

# 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, Jeong-Su Kim

R & D Center, SAMWHA electronics corporation

### 요 약

NiO, ZnO 조성이 다른 Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 분석을 실시했다. 손실,  $P_h$  는 측정 온도의 상승에 따라 감소 해 100-120°C 근처에서 일정한 값을 얻었다.  $P_{cv}$  의 주파수의존성은  $P_{cv} \sim f^n$  로 표현될 수 있는데,  $n$  는 1 MHz 까지 일정했다.  $P_{cv}$  는 ZnO/NiO 비가 증가함에 따라 감소한다.  $P_{cv}$  를 Hysteresis loss,  $P_h$  및 잔류손실, ( $P_{cv}-P_h$ )로 분리했다.  $P_{cv}$  의 온도특성 및 조성 의존성은  $P_h$  에 기인하지만, ( $P_{cv}-P_h$ )는 온도 및 조성에 의존하지 않는다.  $P_h$  와 초투자율,  $\mu_i$  의 온도 및 조성 의존성을 분석 해, 다음과 같은 식이 성립된다는 것을 알 수 있었다.

$$\mu_i \mu_0 = I_s^2 / (K_I + b \sigma_0 \lambda_s) \quad (1)$$

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

여기서,  $\mu_0$  은 진공의 투자율,  $I_s$  는 포화자화,  $K_I$  는 이방성상수,  $\sigma_0$  는 내부 불균일 응력,  $\lambda_s$  는 자기이방성 상수,  $b$  는 미지의 정수,  $Wh$  는 1 주기 당의 히스테리시스 손실( $P_h = Wh * f$ )이다.

Ni-Cu-Zn 페라이트의 Steinmetz 정수  $m=1.64-2.2$  는 Mn-Zn 페라이트보다는 적는데, 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,  $P_{cv}$  decreases monotonically with increasing temperature and attains to a certain value at around 100~120 degrees Celsius. The frequency dependence of  $P_{cv}$  can be explained by  $P_{cv} \sim f^n$ , and  $n$  is independent of the frequency,  $f$  up to 1MHz. The  $P_{cv}$  decreases with an increase in ZnO/NiO. The  $P_{cv}$  was separated to hysteresis loss,  $P_h$  and residual loss, ( $P_{cv}-P_h$ ). The temperature characteristics and compositional dependence of  $P_{cv}$  can be attributed to the  $P_h$ , while ( $P_{cv}-P_h$ ) is not affected by both temperature and ZnO/NiO. By analyzing temperature and composition dependence of  $P_h$  and initial permeability,  $\mu_i$  following equations could be formularized.

$$\mu_i \mu_0 = I_s^2 / (K_I + b \sigma_0 \lambda_s) \quad (1)$$

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

Where  $\mu_0$  is permeability of vacuum,  $I_s$  saturation magnetization,  $K_I$  anisotropy constant,  $\sigma_0$  internal heterogeneous stress,  $\lambda_s$  magnetostriction constant,  $b$  unknown constant.  $Wh$  hysteresis loss per one cycle of

excitation ( $Ph=Wh*f$ ).

Steinmetz constant of Ni-Cu-Zn ferrites,  $m=1.64\sim 2.2$  is smaller than the one of Mn-Zn ferrites, which suggests the difference of loss mechanism between these materials.

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

### 1. 머리말

Ni-Cu-Zn 페라이트는, Mn-Zn 페라이트에 비해 포화자화가 낮고 손실이 크기 때문에, 주로 고주파 신호회로, 전파흡수체 등에 이용되어졌지만, 전원회로로의 응용은 거의 없었다. 하지만, 최근에는 전원의 소형화, 경량화를 위해 트랜스, 초크코일의 소형화가 강하게 요구되어 지고 있다. 특히, Ni-Cu-Zn 는 전기저항이 높아서 코어재를 통한 코일의 쇼트가 없기 때문에 보빈을 사용하지 않고 직접 권선이 가능하다. 따라서, 이것을 이용하면 트랜스, 초크코일의 소형화가 가능하고, 그 검토도 일부 진행되고 있다. 그러나, Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 특성에 관한 연구는 적고, 보고되고 있는 자료도 Mn-Zn 페라이트와 비교한 손실 Data 를 보여주는 것에 지나지 않았고<sup>(1), (2)</sup>, 계통적 연구는 없다.

따라서, 본 연구에서는 Mn-Zn 페라이트의 손실의 분석 결과<sup>(3)</sup>를 기초로 하여 NiO/ZnO 비를 변경한 몇 가지의 Ni-Cu-Zn 페라이트 시료를 제작해, 그 손실 및 각종 전자기 특성을 측정했다. 즉, 손실  $P_{cv}$  를 Hysteresis 손실  $Ph$  및 그 외의 손실( $P_{cv}-Ph$ )로 분리해, 각 손실 성분의 거동을 조사했다. 게다가, 그러한 손실 성분과 전자기 특성의 관계를 조사해 손실 메커니즘 해석 기술을 1 보 전진시켰다. 덧붙여, 본 고에서는 주로 손실의 계통적 거동과  $Ph$  의 분석 결과를 언급하기로 한다.

### 2. 실험방법

NiO/ZnO 비가 다른 Ni-Cu-Zn 페라이트 시료를 일반적인 분말야금법으로 제작했다. Sample 형상은  $\Phi 20 \times 15 \times 7$  의 Toroidal 이다. Table 1 에 나타냈듯이 모든 Sample 의 초투자율은 400~1300 의 범위에 존재한다. 그리고, 손실 및 전자기적 특성의 측정은 이전의 연구<sup>(3)</sup>에 따랐다.

**Table 1.** Sample composition and magnetic characteristics

Sample	NiO/ZnO	$\mu_i$	$T_c(^{\circ}C)$	$\rho (M\Omega \cdot m)$	$H_c(A/m)$
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

### 3. 실험결과 및 고찰

#### (1) 損失 ( $P_{cv}$ )

Fig.1 에 각 시료의 상온에서의 손실( $P_{cv}$ )의 주파수특성을 나타내었다. 이미 보고된 바<sup>(1)</sup>와 같이  $P_{cv}$  는 주파수  $f$  에 대해 log-scale 로 그리면 직선이 된다. 즉, 손실의 주파수특성을  $P_{cv} \sim f^n$  로 나타내면, Mn-Zn 페라이트에서 볼 수 있는 고주파 영역에서 증가하는 손실 인자에 의해  $n$  이 증가하지만, Ni-Cu-Zn 페라이트에서  $n$  은 주파수에 의존하지 않고 일정하게 된다. 이것으로부터,

Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 거동은 Mn-Zn 페라이트와 약간 다르다는 것을 추측할 수 있다. 또 Fig.1 과 같이 NiO/ZnO 비의 감소에 따라 Pcv 가 줄어드는 것을 알았다.

Pcv 를 Hysteresis 손실 Pcv 와 그 외의 손실(Pcv-Ph)로 분리했다. Table 2 에 각 손실의 예로서 100kHz, 50mT, 100°C에서의 손실과 그 분율을 나타냈다. 참고로 통상의 전원용 Mn-Zn 페라이트의 손실도 나타내었다. Ni-Cu-Zn 재의 100kHz, 50mT, 100°C 의 손실은 Mn-Zn 페라이트보다 크고, Ph의 비율이 Mn-Zn에 비해 크다는 것을 알았다.

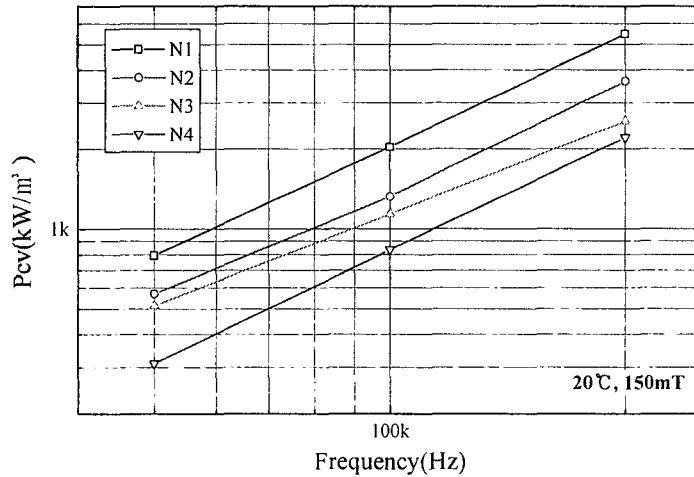


Fig 1. Frequency dependence of total power loss at 150mT

Table 2. 100kHz, 50mT, 100°C에서의 Pcv, Ph, (Pcv-Ph)

Sample	Pcv kW/m <sup>3</sup>	Ph kW/m <sup>3</sup> (%)	(Ph-Pcv) kW/m <sup>3</sup> (%)
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)

또, Ni-Cu-Zn 페라이트의 NiO/ZnO 비의 감소와 함께 Ph는 감소하지만, (Pcv-Ph)는 조성과는

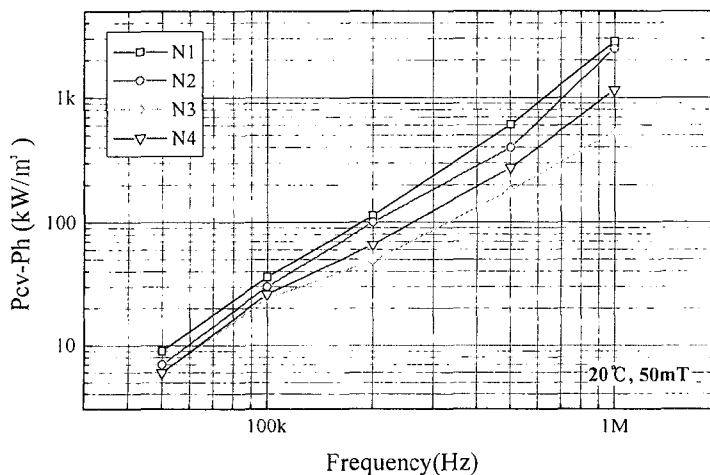


Fig.2 Pcv-Ph vs. Frequency

무관하게 일정하다.

Fig.2 에 (Pcv-Ph)의 주파수 의존성을 나타내었다(Ph 의 정의에 의해 Ph 는 f 에 비례한다). (Pcv-Ph)를 (Pcv-Ph) $\sim f^n$  로 나타내면, n 은 1.2~1.9 의 범위에 존재하며, NiO/ZnO 비의 감소에 따라 줄어드는 경향이 있다(즉, n 은 주파수에 의존하지 않는다). (Pcv-Ph)의 손실 메커니즘은, Ni-Cu-Zn 페라이트의 전기저항이 Table 1 에 나타냈듯이 매우 높기 때문에 와전류손실의 영향이 적을

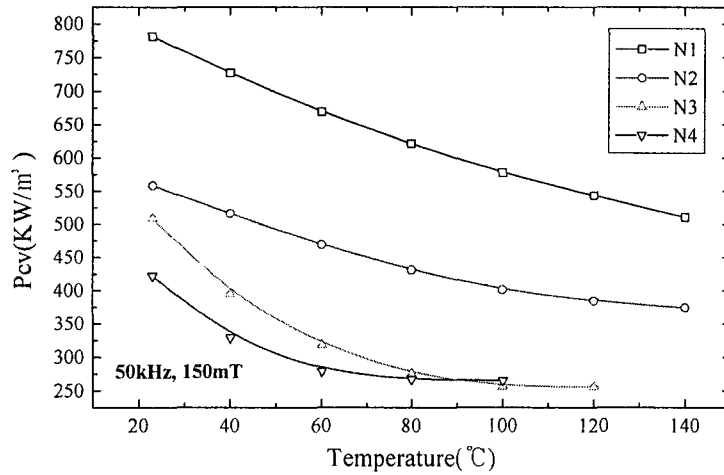


Fig.3 Temperature dependence of total power loss, Pcv

것이라는 것은 예상되지만, 현재 명확하게 되어 있지는 않다.

Fig.3 에 Pcv 의 온도 의존성을 나타내었다. 모든 시료의 Pcv 가 측정 온도의 증가에 따라 감소한다. 특히, 측정 온도를 올리더라도 계속하여 감소하든지, 또는 일정치가 되지만, Mn-Zn 페라이트와 같이 특정 온도에서 상승하는 경우는 없다.

Pcv 를 Ph 및 (Pcv-Ph)로 분리해, 각각의 온도 의존성을 조사했다. Fig.4 및 Fig.5 에 나타낸 것과 같이, Ph 는 측정 온도의 상승에 따라 감소하지만, (Pcv-Ph)는 명확한 온도 의존성을 나타내지는 않는다.

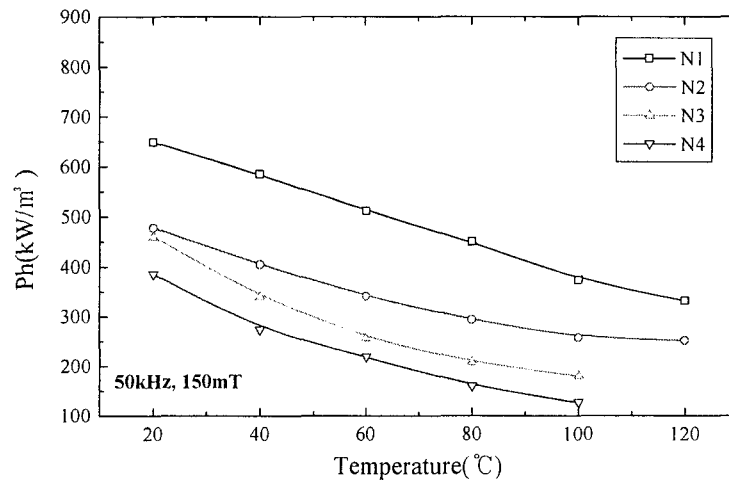


Fig.4 Hysteresis loss vs. Temperature at 50kHz, 150mT

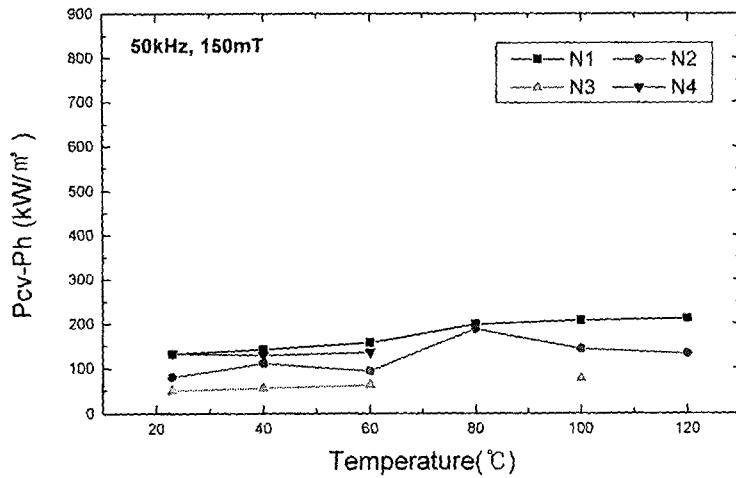


Fig 5. Pcv-Ph vs. Temp. with frequency at 50kHz, 150mT

Mn-Zn 페라이트의 Ph의 온도특성에서 볼 수 있는 최소값은 초투자율의 Secondary peak와 함께 이방성상수가 Zero가 되는 온도를 나타낸다고 알려져 있다<sup>(3)</sup>. 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 고에서는 Ph를 제반 특성과 관련지어 고찰했다.

## (2) Hysteresis 損失

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

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

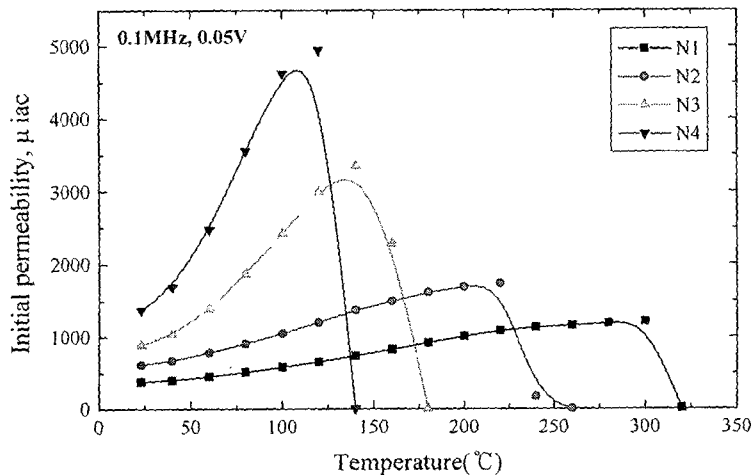


Fig 6. Temperature dependence of initial permeability

사이에서의 연관성은 얻을 수 없다.

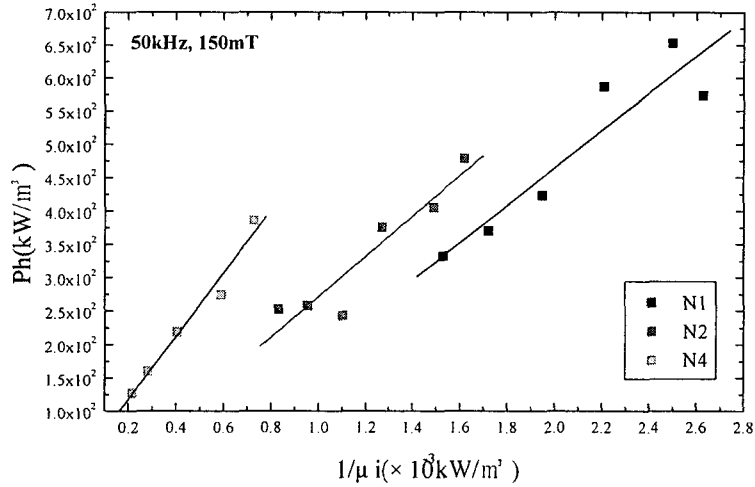


Fig 7. Hysteresis loss vs.  $1/\mu i$

Ph의 기원을 고찰하기 위해 초투자율을 검토하였다. 일반적으로, 입방계 재료의 초투자율  $\mu_i$ 는 자기이방성 정수와 자왜에 강하게 의존한다. 여기서, 그러한 관계를 식(1)에 나타냈다.

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

여기서,  $\mu_0$ 은 진공에서의 투자율이다. 유감스럽지만, Ni-Cu-Zn 페라이트의 자기이방성 정수  $K_1$ 와 자왜  $\lambda_s$ 의 측정치가 없기 때문에, 복합 페라이트의  $K_1$  및  $\lambda_s$ 에 혼합 규칙을 적용해, 그것들을 구성하는 단위 페라이트( $\text{NiOFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuOFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{ZnOFe}_2\text{O}_4$ )의 측정치<sup>(5)</sup>로부터 복합페라이트의  $K_1$  및  $\lambda_s$ 를 계산해, 그것들을 식(1)에 대입해 미지의 값  $b \sigma_0$ 를 구했다. Table 3에 나타냈듯이, 모든 시료에 있어서 거의 동일한  $b \sigma_0$ 을 얻을 수 있었다.

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

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

이것으로부터, 초투자율은 식(1)에 의해 나타낼 수 있다는 것을 알았다. 덧붙여, 통상  $b = 3/2$ 이 나오기 때문에, 이것을 이용해  $\sigma_0$ 을 계산해 보면  $\sigma_0 = 180 \sim 183 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 가 된다. 이는 近角(S.Chikazumi)이 금속계 자성체의 불균일 응력으로 추측했던  $10^9 \text{ N/m}^2$ <sup>(6)</sup>의 1/5 정도로, 산화물자성체로서 그렇게 이상한 값은 아니라고 생각된다.

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

$$Wh = 4.3\pi \lambda_s \sigma_0 \quad (2)$$

식(2)에 식(1)을 대입하면 식(3)을 얻을 수 있다.

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

$I_s$  및  $K_1$  의 조성 의존성, 다시 말해 시료 사이에서의 조성의 변화에 기인하는 포화자화의 변화를 고려해 측정 인자 자계를  $I_s$  로 규격화해, 식(3)의 우변을 계산해 보았다. 그 결과, 시료 N1 에 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,  $W_h$  의 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<sup>(3)</sup>. 현재, 자기이방성이 Hysteresis 손실에 기여하는 메커니즘은 고찰되고 있지는 않지만, 실험 사실을 인정하여, 식(4)가 성립된다고 가정하면 식(5)를 얻을 수 있다.

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

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

시료의 조성 및 측정 온도에 따라  $I_s$ ,  $\mu_i$  가 변화하는 것을 고려하여 보정을 해서  $Ph$  를  $1/\mu_i$  에 대해서 플롯하면 Fig.8 과 같이 된다. 격차가 약간 크지만, 식(5)가 성립되는 것처럼 보인다.

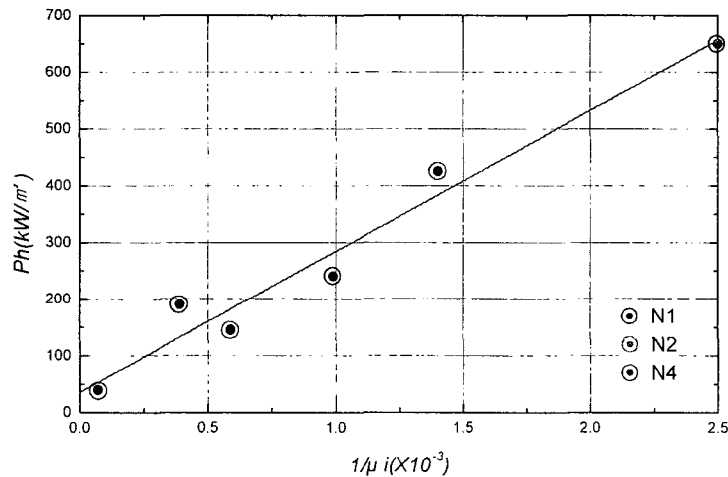


Fig.8 Ph vs.  $1/\mu_i$

이상으로부터,  $\mu_i$  도 Hysteresis 손실도 자기이방성과 자왜의 합, 즉 광의의 자기이방성으로 나타내

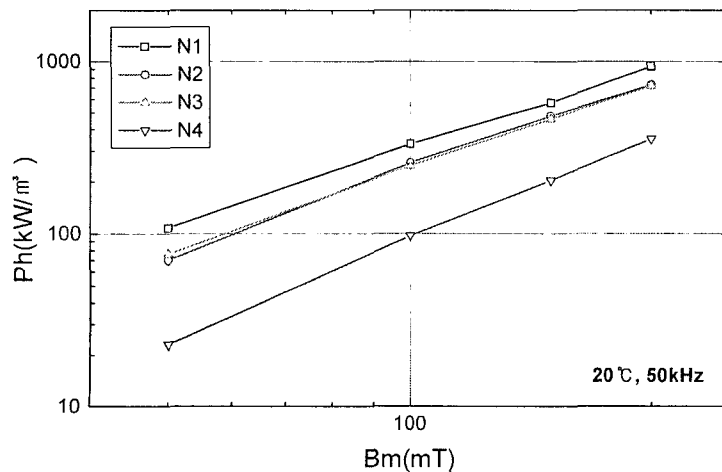


Fig.9 Ph vs.  $B_m$

지는 것을 알았다. 따라서, 그러한 자성 특성의 온도 의존성도 광의의 자기이방성의 온도 의존성에서 기인하게 된다. 결국, 초투자율도 Hysteresis 손실도, 단결정의 자기이방성과 자왜상수의 부호에 의존하므로, 이러한 자기이방성 인자를 이용하여 조직인자나 다른 특성 요인에 영향을 준다고 결론지을 수 있다.

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

**Table 4.** Steinmetz Constant

Sample	20℃	40℃	60℃	80℃	100℃	120℃
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	-

榊(Y.Sakaki)에 의하면, Steinmetz Constant 는 아래와 같은 자화 메커니즘과 관련이 있다<sup>(8)</sup>.

<1>  $m = 1.6$  ; 자벽 이동에 의한 손실

<2>  $m > 2$  ; 자벽 이동과 자벽의 소멸에 기인하는 손실

榊(Y.Sakaki)에 의하면, Fe-3%Si 에서는  $m = 1.64$  at  $B_m < 1T$   $m > 2$  at  $B_m > 1T$ , Mn-Zn 페라이트에서는 모든 Flux level 에서  $m > 2$  이었다. 그리고, Mn-Zn 페라이트의 경우, Spinel 상 입자가 비자성인 입계층과 분리되어 있기 때문에 어느 인가 자계에서도  $m > 2$  가 된다고 기술되고 있다. 유사 예로 Dust core 의 Steinmetz constant 가 거의 2.0 인 것으로 나타난다<sup>(9)</sup>. 한편, Table 4 에 나타난 것처럼 Ni-Cu-Zn 페라이트의 Steinmetz constant 가 1.6~2.2 인 것으로 보아, Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실 메커니즘은 Mn-Zn 와 다르다는 것으로 예상할 수 있다.

한편, Visser 등은 Mn-Zn 페라이트의  $m > 2$  라는 값은 회전 자화가 원인이라고 하고 있다<sup>(10)</sup>. 여기서, 회전 자화의 원인으로 예상되는 고인가 자장에서의 m 를 구해 보면, 그렇게 큰 값은 되지 않았다. 이것으로부터, 榊(Y.Sakaki)등의 설명이 실험 결과와 부합하고 있다고 생각할 수 있다.

#### 4.결 론

NiO/ZnO 비가 다른 몇 종의 Ni-Cu-Zn 페라이트의 손실을 분석하였으며, 이에 더하여 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/ZnO 비의 감소 즉 ZnO 량의 증가에 따라 감소한다.

(3) 이러한 손실의 온도, 조성 의존성은 Hysteresis 손실 Ph 에 의존 하며, 그 외의 손실( $P_{cv-Ph}$ )은 측정 온도, NiO/ZnO 비에 따라 변하지 않았다.

(4) Ni-Cu-Zn 페라이트의 초투자율  $\mu_i$  는 이방성상수  $K_1$  및 자왜정수  $\lambda_s$  에 의존하여, 식(1)로 나타낼 수 있다는 것을 알았다.

(5) Ni-Cu-Zn 페라이트의 Hysteresis 손실과 초투자율에 일정한 관계가 있는 것을 알았으며, 1cycle 당의 Hysteresis 손실은 식(4)로 나타낼 수 있다는 것을 알았다.



(6) Hysteresis 손실은  $Ph \sim Bm^m$  으로 나타내지며,  $m$ (Steinmetz constant)은 1.64~2.2 가 되어,  $m > 2$  인 Mn-Zn 페라이트와 손실 메커니즘의 차이가 있음을 알게 되었다.

#### 참고문헌

- (1) K.Kondo, T.Chiba, S.Yamada and E.Otsuki; "Relationship between Power Loss and Magnetization Process in Ni-Zn Ferrites", J. of Japan Society of Powder Metallurgy, **40** 【2】 185-188(2000).
- (2) E.G.Visser, J.J.Reolofsma and G.J.Aaftink;"Domain Wall Loss and Rotational Loss in High Frequency Power Ferrites",Proc. ICF-5, 605-608(1989).
- (3) E.Otsuki; "Nanostructure and Magnetic Properties of Mn-Zn Ferrites", Proc. **ICF-6**,59-64(1992).
- (4) K.Kondo, T.Chiba, E.Otsuki and S.Yamada;"Analysis of Power Loss in Mn-Zn Ferrites", Tokin Technical Review, **26**, 1-5(1999).
- (5) T.Hiraga,K.Okutani and T.Oshima; "Ferrites", Maruzen(Japan), 26, (19866).
- (6) S.Chikazumi; "Physics of Ferromagnetic Materials" 2 nd volume, Shoukabou, 247,(1987).
- (7) S.Chikazumi; ibd., 274.
- (8) Y.Sakaki and T.Matsuoka;"Hysteresis loss in Mn-Zn Ferrite Core", IEEE Trans. Magn.,623-625, (1996).
- (9) T.Fujiwara, M.Ishii and E.Otsuki;"The Analysis of Iron Loss Properties in Fe-S-Al Alloy Powder Core" Proc. of 2000 Powder Metallurgy World Congress, 1405-1408, (1996).
- (10) J.G.Boerekamp and E.G.Visser;"Grain Size Dependency of the Steinmetz Coefficient of Soft Ferrite Power Loss", **ICF-7**, (1996).