

펄스전자석에 의한 자기이력곡선측정기

이용호·신용돌·이영희

전북대학교 물리학과, 전주 560-756

이장로

숙명여자대학교 물리학과, 서울 140-742

(1993년 4월 6일 받음, 1993년 6월 8일 최종수정본 받음)

보자력이 큰 강자성체의 자기이력곡선, 자기변형, 자기이방성등의 측정에 사용할수 있는 펄스전자석을 설계제작하였다. 철심의 형상이 주어졌을때 권선의 회수에 따른 전자석의 여러특성과 축전기 방전시의 전류진폭 감쇄비등을 계산하는 일반식을 유도하고 그것에 의하여 철심단면적 46 mm × 32 mm, 공기간격 28 mm의 전자석을 설계 제작하여 20 mT / A의 기율기로 0.49 T 까지 직선적인 자기장대 전류특성을 얻었다. 이 전자석에 애너로그 적분기에 의한 자속계를 부쳐서 박막 또는 박대시료의 major 및 minor 이력곡선을 단번에 쉽게 얻을 수 있는 자기이력곡선 측정기가 구성되었다.

I. 서 론

전자석은 자성체특성측정에 필수적이거나 부피, 무게, 소모전력이 크며 복잡한 냉각장치등이 필요하여 취급이 불편하며 고가이다. 특히 온도변화가 치명적 장애요인이 되는 자기변형측정에 있어서 전자석의 발열문제는 매우 심각하다. 본 연구에서는 주로 박막 또는 박대형 시료의 자기이력곡선, 자기변형, 자기이방성등의 여러 특성을 측정할수 있는 소형 경량이며 전력소모와 열의 발생이 적은 경제적인 전자석을 설계 제작하였다. 그리고 측정계통을 디지털 정보화하여 측정시간을 1초이내로 단축시키는 펄스법을 쓰므로써 전자석의 발열을 무시할수 있게 하여 복잡한 냉각장치를 불필요하게 하였으며 간편, 소형화, 소모전력의 격감등이 가능하여 졌다. 발열이 적은 0.2 T 이하의 자장에서는 연속 정현파의 교류전원을 사용하였으며 그 이상의 자장에서는 축전기 방전에 의한 감쇄진동교류로 전자석을 구동하였다. 고감도의 애너로그 적분방식의 자속계에 의하여 박막시료의 자기이력곡선이 VSM (vibrating sample magnetometer)의 사용없이 측정할수 있게 되었다.

II. 전자석의 설계

전자석을 교류로 구동할 때 일어나는 와류손실을 줄이기 위하여 철심은 0.35 mm 두께의 규소강판을 적층하였으며 그 구조는 Fig. 1과 같다. 전자석의 두 극에 절연동선을 각각 N회씩 감아 병렬로 연결할때 공기간격의 중심점에서의 발생자장 B , 동선단면적 A , 동선길이 l , 동선저항

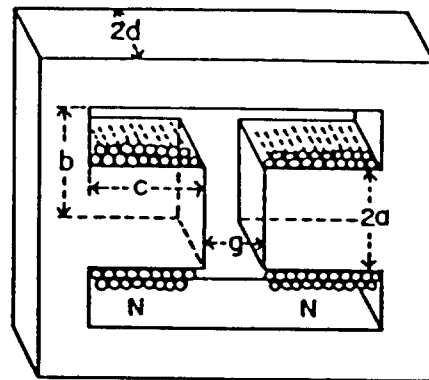


Fig. 1. Geometry of the electromagnet a, b, c, d and g are 23, 52, 56, 16 and 28 in mm. $N = 506$ turns.

* 본 연구는 1992년도 교육부 기초과학연구지원계획 (BS 92-213)에 의한 연구비의 지원을 받았음

R, 인덕턴스 L 등은 SI 단위계를 쓰면

$$B = e \mu_0 N I g^{-1} \quad (1)$$

$$A = \xi (b - a) c N^{-1} \quad (2)$$

$$l = 4 (b + d) N \quad (3)$$

$$R = 2\rho (b + d) N^2 [\xi (b - a) c]^{-1} \quad (4)$$

$$L = 2 \epsilon \mu_0 a d N^2 g^{-1} \quad (5)$$

이 된다. 여기에서 철심의 자속에 대한 reluctance는 무시하였으며 [1], e와 ϵ 는 누설자속을 감안한 자속의 유효율, μ_0 는 진공의 투자율, ξ 는 동선의 점적율, ρ 는 동선의 비저항이며, a, b, c, d, g는 Fig.1에 표시되어 있다. 다음에 전압 V로 충전된 전기용량이 C인 축전기를 위의 전자석에 연결하여 방전할때의 감쇄진동전류 i를 구하면

$$i = V(\omega L)^{-1} \exp(-t/\tau) \sin \omega t \quad (6)$$

이 된다[1]. 여기서 $\tau = 2L/R$, $\omega = (\omega_0^2 - \tau^{-2})^{1/2}$, $\omega_0 = (LC)^{-1/2}$ 이다. 전류 i의 peak 값을 구하기 위하여 $di/dt = 0$ 으로 두면

$$\omega t = \tan^{-1} \omega t + n\pi \quad (n=0, 1, 2, \dots) \quad (7)$$

이 성립되며 여기에서 얻은 t를 (6)에 대입하여 감쇄진동전류의 극대치 I_0, I_1, I_2, \dots 등을 구하면

$$I_0 = V \sin \theta (\omega L)^{-1} \exp(-\theta/\omega\tau) \quad (8)$$

$$I_1 = V \sin \theta (\omega L)^{-1} \exp[-(\theta + \pi)/\omega\tau] \quad (9)$$

과 같이 구해진다. 여기에서 $\theta = \tan^{-1}$ 이고, 진폭감쇄비 ϵ 은

$$\epsilon = |I_1/I_0| = \exp(-\pi/\omega\tau) \quad (10)$$

이 되며 ϵ 에 의하여 축전기의 용량 C는

$$C = \frac{4L}{R^2} \left(\frac{l\mu\epsilon}{\pi} \right)^2 \quad (11)$$

에 의하여 결정된다.

III. 제작된 전자석의 특성 및 고찰

전자석의 철심은 두께 0.35 mm의 규소강판을 가공하여 적층하였으며 Fig.1의 a, b, c, d, g는 각각 23, 52, 56, 16, 28(mm)이다. 직경 1.6 mm의 절연동선을 두극에 각각 506회 감았으며 이때의 점적율 ξ 는 0.63이 되었다. 두 권선의 병렬연결시의 저항 R의 실측치는 0.55 Ω 이며, (4)식에 의한 계산치는 0.56 Ω 이 되어 잘 일치하고 있다. 그러나 인덕턴스 L의 실측치는 47 mH이나 (5)식에 의한 값은 16.9 μ mH가 되어 ϵ 가 2.79가 되어있다. 이것으로 누설자속이 매우 큼을 알 수 있다.

여자전류 (exciting current) I에 대한 공기간격 중심부에서의 발생자장 B 사이의 관계를 구하기 위하여 400 V로 충전된 전기용량 370 μ F의 축전기를 반도체 스위치 solit state relay (SSR)을 경유하여 전자석에 방전하여 Fig. 2의 I-t 곡선과 같은 감쇄진동전류를 전자석에 흐르게 하고 전자석의 공기간격의 중심부에 놓은 자장검출 코일(직경 10.5 mm, 회수 160회)에 생기는 유도기전력을 애너로그 적분기로 구성된 자속계 [2]로 적분하여 Fig.2의 B-t 곡선을 얻었다.

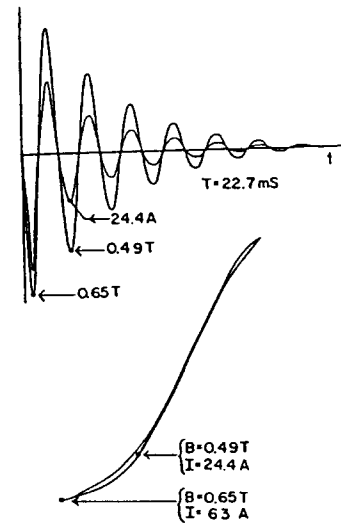


Fig. 2. Time variation of exciting current I and generated magnetic field B by capacitor-discharging method. Capacitance C = 370 μ F, charging voltage = 400 V.

이들의 측정에는 digitizing oscilloscope Nicolet 310을 썼다. 감쇄진동전류의 극대치 $I_0 \sim I_4$ 의 절대치는 각각 63.0, 38.5, 24.4, 19.8 (A)이다. $I_0 \sim I_2$ 부분은 비직선성

이 나타나 있으므로 전류감쇄율 ε 로서 I_3/I_1 를 취하면 0.81이 된다. (11)식에 의하여 R 을 구하면 $R = 1.51\Omega$ 가 되어 R 의 실측치 0.55Ω 의 3배이다. 이것은 반도체 스위치 triac 등의 저항의 비직선성과 철심의 와류손실에 의한 것으로 보인다. R 을 1.51Ω 로 보면 $2 \times 0.047 / 1.51 = 62.3 \times 10^{-3}(s)$ 가 되며 ω 는 $\omega \sqrt{(LC)^{-1} - \tau^{-2}}$ 에 의하여 $239.3/\text{s}$ 가 되며 주기 T 는 26.3ms 로 계산되는데 Fig.2에서의 실측치는 25.6ms 로 되어 비교적 잘 일치한다. 감쇄비 $\varepsilon = |I_3/I_1|$ 의 실험치는 0.81이나 (10)식에 의한 이론치도 0.81이 되어 좋은 일치를 보이고 있다. Fig.2의 아래곡선은 위의 $I-t$ 곡선과 $B-t$ 곡선을 XY표시로 변환한 것이다. $B = 0.49\text{T}$ 까지는 $B-I$ 관계는 좋은 직선이 되며, 0.49T 에서 최대치 0.65T 까지는 철심의 부분적 자기포화에 의하여 비직선성이 나타나고 있다. Fig.3은 전기용량을 $185\mu\text{F}$ 로 할때의 $I-t$, $B-t$, $B-I$ 관계이다. 주기는 약 18ms 이며 $B-I$ 관계의 직선부는 역시 0.49T 까지이고, $B-I$ 직선부의 기울기는 20mT/A 이다.

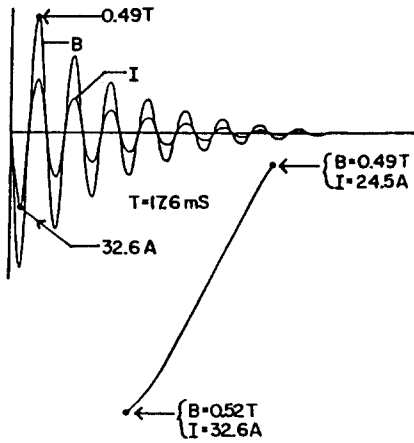


Fig. 3. Time variation of exciting current I and generated magnetic magnetic field B by capacitor-discharging method. Capacitance $C = 187\mu\text{F}$, charging voltage = 400V .

IV. 자기이력곡선 측정기

위의 전자석을 사용하여 박대 또는 박막의 자기이력곡선을 측정하기 위하여, $1 \times 8 \times 10\text{mm}^3$ 의 권선용 보빈에 직경 0.06mm 의 절연동선을 2500회 감은 자화검출 코일과, 이와 동일한 보상코일을 역방향으로 직렬 연결하고 $(6\sim 7) \times 22\text{mm}^2$ 의 시료를 보빈 속에 장착하고 그 출력

을 애너로그 적분계에 의한 자속계 [2]로 적분하였다. 그 결과의 한 예로서 본 연구에서 제작한 전자석에 사용된 두께 0.35mm 의 규소강판의 자기이력곡선은 Fig.4와 같다. 이때의 인가자장은 비교적 약한 74mT 로 시료가 거

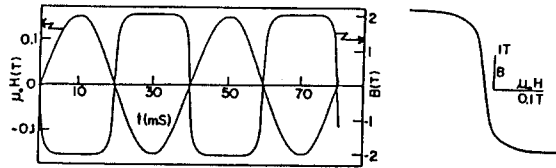


Fig. 4. The magnetic hysteresis loop and time variation of magnetic field H and flux density B of a SiFe sample driven with continuous sinusoidal mode.

의 포화되기 때문에 전원은 축전기 방전 방식대신 정현파 발전기와 증폭기에 의하여 전자석을 구동하였다. 이 경우 10Hz 에서의 전자석의 임피던스는 약 3Ω 이며, 10A 로 자화 시킬때의 자장의 peak치는 0.2T 이며 열손실은 55W 에 불과하여 온도상승은 거의 무시되는 정도였다. 경자성체의 보기로서 $0.65 \times 5 \times 22\text{mm}^3$ 의 쇠톱날의 시료의 측정결과는 Fig.5와 같으며 이때는 쉽게 포화되지 않아서 축전기 방전 방식으로 자장을 인가하였다. Fig.5의 (A), (B)는 충전전압을 190V 로 하여 최대자장을 289mT 로 하여 거의 포화된 상태의 $I-t$, $B-t$ 곡선이며 (C)는 H 축을 4배로 확대하여 minor 곡선과 보자력을 쉽게 볼수 있게 한 것이다. 이들 major 및 minor 곡선에 나타나 있는 개단적 변화는 digital sampling의 분해능 때문이며 $B-H$ 곡선에서는 현저하나 $B-t$ 및 $I-t$ 곡선에서는 연속적이 되어 있다. Fig.6은 현미경 슬라이드 유리로 된 기관위에 Ni, Co, 53 NiFe, Fe의 박막을 $2 \times 10^{-5}\text{torr}$ 의 진공속에 $5 \times 10^{-3}\text{torr}$ 의 Ar 기체를 채워 2\AA/s 의 증착속도 2m 의 두께로 RF 스퍼터링한 박막시료의 이력곡선을 측정 한 결과이다. 시료의 크기는 $7\text{mm} \times 18\text{mm}$ 이며 박막의 질량은 약 2mg 에 불과하나 VSM에 필적하는 감도임을 알수 있다.

V. 결론

주로 박대 및 박막의 자기이력곡선, 자기변형, 자기이방성등의 기초자기특성을 측정하는데 필수적인 교류용 전자석이 제작되었다. 발생자장 대 전류의 비는 20mT/A

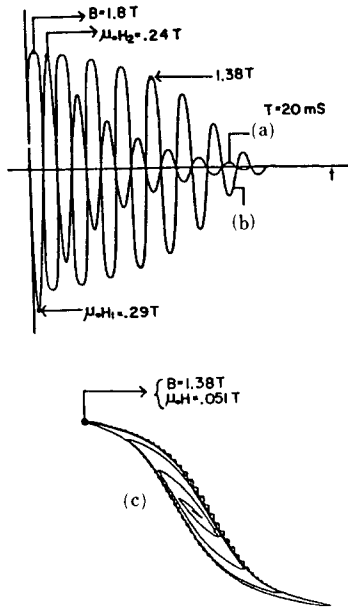
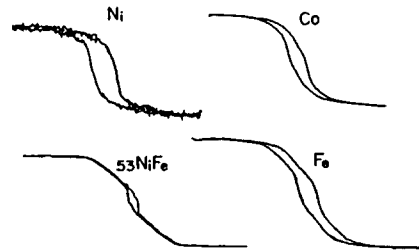


Fig. 5. The magnetic hysteresis loop and time variation of magnetic field H and flux density B of a SiFe sample driven with capacitor-discharging mode.

이며 0.49 T 까지는 직선적이고 최대 0.65 T 까지 쓸 수 있다. 0.2 T 이하에서는 10 Hz에서 최대치 30 V 10 A 의 연속 교류전원으로 동작되며 이때의 전력손실은 55 W 이다. 0.65 T까지는 370 μ F의 축전기를 400 V로 충전된 것을 전자석에 방전하여 주파수 약 40 Hz의 감쇄진동 자

장을 얻었으며 보자력이 큰 시료의 major 및 minor loop 가 순간적으로 얻어지며 열의 발생과 소모전력은 무시할 수 있는 매우 경제적이며 활용성이 큰 전자석과 자기력 곡선 측정기가 완성되었다.



| | H_p (Oe) | H_c (Oe) | $I_s(\tau)$ meas | $I_s(\tau)$ pub |
|--------|------------|------------|------------------|-----------------|
| Ni | 435 | 58 | .55 | .61 |
| Co | 804 | 66 | 1.79 | 1.79 |
| 53NiFe | 520 | 20 | 1.7 | 1.6 |
| Fe | 535 | 40.5 | 2.07 | 2.16 |

Fig. 6. Major loops of several thin film samples. (2μ m thick, 7 mm wide and 18 mm long) H_p : peak value of applied field, H_c : coercive force, I_s : saturation magnetization

참 고 문 헌

- [1] 이용호, 신용돌, 이영희, 이장로, 응용물리, **5** (5), 438 (1992)
- [2] 이용호, 전북대 논문집, **25**, 379 (1983)

Magnetic Hysteresis Curve Tracer using Pulsed Electromagnet

Yong-Ho Lee, Yong-Dol Shin and Young-Hee Lee

Department of Physics, Jeonbuk National University, Jeonbuk Jeonju, 560-756, Korea

Jang-Roh Rhee

Department of Physics, Sookmyong Women's University, Seoul, 140-742, Korea

(Received 6 April 1993, in final form 8 June 1993)

A pulsed electromagnet with silicon steel core driven by alternating current or oscillatory decaying current using capacitor discharging method for measuring magnetic hysteresis loops, magnetostriction and magnetic anisotropy of high coercivity magnetic sample is built. The general formul for various characteristics of the electromagnet with given geometry of iron core and turns of copper wire are presented. Using these formul, an electromagnet with 46 mm \times 32 mm of core's cross section and 28 mm of air-gap is designed and built, its magnetic field to current ratio of 20 mT/A is linear up to 0.49 T. Combining this electromagnet with an analog integrated fluxmeter, a magnetic hysteresis loop can be easily displayed major and minor loops of thin film or strip at once.