

압전세라믹 기판과 고자왜박막을 결합한 스마트액츄에이터

論 文
49C-5-6

Smart Actuators Composed of Piezoelectric Ceramics and Highly Magnetostrictive films

申 光 鎬* · 荒井 賢一** · 司空 鍵***
(Kwang-Ho Shin · Ken-Ichi Arai · Geon Sa-Gong)

Abstract - This paper presents a study on the linear compensation of nonlinear hysteric piezoelectric actuators using the highly magnetostrictive film pattern as a strain sensor. Elements had a hybrid structure, in which thin soft glass substrate with the highly magnetostrictive amorphous FeCoSiB film was bonded on the PZT piezoelectric substrate. The magnetostrictive film as a strain sensor detects the deflection of an actuator, and a voltage signal from the strain sensor related to the deflection of an actuator is used for the linear control of an actuator.

Key Words : Magnetostrictive film, Strain sensitivity, Piezoelectric substrate, Smart actuator

1. 서 론

압전세라믹을 이용한 액츄에이터에 전압을 인가할 때의 동작은 액츄에이터의 압전정수에 비례하므로 액츄에이터용 압전세라믹재료는 압전정수가 큰 것이 요구된다. 그러나, 일반적으로 압전정수가 큰 재료는 전압인가에 따른 변위와 함께 이력특성도 크게 나타나는 경향이 있다. 현재 압전액츄에이터의 변위이력특성을 제거하는 방법으로 스트레인센서를 붙여서 그 신호를 폐환(feedback)시킴으로써 선형구동을 실현하는 방법이 제안되고 있다[1]. 그러나, 전기저항의 변화를 이용하는 일반적인 스트레인센서는 검출감도가 낮기 때문에 정밀한 제어를 실현하기 위해서는 보다 감도가 좋은 스트레인센서를 개발하여 이용할 필요가 있다.

한편, 철계 아몰퍼스 자성재료는, 고자왜와 우수한 연자성 특성을 동시에 가지고 있어서 높은 자기기계결합계수를 나타낸다[2]. 이 재료들은 스트레인에 대해 민감한 자기특성의 변화를 나타내므로 고감도의 스트레인 센서나 응력 센서 등의 구성재료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다[3].

본 논문에서는 스트레인 센서로서 미안더(meander)타입의 패턴으로 가공한 아몰퍼스 FeCoSiB 박막을 압전액츄에이터의 변위 검출을 위한 스마트액츄에이터에 응용하기 위한 목적으로 그들에 대한 기초특성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1 성막 및 특성측정

스트레인 센서를 구성하는 자성박막으로는 $(\text{Fe}_{90}\text{Co}_{10})_{76}\text{Si}_{11}\text{B}_{13}$ 아몰퍼스 고자왜박막을 이용하였다. 박막은 고주파 스파터링법으로 두께 0.15mm의 유리기판 위에 투자율측정용으로 $1\mu\text{m}$, 임피던스측정용으로 $5\mu\text{m}$ 의 두께로 성막하였다. 성막한 자성박막은 350°C의 온도로 500Oe의 회전자계(60rpm)에서 2시간, 정자계에서 1시간동안 열처리를 행하였다.

FeCoSiB박막의 스트레인 감도특성을 평가하기 위하여 자왜박막을 성막한 기판을 외팔보(cantilever)상으로 고정하고, 그 자유단을 마이크로메타를 이용하여 강제적으로 미소변위를 가하면서 투자율을 측정하였다.

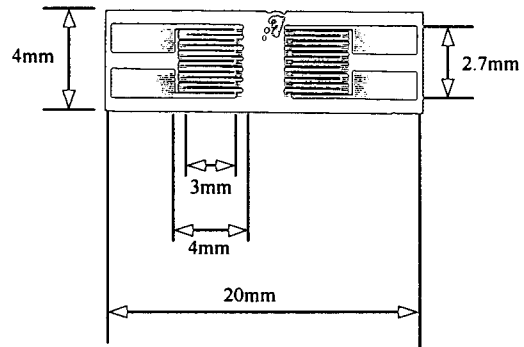


그림 1 스트레인에 의한 임피던스 측정을 위한 Meander형태의 필름

Fig. 1 Meander pattern of the film to measure impedance due to deflection and/or strain.

* 正 會 員 : 三星綜合技術院 MEMS Lab. 研究員 · 工博

** 非 會 員 : Tohoku大學 電氣通信研究所 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 東亞大學 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 12月 9日

最終完了 : 2000年 3月 29日

한편 스트레인 센서를 응용하는 관점에서는 투자율의 변화보다 전기적 신호로 검출이 가능한 임피던스의 변화를 이용하는 것이 보다 더 유용하다. 이를 위해 포토리소그라피법과 이온밀링법을 이용하여 길이 3mm, 폭 100 μ m, 7 turn의 미안더(meander)타입 패턴으로 미세 가공하였으며, 이들 박막패턴의 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 이들 자성박막의 스트레인에 대한 고주파에 있어서 임피던스의 변화를 조사하기 위해 Network Analyzer(HP8752A)를 사용하여 구동주파수 영역인 1MHz에서 500MHz까지의 임피던스 값을 측정하였다.

2.2 스마트 액츄에이터의 구조 및 구동시스템

본 연구에서의 스마트 액츄에이터의 제조공정을 Fig. 2에 나타내고 있다. 먼저, 길이 20mm, 폭 4mm, 두께 0.15mm의 유리기판 상에 고주파스파타링법을 이용하여 아몰퍼스 FeCoSiB 고자왜박막을 성막하고, 포토리소그라피법과 이온밀링법을 이용하여 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 패턴을 제작하였다. 박막패턴이 형성된 기판과 양면이 전극 처리된 PZT기판[길이 26mm, 폭 4mm, 두께 0.3mm]을 광경화성 접착제를 사용하여 접착시켰다. 이 때 접착층의 두께는 약 8 \pm 1 μ m이었다.

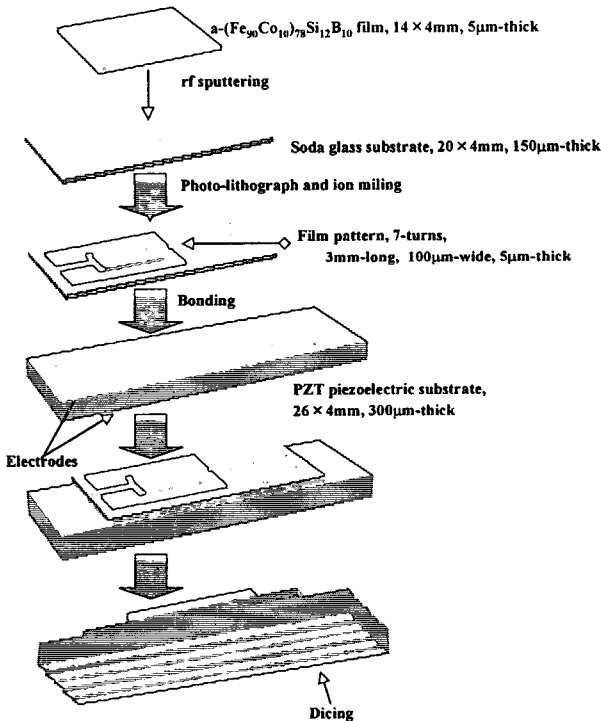


그림 2 압전세라믹기판과 고자왜박막을 결합시킨 스마트액츄에이터의 제조공정
Fig. 2 Fabrication process of a smart actuator hybridized with highly magnetostrictive film and piezoelectric substrate

이렇게 제작된 소자의 PZT기판의 전극간에 전압을 인가하면 PZT기판의 압전정수 d_{31} 과 인가전압의 곱에 비례하여 소자의 길이방향과 폭 방향으로 응력이 발생하고 이로 인해 소자가 동작하게 된다. 그러나, 이 응력은 소자의 길이방향과 폭 방향에 대하여 동등하므로 면내 방향의 일축 자기이방성에 의해 출력신호가 발생하는 자왜박막을 이용한 스트레인 센서의 고감도특성을 얻는 데는 적절하지 못하다.

이러한 문제점을 개선하기 위하여 본 연구에서는 다이싱소(dicing saw)를 이용하여 PZT기판의 배면에 길이방향의 미세한 홈[깊이 250 μ m, 폭 64 μ m]을 만들었으며, 배면을 확대 촬영한 사진을 Fig. 3에 나타내었다.

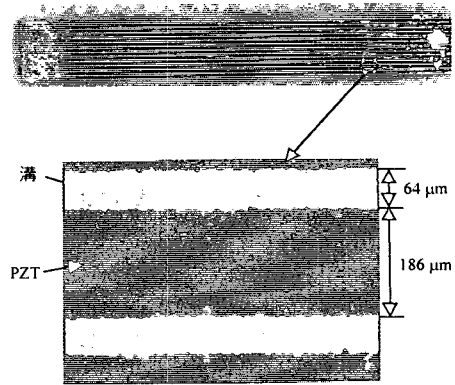


그림 3 액츄에이터의 배면 확대 사진
Fig. 3 Photograph of the back side of an actuator.

이러한 홈을 형성함으로써 소자의 폭 방향으로 발생하는 응력을 무시할 수 있게 되므로 소자의 동작에 의한 민감한 출력신호가 자왜박막을 이용한 스트레인 센서로부터 얻어지게 된다.

즉, 아몰퍼스 FeCoSiB 자왜박막패턴과 PZT기판을 결합시킨 스마트액츄에이터에서 PZT소자의 동작에 의해 스트레인이 자왜박막 패턴에 인가되면 박막의 자기이방성이 변화하여 고주파에서의 표피효과가 변화되고, 결국 임피던스가 변화하게 된다.

따라서, 이들 자왜박막패턴의 구동주파수에서의 임피던스 변화율에서 스트레인 검출이 가능하므로 고감도 스트레인 검출소자로서 활용될 수 있음을 아래의 식 (1)~(6)으로부터 알 수 있다.

PZT기판의 두께방향으로 전압을 인가하는 경우, PZT에서 발생하는 길이방향의 응력은 식 (1)에서 구할 수 있다 [4].

$$\sigma_p = d_{31} \left(\frac{V}{t} \right) E_p \tag{1}$$

이 식에서 $d_{31}(121\text{pc/N})$ 은 PZT의 압전정수, V 는 인가전압, t 는 PZT의 두께, E_p 는 PZT의 young을(70GPa)이며, 이 응력에 의해 소자가 동작하게 된다. 소자의 두께방향으로 증성면(소자가 동작할 때 변형하지 않는 부분)에서 소자의 윗면까지의 두께비율 n 과 곡률반경 R 는 각각 식 (2)와 식 (3)에 의해 구해진다[5].

$$\frac{1}{R} = \int_{(n-1)h}^{nh} E(z)zdz = 0 \tag{2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\int_{(n-1)h}^{nh} E(z)d_{31}(V/t)w_pzdz}{\int_{(n-1)h}^{nh} E(z)w_gz^2dz} \tag{3}$$

여기서, h 는 소자의 두께, w_p 는 PZT층의 폭, w_g 는 유리기관의 폭, $E(z)$ 는 두께방향의 재료의 young을을 나타낸 것이다. 한편, 소자가 동작함에 따라 나타나는 자왜박막의 스트레인을 ∇/l 이라 하면, 식 (4)로 표시할 수 있다.

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{z}{R} \tag{4}$$

스트레인에 의해 자왜박막의 실효적인 자기이방성이 변화되며, 역자왜효과에 의해 투자율이 변화하게 된다[6-7]. 자왜박막의 투자율이 변화하게 되면, 식 (5)에서의 표피효과에 의해 고주파에서의 표피두께가 변화하게 된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0\mu}} \tag{5}$$

여기서, ρ 는 전기저항률, ω 는 각주파수, μ 는 투자율을 나타낸다. 박막의 표피효과가 변화하면 식 (6)에서와 같이 임피던스가 변화하게 된다.

$$Z = \frac{k\rho l}{2\omega} \coth\left(\frac{kt}{2}\right) \tag{6}$$

여기서, l 과 t 는 각각 자왜박막의 길이와 두께이고, $k=(1+i)d$ 이다.

따라서 구동주파수에서의 변화된 임피던스 변화율에서 보다 민감한 스트레인 검출의 성능지수를 구할 수 있게 된다.

Fig. 4는 제작된 스마트 액츄에이터의 구동시스템을 나타낸 것으로, 소자의 PZT기관에 인가하는 제어신호는 FeCoSiB 박막패턴과 임피던스 검출회로에 의해 발생되는 검출신호와 합쳐져서 소자의 변위를 제어하게 된다.

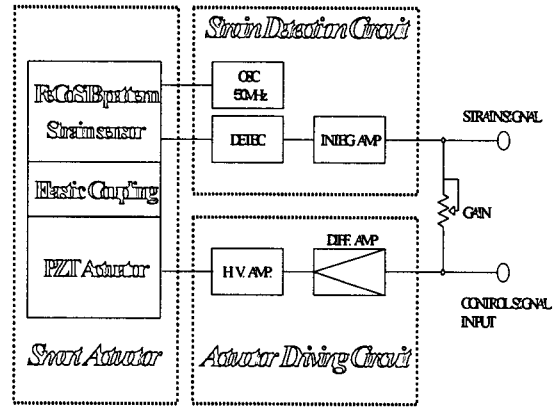


그림 4 스마트액츄에이터의 제환시스템 블록도
Fig. 4 Block diagram of the feed back system for a smart actuator

3. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 FeCoSiB박막의 스트레인 감도특성을 평가하기 위하여 자왜박막을 성막한 기관에 대한 투자율의 측정된 결과를 나타내고 있다. 이 측정에 사용한 자성박막은 정자계 중에서 열처리를 실시하여 일축자기이방성을 유도한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 스트레인 0~4ppm의 영역에서는, 1ppm당 약 110의 투자율의 변화를 나타내고 있다. 이 변화율에서 스트레인 검출의 성능지수[$F=(\nabla\mu/\mu)/\epsilon$]를 구하면 약 1.2×10^5 정도이다. 이 결과로부터 본 연구에서 제작한 자왜박막은 스트레인에 대해 극히 민감한 센싱특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

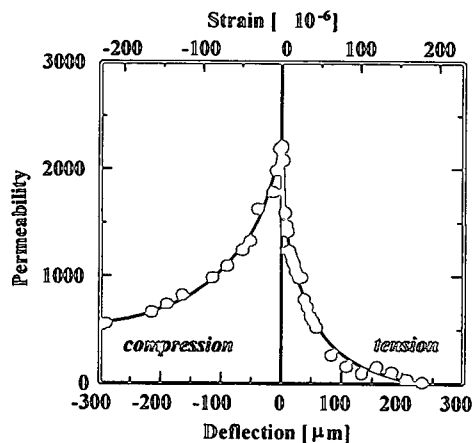


그림 5 자성막 기관의 기계적 변형에 의한 FeCoSiB박막의 투자율

Fig. 5 Permeability of the FeCoSiB film due to mechanical deformation of the substrate

Fig. 6은 제작된 시편에 대해 Network Analyzer (HP8752A)를 이용하여 1MHz에서 500MHz까지의 구동주파수영역에서 측정된 박막패턴의 임피던스로서, 박막시료에 인가한 종단변위를 파라미터로 하여 나타낸 것이다. 여기서 압축스트레인에 의한 임피던스의 변화가 생기는 것은 자기탄성에너지에 의해 자기이방성이 변하고, 이로 인해 고주파 표피효과의 변화에 기인된 것으로 생각된다. 구동주파수 50MHz에서의 임피던스의 변화를 보면, 300 μ m의 종단변위에 대해 약 32%의 변화를 나타내고 있다. 이 변화율에서 스트레인 검출의 성능지수를 구하면, 약 1.7×10^3 정도로서 스트레인의 인가에 대해 극히 민감한 임피던스의 변화를 나타내고 있음을 알 수 있다.

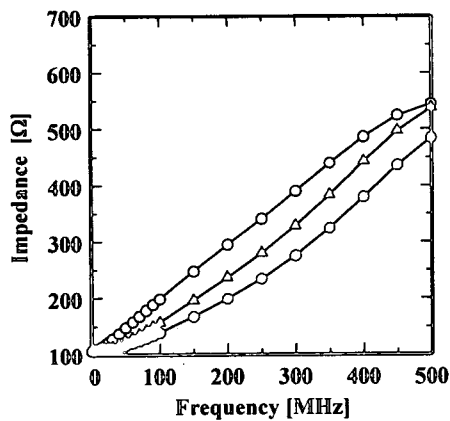


그림 6 자성막 기판의 기계적 변형에 의한 FeCoSiB박막의 임피던스의 주파수 의존성

- : 변위가 없을 경우, △ : 150 μ m 변위의 경우,
- : 300 μ m 변위의 경우

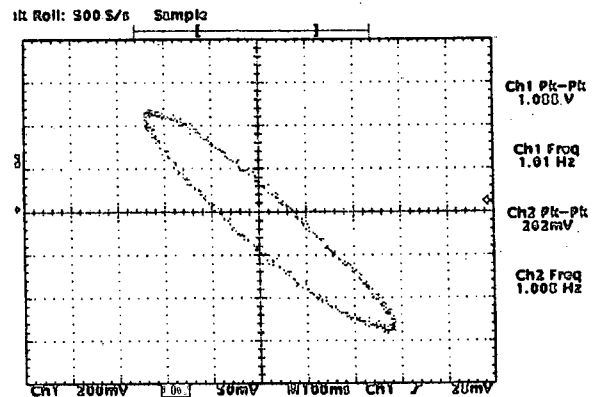
Fig. 6 Impedance of a FeCoSiB film pattern due to mechanical deformation of the substrate as a function of frequency

- : non-deflected, △ : 150 μ m deflected,
- : 300 μ m deflected

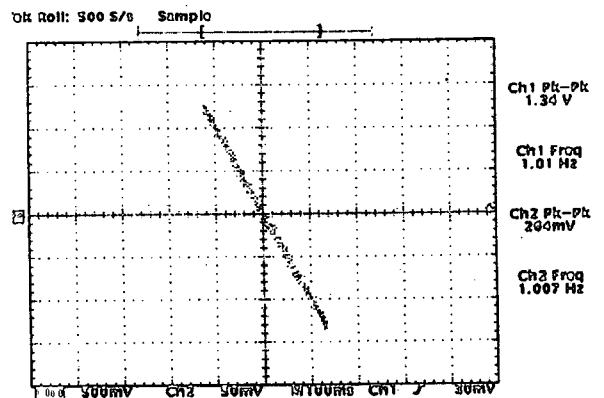
Fig. 7(a)는 구동주파수가 1Hz일 때, 스트레인 검출신호를 폐환시키지 않은 경우(Open loop)에 있어서 PZT기판에 인가한 전압에 대한 자왜박막패턴에서의 출력신호를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 소자의 구동특성에는 PZT의 변위이력특성이 원인인 비선형성이 포함되어 있음을 볼 수 있다.

Fig. 7(b)는 구동주파수가 1Hz일 때, 스트레인 검출신호를 PZT구동회로에 폐환시킨 경우로서, 이 때 폐환이득(feedback gain)은 50배이었다. 이 그림에서 스트레인 검출신호를 폐환시킴으로써 소자의 동작 시 이력특성이 없어지고 선형구동이 실현되고 있음을 볼 수 있다. 이 때, PZT에 인가한 전압의 크기는 50V이고, 스트레인 검출회로에서의 출력신호는 약 260mV이었다. 그리고, 레이저 변위계를 이용한 측정결과 50V의 인가에서 소자의 변위가 약 40 μ m이

있으며, 또한 스트레인 검출회로에서의 출력되는 신호의 노이즈레벨은 약 2mV이었다. 따라서, 본 연구에서 구성한 액츄에이터와 구동시스템에 의해 약 32nm정도의 정밀한 변위의 제어가 가능함을 확인하였다.



(a)



(b)

그림 7 스마트액츄에이터의 구동회로 (a): 개방형 제어, (b): 폐로형 제어.

Fig. 7 Driving circuit of a smart actuator (a): open loop control, (b): feed back control.

4. 결 론

아몰퍼스 FeCoSiB 고자왜박막에 기계적인 스트레인을 인가하였을 때의 자기특성의 변화에 대해 조사하였다. 그 결과, 본 연구에서 제작한 자왜박막의 스트레인 검출성능이 약 $F=1.2 \times 10^5$ 정도의 큰 값이 얻어져 스트레인에 대해 고감도 특성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 또한, 미세가공한 박막시료는 스트레인에 대하여 50MHz의 구동주파수에서 약 32%의 임피던스의 변화를 나타내었다. 따라서, 이 자왜박막패턴은 전기신호로서 스트레인을 검출할 수 있는 소자로서 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

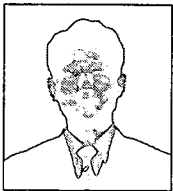
아몰퍼스 FeCoSiB 자왜박막패턴과 PZT기판을 결합시킨

스마트액츄에이터를 제작하여, 액츄에이터의 선형구동성에 관한 연구결과에서 자왜박막패턴에서의 스트레인 검출신호를 PZT기판에 인가하는 제어신호에 제환시킴으로써 액츄에이터의 선형구동이 실현됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 内野研二, 壓電/電歪アクチュエータ, pp. 123, 1986.
 [2] C. Modzelewski, H. T. Savage, L. T. Kabacoff, and A. E. Clark, "Magneto-mechanical Coupling and Permeability in Transversely Annealed Metglas 2605 Alloys", IEEE Trans. Magn., Vol. 17, No. 6, pp. 2837, 1981.
 [3] K. H. Shin, M. Inoue, and K. Arai, "Highly Sensitive Strain Sensors with FeCoSiB Amorphous Films", J. Magnetics Society of Japan., Vol. 23, No 4-2, pp. 1425-1428, 1999.
 [4] M. A. Marcus, "Performance Characteristics of Piezoelectric Polymer Flexure Mode Devices", Ferroelectrics., Vol. 57, pp. 203-220, 1984.
 [5] J.Kelly Lee, and M. A. Marcus, "The Deflection-bandwidth Product of Poly(Vinylidene Fluoride) Benders and Related Structures", Ferroelectrics., Vol. 32, pp. 93-101, 1981.
 [6] J.D.Livinston, "Magneto-mechanical Properties of Amorphous Metals", Phys.Stat.Sol., Vol. 70, pp. 591-596, 1982.
 [7] M. L. Spano, K. B. Hathaway, and H. T. Savage, "Magnetostriction and magnetic anisotropy of field annealed Metglas* 2605 alloys via dc M-H loop measurements under stress", J.Appl.Phys., Vol. 53, pp. 2667-2669, 1982.

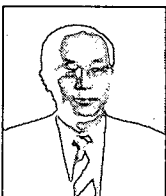
제 자 소 개



신 광 호 (申 光 鎬)
 1993년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업.
 1995년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1999년 9월 Tohoku대학 (공박). 1999년 10월~2000년. 2월 일본 厚生省 연구원. 2000년 3월~현재 삼성종합기술원 MEMS Lab. 연구원



사공 건 (司 空 鎰)
 1968년 영남대 공대 전기공학과 졸업.
 1973년 및 1996년 동 대학원(공박). 1983~1985년 The Penn. State Univ., Mat. Res. Lab(Visiting Scientist), 1993년 일본 동경 공업대학(객원연구원). 1994년 The State Univ. of New Jersey (Visiting Scientist). 1997-1998년 Virginia Tech. (Visiting Professor) 1979~현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수



K.I. Arai (荒井 賢一)
 1966년 Tohoku대학 전자공학과 졸업.
 1971년 동 대학원 공학연구과(공박). 1974년 동 대학 전기통신연구소 助手. 1975년 동 대학 조교수. 1986~ 현재 동 대학 교수.