

# 박막성형 기술 및 MEMS 공정을 이용한 자기변형 위치변환기

이흥식<sup>†</sup> · 조종두\* · 이상교\*

## Fabrication of a Magnetostrictive Transpositioner using Thin Film Deposition and MEMS Techniques

Heung-Shik Lee, Chongdu Cho and Sang-kyo Lee

**Key Words :** Magnetostrictive(자기 변형), Micromachining(미세기계가공), Thin film deposition(박막 성형), Transpositioner(위치 변환기)

### Abstract

This paper presents a magnetostrictive transpositioner and its fabrication process. To get a transposition movement without shifting or twisting, it is designed as an array type. To fabricate the suggested design, micromachining and selective DC magnetron sputtering processes are combined. TbDyFe film is sputter-deposited on the back side of the bulk micromachined transpositioner, with the condition as: Ar gas pressure below  $1.2 \times 10^{-9}$  torr, DC input power of 180W and heating temperature of up to 250°C for the wireless control of each array component. After the sputter process, magnetization and magnetostriction of each sample are measured. X-ray diffraction studies are also carried out to determine the film structure and thickness of the sputtered film. For the operation, each component of the actuator has same length and out-of-plane motion. Each component is actuated by externally applied magnetic fields up to 0.5T and motion of the device made upward movement. As a result, deflections of the device due to the movement for the external magnetic fields are observed.

### 1. 서 론

여기에 최근 기능성 소재가 발견되면서 MEMS의 중요한 소재로 자기변형 재료가 연구되고 있으며 상업화되고 있다 [1]. 자기변형재료는 외부에서 인가되는 자기장에 의해 치수의 변화(주로 길이의 변화를 일컬음)가 발생하는 재료를 말한다. 상업적인 응용에 대한 시도는 1960년대 희토류 금속(rare earth elements)과 자기 천이금속(magnetic transition metals)과의 합금을 통해 상온에서 약  $10^{-3}$  정도의 큰 자기변형을 갖는 Terfenol이 개발되면서부터였고,

1980년대 미국의 AMES에서 작은 크기의 인가 자기장 하에서도 큰 변형을 보이는 Terfenol-D가 개발되어 상업적인 성공을 거두었다. 상기 MEMS 소자에 적용되는 자기변형 재료는 취성이 매우 크고, 외팔보 형태와 같은 단일 구조물로 되어있어 변형량에 비해 충분한 기계적 힘을 나타내고 있지 못하고 있으며, 원하는 정도의 자기변형을 얻기 위해서는 비교적 높은 자기장이 요구되는 단점을 가지고 있다.

1990년대 중반이후 자기변형 복합 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 자기변형 복합재료의 기계적 해석을 위한 해석 모델에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다 [2-4].

이러한 연구는 압전재료나 형상기억합금이 이용되는 복합재료의 거동 해석을 위해 개발된 해석적 모델링(analytical modeling) 기법과 유사한 방법으로 진행되고 있다. 최근 국내에서도

---

<sup>†</sup> 회원, 인하대학교 기계공학과  
E-mail : js-heung@hanmail.net  
TEL : (032)860-7321 FAX : (032)868-1716

\* 인하대학교 기계공학과

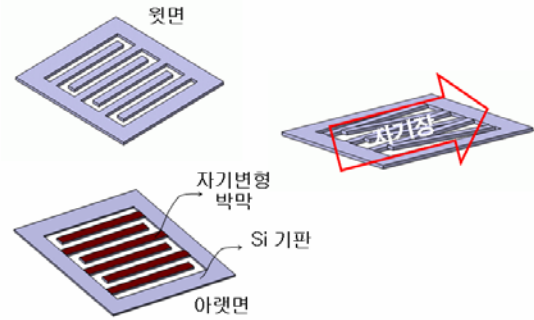
자기변형 박막의 제작 및 응용에 관해 연구개발이 이루어지고 있으나 프랑스, 일본 등의 연구노력에 비해 매우 미약한 실정이다.

먼저 자기변형 MEMS 소자에 대한 연구는 매우 활발히 진행되고 있으나, 이들 대부분은 자기변형 현상의 구동원리를 미소 구조물에 적용한 것으로 자기변형의 응용에 대한 개념 검증의 단계에 머무르고 있다. 즉 구체적인 응용사례 및 상용화에 성공한 예는 아직까지 보고되지 않았다. 이것은 자기변형 MEMS 소자의 개발에 대한 새로운 아이디어의 창출이 빈약했거나 또는 자기변형 MEMS 소자의 설계 및 제작을 위한 수치 모델링 기법 등이 여러 연구자에 의해 제안되었지만 자기변형 MEMS 소자의 기하학적 특성 및 비선형적인 자기변형 현상을 적절히 고려할 수 있는 효율적인 설계도구로서의 역할을 수행할 수 없었기 때문이기도 하다.

자기변형 복합 재료에 관한 연구 역시 매우 활발히 진행되고 있지만, 압전재료나 형상기억합금이 사용되는 복합재료의 거동해석을 위해 많은 연구가 수행된 것을 통해서도 알 수 있듯이 자기변형 복합재료를 기능성 재료로써 효율적으로 이용하기 위해서는 기계적 거동 예측을 위한 유한 요소 모델링 기법의 개발이 필수적으로 요구되나 지금까지의 대부분의 연구는 해석적 모델의 개발에 국한되어 왔으며 수치 모델링에 관한 연구는 아직까지는 보고되지 않은 것으로 파악된다.

외국과 비교할 때 자기변형 재료에 대한 국내의 연구는 매우 미약하며 주로 자기변형 박막 또는 자기변형 복합재료의 제조에만 머무르고 있는 실정이다. 즉 자기변형 MEMS 소자의 개발, 자기변형 복합재료의 모델링에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 것이다.

따라서, 본 연구의 목적은 상술한 문제점을 해결하기 위한 것으로 강도가 낮은 자기장으로 높은 힘을 발휘할 수 있으며, 정확한 위치제어가 가능하고, 제조단가가 낮으며, 대량생산이 용이한 자기변형 위치변환기를 제안함과 함께, MEMS 공정과 선택적 박막 증착 공정에 의해 배열형 구조물의 제작을 통해 외부에서 가해지는 자기장의 세기에 따라 수직 위치를 변화시키는 자기변형 위치 변환기를 제작하고, 자기-기계적 특성을 연구하는 것에 있다. 본 연구를 통해 기존의 단일 구조물에서 얻어내기 어려운 큰



**Fig. 1** Schematic design of array type thin film actuator and deposited magnetostrictive films with shape changes after applying magnetic field.

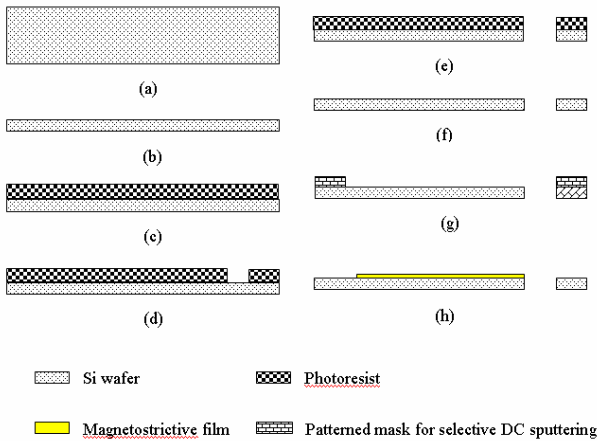
기계적인 힘을 얻어낼 수 있게 되었으며 이것은 MEMS 구조물의 위치제어에 응용 될 수 있다.

## 2. 설계

자기변형 광학스위치의 개념도를 Fig. 1 에 나타내었다. 마이크로머시닝(micromachining)공정에 의해 제작된  $50\mu\text{m}$  두께의 배열형의 외팔보 구조물 들은 외부 프레임에 연결되어 전체의 구성을 이루고 있다. 설계된 자기변형 구동기 시스템의 전체 크기는 가로 4mm, 세로 5mm 로 설계되었으며, 내부에 형성된 배열형 외팔보의 각 크기는 폭  $300\mu\text{m}$ , 길이 2.4mm, 구조물 사이의 간격  $100\mu\text{m}$  로 구성 되었다. 자기변형의 특성을 이용한 원격 위치를 제어할 위해 스위치의 뒷면에 TbDyFe 를 박막형태로 증착시킨다. 설계된 광학 스위치는 외부에서 가해지는 자기장의 세기에 따라 굽힘 현상을 일으키게 되어, 외부 자기장의 세기가 0 에서부터 0.5T 에 이르기까지 증가함에 따라 굽힘의 크기가 커지도록 한다. 배열형 구조의 기판과 자기변형 재료의 증착을 위해 마이크로 머시닝 (micromachining) 공정과 선택적 직류 자기 스퍼터 (selective DC magnetron sputtering) 공정을 도입한다.

## 3. 제작

제안된 배열형의 자기변형 구동기의 제작 공정에 있어서, 마이크로머시닝 공정과 선택적 직류 자기 스퍼터(DC magnetron sputtering)공정을 사용하여 제작 및 박막 증착을 하였다.

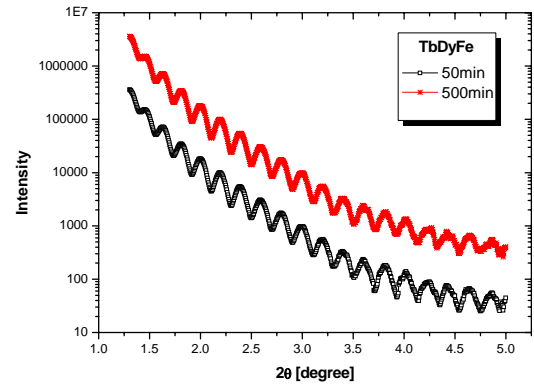


**Fig. 2** Micromachining and TbDyFe thin film deposition sequences for the fabrication of magnetostrictive actuator.

배열 형 외팔보 구조의 자기변형 구동기 제작의 시작으로 Fig. 2 에서 보는 것과 같이 약 750 $\mu\text{m}$  두께의 실리콘 웨이퍼를 건식 식각(dry etching)을 통해 그 두께를 51~52 $\mu\text{m}$  로 줄인 후 (Fig 1a, b), 연마공정(CMP, Chemical Mechanical Polishing)을 통해 표면 거칠기를 6~8 $\mu\text{m}$  로 만든다. 외팔보 형태의 부분과 외부 프레임 형태 사이를 관통시켜 형상을 만들기 위해 포토레지스트 (photoresist)를 약 30 $\mu\text{m}$  두께로 쌓는다. 포토레지스트는 15 초간 1100rpm 으로 스핀 코팅을 이용한다. 쌓여진 포토레지스트 위에 미리 제작된 마스크를 이용하여 패턴을 형성한다 (Fig. 2c). 형성된 패턴에 반응이온식각 (Reactive Ion Etching)을 이용해 50 $\mu\text{m}$  두께의 Si 기판을 관통시킨다 (Fig. 2d). 포토레지스트를 제거한 후, 외팔보 형태의 부분에만 자기변형재료를 증착시키기 위해 콘넥터 와 프레임을 마스크로 가린 후 (Fig. 2e), 스퍼터 공정을 통해 자기변형 박막을 원하는 두께로 증착시킨다. 직류 자기 스퍼터 증착공정의 조건으로 입력과워 180W, 아르곤 (Ar) 가스 압력을  $1.2 \times 10^{-9}$  이하로 유지, 증착온도를 약 300 $^{\circ}\text{C}$  로 사용한다. 박막을 증착한 후, 선택적 증착을 위해 사용한 마스크를 제거한다 (Fig. 2f).



**Fig. 3** Fabricated magnetostrictive actuator.



**Fig. 4** X-ray diffraction for thickness measurement with deposition time.

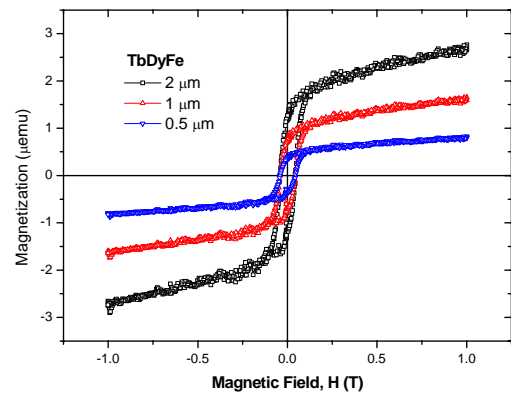
그 후, 선택적 증착을 이용하여 TbDyFe 박막을 외팔보 부분에만 0.5 $\mu\text{m}$ , 1 $\mu\text{m}$ , 2 $\mu\text{m}$  두께로 증착한다 (Fig. 2g, h). 제작된 구동기를 Fig. 3 에 나타내었다.

#### 4. 특성 평가

제작된 자기변형 광학 스위치 및 빗살 형 구동기의 제작 특성 및 자기-기계적 특성을 확인하기 위하여 그 성능을 실험적으로 조사하였다. Fig. 3 은 제작된 기관 위에 증착시킨 자기변형 박막의 두께를 측정하기 위해 사용된 X 선 회절분석(X-ray diffraction)의 결과를 나타낸다.

Fig. 4 의 그래프 결과에 사용된 시료는 TbDyFe 박막이며 각각 50 분, 500 분 증착하였을 때의 측정 상태를 나타낸다. Fig. 4 를 이용하여 시간에 따른 증착 두께를 다음의 식을 이용하여 얻어낼 수 있다.

$$\Lambda = 1/\lambda \left( 2\sqrt{\sin^2 \theta - 2\delta} \right) \quad (1)$$



**Fig. 5** Magnetization of TbDyFe actuator at each deposited film thickness.

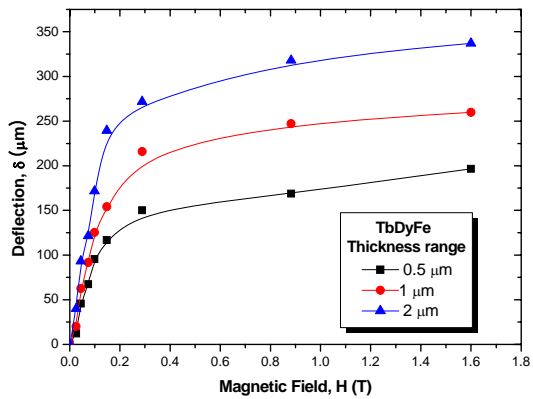


Fig. 6 Magnetization of TbDyFe actuator at each deposited film thickness.

식 (1)에서  $I$  는 각 2θ 에서의 최고치 강도를,  $\lambda$  는 박막의 과장을 나타내며,  $\Lambda$  는 증착된 두께를 나타내고  $\delta$  는 굴절률 지수를 나타낸다.

Fig. 5 는 배열형 외팔보 구조를 갖는 자기변형 구동기의 TbDyFe 증착 두께 별 자화 특성을 나타내며, 외부 인가 자기장의 세기는 최대 1T 를 사용하였다. 또한 자화 특성에 이어 자기-기계적 특성을 알아보기 위해 자기장의 세기에 따른 각 구조물의 처짐량을 측정하였다. 처짐량의 측정은 레이저를 이용한 방법을 사용하였으며, 인가 자기장의 세기에 따른 횡방향과 종 방향의 곡률을 측정함으로써 자기변형량을 측정하고 그것을 처짐량으로 최종 산출하였다. 사용된 식은 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{t_s^2}{9t_f} \frac{Y_s}{Y_f} \frac{1+\nu_f}{1+\nu_s} \left( \frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_w} \right) \quad (2)$$

식 (2)에서  $Y$  는 탄성계수를,  $\nu$  는 포아송의 비를,  $t$  는 두께를,  $R$  은 곡률반경을, 아래첨자  $s, f$  는 각각 기판과 박막을 의미한다.

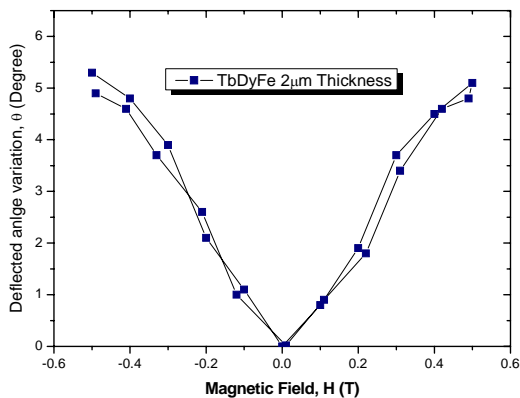


Fig. 7 Magnetization of TbDyFe actuator at each deposited film thickness.

Fig. 6 은 증착 두께 별로 외부 자기장에 의해 나타난 처짐 량을 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 7 은 자기변형 구동기의 인가 자기장에 대한 처짐량으로 인해 나타난 변형 각을 나타낸 것이다.

## 5. 결론

마이크로 광학 시스템에 응용하기 위해 자기변형 특성을 이용한 광학 스위치 및 빗살 형 구동기를 설계하고 제작하였으며 자기-기계적 특성을 평가하였다. 각각 TbDyFe 박막을 두께 별로 특성화하였으며 배열형 외팔보 구동기에서 330μm 의 최대 변형량과 5.5° 의 변형 각을 나타내었다.

## 참고문헌

- (1) A. Speliotis, O. Kalogirou, N. Vouroutzis and D. Niarchos, 1998, "Magnetostrictive properties of amorphous and nanocrystalline TbDyFe films with Nb and Zr additives," *J. Magn. Magn. Mater.* Vol. 187, pp. 17-22.
- (2) M.R.J. Gibbs, E.W. Hill and P.J. Wright, 2004, "Magnetic materials for MEMS applications," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 37, pp. R237~244.
- (3) H. Janocha, 2001, "Application potential of magnetic field driven new actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 91, pp. 126~132.
- (4) C. Body, G. Reyne and G. Munier, 1997, "Application of Magnetostrictive Thin Films for Microdevices," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No. 2, pp. 2163~2166.