

비정질 금속 $Fe_{78} B_{13} Si_9$ 의 주파수에 따른 자기 임피던스 효과

김용국 · 김택기

충남대학교 재료공학부

대전광역시 유성구 궁동 220번지, 305-764

이희복

공주대학교 사범대학 물리교육과

충남 공주시 신관동 182번지, 314-701

(1997년 2월 6일 받음, 1997년 3월 3일 최종수정본 받음)

비정질 $Fe_{78} B_{13} Si_9$ 의 자기 임피던스 효과를 측정하였다. 자기 임피던스 효과는 자성체 시료의 임피던스가 시료에 걸어준 자기장에 따라서 달라지는 현상이다. MIR (Magneto-Impedance Ratios)은 $\Delta Z / Z \equiv [Z(0) / Z(H_s)] - 1$ 로 정의되며, H_s 는 시료 방향으로 자기장을 가하여 임피던스가 포화될 때의 자기장의 세기이다. 본 시료의 MIR 값은 진공중에서 열처리하였을 때 일반적으로 감소하였으며, 5 MHz를 걸어준 상태에서 열처리를 할 때 58 % 이상 증가하였다.

I. 서 론

최근 자성 재료의 발달로 자기 기록 매체의 고밀도화와 고기능화가 급속하게 이루어지고 있다. 고감도·고속 응답(고주파동작)의 마이크로 자기헤드가 필요함에 따라 극소형 자기 센서로서 활용할 수 있는 다층 박막의 거대 자기 저항(Giant Magneto-Resistance : GMR) 효과에 관한 연구가 근래 매우 활발히 이루어지고 있다[1]. MR 효과는 시료의 전기 저항이 자기장의 세기에 따라 달라지는 현상으로 시료의 직류특성이다. 그런데 최근 영자왜(Zero Magnetostriction) 비정질 금속의 교류 전류에 대한 MR 특성이 크다는 것이 발견되면서 자기 임피던스(Magneto-Impedance : MI) 효과에 대한 연구가 급속히 진전되고 있다[2, 3].

자기 임피던스(Magneto-Impedance : MI) 효과란 고투자율 재료에 고주파 전류가 흐를 때 임피던스가 전류 방향으로 가해진 외부 자기장에 따라 민감하게 변화하는 전자기현상이다. MR 센서는 거대 자기저항 센서의 발견으로 고감도 자기 센서의 실현 가능성이 있지만 큰 MR 비를 얻기 위해서는 큰 자기장이 필요하며 MR에 히스테리시스가 나타나는 등 실용화에 과제가 많다[3, 4]. MI 효과는 MR 효과에 비하여 훨씬 낮은 자기장(50 Oe 이내)에서 GMR보다 훨씬 큰 임피던스 변화(40~200 %)를 보여 고감도성(분해능 10^{-5} Oe) 자기 센서로서 유망하다[5]. 또한 MI 센서는 고주파 변조 동작을 하기 때문

에 응답 속도가 현저히 높으며 통전 전류가 매우 적어 반도체 소자와 결합시켜 사용할 수 있다는 장점이 있다.

MI 효과는 일반적으로 MIR (Magneto-Impedance Ratios)로 나타내는데 $\Delta Z / Z \equiv [Z(0) / Z(H_s)] - 1$ 로 정의한다. 여기서 H_s 는 시료 방향으로 자기장을 가하여 임피던스가 포화될 때의 자기장의 세기이다. 일반적으로 거대 자기 임피던스(Giant Magneto-Impedance : GMI) 효과는 MIR이 50 % 이상일 때를 말한다.

본 연구에서는 비정질 금속 $Fe_{78} B_{13} Si_9$ 의 주파수에 따른 자기 임피던스(Magneto-Impedance : MI) 효과를 측정하였다. 또한, 열처리 조건에 따라 MI 효과의 변화를 살펴보기 위하여 본 시료를 진공중에서 열처리하였으며, 자장중 열처리, 고주파 통전 열처리 등을 하여 자시료의 MI 특성 변화를 측정하였다.

II. 실험방법

측정에 사용된 시료는 길이 15 mm, 폭 2.5 mm, 두께 19 μm 인 Allied Signal사의 제품(Metaglas 2605S2)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 GMI 측정용 시료를 Cryogenic Chamber에 넣고 4단자법으로 GMI를 측정할 수 있도록 고안되었다. 본 실험 장치의 모든 부분을 GPIB BUS로 연결하여 실험 과정이 모두 PC에 의하여 통제되도록 구성하였다. 즉, 외부 자기장을 조절하기 위하여 GPIB로 조절되는 DC

전압기(HPE3631A, EG&G Lockin Amp. 5110)의 출력을 자작한 DC Power Supply(0~±30 V)로 전력 증폭하여 Solenoid에 연결함으로써, 외부 자기장을 ±150 Oe의 범위 내에서 200등분하여 프로그램으로 변화시켰다. 이 때, 디지털 멀티미터(DMM; HP34401A)로 코일에 흐르는 전류를 측정하여 외부 자기장의 세기를 기록하였다. 고주파 전류는 1 GHz까지 가변할 수 있는 Signal Generator(SYTRON 1702)를 사용하여 시료에 걸여 주었으며 GPIB로 주파수를 가변시켰다. 시료에 흐르는 전류를 측정하기 위하여 직렬로 연결된 3.3 Ω (5 W)의 저항 양단의 전압을 측정하였으며, RF 전압을 DC 전압으로 바꾸는 변환기(FLUKE RF Probe)를 써서 RF 전압을 DMM을 통해서 PC에 입력하여 전류로 환산하였다. 시료의 임피던스 측정은 시료 양단의 교류 전압을 측정하여 역시 RF 전압을 DC 전압으로 바꾸는 변환기를 써서 DMM으로 읽은 다음 시료를 관통하는 전류로 나누어 측정하였다. 본 GMI 측정 장치 프로그램은 Windows95에서 작동할 수 있도록 Visual Basic으로 작성하였다.

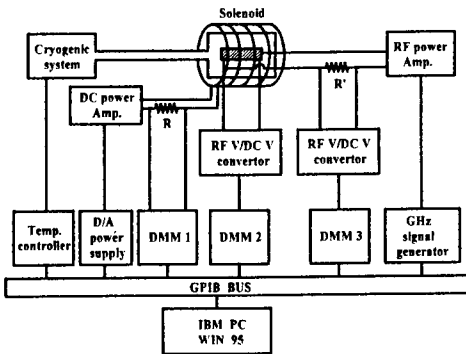


Fig. 1. Schematic diagram of the magnetoimpedance measurement system.

측정에 사용된 시료는 비정질 원시료, 진공중에서 각각 250 °C, 350 °C로 30분 동안 열처리한 시료, 2 kOe의 자장을 시료길이의 수직방향으로 걸어주면서 각각 350 °C, 475 °C, 525 °C로 30분 동안 진공 열처리한 시료, 고주파(10 mA)를 걸어 주면서 진공중에서 250 °C로 30분 동안 열처리한 시료 등이다. 자장중 열처리를 하기 위해서는 VSM의 고온 장치를 이용하였으며, 고주파 통전 열처리를 위해서는 Fig. 2와 같이 진공 장치를 개조하여 제작한 열처리로를 사용하였다.

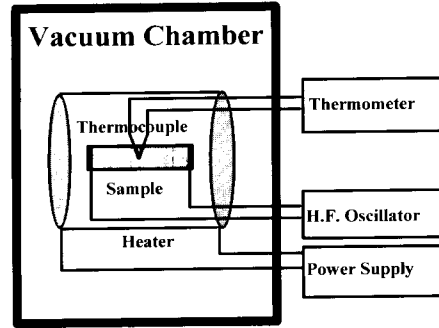


Fig. 2. Schematic diagram of the vacuum annealing system used for high frequency current annealing.

III. 실험 결과 및 고찰

GMI 센서내의 총 임피던스 Z 는 $Z = R + jX$ 로 주어지며 R 은 DC 저항이고 X 는 리액턴스이다. GMI의 원인은 고전 전자기학 현상으로 시료에 흐르는 전류에 의하여 전류 방향과 수직인 횡방향(transverse direction)으로 발생하는 자기장의 영향을 받는 시료의 자구의 운동 및 자기 모멘트의 고주파 영역의 Skin effect 때문에 생긴다[6].

GMI 효과는 연자성체에서 전류 방향과 수직으로 놓인 자구와 같이 횡방향 자기 구조를 가질 때 매우 큰 효과가 있다. 특히 낮은 주파수에서는 외부 자기장 H_{ex} 에 의하여 유도된 횡방향 자화는 자구벽의 운동에 의하여 일어난다.

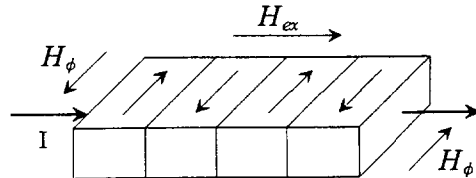


Fig. 3. Transverse magnetoimpedance effect.

Fig. 3은 횡방향 자기 임피던스 효과를 나타낸 것이다. 이러한 자구 구조는 자기장이나 다양한 열처리 조건에 따라 개선할 수 있다.

고주파 전류 I 가 흐를 때 시료의 양단간의 전위차 ΔV 는

$$\Delta V = IR + \langle E_z \rangle L = IR + \frac{d\Phi_\phi}{dt} L = IR + \alpha \frac{dM_\phi}{dt} \quad (1)$$

이다. 여기서 $\langle E_z \rangle$ 는 시료에 유도되는 역기전력 때문에 생기는 전기장으로 시료방향에 수직인 둘레에 생긴 자속 Φ_ϕ 의 변화에 의해 유도되며, 시료 둘레에 유도된 자화값 M_ϕ 의 변화에 비례한다. 이 때 L 은 시료의 길이이며 α 는 비례상수이다.

MI 효과의 주파수 의존성을 알기 위해 먼저 도선에 흐르는 전류에 의한 $\langle E_z \rangle$ 를 계산하면 다음과 같다. 먼저 정성적인 설명을 위해 시료를 반경 a 인 원통형이라 가정하고 비교적 낮은 주파수(Skin effect 무시)의 전류가 균일하게 흐른다면 시료의 내부중심에서 r 인 지점의 자기장 세기 H_ϕ 는 $H_\phi = \frac{2Ir}{ca^2}$ 으로 주어진다. 여기서 c 는 광속도이다. 고주파 전류는 $I = I_0 e^{-j\omega t}$ 이므로 $\langle E_z \rangle L$ 은

$$\langle E_z \rangle = -j \frac{\omega}{c^2} L_i \quad (2)$$

$$L_i = 2I \left\langle \int_0^r \mu_\phi r' dr' / a^2 \right\rangle \quad (3)$$

으로 주어진다[7]. 여기서 μ_ϕ 는 횡방향 초기투자율이 다. 식 (3)에서 임피던스의 변화는 주파수에 비례함을 알 수 있다. 위에서 계산한 회전 자화값 ΔM_ϕ 은 L_i 또는 μ_ϕ 에 영향을 준다.

주파수가 높아지면 고주파 자속 변화에 의한 시료내의 와전류(Eddy current)가 커지므로 자구의 운동이 억제되며, 원자규모의 자기 모멘트의 운동과 전류의 흐름이 도선의 표피 근방으로 이동하는 Skin effect 효과가 커지게 된다. 이 때 교류 전류에 대한 Skin depth δ 는[8]

$$\delta = c \left(\frac{\rho}{2\pi \mu_\phi} \right)^{1/2} \quad (4)$$

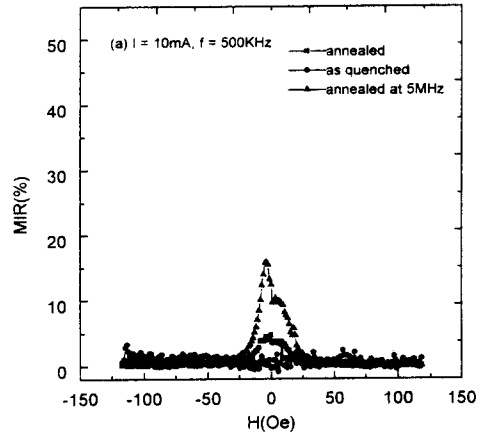
이다. 여기서 c 는 광속도이고, ρ 는 DC 비저항이다. 이 때 δ 는 리본의 두께에 비하여 매우 작으므로 전류는 시료의 표면 근처에서만 흐른다. 이와 같은 경우 시료의 임피던스 Z 는 근사적으로[9]

$$Z = (1-j) \frac{\rho}{2l\delta} = \frac{(1-j)L}{2lc} (2\pi\rho\omega \mu_\phi)^{1/2} \quad (5)$$

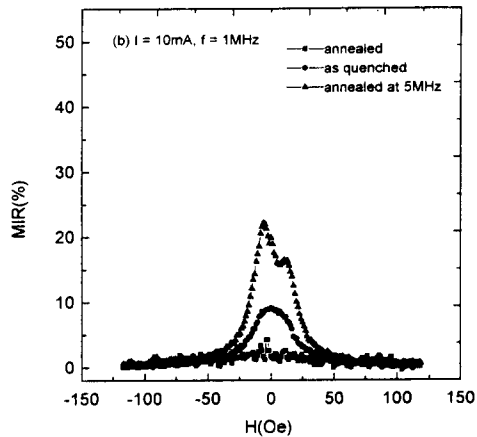
이며, l 과 L 은 리본의 폭과 길이이다. 식 (5)에서 Z

가 자기장과 주파수에 관련된 $\sqrt{\omega \mu_\phi}$ 에 비례함을 알 수 있다.

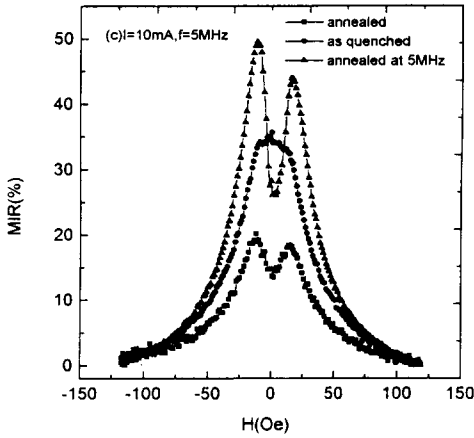
Fig. 4의 (a), (b), (c), (d)는 주파수가 각각 500 kHz, 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz에서 일정한 전류를 인가할 때 측정된 MIR를 나타낸 것으로 일반적으로 주파수가 증가하면서 MIR도 증가함을 나타내었다. Fig. 4에 제시된 5 MHz의 고주파를 통전하면서 진공중에서 열처리한 시료가 최대 MIR을 나타내었다. 이 밖에 350 °C에서 열처리한 시료와 350 °C, 475 °C, 525 °C에서 가장중 열처리한 시료의 MIR은 억제되어 거의 0으로 나타났다. 이는 시료의 열처리 온도가 큐리 온도(415 °C)보다 훨씬 낮은 경우라 하더라도 열처리에 의하여 자구의 운동과 원



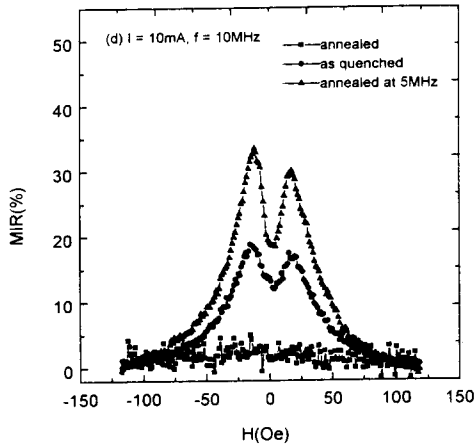
(a) 500 KHz



(b) 1 MHz



(c) 5 MHz

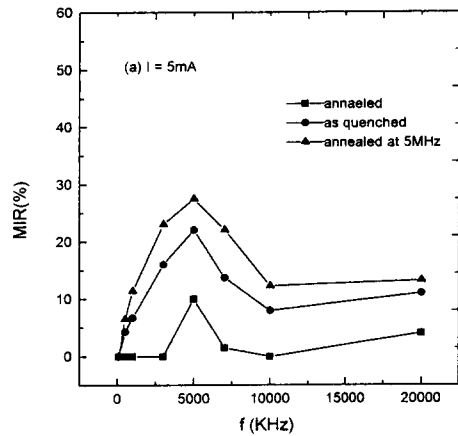


(d) 10 MHz

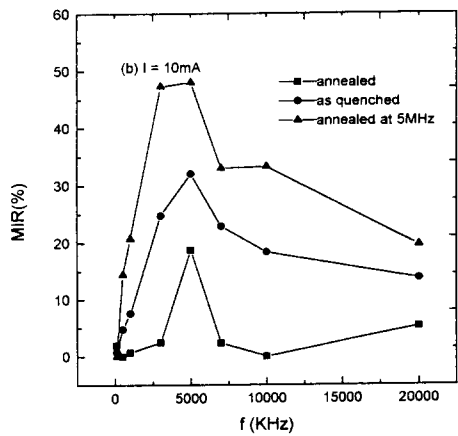
Fig. 4. Frequency dependance of MIR at 10mA in the sample : (a) 500 KHz, (b) 1 MHz, (c) 5 MHz, (d) 10 MHz.

자규모의 자기 모멘트 운동이 억제될 수 있음을 보여 준다. 5 MHz의 통전 전류에 의한 열처리 시료에서는 고주파 통전 전류가 흐르면서 발생한 자기장에 의하여 원자규모의 자기 모멘트의 운동이 활발해지도록 열처리되어 MI 효과가 증가된 것으로 보인다. 이 때 열처리한 시료가 상온으로 냉각될 때까지 통전 전류를 유지하도록 하였다.

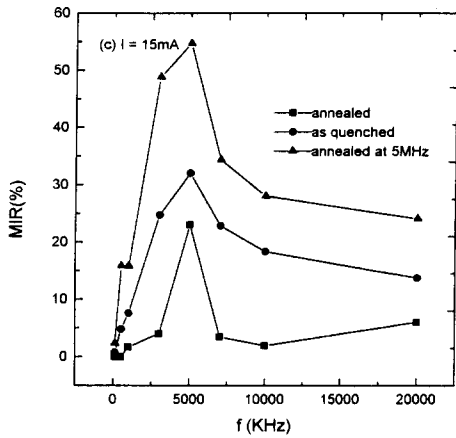
MI 효과의 주파수 의존성을 알아보기 위하여 일정한 전류가 흐를 때의 MIR을 Fig. 5에 나타냈다. 1 MHz 이하의 주파수에서는 MIR이 매우 작거나 0이며, 주파수가 증가함에 따라 $\sqrt{\omega}$ 에 비례하여 증가됨을 알 수 있다. 이 관계는 식 (5)에서 언급한 바와 같이 Skin effect에 기인한 것으로 사료된다. 특히 5 MHz를 통전 열처리 시료는 주파수 5 MHz에서 MIR이 58%에 이르러 GMI 특성을 나타냈다. MIR은 10 MHz가 되면서 급격히 감소하는데 이는 식 (5)의 $\sqrt{\omega \mu_\phi}$ 에서 μ_ϕ 가 고주파 영역에서 급격히 감소되기 때문으로 추측된다.



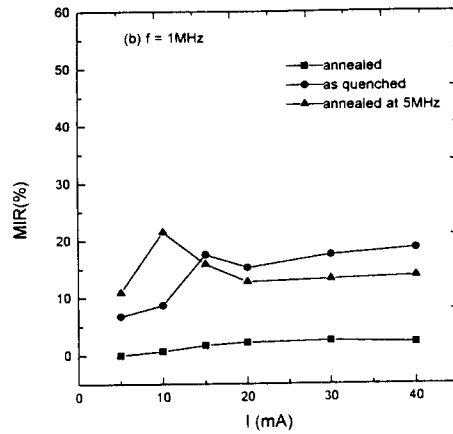
(a) 5 mA



(b) 10 mA



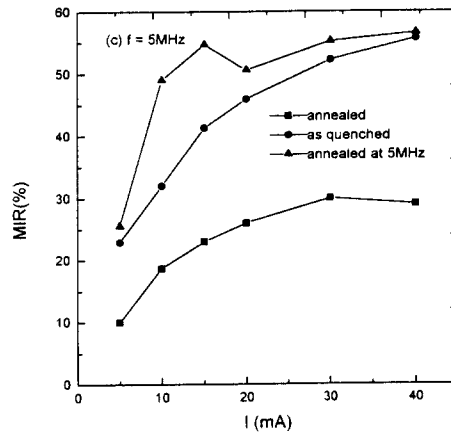
(c) 15 mA



(b) 1 MHz

Fig. 5. Frequency dependence of MIR for the current at (a) 5 mA, (b) 10 mA, and (c) 15 mA.

MI 효과는 시료를 관통하는 전류에 의하여 횡방향으로 생기는 자기장 때문에 생기므로 시료에 흐르는 전류가 커짐에 따라 증가할 것이다. Fig. 6의 (a), (b), (c)는 500 KHz, 1 MHz, 5 MHz를 각각 인가하여 전류에 따른 MIR를 나타낸 것이다. 원시료와 진공중 열처리한 시료는 전류가 증가함에 따라 MIR도 증가하나, 5 MHz를 인가하면서 진공중에서 열처리한 시료는 10 mA에서 최대 MIR을 나타낸 후 점차 감소하였다. 이는 시료의 고주파 통전



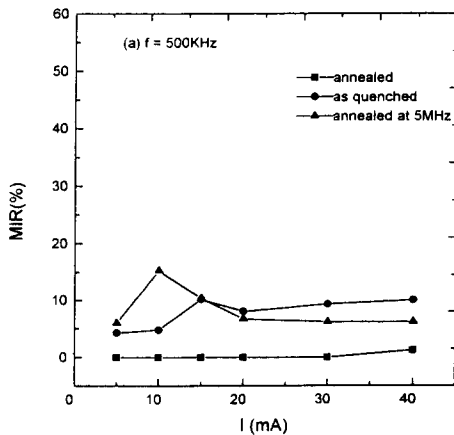
(c) 5 MHz

Fig. 6. Current dependence of MIR for the frequency at (a) 500 KHz, (b) 1 MHz, and (c) 5 MHz.

열처리에 흘려준 10 mA와 일치한다. 통전 전류에 의한 열처리에서는 통전 전류에 의하여 발생한 자기장의 세기 때문에 고주파 연자성 특성이 좋아졌으므로 통전전류의 세기에 따라 MI 효과의 한계가 결정되어진 것으로 보인다.

IV. 결 론

비정질 금속 $Fe_{78} B_{13} Si_9$ 의 주파수에 따른 자기 임피



(a) 500 KHz

던스(Magneto-Impedance : MI)효과를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 낮은 주파수 영역에서 MI 효과는 고주파 통전 열처리 시료에서 가장 크게 증가했다.
2. 1 MHz 이상의 고주파에서 MI 효과가 크게 나타났으며 고주파 통전 열처리 시료는 15 mA 통전시 5 MHz에서 58 % 이상의 거대 자기 임피던스 효과를 나타내었다.
3. MIR은 전류가 증가함에 따라 증가하나 20 mA 이상에서는 포화되었다.
4. 진공중 열처리 시료의 MI 효과는 대체로 감소하였다.
5. MIR은 외부 자기장 H_{ex} 가 ± 50 Oe에서 가장 크게 변화하였다.

본 연구에서 비정질 금속 $Fe_{78} B_{13} Si_9$ 의 고주파 통전 열처리 효과가 발견되었으므로 이에 대한 자세한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 1996년도 교육부 학술 연구 조성비(신소재 분야)에 의하여 연구하였음.

참고문헌

- [1] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, and F. Detroff, Phys. Rev. Lett., **61**, 2472(1988).
- [2] K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa, and Y. Yoshida, IEEE Trans. Magn. **29**, 1245(1993).
- [3] L. V. Panina, H. Katoh, K. Mohri, and K. Kawashima, IEEE Trans. Magn. **29**, 2524(1993).
- [4] M. Knobel, M. L. Sanchez, C. Gomez-Polo, P. Marin, M. Vazquez, and A. Hernando, J. Apply. Phys. **29**, 1646(1996).
- [5] M. Senda, O. Oshii, Y. Koshimoto, and T. Toshima, IEEE Trans. Magn. **30**, 4611(1996).
- [6] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Electro-dynamics of Continnous Media, (Pergamon Press, Oxford, 1975).
- [7] L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, and M. Noda, J. Apply. Phys. **76**, 6189(1994).
- [8] J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, (Wiley, NewYork, 1975).
- [9] K. Kawashima, T. Kohzawa, Y. Yoshida, and K. Mohri, IEEE Trans. Magn. **29**, 3168(1993).

Frequency Dependence of the Magnetoimpedance Effect in Amorphous $Fe_{78} B_{13} Si_9$ Alloy

Yong-Kook Kim and Taik-Kee Kim

Division of Material Science, Chungnam National University, Tjejon 305-764

Heebok Lee

Department of Physics Education, Kongju National University, Kongju 314-701

(Received 6 February 1997, in final form 3 March 1997)

The frequency dependence of magnetoimpedance (MI) effect in amorphous $Fe_{78} B_{13} Si_9$ alloy has been obtained. Magnetoimpedance (MI) effect is a high-frequency phenomenon, which describes the changes of impedance in any ferromagnetic sample, when a magnetic field is applied on it. MIR (Magnetoimpedance ratios) is defined as $\Delta Z/Z \equiv [Z(0)/Z(H_s)] - 1$ where H_s is the saturating field along the long side of the sample. The MIR of the samples annealed in vacuum has been decreased normally except that the sample annealed at 5 MHz has been reached as much as 58 %.