

## CoFeSiB 아몰퍼스합금 자기리본 변위센서 개발에 관한 연구

### A Study on Development of the Displacement Sensor of CoFeSiB Amorphous Alloy Magnetic Ribbon

강재덕\*, 신용진\*\*

(Jae-Duk Kang\*, Yong-Jin Shin\*\*)

#### Abstract

This dissertation describes the development of a sensor for measuring microscopic displacement where we use CoFeSiB amorphous alloy magnetic ribbon having near zero magnetostrictive properties. For the development of the sensor, we first fabricate amorphous alloy magnetic ribbon, and then investigate its physical and magnetic properties. Finally, its possibility of practical application as a displacement sensor is discussed. The experimental samples were made of near zero magnetostrictive  $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{79}Si_2B_{19}$  alloy which were fabricated by a rapid liquid quenching method. As a results, we got amorphous alloy magnetic ribbons of 12  $\mu m$  in thickness, 10 mm in length, and 2.5 mm in width. It was found that the crystallization temperature and the Curie temperature are around 451  $^{\circ}C$  and around 441  $^{\circ}C$  respectively. We couldn't observe any noticeable change of the impedance frequency of 10 MHz, but observed the impedance change of 3.76 %/Oe at 100 MHz. The inductance was nearly stable over the frequency range of 1~10 MHz. In addition, it was observed that the variation of the inductance and the impedance were linear within the displacement ranges of 20~60  $\mu m$ . As the results of the experiments, it is suggested that the displacement sensor which is fabricated by using amorphous alloy magnetic ribbon of  $(Co_{0.94}Fe_{0.06})_{79}Si_2B_{19}$  compound, can be used as a sensor to detect microscopic displacement.

**Key Words** : amorphous magnetic ribbon, displacement sensor, sensormagnetics, Impedance, inductance

#### 1. 서론

산업의 정보화의 물결은 마그네틱스중에 센서 및 센싱의 연구분야를 태두시켰으며, 이와 같은 센서 및 센싱에 관한 마그네틱스를 "센서마그네틱스"(sensormagnetics)라고 하며 이 분야의 연구가 활발하게 진행되고 있다.[1,2]

자기센서와 의용생체공학에서는, 자기를 이용하여 인체 표면 및 내부의 미묘한 운동을 검출하는 생체정보 검출법이 소개되었다. 그 기본은 몸의 운동부위에 작은 자석을 고정하여, 자기센서에 의해서 그 움직임을 비접촉으로 수mm의 범위에서 검출하는 것이다. 생체정보의 본질은 심전도나 뇌파 등의 전기적 신호만이 아니라, 그 명령에 의해서 활동하는 심근이나 혈관 및 각종 근육의 움직임을 알 수 있다.

검출대상의 변위를 검출하는 변위센서는 액츄에이터의 기계적 변위나, 광, 초음파, 마이크로파 등을 응용한 것이 있다. 그러나, 그들의 검출범위는 대개 mm~cm 단위로 하는 것이 많다. 자기식 변위센서는 검출범위를 넓게 설계 가능하고, 구성이 간

\* : 극동정보대학 전자통신과

(충북 음성군 감곡면 단평리 극동정보대학

Fax : 043-881-3310

E-mail : jdkang@telecom.kdc.ac.kr

\*\* : 명지대학교 전자정보통신공학부

2000년 11월 6일 접수, 2001년 1월 11일 심사완료

단하며, 저 코스트 등의 장점을 가지며, 자벽이동이나 역자왜에 있어서 자기탄성과 등을 이용한 변위센서의 연구가 최근 보고되고 있다.[3]

본 연구는 최근 메카트로닉스나 의용생체공학분야 등에서 요구되고 있는  $\mu\text{m}$  단위의 미세변위 검출이 가능한 변위센서의 구성을 목표로 하였다. 먼저 그 우수한 센싱기능으로 주목되고 있는 아몰퍼스 자성체 중에서, 영자왜에 가까운  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{79}\text{Si}_2\text{B}_{19}$  조성의 두께  $12\ \mu\text{m}$ , 길이  $10\ \text{mm}$  및 폭  $2.5\ \text{mm}$ 인 시료리본을 초급냉법으로 제작하고 열처리한 다음, 임피던스 변화율의 주파수 의존성 등 자기특성을 조사 연구하여, 시료리본의 센서소재로서의 특성을 확인하였다.[4] 그리고 이 시료리본을 이용한 미세변위센서를 시험 제작한 후 그 성능을 조사하였다.[5]

## 2. 실험 방법

### 2.1 시료리본의 제작

시료조성은 영자왜에 가까운  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{79}\text{Si}_2\text{B}_{19}$ 로서 단급냉법으로 두께  $12\ \mu\text{m}$ , 길이  $10\ \text{mm}$  및 폭  $2.5\ \text{mm}$ 의 아몰퍼스리본을 제작하였다.[6] 포함금은 Fe, Co, Si 및 B를 wt %로 환산하여 합금전체의 질량이  $20\ \text{g}$ 이 되도록 하였고, Ar분위기의 유도용해로에서 용해하여 만들었다.

리본합금의 제작조건은 석영관 노즐 직경  $0.5\ \text{mm}$ , Ar 분사압  $0.6\ \text{kg/cm}^2$ , 물의 선속도  $28\ \text{m/sec}$  및 용탕온도  $1400\sim 1600\ ^\circ\text{C}$ 였으며, Ar 가스 분위기 내에서 제작하였다.

시료의 두께는 SEM을 이용하여 수 회 측정값의 평균으로 하였고, 급냉리본의 길이는 제작시 수십 cm에서 수백 cm이었다. 또 리본의 제작시  $10^{-2}\sim 10^{-3}\ \text{Torr}$ 의 진공에서 Ar 가스를 대기압 정도까지 주입하여 치환하는 방법을 수 회 반복하여 Ar분위기의 농도를 높였다.

아몰퍼스자성체는 결정에 의한 자기이방성을 갖지 않고, 또 열적으로 불안정하기 때문에 그 자기특성은 열처리에 의해서 크게 변화한다. 열처리하는 시료리본을 자체중 열처리함으로써 아몰퍼스리본에 일축자기이방성을 유도하거나, 구조완화에 의한 보자력의 저하를 유도하기 위해서 행해지고 있다.[7] 큐리온도  $T_c$ 와 결정화온도  $T_x$ 는, 아몰퍼스리본을 열처리할 때 중요하다. 그 측정은 진동형 시료자력계(VSM)를 사용하는 것이 일반적이며, 시료에 열을 가하면서 측정하는데, 자화가 0이 되는 온도가 큐리온도  $T_c$ , 다시 자화가 상승하기 시작하는

온도가 결정화 온도  $T_x$ 가 된다. 그림 1은 열처리 스케줄에 따른 온도변화를 나타내고 있다.

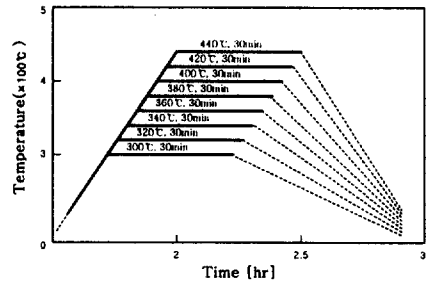


그림 1. 열처리온도 스케줄.

Fig. 1. Temperature schedule for annealing.

### 2.2 센서의 제작

본 연구에서 제작한 센서는 미세변위의 검출과 디바이스의 구성이 용이한 LVDT(linear variable differential transformer) 방식의 센서를 채용하였다. 센서는  $\phi 0.1\ \text{mm}$  굵기의 코일을 450 회 감은 1개의 1차 코일과 2개의 2차 코일로 구성되었으며, 1차 코일과 2차 코일은 원통형실린더에 대칭적으로 배치하였다. 단일코일의 안쪽에 원통의 축방향으로 설치된 가동철심은 제작된 아몰퍼스합금 자기리본을 이용하였다. 그림 2는 센서의 구성도를 나타낸 것이다.

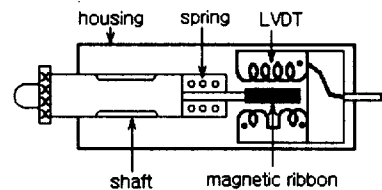


그림 2. 변위센서의 구성도.

Fig. 2. Schematic diagram of the displacement sensor.

그림 3은 LVDT의 원리를 나타낸 것인데, 1차 코일( $C_1$ )과 2차 코일( $C_{21}, C_{22}$ ), 감지하게 될 기계적 변위량과 그와 함께 움직이는 아몰퍼스합금 자기리본으로 구성되어 있다. 이들 3개의 코일( $C_1, C_{21}, C_{22}$ )은 1차 코일을 중앙으로, 2개의 2차 코일이 각각 1차 코일의 양옆에 원통으로 감겨져 있다.

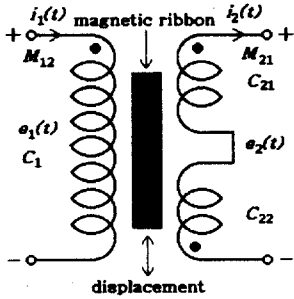


그림 3. LVDT의 설명도.  
Fig. 3. Schematic illustration of LVDT.

외부의 변위를 전달하기 위한 연결축의 끝에 시료 리본이 있고, 시료는 원통의 가운데에 놓여있다. LVDT에서는 시료리본이 변위할 경우, 1차 코일에 흐르는 교류전류  $i_1(t)$ 에 의하여 2개의 2차 코일에 전압  $e_2(t)$ 가 유기되며 상호유도인덕턴스  $M$ 이 변화한다. 이에 의해서 2개의 2차 코일에 유기되는 전압의 차를 이용한다. 상호유도는 다음 식으로 주어진다.

$$e_2(t) = \pm M \frac{di_1(t)}{dt} \quad (1)$$

동작원리는  $C_1$ 과  $C_{21}$ ,  $C_1$ 과  $C_{22}$ 의 상호인덕턴스  $M_{12}$ ,  $M_{21}$ 은 같으므로 1차 코일에 가해진 전류는, 2개의 2차 코일에 상호유도에 의하여 같은 전압을 발생하게 된다.

또, 시료리본이  $C_{21}$ 쪽으로 조금 이동한 경우에는  $M_{12} > M_{21}$ 이 되므로  $C_{21}$ 의 전압  $e_1(t)$ 과  $C_{22}$ 의 전압  $e_2(t)$ 는  $e_1(t) > e_2(t)$ 가 된다. 시료리본이 변위하여  $C_{21}$ 쪽으로 완전히 이동하면  $M_{12}$ 가 최대가 되며, 유기전압  $e_1(t)$ 은 최대가 된다. 다시 시료리본이  $C_{22}$ 쪽으로 이동하게 되면  $C_{22}$ 의 유기전압  $e_2(t)$ 는 증가해 간다.

그림 4는 자기리본의 위치변화와 LVDT의 출력의 관계를 나타낸 것이다. 출력신호(또는 위상변화)는 시료리본의 위치정보가 되기 때문에, 1차와 2차 코일의 신호전압 사이에 상변화가 발생할 경우, PLL(phase-locked loop)에서 상의 변화량에 비례하는 출력이 나타나게 된다.[8]

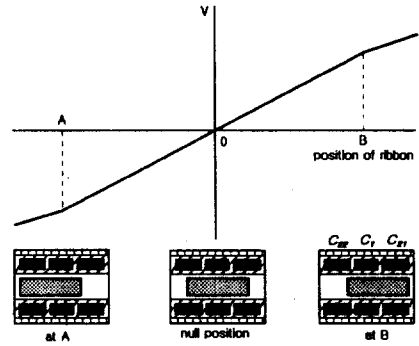


그림 4. 자기리본의 위치와 출력.  
Fig. 4. Relationship between the position of the ribbon and the output.

그림 5는 PLL의 블록도를 나타낸 것이다. 기준 입력주파수와 LVDT에 비례한 귀환주파수 사이의 위상차이는 위상검파기에서 검파되어 위상오차에 비례하는 전압이 필터의 입력으로 주어지게 된다.

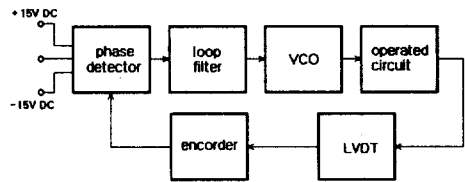


그림 5. PLL의 블록도.  
Fig. 5. Block diagram of PLL.

필터에서 잡음을 제거한 전압성분이 VCO(voltage control oscillator)를 거쳐 구동회로에 가해지면 LVDT가 구동하게 된다. 이때 기준주파수  $f_{ref}$ 와 귀환주파수  $f_{feed}$ 는  $f_{ref} < f_{feed}$ 일 때 스위치  $S_1$ 이 닫히고 위상주파수 검파기의 출력이 1이 되어, 공급전압  $V_{cc}$ 가 구동회로에 가해져서 동기속도로 LVDT에 전압을 제공하게 된다.  $f_{ref} > f_{feed}$ 일 때 스위치  $S_1$ 이 닫히고, 0V의 출력이 나타나게 되어 위상주파수 검파기의 출력은 0으로 감소한다.  $f_{ref}$ 와  $f_{feed}$ 의 위상차가 0인 동기상태에서  $S_1$ 과  $S_2$ 는 개방상태가 되고, 이때 출력전압이 나타난다. 또,  $f_{ref} = f_{feed}$ 일 때에는 위상차에 비례하는 듀티-사이클이 된다. 그림 6은 위상주파수 검파기의 동작회로를 나타낸 것이다.

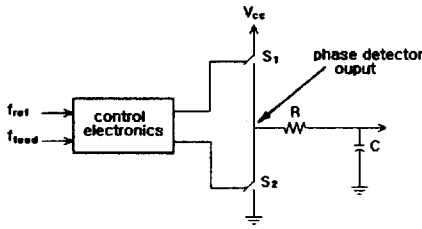


그림 6. 위상주파수 검파기의 등가회로.  
 Fig. 6. Equivalent circuit of phase frequency detector.

그림 7은 LVDT를 인터페이스하기 위하여 제작한 모듈의 블록도를 나타낸 것이다. ±15 V의 안정적인 DC를 공급하기 위하여 정전압회로를 구성하고, 전압, 자기임피던스 및 인덕턴스 등의 측정값을 파라미터로 하여, 임출력단자(전압, 1차 코일, 2차 코일)는 모두 10개로 하였다. 즉, 필터를 거친 데이터가 A/D 변환이 되도록 접속하였다.

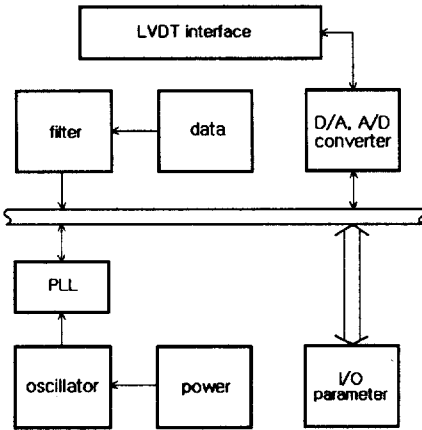


그림 7. 시스템 인터페이스 모듈의 블록도.  
 Fig. 7. Block diagram of system interface module.

3. 결과 및 고찰

그림 8은 자기임피던스(MI) 효과의 측정을 위한 측정시스템의 개략도이다. 측정시스템에 나타낸 바와 같이, 고주파원으로부터 전류  $I_f$ 를 시료리본에 흐르게 하고, 외부자계  $H_{ex}$ 를 인가하면서, 시료리본 양단간에 걸리는 전압  $e(t)$ 의 크기  $E_f$ 를 오실로스코프로 측정하고, 임피던스의 크기  $Z = E_f/I_f$ 를

구한다. 그리고, 임피던스의 변화율  $\Delta Z_{H_{ex}}/Z_{H_0}$ 는 다음 식으로부터 구하였다.[9]

$$\frac{\Delta Z_{H_{ex}}}{Z_{H_0}} = \frac{Z_{H_{ex}} - Z_{H_0}}{Z_{H_0}} \quad (2)$$

여기서,  $Z_{H_{ex}}$ 는 외부자계를 인가했을 때의 임피던스이고,  $Z_{H_0}$ 는 외부자계를 인가하지 않았을 때의 임피던스이다.

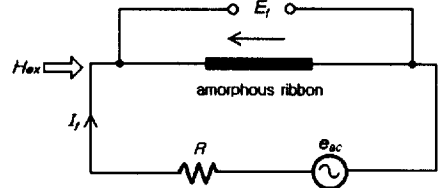


그림 8. MI 효과의 측정회로.  
 Fig. 8. Circuit for measuring MI effect.

그림 9는 시료리본의 MI 효과, ( $\Delta Z/Z_{H_{ex}}$ )특성을 나타낸 것으로서, 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이,  $Z$ 는 인가자계  $H_{ex}$ 와 함께 증가하다가 감소하는, 즉, 쌍봉특성을 나타내고 있다. 보고에 의하면[10] 이방성자계를  $H_k$ 라고 하면, 회전자화에 의한 투자율  $\mu_{rot}$ 는  $H_{ex} < H_k$ 에서는  $H_{ex}$ 와 함께 증가하며,  $H_{ex} = H_k$ 에서 최대값을 나타내고,  $H_{ex} > H_k$ 에서는  $H_{ex}$ 와 함께 감소하게 된다. 또 자벽이동에 의한  $\mu_{rot}$ 는  $H_{ex}$ 와 함께 단조롭게 감소하는데,  $Z$ 의 변화는  $\mu_{rot}$ 의 변화에 대응하고 있는 것으로 볼 수 있다. 그 원인으로서는 리본내의 자계가 고주파이기 때문에, 자구구조가 단자구상태에 가깝다는 사실을 알 수 있으며, 큰 변화율(약 4.52 %/Oe)을 나타내었다.

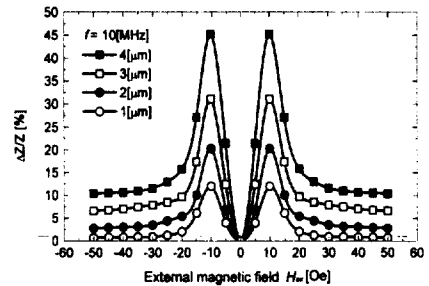


그림 9. 외부자계  $H_{ex}$ 에 따른 임피던스 변화율의 관계.  
 Fig. 9. Impedance changing rate vs magnetic field  $H_{ex}$ .

그림 10은 여자주파수 10 MHz와 100 MHz일때의 외부자계와 임피던스변화율의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 임피던스변화율의 최대값은 여자주파수 10 MHz에서 나타났다. 이는 고주파영역에서의 아몰퍼스합금 자기리본의 고주파손실에 의한 투자율의 저하 때문인 것으로 판단된다. 여자주파수 100 MHz일 경우, 약 3.76 %/Oe의 임피던스 변화율을 나타내었다.

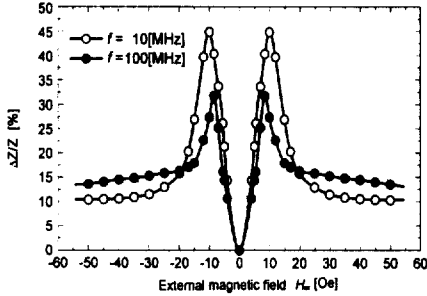


그림 10.  $\Delta Z/Z$ 와  $H_{ex}$ 의 관계 ( $I_f=20$  mA).

Fig. 10. Relationship between  $\Delta Z/Z$  and  $H_{ex}$  ( $I_f=20$  mA).

그림 11은 변위센서의 특성을 측정하기 위한 측정시스템의 블록도를 나타낸 것이다. LVDT에 직류 ±15 V의 안정된 전압을 공급하기 위해 바이폴라전원장치를 사용하였으며, 데이터의 파형과 전압의 측정은 오실로스코프를 사용하였다. 자기임피던스의 측정은 LCR미터로 하였다.

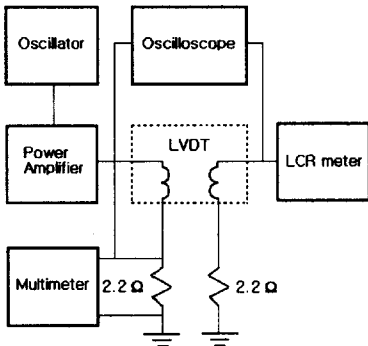


그림 11. 변위센서의 측정시스템.

Fig. 11. Measuring system of the displacement sensor.

그림 12는 시료리본의 위치를 영점상태에서 정·부 방향으로 10 μm씩 이동시키면서 미세변위와 유기전압의 관계를 측정하여 정리한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 측정시스템은 아몰퍼스합금 자기리본의 미세한 위치변화를 감지하고 A/D와 D/A 변환을 거치게 된다. 변위의 검출은 1차와 2차 유기전압의 신호 사이에서의 상 변화의 측정으로 이루어지며, 신호전압과 변위는 선형적인 관계가 있다는 사실을 나타내고 있다.

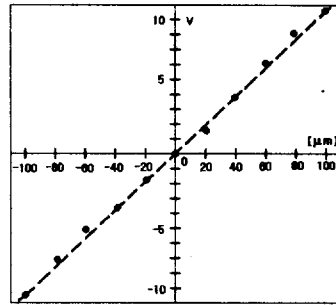


그림 12. 시료리본의 위치와 전압의 관계.

Fig. 12. Relationship between the displacement and the output voltage of ribbon.

그림 13은 시료리본의 주파수변화에 따른 자기임피던스와 변위의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이, 변위가 증가함에 따라 임피던스는 감소하게 되며, 20~80 μm의 변위범위 내에서는 센서의 특성이 비례적으로 감소함을 확인할 수가 있다.

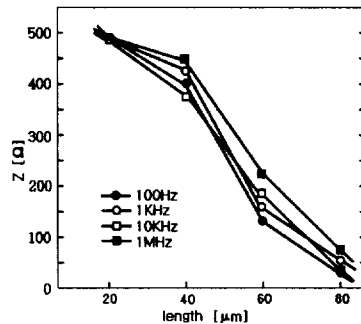


그림 13. 시료리본의 자기임피던스와 변위의 관계.

Fig. 13. Relationship between the displacement and the magneto impedance of ribbon.

그림 14는 시료리본의 주파수변화에 따른 인덕턴스와 변위의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 20~60  $\mu\text{m}$ 의 변위범위 내에서 인덕턴스의 특성이 비례적인 증가를 나타내고 있다.

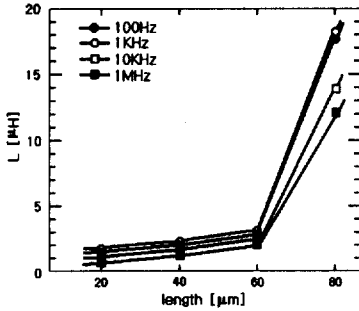


그림 14. 시료리본의 인덕턴스와 변위의 관계.  
 Fig. 14. Relationship between the displacement and the inductance of ribbon.

4. 결론

영자왜에 가까운 CoFeSiB계 아몰퍼스 자기리본을 제작하고 열처리과정을 거친 시료의 자기적 특성과 센싱기능을 조사한 다음, 변위센서를 제작하여 미세 위치변화에 따른 자기임피던스를 측정된 결과 우수한 센서특성을 확인하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 영자왜 아몰퍼스합금 자기리본의 조성은 영자왜에 가까운  $(\text{Co}_{0.94}\text{Fe}_{0.06})_{79}\text{Si}_{2}\text{B}_{19}$ 을 선택하였으며, 제작된 리본의 큐리온도는 441  $^{\circ}\text{C}$ 이고, 결정화온도는 451  $^{\circ}\text{C}$ 이었다.[4]
- 2) 임피던스 변화율은 여자주파수 10 MHz에서는 나타나지 않았으며 100 MHz일 경우, 약3.76 %/Oe 이었다. 그리고 인덕턴스는 1~10 MHz대역에서 거의 안정적이었다.
- 3) 변위의 범위 20~80  $\mu\text{m}$  내에서는 인덕턴스의 변화 2.8~19.4  $\mu\text{H}$ 와 임피던스변화 50~500  $\Omega$ 이었으며, 특히 20~60  $\mu\text{m}$  범위 내에서의 변위에 대해서는 임피던스와 인덕턴스의 변화가 비례적인 특성값을 나타내고 있음을 확인하였다.

따라서, 본 연구에서 제작한 아몰퍼스합금 자기리본을 이용한 변위센서가 미세한 위치변화를 민감하게 감지할 수 있는 변위센서로서 충분하다는 것을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] 毛利佳年雄, "센싱기술과 자기학," 日本應用磁氣學會誌, Vol.16, No.1, pp.3~4, 1992.
- [2] 山崎二郎, "아몰퍼스磁性체의 센싱기능," 日本應用磁氣學會誌, Vol.16, No.1, p.14, 1992.
- [3] 신용진 외4, "아몰퍼스 자성박막의 센서기능에 관한 연구," 한국전기전자재료학회, 춘계학술대회논문집, p27, 1996.
- [4] 강재덕, 신용진 외3, "CoFeSiB 아몰퍼스 리본의 열처리에 의한 대마크하우젠 효과," 한국전기전자재료학회, Vol.12, No.10, pp.956~962, 1999.
- [5] 강재덕, 신용진 외3, "공차제어를 위한 인프록세스 계측 자기센서의 개발 연구," (사)안전경영과학회지 제2권, 1호, pp.89~97, 2000.
- [6] 강재덕, 신용진 외3, "아몰퍼스 리본의 변위에 의한 자기임피던스," 한국전기전자재료학회, 추계학술발표대회, pp.73~76, 1999.
- [7] J.Yamasaki 외3, IEEE Trans. on Mag., Vol.33, No.5, pp.3775~3777, 1997.
- [8] T.Meydan, "Ph.D thesis," U of Wales, 1984.
- [9] 신용진 외4, "아몰퍼스 자성박막의 센서기능에 관한 연구," 한국전기전자재료학회, 추계학술대회 논문집, p.89, 1994.
- [10] K.Mohri, T.Uchiyamam, L.V.Panina, and K.Bushida, "Magneto-Impedance Element," IEEE Trans. Magn., 31, p.2454, 1995.