

논문 93-02

비정질 세선의 자기탄성 효과를 이용한 가속도 센서  
개발에 관한 연구

조희정\*, 손대락\*\*, 임순재\*\*\*, 양종만\*

Study on an Acceleration Sensor using Magnetoelastic  
Effect of an Amorphous Wire

H. J. Cho, D. L. Son, S. J. Lim, and J. M. Yang

## 요 약

비정질 세선의 인장응력에 따른 교류자화과정에서의 최대자기유도 변화를 피측정 물리량으로 하는 가속도 센서에 관하여 연구를 하였다. 진동측정 주파수 범위는 진동감지소자의 질량에 의하여 결정되었으며, 질량이  $1 \times 10^{-3}$  kg일 경우 DC에서 700 Hz,  $5 \times 10^{-3}$  kg일 경우 DC에서 200 Hz로 측정되었다. 가속도 센서의 선형도는 가속도의 범위가 5 g 이내일 때 1% 이하였다.

## Abstract

We have constructed an acceleration sensor which is based on the maximum magnetic induction changes of amorphous wire as a measurand. The frequency bandwidth of the constructed sensor depends on the mass of a sensing element. For  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  amorphous wire, the bandwidth is DC-700 Hz for  $1 \times 10^{-3}$  kg sensing element and DC-200 Hz for  $5 \times 10^{-3}$  kg. The linearity of the acceleration sensor was less than 1% within the acceleration of 5 g.

## I. 서 론

진동측정 및 진동관련시험은 가속도 센서를 이용해서 측정하고 있으며, 이러한 가속도 센서의 측정 원리로는 전기용량형(capacitive type), 압전저항형(piezoresistive type), 압전형(piezoelectric type), 가동코일형(moving coil type) 및 와전류(eddy current)형 등 다양한 종류가 있다. 압전형 가속도계는 응력을 받으면 그 크기에 비례해서 전하량을 발생시키는 압전형 물질을 사용한다. 이는 습도, 외부 온도의 영향을

받을 우려가 있는 반면 측정주파수 범위가 넓고, 소형, 경량으로 견고하며 외부전원이 필요치 않고 환경 변화에 따른 안정성이 좋은 점 등 여러 장점으로 인해 진동 측정용 센서로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 DC 가속도를 측정하지 못하는 단점이 있다.<sup>[1-2]</sup> 최근 센서 개발 경향은 소형화 다기능화 추세로서, 반도체를 이용한 가속도계 개발에 많은 연구가 진행되고 있으나 감지요소의 경량성으로 인하여 넓은 주파수 대역폭은 쉽게 실현화시킬 수 있지만 낮은 감도와 저주파수 영역의 특성이 우수하지 못한 문제가 있다.<sup>[3-5]</sup>

따라서 세선의 크기가 비교적 소형이면서 저주파 특성이 우수한 가속도 센서의 개발이 필요하다. 비정질 세선을 이용할 경우 센서의 소형화를 도모할 수 있고<sup>[6]</sup> 저주파 특성이 좋은 가속도 센서의 개발이 가능하므로 본 연구에서는  $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$  비정질 세선의 인장응력에 따른 최대자기유도변화를 이용하여 가속도 센서의 제작을 시도하였다.

\* 梨花女子大學校 物理學科  
(Dept. of Physics, Ewha Woman's Univ.)

\*\* 正會員: 韓南大學校 物理學科  
(Dept. of Physics, Han Nam Univ.)

\*\*\* 韓國標準科學研究院  
(Korea Research Institute of Standards and Science)  
<접수일자: 1993년 2월 22일>

## II. 센서 설계

Fig. 1은 본연구에서 사용된 비정질세선(C<sub>072.5</sub>Si<sub>12.5</sub>B<sub>15</sub>)이 자화주파수 1 kHz 에서 인장응력에 따른 최대자기유도의 변화를 측정할 결과이다.

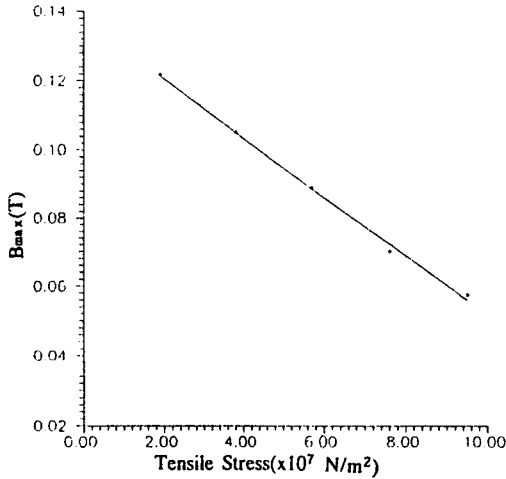


그림 1. H<sub>max</sub>=0.55 A/cm에서 인장응력에 따른 비정질세선 (C<sub>072.5</sub>Si<sub>12.5</sub>B<sub>15</sub>)의 최대자기유도변화  
**Fig. 1.** Maximum magnetic induction changes of C<sub>072.5</sub>Si<sub>12.5</sub>B<sub>15</sub> vs. tensile stress for H<sub>max</sub>=0.55 A/cm.

인장응력에 따른 최대자기유도의 변화 ΔB<sub>max</sub>를 이용한 가속도 센서를 제작하기 위하여 Fig. 2와 같이 진동감지소자 M을 비정질 세선에 고정시켜 외부의 진동에 의한 가속도에 비례하여 비정질 세선이 응력을

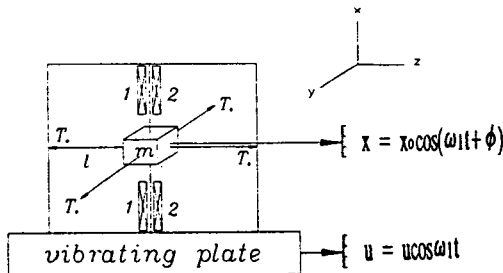


그림 2. 가속도센서의 구조 ; 1: 자화코일, 2: 자기유도코일

**Fig. 2.** Schematic diagram of the acceleration sensor ; 1: magnetizing coil, 2: magnetic induction coil.

받도록 하였다. 이 응력에 의하여 변화하는 비정질 세선의 최대자기유도를 이차코일에 유도되는 기전력을 적분하여 얻기 위하여, 코일포머에 일차코일, 이차코일을 권선하였다. 양 옆의 4개의 세선은 일축운동만 하도록 하기 위하여 초기응력(initial tension) T<sub>0</sub>로 힘을 가해 고정시켰다. 진동면 위에 가속도 센서를 설치하여 진동면을 u<sub>0</sub>cos ω<sub>0</sub>t로 진동시켰을 때 가속도 센서의 구조물과 상대적으로 움직이는 진동감지소자 M의 운동을 통하여 진동에 대한 센서의 반응을 예상하였다.

일축 운동만을 가정하였을 때 진동면의 움직임을 u=u<sub>0</sub>cos ω<sub>0</sub>t라 가정하고 상대적으로 움직이는 진동감지소자 M의 움직임을 x라 하면 총 변위는 x+u이므로 인한 운동 방정식은

$$M \frac{d^2(x+u)}{dt^2} + F_x = 0 \tag{1}$$

이며, x방향의 총 힘은 인장응력과 압축응력을 받는 세선의 복원력과 양 옆의 세선의 복원력의 합이므로

$$M \frac{d^2(x+u)}{dt^2} + 4T \frac{x}{\sqrt{l^2+x^2}} + 2\epsilon x = 0 \tag{2}$$

와 같이 된다. 여기서 T=T<sub>0</sub> + AE(δ/l)이며,<sup>[7]</sup> A는 비정질 세선의 단면적, E는 Young's modulus, l은 양 옆 세선의 길이, δ는 진동으로 인한 양 옆 세선이 늘어난 길이이고 ε=EA/l이다. (2)식을 간단히 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{d^2(x+u)}{dt^2} + \left[ \frac{4T_0}{Ml} + \frac{2\epsilon}{M} \right] x + \frac{2(AE-T_0)}{Ml^3} x^3 = 0, \tag{3}$$

(3)식에

$$\frac{4T_0}{Ml} + \frac{2\epsilon}{M} = \omega_0^2, \tag{4}$$

$$\frac{2(AE-T_0)}{Ml^3} \approx \frac{2AE}{Ml^3} = h \tag{5}$$

를 대입하면,

$$\frac{d^2(x+u)}{dt^2} + \omega_0^2 x + hx^3 = 0 \tag{6}$$

과 같이 된다. 이 이차미분방정식의 해를 섭동론을 이용하여 구하면

$$\begin{aligned}
 x(t) = & c \frac{Mg}{\epsilon} \cos \omega_0 t + \frac{h}{32\omega_0^2} \left( \frac{Mg}{\epsilon} \right)^3 \cos 3\omega_0 t \\
 & + \left[ \frac{u_0 \omega_1^2}{(\omega_0^2 - \omega_1^2)} \right. \\
 & - \left. \frac{3hu_0^3 \omega_1^6}{4(\omega_0^2 - \omega_1^2)^4} \right] \cos \omega_1 t \\
 & + \left. \frac{hu_0^3 \omega_1^6}{4(9\omega_1^2 - \omega_0^2)(\omega_0^2 - \omega_1^2)^3} \right] \cos 3\omega_1 t \quad (7)
 \end{aligned}$$

이다.

Fig. 2와 같이 가속도 센서를 설계하였을 때 진동에 대한 진동감지소자 M의 움직임은 식 (7)과 같다. 실제로 특정한 값을 넣었을 때 이 가속도 센서의 움직임을 예상하기 위해서 컴퓨터를 이용하여 계산하였다. 진동면을 일정한 가속도로 가속시켰을 때 진동감지소자 M의 변위와 가속도 반응 그리고 진동면을 일정한 진폭으로 진동시켰을 때 M의 변위와 가속도 반응을 계산한 결과 공명주파수 이하에서 일정한 가속에 대한 센서의 일정한 반응이 나오므로 가속도 센서로서 사용될 수 있다. 공명주파수 변화 범위가  $M=1 \times 10^{-3}$  kg일 때 1 kHz에서 1.6 kHz까지이고,  $M=5 \times 10^{-3}$  kg일 때 0.6 kHz에서 1 kHz까지 이므로 이 가속도 센서는 500 Hz 이하에서 사용될 수 있는 저주파용 가속도 센서가 됨을 예상할 수 있다. Fig. 3은  $M=1 \times 10^{-3}$  kg일 때 일정한 가속도 진폭에 대한 진동감지소자 M의 변위 반응이다.

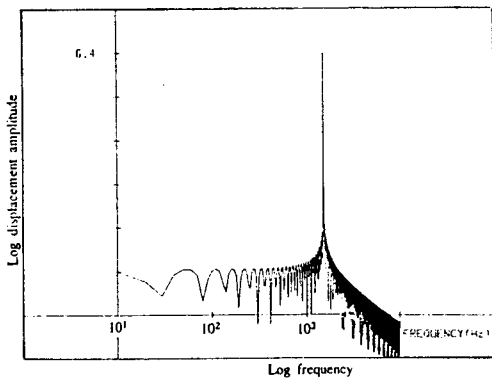


그림 3. 이상적인 가속도센서의 주파수반응 계산( $M=0.001$  kg, 가속도 진폭 =  $1g$ ,  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>)

Fig. 3. The calculated frequency response of ideal acceleration sensor( $M=0.001$  kg, acceleration amplitude =  $1g$ ,  $g=9.81$  m/s<sup>2</sup>).

### III. 센서 제작

가속도 센서의 제작은 Fig. 4와 같이  $60 \times 60 \times 60$  mm인 황동 정육면체에 진동감지소자 M을 가운데 놓고  $Co_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ 를 위 아래 관통시켜 고정시켰으며 1축 운동을 지지하기 위하여 양 옆을 비정질 세션으로 고정하였다. 진동감지소자 M과 세션들은 순간접착제를 사용하여 고정하였으며, 비정질세션의 위아래 부분에는 길이가 1cm인 코일포머에 1차 코일 120회, 2차코일 240회를 권선하여 진동감지소자의 진동시 변화하는  $\Delta B_{max}$ 를 측정하도록 하였다.

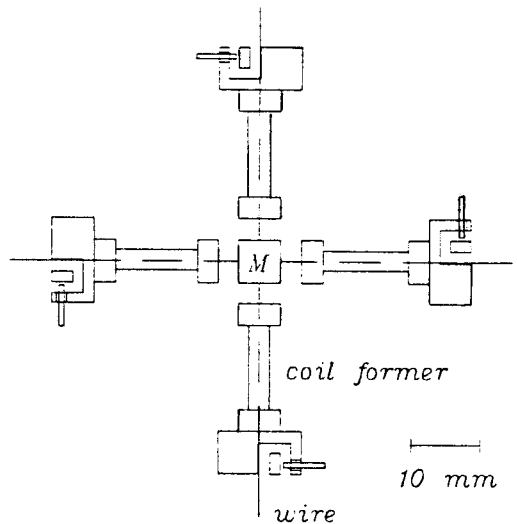


그림 4. 3-축 가속도측정을 위한 가속도센서의 구조  
Fig. 4. Structure of the acceleration sensor for 3-axis acceleration measurement.

신호처리용 전자장치 제작은 두 코아의 최대자기 유도의 차이를 구하기 위해서 다음과 같은 방법을 택하였다. 우선 최대자기유도에 도달하는 시간이 최대자화력  $H_{max}$ 의 시점과 같기 때문에 만약 일차코일에 가하는 전류를 정현파로 할 경우 최대자기유도의 시점은 일차코일에 흐르는 전류파형의 미분인 cosine파형의 zero-crossing 시점이 된다. 따라서 두 코아의 최대자기 유도의 차이를 측정하는 장치를 Fig. 5와 같이 구성하였다.

Sine과 cosine의 출력이 있는 발진기(quadrature oscillator, BB4423)을 사용하였으며, 자화주파수는 10 kHz를 사용하였다. 일차코일에 가하는 전류를 얻기 위하여 발진기의 sine출력단에 전압-전류 변환기를

사용하였으며, 최대자기유도의 샘플링 펄스를 얻기 위하여 cosine 출력을 전압비교기와 multivibrator

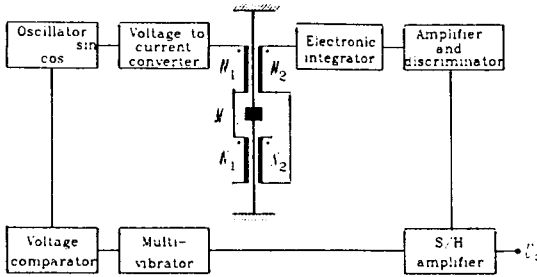


그림 5. 가속도센서의 측정회로도

Fig. 5. Block diagram of the measuring circuit of the acceleration sensor.

를 사용하여 cosine출력의 zero-crossing 위치에서 샘플링 펄스를 만들어 S/H 증폭기의 디지털 입력단에 연결하였다. 한편 두 코아의 최대자기유도의 차이를 구하기 위하여 두 이차 코일에 유도되는 기전력의 차이를 Miller 적분기로 적분하였으며, 적분된 신호를 증폭기를 사용하여 증폭시킨 다음 S/H 증폭기의 아날로그 입력단에 연결함으로써 두 코아의 최대자기유도 차이에 비례하는 출력을 얻을 수 있도록 하였다. 이 경우 S/H 증폭기의 출력전압  $U_0$ 와 인장응력  $\Delta\sigma$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$U_0 = \frac{kGN_2}{RC} \Delta\sigma \quad (8)$$

여기서  $k$ 는 비례상수,  $N_2$ 는 이차코일의 권선수,  $G$ 는 증폭기의 이득이고,  $RC$ 는 전자적분기의 시간 상수(time constant)이다. 위의 식에서 보면 센서의 전달함수( $U_0/\Delta\sigma$ )가 주어진 자화주파수와 최대자화력에 대하여 일정하며, 샘플링의 위치가 가속도의 크기에 무관하기 때문에, 피측정량인 가속도를 자화주파수와 동일하게 일정한 시간 간격으로 샘플링할 수 있다.

#### IV. 센서 특성 측정

제작된 가속도 센서의 공명주파수와 가속에 대한 반응을 알아보기 위한 시험장치의 구성은 Fig. 6과 같다. 시험이 이루어지는 과정은 신호발생기(sine controller)에서 정현파를 발생하고 이 진동신호를 증폭

기에 입력시켜 진동발생기를 여기시킬 수 있도록 증폭시켰다. 피시험체인 가속도 센서는 이 진동발생기에 고정되어 있는데 진동발생기와 가속도 센서를 연결시켜주기 위하여 고정구(fixture)가 필요하다. 한편, 진동발생기가 의도하는대로 정확하게 발생되기 위하여 제어용 가속도계를 설치하였다.

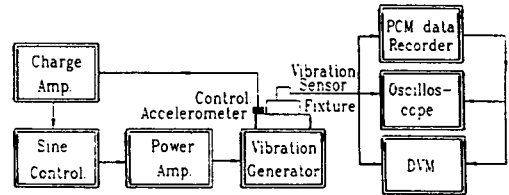


그림 6. 가속도측정장치의 구조

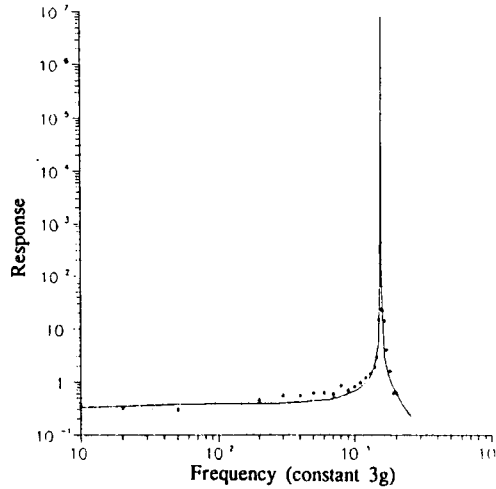
Fig. 6. Schematic diagram of the acceleration testing system.

이 제어용 가속도계는 진동신호를 전기신호로 변화시켜 전하증폭기(charge amplifier)로 증폭한 후, 신호발생기의 이 신호 값이 일정하게 나오도록 출력전압을 조절시켰다. 피시험체인 가속도 센서의 응답은 PCM 데이터 기록기로 저장한 후 오실로스코프와 DVM을 이용하여 보았다.

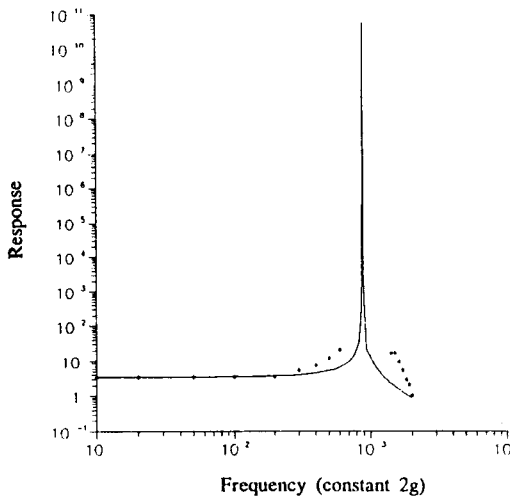
한편 진동발생기안에 있는 전자석에 의하여 피시험체인 가속도 센서 위치에서 약 8 gauss 이상인 큰 자기장이 나오므로 이 자기장을 차폐(shielding)시키기 위하여 가속도 센서 밑면에 무방향성 구조강판 2개를 고정시키고 가속도 센서에 투자율이 높은 Co계 비정질 물질로 봉하였다. 이 차폐에 의하여 가속도 센서 위치에서 약 0.4 gauss 이하로 차폐시킬 수 있었다.

진동발생기를 일정한 가속도 진폭(2g 또는 3g,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ )으로 진동시키고 주파수 범위를 10 Hz 에서 200 Hz 까지 변화시키면서 가속도 센서(센서1:  $M = 1 \times 10^{-3} \text{ kg}$ , 센서2:  $M = 5 \times 10^{-3} \text{ kg}$ )의 출력을 측정하였다. DC에서 9 Hz까지는 기계상 진동을 발생시키지 못하므로 실험하지 못하였으나 제작된 센서의 원리에 의해 이 주파수 범위도 사용범위에 넣을 수 있다. 측정값과 계산값을 비교한 것이 Fig. 7에 있다. 센서1의 공명주파수는 1550 Hz근처이며, 사용주파수 범위는 DC에서 700 Hz정도이고, 센서2의 공명주파수는 800 Hz에서 900 Hz 사이인데 센서2의 경우 공명주파수 부근에서 출력이 커서 OP Amp. 증폭 출력전압 범위에 벗어나므로 실험값이 없다. 사용주파수 범위는 DC에서 200 Hz정도이다. 공명주파수 근처에서

이론치와 실험치 사이의 차이는 이론식에 마찰에 의한 감쇄(damping) 효과를 넣지 않았기 때문으로 사료된다.



(a)



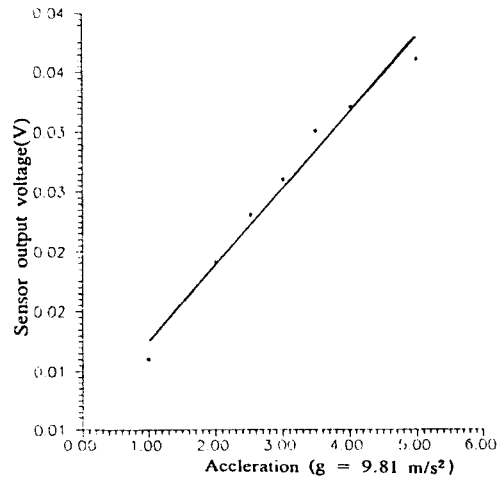
(b)

그림 7. 가속도센서의 주파수응답; (a) 가속도 3g에서의 센서1(M=0.001 kg), (b) 가속도 2g에서의 센서 2(M=0.005 kg), \*측정값, -이론적으로 계산한 값.

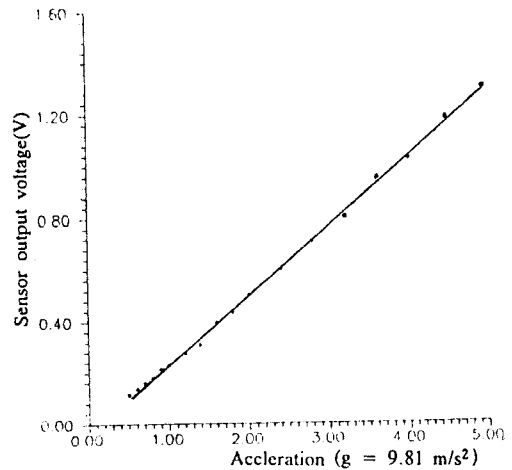
Fig. 7. Frequency response of the acceleration sensors; (a) sensor 1(M=0.001 kg) at 3 g, (b) sensor 2(M=0.005 kg) at 2 g, \*experimental value, - theoretical calculation.

선형도 측정은 기준주파수(reference frequency) 20 Hz에서 가속도 진폭 0.5 g에서 5 g까지 증가시키면서 가속도 센서의 출력 전압을 측정하여 센서의 선형성을 조사하였다. 센서1의 선형도 측정결과는 Fig. 8(a)와

같고, 가속도가 1 g에서는 신호가 작아 잡음크기와 비슷하였으므로 신호값이 불안정하였다. 1 g일때의 신호를 제외한 나머지 신호들은 가속도에 대해 선형적이었으며 감도는 8.9 mV/g였다. 센서2의 선형도 측정결과는 Fig. 8(b)와 같이 센서1 보다 비교적 좋은 선형성을 갖고 있으며, 감도는 240 mV/g, 선형도는 1% 이하였다.



(a)



(b)

그림 8. 센서의 선형도를 조사하기위하여 주파수 20 Hz에서 가속도에 따른 센서의 출력전압; (a) 센서 1(M=0.001 kg), (b) 센서 2(M=0.005 kg)

Fig. 8. Sensor output voltage vs. acceleration at 20 Hz to demonstrate the linearity of the sensors; (a) sensor 1(M=0.001 kg), (b) sensor 2(M=0.005 kg).

## V. 결 론

비정질 세션이 교류자화과정에서 인장응력에 따라 변화하는 최대자기유도를 피측정물리량으로 하는 가속도 센서에 관하여 연구하였다. 비정질세션( $\text{Co}_{72.5}\text{Si}_{12.5}\text{B}_{15}$ )을 이용한 가속도 센서의 사용 주파수 범위는 진동자의 질량 M에 의하여 결정되었으며, 진동자의 질량이  $1 \times 10^{-3}$  kg의 경우 센서의 주파수 대역폭이 DC에서 700 Hz,  $5 \times 10^{-3}$  kg일 경우 DC에서 200 Hz였다. 센서의 선형도는 가속도가 5 g까지 1% 이하였다. 비정질 세션의 자기탄성 효과를 이용한 가속도 센서 응용은 가속도를 DC에서 부터 측정할 수 있고 소형화가 가능하기 때문에 자동차공학이나 감성공학 등에서 사용될 수 있는 저주파용 가속도 센서의 개발이 가능할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [ 1 ] C.M.Harris and C.E.Crede, *Shock and Vibration Handbook*, McGraw-Hill book company, New York, 1961.
- [ 2 ] “진동 측정 기술,” 한국표준과학연구원, 1992.
- [ 3 ] K.Yamada, et. al., “A novel silicon accelerometer with a surrounding mass structure,” *Sensors and Actuators*, A21-A23, p. 308, 1990.
- [ 4 ] H.Seidel, et. al., “Capacitive silicon accelerometer with highly symmetrical design,” *Sensors and Actuators*, A21-A23, p. 312, 1990.
- [ 5 ] S.Suzuki, et. al., “Semiconductor capacitive-type accelerometer with PWM electrostatic servo technique,” *Sensors and Actuators*, A21-A23, p. 316, 1990.
- [ 6 ] K.Mohri, “Review on recent advanced in the field of amorphous-metal sensors and transducers” *IEEE Trans. Mag.*, Mag-20, p. 942, 1984.
- [ 7 ] F.S.Tse, et. al., *Mechanical Vibrations*, Allyn and Bacon, Inc, Boston, 1975.
- [ 8 ] Intermag '90 satellite symposium on amorphous magnetic wire & application, London, 1990.
- [ 9 ] R.Boll and L.Boreck, “Magnetic sensors of new materials,” *Siemens Forsch. -u. Entwickl. -Ber.* Bd. 10, p. 83, 1981.
- [ 10 ] R.Boll and K.J.Overshott, *Sensors vol.5 Manetic sensors*, VCH, Weinheim, 1989.
- [ 11 ] *Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifier Handbook*, Bruel & Kjaer, 1986.
- [ 12 ] 손대락, 임순재, 유중렬, 김창석, “비정질 합금을 이용한 비접촉 자기탄성 토오크 센서,” *한국자기학회지*, vol. 1, p. 89, 1991.
- [ 13 ] 구경희, “압전형 가속도계의 설계, 제작 및 보정,” 석사학위논문, 한국과학기술원, 1989.

## 著 者 紹 介



## 조희정

1969년 8월 27일생. 1991년 이화여자대학교 물리학과 졸업(이학사). 1993년 동 대학원 졸업(이학석사). 주관심분야: 자기 특성 및 자기센서.



## 임순재

1959년 8월 25일생. 1982년 충남대학교 농업기계공학과 졸업(학사). 1985년 서울대학교 대학원 농공학과 졸업(석사). 1982년~현재 한국표준과학연구원 계측시스템 연구실 선임기술원. 주관심분야: 센서 및 계측시스템의 성능평가.



**손 대 락**

1955년 6월 29일생. 1979년 충남대학교 물리학과 졸업(이학사). 1981년 학국과학기술원 물리학과 졸업(이학석사). 1990년 Universität der Bundeswehr Hamburg 졸업(공학박사). 1981년~1992년 한국표준과학연구원 선임연구원. 1992년~현재 한남대학교 물리학과 조교수. 주관심분야: 자성 및 자기센서.



**양 종 만**

1950년 12월 24일생. 1973년 서울대학교 문리대 물리학과 졸업(이학사). 1975년 동대학원 졸업(이학석사). 1981년 시카고대학 물리학과 졸업(이학박사). 1981년~1985년 캘리포니아공과대학. 1985년~현재 이화여자대학교 물리학과 교수. 주관심 분야: 동위원소 분석 및 우주론.