kHz	2.82	
500 kHz	2.73	

한편 30mT 자속 밀도에서 동작 온도에 따른 주파수 상수(y)의 변화를 분석한 결과 표 4와 같이 나타났다. 일반적으로 저주파 영역에서 손실은 선형적인

관계를 갖는다. 하지만 수백kHz의 고주파 영역이 되면 선형성을 벗어나 지수 함수적으로 증가하게 된다. 본 실험의 경우 250kHz 이상에서 이러한 현상이 확인되었다. 이러한 선형적인 관계는 주로 히스테리시스손($P_h \propto f$)이 작용하는 주파수 구간이고 와전류손($P_e \propto f^2$)이 작용하는 경우는 선형성을 벗어나게 된다. 표 4에서 보듯이 동작 온도가 증가하면서 주파수 상수가 변화하는 것은 전환 주파수(onset frequency)가 빨라지기 때문으로 이것은 자성 코아의 투자율의 분산(dissipation) 주파수와 일치하는 현상이다.

표 4. 주파수에 따른 주파수 상수(y) 변화.

Frequency	Frequency Exponent [y]	Power Loss Mechanism : Eddy Current Loss (30mT)
20 °C	1.12	
70 °C	1.25	
100 °C	1.25	

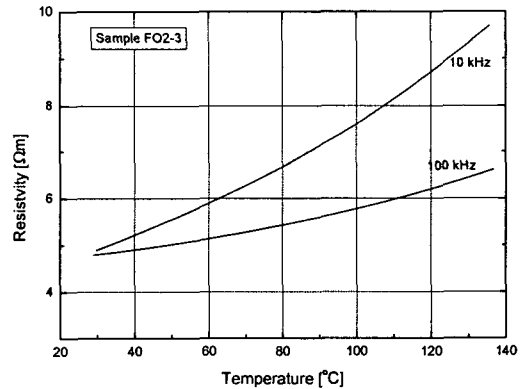


그림 4. 동작 주파수를 달리하는 경우 사용 온도에 따른 저항율 변화.

그림 4는 동작 주파수를 달리하는 경우 사용 온도에 따른 저항율의 변화를 시험한 결과이다. 10kHz의 낮은 주파수의 경우 온도에 따른 저항율의 변화는 큰 반면 상대적으로 높은 100kHz의 주파수에서는 온도에 따른 저항율의 변화량이 현저히 줄었다. 이것은 전체 저항은 절연성의 입계(grain boundary)에 의해 결정되고 높은 비저항을 갖는 입계가 주파수가 높아지면서 용량성 특성(capacitive properties)으로 인해 단락되기 때문으로 알려져 있다. 따라서 와전류

손은 코아의 비저항에 반비례하는 특성이 있어 주파수가 높아지면서 코아의 손실이 와전류손에 의한 영향이 크게 작용하는 것을 보여준다.

4. 결 론

대전류 출력형 Flat Transform으로 적용이 가능한 페라이트 코아를 제조하여 100kHz이상의 고주파에서의 동작 특성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1350℃에서 소성된 시편 FO₂(x=0.5wt%)의 경우 250kHz, 200mT, 100℃의 동작 조건에서 약 350kW/m²의 우수한 손실 특성을 얻었다.
- 2) 주파수에 따른 Steinmetz 상수는 100kHz에서 2.95로 거의 3에 가깝지만 동작 주파수가 250kHz, 500kHz로 높아지면서 그값이 2.82, 2.73으로 낮아 고주파화 되면서 손실의 주된 메카니즘이 히스테리시스손에서 와전류손으로 전환되는 현상이 확인되었다.
- 3) 동작 온도가 증가하면서 주파수 상수가 변화하는 것은 전환 주파수(onset frequency)가 빨라지기 때문으로 이것은 자성 코아의 투자율의 분산(dissipation) 주파수와 일치하였다.

참고 문헌

- [1] L. L. James and K. K. Sum, "Flat Transformer Technology", Internet materials, 2001.
- [2] 한세원, 조한구, "대전류 출력형 Flat Transformer 설계 및 해석기술", 2002 한국전기전자재료학회 춘계 학술대회 논문지 pp15~17, 2002.
- [3] Flat Matrix Transformer, Edwrad Herbert, US Patent 4,665,357, 1987.
- [4] SMPS 기술 현황, SMPS 기술 조사 위원회, 대한 전기학회, 기술조사보고, 제11호, 1997.
- [5] High Frequency Switching Power Supplier : Theory and Design, George Chrysis, McGRAW HILL BOOK, 1984 old electrical insulation", 1984.
- [6] J. J. Suh, B. M. Song, "Temperature dependence of power loss on Mn-Zn Ferrite at high frequency, IEEE Transactions of magnetics, 36(5), pp3402~3404, 2000.
- [7] 한세원, 조한구 외, "Flat TR용 페라이트 코아의 제조와 동작 특성 안정화 연구 ", 2003 한국전기전자재료학회 춘계 학술대회 논문지 pp23~26,

2003.

- [8] W. H Jeong et al, "Analysis of Power Losses in Mn-Zn Ferrites", Jpn. J. Appl. Phys. 41(5A), pp2912-2915, 2002.