

SMPS용 Mn-Zn 페라이트 코어의 자기손실 특성

권태석 · 김성수

충북대학교 공과대학 재료공학과
충북 청주시 흥덕구 개신동 산 48번지, 361-763

(1999년 1월 30일 받음, 1999년 5월 10일 최종수정본 받음)

SiO₂-CaO-V₂O₅ 3원계 첨가물을 함유한 Mn-Zn 페라이트 저손실재에서 자기손실의 주파수 및 온도 의존성에 대해 조사하고 주된 자기손실기구에 대해 고찰하였다. 연쇄고온합성법에 의해 MnO:ZnO:Fe₂O₃ = 36:11:53 mol % 조성의 페라이트를 제조하였다. 자기손실의 주파수 의존 결과로부터 저주파에서는 자기이력손실이 고주파에서는 와전류손실이 지배적임을 제시하였고, 고저항 첨가제에 의해 비저항이 증가할수록 자기이력손실이 감소하였다. 순수 Mn-Zn 페라이트의 경우 자기 손실은 온도 증가에 따라 증가하였으나, 입계저항제가 첨가된 시편의 경우 와전류손실의 감소로 약 40 °C에서 자기손실의 최소치가 나타났다.

I. 서 론

Mn-Zn 페라이트는 스피넬 구조를 갖는 연자성 재료로서 다른 페라이트에 비해 보자력이 작고 초기투자율과 포화자화 값이 커 고투자율이 요구되는 인덕터 및 트랜스포머의 자심재, 자기헤드, 필터코어 등으로 다양하게 응용되고 있다. 특히 반도체 산업의 발전에 따라 SMPS (Switched-Mode Power Supply)라는 새로운 응용분야가 열리면서 이들 기기의 소형화와 경량화가 요구되고, 이에 부응하여 고주파 대역에서 자기적 특성이 우수한 Mn-Zn 페라이트 코어의 개발이 요구되고 있다 [1, 2].

SMPS용 페라이트에서 요구되는 가장 중요한 특성은 동작 조건에서 낮은 코어 손실이다. 전력변환기에서 코어손실은 동전손실과 함께 열을 발생시켜 코어의 동작온도를 높이고 포화지속밀도를 감소시킨다. 따라서 동작온도에서 코어손실을 최소화하는 것이 무엇보다 중요하다.

자성체의 자기손실은 자기이력손실, 와전류손실, 잔류손실로 구분된다. 자기이력손실은 자화, 탈자화되는 과정에서 자벽(domain wall)이 계재물이나 결함과의 상호작용에 의해 비가역적 변화를 함으로써 발생하는 손실이다. 이 손실을 감소시키기 위해서는 자기이방성, 자기응력을 최소화시켜야 하며 각종 결함이나 응력을 없애는 것이 중요하다. 잔류손실은 주파수에 따른 자기완화와 자기공명에 의한 손실을 말한다. 즉 주파수가 높아질수록 자벽의 이동과 자화의 회전이 원활하지 못함에 따라 일어나는 손실이다.

와전류손실은 코어에 교류자장이 인가될 때 반대방향의 유기전압에 의해 발생하는 와전류에 의한 손실이다. 와전

류손실은 주파수의 제곱에 비례하고 전기저항에 반비례하기 때문에, 동작주파수가 상향 추세에 있는 SMPS용 코어에서 가장 중요시되는 손실기구이다. Mn-Zn 페라이트의 경우 고유의 전기저항이 작기 때문에 와전류 손실의 감소 방법으로 각종 첨가제를 사용한다. 가장 대표적인 첨가제는 SiO₂와 CaO로서 Mn-Zn 페라이트의 입계에 편석되어 고저항층을 형성한다 [3]. SnO₂와 TiO₂의 미량첨가도 와전류손실 감소에 효과적인 것으로 알려져 있다 [4]. Sn⁴⁺, Ti⁴⁺ 이온은 Fe³⁺ 격자 위치에 고용되어 Fe²⁺ 이온과 Fe³⁺ 이온 사이의 전자 이동을 억제시키기 때문에 전기비저항을 증대시키고 와전류손실을 감소시킨다. 같은 목적으로 V₂O₅, Ta₂O₅, MoO₃ 등의 첨가제 효과가 조사된 바 있다 [5-8].

동작주파수가 자기공명주파수보다 낮고 인가자장이 큰 경우, 자기손실은 주로 자기이력손실과 와전류손실이 차지한다. Mn-Zn 페라이트 코어의 경우 이 2가지 손실기구가 혼재하는 까닭에, 자기손실을 낮추기 위한 재료설계 및 공정제어를 체계적으로 하기 위해서는 사용주파수 대역과 사용온도에 따라 주된 손실기구를 규명하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 입계 저항제로 잘 알려진 SiO₂, CaO, V₂O₅를 첨가시킨 Mn-Zn 페라이트 코어에서 자기손실의 주파수 및 온도 의존성에 대해 조사하였다. 자기공명에 의한 잔류손실의 유무를 알아보기 위해 초기투자율의 주파수 분산특성을 조사하였으며, 코어손실의 주파수 외삽법 [7]에 의해 자기이력손실과 와전류손실을 분리하고 주파수에 따른 주된 손실기구에 대해 고찰하였다.

II. 실험방법

시편의 조성은 저손실재 조성으로 알려진 MnO: ZnO:Fe₂O₃의 비율이 36:11:53 mol%으로 선정하였다 [9]. 원료의 혼합은 폴리에틸렌 용기에 분말, 증류수, steel ball의 비율을 100:72:200 비로 장입하여 볼 밀링에 의해 행하였다. 비중 차이로 인한 불균일 침전을 방지하기 위하여 교반조건을 행한 후, 연쇄고온합성법(Self-Propagation High-Temperature Synthesis)에 의해 페라이트 분말을 제조하였다 [10].

고저항 첨가제로 SiO₂, CaO, V₂O₅를 선정하였으며 합성된 Mn-Zn 페라이트 분말과 혼합한 후 attrition milling에 의해 평균입도가 약 1.1 μm 정도 되도록 분쇄한 후 건조하였다. 건조된 분말로부터 약 300 μm 크기의 granule을 제조하였으며, 조립화시킨 합성분말을 내경, 외경이 각각 18 mm, 25 mm인 토로이드형 몰드에 충전시킨 후 green density가 3.0 g/cm³인 성형체를 제조하였다. 소결은 1350 °C에서 5 시간 동안 행하였고, 이때 승온 및 냉각속도는 각각 4 °C/min, 1.6 °C/min이었다. 승온부터 소결(1350 °C) 전반부 3시간까지는 75 % 산소를 흘려주었으며, 이후 냉각까지는 100 % 질소로 교체하였다.

소결한 시편의 전기비저항은 2 단자법으로 측정하였으며, 시편의 자기적 특성으로는 초기투자율, 자기손실을 측정하였다. 초투자율은 임피던스 분석기를 사용하여 인가자장 0.8 A/m, 주파수 10 kHz에서 인덕턴스를 측정하여 구하였다. 교류자기이력손실은 Ryowa사의 MMS-4000 B-H Analyzer를 사용하여 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

본 실험에 사용된 시편은 3 종류이었다. 첫째 시편은 첨가물이 들어있지 않은 순수 Mn-Zn 페라이트로서 전술한 조성을 갖는다. 둘째 시편은 SiO₂-CaO 2원계 첨가물을 함유한 시편으로 첨가량은 SiO₂=0.002 wt%, CaO=0.06 wt%이었다. 세번째 시편은 SiO₂-CaO-V₂O₅ 3원계 첨가물을 함유한 시편으로 각 첨가물의 함량은 SiO₂=0.002 wt%, CaO=0.06 wt%, V₂O₅=0.02 wt%이었다.

Table I은 이들 시편의 미세조직적 특징과 전기적, 자기적 성질을 나타낸 것이다. 소결밀도는 약 4.8 g/cm³으로서 시편에 따라 큰 차이가 없었다. 평균입자크기는 첨가물의 양이 커짐에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 비저항과 자기손실은 첨가제에 따라 매우 현격한 차이를 나타

Table I. Structures and properties of Mn-Zn ferrites with additives indicated

SiO ₂ (wt%)	0	0.002	0.002
CaCO ₃ (wt%)	0	0.06	0.06
V ₂ O ₅ (wt%)	0	0	0.02
Sintered density (g/cm ³)	4.80	4.83	4.84
Avg ^o grain size (mm)	30	28	25
DC resistivity (Ω · cm)	230	780	1090
Core loss (kW/m ³)	1300	718	677

100 kHz, 200 mT and 40 °C

내었다. 순수 Mn-Zn 페라이트 소결체의 경우 비저항은 230 Ω · cm로 매우 낮은 값을 보였으나 SiO₂-CaO-V₂O₅가 첨가된 시편의 경우 1090 Ω · cm로 증가하였다. 첨가물이 비저항 증가에 매우 효과적임을 알 수 있다. 반면 자기손실은 주파수 100 kHz, 인가자장 200 mT, 온도 40 °C에서 1300 kW/m³로부터 677 kW/m³로 감소하고 있다.

Fig. 1은 1350 °C에서 소결한 시편에 대한 투자율의 주파수 분산특성을 나타낸 것이다. 모든 시편의 경우 특정 주파수 이하에서는 일정한 투자율을 보이다가 이 주파수를 넘어서면서 급격히 감소한다. 따라서 자기공명에 의한 잔류손실은 순수 시편의 경우 300 kHz, 3원계 첨가제 시편의 경우에는 700 kHz 이상의 주파수에서 나타날 것으로 보인다.

일반적으로 코어의 자기손실 (P_c)은 다음 식 (1)에서와 같이 자기이력손실 (P_h), 와전류손실 (P_e), 잔류손실 (P_r), 3 가지로 구분된다.

$$P_c = P_h + P_e + P_r \tag{1}$$

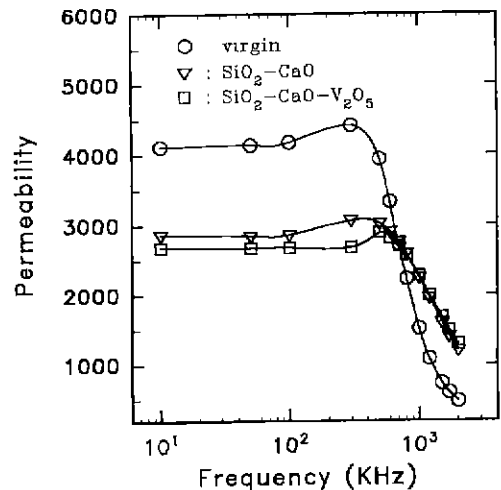


Fig. 1. Frequency dependence of initial permeability of Mn-Zn ferrites with the additives

그러나 작동주파수가 공명주파수보다 낮고 인가자장이 클 경우, 자기손실은 주로 자기이력손실과 와전류손실이 차지한다. 자기이력손실과 와전류손실은 각각 (2) 식과 (3) 식으로 표시된다.

$$P_h = W_h f \tag{2}$$

$$P_e = C d^2 f^2 B_m^2 / \rho \tag{3}$$

여기서 W_h 는 B-H 자기이력곡선의 면적, f 는 주파수, d 는 시료의 치수, B_m 은 최대자속밀도, ρ 는 전기비저항, C 는 상수이다.

Fig. 2는 주파수에 따른 단위 cycle 당 자기손실 (P_c/f)의 변화를 나타낸 것으로 P_c/f 는 주파수에 따라 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 자기손실의 주파수 의존성은 (2)와 (3)의 이론식에 잘 일치하고 있다. Otsuki 등 [7]이 제시한 방법에 의해 P_c/f 값을 $f=0$ 로 외삽함으로써 W_h 를 구할 수 있고, 직선의 기울기로부터 전기비저항의 크기를 예측할 수 있다. 첨가제를 함유한 시편에서와 같이 전기비저항이 커질수록 직선의 기울기는 감소한다. 이렇게 해서 구한 W_h 를 첨가물의 종류에 따라 Table II에 나타내었다. 첨가물이 들어간 시편에서 W_h 가 약간 커지는 경향을 나타내었다.

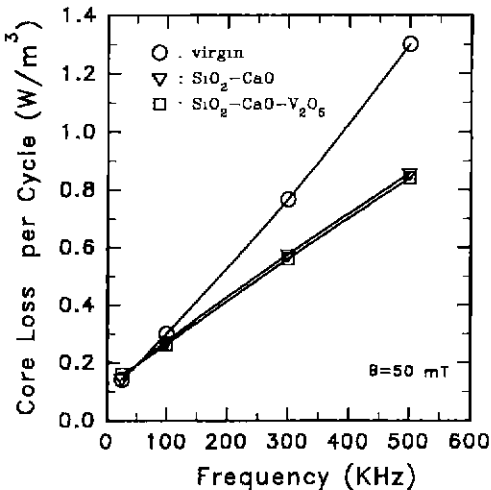


Fig. 2. Frequency dependence of core loss per cycle (P_c/f) of Mn-Zn ferrites with the additives.

Table II. Hysteresis coefficient estimated in the specimens with the additives

	virgin	SiO ₂ -CaO	SiO ₂ -CaO-V ₂ O ₅
W_h (W/m ³)	0.09	0.11	0.12

Fig. 3은 첨가물의 종류에 따른 주파수와 손실과의 관계를 나타낸 것이다. 전체 손실과 와전류손실은 순수 시편보다 첨가물이 첨가된 경우 더 낮은 값을 나타낸 반면, 자기이력손실은 순수 시편이 더 낮은 값을 나타냈다. 첨가물에 의한 와전류손실의 감소는 비저항의 증가 때문이며, 자기이력손실의 증가는 입자크기의 감소 및 절연막의 두께 증가에 기인한 입계응력 때문으로 생각되어진다[9, 11].

Fig. 3(d)는 주파수 증가에 따른 전체 손실 중의 와전류손실이 차지하는 비율을 나타낸 것으로 주파수의 증가에 따라 와전류손실이 차지하는 부분이 급격하게 증가함을 보여주고 있다. 또한 첨가물이 들어가면 와전류손실의 비율이 감소함을 알 수 있다. 500 kHz에서 원료분말의 경우 와전류손실이 93%를 차지하는데 반해, 3원계 첨가물을 첨가하였을 경우에는 86%로 줄어들고 있다. 이와 같은 와전류손실 비율의 감소는 첨가물의 입계편석에 따른 전기비저항의 증가에 기인한다.

와전류손실과 자기이력손실이 같아지는 지점, 즉 $P_e/P_c = 50\%$ 인 주파수를 기준으로 주된 손실기구를 예측할 수 있다. $P_e/P_c = 50\%$ 인 주파수가 순수 시편의 경우 60 kHz인데 반해 3원계 첨가물인 경우에는 100 kHz로 상승하고 있다. 이것은 SiO₂-CaO-V₂O₅의 첨가시 100 kHz

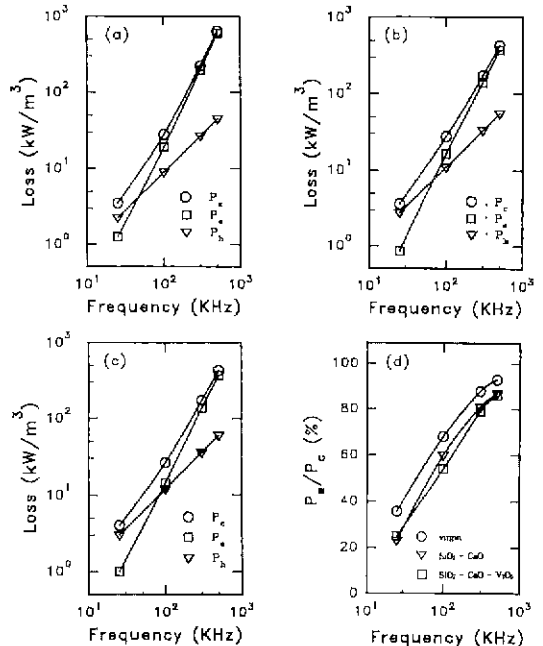


Fig. 3. Frequency dependence of core loss (P_c), eddy current loss (P_e) hysteresis loss (P_h) and P_e/P_c of Mn-Zn ferrites : (a) virgin, (b) SiO₂-CaO, (c) SiO₂-CaO-V₂O₅, (d) P_e/P_c .

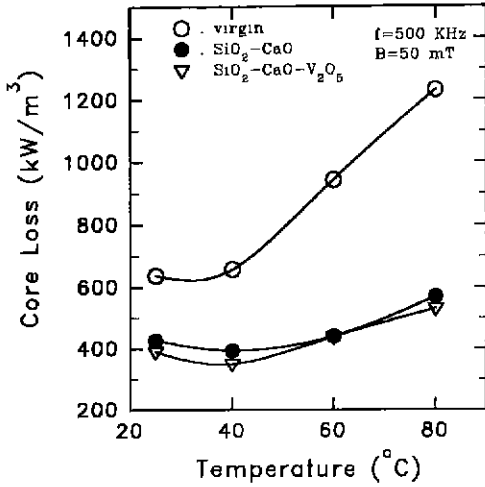


Fig. 4. Temperature dependence of core loss (at 50 mT, 500 kHz) of Mn-Zn ferrites with the additives.

이하의 범위에서는 자기이력손실이 지배적이고, 그 이상의 주파수에서는 와전류손실이 지배적이라는 것을 의미한다. 따라서 100 kHz 이하의 주파수에서는 자기이력손실을 줄이는 방법이 모색되어야 하고, 100 kHz 이상의 주파수에서는 와전류손실을 줄이는 것이 전체 손실을 줄이는 효과적인 방법이라 할 수 있다.

자기손실의 온도의존성을 첨가물의 종류에 따라 Fig. 4에 나타내었다. 첨가물이 없는 경우 자기손실은 온도에 따라 계속적으로 증가하는 반면, 첨가물이 들어간 시편은 40 °C에서 최저치를 나타내고 있다. 이 부극대 온도는 자기이방성과 자왜상수가 0이 되는 SPM(Secondary Permeability Maximum) 온도와 일치하고 Fe²⁺ 농도가 감소할수록 증가하는 것으로 알려져 있다 [12]. 일반적으로 자기이력손실은 SPM 온도에서 최소값을 갖고 이 온도에서 벗어나면 급증한다. 반면, 와전류손실은 비저항에 의존하는 함수이므로 온도 증가에 따라 계속적으로 증가한다. 따라서 순수 시편의 경우 Fig. 4에서와 같이 온도 증가에 따라 자기손실이 계속 증가한 것은 와전류손실이 주된 손실기구가기 때문이다. 첨가물이 들어간 시편의 경우 40 °C 부근에서 부극대가 생긴 결과는 첨가물에 의해 와전류손실이 감소하고 아울러 Fe²⁺ 농도가 감소했기 때문으로 사려된다. 부극대 온도를 40 °C 이상으로 높이기 위해서는 원료분말 조성에서 철과잉량을 감소시키거나 소결시 산소분압을 증가시켜 Fe²⁺ 농도를 더욱 줄일 필요가 있다

IV. 결 론

임계 저항층을 형성하는 첨가물 (SiO₂, CaO, V₂O₅)을 함유한 저손실재 조성 (MnO:ZnO:Fe₂O₃ = 36:11:53 mol%)의 Mn-Zn 페라이트 코어에서 자기손실의 주파수 및 온도의존 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 첨가물 (SiO₂, CaO, V₂O₅)은 와전류 손실을 크게 낮추었으나 자기이력손실 감소에는 크게 효과적이지 못하다.
2. 임계 주파수를 기준으로 저주파에서는 자기이력손실이, 고주파에서는 와전류손실이 주된 손실 기구이었다.
3. 고저항 첨가제에 의해 비저항이 증가할수록 와전류 손실의 감소로 임계주파수는 증가하였다.
4. 순수 Mn-Zn 페라이트 코어의 경우 자기손실은 온도 증가에 따라 증가하였으나, SiO₂, CaO, V₂O₅가 첨가된 시편에서는 약 40 °C에서 자기손실이 최소치를 가졌다. 이는 비저항 증가로 인한 와전류손실의 감소로 주된 손실 기구가 자기이력손실로 바뀌기 때문으로 사려되었다.

감사의 글

본 논문은 1998년도 정보통신부 정보통신 우수학교 지원사업에 의해서 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] P. I. Slick, Ferrite for Non-microwave Applications in Ferromagnetic Materials, Vol. 2, edited by E. P. Wohlfarth, North-Holland Pub. Co., New York (1980).
- [2] E. C. Snelling, Soft Ferrites, Properties and Applications, 2nd Edition, Butterworth Co. Ltd., London (1988).
- [3] T. Akashi, Trans. Jap. Inst. Metals, 2, 171 (1961).
- [4] T. G. Stjntjes, Philips Res. Rept., 25, 95 (1970).
- [5] A. Znidarsic, M. Lumpel, G. Drazic and M. Drogenik, Proc. of The 6th Inter. Conf. on Ferrites, 333 (1992).
- [6] K. Inuno, Proc. of The 6th Inter. Conf. on Ferrites, 1173 (1992).
- [7] E. Otsuki, S. Yamada, T. Otsuka, K. Shoji and T. Sato, J. Appl. Phys., 69, 5942 (1991).
- [8] K. S. Lakshmi, Ph. D. Thesis. Andhra University, India (1997).
- [9] A. Goldman, Modern Ferrite Technology, Van Nostrand Reinhold, New York (1990)
- [10] T. S. Kwon and S. S. Kim, J. Kor. Mag. Soc., 5, 197 (1995).
- [11] E. Otsuki, Proc. of The 6th Inter. Conf. on Ferrites, 59 (1992).
- [12] T. Imura, J. Amer. Cer. Soc., 59, 458 (1976).

Magnetic Loss of Mn-Zn Ferrite Cores Used for SMPS

Tae-Seok Kwon and Sung-Soo Kim

Department of Materials Engineering Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

(Received 30 January, in final form 10 May 1999)

Frequency and temperature dependence of magnetic loss has been investigated in Mn-Zn ferrites containing the resistive ternary compounds of SiO_2 -CaO- V_2O_5 . The Mn-Zn ferrite with the composition of $\text{MnO} : \text{ZnO} : \text{Fe}_2\text{O}_3 = 36 : 11 : 53$ (by mol %) are prepared by self-propagating high-temperature synthesis. From the results of frequency dependence of core loss, it has been found that the hysteresis loss is dominant at low frequency and the eddy current loss becomes more dominant as the frequency increases. With the addition of resistive compound, the frequency region where the hysteresis loss is dominant becomes wide. The core-loss minimum occurs at about 40 °C in the specimens with the additives because of the reduction in eddy current loss.