

세라믹 자성재료의 자화 특성 평가

남 중 희
 요업기술원 전자소재·부품팀
 jnam@kicet.re.kr

1. 서 론

각종 전자 산업의 발전 추세가 가전(家電)중심의 기기에서 정보통신 관련 소재 및 부품에 대한 방향으로 전환됨에 따라 다양한 용도의 전자재료에 대한 관심이 날로 증가되고 있다. 특히, 자성재료 응용 분야의 특성상 주파수나 사용 환경에 따른 고성능화가 요구되므로 이에 대응하기 위한 정확한 평가 기술 및 관련 재료의 개발이 절실히 요구되는 실정이다.

전자기기의 고성능화가 급속히 추진됨에 따라 고주파의 사용이 광범위화되고 그 수요가 급증하고 있어서 이들 고주파용 자심(transformer, inductor)등에 대한 평가 방법에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 이러한 고주파용 자심의 자기 특성평가 항목으로는 자기이력곡선에 의한 고유 정수인 자속밀도, 보자력, 초기투자율 등과 자장에 의해 유도되는 자기량의 손실을 의미하는 손실 계수 등으로 구분된다.

자성재료의 특성은 원자구조에 따른 스핀 모멘트(spin

moment)의 거동과 관련되므로, 근본적으로는 이들 spin 배향 상태에 따라 전체 자기모멘트가 외부 자장에 의해 변화하는 것이 자기 특성으로 나타나게 된다. 즉, 재료가 갖는 비직선적 자기 유도량을 측정하여 얻은 data로써 자기 특성을 평가한다. 대체로 금속이 페라이트 보다는 특성의 범위가 넓기 때문에 응용 분야는 다양하지만, 세라믹 자성재료인 페라이트는 비저항이 상대적으로 높기 때문에 고주파 특성이 우수하다(Fig. 1).

특히 자성세라믹스를 크게 3가지로 구분하면, 스피넬 또는 입방정 페라이트, garnet 또는 희토류계 페라이트, 그리고 magnetoplumbite 또는 육방정 페라이트로 나눌 수 있다. 일반적으로 연자성재료(soft magnetic materials)는 보자력(coercive force)이 낮고 포화자화(saturation magnetization)는 큰 것이 특징이다(Fig. 2).

자성재료를 기능별로 구분하면 연자성재료(soft mag-

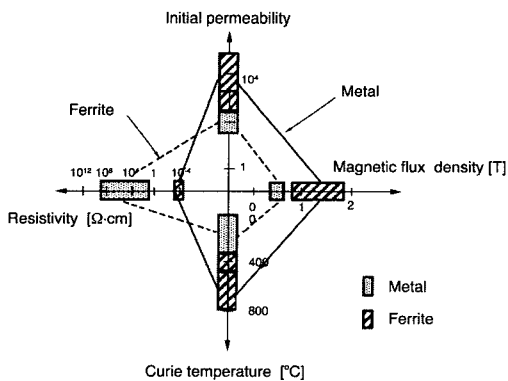


Fig. 1. Classification of magnetic metals and ferrites.

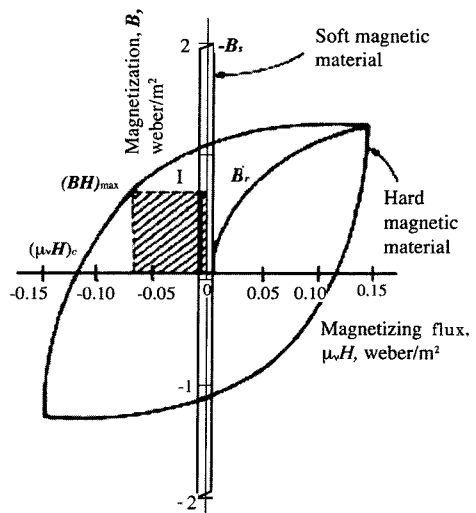


Fig. 2. Representative curves of initial magnetization and hysteresis loops for soft and hard magnetic materials.

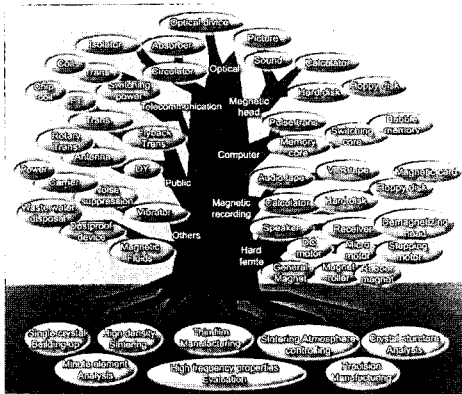


Fig. 3. Classification of ferrites in applications.

netic materials), 경자성재료 (hard magnetic materials) 그리고 자기기록매체 (magnetic recording media and head) 로 나눌 수 있으며, 이들 대부분은 통신 기기와 정보저장용 부품으로 활용된다. 그 중에서도 페라이트는 각종 자심(core)과 노이즈 필터, 전자파 흡수체 등으로 사용되는 연자성 페라이트 (soft ferrite)와 소형 구동 모터용 자석과 고무자석용으로 사용되는 경자성 페라이트 (hard ferrite)로 분류되며, 다양한 형태로서 광범위하게 사용되고 있다 (Fig. 3).

페라이트는 ferrimagnetism을 갖는 형태로서 ferrimagnetism 자체는 magnetite (Fe₃O₄)로부터 유래되었다. Ferrimagnetics (약강자성체)는 ferromagnetics (강자성체)와 마찬가지로 실온에서 자발자화를 나타내며, 이로 인해 응용에 있어서 중요한 의미를 갖는 것이다. 또한, 강자성체와 같이, 자체가 포화 (saturation)된 자기 (magnetic domain)로 되어 있으며, 자기적 포화와 자기 이력 (magnetic hysteresis) 현상을 나타낸다. 특히, 연자성 페라이트의 기본적인 특성은, 화학조성에 의해 결정되는 특성, 화학 조성 외에 다결정체의 미세구조 등의 영향을 강하게 받는 특성으로 구분할 수 있다. 이 중에서 화학 조성에 영향을 받는 특성에는 포화자속밀도, 큐리온도, 자왜 등이 있으며, 다결정체 (소결체)의 미세 구조에 영향을 받는 특성으로는 투자율, 자기손실, disaccommodation 등이 있다.

연자성재료의 자기 특성은 일반적으로 투자율이 크고 보자력이 작은 것이 특징이며, 자기 회로를 구성할 때 자속 (magnetic flux)의 흐름이 원만하며 외부 자장 또는

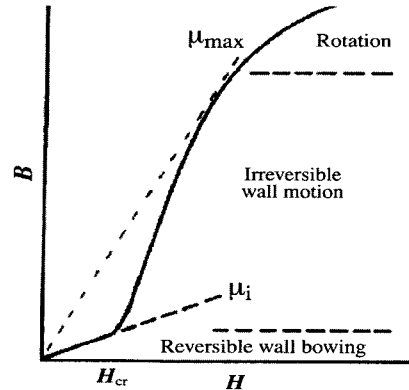


Fig. 4. Schematic magnetization curve showing the important parameters : initial permeability, μ_i (the slope of the curve at low fields), the critical field, H_{cr} , and the main magnetization mechanism in each magnetization range.

교류 전류에 따른 응답성이 신속해야 하기 때문에 각종 power transformer와 전자기기용 부품 및 구동 모터의 자심 등으로 사용된다.

현재 이와 같은 자성재료의 산업 응용 분야에 있어서는 ASTM과 IEC 또는 JIS에 측정법 및 평가법이 세부적으로 명시되어 있으며, 이를 바탕으로 하여 국내에도 KS에 페라이트 자심에 대한 규격이 제정되었고 평가 기술과 관련한 연구가 진행되어 표준화 평가기술 개발을 위한 방안이 제시되었으나, 자성 재료의 응용 범위가 넓고 각각의 용도에 부합하는 측정 조건이 다르기 때문에 측정 장치에 절대적으로 의존하고 있는 국내 자성재료 평가기술은 대부분 외국 관련 업체 및 국가 규격 등에 의존하고 있는 실정이다.

이번 특집 review에서는 자성재료의 광범위한 응용분야 및 측정방법 중에서 최근 통신기기 및 전자파 흡수체용 소재로서의 응용 범위가 넓은 연자성 세라믹스를 중심으로 자화 특성 평가의 원리와 특성 평가방법 중에서 VSM을 이용한 자화 측정에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. 자화 과정 (Magnetization Process)과 이력곡선 (Hysteresis Loop)

자성재료를 평가함에 있어서 가장 중요한 인자는 자기이력곡선 (magnetic hysteresis loop)에 대한 것들이다. 만일 어떤 자성재료가 특정 용도로 사용 가능한지의 여

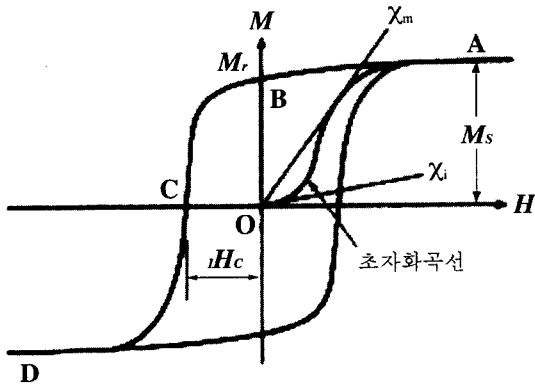


Fig. 5. Representative curves of M-H loop.

부는 자기이력곡선 즉, 인가 자장에 대해 변화하는 자화량에 의해 결정된다.

외부 자계에 대한 자성재료의 변화는 자구 (magnetic domain)와 자벽(magnetic domain wall)의 거동에 기인한다. 일반적으로 포화자화 상태에 도달하기 위해서는 자장의 크기에 따라 각 단계별로 자화의 과정을 거치게 된다(Fig. 4).

자성재료의 자화 상태는 자장의 세기와 방향의 함수로 표현되며, 인가되는 자장의 크기 및 방향에 따라 일정 크기의 케적을 형성하여 자기이력곡선(magnetic hysteresis loop)으로 나타나게 된다. 자장을 인가함에 따라 자성재료내에서는 자벽(magnetic domain wall)의 가역적인 거동을 하게 된다. 자장을 제거하면 자구의 경계는 원위치로 돌아간다. 자성체에 자장을 인가할 때, 자장(H)과 자성체 전체의 자화 크기(M)와의 관계를 나타낸 것(Fig. 5)이 M-H 곡선(hysteresis loop)이고, 최초의 상태 O 지점에서 $H=0, M=0$ 의 상태를 소자(消磁) 상태라고 한다. 인가되는 자장에 대한 자화의 증가 변화율을 자화율(χ)이라고 하고, 아주 작은 자화율을 초기자화율(χ_i)이라고 하는데, 이 자장의 범위에서는 $H=0$ 이 되면 $M=0$ 으로 되는 가역적(reversible)인 자화 과정에 해당된다. 그러나, 그 이상 크기의 자장에서는 $H=0$ 이 되어도 $M=0$ 으로 되지 않는 비가역적(irreversible)인 자화 과정을 거치게 된다. 포화 상태에서 자장을 감소시켜도 $M=0$ 이 되지 않고, B 지점에 이르게 되어 OB 만큼의 자화가 남는다(M_r). 그 다음에 자장의 방향을 반대로 하여 증가하면 M은 감소하여 C점에 도달하게 되는데,

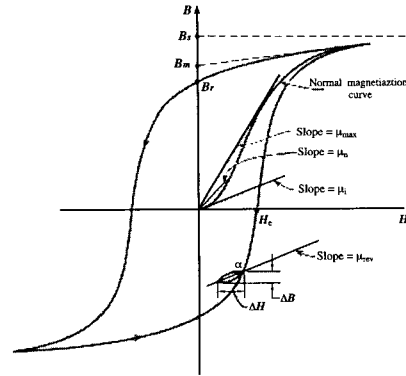


Fig. 6. Magnetization characteristic and B-H hysteresis loop caused by domain action.

이때 BC 곡선을 감자곡선(demagnetized curve)이라고 한다. 또한, OC 만큼의 자장을 보자력(H_c)이라고 하며, 음(negative)의 자장을 인가하면 D에 도달하여 반대 방향으로 포화되는 상태가 된다. M-H 곡선이 나타내는 면적에 해당하는 것을 이력손실(hysteresis loss)라고 한다.

한편, 자화 M 대신에 자속밀도($B=M+\mu_0H$)로써 나타낸 것을 B-H 곡선(Fig. 6)이라고 한다. 자성체 내부에는 외부 자장과 자화에 의한 자장이 발생하여 실용상으로는 이 두가지를 합한 자속밀도(B)값을 택하는 것이 중요한 의미를 갖는다. 앞서 설명한 바와 같이 B-H 곡선의 시작 부분으로 slope μ_i 가 형성되는 구간은 가역적인 자벽이동에 의한 것으로서 이때의 기울기를 초기투자율(initial permeability)이라고 한다.

3. 교류 자화 특성

3.1. 페라이트의 투자율 측정 원리

각종 전자기기에 대한 응용 주파수 대역이 높아지게 되어 이에 사용되는 연자성재료에 대한 저손실 및 고투자율의 특성이 요구되고 있다. 일반적으로 자성재료에 대한 자기적 특성은 그 재료의 원자 구조에 의한 스핀 모멘트의 거동 기인하여 변화한다. 자성재료는 외부에서 자장을 인가함으로써 발생하는 비직선적 자기유도량을 검출하여 그 특성을 평가한다. 또한, 고주파용 스피널 페라이트는 주로 transformer, inductor용 소재로서 사용되므로, 주파수 의존성에 대한 물성 평가는 매우 중

요한 의미를 갖는다.

자속밀도는 전류에 비례하고, 시편의 형태 및 치수에 의존한다. 또한, 전류가 흐르는 loop의 면적과 교차하는 전체 자속 Φ 는 자속 밀도 B 와 loop의 면적 A 와의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi = B \cdot A = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot l \cdot \sin \theta}{4\pi \cdot r^2} \cdot i \quad (1)$$

$$= L \cdot i \text{ [Weber]} \quad (2)$$

단, μ_0 : 진공의 투자율, l : 권선 길이 [m],
 r : toroid 시편의 반경, i : 도선에 흐르는 전류 [A]

식(1)과 (2)에서 보면, 인덕턴스 L 은 loop의 형태와 재료의 특성 변화에 의존함을 알 수 있다. 코일에 교류 자장이 흐르면 Faraday 법칙에 따라 일정 전압이 유도되는데, 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$v = -L \cdot \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad (3)$$

식(3)에서 음(negative)의 부호가 갖는 의미는 전류에 따라 유도되는 전압 v 는 전류의 방향과 반대 방향으로 발생한다는 것이다. 즉, 유도 기전력에 의해 전류의 흐름이 방해받게 됨을 의미하는 것인데, 이때 유도되는 전압의 크기는 자성재료의 인덕턴스 변화에 의존함을 알 수 있다.

스피넬 페라이트를 비롯한 연자성재료의 특성 평가에 있어서는 대부분 toroid형 시편을 사용한다. 일반적으로 toroid 형태의 시편에 대한 자속의 흐름은 폐회로의 상태이기 때문에 공기중으로 누설되지 않으므로 시편 전체에 걸친 균일한 자속 분포를 얻을 수 있으며, 공기중으로 발산되는 자속을 막아주기 때문에 측정시의 오차를 최대한 줄여줄 수 있다. 그러나, toroid 시편에 대한 자속의 흐름은 외경과 내경간의 경로차이가 발생하게 되므로 정확한 자속의 경로(또는 자로, magnetic flux path)를 설정해야 한다. 따라서, toroid 시편의 최외곽을 흐르는 자로와 최내곽을 흐르는 자로의 중간 경로를 평균 자로라고 하는데, 이 경우에 시편의 형상에 대한 자

장의 세기는 다음과 같이 표현된다.

$$H = \frac{N \cdot i}{l_t} \text{ [A/m]} \quad (4)$$

단, N : toroid 시편의 권선 수, l_t : 평균 자로

전류에 의한 자속의 흐름에 의해 형성된 자기 회로의 개념을 일반적인 전기 회로와 비교해 보면, 전압에 해당하는 항으로서의 magneto- motive force F_m , 전류의 역할을 하는 magnetic flux Φ 이 있다.

$$F_m = \Phi \cdot R_m \quad (5)$$

여기서, F_m 과 Φ 사이에는 저항 성분으로서 magnetic resistivity R_m 이 존재하게 됨을 알 수 있다. 식(5)에서 F_m 은 코일의 권선 수와 전류에 비례하므로 다음의 관계가 성립한다.

$$F_m = N \cdot i \quad (6)$$

따라서, R_m 은 식(7)으로 나타낼 수 있다.

$$R_m = \frac{l_t}{\mu \cdot A} \quad (7)$$

(단, μ : 투자율, A : 권선된 자성체 부분의 단면적)

투자율은 외부 인가 자장에 따라 유도되는 자속의 비를 의미하고, 권선 수가 증가하면 자속 Φ 의 양도 증가하므로, 식(2)의 관계를 이용하면, 인덕턴스 L 은 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{i} = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l_t} \quad (8)$$

여기서, 식(8)을 시편에 대한 인덕턴스 값이라고 하면, 진공 중에서의 인덕턴스는 $L_0 = N^2 \cdot \mu_0 \cdot A / l_t$ 가 되므로, 비투자율의 관계로부터 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\mu}{\mu_0} = \mu_r \quad (9)$$

이와 같이 계산된 μ_r 에 대한 인가자장 또는 주파수 값의 설정은 초기 자화 곡선의 가역적인 영역에서 이루어져야 하며, 그 경우의 투자율을 초기투자율(μ_i)이라고 한다.

투자율의 측정 방법은 권선을 1차만 사용하는 self inductance 방법과 maxwell bridge, vector impedance meter에 의해 inductance (L)을 측정하고 위의 식(9)에 의해 비투자율을 계산한다. 측정 설비의 대부분은 전압 변환이 가능한 LCR meter, impedance analyzer 등이므로, 초기투자율을 측정할 때 초기 자화곡선의 가역적인 (reversible)영역에 해당하는 자장이 인가되도록 해야한다. 또한 투자율값은 주파수 의존성이 크기 때문에 주파수 변화에 따른 투자율의 변화가 페라이트의 응용 특성을 해석하는 데 중요한 역할을 한다.

3. 2. 페라이트의 자성 손실

일반적으로 연자성 재료의 이상적인 특성은 고투자율 이면서 손실이 낮은 경우이다. 그러나 주파수에 따라 자화 과정의 변화가 발생하여 손실과 공명 현상 등에 영향을 미치게 된다.

교류자장 $H=H_0 \cos \omega t$ 를 자성체에 가하면 저주파수 영역에서는 H 와 B 의 위상이 일치하며, 자속밀도는 $B=B_0 \cos \omega t$ 로 나타낼 수 있다. 단, H_0 와 B_0 는 각각 시간 $t=0$ 일때의 값에 해당한다. 그러나, 고주파수 영역에서는 자속밀도와 자장의 변화사이에 위상차 δ 가 발생하게 되며, 이때의 자속밀도는 $B=B_0 \cos(\omega t - \delta)$ 로 된다. 이때 자장과 자속밀도를 지수함수의 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$H=H_0 \cdot e^{j\omega t} \quad (10)$$

$$B=B_0 \cdot e^{j(\omega t - \delta)} \quad (11)$$

한편, B/H 는 투자율 μ 가 되므로

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (12)$$

$$= \frac{B_0 \cdot e^{j(\omega t - \delta)}}{H_0 \cdot e^{j\omega t}} \quad (13)$$

$$= \frac{B_0}{H_0} \cdot e^{-j\delta} \quad (14)$$

$$= \frac{B_0}{H_0} \cos \delta - j \frac{B_0}{H_0} \sin \delta \quad (15)$$

와 같이 복소수식으로도 표현할 수 있다. 여기서 실수 부분과 허수부분을 각각 $\mu' = (B_0/H_0)\cos\delta$, $\mu''=(B_0/H_0)\sin\delta$ 라고 하면, 복소투자율은 다음과 같은 식(16)으로 나타낼 수 있다.

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (16)$$

μ' 는 H 와 같은 위상에 있는 B 성분에 관한 것으로서 일반적으로 말하는 투자율에 해당하고, μ'' 는 H 보다 90° 만큼 벗어난 위상을 갖는 B 성분으로서 에너지 손실에 해당하며, μ''/μ' 은 자성손실항을 의미한다.

일반적으로 주파수 변화에 의한 자성 재료의 손실은 이력 손실, 맴돌이전류 손실, 잔류 손실의 합으로 나타낼 수 있다. 이력 손실은 강자성체에서 반드시 존재하는 손실이며 자기이력곡선 면적에 비례하는 손실을 갖는다. 맴돌이전류 손실은 주파수에 비례하여 증가하는 손실이며 전기비저항에 반비례한다. 그러나 페라이트의 경우는 전기비저항값이 대체로 크기 때문에 와전류 손실이 크지 않으므로 고주파수 영역에서는 잔류 손실이 가장 중요하다. 페라이트의 잔류 손실은 자벽 이동에 의한 공명 또는 완화에 의한 손실, 자연 공명에 의한 손실 그리고 형상공명에 의한 손실 등이 있다.

페라이트의 자벽 공명은 외부 자장의 주파수가 자벽의 고유 진동 주파수에 근접할 때 발생하는데, 이때 자벽 이동에 의한 손실 계수 $\tan \delta$ 는 다음의 식(17)과 같다.

$$\tan \delta \approx \frac{\mu_r''}{\mu_r' - 1} = \frac{\beta \cdot \omega}{\alpha - m \cdot \omega^2} \quad (17)$$

여기서 μ_r' 과 μ_r'' 은 각각 복소투자율의 실수항과 허수항, α 는 복원력 인자, m 은 질량, β 는 제동 인자 그리고 ω 는 각주파수를 의미한다. 여기서 제동 인자 β 가 작을 때에는 공명 현상이 일어나서 μ_r'' 변화 곡선이 peak를 형성하게 되는 반면, β 가 크면 μ_r'' 변화가 완만한 완화형 스펙트럼으로 된다. 완화형은 공명형에 비하여 μ_r'' 의

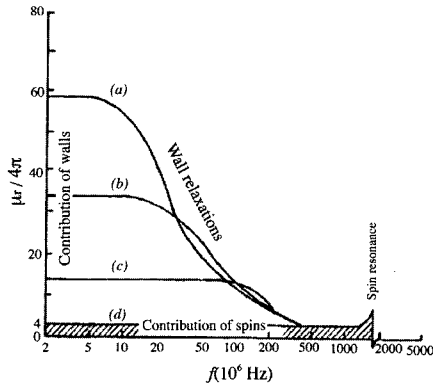


Fig. 7. Permeability spectra of NiFe₂O₄ samples with different grain size ; (a) 11 μm (b) 5 μm (c) 2 μm and (d) size < 0.2 μm (single-domain behaviour).

스펙트럼이 완만하며, μ_r'' 은 공명 주파수에서 최대값을 갖게 된다.

복소투자율의 주파수 의존성 변화 중에서 두 개의 공명이 나타남을 알 수 있는데, 저주파 대역에서 나타난 손실이 자벽 공명에 의한 부분이고 고주파 대역에서 나타난 손실은 자연 공명에 의한 것이다.

자연 공명은 물질 고유의 자기 이방성에 의하여 일어나는 현상으로서 자연 공명 주파수는 자기 이방성의 세기에 비례하게 된다. 자기 이방성에 의한 스핀의 공명 주파수 f_r 은 식(18)과 같다.

$$f_r = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\gamma \cdot H_A}{2\pi} \quad (18)$$

여기서 ω 는 각주파수, ν 는 전자의 자기 모멘트와 각운동량의 비, 그리고 H_A 는 물질에 따라 특정 값을 갖는 자기 이방성의 세기이다.

페라이트에 가한 자장의 주파수가 f_r 부근이면 spin의 세차(precession) 운동은 외부 주파수와 공명하여 에너지를 흡수하며 이때의 μ_r' 과 μ_r'' 은 공명형으로 변화한다.

일반적으로 스피넬 구조를 갖는 다결정 페라이트인 경우는 식(19)의 관계가 성립한다.

$$f_r (\mu_i - 1) = \frac{1}{3\pi\mu_0} \cdot \gamma \cdot I_s \quad (19)$$

여기서 f_r 은 자연공명주파수, μ_i 는 재료의 초투자율, μ_0 는 진공의 초투자율, I_s 는 포화자화를 의미하는데, $f_r \cdot \mu_i$

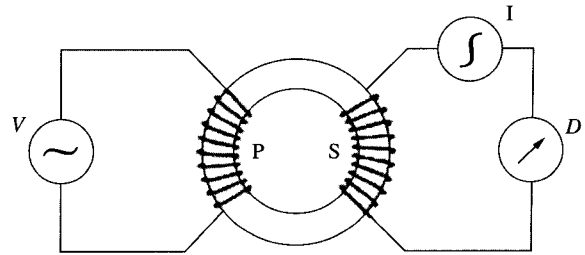


Fig. 8. Schematic diagram for experimental measuring of the toroidal sample.

가 I_s 에 비례하므로 I_s 가 거의 같은 물질에서는 μ_i 가 높을 수록 공명이 낮은 주파수에서 일어난다. NiZn 페라이트에 대한 μ_r' 과 μ_r'' 의 주파수분산특성은 자연공명현상에 의해 생겨나는 것으로서 페라이트 소재에 대한 고주파 손실의 주요 원인으로 작용한다. 이와 같이 스피넬 페라이트의 $f_r(\mu_i - 1)$ 는 일정한 값을 갖고 있어서 사용가능한 주파수 한계가 존재하게 되는데, 이를 Snoek의 한계(Snoek's limit)라고 한다.

이와 같은 페라이트의 초기투자율 값에 대한 주파수의 존성의 예를 Ni 페라이트 소결체의 grain size에 따른 변화(Fig. 7)로써 나타내었다.

4. 자화 측정 방법

앞의 2절에서 기술한 바와 같이 자화 과정에 대한 특성 평가는 이력 곡선으로부터 얻을 수 있는 포화자화(saturation magnetization), 보자력(coercivity), 잔류 자속밀도(remanent magnetic flux density), 최대에너지, 투자율(permeability) 및 자기 민감도(magnetic susceptibility) 등의 항목으로 이루어진다.

4.1. Induction Methods

자화 측정법은 크게 두가지로 구분된다. 첫째는 자성 재료 근처의 회로에 유기된 전류를 감지하는 방법이며, 또 하나는 불균질 자장의 상태에서 자성 재료에 작용하는 힘을 측정하는 방법이다. 이 방법은 탈자장(demagnetization field) 때문에 문제가 생긴다. 일반적으로 시편에 작용하는 자장은 인가 자장(applied magnetic field) 과 탈자장의 합이며, 이들 두 자장은 서로 반대 방향으로

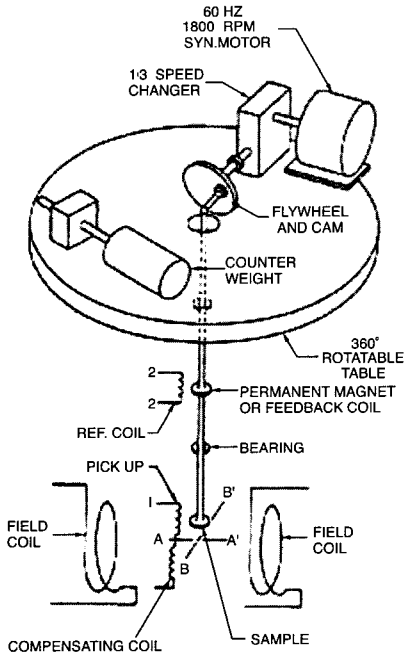


Fig. 9. Schematic diagram of a vibrating-sample magnetometer.

로 존재하기 때문에 유효 자장(effective magnetic field)은 인가 자장보다 훨씬 작게 된다. 만일, 측정 시편의 형태가 toroid 형태와 같이 탈자장이 없는 모양으로 된다면 이러한 문제를 피할 수 있으며, Fig. 8에 측정원리를 나타내었다. 즉, Faraday 유도 법칙에 의해 2차 코일에 유기된 기전력은 시료를 통과하는 자속 Φ 의 변화율과 같다. 그 자속은 시편의 자기 유도 B 에 비례한다.

여기서, 각각의 항목으로서, P는 1차 코일, S는 2차 코일, I는 지시계, V는 전류 source, D는 검출기, N은 코일의 감은 횟수 그리고 A는 시료의 단면적을 나타낸다.

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NA \frac{dB}{dt} \quad (20)$$

그러나, 걸리는 자장은 1차 코일에 흐르는 전류에 비례한다. 따라서, B값을 정확하게 측정하기 위해서는 2차 코일에 흐르는 전류가 적분되어야 하는데, 이 경우는 큰 자장을 걸어줄 수 없기 때문에 비교적 낮은 자장으로 자화되는 연자성재료의 측정에 적합하다.

이런 코일 방법은 알고 있는 단면적 A 로부터, 코일을 통해 지나가는 자속 Φ 를 측정하여, 유도자기 B 를 알 수 있다는 것이 주목할 점이다. 코일 안에 높은 투자율의 코어를 집어넣는 것으로 H 가 일정하게 유지되는 동안 B 가 증가한다면 유도 전압은 증가하게 될 것이다. 물론 자유 공간에서는 $B = \mu_0 H$ 이므로

$$V = -\mu_0 NA \frac{dH}{dt} \quad (21)$$

로 나타낼 수 있다.

4.2 Vibrating-sample Magnetometer (VSM)에 의한 측정

Vibrating-sample magnetometer (VSM)은 샘플이 코일 대신에 움직이는 것을 제외하면 vibrating-coil magnetometer의 원리와 동일하다. VSM은 Foner에 의해 처음 고안되었고, 현재는 vibrating-coil 장치를 거의 완벽히 대신할 수 있다. VSM은 시편이 있는 곳과 없는 곳의 자기 유도의 차이를 측정하는 자기 측정기이다. 그 결과 자화 M 을 직접 얻을 수 있다. 일반적인 VSM의 개략도는 Fig. 9와 같다. 일반적으로 시편은 전자기적 극성 사이에 다소 작게 고정시켜야 한다. 이 방법은 일반적인 경우에서 작은 시편으로 인한 demagnetizing 효과로 인하여 자화 곡선이나 자화 이력곡선의 측정이 용이하지 않다. 그러나 포화 자화 M_S 의 측정은 용이하다. 고정된 주파수에 의한 교류 신호의 탐지는 lock-in amplifier를 사용하여 측정할 수 있다.

연구 자석과 reference pick-up coil에 사용되는 reference 신호는 그림에서처럼 lock-in amplifier에 의해 공급되어진다. $5 \times 10^4 \text{ Am}^2$ ($5 \times 10^{-5} \text{ emu}$) 정도의 작은 자기 모멘트도 VSM으로 측정이 가능하며, 그 오차는 2% 정도이다. 즉, VSM은 시편을 일정주파수로 진동시켜 detection coil에 유기(induction)되는 교류 기전력을 lock-in amplifier로 검출하여 자기모멘트를 측정하는 장치이며, 측정 중 영점의 이동이 없고 측정 감도(sensitivity)가 높아서 약자성 또는 강자성 재료에 대한 자화량의 측정에 적합하다. 또한, open magnetic circuit 내에서의

측정이 이루어지므로 온도에 따른 자기모멘트의 측정이 용이하다는 장점을 갖고 있다.

5. 맺음말

이번 특집에는 자성재료의 자화 특성 평가에 대한 원리를 소개하고자 하였으나, 방대한 분야의 내용 중 introduction에 해당하는 일부분만을 기술하였습니다.

21세기에는 각종 전자 기기의 소형화 및 경량화의 추세에 따른 관련 소재 형태가 다양화됨에 따라 각 분야별 재료의 응용에 대한 특성 평가 방법에 대한 표준화의 연구가 선행되어야 할 것으로 기대된다. 특히, 최근에는 bulk형 소자 뿐 아니라 차세대형 자기 소자인 후막 및 박막형 재료에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있는 추세여서 향후 자성재료 응용에 대한 특성 평가 방법의 재현성 및 일반화를 위해서는 이러한 기초적인 원리 및 측정 방법을 토대로 보다 많은 실험 결과의 축적이 필요할 것으로 생각된다.

자성재료의 특성 평가 이론의 대부분은 고체물리학과 전자공학 및 계측공학이 함께 조화를 이루고 있으며, 이들 기초 이론을 중심으로 보다 정밀한 계측 장비 및 측정 방법이 개발될 때 가장 정확한 결과의 측정 및 예측이 가능하다고 생각한다. 또한, 응용 분야가 주로 전자 및 전기 기기의 활용에 집중되어 있어서 고성능화가 요구되는 실정이기 때문에 재료공학적인 면에서도 측정 결과의 재현성 및 정밀도를 요구하기에는 아직도 미흡한 부분이 없지 않은 상황이다. 따라서 자성재료의 평가는 단순한 특성 측정이 아니라 연구 개발의 신뢰성을 높이는 역할을 하기 때문에, 자성재료 관련 분야 전공자 및 업체 전문가들이 중심으로 자체 평가 기술 개발을 위한 연구가 좀 더 많이 수행되었으면 합니다.

참고 문헌

1. 平賀貞太郎, 奥谷克伸, 尾島輝彦, フェライト, 丸善株式会社, pp. 9~124 (1986).
2. James J. Brophy, *Basic Electronics For Scientists*, 2nd

Ed. (1983).

3. 電子材料工業會編, 電子技術者のためのフェライト應用技術, 誠文堂新光社, pp.45~296(1972).
4. Allan H. Morrish, *The Physical Principles of Magnetism*, John Wiley & Sons, Inc. (1965).
5. 金子秀夫, 本間基文, 磁性材料, 日本金屬學會, pp.3~141(1977).
6. 太田惠造, 磁氣工學の基礎 II, 共立全書, pp. 217~379(1976).
7. J. Verweel, "Ferrites at Radio Frequencies," *Magnetic properties of materials*, Inter-University Electronics Series, Vol.13, Ed. by Jan Smit, McGraw Hill Book Co., pp. 64~237(1971).
8. G. T. Rado, R. W. Wright and W. H. Emerson, "Ferromagnetism at Very High Frequencies : III . Two Mechanism of Dispersion in a Ferrite," *Phys. Rev.*, **80**(2), 273~280(1950).
9. 조성일, 손홍재, 허원도, "연자성재료의 교류 자기 특성평가 방법," *요업기술*, **10**(4), 343(1995).
10. Raul Valenzuela, *Magnetic Ceramics*, Cambridge University Press (1994).
11. L. L. Hench and J. K West, *Principle of Electronic Ceramics*, John Wiley & Sons (1990).
12. 조대형, 손대락, "자성재료의 자기특성평가기술," *요업기술*, **11**(6), 467 (1996).
13. 양충진, "자성재료의 기술개발 동향," *전기전자재료학회지*, **13**(11), 1 (2000).
14. David Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, Chapman and Hall (1991).
15. B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley Co. (1972).
16. 김영희, *자기 및 자성재료*. 반도출판사(1997).



남 중 희

- 1997년 인하대학교 공학박사
- 1997년 Materials Reserach Center,
- 1999년 Univ. of Missouri-Rolla 연구원
- 1999년 인하대학교 소재연구소
- 2000년 전임연구원
- 2000년 요업기술원 전자소재·부품팀
- 현재 선임연구원