

Ni-Cu-Zn 페라이트의 損失과 磁性 特性

大槻悦夫 · *金正秀

三和電子工業(株) 新素材研究所

Power Loss and Electro-Magnetic Characteristics of Ni-Cu-Zn Ferrites

E. Otsuki and *Jeong-Su Kim

R & D Center, SAMWHA electronics corporation

요 약

NiO, ZnO 조성이 다른 Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 분석을 실시했다. 손실, Ph는 측정 온도의 상승에 따라 감소해 100-120°C 근처에서 일정한 값을 얻었다. Pcv의 주파수의존성은 $P_{cv} \sim f^n$ 로 표현될 수 있는데, n은 1 MHz까지 일정했다. Pcv는 ZnO/NiO비가 증가함에 따라 감소한다. Pcv를 Hysteresis loss(Ph) 및 잔류손실(Pcv-Ph)로 분리했다. Pcv의 온도특성 및 조성 의존성은 Ph에 기인하지만, Pcv-Ph는 온도 및 조성에 의존하지 않는다. Ph와 초투자율, μ_i 의 온도 및 조성 의존성을 분석해, 다음과 같은 식이 성립된다는 것을 알 수 있었다.

$$\mu_i \mu_0 = I_s^2 / (K_1 + b \sigma_0 \lambda_s)$$

$$Wh = 13.5(I_s^2 / \mu_i \mu_0)$$

여기서, μ_0 은 진공의 투자율, I_s 는 포화자화, K_1 는 이방성상수, σ_0 는 내부 불균일 응력, λ_s 는 자기이방성 상수, b는 미지의 상수, Wh는 1주기 당의 히스테리시스 손실($Ph=Wh \times f$)이다. Ni-Cu-Zn 페라이트의 Steinmetz 상수 $m=1.64\sim 2.2$ 는 Mn-Zn 페라이트보다는 적은데, 이는 양 재료 간의 손실 메커니즘의 차가 있음을 암시하는 것이다.

주제어 : Ni-Zn 페라이트, 히스테리시스 손실, 자기이방성 상수, 스테인메츠 상수

Abstract

The power loss analysis was carried out for Ni-Cu-Zn ferrite samples with different content of NiO and ZnO. The power loss, Pcv decreases monotonically with increasing temperature and attains to a certain value at around 100-120 degrees Celsius. The frequency dependence of Pcv can be explained by $P_{cv} \sim f^n$, and n is independent of the frequency, f up to 1 MHz. The Pcv decreases with an increase in ZnO/NiO. The Pcv was separated to hysteresis loss(Ph) and residual loss(Pcv-Ph). The temperature characteristics and compositional dependence of Pcv can be attributed to the Ph, while Pcv-Ph is not affected by both temperature and ZnO/NiO. By analyzing temperature and composition dependence of Ph and initial permeability, μ_i like following equations could be formularized.

$$\mu_i \mu_0 = I_s^2 / (K_1 + b \sigma_0 \lambda_s)$$

$$Wh = 13.5(I_s^2 / \mu_i \mu_0)$$

Where μ_0 is permeability of vacuum, I_s is saturation magnetization, K_1 is anisotropy constant, s_0 is internal heterogeneous stress, λ_s is magnetostriction constant, b is unknown constant, and Wh is hysteresis loss per one cycle of excitation ($Ph=Wh \times f$). Steinmetz constant of Ni-Cu-Zn ferrites, $m=1.64\sim 2.2$ is smaller than that of Mn-Zn ferrites, which suggests the difference of loss mechanisms between these materials.

Key words: Ni-Zn Ferrite, Hysteresis loss, Magnetostriction constant, Steinmetz constant

* 2004년 11월 19일 접수, 2004년 12월 17일 수리

* E-mail: kimjeongsu@samwha.co.kr

1. 머리말

Ni-Cu-Zn페라이트는 Mn-Zn 페라이트에 비해 포화자화가 낮고 손실이 크기 때문에, 주로 고주파 신호회로 및 전파흡수체 등에 이용되어졌지만, 전원회로의 응용은 거의 없었다. 하지만 최근에는 전원의 소형화, 경량화를 위해 트랜스, 초크코일의 소형화가 강하게 요구되어지고 있다. 특히 Ni-Cu-Zn는 전기저항이 높아서 코어재를 통한 코일의 쇼트가 없기 때문에 보빈을 사용하지 않고 직접 권선이 가능하다. 따라서 이것을 이용하면 트랜스 및 초크코일의 소형화가 가능하며, 이미 일부에서는 검토가 진행되고 있다. 그러나 Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 특성에 관한 연구는 적고, 보고되고 있는 자료도 Mn-Zn 페라이트와 비교한 손실 Data를 보여주는 것에 지나지 않았다.¹⁻²⁾

따라서 본 연구에서는 Mn-Zn 페라이트의 손실의 분석 결과³⁾를 기초로 하여 NiO/ZnO비를 변경한 몇 가지의 Ni-Cu-Zn 페라이트 시료를 제작해, 그 손실 및 각종 전자기 특성을 측정했다. 즉, 손실 Pcv를 Hysteresis 손실 Ph 및 그 외의 손실(Pcv-Ph)로 분리해, 각 손실 성분의 거동을 조사했다. 더불어 그러한 손실 성분과 전자기 특성의 관계를 조사한 내용은 손실 메커니즘 해석 기술을 일보 진전시켰다. 또한 본 연구에서는 주로 손실의 계통적 거동과 Ph의 분석 결과를 언급하기로 한다.

2. 실험방법

NiO/ZnO비가 다른 Ni-Cu-Zn 페라이트 시료를 일반적인 분말야금법으로 제작했다. 시료의 형상은 $\phi 20 \times 15 \times 7$ 의 Toroidal이다. Table 1에 나타냈듯이 모든 sample의 초기투자율은 400~1300의 범위에 존재한다. 그리고, 손실 및 전자기적 특성의 측정은 이전의 연구³⁾에 따랐다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 損失 (Pcv)

Fig. 1에 각 시료의 상온에서의 손실(Pcv)의 주파수 특성을 나타내었다. 이미 보고⁴⁾된 바와 같이 Pcv는 주파수 f에 대해 log-scale로 그리면 직선이 된다. 즉 손실의 주파수 특성을 $P_{cv} \sim f^n$ 로 나타내면, Mn-Zn 페라이트에서 볼 수 있는 고주파 영역에서 증가하는 손실 인자에 의해 n이 증가하지만, Ni-Cu-Zn 페라이트에서 n은 주파수에 의존하지 않고 일정하게 된다. 이것으로부터 Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 거동은 Mn-Zn 페라이트와 약간 다르다는 것을 추측할 수 있다. 또한 Fig. 1과 같이 NiO/ZnO비의 감소에 따라 Pcv가 줄어드는 것을 알았다.

Pcv를 Hysteresis손실 Ph와 그 외의 손실(Pcv-Ph)로 분리했다. Table 2에 각 손실의 예로서 100 kHz, 50 mT 및 100°C에서의 손실과 그 분율을 나타냈다. 참고로 통상의 전원용 Mn-페라이트의 손실도 나타내었다. Ni-Cu-Zn제의 100 kHz, 50 mT 및 100°C의 조건에서의 손실은 Mn-Zn 페라이트 보다 크고, Ph의 비율이 Mn-Zn에 비해 크다는 것을 알았다.

또, Ni-Cu-Zn 페라이트의 NiO/ZnO비의 감소와 함께

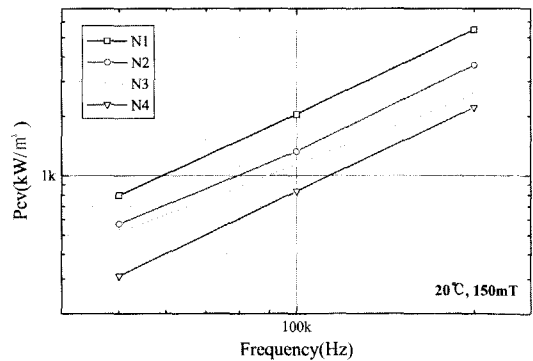


Fig. 1. Frequency dependence of total power loss at 150 mT.

Table 1. Sample composition and magnetic characteristics

Sample	NiO/ZnO	μ_i	Tc(°C)	$\rho(M\Omega \cdot m)$	Hc(A/m)
N1	0.9350	407	320	7.18E+01	42
N2	0.7010	669	240	1.02E+02	27
N3	0.4362	927	180	1.36E-01	21
N4	0.4000	1248	140	2.40E-02	16

Table 2. Pcv, Ph, Pcv-Ph at 100 kHz 50 mT, 100°C

Sample	Pcv (kW/m ³)	Ph [kW/m ³ (%)]	Pcv-Ph [kW/m ³ (%)]
N1	174	142 (82)	32 (18)
N2	111	81 (73)	30 (27)
N3	66	38 (58)	28 (42)
N4	62	30 (48)	32 (52)
Mn-Zn ferrite	1.72	0.30 (18)	1.42 (82)

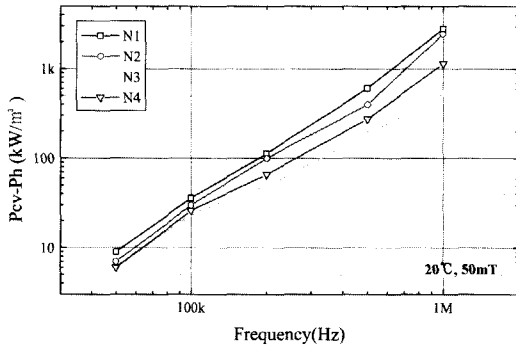


Fig. 2. Correlation of Pcv-Ph and Frequency.

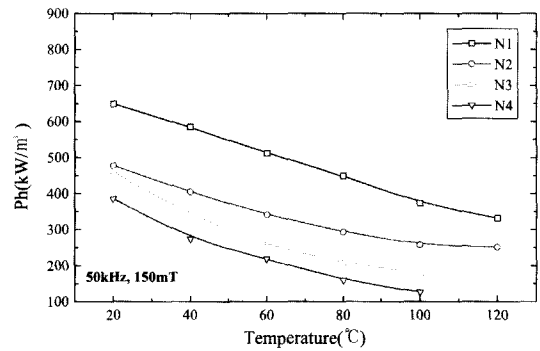


Fig. 4. The correlation of Ph and temperature at 50 kHz & 150 mT.

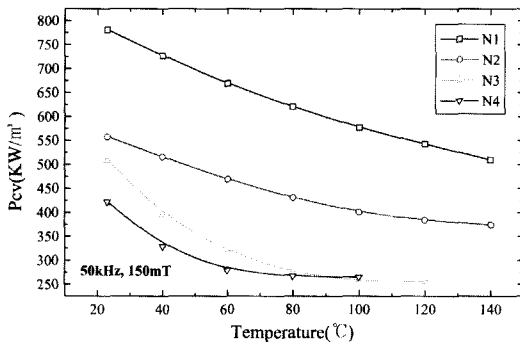


Fig. 3. Temperature dependence of total power loss (Pcv).

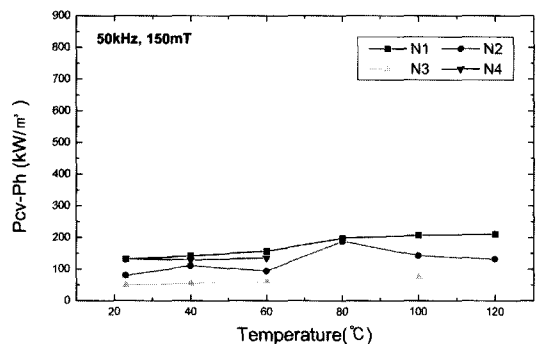


Fig. 5. Correlation of Pcv-Ph vs. temp. at 50 kHz & 150 mT.

Ph는 감소하지만, Pcv-Ph는 조성과는 무관하게 일정하다.

Fig. 2에 Pcv-Ph의 주파수 의존성을 나타내었다(Ph의 정의에 의해 Ph는 f에 비례한다). Pcv-Ph를 (Pcv-Ph)~fⁿ로 나타내면, n은 1.2~1.9의 범위에 존재하며, NiO/ZnO 비의 감소에 따라 줄어드는 경향이 있다(즉, n은 주파수에 의존하지 않는다). (Pcv-Ph)의 손실 메커니즘은 Ni-Cu-Zn 페라이트의 전기저항을 Table 1에 나타냈듯이 매우 높기 때문에 와전류손실의 영향이 적을 것이라는 것이 예상되지만, 현재 명확하게 되어 있지는 않다.

Fig. 3에 Pcv의 온도 의존성을 나타내었다. 모든 시

료의 Pcv가 측정 온도의 증가에 따라 감소한다. 특히 측정 온도를 올리더라도 Pcv가 계속하여 감소하든지, 또는 일정치가 되지만 Mn-Zn 페라이트와 같이 특정 온도에서 상승하는 경우는 없다.

Pcv를 Ph 및 Pcv-Ph로 분리해, 각각의 온도 의존성을 조사했다. Fig. 4 및 Fig. 5에 나타낸 것과 같이, Ph는 측정 온도의 상승에 따라 감소하지만, Pcv-Ph는 명확한 온도 의존성을 나타내지는 않는다.

Mn-Zn 페라이트의 Ph의 온도특성에서 볼 수 있는 최소값은 초기투자율의 2차 피크와 더불어, 이방성상수

가 zero가 되는 온도를 나타낸다고 알려져 있다.³⁾ 이것은 각 cation의 부호가 다른 이방성상수의 상쇄에 의한 것이다. Ni-Cu-Zn 페라이트의 경우 이러한 이방성상수의 상쇄가 없기 때문에 Ph의 온도 의존성에는 특별한 요인을 생각하지 않으면 안 된다. 본 연구에서는 Ph를 제반 특성과 관련지어 고찰했다.

3.2. Hysteresis 損失

Fig. 6에 초기투자율의 온도 의존성을 나타내었다. Ni-Cu-Zn 페라이트의 초기투자율은 알려진 바와 같이 온도의 상승에 따라 증가한다.

Fig. 4 및 Fig. 6에 따르면 Ph와 초기투자율에 공통되는 영향 인자가 있어, 그 온도특성에 의해 Ph 및 초기투자율의 온도 의존성을 설명할 수 있을 것으로 예상된다. Ph를 $1/\mu_i$ 에 대해서 도시하면, Fig. 7과 같이 각 조성의 시료에 대해서 일정한 관계를 얻을 수 있지만, 조성이 다른 시료 사이에서의 연관성은 얻을 수 없다.

Ph의 기원을 고찰하기 위해 초기투자율을 검토하였다. 일반적으로, 입방계 재료의 초기투자율 μ_i 는 자기이방성상수와 자왜(magnetostriction)에 강하게 의존한다. 그러한 관계를 식(1)에 나타냈다.

$$\mu_i \mu_0 = I_s^2 / (K_1 + b \sigma_0 \lambda_s) \tag{1}$$

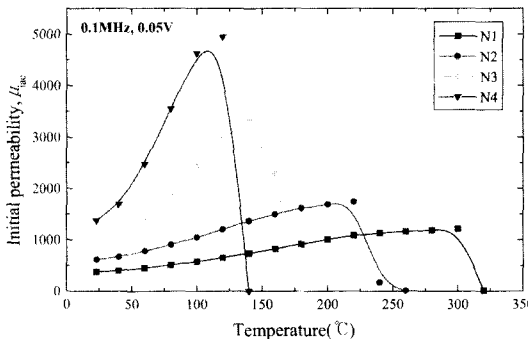


Fig. 6. Temperature dependence of initial permeability.

여기서, μ_0 은 진공에서의 투자율이다. 그러나, Ni-Cu-Zn 페라이트의 자기이방성 정수 K_1 와 자왜(magnetostriction) λ_s 의 측정치가 없기 때문에, 구성하는 단위 페라이트(NiOFe_2O_4 , CuOFe_2O_4 , ZnOFe_2O_4)의 측정치⁵⁾로부터 복합페라이트의 K_1 및 λ_s 를 계산한 다음 식(1)에 대입해 미지의 값 $b\sigma_0$ 를 구했다. Table 3에서 알 수 있는 바와 같이 모든 시료에 있어서 거의 동일한 $b\sigma_0$ 을 얻을 수 있었다.

이것으로부터 초기투자율은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다는 것을 알았다. 통상 $b = 3/2$ 이 나오기 때문에 이것을 이용해 σ_0 을 계산해 보면 $\sigma_0 = 180 \sim 183 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 가 된다. 이는 S.Chikazumi가 급속히 자성체의 불균일 응력으로 추측했던 10^9 N/m^2 의 1/5정도⁶⁾로, 산화물자성체로서 상이한 값은 아니라고 생각된다.

한편, 손실에 관한 고전적인 연구에 의하면 입방계 재료의 Hysteresis 손실이 단결정의 불균일성에 기인한다고 해서 식 (2)가 제안되고 있다.⁷⁾ 여기서 Wh는 1사이클의 Hysteresis 손실이다.

$$Wh = 4.3 \pi \lambda_s \sigma_0 \tag{2}$$

식 (2)에 식 (1)을 대입하면 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$Wh = 4.3 \pi (I_s^2 / \mu_i \mu_0 - K_1) \cdot 1/b \tag{3}$$

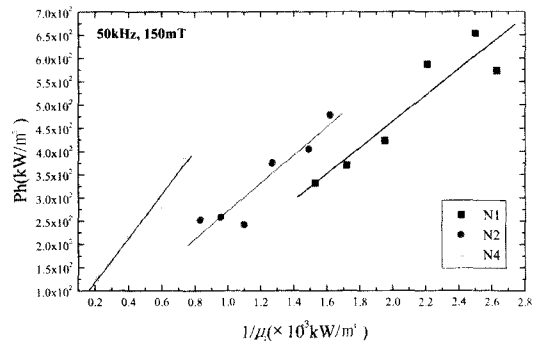


Fig. 7. Correlation of hysteresis loss vs. $1/\mu_i$.

Table 3. $b\sigma_0$ value calculated by equation(1) from K_1 and λ_s of unit ferrites.

Sample	K_1 (J/m^3)	λ_s	$b\sigma_0$ (N/m^2)
N1	-3.74×10^3	-15.06×10^{-6}	-274×10^6
N2	-3.30×10^3	-13.01×10^{-6}	-270×10^6
N3	-2.65×10^3	-9.97×10^{-6}	-275×10^6
N4	-2.52×10^3	-9.39×10^{-6}	-275×10^6

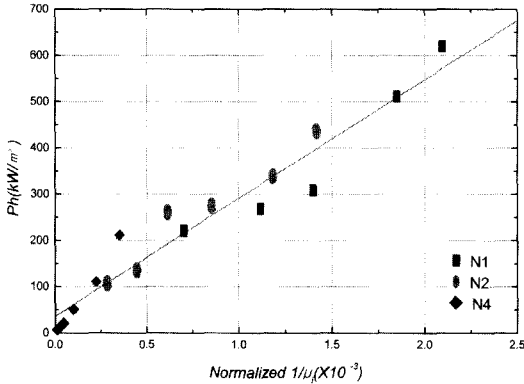


Fig. 8. Correlation of Ph vs. $1/\mu_i$.

I_s 및 K_1 의 조성 의존성, 다시 말해 시료 사이에서의 조성의 변화에 기인하는 포화자화의 변화를 고려해 측정 인가 자계를 I_s 로 규격화해, 식 (3)의 우변을 계산해 보았다. 그 결과, 시료 N1에 대한 $(I_s^2/\mu_i\mu_0) = 385 \text{ J/m}^3$ 를 얻을 수 있었으며, 이는 $K_1 = 3.74 \text{ KJ/m}^3$ 의 약 10% 정도의 수준이다. 다른 시료에 대해서도 같은 양상으로 $(I_s^2/\mu_i\mu_0)$ 가 K_1 의 10% 이하가 되어, Wh의 대부분이 K_1 값에 따르게 된다. 이것은, 자기이방성이 Hysteresis 손실에 기여하지 않는다고 가정해 식 (2)를 구한 것과 모순된다.

한편, Mn-Zn 페라이트의 Hysteresis 손실이 $K_1=0$ 에서 최소치를 나타낸다는 것은 이미 널리 알려져 있다.³⁾ 현재, 자기이방성이 Hysteresis 손실에 기여하는 메커니즘은 고찰되고 있지는 않지만, 실험 사실을 인정하여 식 (4)가 성립된다고 가정하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$Wh = 4.3 \pi (K_1 + b\sigma_0\lambda_s) \quad (4)$$

$$Wh = 4.3 \pi (I_s^2/\mu_i\mu_0) \quad (5)$$

시료의 조성 및 측정 온도에 따라 I_s , μ_i 가 변화하는 것을 고려하고 보정을 해서 Ph를 $1/\mu_i$ 에 대해서 플롯하면 Fig. 8과 같은 결과를 얻을 수 있다.

이상으로부터 μ_i 및 Hysteresis 손실도 자기이방성과

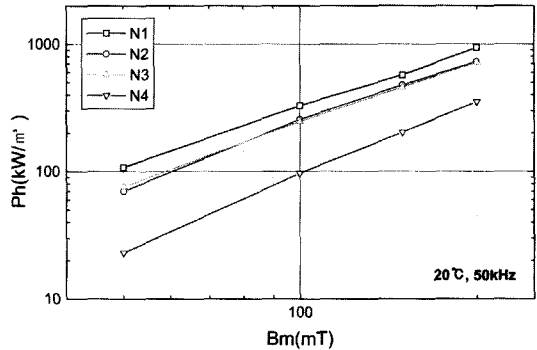


Fig. 9. Correlation of Ph vs. B_m .

자왜의 합, 즉 광의 자기이방성으로 나타내 지는 것을 알았다. 따라서 자성 특성의 온도 의존성도 광의 자기이방성의 온도 의존성에서 기인하게 된다. 결국, 초기투자율 및 Hysteresis 손실은 단결정의 자기이방성과 자왜상수의 부호에 의존하므로 이러한 자기이방성 인자를 이용하여 검토하여 보면, 조직인자나 다른 특성 요인에 영향을 준다고 결론지을 수 있다.

다음으로 Hysteresis 손실의 인가 자장 의존성을 조사했다. Fig. 9에 나타난 것처럼 Hysteresis 손실은 대수그래프로 B_m 에 거의 직선 관계이므로, $Ph \sim B_m^m$ 로 나타낼 수가 있다. Steinmetz constant라고 하는 m 값을 각각의 시료에 대해서 구하면 Table 4와 같다.

Y.Sakaki에 의하면 Steinmetz constant는 아래와 같은 자화 메커니즘과 관련이 있다.⁸⁾

<1> $m = 1.6$; 자벽 이동에 의한 손실

<2> $m > 2$; 자벽 이동과 자벽의 소멸에 기인하는 손실

Y.Sakaki⁸⁾에 의하면, Fe-3%Si에서는 $m = 1.64$ (at $B_m < 1T$) 또는 $m > 2$ (at $B_m > 1T$)였으며, Mn-Zn 페라이트에서는 모든 flux level에서 $m > 2$ 이었다. 특히 Mn-Zn 페라이트의 경우, Spinel상 입자가 비자성인 입계층과 분리되어 있기 때문에 어느 flux level에서도 $m > 2$ 가 된다고 설명한 바 있다. 비슷한 사례로, Dust core의

Table 4. Value of Steinmetz constant according to temperature.

Sample	20°C	40°C	60°C	80°C	100°C	120°C
N1	1.54	1.68	1.68	1.49	1.51	1.53
N2	1.66	1.56	1.65	1.39	1.61	1.67
N3	1.52	1.70	1.85	1.88	2.00	-
N4	1.76	1.82	2.09	2.20	1.98	-

Steinmetz constant가 거의 2.0인 것으로 나타난다.⁹⁾ 한편, Table 4에 나타난 것처럼 Ni-Cu-Zn 페라이트의 Steinmetz constant가 1.6~2.2인 것으로 보아, Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 메커니즘은 Mn-Zn와 다르다는 것으로 예상할 수 있다.

한편, Visser등은 Mn-Zn 페라이트의 $m > 2$ 라는 값은 회전 자화가 원인이라고 하고 있다.¹⁰⁾ 여기서, 회전 자화의 원인으로 예상되는 고 인가자장에서의 m 을 구해 보면 비교적 큰 값은 되지 않았다. 이것으로부터, Y.Sakaki등의 설명이 실험 결과와 부합하고 있다고 생각할 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 NiO/ZnO비가 다른 몇 종의 Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실을 분석하였으며, 더불어 다른 전자기 특성과의 관계를 조사하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실은 Mn-Zn 페라이트에 비해 매우 크고, 손실 중에서 Hysteresis 손실 성분이 크다.
2. Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실은 측정 온도의 상승에 따라 점점 감소하며, 또한 NiO/ZnO비의 감소 즉 ZnO량의 증가에 따라 감소한다.
3. 이러한 손실의 온도, 조성 의존성은 Hysteresis 손실 Ph에 의존하며, 그 외의 손실(Pcv-Ph)은 측정 온도, NiO/ZnO비에 따라 변하지 않았다.
4. Ni-Cu-Zn 페라이트의 초기투자율 μ_1 는 이방성상수 K_1 및 자왜정수 λ_S 에 의존하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_1 \mu_0 = I_S^2 / (K_1 + b \sigma_0 \lambda_S)$$

5. Ni-Cu-Zn 페라이트의 Hysteresis 손실과 초기투자율에 일정한 관계가 있는 것을 알았으며, 1 사이클 당의 Hysteresis 손실은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Wh = 4.3 \pi (K_1 + b \sigma_0 \lambda_S)$$

6. Hysteresis 손실은 Ph-Bm^m으로 나타낼 수 있으며, Ni-Cu-Zn 페라이트에 있어서의 Steinmetz constant m 은 1.64~2.2가 된다. 이 값은 Mn-Zn 페라이트($m > 2$)와는 다른데 이것은 Ni-Cu-Zn 페라이트와 Mn-Zn 페라이트의 손실 메커니즘의 차이가 있음을 나타내는 것이다.

참고문헌

1. Kondo, K., Chiba, T., Yamada, S. and Otsuki, E., 2000: "Relationship between Power Loss and Magnetization Process in Ni-Zn Ferrites", J. of Japan Society of Powder Metallurgy, **40**(2), pp. 185-188.
2. Visser, E.G., Roelofsma, J.J., and Aaftink, G.J., 1989: "Domain Wall Loss and Rotational Loss in High Frequency Power Ferrites", Proc. **ICF-5**, pp. 605-608.
3. Otsuki, E., 1992: "Nanostructure and Magnetic Properties of Mn-Zn Ferrites", Proc. **ICF-6**, pp. 59-64.
4. Kondo, K., Chiba, T., Otsuki, E. and Yamada, S., 1999: "Analysis of Power Loss in Mn-Zn Ferrites", Tokin Technical Review, **26**, pp. 1-5.
5. Hiraga, T., Okutani, K. and Oshima, T., 1986: "Ferrites", Maruzen(Japan), p. 26.
6. Chikazumi, S., 1987: "Physics of Ferromagnetic Materials", 2, Shoukabou, p. 247.
7. Chikazumi, S. ibd., p. 274.
8. Sakaki, Y. and Matsuoka, T., 1996: "Hysteresis loss in Mn-Zn Ferrite Core", IEEE Trans. Magn., pp. 623-625.
9. Fujiwara, T. Ishii, M. and Otsuki, E., 1996: "The Analysis of Iron Loss Properties in Fe-S-Al Alloy Powder Core", Proc. of 2000 Powder Metallurgy World Congress, pp. 1405-1408.
10. Boerekamp, J.G. and Visser, E.G., 1996: "Grain Size Dependency of the Steinmetz Coefficient of Soft Ferrite Power Loss", Proc. **ICF-7** Abstract, p. 263.

大槻悦夫



- 1973년 東北大學 大學院 工學研究科 博士課程 終了
- 1983년 東北大學 大學部 助教授
- 2002년 三和電子工業(주) 新素材研究所 所長

金正秀



- 1996년 충북대학교 재료공학과 졸업
- 1996년 삼화전자공업(주) 입사