

## 반자장계수를 고려한 자성분말의 초투자율 측정에 관한 연구

### A Study on measuring the Initial Permeability of Magnetic Powder considered Demagnetizing factors

전 홍배\*, 허 진\*, 김 철한\*, 사 공건\*

\*동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

Hong-Bae Jun\*, Jin Heo\*, Chul-Han Kim\*, Geon Sa-Gong\*

Dept. of Electrical, Electronic & Computer Engineering, Dong-A University

#### Abstract

In this study, A equipment for measuring the initial permeability of soft-ferrite powder was developed by using a differential transformer coil, and was investigated demagnetizing factors. To measure the initial permeability of magnetic ceramic powder is cumbersome since there are not any measuring equipment and method. Magnetic powder is currently used for a magnetic fluid and microwave absorber materials, and the initial permeability of the magnetic powder is very important to be evaluated a powder for some applications.

**Key Words(중요용어)** : Initial Permeability, differential transformer coil, demagnetizing factor, Magnetic fluid, Microwave absorber

#### 1. 서 론

자성분말의 자기적 특성은 결정자기이방성과 형상자기이방성에 의해 주로 결정되기 때문에 조성비, 제조방법 및 다른 인자들에 의해 달라지므로 자성분말 특성<sup>[1]</sup>의 재현성에 있어서 중요하다. 그리고 자성유체, 전파흡수체 등은 자성분말 자체가 제품에 직접 사용되므로 자성분말의 자기적 특성은 품질관리 측면에서 매우 중요하다.

자성분말의 자기적 특성 중 초투자율에 관한 측정은 자성분말 자체의 사용이 극히 제한되어 있어서 그 동안 측정방법에 어려움이 있었다. 일반적으로 자성분말의 초투자율 측정을 위해 진동시료형 자력계(VSM)<sup>[2]</sup>가 이용되었으나 장치가 복잡하고 진동에 약하며 매우 고가인 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 Toroid Type의 시편에 코일을 감은 후 시편의 자기 인덕턴스를 측정하여 초투자율을 계산하는 방법이 있다. 이 방법 또한 Toroid Type의 시편을 만들기 위해 지그를 제작하고 압축성형하여 코일을 감아야 하는 난점을 가지고 있다.

본 연구에서는 자성분말의 초투자율을 빠르고 연속적으로 측정하기 위한 방법을 제안하고자 하며 자기추정 시 자성분말 내부에 작용하는 반자장(Demagnetizing field)<sup>[3]</sup>에 대한 연구를 행하였다.

#### 2. 측정원리 및 제작

##### 2.1 측정원리

본 연구에서는 자성분말의 초투자율을 측정하기 위해 전자기유도법을 이용한 단순한 방법에 대해 기술한다.

패러데이 법칙(Faraday's law)에 의하여 코일을 통과하는 자력선  $\Phi$ 의 변화는 코일에 기전력(emf)을 유기시키는 데, 이 emf는 식 (1)과 같이 자속의 변화율과 권선수 N에 비례한다<sup>[3]</sup>.

$$emf = -N \frac{d\Phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

여기서, B는 자속밀도, S는 코일의 단면적이다. 만약, 코일 안에 자성체가 있는 경우에 자속밀도는 식 (2)와 같이 유기기전력은 증가하게 된다.

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 \mu_r H \quad (2)$$

여기서 H는 자계, M은 자기 쌍극자 모멘트,  $X_m$ 은 자화율,  $\mu_0$ 는 공기중의 투자율,  $\mu_r$ 은 비투자율이다. 그런데, B/H가 선형적인 관계를 나타낼 때의 투자율을 초투자율  $\mu_i$ 라 하며 식 (2)는 다음의 식

식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_0 \mu_i H \quad (3)$$

식 (3)를 이용하면 공기 중에 있는 코일에 발생하는 유기기전력  $emf_{\text{공기}}$ 와 자성물질이 들어 있는 코일에 발생하는 유기기전력  $emf_{\text{물질}}$ 는 식 (4), (5)로 나타낼 수 있다.

$$emf_{\text{공기}} = -NS \frac{dB}{dt} = -NS \frac{d}{dt} (\mu_0 H) \quad (4)$$

$$emf_{\text{물질}} = -NS \frac{dB}{dt} = -NS \frac{d}{dt} (\mu_0 \mu_i H) \quad (5)$$

따라서, 초투자율은 식 (6)에 의해서 구할 수 있다.

$$\mu_i = \frac{emf_{\text{물질}}}{emf_{\text{공기}}} \quad (6)$$

## 2.2 반자장계수

반자장  $H_d$ 는 그것을 생성시키는 자화  $M$ 의 반대 방향으로 작용한다. 솔레노이드에 의한 인가자장  $H_a$ 는 시료에 작용하는 진자장(true field)  $H$ 를 얻기 위해서 식 (7)과 같이 반자장 효과를 고려해야 한다.

$$H = H_a - H_d = H_a - N_d M \quad (7)$$

여기서  $N_d$ 는 반자장계수이며  $N_d$ 는 주로 물체의 형상에 의존한다.

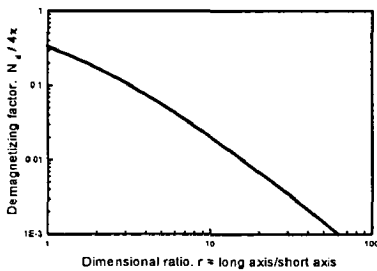


그림 1. Magnet 치수 비  $r$ 에 따른 반자장계수  $N_d/4\pi$

반자장계수의 값은 많은 조사 연구로부터 Bozorth<sup>[3]</sup>에 의해 선택되어졌으며  $N_d/4\pi$ 의 값으로

그림 1과 같이 나타내어진다. 즉, Magnet 치수비  $r$  (Magnet 길이에 대한 직경비  $r = \text{long axis}/\text{short axis}$ )에 따라 다르며 치수비가 클수록, 다시 말해 얇고 길수록, 반자장계수는 작아지며  $r$ 가 무한대로 커짐에 따라 반자장계수는 0(零)에 접근한다.

## 2.3 측정장치의 제작

그림 2는 초투자율 측정을 위해 자체 제작한 것으로서 초투자율을 측정하기 위한 분말 상태의 자성체가 들어 있는 작은 솔레노이드 코일과 공기중의 초투자율을 측정하기 위한 보상용 솔레노이드 코일을 자속(magnetic flux)을 형성하는 큰 솔레노이드 코일 안에 넣어 자속이 변할 때 작은 솔레노이드 코일과 보상용 솔레노이드 코일에 나타나는 유기기전력의 변화를 이용하여 분말 상태 자성체의 초투자율을 구한다.

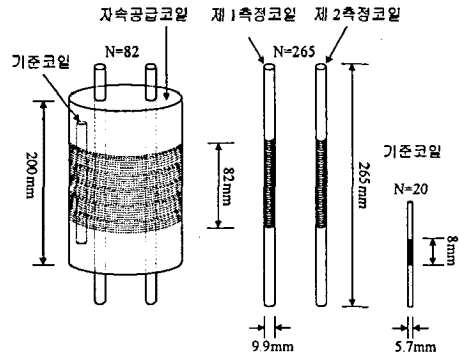


그림 2. 초투자율 측정장치

초투자율 측정장치는 자속 공급코일, 제1 측정코일 및 제2 측정코일로 구성되어 있으며, 자속 공급코일은 초투자율 측정을 위해 필요한 자속을 공급한다. 제1 측정코일은 초투자율을 측정하기 위한 물질이 삽입되어 자속 공급코일에서 자속이 공급될 때, 이 자속과 측정 물질에 의하여 제1 유기기전력을 발생시킨다. 제2 측정코일은 제1 측정코일과 기하학적 치수와 권선수가 같고 제1 측정코일과 평행하게 위치되어 자속 공급코일로부터 제1 측정코일과 동일하게 자속을 공급받는다. 이 때 제2 측정코일에는 아무런 물질이 삽입되어 있지 않아서 제1 측정코일에서 발생하는 유기기전력의 기준 전위를 형성한다. 기준 코일은 자속 공급코일로부터 자속을 공급받아 공기 중에서의 유기기전력을 발생시킨다.

위에서 언급한 측정값은 교류 자장 속에 코일의

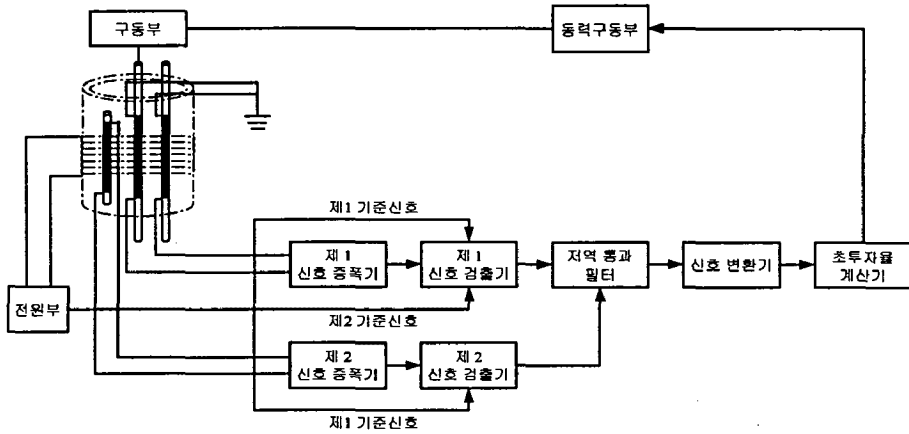


그림 3. 초투자율 측정 시스템의 블록도

권선수와 기하학적 치수에 따라 유기기전력으로 표현되며 반경  $R$ 과 길이  $l$ 를 가진 솔레노이드 코일의 자기장은 식 (8)과 같이 나타내어진다.

$$B = \frac{\mu_0 N i}{l} \quad (8)$$

정확한 측정을 위해서는 솔레노이드 코일의 중심에 시료가 중심축 상의 가운데에 위치시키기 위해 코일을 수직으로 놓았을 때 시료를 담은 용기를 실로 연결하여 상하 이동이 가능한 구조로 제작하였다. 이러한 형태는 시료를 정확한 위치에 놓이게 할 수 있을 뿐만 아니라 시료 측정을 신속하게 행할 수 있다.

이러한 장치와 더불어 측정할 계측기의 구성은 다음과 같다.

전원부는 자속 공급코일의 두 개의 단과 연결되어 자속 공급코일에 전류를 공급하고 제1 유기기전력에서 특정 신호를 검출하기 위한 두 개 이상의 기준 신호를 출력하며, 전체 시스템에 전원을 공급한다.

제1 신호증폭기는 차동증폭기로서 한쪽 단이 제1 측정코일의 다른 한쪽 단과 연결되고, 다른 한쪽 단은 제2 측정코일의 다른 한쪽 단과 연결되어 제1 측정 코일에서 유기되는 제1 유기기전력과 제2 측정코일에서 유기되는 제2 유기기전력을 입력받아 제1 유기기전력과 제2 유기기전력의 차이에 해당하는 전압을 증폭한다.

제1 신호검출기는 위상 검파기(Phase sensitive detector)로서 기준 신호를 전원부에서 입력받아 제1 신호 증폭기를 통하여 출력된 신호 중에서  $B/H$ 의 선형적인 부분의 신호와  $B/H$ 의 비선형적인 부분의

신호를 검출한다.

제1 신호증폭기에서 출력된 신호는 제1 신호 검출기를 거쳐 맥류가 되는 데 이 때 제1 신호 증폭기의 제1 기준 신호는 자속 공급코일에 흘린 전류의 위상과 동일하다. 따라서, 제1 신호 증폭기에서 출력된 신호 중 제1 기준 신호와 동일한 위상의 신호만이 그 크기가 증폭되어 검출된다. 제1 신호 검출기를 통한 맥류 신호는 저역 필터를 거쳐 직류 신호로 변환되고, 신호 변환기를 통하여 아날로그 신호에서 디지털 신호로 변환된 뒤 초투자율 계산기로 입력된다.

이 때, 자성체의 초투자율은  $B/H$ 의 선형 부분을 측정하는 것이므로 이를 초과하는 영역에서 형성되는 제1 측정 코일의 유기기전력은 비선형적인 신호 성분을 포함하게 된다. 따라서, 이 비선형적인 영역에서 제1 신호 증폭기가 출력하는 신호는 기준 주파수의 정수배의 주파수 성분이 나오는데 이중 가장 신호의 세기가 큰 제2고조파의 성분을 측정함으로써 비선형 부분을 체크할 수 있다. 즉, 전원부로부터 제1 기준 신호의 주파수의 2배에 해당하는 제2 기준 신호를 제1 신호 검출기에 인가하면 제1 측정 코일에서 출력된 유기기전력의 제2 고조파가 제1 신호 검출기에서 가장 크게 증폭되어 출력되고 저역 통과필터를 거치면서 직류로 변환된 다음 초투자율 계산기로 출력됨으로써 비선형 부분을 검출할 수 있다.

초투자율을 계산하기 위해서는 식 (6)에 의하여 공기 중에서의 유기기전력을 파악해야 하므로 기준 코일에서 출력된 유기기전력을 제2 신호검출기에서 선형적인 영역에서의 신호를 검출하고 이를 저역 통과 필터를 통하여 직류로 만든 다음 신호변환기에서 디지털 신호로 만들고 초투자율 계산기에서

초투자율을 계산한다.

이러한 과정을 통하여 자성체의 초투자율을 손쉽게 구할 수 있다.

초투자율  $\mu_i$ 의 계산은 식 (6)으로부터 식 (9)로 계산되어 진다.

$$\mu_i = \frac{\text{물체의 단위 부피당 단위권선 전압}}{\text{진공에 대한 단위 부피당 단위권선 전압}}$$

$$= \frac{\nu l_1 N V_1}{\nu_1 l N_1 V} \quad (9)$$

여기서,  $V_1$ 는 자성물질이 들어 있는 코일에 발생하는 유기기전력,  $V$ 는 공기 중에 있는 코일에 발생하는 유기기전력,  $N_1$ 는 측정용 코일의 권선수,  $N$ 는 보상용 코일의 권선수,  $l_1$ 는 측정용 권선의 길이,  $l$ 은 보상용 권선의 길이,  $\nu_1$ 는 자성체 분말의 부피, 그리고  $\nu$ 는 보상용 코일에 대한 부피를 나타낸다.

그림 3은 본 연구의 실시 예에 따른 자성체 이송장치를 부착한 초투자율 측정 시스템의 블록도이다.

### 3. 측정 및 고찰

#### 3.1 시료제조

본 연구에서 사용된 시료는 자체 제조한 Ni-Zn 페라이트로서 공침법에 의해 제조하였다<sup>[4]</sup>. 이때 출발원료는  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  및  $\text{ZnCl}_2$ 를 사용,  $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ 의 조성비가 되도록 칭량하여 수용액을 만든 후, 70(°C)로 유지되는 4 neck flask 내에서 교반기로 교반을 행하였으며 교반 중에 NaOH를 일정량 적하하여 pH를 조절하여 침전물을 얻었다. 침전이 완료된 후 공기를 주입하여 산화시켰다. 또 침전물 여액 중에 용해되어 있는  $\text{Cl}^-$ 이온을 제거하기 위해 증류수로 충분히 세척한 후, 공침물을 70(°C)로 유지된 건조기 내에서 24시간 동안 완전히 건조시켰다. 건조된 분말의  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 와 비정질상을 스피넬상(spinel phase)으로 만들기 위해 체 가름을 한 후 200(°C/hr)의 승온율로 1,100(°C)에서 2시간 동안 열처리하였다.

#### 3.2 초투자율 측정

Ni-Zn 페라이트 분말을 그림 4와 같은 용기에 질량을 0.1g에서 1.0g까지 0.1g씩 증가시켜 측정하였다. 질량의 증가시킬 때마다 측정에 사용된 용기의

long axis축의 길이를 측정하여 Magnet 치수비 r를 계산하였으며, 자성분말이 들어 있는 코일에 발생하는 유기기전력의 정확한 측정을 위해서 10번씩 반복실험을 행하여 그 평균값을 측정치로 취하였다.

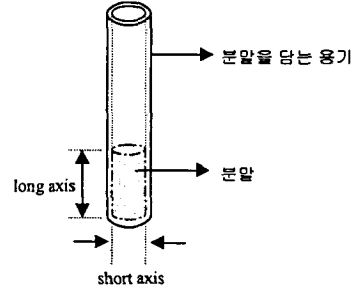


그림 4. 측정에 사용된 용기

공기 중에 있는 코일에 발생하는 유기기전력은 0.990mV이었으며 자성물질이 들어 있는 코일에 발생하는 유기기전력은 10번의 실험치의 평균치이며 자성 분말의 초투자율은 식(9)에 의해 계산하여 표 1에 나타내었다.

표 1 질량에 따른 초투자율

| 질량(g) | short (mm) | long (mm) | l/s   | V(mV)  | $\mu_i$ |
|-------|------------|-----------|-------|--------|---------|
| 0.1   | 4.8        | 4.5       | 0.937 | 1.017  | 1.992   |
| 0.2   | 4.8        | 7.8       | 1.625 | 2.852  | 3.223   |
| 0.3   | 4.8        | 11        | 2.292 | 4.666  | 3.739   |
| 0.4   | 4.8        | 14.5      | 3.021 | 6.773  | 4.118   |
| 0.5   | 4.8        | 17.7      | 3.688 | 9.125  | 4.544   |
| 0.6   | 4.8        | 21        | 4.375 | 11.557 | 4.851   |
| 0.7   | 4.8        | 23.3      | 4.854 | 13.520 | 5.115   |
| 0.8   | 4.8        | 27.8      | 5.792 | 17.050 | 5.406   |
| 0.9   | 4.8        | 31.2      | 6.500 | 19.284 | 5.448   |
| 1.0   | 4.8        | 34.4      | 7.167 | 21.797 | 5.586   |

1,100°C에서 하소한 Ni-Zn 페라이트는 질량이 증가할수록 자성물질이 들어 있는 코일에 발생하는 유기기전력은 증가되었고, 그림 5와 같이 초투자율은 Magnet 치수비에 따라 증가하다가 반자장계수가 작아짐으로써 약 6~7정도에서 포화하고 있음을 볼 수 있다.

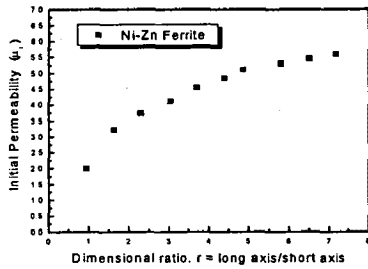


그림 5. Magnet 치수 비 r에 따른 Ni-Zn Ferrite의 초투자율

그림 6은 Bozorth에 의해 선택된 반자장계수를 바탕으로 진투자율(true permeability)이 5일 때 가시투자율(apparent permeability)과 Magnet 치수비에 따른 관계를 나타내고 있으며 Magnet 치수비가 증가함에 따라 가시투자율이 포화되고 있음을 알 수 있다..

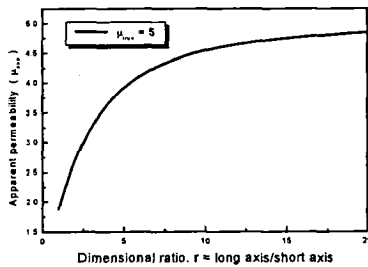


그림 6. Magnet 치수 비 r에 따른 가시투자율

본 연구에서 제작한 초투자율 측정장치로 1,100℃에서 하소한 Ni-Zn 페라이트 분말을 측정된 결과와 Bozorth에 의해 선택된 반자장계수를 근거로 하여 얻은 결과는 매우 근접하고 있다(그림 6). 따라서 반자장계수를 고려한 1,100℃에서 하소한 Ni-Zn 페라이트 분말 초투자율은 약 6~7정도임을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 자성분말의 초투자율 측정을 위해 자체제작한 차동트렌스 코일을 이용한 초투자율 측정기로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자성분말의 질량을 일정하게 증가시킬 경우

Magnet 치수 비가 증가하게 되면 반자장계수가 감소하게 되어 초투자율이 일정한 값에서 포화됨을 알 수 있었다.

2. 본 연구에서 제조한 1100℃에서 하소한 Ni-Zn Ferrite 분말의 초투자율은 약 6~7정도임을 알 수 있었다.
3. 솔레노이드 코일 속에 보상용 솔레노이드 코일을 위치시켜 보상해줌으로써 분말상태의 페라이트에 대한 초투자율을 정밀하게 측정할 수 있었다.

이상의 결과로부터 자성분말의 초투자율을 빠르게, 연속적인 방법으로 측정할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. Gornert, E. Sinn, H. Pfeiffer, W. Schuppel and M. Rosler, J. Mag. Soc. Jap., 15, pp. 669, 1991
- [2] S. Foner, Rev. Sci. Instrum. 30, pp. 548, 1959
- [3] B. D. Cullity, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 27, 1972.
- [4] 김한근, 사공건, "pH변화에 의한 Ni-Zn 페라이트의 자기적 및 전파흡수특성", Vol. 43, No. 8, pp. 1308~1322, 1994.