

CoFeSiBNi 아몰퍼스 합금의 자기-임피던스 효과

이승훈 · 박병규* · 황성우* · 문성욱†

Magneto-impedance effect of CoFeSiBNi amorphous magnetic films

SeungHun Lee, ByungKyu Park*, SungWoo Hwang*, and Sung Moon†

Abstract

Soft ferromagnetic materials are very useful for many sensors using magnetic materials demanding high permeability, low coercivity and low hysteresis loss. Among them, FeCoSiBNi amorphous magnetic films show a good impedance change (about 5.01 %/Oe, at 10 MHz) by the external magnetic field in this experiment. The magnetic films are produced by melt-spun method, one of the rapid solidification process. Ribbon shape wires were made from the films, and let them annealed in DC magnetic field to increase the maximum Giant Magneto Impedance ratio. Field annealing decreases the stress and changes the effective anisotropy. Thus, we can find that the impedance change (200.47 %) is improved and the fabricated magnetic wire has characteristics of good sensor element.

Key Words : MI effect, soft magnetic, amorphous magnetic film, magnetic sensor, skin effect, Annealing

1. 서 론

연자성체에 고주파 전류를 통전시키고 외부로부터 변화하는 자계를 가해주면, 자성체의 표피 효과(Skin effect)에 의해 외부 자계에 따른 임피던스의 변화가 일어나게 되는데 이를 MI(magneto-impedance)효과라 한다^[1].

이러한 현상은 약 60년 전부터 알려졌으며, 1980년대 후반 Shimada 그룹은 이러한 연자성체에서의 외부 자계 인가에 의한 고주파의 저항 변화가 약 400 %/Oe에 도달할 것을 이론적으로 증명하였고, 1992년 Mohri 교수가 이 현상에 MI 효과라는 명칭을 붙여, 이를 고감도 자계 센서의 개발에 응용하면서부터 전 세계적으로 연구가 확산되었다^[2-6].

최근까지 센서에 응용될 수 있는 자성 물질에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔으며, 그 중 아몰퍼스 자성 재료는 고무자율로 인한 고감도 자계 검출 실현과 소형화가 가능하고, 낮은 전력 소모율을 가지며, 빠른 응

답 속도를 낼 수 있는 등의 센서 소자로서의 응용에 좋은 특성을 가진 것으로 알려져 왔다.

그리고, 결정 자기 이방성이 없고 외부 자계에 의한 자화 회전이 용이하며, 자계 검출 감도가 높은 특성을 가지고 있어, 고밀도 기록을 할 수 있는 메모리 재료, 저 손실을 실현해야하는 트랜스 재료, 고성능 자기 헤드 등으로의 응용이 가능하며, 그 일부가 이미 실용화 되어 있다^[7,8].

MI 센서의 경우 센서의 감도는 자성체의 연자성에 의해 민감하게 변하게 되므로 자장중 열처리를 통한 연자성의 개선과 이방성계의 제어는 중요한 과제라고 볼 수 있다^[9].

따라서, 본 논문에서는 FeCoSiBNi 합금을 급냉하여 아몰퍼스 박판 형태로 제작한 자성 재료를 와이어 수준으로 얇게 가공한 뒤, DC 자장중 열처리를 수행하여, 자장중 열처리가 외부 자계 변화에 따른 임피던스 변화를 향상에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 열처리 전 시료의 특성평가

2.1. 시료 제작 및 임피던스 측정 방법

CoFeSiBNi 아몰퍼스 합금 박판은 급속냉각기술의 한 방법인 melt-spun 방식을 이용하여 제작되었다.

한국과학기술연구원 나노과학연구본부(Nano-Science Research Division, Korea Institute of Science and Technology)

*고려대학교 전기전자공학부(School of electrical engineering, Korea Univ.)

†Corresponding author: s.moon@kist.re.kr

(Received : July 28, 2007, Accepted : August 7, 2007)

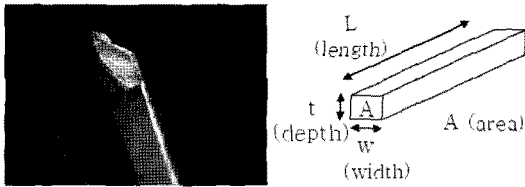


그림 1. 와이어의 사진과 형태
Fig. 1. Photo and shape of wire.

용융된 합금을 압력을 주어 노즐을 통하여 물에 일정하게 분사시키면, 박판 형태의 합금이 물에 의해 냉각, 형성되어 다른 물로 감겨져 박판이 형성된다. 이때 결정화에 필요한 시간을 주지 않고 급냉이 이루어지면 아몰퍼스 형태의 연자성 합금이 만들어진다.

완성된 합금 박판을 그림 1과 같이 직사각형의 단면을 가진 와이어 형태로 두께(t:20 μm), 길이(L:20 mm), 폭(W)을 각각 30, 50, 100, 200, 300 μm로 달리 하여 가공하였다.

시료를 Helmholtz coil 사이에 놓고 Helmholtz coil에 DC 전류를 흘려 센서 소자의 길이 방향과 평행하게 자장을 발생시켰으며, 전류의 양을 조절하여 발생 자장의 크기를 변화시키면서, 임피던스의 변화를 관찰하였다.

측정 장치 구성은 그림 2와 같고, 임피던스 측정은 Agilent사의 4294A impedance analyzer를 사용하여 측정하였다.

2.2. 주파수에 대한 임피던스 변화 측정

그림 2의 측정 장치를 이용하여 as-cast(열처리 전 시료) 상태의 w=50 μm, t=20 μm, L=20 mm 직사각

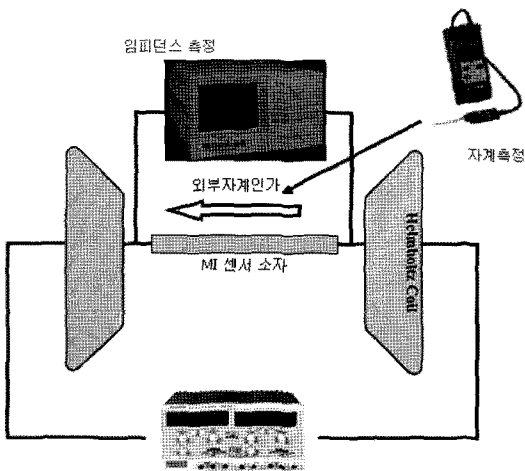


그림 2. 측정 장치 구성
Fig. 2. Measurement system.

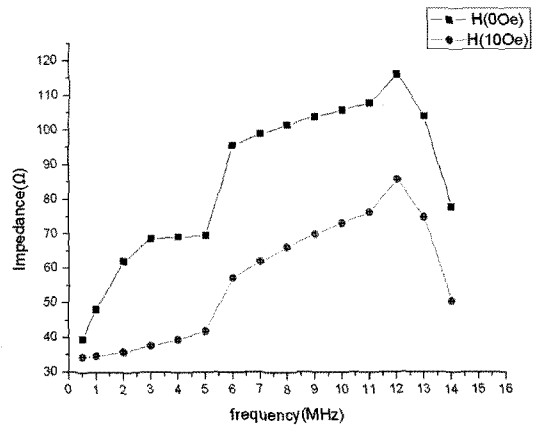


그림 3. 주파수 변화에 따른 열처리 전 시료의 임피던스 변화
Fig. 3. Impedance variation of as-cast sample with frequency change.

형 단면을 가진 리본 형상의 와이어 소자에 통전 전류의 주파수를 변화시키면서, 외부 인가 자기장(Hex)이 각각 0과 10 Oe 일 때 각각의 임피던스를 측정된 결과를 그림 3에 나타내었고, 5~6 MHz와 10~12 MHz에서 둘 다 급격한 임피던스 변화를 보이다가 12 MHz 이후에서 서서히 감소함을 확인할 수 있다.

2.3. 와이어 크기에 따른 임피던스 변화(율) 측정

위와 동일한 방식으로, 제작된 리본 와이어의 폭(w=30, 50, 100, 200, 300 μm)을 변화시켜가면서 소자 양단에서 임피던스를 측정하였으며, 시료의 단면 크기(A)에 따른 임피던스 변화의 차이를 관찰하였다.

그림 4의 결과에서 보는 바와 같이 리본 와이어의 폭이 좁을수록 임피던스는 커지고, 외부 자계에 대한 반응은 더욱 민감함을 확인할 수 있었으며, 이는 평판형상에 따른 임피던스 값 해석을 나타낸 식 (1)에서와 같이 W가 작을수록 초기 임피던스 값은 커지기 때문이며, 이후에 외부 자계에 영향을 받아 흐르는 전류가 증가하여 임피던스는 감소하는 경향을 보이게 된다^[10].

$$|Z| \approx \frac{l}{2W} \frac{\sqrt{\rho\omega\mu_m}}{\sqrt{1+(\omega/\omega_c)^2}} \quad (l: \text{시료길이}, W: \text{폭}) \quad (1)$$

실험 결과에서 Hex가 0일 때 5개의 시료 중 가장 큰 임피던스 변화는 단면적이 가장 작은 30 μm 시료에서 나타났음을 확인할 수 있고, 동시에 이러한 임피던스 변화는 흘러주는 고주파 통전 전류의 주파수 성분 에 의해 발생하는 표피 효과(skin effect)와도 깊은 관련이 있다.

30 μm 폭의 시료는 제작상의 형상 오차가 있어, 반

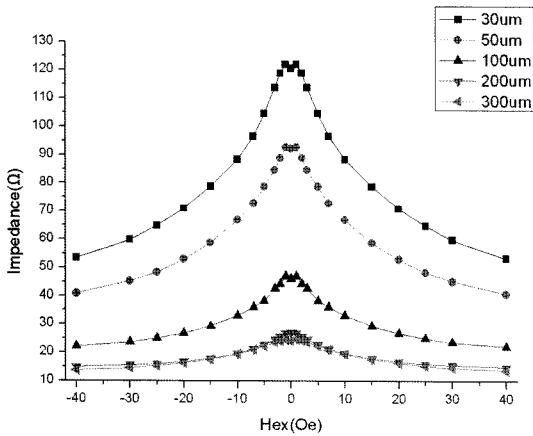


그림 4. w 변화와 Hex에 대한 열처리 전 시료의 임피던스 변화 (f = 12 MHz)

Fig. 4. Impedance variation of as-cast sample according to w & Hex (f = 12 MHz)

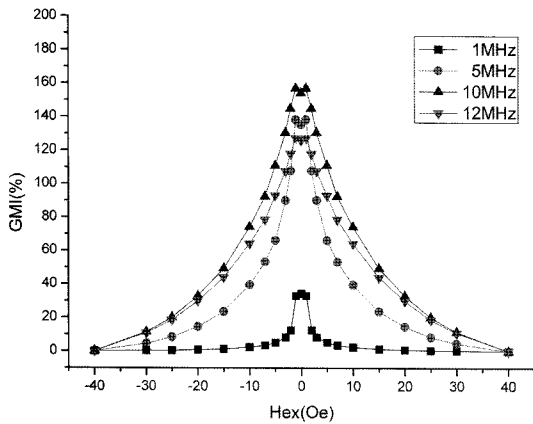


그림 5. 열처리 전 시료에 대한 임피던스 변화율 (w : 50 μm, t : 20 μm, L : 20 mm)

Fig. 5. Impedance change rate of as-cast sample (w : 50 μm, t : 20 μm, L : 20 mm)

복적인 경향성을 가지는 50 μm 폭의 시료를 이용하여 대부분의 실험을 진행하였다.

그림 5의 GMI(%)는 50 μm 폭의 시료로 측정된 주파수별 임피던스를 토대로 아래의 식 (2)에 의해 계산하여 산출하였으며, 10 MHz에서 최대값을 가지는 것을 확인하였다.

$$GMI(\%) = \left| \frac{Z(H) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \right| \times 100 \quad (2)$$

3. 자장중 열처리 후 시료의 특성 평가 및 분석

아몰퍼스 자성체의 우수한 연자성 특성을 개선하기

표 1. DC 자장 중 열처리 실험 조건

Table 1. Experimental condition of DC field annealing

	열처리 온도 (°C)	외부자장 (Oe)	시간 (h)
소자 1	320	2000	1
소자 2	375	2000	1
소자 3	475	2000	1

위한 방법으로는 자왜가 거의 나타나지 않는 조성을 선택하는 방법과 정자계 중에서의 열처리를 통하여 연자성을 개선하고 자기 이방성을 유도하는 방법 등이 흔히 사용된다.

이 실험에서는 외부 자장(DC field)에 의한 열처리를 실시, 임피던스 변화의 특성을 개선하고자 하였다.

제작된 as-cast 상태의 아몰퍼스 와이어는 형상 이방성만 존재할 뿐, 결정 자기 이방성은 존재하지 않는다. 따라서, 박막 제작 시 내부에 가해지는 응력을 완화하여 투자율을 높이고, 자기 이방성을 유도하여 자화용이축(길이 방향)으로의 자계 검출 능력을 높이기 위해 다음의 표 1과 같이 실험하였다.

표피 효과는 도체에 교류가 흐를 때 도체의 중심부의 전류 밀도가 낮아져 전류가 중심으로 흐르지 않고 도체 표면에 집중되어 나타나는 현상을 말한다. 이것은 도체의 중심부일수록 쇠교 자속수가 많아지고 인덕턴스가 커져서 전류가 흐르기 힘들기 때문이다. 따라서 그림 3에서와 같이 통전 전류의 주파수가 증가할수록 표피효과에 의해 임피던스 값이 증가하는 결과가 나타나게 되고, 이러한 표피 깊이는 다음의 식 (3)에서와 같이 δ로 정의된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad (\delta: \text{표피깊이}, \omega = 2\pi f, \mu: \text{투자율}) \quad (3)$$

따라서, 와이어의 A(w×t)가 작을 때 큰 경우에 비해 고주파 전류 인가 시 초기 임피던스가 크게 형성되고, 이후 외부 자계 Hex에 의한 자화에 의해 전류의 양이 증가하여 임피던스 변화가 더욱 크게 나타나게 되는 것이다.

그림 6에서는 열처리 후 Hex에 의해서 변화하는 임피던스의 크기를 최대로 변화게 하는 주파수를 알아내기 위한 실험 결과를 나타내고 있다. 가장 큰 임피던스는 12 MHz에서 나타났으며, 이것은 열처리 전에도 동일함을 확인하였으며, Hex의 변화에 따른 임피던스 차이인 GMI(%)는 10 MHz에서 최대가 됨을 그림 7을 통해 확인할 수 있었다.

그림 8은 외부 자계에 의한 임피던스 변화를 크게 개선시키기 위한 방법으로서, DC 자장중 열처리를 한

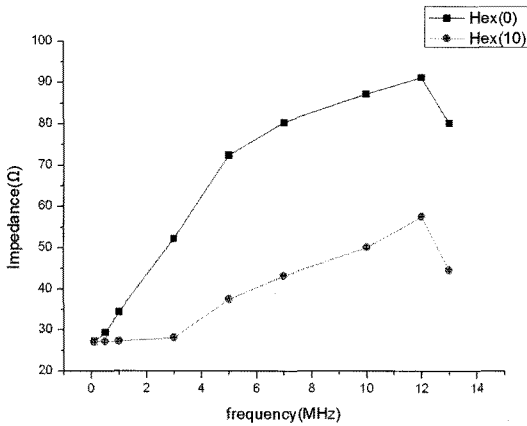


그림 6. 주파수 변화에 따른 소자 1의 임피던스 변화
Fig. 6. Impedance variation of sample 1 with frequency change.

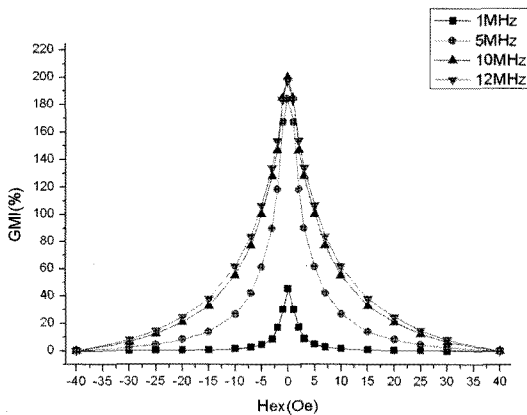


그림 7. 자장 중 열처리 후 소자 1(320 °C)에 대한 임피던스 변화율(W: 50 μm, t: 20 μm, L: 20 mm)
Fig. 7. Impedance change rate of sample 1(320 °C) after field annealing(W: 50 μm, t: 20 μm, L: 20 mm).

후의 측정 결과이며, 열처리 온도는 320 °C, Hex는 2000 Oe, 1시간 동안 자장 열처리를 행한 소자 1이 10 MHz 대역에서 가장 큰 임피던스 변화율(200.47%)을 보였고, 열처리 온도가 높은 소자 3은 오히려 탈자가 진행되어 변화율이 감소하였다. 이 결과는 열처리 전의 as-cast 상태일 때(156.54%) 보다 약 44% 향상되었음을 보여주는데, 그 이유는 다음과 같이 설명된다.

일반적으로 아몰퍼스 자성체가 만들어질 때나 제작 직후, 재료에 포함되는 스트레스나 이방성의 분산으로 인해 최적의 연자성이 얻어지지 않고, 그 특성이 떨어지는 경우가 자주 발생한다. 따라서 이를 개선하기 위해 정자계 중에서 열처리를 행하면, 연자성 특성이 개선되고 자기 이방성이 유도되어 자화용 이축 방향에서

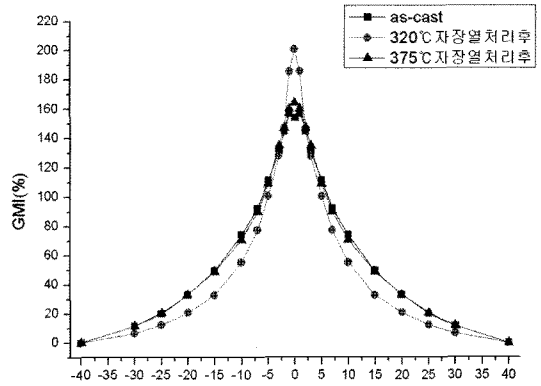


그림 8. 자장열처리 후의 소자와 as-cast 소자의 임피던스 변화율을 비교하여 나타낸 그래프(f= 10 MHz)
Fig. 8. Impedance change rate of sample 1,2 & as-cast element(f= 10 MHz).

더 큰 임피던스 변화를 나타내게 되고, 또한 좋은 센서 소자로서의 성능도 발휘할 수 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 CoFeSiBNi 아몰퍼스 합금을 직사각형(단면)의 와이어 수준으로 가공하고, 이를 소자 형태로 제작하여 외부 자장에 의해 바뀌는 임피던스의 변화(율)를 측정하는 실험을 하였다. 또한 더 좋은 센서 소자로 발전시키기 위해 DC 자장중 열처리를 행하였고, 이 결과로 as-cast 상태보다 약 44% 정도 임피던스 변화율이 향상되었음을 실험 결과를 통하여 확인하였다.

최대 임피던스 변화율은 소자 1 (열처리 온도: 320 °C, 외부 자장: 200 Oe, 1시간 동안 자장중 열처리함)에서 볼 수 있었으며 약 200.47%였다. 이때 통전 전류의 주파수는 10 MHz였고, 이를 다시 단위 자계로 환산하면 약 5.01 %/Oe이다.

본 실험을 통해서 제작된 CoFeSiBNi 아몰퍼스 합금 와이어가 우수한 MI 센서 소재로서의 그 특성을 갖추고 있으며, 이를 자기 센서로서 응용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

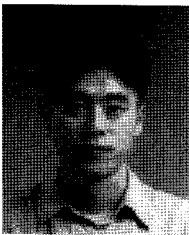
감사의 글

본 연구를 위해 시료를 제공해주신 (주)아모텍 관계자 분들께 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

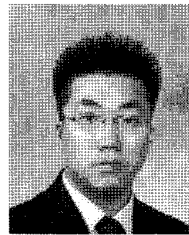
[1] L. V. Panina and K. Mohri, "Magneto-impedance

- effect in amorphous wires”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 9, p. 1189, 1994.
- [2] K. Mohri, K. Kawashima, T. Kohzawa, H. Yoshida, and L. V. Panina, “Magneto-inductive effect in amorphous wires”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 5, p. 3150, 1992.
- [3] K. Mohri, Fellow, K. Bushida, M. Noda, H. Yoshida, L. V. Panina, and T. Uchiyama, “Magneto-Impedance Element”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 31, no. 4, 1995.
- [4] R. L. Sommer and C. L. Chien, “Role of magnetic anisotropy in the magneto-impedance effect in amorphous alloys”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 67, no. 6, p. 857, 1995.
- [5] M. Takezawa, H. Kikuchi, K. Suezawa, M. Yamaguchi, K. Ishiyama, and K. I. Arai, “High frequency carrier type bridge-connected magnetic field sensor”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 4, p. 1321, 1998.
- [6] O. Kumoto and K. Ohya, “Amorphous FeCo-SiB alloys with zero magnetostriction”, *J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 2, p. 928, 1981.
- [7] 신용진, 소대화, 김현욱, 김대주, 서강수, “FeCoSiB 계아몰퍼스 자성박막의 자기-임피던스효과”, 한국재료학회지 vol. 8, no. 3, 1998.
- [8] 허진, 김영학, 신광호, 사공진, “CoZrNb막을 이용한 MI센서 소자의 제작 및 특성”, 전기전자재료학회지 vol. 17, no. 1, p. 52, 2004.
- [9] S. U. Jen and Y. D. Chao, “The field-annealing effect on magnetoimpedance of a zero magnetostrictive metallic glass”, *J. Appl. Phys.*, vol. 79, no. 8, p. 6552, 1996.
- [10] 서강수, 영자의 아몰퍼스 자성박막의 임피던스효과에 관한 연구, 박사학위논문, 명지대, 1998.



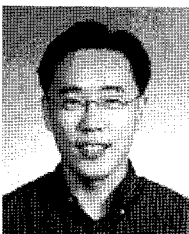
이 승 훈

- 1998년 울산대학교 기계공학과 졸업 (공학사)
- 2001년 울산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 2004년~현재 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사과정
- 2001년~현재 한국과학기술연구원 나노과학연구본부 나노바이오연구센터
- 주관심분야 : MEMS, 적외선 센서, 전기화학공정 및 센서, 센서신호처리



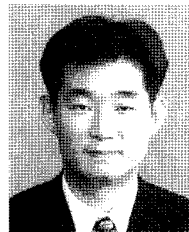
박 병 규

- 2003년 고려대학교 제어계측공학과 졸업 (공학사)
- 2007년 고려대학교 전자컴퓨터공학과 졸업(공학석사)
- 2007년 현재 하이닉스 MM제품 평가기술팀 연구원 재직 중
- 주관심분야 : MEMS, Sensors, actuators, Main memory test programming



황 성 우

- 1985년 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1987년 서울대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1993년 Princeton University 전기공학과 졸업(공학박사)
- 1995년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수
- 2007년~현재 타임 도메인 나노 기능소자 연구단 연구단장
- 주관심분야 : nanostructure fabrication, microwave properties of quantum devices and single electron transistors and RF/microwave passive circuit design



문 성 욱

- 1986년 연세대학교 금속공학과 졸업 (공학사)
- 1988년 연세대학교 대학원 금속공학과 졸업(공학석사)
- 1994년 연세대학교 대학원 금속공학과 졸업(공학박사)
- 1995년~1997년 영국Rutherford 연구소 우주연구부 객원연구원
- 1989~현재 한국과학기술연구원 나노과학연구본부 나노바이오연구센터 센터장
- 주관심분야 : Optical MEMS, Uncooled type microbolometer, 양자암호, 나노바이오센서