

## 온도에 따른 비정질 금속 $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$ 의 자기 임피던스 효과

김용국 · 김택기

충남대학교 재료공학부

대전광역시 유성구 궁동 220번지, 305-764

김성일 · 이회복

공주대학교 사범대학 물리교육과

충남 공주시 신관동 182번지, 314-701

(1997년 9월 29일 받음, 1998년 1월 20일 최종수정본 받음)

온도에 따른 비정질 금속  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$  의 자기 임피던스의 변화를 저온 장치를 써서 시료의 온도를 10 K~300 K까지 변화시키면서 측정하였다. 이때, 시료에 걸어준 교류 전류를 10 mA로 고정시키고 주파수를 100 kHz에서 10 MHz까지 변화시켰다. MIR (Magneto-Impedance Ratio)은 온도가 증가함에 따라 급격히 증가하였으며,  $MIR(T) \equiv MIR(0) \exp(cT^2)$ 의 관계식으로 나타났다. 상온에서 측정한 MIR 값은 측정 주파수 내에서 10 K에서의 값보다 2~3배 크게 나타났다. 이 결과는 MI 온도 효과를 이용한 온도 센서로서의 가능성을 제시한다. MIR 곡선의 모양은 온도의 증가에 따라 큰 변화가 없었으며 MIR은 주파수 증가에 따라 커지면서 MIR 곡선의 모양이 퍼지는 전형적인 경향을 나타냈다.

### I. 서 론

최근 비정질 금속의 자기 임피던스(Magneto-Impedance : MI) 효과가 발견됨에 따라 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]-[3].

자기 임피던스(Magneto - Impedance : MI) 효과란 고투자율, 영자왜 (zero magnetostriction) 재료에 고주파 전류가 흐를 때 임피던스가 외부 자기장에 따라 민감하게 변화하는 전자기 현상이다. 일반적으로 MI 효과는 MR 효과에 비하여 훨씬 낮은 자기장(50 Oe 이내)에서 훨씬 큰 임피던스 변화를 보여 고감도성(분해능  $10^{-5}$  Oe) 자기 센서로서 유망하다[4]. 또한 MI 센서는 고주파 변조 동작을 하기 때문에 응답 속도가 현저히 높으며 통전 전류가 매우 적어 반도체 소자와 결합시켜 사용할 수 있다는 장점이 있다.

MI 효과는 일반적으로 MIR (Magneto-Impedance Ratio)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 센서는 온도에 따라서 그 특성이 변화한다. 그러나 MI 센서의 온도 특성에 관한 연구는 전무

한 실정이다. 본 연구에서는 MI 센서의 온도 특성을 조사하기 위해 비정질 금속  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$  의 온도에 따른 자기 임피던스 효과를 저온 장치를 써서 10 K~300 K 범위 내에서 측정하였다.

### II. 실험 방법

측정에 사용된 시료는 Allied Signal사의 제품(Metglas 2714A)을 길이 15 mm, 폭 2.5 mm로 잘라 사용하였으며, 두께는  $19 \mu\text{m}$  이었다. 본 연구에 사용된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 시료를 10 K~300 K까지 온도를 변화시킬 수 있는 Cryogenic Chamber에 넣고 4단자법으로 자기 임피던스 효과를 측정할 수 있도록 하였다. 본 실험 장치의 모든 부분을 GPIB BUS로 연결하여 실험과정이 모두 IBM PC에 의하여 통제되도록 구성하였다. 즉, 외부 자기장을 조절하기 위하여 GPIB로 조절되는 DC 전압기(HPE3631A, EG&G Lockin Amp. 5110)의 출력을 자작한 DC 전원 장치 ( $0 \sim \pm 30$  V)로 전력 증폭하여 슬레노이드에 연결함으로써, 외부 자기장을  $\pm 150$  Oe의 범위 내에서 200 등분하여 프로그램으로 변화시켰다. 이 때, 디지털 멀티미터(DMM; HP34401A)로 코일에 흐르는 전류를 측

정하여 외부 자기장의 세기를 기록하였다. 고주파 전류 (10 mA) 는 1 GHz까지 가변할 수 있는 signal generator (SYTRON 1702)를 사용하여 시료에 걸어 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.

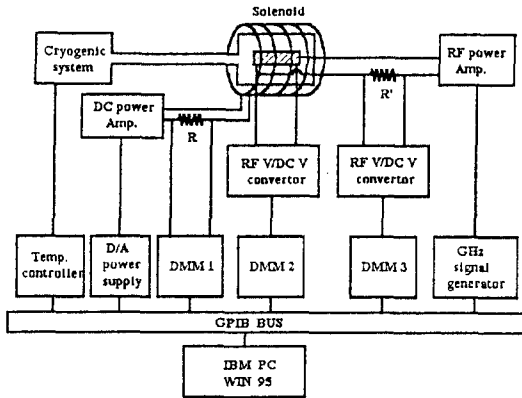


Fig. 1. Schematic diagram of the magnetoimpedance measurement system.

### III. 실험결과 및 고찰

MI 센서내의 총 임피던스  $Z$  는  $Z=R+jX$  로 주어지며  $R$  은 DC 저항이고  $X$  는 리액턴스이다. MI 는 고전 전자기학 현상으로 시료에 흐르는 전류에 의하여 전류 방향과 수직인 횡방향으로 발생하는 자기장의 영향을 받는 시료의 자구의 운동이나 원자 규모의 자기 모멘트, 고주파 영역의 포피 효과 (skin effect) 등 때문에 생긴다 [5].

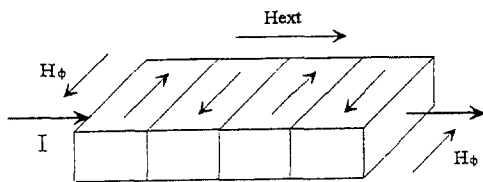


Fig. 2. Transverse magnetoimpedance effect.

MI 효과는 연자성체에서 전류 방향과 수직으로 놓인 자구와 같이 횡방향 자기 구조를 가질 때 매우 큰 효과가 있다. 특히 낮은 주파수에서는 시료에 흐르는 전류 때문에 발생한 자기장에 의해 자구벽의 운동이 일어나 횡방향 자화가 생긴다.

Fig. 2는 시료에 전류가 흐를 때 시료가 횡방향으로 자화되는 것을 나타낸 것이다. 전류가 흐르는 종방향의 전위차  $\Delta V$  는

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

이다. 여기서  $\langle E_z \rangle$  는 시료에 유도되는 역기전력 때문에 생기는 전기장으로 시료방향에 수직한 둘레에 생긴 자속 변화에 의해 유도되며, 시료 둘레에 유도된 자화값의 변화에 비례한다. 이 때  $L$  은 시료의 길이이고  $\alpha$  는 비례상수이다.

MI 효과의 주파수 의존성을 알기 위해 먼저 도선에 흐르는 전류에 의한  $\langle E_z \rangle L$  을 계산하면 다음과 같다. 먼저 정성적인 설명을 위해 시료를 반경이  $a$  인 원통형이라 가정하고 비교적 낮은 주파수에서 균일하게 흐른다면, 시료의 중심으로부터 거리  $r$  인 지점에서의 전류에 의한 자기장  $H_\phi$  는  $H_\phi = \frac{2Ir}{ca^2}$  으로 주어진다. 여기서  $c$  는 광속도이다. 또한, 전류는  $I = I_0 e^{-j\omega t}$  이므로  $\langle E_z \rangle L$  은

$$\langle E_z \rangle L = -j \frac{2I\omega}{c^2} \int_0^r \mu_\phi r' dr' / a^2 \quad (2)$$

으로 주어진다 [6]. 여기서  $\mu_\phi$  는 횡방향 초기투자율이다. 식 (2)에서 임피던스의 변화는 주파수와 횡방향 투자율에 비례함을 알 수 있다.

주파수가 높아지면 고주파 자속 변화에 의한 시료내의 와전류 (eddy current)가 커지므로 자구의 운동이 억제되며, 원자규모의 자기 모멘트 운동과 전류의 흐름이 도선의 포피 근방으로 이동하는 포피 효과가 커지게 된다. 이 때 교류 전류에 대한 Skin depth  $\delta$  는 [7]

$$\delta = c \left( \frac{\rho}{2\pi \mu_\phi} \right)^{1/2} \quad (3)$$

이다. 여기서  $c$  는 광속도이고,  $\rho$  는 DC 비저항이다. 이 때  $\delta$  는 리본의 두께에 비하여 매우 작으므로 전류는 시료의 표면 근처에서만 흐른다. 이와 같은 경우 시료의 임피던스  $Z$  는 근사적으로 [8]

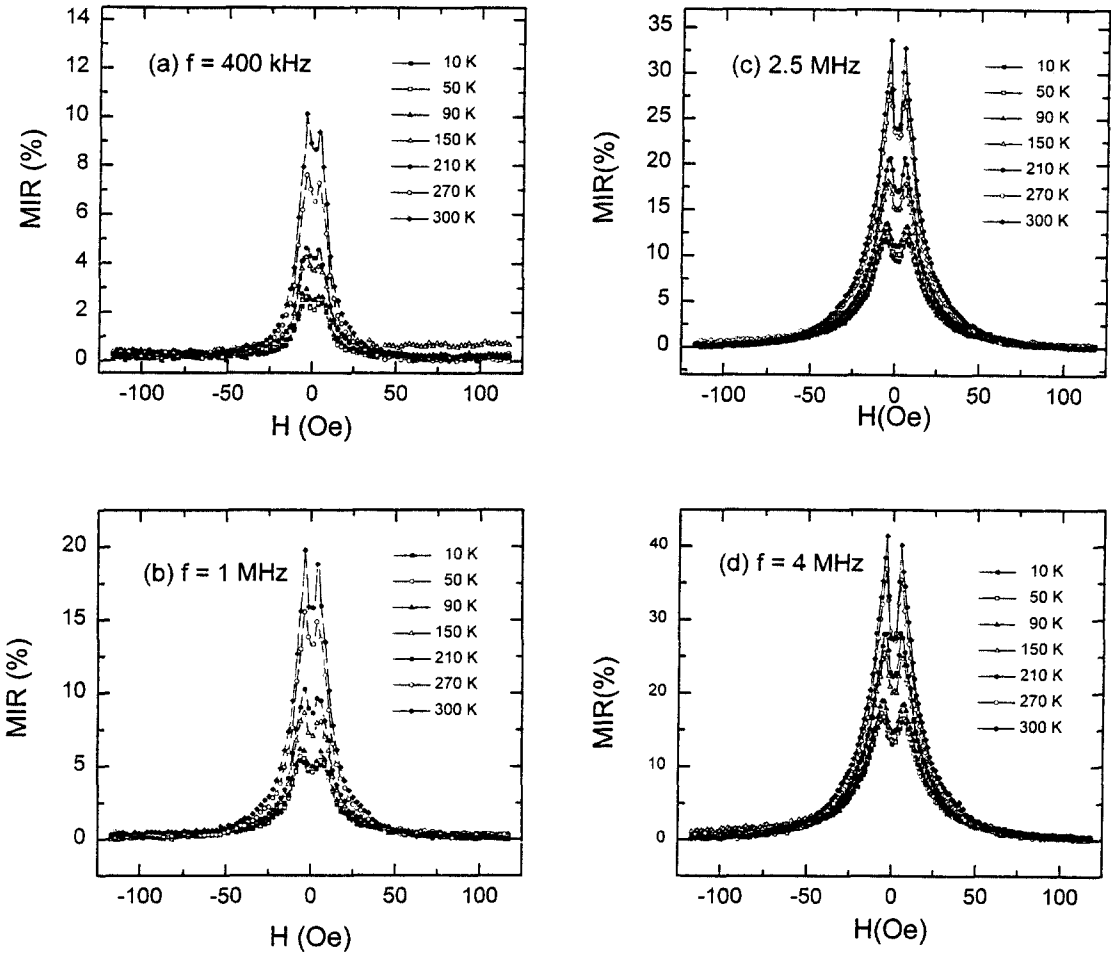


Fig. 3. The MIR vs  $H_{\text{ex}}$  curves at various temperatures with the frequencies at (a) 400 kHz, (b) 1 MHz, (c) 2.5 MHz, (d) 4 MHz.

$$Z = (1-j) \frac{\rho}{2l\delta} = \frac{(1-jL)}{2lc} (2\pi\rho\omega\mu_{\phi})^{1/2} \quad (4)$$

이며,  $i$  과  $L$  은 리본의 폭과 길이이다. 식 (4)에서  $Z$  가 자기장과 주파수에 관련된  $\sqrt{\omega\mu_{\phi}}$  에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 3의 (a), (b), (c), (d)는 주파수가 각각 400 kHz, 1 MHz, 2.5 MHz, 4 MHz에서 각 시료의 온도를 10 K~300 K까지 변화시키면서 MIR을 측정하여 온도가 증가함에 따라 MIR이 증가하는 경향을 나타냈다. 상온에서 측정된 MIR 값은 측정 주파수내에서 10 K에서의

측정값 보다 2~3배 크게 나타났고, MIR은 외부 자기장  $H_{\text{ex}}$  가  $\pm 30$  Oe 범위 내에서 가장 크게 변화하였다. 그러나, MIR 곡선의 모양은 온도 변화에 대하여 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 시료의 측정 온도가 상온보다 훨씬 낮은 경우라 하더라도 자구의 운동이나 표면 효과에 의하여 자구 운동이 억제된 경우에도 시료 표면 근방의 분자 규모의 자기모멘트 운동에는 큰 변화가 없음을 의미한다. 특히 MI 곡선의 최대가 되는 지점의 외부 자기장 크기에 변화가 거의 없는 것은 이 위치에 영향을 주는 것으로 추측되는 이방성 자기장의 크기가 온도의 영향을 받지 않기 때문으로 보인다. 따라서 본 시료와 같이 자왜

가 거의 0이고 온도 팽창계수가 작은 시료의 경우 이 최대 지점의 자기장을 온도 변화가 큰 환경에서 기준으로 이용할 수 있을 것이다.

Fig. 4는 각 측정 주파수에 대하여 MI 효과의 온도의 의존성을 나타낸 것으로 온도의 증가에 따라 MI 효과가 지수적으로 증가함을 알 수 있다.

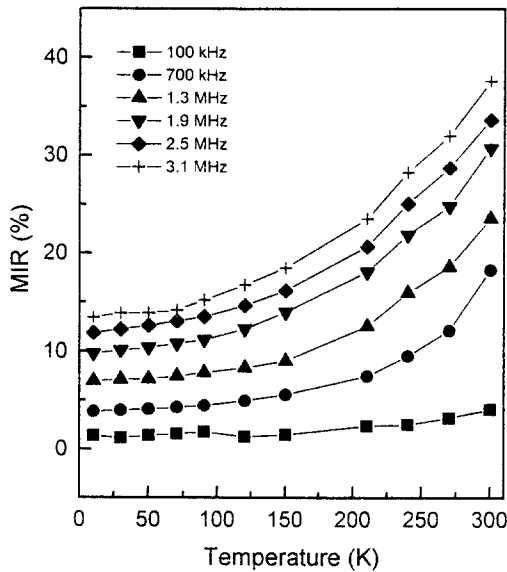


Fig. 4. Temperature dependence of MIR at various frequencies.

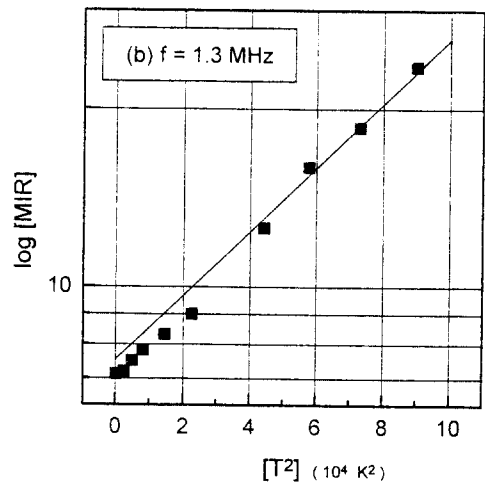
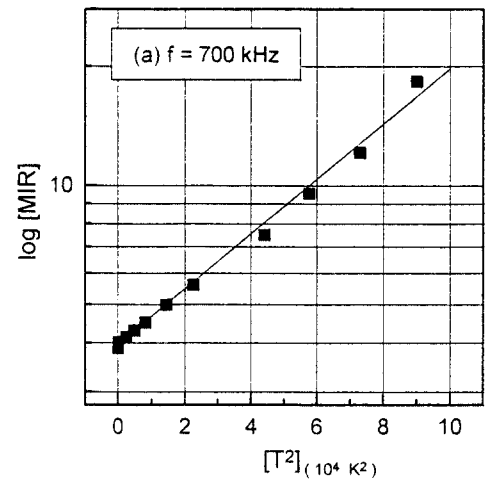
이러한 온도에 따른 MIR의 변화를 분석하기 위하여 log 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이 그래프는 실험 오차 범위 내에서 다음 식으로 나타낸다.

$$MIR(T) \equiv MIR(0) \exp(cT^2) \quad (5)$$

여기서  $T$ 는 측정 온도,  $MIR(0)$ 는  $T=0$  K에서의 MIR 값,  $c$ 는 상수이다.

온도에 따른 MIR의 급격한 증가는 시료의 자기적 특성이 온도에 따라 달라지기 때문이며 MI 효과에 영향을 가장 많이 주는 특성으로 투자율의 변화와 포화자화값의 변화를 들 수 있다. 일반적으로 포화자화값은 온도 증가에 따라 감소하는데, 본 시료의 큐리 온도가 205 °C이므로 본 실험의 측정 온도 범위 내에서는 포화자화값이 급격히 변화하지 않는다[9]. 일반적으로 연자성 특성이 매우 우수한 시료에서는 온도 증가에 따라 자기모멘트가 무질서한 방향으로 열적운동을 하게 됨에 따라 자기 모멘트

간의 상호 작용이 약해지기 때문에 국소적 이방성이 감소하게 되어 고주파 투자율이 증가한다. 다시 말하면 저온에서는 자기모멘트의 시료 들레 방향으로의 운동이 일어 불게 되어 MIR이 감소한다고 볼 수 있다[10]. 따라서 이러한 복합적인 결과로 온도 증가에 따라 MIR이 급격히 증가한 것으로 보이나 이를 규명하려면 보다 기초적인 연구가 필요하다. 참고로 본 시료와 일부 Co계 비정질 금속에서 상온보다 높은 온도에서 열처리 할 때 구성 원자들의 미소한 위치 재배열이 일어나 국소적 이방성이 증가된다고 보고된 바 있으나[9], 이는 시료내에서 원자들의 재배열이 일어날 수 있는 충분히 높은 상온이상의 온도에서만 가능한 것이고 본 실험의 경우와 같이 상온이하에서



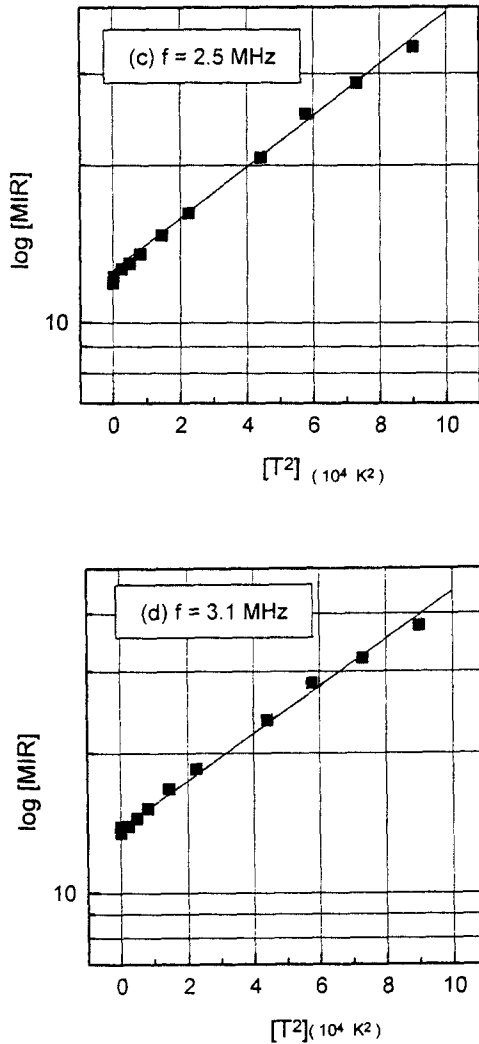


Fig. 5. Temperature dependence of MI effect fitted with the equation (5).

는 원자의 재배열이 일어날 수 있는 열적 활성화에너지(thermal activation energy)를 갖지 못하므로 온도 증가에 따른 국소적 이방성이 증가한다는 주장은 성립될 수 없다. MIR의 온도에 따른 변화와 식(5)를 이용하면 MI 효과를 이용한 온도 센서로서의 응용이 가능하다.

Fig. 6은 MI 효과의 주파수 의존성을 나타낸 것으로 5 MHz 이하에서 MIR은 주파수에 비례하여 증가하고 7 MHz 전후에서 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 낮은 주파수에서는 자구의 운동에 기인하여 증가하나, 주파수가 증가함에 따라 표피 효과 때문에

자구 운동이 점차 억제되고 시료 표면 근방의 분자 규모의 자기 모멘트 운동이 나타나기 때문이다.

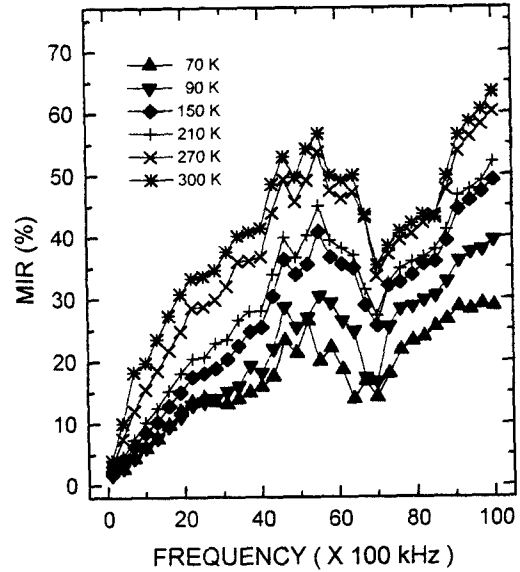


Fig. 6. Frequency dependence of MIR at various temperatures.

#### IV. 결 론

온도에 따른 비정질 금속  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$  의 자기 임피던스 (Magneto-Impedance : MI) 효과를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 온도가 증가함에 따라 MI 효과는  $\text{MIR}(T) \equiv \text{MIR}(0) \exp(cT^2)$ 의 관계식에 따라 증가하였다.
2. 온도 변화에 따른 MI 곡선의 모양과 MIR의 최대 지점의 자기장의 위치가 변화하지 않았다. 이는 온도 센서로서의 응용 가능성이 있음을 의미한다.
3. 상온에서 측정된 MIR 값은 측정 주파수내에서 10 K에서의 값보다 2~3배 크게 나타났다.
4. MIR은 외부 자기장  $H_{ex}$  가  $\pm 30$  Oe 범위 내에서 가장 크게 변화하였다.

본 연구에서 측정된 온도에 따른 MI 효과의 변화에는 온도에 따른 횡방향 투자율의 변화가 가장 큰 영향을 준 것으로 사료되며, 이는 국소적 이방성이 저온에서는 자기 모멘트간의 상호 작용으로 증가하고 온도가 상온으로 상승함에 따라 감소하기 때문으로 보인다. 또한, 본 연구로 MI 센서의 온도의존성에 관한 관계식이 도출되었으며 이 관계식을 설명하려면 MI 효과에 영향을 주는 여러 가지 자기적

특성에 관한 정량적인 연구가 더욱 진행되어야 한다.

### 감사의 글

이 논문은 1997년도 교육부 학술 연구 조성비(신소재 분야)에 의하여 연구하였음.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] L. V. Panina, H. Katoh, K. Mohri, and K. Kawashima, *IEEE Trans. Magn.* **29**, 2524 (1993).
- [ 2 ] 이회복, 조완식, 김종오, 김택기, *응용물리*, **10** (2), 175 (1997).
- [ 3 ] 김용국, 김택기, 이회복, *한국자기학회지*, **7** (1), 4 (1997).
- [ 4 ] M. Senda, O. Oshii, Y. Koshimoto, and T. Toshima, *IEEE Trans. Magn.* **30**, 4611 (1996).
- [ 5 ] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Electro-dynamics of Continuous Media*, Pergamon Press, Oxford, (1975).
- [ 6 ] L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, and M. Noda, *J. Appl. Phys.* **76**, 6189 (1994).
- [ 7 ] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley, New York, (1975).
- [ 8 ] K. Kawashima, T. Kohzawa, Y. Yoshida, and K. Mohri, *IEEE Trans. Magn.* **29**, 3168 (1993).
- [ 9 ] G. Bordin, G. Buttino, A. Cecchetti, M. Cecchetti, M. Poppi, *J. Magn. Magn. Mater.* **153**, 286 (1996).
- [ 10 ] Y. K. Kim, W. S. Cho, T. K. Kim, C. O. Kim, Heebok Lee, *J. Appl. Phys. and IEEE Trans. Magn.* (to be published).

## Temperature Dependence of Magnetoimpedance Effect in Amorphous $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$ Ribbon

Y. K. Kim and T. K. Kim

*Division of Material Science, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea*

S. I. Kim and Heebok Lee

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

(Received 29 September 1997, in final form 20 January 1998)

The temperature dependence of the magnetoimpedance (MI) effect is important both for scientific study and for thermal stability of MI sensors. We have performed the measurement of MI effect in amorphous  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Ni}_1\text{B}_{14}\text{Si}_{15}$  (Metglas 2714A) ribbon from a cryogenic chamber where the temperature of the sample can vary from 10 K to 300 K. The ac current was fixed at 10 mA for all measured frequencies ranging from 100 kHz to 10 MHz.

The magnetoimpedance ratio (*MIR*) was revealed the drastic increment as a function of  $MIR(T) \equiv MIR(0) \exp(cT^2)$  where *c* is a constant. The measured *MIR* values at room temperature are usually 2-3 times larger than the data measured at 10 K for all measured frequencies. However, the shapes of the *MIR* curves are remained. This result shows the potential application of the MI effect for a temperature sensor. The frequency dependence of *MIR* has shown the typical tendency where the maximum values of *MIR* are increasing and also the shapes of *MIR* curves are getting broader as the measured frequency increases.