

## 표면층 제거에 대한 비정질 금속 $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$ 의 자기임피던스 효과

조완식 · 김종오 · 이희복\*

충남대학교 공과대학 재료공학과

\*공주대학교 물리교육과

### Magnetoimpedance(MI) Effect due to the Removal of Skin Layer in Amorphous Metal $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$

W.S. Cho, C.O Kim and H.B. Lee\*

Department of Materials Engineering, Chungnam National University, Taejeon 305-764

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

(1997년 5월 21일 받음, 1997년 7월 12일 최종수정본 받음)

**초 록** 비정질 금속  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$ 의 표면층 제거에 대한 자기임피던스 효과는 시료의 길이방향에 평행한 일축자기장에 대하여 측정하였다. MIR(Magnetoimpedance Ratios)은 비정질 금속의 두께가 얇아짐에 따라 감소하고, 전류에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 인가전류 주파수에 대한 MIR과 자기장의 감도는 모든 시료에서 주파수에 비례하여 증가하며 수MHz 부근에서 최대값을 가지고 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 시료의 표면층제거에 기인한 이방성자기장의 변화는  $\text{MIR}_{\text{max}}$ 을 나타내는 외부 자기장을 감소시키지만, MIR은 표면층 제거에 따른 부피효과에 기인하여 감소하였다.

**Abstract** The giant magnetoimpedance (GMI) effects due to the removal of skin layer in amorphous alloy  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$  were measured for uniaxial magnetic field along the longitudinal direction of the sample. Magnetoimpedance ratio was decreased by the removal of skin layer of the sample and also was proportional to the current and applied current frequencies. Our samples showed the maximum MIR values( $\text{MIR}_{\text{max}}$ ) at frequencies around MHz range and the value decreased again for the higher frequencies. The change in anisotropy field due to the removal of skin layer lowered the applied magnetic field where the MIR value was maximum. However, MIR decreased because of the volume effect due to the removal of skin layer.

### 1. 서 론

최근 영자왜(zero magnetostriction) 비정질 금속에서 교류전류에 대한 GMI 특성이 매우 크다는 것이 발견되면서 자기 임피던스(Magneto-Impedance : MI)효과에 대한 연구가 급속히 진전되고 있다<sup>1,2)</sup>. MI 센서는 MR 효과를 이용한 자기센서에 비하여 훨씬 낮은 자기장(50Oe 이내)에서 GMR 보다 훨씬 큰 임피던스 변화(40~200%)를 보이므로 고감도성(분해능  $10^{-5}$ Oe) 자기센서로서 많은 관심을 받고있다<sup>3)</sup>.

MI는 MIR(Magnetoimpedance Ratios)로 나타내는데  $\Delta Z/Z(H_{\text{max}}) \equiv [Z(H_{\text{ex}})/Z(H_{\text{max}})] - 1$ 로 정의한다. 여기서  $H_{\text{ex}}$ 는 시료방향으로 걸어진 자기장의 세기이고,  $H_{\text{max}}$ 는 인가된 최대 자기장의 세기이다. 이러한 자기임피던스 효과는 고전전자기학 현상으로 시료에 흐르는 전류에 의하여 전류방향과 수직인 횡방향(transverse direction)으로 발생하는 자기장의 영향을 받는 시료의 자구 운동이나 고주파 영역의 skin effect에 기인한다<sup>4)</sup>. MI 효과는 연자성체에서 전류방향과 수직으로 놓인 자구와 같이 횡방향 자기구조를 가질 때 매우 큰 효과가 있다. 특히, 낮은 주파수에서 횡방향 자화는 외부 자기장  $H_{\text{ex}}$ 이 이방성 자기장  $H_i$ 보다 작을

때 주로 자벽 운동에 의하여 일어나며, 이에 대응하는 횡투 자율이 매우 크고, 종방향(longitudinal direction)으로 가하는 외부 자기장이 증가함에 따라 급속히 감소하여 매우 큰 MIR을 나타낸다. 자벽이 eddy current에 의하여 완전히 멈추지 않은 주파수영역에서는 자벽 운동과 자기모멘트의 회전, skin effect의 영향을 받아 자장 의존성이 존재한다<sup>5)</sup>. 그러나 고주파 영역에서는 임피던스의 주파수특성이 주로 skin effect에 의해 발생하여 임계주파수를 가지고 감소하는 경향이 존재한다. 전류방향과 평행한 자구구조를 가지는 연자성체의 경우 자화과정에서 자벽운동은 무시되고 자기모멘트의 회전과 skin effect에 의해 발생된다. 따라서 저주파에서 MI효과는 횡자구 구조의 시편보다 작게 나타나지만 고주파 영역에서는 비슷한 값을 나타낸다.

본 실험에서 사용한 Metglas 2714A는 비정질 제작시 도입되는 내부응력에 기인한 유도이방성<sup>6)</sup>과 리본의 휠측면(wheel side surface)과 자유표면(air side surface)의 상이한 형상(morphology)에 기인한 형상이방성<sup>7)</sup>(shape anisotropy)에 의하여 종방향 자기구조를 가지고 있는 재료<sup>7~9)</sup>로 열처리를 하지 않은 as-quenched상태에서는 리본의 길이방향과 평행한 종축이방성을 가지고 있다. 그러나 기계적 연마나 에칭법에 의해 표면층을 제거하면 리본의 휠

측면과 자유표면의 상이한 형상과 표면층 근처에 밀집되어 자벽운동을 방해하는 pinning centers가 제거되어 리본의 길이방향에 수직인 횡방향 이방성자기장이 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>10)</sup>.

본 연구에서는 Metglas 2714A의 표면층을 에칭법으로 제거하여 이방성자기장의 변화가 MI효과에 미치는 영향을 인가전류 주파수와 인가전류에 대하여 조사하였다.

### 2. 실험 방법

본 연구에서는 Allied Signal사의 제품(Metglas 2714A)을 길이 15mm, 폭 4.5mm, 두께  $20\mu\text{m}$ 로 절단하여 사용하였다. 이 시료의 자왜값은 거의 0( $\lambda_s < 10^{-6}$ )<sup>11)</sup>으로 매우 작아 GMI 센서에 적합할 것으로 판단되어 원시료로 사용하였다. 원시료를 Horvat등<sup>12)</sup>이 제안한 방법으로 29%  $\text{CH}_3\text{COOH}$ , 14%  $\text{HNO}_3$ , 7%  $\text{HCl}$ , 50%  $\text{H}_2\text{O}$  용액에서 화학적 에칭을 시행하여 두께가  $15\mu\text{m}$ 인 시료로 제작하였다. 시료의 두께는 마이크로메타를 이용하여 측정하였으며 횡측면과 자유표면 모두에서 에칭이 발생하게 하였다. 자기장 변화에 대한 MI효과를 측정하기 위하여  $\pm 120\text{Oe}$  정도의 외부자기장을 solenoid를 이용하여 시료의 길이방향과 평행하게 연속하여 인가하고 Signal Generator (SYSTRON 1702)를 사용하여 인가전류와 인가전류 주파수를 1~60mA, 0.1~10MHz 범위에서 가변 시키면서 4단자법으로 측정하였다<sup>13)</sup>. 시료에 흐르는 전류를 측정하기 위하여 직렬 연결된  $3.3\Omega(5\text{W})$ 의 저항체 양단의 전압을 측정하였으며, RF전압을 DC전압으로 바꾸는 변환기(FLUKE RF probe)를 써서 RF전압을 디지털멀티미터(DMM : HP34401A)를 통해 컴퓨터에 입력하여 전류로 환산하였다. 시료의 임피던스 측정은 시료 양단의 교류전압을 측정하여 역시 RF전압을 DC 전압으로 바꾸는 변환기를 써서 DMM으로 읽은 다음 시료를 관통하는 전류로 나누어 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

주파수가 높아지면 고주파 자속변화에 의한 시료내의 와전류(eddy current)가 커지고, 이로써 자구의 운동이 억제되며 전류의 흐름이 도선의 표피 근방으로 이동하는 skin effect 효과가 커지게 된다. 이 때 교류전류에 대한 skin depth  $\delta$ 는<sup>14)</sup>

$$\delta = c \left( \frac{\rho}{2\pi\omega\mu_b} \right)^{1/2} \quad (1)$$

이다. 여기서 c는 광속도,  $\mu_b$ 는 횡투자율,  $\rho$ 는 DC 비저항이다. 이 때  $\delta$ 는 리본의 두께에 비하여 매우 작으므로 전류는 시료의 표면 근처에서만 흐른다. 이같은 경우 시료의 임피던스 Z는<sup>14)</sup> 근사적으로

$$Z = (1-i) \frac{\rho L}{2l\delta} = \frac{(1-i)L}{2lc} (2\pi\rho\omega\mu_b)^{1/2} \quad (2)$$

이며, l과 L은 리본의 폭과 길이이다. 식 (2)에서 Z가 자

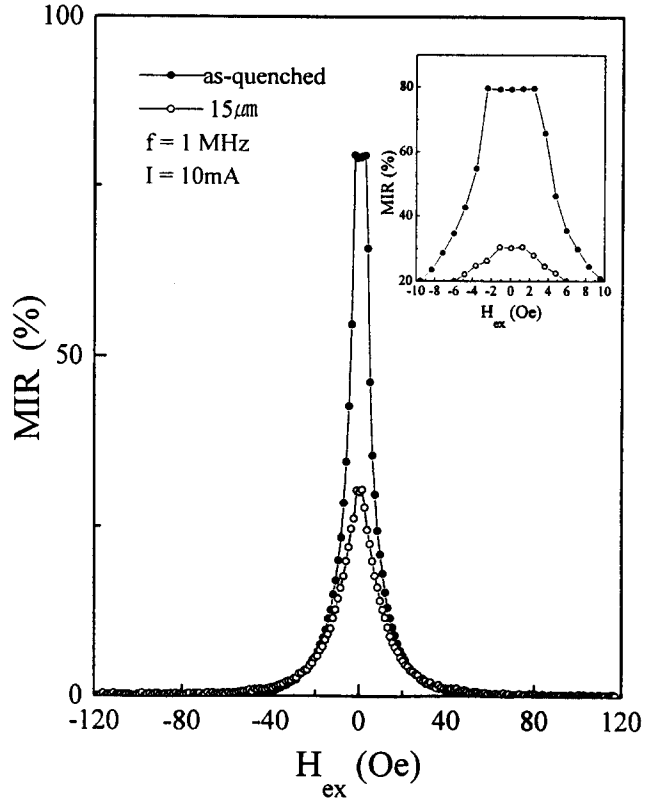


Fig. 1. Dependence of magneto-impedance ratios on axially applied magnetic field for two samples of the different thickness.

기장과 주파수에 관련된  $\sqrt{\omega\mu_b}$ 에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 1.는 시료의 두께에 따른 MIR의 자기장 의존성을 나타낸 것이다. 인가전류와 주파수를 10mA, 1MHz로 고정하여  $\pm 120\text{Oe}$  범위의 자기장 변화에 대하여 얻어진 결과이다. 거의 0인  $H_{ex}$ 에서 원시료의  $MIR_{max}$ 는 80%,  $15\mu\text{m}$ 시료는 30%를 나타내고 자기장의 세기가 증가함에 따라 대칭적으로 감소하는 경향이 관찰되었다. 원시료에 비해  $15\mu\text{m}$ 시료에서 작은 MIR값을 갖는 것은 인가전류가 시편을 통과하는 면적이 시편의 두께(t)가 감소할수록 작아짐에 따라 자화될 수 있는 부피가 감소하여 임피던스의 변화가 작아지는 것으로 판단된다.

Fig. 1.에 삽입된 그림은  $\pm 10\text{Oe}$  범위의  $H_{ex}$ 에서 MIR 변화를 나타낸 것으로  $15\mu\text{m}$ 시료의  $MIR_{max}$ 를 나타내는 자기장의 세기( $H_{ex} = H_k$ )가 원시료에 비하여 작은 값을 나타내고 있는데 이것은 에칭에 의해 종축이방성자기장이 감소하기 때문이고,  $H_{ex} < H_k$ 의 자기장 영역에서 급격한 MIR변화가 관찰되지 않는 것은 에칭에 의한 이방성자기장의 변화가 크지 않아 자구구조가 인가전류에 평행한 종자구를 유지하여 자화과정에 자구운동이 기여하지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 2.은 자기장에 대한 MIR의 의존성을 나타낸 것이다. MIR은 원시료와  $15\mu\text{m}$ 시료에 3개의 인가전류의 주파수(0.1, 1과 5MHz)와 인가전류 10mA에 대한 길이방향의 일축자기장에 대하여 얻어진 결과이다. 원시료에 대한 MIR은 길이방향의 일축자기장이 0부근에서 최대값( $MIR_{max} = 3\%$  at 0.1MHz,  $MIR_{max} = 79\%$  at 1MHz,  $MIR_{max} = 150\%$  at 5MHz)을 가지고 자기장이 증가할수록 감소하는 것

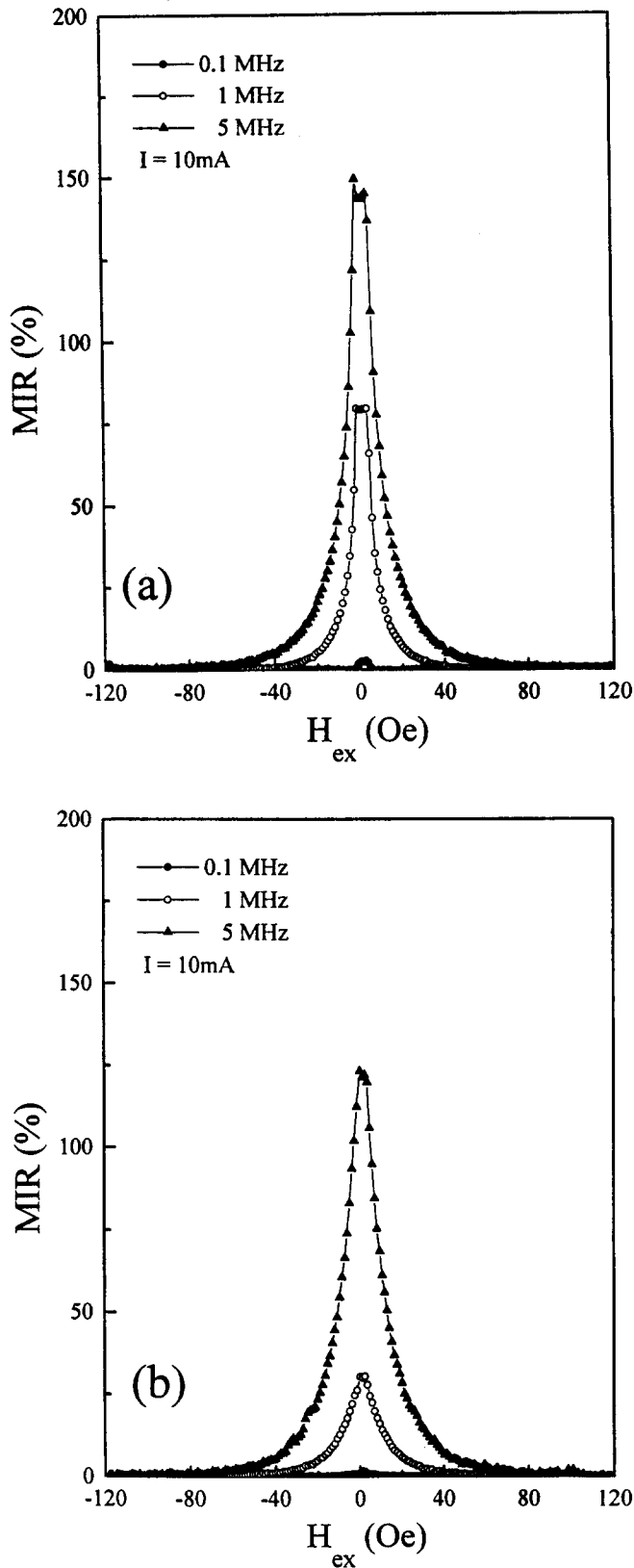


Fig. 2. Dependence of magneto-impedance ratios on axially applied magnetic field for (a) the as-quenched sample and (b) the  $15\mu\text{m}$  sample.

으로 나타나고 있다(Fig. 2(a)).  $15\mu\text{m}$ 시료에서의 MIR은 원시료에 비하여 작은 최대값( $MIR_{max}=2\%$  at 0.1MHz,  $MIR_{max}=30\%$  at 1MHz,  $MIR_{max}=123\%$  at 5MHz)을 나

타내고 있으나 원시료와 동일한 자기장의 의존성을 나타내고 있다(Fig. 2(b)). 종자구조의 시료에서 낮은 인가전류 주파수에서의 횡자화 과정은 자기모멘트의 회전에 의존하고, 높은 주파수에서는 자기모멘트의 운동과 skin effect에 따른 skin depth에 의존한다. 따라서 낮은 주파수에서는 횡자구조를 가지는 시료<sup>13)</sup>에 비하여 매우 작은 값을 갖지만 높은 주파수에서는 비교적 큰 값을 갖게 된다. 자기임피던스와 관련된 자기인덕턴스(self-inductance)<sup>5)</sup>가  $L_i = l\mu(H_{ex})/2$ 로 인가전류에 의해 발생하는 횡자율에 비례하고, 횡자율은 자기장의 증가에 따라 급격히 감소<sup>15,16)</sup>하므로 원시료의 경우 0.1MHz( $-20\text{Oe} < H_{ex} < 20\text{Oe}$ ), 1MHz( $-60\text{Oe} < H_{ex} < 60\text{Oe}$ )와 5MHz( $-100\text{Oe} < H_{ex} < 100\text{Oe}$ )에서 거의 직선적인 MIR의 감소를 보이고 그 이상의 자기장에서는 완만한 감소곡선을 갖는다.

Fig. 3은 원시료와  $15\mu\text{m}$ 시편에 10mA의 인가전류와 100kHz부터 10MHz범위의 주파수에서  $MIR_{max}$ 의 주파수 의존성을 나타내고 있다. 자기임피던스는 식(2)에서 표현된 것처럼  $\sqrt{\omega}$ 에 비례하여 증가하고 임계주파수를 가지고 감소하는 경향을 보이고 있다. 원시료의 경우 임계주파수는 4MHz부근이고,  $15\mu\text{m}$ 시료는 6MHz부근에서 나타났다. 높은 주파수에서 임피던스는 시료의 자구운동이나 자기모멘트의 회전과정보다 skin effect에 의존한다. 이러한 주파수 이상에서는 횡자율의 외부자기장에 대한 변화가 완만해지고 결국 자기장에 대해 독립적인 거동을 하게 된다. 따라서 임계주파수 이상에서 MIR은 감소하는 경향을 나타낸다. 원시료보다  $15\mu\text{m}$ 시료에서 높은 임계주파수가 나타나는 것은 에칭법으로 표면층의 pinning centers를 제거한  $15\mu\text{m}$ 시료에서 skin depth내의 자기모멘트의 회전이 원활하게 진행되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 3에 삽입된 그림은 MI 감도의 주파수의존성을 나타낸 것으로 자기장에 대한 MI감도는

$$\frac{2}{FWHM} \left[ \frac{\Delta Z}{Z} (\%) \right]_{max} \quad (3)$$

로 정의되고<sup>17)</sup>, 여기서 FWHM은  $1/2 MIR_{max}$ 에서의 자기장의 폭이다. 원시료의 경우 1%/Oe에서 27% 정도의 값을 나타내고  $15\mu\text{m}$ 시편은 1%/Oe에서 15%/Oe 정도의 값을 나타내 자기장의 감도 역시 MIR과 비슷한 경향으로 시료의 두께(t)가 감소하면 자기장에 대한 감도가 작아지는 것으로 관찰되었다. 이러한 결과는 표면층의 에칭에 의해 pinning centers가 제거되어 자력 운동과 자기모멘트의 회전이 원활하게 되어 자기장에 대한 감도가 증가할 것이나 자화가 될 수 있는 부피가 감소하여 실제로는 MI효과가 감소하는 것으로 추측된다.

Fig. 4는 인가전류의 주파수를 5MHz로 고정하고 인가전류의 세기를 1mA, 5mA, 10mA, 20mA로 변화시켰을 때 시료의 길이방향과 평행한 외부자기장에 대한  $15\mu\text{m}$ 시료의 MIR을 나타낸 것이다. 인가전류에 비례하여  $MIR_{max}$ 는 급격한 증가를 보이고 있다. 이러한 경향은 인가전류에 비례하

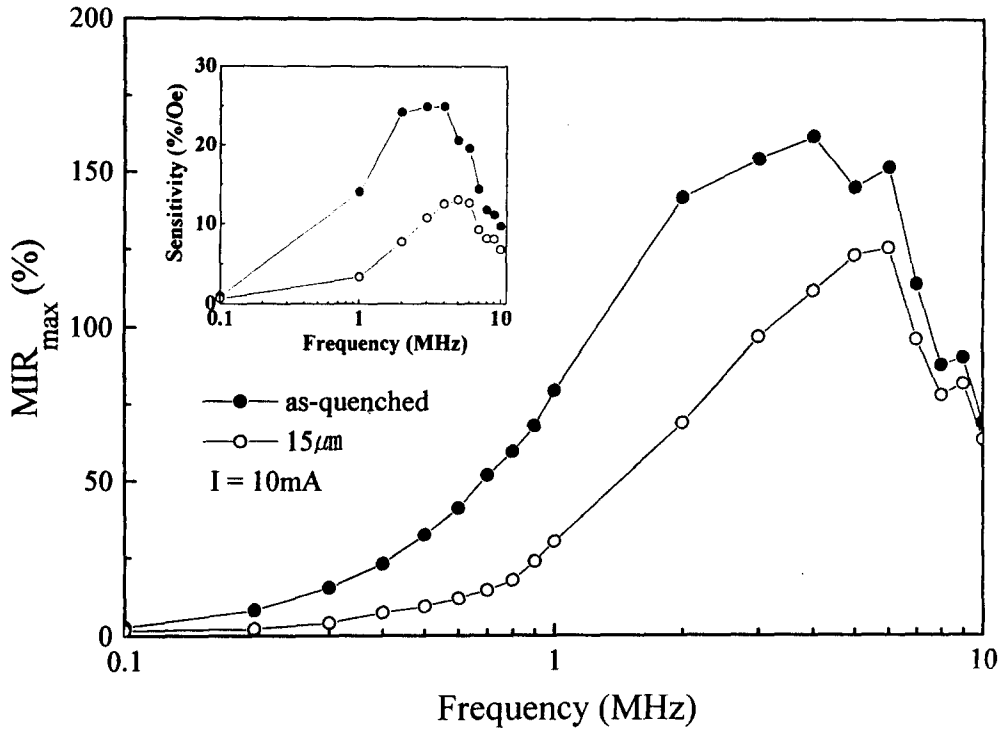


Fig. 3. Magneto-impedance ratios versus frequencies for two samples of the different thickness.

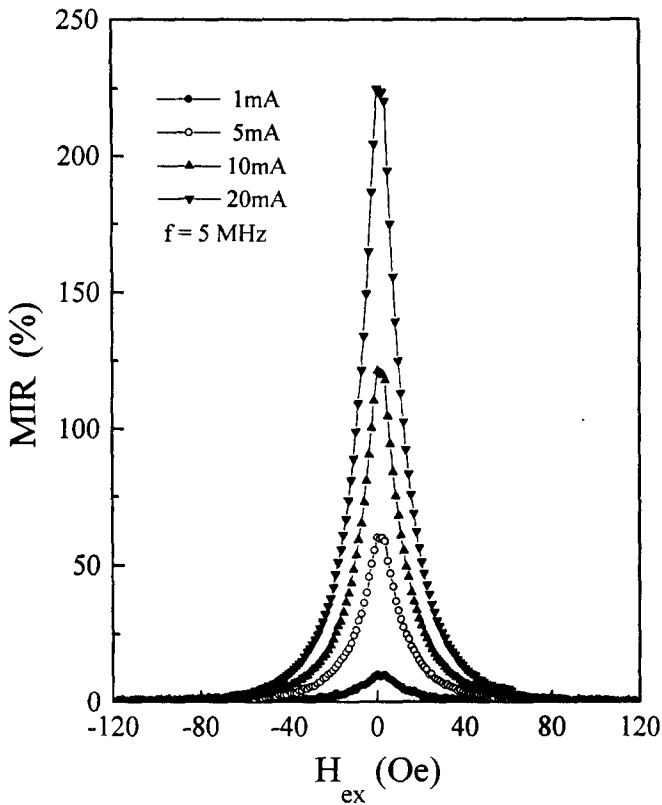


Fig. 4. Dependence of magneto-impedance ratios on axially applied magnetic field for various ac currents. Thickness of sample is  $15\mu m$ .

는 횡투자율에 기인한 것으로 식(2)와 같이  $\sqrt{\mu_0}$ 에 비례하여 커지는 것으로 판단된다. Fig. 5.는 인가전류의 주파수를 5MHz로 고정하고 1mA에서 60mA 범위의 인가전류의 세기에 따른  $MIR_{max}$ 을 나타낸것이다. 인가전류가 증가함에

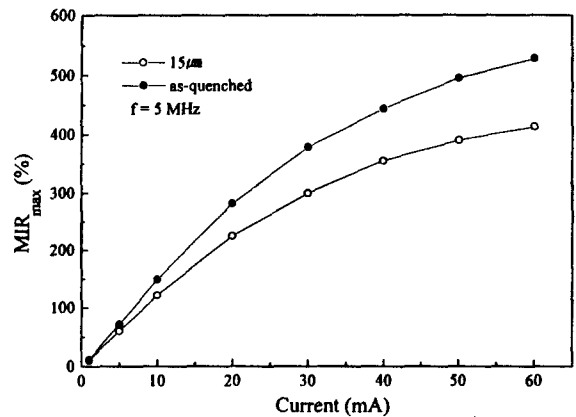


Fig. 5. Magneto-impedance ratios versus ac currents for two samples of the different thickness.

따라  $MIR_{max}$ 는 점차 증가하여 포화되어 가는데, 이는 인가전류가 증가함에 따라 횡자화 과정에서 자기모멘트가 pinning되는 것을 쉽게 극복하여 원활한 회전을 하기 때문이며, 원시료에 비하여  $15\mu m$ 시료의  $MIR_{max}$ 가 작게 나타나는 것은 시료의 부피효과 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

에칭법을 이용하여 비정질 금속  $Co_{66}Fe_4NiB_{14}Si_{15}$ 의 두께를 변화시켜 자기임피던스 효과를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 인가전류방향과 평행한 자구구조를 갖는 시료에서  $MIR$ 은  $H_k$  근방에서 최대가 되며, 외부 자기장이  $H_k$  보다 약간 클 때 급격한 감소를 나타냈다.

2) 표면층 제거에 따른 이방성자기장의 감소로  $MIR_{max}$ 가 나타나는 자기장의 세기는 감소하지만  $MIR$ 과  $MI$ 감도는 자화부피의 감소에 기인하여 작은 값을 나타낸다.

3)  $MIR$ 은 주파수에 따라 증가하다 임계주파수를 가지고 감소하는 경향을 나타내고 있으며 이러한 임계주파수는 표면층을 제거하여 pinning centers를 제거한 15 $\mu$ m시료에서 높게 나타나고 있다.

#### 참고 문헌

1. K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa, Y. Yoshida, and L. V. Panina, IEEE Trans. Magn. 28, 3150 (1992).
2. K. Kawashima, T. Kohzawa, Y. Yoshida, and K. Mohri, IEEE Trans. Magn. 29, 3168 (1993).
3. M. Senda, O. Oshii, Y. Koshimoto, and T. Toshima, IEEE Trans. Magn. 30, 4611 (1994).
4. L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Electro-dynamics of Continous Media, (Pergamon Press, Oxford, 1975).
5. L. V. Panina and K. Mohri, Appl. Phys. Lett. 65, 1189 (1994)
6. H. Kronmuller and W. Fernengel, Phys. Stat. Solidi (a) 64, 593 (1981).
7. G. Bordin and G. Buttino, J. Magn. Magn. Mater. 117, 348 (1992).
8. G. Bordin, G. Buttino, A. Cecchetti and M. Poppi, J. Magn. Magn. Mater. 133, 259 (1994).
9. G. Bordin, G. Buttino, A. Cecchetti, M. Cecchetti and M. Poppi, J. Magn. Magn. Mater. 153, 285 (1996).
10. M. Tejedor, J. A. Garcia and J. Carrizo, J. Magn. Magn. Mater. 117, 141 (1992).
11. L. Kraus, I. Tomas, E. Kratochvilova, B. Springmann and E. Muller, Phys. Stat. Solidi (a) 100, 289 (1987).
12. J. Horvat and Babic, J. Magn. Magn. Mater. 96, L13 (1991).
13. 조완식, 김종오, 이희복, 김택기, 응용물리, 10(2), 175 (1997).
14. J. D. Jackson, Classical Electrodynamics, (Wiley, NewYork, 1975).
15. L. V. Panina, K. Mohri, Senior member, T. Uchiyama and M. Noda, IEEE Trans. Magn. 31, 1249 (1995).
16. R. S. Beach and A. E. Berkowitz, J. Appl. Phys. 76, 6209 (1994).
17. R. S. Beach and A. E. Berkowitz, Appl. Phys. Lett. 64, 3652 (1994).