

희토류 영구자석의 자성측정을 위한 고감도 펄스마그네토미터

김윤배*

한국표준과학연구원 전자기표준부, 대전광역시 유성구 도룡동 1

G. A. Kapustin

RRC Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia

(2005년 8월 1일 받음, 2005년 8월 16일 최종수정본 받음)

8 MA/m급 펄스자석과 픽업코일, 아날로그 전자적분기, 계수기록형 오실로스코프, 퍼스널컴퓨터 등을 이용하여 펄스고자장에서 자성을 정밀 측정할 수 있는 펄스마그네토미터를 구성하였다. 픽업코일은 작은 공간에서 정밀측정이 가능하도록 3축보상원리를 채용하여 제작하였으며 펄스자장에 대한 신호 보상은 10^{-6} 수준이었고 적분기와 오실로스코프를 거친 후의 최종 자기모멘트의 측정감도는 $5 \cdot 10^{-7} \text{ Am}^2$ 이었다. 본 실험을 통하여 구성된 펄스마그네토미터는 지름 3 mmφ 이하의 소형 및 박막형 희토류 영구자석의 특성평가에 적합하였다.

주제어 : 펄스마그네토미터, 펄스자석, 3축보상, 희토류자석

I. 서 론

영구자석은 기계적에너지를 전기적에너지로 변환시키거나 전기적에너지를 기계적에너지로 변환시키는 트랜스듀서의 기능을 갖으며 각종 전기 및 전자기기의 핵심소자로 응용된다. 이들 영구자석에 대한 특성평가법은 국제표준규격 IEC60404-5[1]에 그 측정법이 상세히 기술되어 있는데 이는 전자석을 이용하여 측정하고자 하는 시험편이 폐자기회로(closed magnetic circuit)를 이루도록 구성한 다음 탈자화곡선(demagnetization curve)을 그리고 그로부터 보자력(H_{cb} , H_{cb}), 잔류자속밀도(B_r) 및 최대자기에너지적(BH_{max})을 산출토록 되어 있다. 이 방법은 측정 중에 반자장(demagnetizing field)이 형성되지 않으므로 원리적으로 정확한 측정이 이루어지는 장점이 있으며, 보자력이 비교적 작은 알니코자석과 산화물자석(바륨페라이트, 스트론튬페라이트) 등의 평가에 사용되고 있다.

그러나, 최근 수요가 증가하고 있는 NdFeB 및 SmCo 계열의 영구자석은 통상 0.8~2.4 MA/m(10~30 kOe)의 높은 고유보자력을 띠고 있어 전자석만을 이용하여서는 측정이 불가능하다. 이와 같이 영구자석이 고보자력을 띠는 경우, IEC60404-5에서는 시험편을 자기적으로 포화시킬 수 있는 고자장(초전도자석 혹은 펄스자석)을 이용하여 착자시킨 다음 전자석을 이용하여 측정하는 방법을 권고하고 있다. 그러나 이 방법은 시험편의 보자력이 전자석의 인가자장보다 큰 경우 보자력 측정이 불가능하고, 고자장을 이용하여 착자시켰다 하더라도 전자석을 이용하여 측정되는 탈자화곡선은 사실

상 마이너루프라는 점, 그리고, 경우에 따라 전자석 자극의 포화에 따른 자기이력곡선의 제1상한에서의 비정상적인 측정에 의하여 포화자속밀도를 알 수 없다는 문제점이 있다.

따라서, 국제전기규격위원회에서는 이러한 문제점을 보완코자 펄스고자장을 이용한 새로운 영구자석 측정법의 표준화를 진행하고 있다[2]. 본 논문에서는 이와 같은 국제적 추세에 부응하여 펄스고자장을 이용한 자성측정기술을 연구하였으며 그 결과를 서술하고자 한다.

II. 펄스마그네토미터의 구조

2.1. 측정원리 및 구조

펄스자장중에서의 자장 및 자기모멘트 측정에는 자기유도법을 이용하였다. 탐지코일에 펄스자장을 인가하거나 탐지코일 중에서 자기모멘트가 변화하면 Faraday induction 법칙에 따라 자장을 측정하기 위한 H-coil 및 자기모멘트를 측정하기 위한 m-coil에는 각각 식 (1) 및 식 (2) 와 같은 기전력이 유도된다.

$$V_H = -C_H \cdot dH/dt \quad (1)$$

$$V_m = -C_m \cdot dm/dt \quad (2)$$

여기에서, C_H 및 C_m 은 각각 H- 및 m-coil의 코일상수에 해당하며 펄스자장 및 자기모멘트는 위 식 (1) 및 (2) 를 적분하여 구할 수 있다. 측정신호의 적분에는 탐지코일에서 측정된 전압을 컴퓨터를 이용하여 소프트웨어적으로 수행하는 방법(digital integration)과 전자적분기를 이용하여 수행하는 방

*Tel: (042-868-5161), E-mail: ybkim@kriss.re.kr

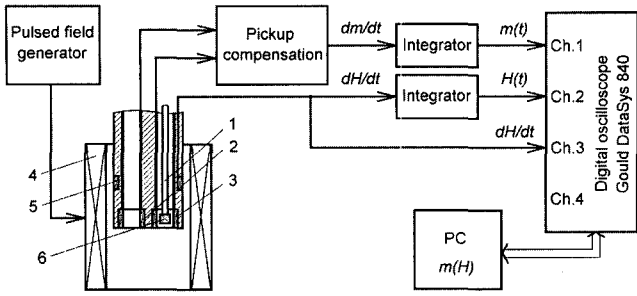


Fig. 1. Schematic diagram of 8 MA/m-class PFM.

법(analog integration)이 있다.

Fig. 1은 본 실험에서 구성된 펄스자기네트미터(PFM)의 개략도로써 펄스자장은 커패시터뱅크와 스위치로 구성된 pulse generate에 충전된 전기에너지를 솔레노이드 (4)를 통하여 방전시킴으로써 생성시킨다. 자기모멘트 측정을 위한 m-coil (3)은 솔레노이드 중심에 위치하며 동일한 코일상수를 갖는 보상용 코일 (2)과 반 직렬로 연결되어 원리적으로 시험편 (6)의 신호만이 검출되도록 하였다. 펄스자장은 시험편의 영향을 피하기 위하여 시험편으로부터 일정 거리 떨어진 곳에 위치한 H-coil (5)를 이용하여 측정한다. m-coil 및 H-coil에 검출된 신호는 전자적분기에 의하여 적분되며 이 적분신호를 digital storage oscilloscope로 기록시킨 다음 컴퓨터로 이송시키어 자기이력곡선을 산출토록 하였다. 한편, 펄스자장을 생

성하는 솔레노이드는 수냉형으로 안지름이 25.4 mm이고 코일 길이가 70 mm이며 3 kV-4 mF-18 kJ 커패시터뱅크에 연결되어 최대 8 MA/m(약 100 kOe), 반주기 5.1 ms의 사인감쇄형 펄스자장을 생성토록 되어있다. Fig. 2에 구성된 펄스자기네트미터의 실물사진을 나타내었다.

2.2. 탐지코일

자기모멘트 측정을 위한 m-coil(안지름=5.14 mmφ, 바깥지름=5.8 mmφ, 길이=5.04 mm)은 정밀 보상을 위하여 3축-보상원리를 채용하였다. Fig. 3은 제작한 m-coil의 측정감도를 평가하기 위하여 시험편이 없는 상태에서 5분 간격으로 펄스자장을 인가하면서 m-coil에 측정되는 자기모멘트 신호를 조사한 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 처음 4회의 펄스동안 큰 잡음신호가 관측되며 이는 펄스자장에 의한 픽업코일의 온도상승에 기인한 불안정성으로 생각된다. 그러나, 이후 연속되는 펄스에서 m-coil에 유기되는 잡음신호는 인가펄스자장 6 MA/m에서 $5 \cdot 10^{-7} \text{ Am}^2$ 수준(Fig. 3 삽입그림 참조)으로 안정되며, 따라서, 본 펄스자기네트미터의 측정감도는 $5 \cdot 10^{-7} \text{ Am}^2$ 인 것으로 평가되었다. 이는 $5 \cdot 10^{-5} \text{ Am}^2$ 의 자기모멘트를 2%이 정확도로 측정할 수 있는 정도로 수백 마이크로미터의 희토류자석 박막의 특성평가가 가능하다.

Fig. 4는 탐지코일의 균일도를 조사하기 위하여 NiZn-

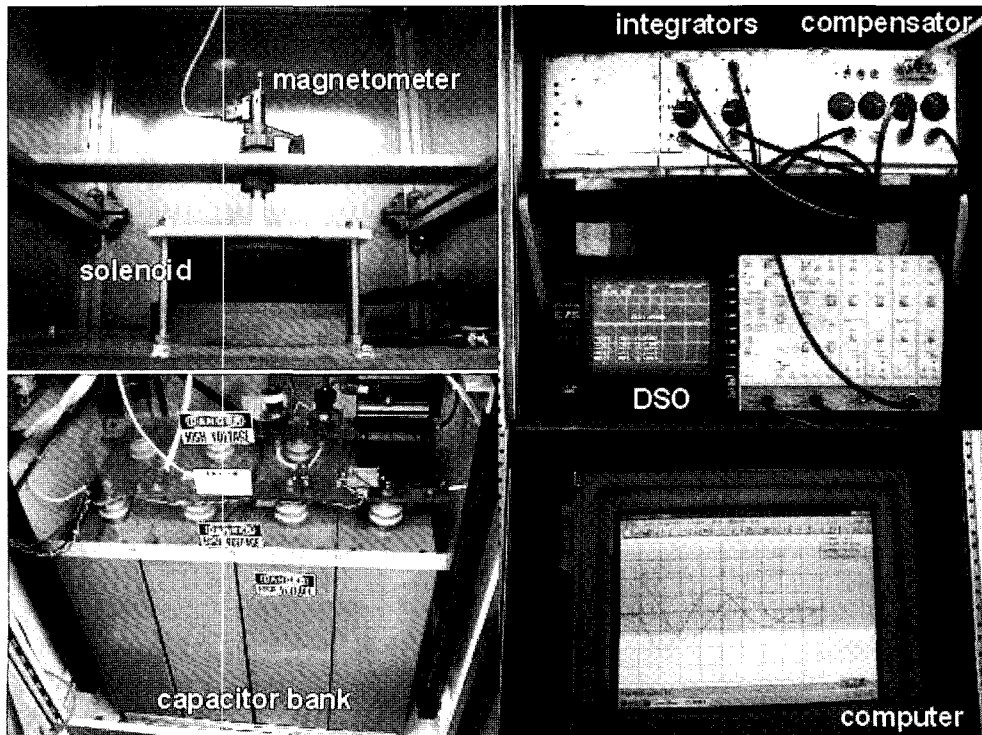


Fig. 2. Photos of 8 MA/m-class PFM.

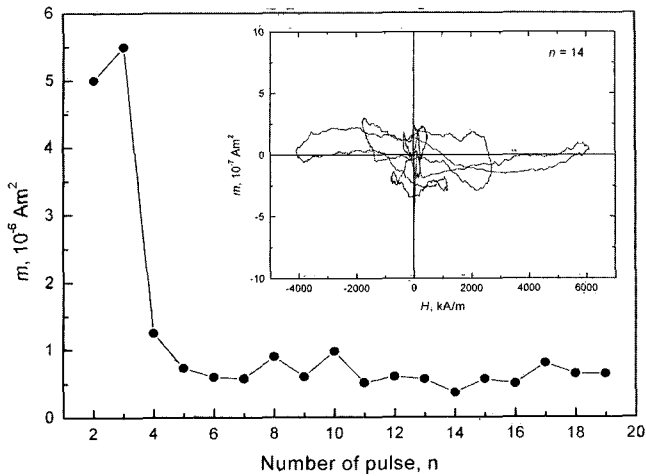


Fig. 3. Noise signal of m-coil as a function of pulse number.

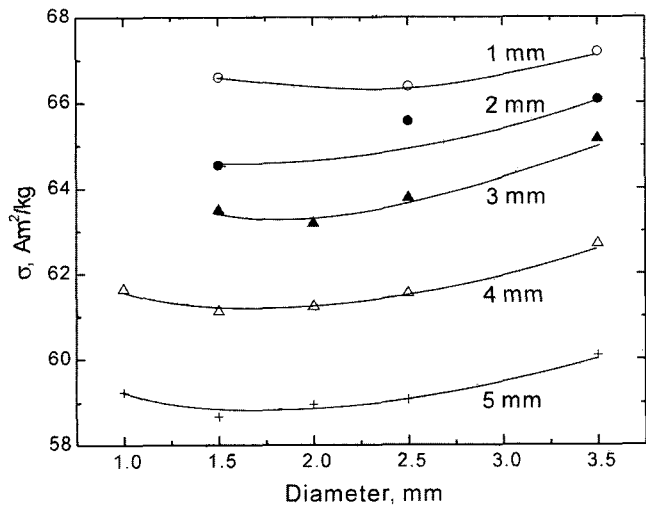


Fig. 4. Change of measurement results for various dimension (Compared at $H = \pm 3.98$ [MA/m] for NiZn-ferrite).

ferrite(삼화전자주식회사, L-82)를 지름 1 mm~3.5 mm, 길이 1 mm~5 mm 범위의 다양한 실린더형으로 가공한 다음 펄스 마그네토미터를 이용하여 측정된 결과로서 자화곡선상의 $H = \pm 3.98$ [MA/m]에서의 비자화(specific magnetization) 값을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 탐지코일에 측정된 값은 시험편의 지름과 길이에 따라 편차를 보이며, 특히, 길이에 따라서 그 편차가 매우 큼을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 탐지코일에 대한 시험편의 상대적 자화분포가 다르기 때문으로 사료되며, 따라서, 시험편의 모양과 크기에 의존하지 않게 하기 위한 보정이 필요하다.

한편, 탐지코일에 가상의 단위전류가 흐른다고 가정하고 이 때 임의의 공간좌표(x, y, z)에 생성되는 가상의 단위자장벡터를 h 라 하면, 시험편에 의하여 생성된 자속은 상호인덕턴스의 호혜법칙(principle of reciprocity)을 이용하면 다음 식

(3)과 같이 표현할 수 있다[3].

$$\Phi/\mu_0 = \int_V M \cdot hdV \quad (3)$$

Fig. 5는 시험편의 자화분포가 탐지코일의 가상자장분포와 동일하다는 가정하에서 본 실험에서 제작한 m-coil 내에 실린더형의 자성체가 있다고 생각하고 식 (3)의 관계를 이용하여 산출한 시험편의 크기에 따른 m-coil의 측정감도 변화를 나타낸 것이다. 여기에서, L 및 D 는 각각 시험편의 길이와 지름이며, 시험편의 길이가 일정할 경우에는 지름이 증가할수록, 시험편의 지름이 일정할 경우에는 길이가 감소할수록 h 가 증가하여 실험결과인 Fig. 4와 잘 일치함을 볼 수 있다.

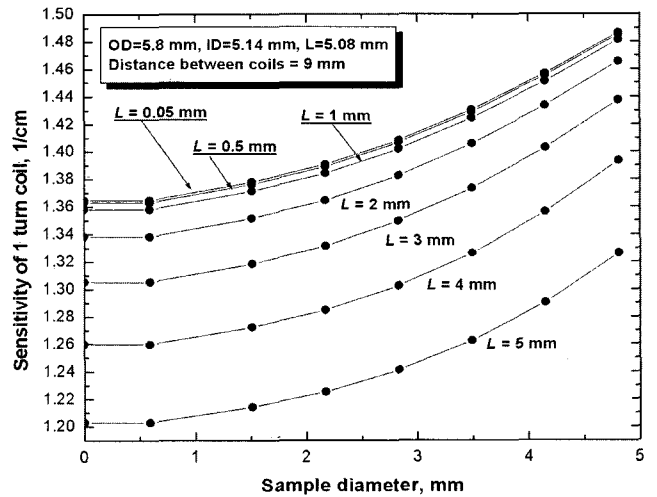


Fig. 5. Sensitivity of search coil, h , calculated using principle of reciprocity for mutual inductance.

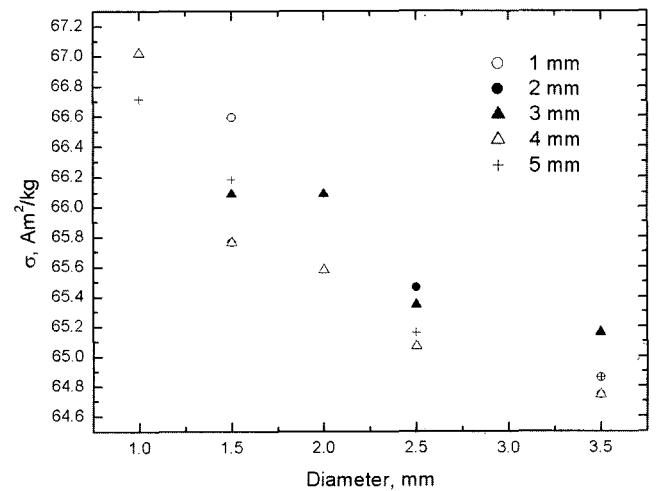


Fig. 6. Measurement results for the magnetization of NiZn-ferrite for various dimension. The values were recalculated under assumption that the flux distribution in the ferrite is the same with that of the imaginary field of the search coil.

Fig. 6은 측정된 NiZn-ferrite 시험편의 자속이 탐지코일의 가상자장과 동일한 분포를 이룬다고 가정하고 계산한 것으로, 길이에 따라 크게 달라지던 감도를 개선시키는 결과(최대 1.2% 이하)를 보인다. 예를 들어 표준시험편의 크기가 2.5 mmφ×3 mm의 실린더 형이라고 가정하고, 이를 이용하여 탐지코일을 교정한 후 단면이 같은 시험편을 측정한다고 할 경우, 시험편과 표준시험편의 길이가 0.5 mm 차이가 난다면 보정하기 전에는 2% 차이가 나게 되나 시험편의 자속이 탐지코일의 가상자장과 동일한 분포를 이룬다고 가정하고 보정할 경우 그 차이는 0.2% 이하로 줄어들어 보다 정확한 측정이 이루어짐을 알 수 있다.

2.3. 표준시험편

펄스자장은 dB/dt 가 크므로 금속시험편을 측정하는 경우 와전류(eddy current)가 생성된다. 와전류는 인가자장을 방해하는 방향으로 흐르므로 자장이 시험편으로 침투하지 못하도록 하는 차폐효과가 있으며 자기모멘트를 형성한다. 따라서 펄스자장 하에서의 자성측정을 위한 표준시험편으로는 와전류의 영향이 없는 전기비저항이 높은 재료를 선택하는 것이 바람직하다. 예로써, 연자성 및 경자성 산화물과 같은 경우 전기비저항이 높기 때문에 이와 같은 목적에 적합하다. 그러나 산화물의 경우 제조방법에 따라 조성이 다르므로 시험편마다 자기특성이 다른 단점을 갖고 있다.

자성산화물에 비하여 Fe, Co 및 Ni 등과 같은 금속은 순도가 높은 경우 자화 값을 신뢰할 수 있으므로 표준시험편으로 사용하기에 적합하다. 그러나 순금속은 전기비저항이 작아 와전류가 형성되는 문제점이 있다. 이 경우 분말을 사용하거나 시험편을 작게 하여 전류가 흐르는 경로를 짧게 하여 전기저항을 증가시키면 와전류 영향을 감소시킬 수 있으며 경우에 따라서는 무시할 수 있는 정도로 할 수도 있다.

본 실험에서는 자성산화물과 순금속의 장단점 및 탐지코일의 측정 불균일도 등을 고려하여 표준시험편으로써 와이어 형태의 Ni 순금속을 선택하였다. Fig. 7은 펄스자기측정을 위한

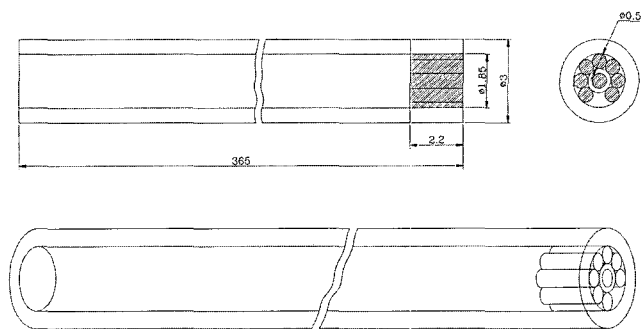


Fig. 7. Schematic diagram of the Ni standard sample.

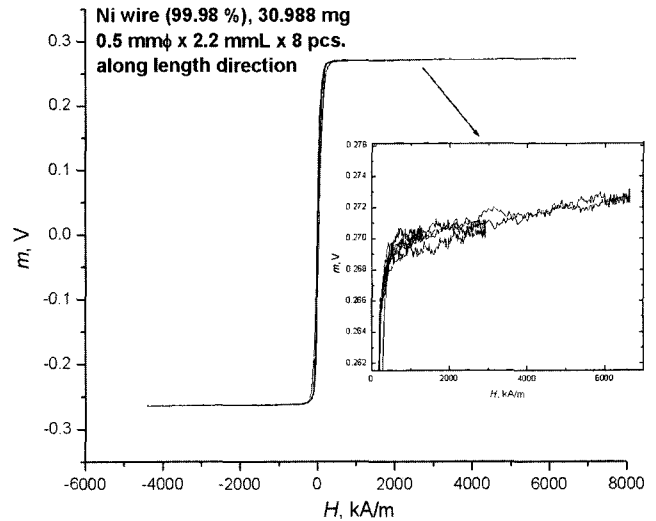


Fig. 8. Magnetic hysteresis loop of Ni wire measured by the PFM.

표준시험편에 대한 모식도로써 지름 0.5 mmφ인 Ni 와이어(순도 99.98%)를 길이가 각각 2.2 mm가 되도록 8 조각으로 자른 후 길이 365 mm, 바깥지름 3.0 mmφ, 안지름 1.85 mmφ의 유리튜브 내면에 장착시켜 제작하였다. 이때, Ni 와이어에서 생성되는 와전류를 최소화하기 위하여 와이어와 와이어 사이를 유기물 접착제로 격리시키며 튜브 안쪽에 부착되도록 하였다. 표준시험편 제작에 사용된 Ni 와이어는 총 30.988 mg이며, Ni의 비포화자화 $\sigma_s=54.39[Am^2/kg]$ 과 순도를 고려하여 산출한 결과 $1.6851 \times 10^{-3}[Am^2]$ 의 자기모멘트를 갖는다.

Fig. 8은 펄스자기미터를 이용하여 표준시험편인 Ni 와이어를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 y축은 적분기에서 적분한 전압신호로서 시험편의 자기모멘트에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이 Ni 시험편은 저자장에서 자기적 포화상태에 이른 후 자기모멘트는 일정한 값을 보인다. 포화부분을 확대한 삽입 그림에서 Ni의 자기모멘트가 미미하게 증가하는 것($\sim 0.06\%/MAm$)은 강제자화에 기인하는 것으로 사료된다. Ni 시험편에 와전류 효과가 있다면 자화곡선에는 이력현상이 나타나게 된다. 삽입된 그림에서 Ni 이 포화에 이른 후 뚜렷한 이력현상은 보이지 않으며, 따라서, Ni 와이어 시험편에서 와전류 효과는 무시할 수 있을 정도로 판단된다.

Fig. 9는 Ni 시험편과 동일한 크기와 모양을 갖는 Cu 와이어 시험편(5 mmφ×2 mm×8 pcs)을 제작하여 자기이력곡선을 측정된 결과로서, 그림의 이력현상은 와전류 효과에 기인한다. 와전류가 순수히 전기전도도에만 기인한다고 가정하면 Ni의 비저항($\rho_0=6.14 \mu\Omega cm$)이 Cu의 비저항($\rho_0=1.55 \mu\Omega cm$)에 비하여 약 4배 크므로 Ni 시험편에서 기대되는 와전류의 영향은 Cu에서 관측되는 와전류 효과의 1/4이 될 것

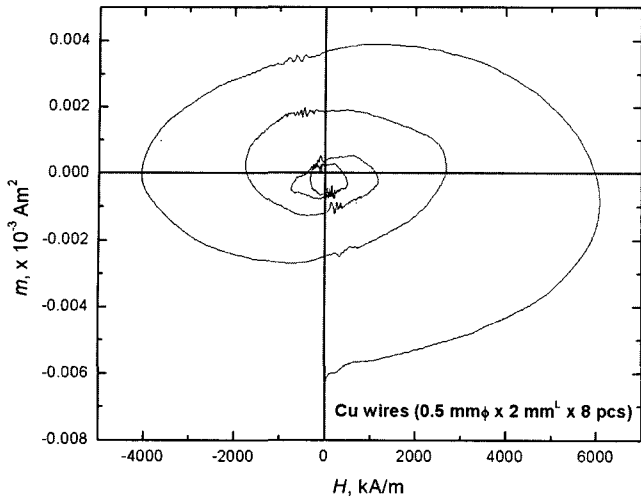


Fig. 9. Eddy current effects of Cu wire measured by the PFM.

으로 기대된다. Fig. 7에서 Ni은 $H=500$ kA/m 부근에서 포화되며 그 이상에서 와전류에 기여하는 투자율의 영향은 무시할 수 있다. 즉, $H=500$ kA/m 이상에서 Cu 와이어의 와전류에 의한 자기모멘트는 6×10^{-6} Am² 이하 이므로 같은 자장 하에서 Ni 표준시험편은 자기적 포화상태에 이르고 이때 와전류가 자기모멘트에 기여하는 부분은 1.5×10^{-7} Am² 정도일 것으로 추정된다. 이 값은 Ni 표준시험편 자기모멘트의 0.009%에 해당하며, 따라서, 표준시험편에서 와전류영향은 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

III. 측정결과

Fig. 10은 펄스자기미터를 이용하여 측정한 예로서 NdFeB 소결자석의 경우이다. 실험에 사용한 시험편은 크기가 약 2 mm×2 mm×2.4 mm인 직육면체이였으며 자화용이 축이 펄스자장과 평행이 되도록 지름 3 mmφ의 유리홀더 끝에 본드를 이용하여 부착시키었고 시험편의 위치는 마이크로미터를 이용하여 0.001 mm의 정밀도로 조정하였다. 그림의 자기이력곡선은 시험편의 반자장계수를 고려하여 산출한 것으로 $H_c=1,010$ kA/m, $B_r=1.20$ T, $BH_{max}=234$ kJ/m³의 값을 갖으며 자기이력곡선의 제2상한에서 관측되는 스텝은 기계가공에 의한 열화에 기인한다.

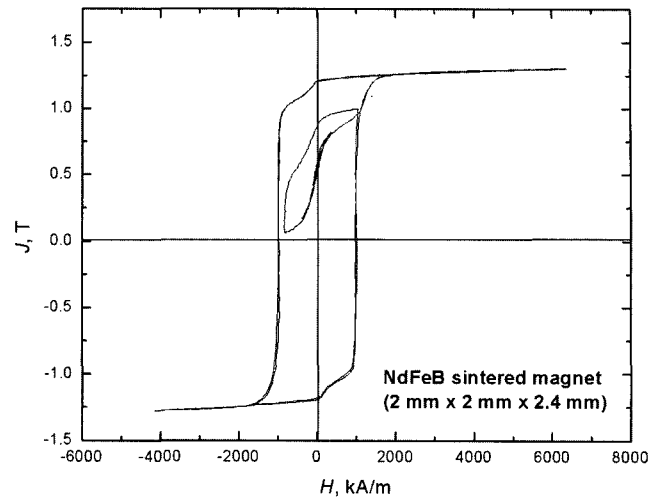


Fig. 10. Magnetic hysteresis loop of NdFeB sintered magnet measured by the PFM.

IV. 결 론

8 MA/m급 펄스자석과 픽업시스템을 이용하여 상온에서 재료의 자성을 정밀 측정할 수 있는 펄스자기미터를 구성하였다. 픽업코일은 정밀측정이 가능하도록 3축보상원리를 채용하여 제작하였으며 자기모멘트에 대한 측정감도는 $5 \cdot 10^{-7}$ Am²이었다. 본 실험을 통하여 구성된 펄스자기미터는 지름 3 mmφ 이하의 소형 및 박막형 희토류 영구자석의 특성평가에 적합하였다.

참고문헌

- [1] IEC60404-5, Magnetic materials-Part 5: Permanent magnet (magnetically hard) materials - Methods of measurement of magnetic properties.
- [2] J. Dudding, "Draft technical report on pulsed field magnetometry", IEC TC68 WG2, N118(2001).
- [3] G. A. Kapustin, Meas. Sci. Technol. **11**, 1(2000).
- [4] "Ferrite cores for telecommunication & EMC", Catalog, 삼화전자공업주식회사(2001.5) p. 8.

A High Precision Pulsed Field Magnetometer for Magnetic Properties Measurements of Rare Earth Magnets

Y. B. Kim*

Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, Korea

G. A. Kapustin

RRC Kurchatov Institute, Moscow 123182, Russia

(Received 1 August 2005, in final form 16 August 2005)

A 8 MA/m-class pulsed field magnetometer has been constructed by composing a pulsed field magnet, a pickup coil, analog integrators, a digital storage oscilloscope and a personal computer. For precision measurements, a 3-axis compensation principle has been applied for the fabrication of pickup coil, and the compensation level of the order of 10^{-6} and the sensitivity of $5 \cdot 10^{-7}$ Am² for magnetic moment have been obtained. The high sensitivity of the magnetometer is good enough for measurements of magnetic properties of rare earth magnets in small size or thin films shorter than 3 mm ϕ in diameter.

Key words : pulsed field magnetometer, pulsed field magnet, 3-axis compensation, rare earth magnet