

## 자화방향에 따른 비정질 $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$ 리본의 자기임피던스 효과

유권상

한국표준과학연구원 전자기연구부, 유성우체국 사서함 102호 305-600

김철기

선문대학교 물리학과, 충남 아산시, 336-840

윤석수

안동대학교 물리학과, 경북 안동시 760-749

양재석 · 손대락

한남대학교 물리학과, 대전시 대덕구 오정동 113, 300-791

(1997년 6월 1일 받음, 1997년 6월 20일 최종수정본 받음)

비정질  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$ 에서 리본의 종방향에 대하여 여러 가지 각도를 갖는 시편을 식각법으로 제작하여 100 kHz의 교류전류에서 4 단자법으로 MI 신호를 측정하였다.  $H=0$  근처에서  $30^\circ$  시편부터 dip이 나타났으며, 그 크기는 각도에 따라 단조증가하였다. 자기장 크기에 따라 MI 신호는 증가하였고, 일정한 자기장에서 식각각도에 따라 MI 신호는 증가하다가  $90^\circ$  시편에서 감소하였다.

### I. 서 론

자성체에 교류전류를 흘리면서 전류 방향으로 자기장을 인가하면 전류방향의 임의의 두 위치에서 저주파 (1~10 kHz) 일때는 자벽이동에 의해, 고주파 (0.1~10 MHz) 일때는 표피 효과에 의해 전압이 민감하게 변하는데, 이 현상을 자기임피던스 (Magneto-Impedance, MI)라 한다 [1]. 특히 높은 투자율을 갖는 비정질 재료에서 그 값이 크게 변하므로 이를 거대자기임피던스 (Giant Magneto-Impedance, GMI)라 한다. 이 효과는 고밀도 자기기록 매체의 자기 센서로 활용되는 거대자기저항 (Giant Magneto-Resistance, GMR)에 비하여 낮은 자기장 (50 Oe 이내)에서 자기이력을 보이지 않고 GMR 보다 100배 이상의 민감도를 보이므로 고감도 자기 센서로 유망하다 [1]. 또한, 직경 수  $\mu\text{m}$ , 길이 1 mm의 크기를 갖는 비정질 와이어에서  $10^{-5}$  Oe의 국부자기장 관측이 가능하여 미소 고감도 자기헤드 및 정보기록매체의 자기센서로 활용할 가능성이 크다 [2].

K. Mohri 그룹에서 비정질 와이어에 대한 자기유도효과 (magneto-inductive effect)에 대한 연구가 이루어진 후 [3~5], Fe-based 비정질 리본과 자기변형이 없는 (zero-magnetostriction) Co-based 비정질 리본에 대한

MI 및 GMI 연구가 활발히 진행되고 있다 [5~7]. 그리고 나노 구조 (nanostructure)를 갖는 비정질 와이어에서 MI 연구도 진행되었으며 [8], 비정질 GMI 소자를 갖는 resonant multivibrator를 이용한 전류 센서도 제작되었다 [9]. 국내에서도 Co-based 비정질 리본에서 열처리 전, 후의 GMI 효과를 비교하였고 [10], GMI 효과가 일어나는 자기장에서 임피던스의 위상변화에 대한 연구가 이루어졌다 [11].

R. L. Sommer 등은 magnetron sputtering으로 제작한 Fe-based film을 횡 방향과 종 방향으로 자장 중 열처리하여 GMI 효과를 측정하고, Co-based 비정질 리본에서 횡방향과 종방향으로 자장 중 열처리하여 MI를 측정하였다 [12, 13]. 그리고 최근에서 3% SiFe에서 rolling 방향에 따른 GMI 신호는  $70^\circ$ 에서 가장 큰 것으로 측정되었다 [14]. A. D. Santos 등은 비정질 리본으로 횡방향으로 자장 중 열처리한 시편에서 자기광학 Kerr effect에 의해 자구를 관측하여 자구와 GMI 효과의 관계를 설명하였으며 [15], L. Kraus 등은 비정질 리본의 횡방향으로 응력을 가하면서 열처리한 시편에서 GMI 효과를 관측하였다 [16].

본 연구에서는 일반적으로 MI가 큰 것으로 알려져있는 Co-based 비정질 리본을 선정하여 비정질이지만 리본

의 길이 방향으로 이방성이 있는 것으로 알려져 있으므로, 이방성에 따른 MI 효과를 보고자 하였다. 비정질  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$  리본을 종방향에 대하여  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , 및  $90^\circ$ 로 식각하여  $5\text{ mm(W)} \times 45\text{ mm(L)}$ 인 시편을 제작한 후, 자기장의 크기에 따른 MI 신호와 dip의 변화를 측정하고, 이를 투자율에 의해 설명하고자 한다.

## II. 자기도체의 임피던스

시편에 교류전류와 나란한 방향으로 자기장을 인가할 때, 자기장에 의한 임피던스의 변화는 자벽이 전류방향과 수직하게 놓여있는 경우와 평행하게 놓여있는 경우로 나누어 설명할 수 있다. Fig. 1과 같이 자벽이 전류방향과 수직하게 놓여있는 경우 낮은 주파수 영역에서 외부 직류 자기장이 없을 때, 횡자화는 주로 교류전류에 의해 생성되는 자기장에 의한 자벽이동에 의해 일어난다[2]. 이때, 이방성 자기장  $H_K$ 와 같은 크기의 외부 자기장( $H_{ex}$ )을 인가하면 자기모우먼트의 회전이 일어나게 된다. 그러나 고주파 영역에서 와전류에 의해 자벽이동이 거의 감소되었을 때, 자기모우먼트의 회전은  $H_{ex} \ll H_K$ 일때도 우세하게 된다.  $H_{ex}$ 가 자화근란축으로 인가한 자기장이  $H_K$  근처 값을 가질 때 횡투자율  $\mu_T$ 는 상당한 큰 값으로 변하게 되어 MI 효과는 대단히 크고 민감해진다.

전류 방향과 자벽이동이 평행한 경우, 횡자화는 순수한 자기모우먼트의 회전에 의해서만 일어난다. 대응되는 투자율은 상대적으로 적고, 자화용이축으로 인가한 외부 자기장  $H_{ex}$ 와 함께 천천히 감소한다. 이런 형태의 MI 효과는 고주파에서 크게 나타나지만 이것은 자벽과 전류가 수직한 경우만큼 민감하지 않다[2].

MI 효과는 투자율과 전기전도도를 이용하여 정량적으로 분석할 수 있다[2]. Fig. 1과 같은 두께가  $2a$ 인 얇은 sheet의 종방향 ( $z$  방향)으로 전류  $I_L = I_0 \exp(-j\omega t)$ 를 흐르면 횡방향의 자기장 성분  $B_T = \mu_T H_T$ 이고, 임피던스는

$$Z = R_{dc} jka \coth(jka) \quad (1)$$

으로 주어진다. 여기서  $j = \sqrt{-1}$  이고,  $R_{dc} = l / (2\pi a^2 \sigma)$ 는 직류저항이며,  $k = (1 + j) / \delta_m$ 이다. 그리고  $\delta_m$ 은 횡투자율  $\mu_T$ 와 전도도  $\sigma$ 를 갖는 자성체의 투과깊이 (penetration depth)로 다음과 같이 주어진다.

$$\delta_m = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\sigma\mu_T}} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)로부터 임피던스는 투과깊이를 매개로 하여 횡투자율에 영향을 받을 수 있다.

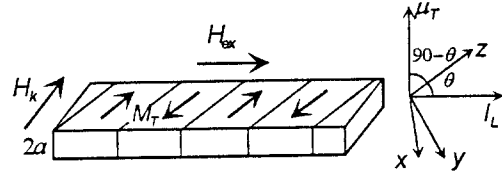


Fig. 1. Stripe domain structure  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$  amorphous ribbon at  $90^\circ$  cutting angle from ribbon axis.

## III. 실험 방법

자화를 시편의 종방향과 횡방향으로 향하게 하기 위해 시편을 종방향에 대하여 어떤 각을 갖도록 절단하여 준비하였다. 절단과정에서 발생할 수 있는 stress를 최소화하기 위하여 식각법으로 시편을 준비하였으며, 사용한 원재료는 Allied Signal사에서 제작한 Metglas<sup>®</sup> 2714A( $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$ )로 자기변형이 없는 것으로 알려져 있다. 두께  $20\ \mu\text{m}$ 인 리본의 길이 방향에 대하여  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  및  $90^\circ$ 로 염화 제이철 용액으로 식각하여 길이  $45\text{ mm}$ , 폭  $5\text{ mm}$ 인 시편을 제작하였다.

4 단자법으로 MI를 측정하기 위한 장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 전류 인가 및 신호측정용 단자를 silver

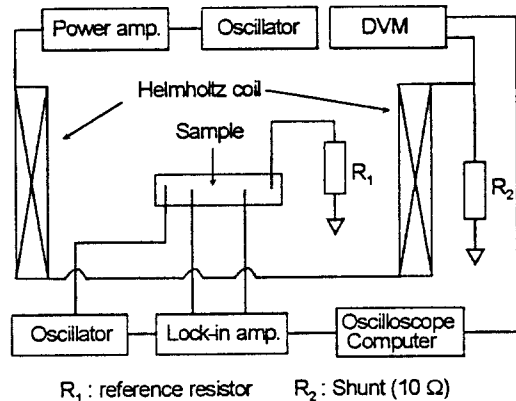


Fig. 2. Block diagram for measuring MI.

paste로 시편에 접촉하였다. 시편의 길이 방향으로 100 kHz 교류전류를 인가하기 위해 신호발생기 (hp3325B)를 사용하였고, MI 신호 관측용으로 lock-in 증폭기 (SR530)를 사용하였다. 자기장은 다른 하나의 신호발생기 (hp3325B)에서 발생한 삼각파형을 전력증폭기 (Tecron 7560)에 입력하여 전류를 증폭시킨 후, 이 전류를 코일상수가 23.56 Oe/A인 헬름홀츠 코일에 인가함으로써 생성되었고, 자기장의 크기는 DVM으로 10 Ω 선트저항의 전압으로 측정하였다. DVM의 출력과 lock-in 증폭기의 출력을 AD 변환기로 변환하여 컴퓨터로 자기장 세기 및 MI 신호를 측정하였다.

#### IV. 결과 및 논의

Fig. 3은 60°로 식각한 시편에 주파수가 0.1 Hz의 자기장을 인가하면서 측정한 MI 신호로 I은 자기장이 증가할 때의 영역이고, II는 자기장이 감소할 때의 영역이다. 최대 자기장이 각각 2.7, 4.6, 6.8, 9.2, 11.5 및 13.2 Oe<sub>p-p</sub> 일 때 측정한 MI 신호가 (a), (b), (c), (d), (e) 및 (f)에 주어져 있는데, H<sub>ex</sub>가 0 Oe 근방일 때 MI 신호가 관측된다. 자기장이 13.2 Oe<sub>p-p</sub> 일 때

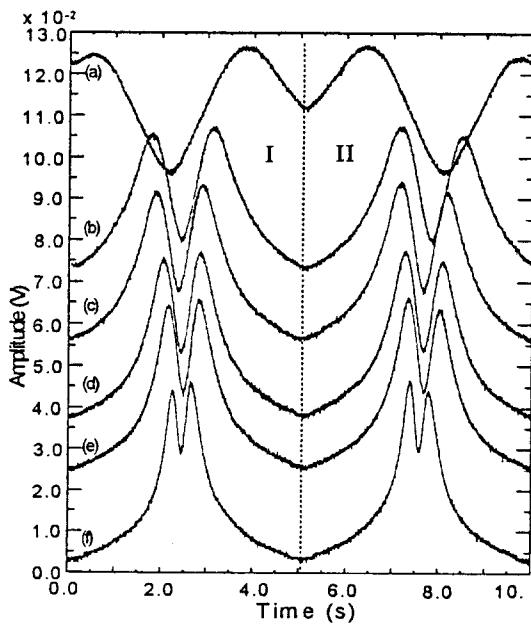


Fig. 3. MI signals for etching direction 60° sample at (a) H<sub>ex</sub> = 2.7, (b) 4.6, (c) 6.8, (d) 9.2, and (f) 11.5 Oe<sub>p-p</sub>.

MI 신호의 최대치는 약  $4.4 \times 10^{-2}$  V이다. 최대 자기장이 증가하면 자기모우먼트의 회전에 의해 횡투자율이 커지기 때문에 MI 신호가 커지는 것으로 사료된다. 또한 H<sub>ex</sub> = 0 근처에서 MI 신호는 dip을 가진다. Perminvar에서 투자율은 임계자기장까지는 작고 다소 급하게 증가하나 임계자기장 이상의 자기장을 가하면 180° 자벽은 포텐셜 우물 밖으로 움직이게 되고, 포텐셜 우물을 벗어나면 자벽은 보다 용이하게 이동하며 투자율은 증가하는 바와 같이 MI 신호는 자벽의 비선형적인 이동에 기인하는 것으로 사료된다[17]. Fig. 3 (a)와 같이 외부자기장이 작은 경우에는 dip이 나타나지 않다가 자기장이 증가함에 따라 나타나는데, dip이 작아야 MI를 센서로 활용하기에 유리하다.

Fig. 4는 Fig. 3을 인가자기장에 대한 MI 신호와 dip의 최대값으로 나타내었다. 최대 자기장이 증가함에 따라 MI 신호의 크기는 단조증가하지만, dip의 크기는 자기장이 증가함에 따라 증가하다 감소한다.

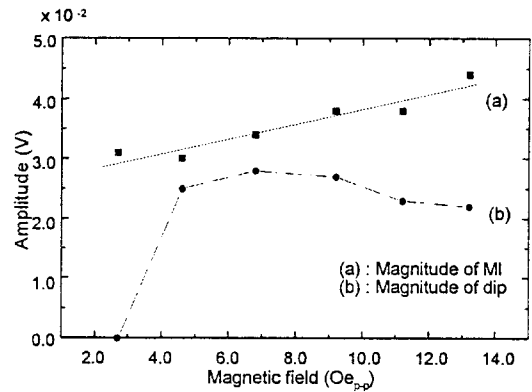


Fig. 4. Dependence of MI and dip magnitude on the magnetic fields. (a) Maximum MI signals, and (b) dip magnitudes.

Fig. 5는 0°, 30°, 45° 및 90°로 식각한 시편에서 최대 자기장이 11.5 Oe<sub>p-p</sub> 일 때 측정한 MI 신호인데, I는 자기장이 증가하는 영역이고 II는 자기장이 감소하는 영역이다. 각도에 따라 MI 신호가 증가하고, 자화용이축이 30° 일 때부터 0 Oe 근처에서 dip이 나타난다. MI 신호의 최대치와 dip의 값을 Fig. 6에 나타내었다. 각도에 따라 증가하다가 90° 시편에서는 감소하는데, 이는 3% SiFe에서 70° 각도에서 최대 MI 효과가 관측된 것과 정성적으로 일치한다[14]. dip은 자화용이축이 리본의 종방향에서 멀어질 때 거의 단조 증가하였다.

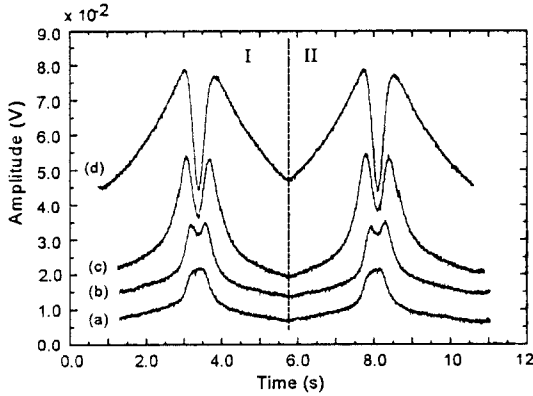


Fig. 5. MI profiles measured in the various angles from ribbon axis. ((a)  $\theta=0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $45^\circ$ , (d)  $90^\circ$ ).

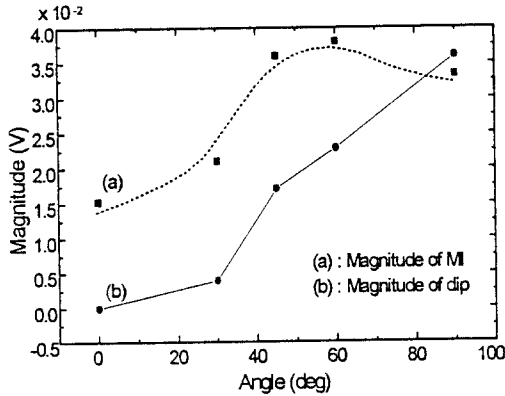


Fig. 6. Dependence of MI signals and dip magnitudes on the angle from ribbon axis. (a) Maximum MI signals, and (b) dip magnitudes.

이 결과는 종방향으로 열처리한 시편보다 횡방향으로 열처리한 시편에서 MI 효과가 크게 나타난 것과 유사하다[13].

Co-based 비정질에서 리본의 종방향에 대하여  $90^\circ$ 로 식각한 시편에서는 Fig. 7(a)와 같이 일축이방성을 갖는다. z 방향으로 자기장  $H_{ex}$ 을 가하면 횡자화  $M_T$ 는  $H_{ex}$ 에 의해 변화하게 된다. 이방성 자기장  $H_k$ 가 횡방향으로 놓여있을 때 외부 자기장  $H_{ex}$ 가 없으면 고주파 전류에 의해 생기는 자기장  $H_{ac}$ 에 의한  $M_T$ 의  $H_k$  방향 성분의 변화는  $H_{ex}=H_k$  일 때 최대가 되고,  $H_{ex}>H_k$  일 때 다시 감소하게 된다[5]. MI 스펙트럼은  $H_{ac}$ ,  $H_k$  및  $H_{ex}$ 에 의해 생성되는 자기장의 상대적인 방위에 의

해 결정되고,  $H_{ex}$ 는 반자장에 의해 결정된다[13]. 5 가지 형태의 시편에서 내부 자기장은 근사적으로  $H_i^x=H_{ex}-4\pi D_v$ ,  $M_v$ 에 의해 주어진다. 여기서  $v=0^\circ, \dots, 90^\circ$ 이고,  $D_v$ 는 반자장계수이다. Fig. 7(a)와 같이  $H_{ac}$ 와  $H_k$ 가 평행한  $90^\circ$  시편과 (c)와 같이  $H_{ac}$ 와  $H_k$ 가 수직인  $0^\circ$  시편에서 상대 횡투자율의 모습이 (b), (d)에 주어져 있다[13]. 각도  $\theta$ 에 따른 MI 증가는  $(90-\theta)$ 에 따른 투자율 증가로 정성적으로 설명될 수 있는데  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$  및  $90^\circ$ 로 식각한 시편에서 상호유도법(mutual inductive method)으로 측정된 투자율로 계산한 임피던스와 본 실험으로 측정한 임피던스의 변화는 거의 같은 경향을 보였다[18]. 그러나 정량적인 분석은 더 많은 연구가 필요하다.

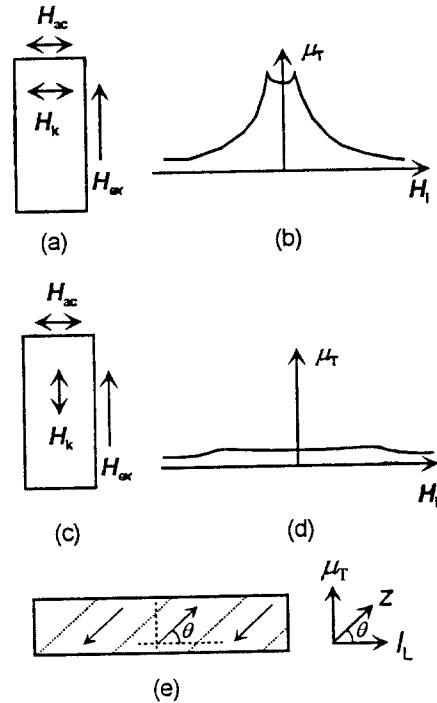


Fig. 7. Schematics showing the effects of etching direction, measurement geometries, and induced anisotropies on magneto-impedance for (a)  $\theta=90^\circ$ , (c)  $0^\circ$ . The relevant transvers susceptibility versus internal field  $H_i$  for (b)  $\theta=90^\circ$ , (d)  $0^\circ$ . The anisotropy at arbitrary cutting direction (e).

## V. 결 론

비정질  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$ 에서 리본의 종방향에 대하

여 여러 가지 각도를 갖는 시편을 식각법으로 제작하여 100 kHz의 교류전류에서 MI 신호를 관측하였다. 60° 식각시편에서 자기장을 변화시키며 측정된 MI 신호는 자기장의 크기가 증가함에 따라 증가하고,  $H \approx 0$ 에서 나타나는 dip의 크기는 증가하다가 감소하였다. 일정한 자기장에서 식각각도가 증가함에 따라 MI 신호도 증가하였는데, 이는 식각각도가 증가하면 횡투자율이 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [ 1 ] L. V. Panina, and K. Mohri, Appl. Phys. Lett., **65**, 1189(1994).
- [ 2 ] L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, M. Noda, and K. Bushida, IEEE Trans. Magn., **31**, 1249 (1995).
- [ 3 ] K. Kawashima, T. Kohzawa, H. Yoshida, and K. Mohri, IEEE Trans. Magn., **29**, 3168(1993).
- [ 4 ] K. Katoh, K. Mohri, and K. Kawashima, IEEE Trans. Magn., **29**, 2524(1992).
- [ 5 ] L. V. Panina, K. Mohri, K. Bushida, and M. Noda, J. Appl. Phys., **78**, 6198(1994).
- [ 6 ] F. L. A. Machado, B. L. da Silva, S. M. Rezende, and C. S. Martins, J. Appl. Phys., **75**, 6563(1994).
- [ 7 ] R. L. Sommer and C. L. Chien, Appl. Phys. Lett. **67**, 857(1995).
- [ 8 ] M. Knobel, M. L. Sanchez, C. Gomez-Polo P. Martin, M. Vazquez, and A. Hernandez, J. Appl. Phys. **79**, 1646(1996).
- [ 9 ] K. Inada, K. Mohri, and K. Inuzuka, IEEE Trans. Magn., **30**, 4623(1994).
- [10] 이회복, 조완식, 김종오, 김택기, 응용물리, **10**, 175(1997).
- [11] 김철기, 김호철, 윤석수, 유권상, 송재성, 한국물리학회회보, **15**, 102(1997).
- [12] R. L. Sommer and C. L. Chien, Appl. Phys. Lett. **67**, 3346(1995).
- [13] R. L. Sommer and C. L. Chien, Phys. Rev. **B53**, R5982(1996- II).
- [14] M. Carara and R. L. Sommer, J. Appl. Phys., **81**, 4107(1997).
- [15] A. D. Santos, L. G. C. Melo, C. S. Martins, F. P. Missell, Y. Souche, F. L. A. Machado, and S. M. Rezende, J. Appl. Phys., **79**, 6546(1996).
- [16] L. Kraus, M. Knobel, V. Halar, A. Medina, and F. G. Gandra, Conference Digest of the 8th International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems, ISEM, TPA2-17(1997, May).
- [17] B. D. Cullity, *Introduction to Magnetic Materials*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1972), pp. 357-368.
- [18] Submitted "The Journal of The Magnetic Society of Japan".

## Dependence of Magneto-Impedance on Magnetizing Angle from Amorphous $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$ Ribbon Axis

K. S. Ryu

*Electromagnetics Metrology Div., KRISS, Taejon, 305-600, Korea*

C. G. Kim

*Dep. of Phys., Sun Moon Univ., Chungnam, 336-840, Korea*

S. S. Yoon

*Dep. of Phys., Andong Univ., Kyungbook, 760-749*

J. S. Yang and D. Son

*Dep. of Phys., Hannam Univ., Taejon, 300-791*

(Received 1 June 1997, in final form 20 June 1997)

Magneto-impedance (MI) were measured in amorphous  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{NiB}_{14}\text{Si}_{15}$  ribbons at 100 kHz as a function of the angle from ribbon axis. The samples were prepared using etching method, with the angle deviated from ribbon axis,  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  and  $90^\circ$ . The MI measured in  $60^\circ$  sample increased with the increasing magnetic fields. The dip in profile appears at  $H=0$  above the angle of  $30^\circ$ . The maximum values of MI and their dips are increased with the cutting angle, but the maximum value of MI decreased at  $90^\circ$ . The increase of MI with the angle was analyzed in terms of the transverse magnetic permeability.