

# 초기변형 최소화를 위한 광변조 압전 다층박막 액추에이터의 설계, 제작 및 시험

論 文

49C-9-1

## Design, Fabrication and Test of Piezoelectric Multi-Layer Cantilever Microactuators for Optical Signal Modulation

金明震\*·曹永昊\*\*

(Myeong Jin Kim · Young-Ho Cho)

**Abstract** - This paper presents a method to minimize the initial deflection of a multi-layer piezoelectric microactuator without losing its piezoelectric deflection performance required for light modulating micromirror devices. The multi-layer piezoelectric actuator, composed of PZT, silicon nitride and platinum layers, deflects or buckles due to the gradient of residual stress. Based on the structural analysis results and relationship between process conditions and mechanical properties, we have modified the fabrication process and the thickness of thin film layers to reduce the initial residual stress deflection without decreasing its piezoelectric deflection performance. The modified designs, fabricated by surface-micromachining process, achieved the 77% reduction of the initial deflection compared with that of the conventional designs, while maintaining equivalent piezoelectric deflection performance. The present design and process modification method, based on the measured micromechanical material properties, is applicable to the design refinement of multi-layer MEMS devices and micromechanical structures.

**Key Words:** micromirror, piezoelectric microactuator, PZT, deflection control, residual stress

### 1. 서 론

최근 들어 광(optical) MEMS 기술을 이용한 광 스위치, 스캐너, 화면 표시기 등 고성능 정보기기 개발이 활성화 되고 있다. 그 중 미소거울을 이용한 광변조 화면 표시기(Fig.1)는 광효율 향상 측면에서 관심의 대상이 되어왔다. TI(Texas Instrument)사가 정전구동형 미소거울을 이용하여 광변조 화면표시기 DMD (Digital Micromirror Device)[1]를 개발한 이래 미소거울의 설계 및 제조공정의 개선이 꾸준히 진행되고 있으며, 최근 국내 기업체에서도 압전구동형 거울을 이용한 광변조 화면표시기[2]개발에 성공한 바가 있다.

이처럼 다수의 미소거울을 이용한 광변조 화면표시기의 제품화를 위해서는 미소 거울의 성능 및 수율의 균질성과 재현성 유지가 필수적이다. 특히 다층박막 구조물을 사용하는 화면표시기의 경우, 다층박막의 잔류응력에 의해 미소 구조물의 초기변형이 발생하기 쉬우며, 이러한 초기변형의 크기와 불균일성은 미소거울의 성능 및 수율의 균질성 유지에 심각한 문제를 발생시킬 뿐 아니라 화면표시기의 광변조 성능과 수명을 줄이는 결과를 초래한다. 따라서 다층박막 구조물을 이용한 화면표시기의 경우, 균질성과 재현성 향상을 위하여 박막 내부의 잔류응력 조절이 매우 중요하다.

본 연구에서는 광변조용 압전 다층박막 액추에이터의 구

조와 잔류응력을 조절함으로써 미소거울의 구동성능의 저하 없이 초기변형을 최소화할 수 있는 설계 및 공정기술을 개발하였다. 이를 위해 먼저 다층박막 액추에이터의 구조분석을 통해 박막재료의 물성치가 미소거울의 초기변형 및 구동특성에 미치는 영향을 검토하였고, 각 박막별로 측정된 물성치를 기반으로 다층박막 액추에이터의 두께와 잔류응력 조절을 통해 초기변형을 최소화 할 수 있는 설계 및 공정을 개발하였다. 또한 개선된 설계와 공정에 따라 다층박막 액추에이터를 제작하였고, 광변조 성능시험을 통해 그 효과를 실험적으로 검증하였다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 구조 및 작동 원리

본 논문에서 고려한 압전 다층박막 액추에이터는 광변조용 미소거울을 지지함과 동시에 이를 구동하기 위한 외팔보형 미소구동 요소로서, Fig.1에 도시한 바와 같이 압전구동에 의한 외팔보의 변형을 이용하여 미소거울을 회전시키고 반사광의 경로를 변환시켜 화면에 조사되는 빛의 양을 조절하는 기능을 수행한다.

Fig.2에서 보듯이 광변조를 위한 미소거울은 백금 전극층 사이에 위치한 압전(PZT)층의 압전 구동력에 의해 작동된다. 광변조기의 주요 성능 인자 중 하나는 미소거울의 회전각이며, 회전각이 클수록 높은 음영 비율을 나타낸다. 이러한 미소거울의 회전각은 압전 다층 미소구동기의 특성과 관계된다.

압전구동기의 해석을 위해 폭  $w$ 를 갖는 다층 박막보의

\* 非 會 員 : LGEDS 研究院

\*\* 正 會 員 : KAIST 機械工學科 副教授

接受日字 : 2000年 8月 4日

最終完了 : 2000年 8月 28日

변형을 생각하자. 구조 해석을 위해 다층 박막으로 구성된 보의 각 층은 선형 탄성 영역내의 균질한 재료로 이루어졌다고 가정하고, 등가단면의 방법(transformed-section method) [3]를 이용하면, 보의 단면에서 힘의 평형은 다음과 같이 기술된다.

$$\int z dA + \sum_i \int_i z n_i dA = 0 \tag{1}$$

여기서,  $z$ 는 중립축으로부터의 거리를,  $n_i$ 는  $E_i/E_1$ 으로 첫 번째 층에 대한  $i$  번째 층의 영계수 비를 나타낸다. 등가단면 방법에 의해 동일 재질  $E_1$ 으로 구성되며  $E_i$ 와  $E_1$ 과의 비에 따라 단면의 폭을 등가적으로 변환한 축대칭 단면을 갖는 다층 외팔보의 변환된 단면에서의 중립축 위치와 관성모멘트는 식(1)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\bar{z} = \frac{\sum_i \bar{z}_i A_i}{\sum_i A_i} \tag{2}$$

$$I_i = I_1 + \sum_i n_i I_i \tag{3}$$

여기서,  $\bar{z}_i$ 는 보의 표면에서  $i$  번째 층 단면의 중심까지의 거리를,  $A_i$ 는 등가단면 방법에 의해 변환된  $i$  번째 단면의 면적을,  $\bar{z}$ 는 보의 표면에서 중립축까지의 거리를 각각 나타낸다. 또한,  $I_i$ 는 변환된 단면의 관성모멘트를,  $I_1$ 과  $I_i$ 는 첫 번째와  $i$  번째 층에 대한 단면의 관성모멘트를 각각 표시된다.

한편 압전(PZT)층 단위 면적 당 압전 구동력( $\sigma_x$ )은 다음과 같이 인가전압과 압전상수의 함수로 나타난다.

$$\sigma_x = d_{31} \frac{V}{t_{PZT}} E_{PZT} \tag{4}$$

여기서  $d_{31}$ 은 압전상수,  $V$ 는 인가전압,  $t_{PZT}$ 와  $E_{PZT}$ 는 각각 PZT층의 두께와 영계수이다. 압전(PZT)층의 횡방향 수축에 의한 압전 구동력은 다층보에 다음과 같은 굽힘 모멘트를 인가한다.

$$M_y = \int_{z_1}^{z_2} z \sigma_x w dz \tag{5}$$

여기서  $w$ 는 압전(PZT)층의 폭이며,  $z_1$ 과  $z_2$ 는 각각 압전층의 상하면의 표면과 보의 중립면과의 거리를 나타낸다.

식(5)의 굽힘 모멘트에 의한 길이  $l$ 인 외팔보 끝의 최대 수직 변위( $\delta_{PZT}$ )은 다음과 같이 표시된다.

$$\delta_{PZT} = \frac{M_y l^2}{2E_1 I_i} \tag{6}$$

식(6)에서 압전형 구동기의 변형을 증가시키기 위해서는 압전 구동력의 증가로 굽힘 모멘트를 증가시키거나 다층보의 강성계수(EI)를 줄여야 함을 알 수 있다.

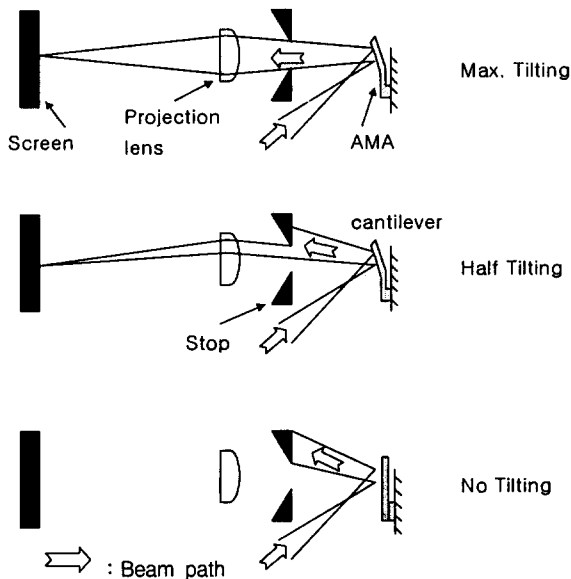


그림 1 외팔보형 압전구동 미소거울열을 이용한 대형 화면표시기의 광변조 원리

Fig. 1 Principle of the light modulation using a piezoelectrically actuated micromirror array(AMA)

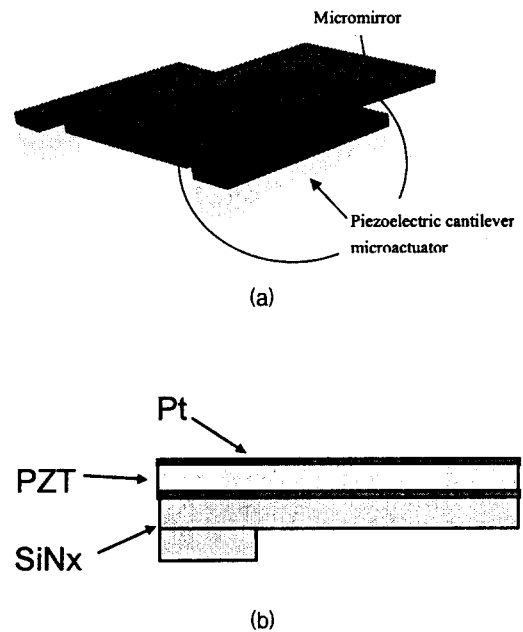


그림 2 압전 다층박막 액추에이터의 구조: (a) 사시도, (b) 단면도

Fig. 2 Structure of the piezoelectric multi-layer microactuator: (a) Perspective view, (b) Cross-sectional view

2.2 잔류응력에 의한 초기 변형

Fig.1과 같은 광변조기에 있어서 미소거울의 초기변형은 여러가지 문제를 야기할 수 있는데, 미소구동기의 초기 굽힘 응력이 최대응력에 더해지므로 수명이 짧아진다는 것과 압전형 미소거울의 구동 범위를 줄이는 것 등을 들 수 있다. 또한 초기변형은 광학계에도 여러 가지 문제를 안겨주는데, 광원, 렌즈, 화면표시기 패널 등 광학 요소의 위치가 이상적인 계와는 다르게 보정되어야 한다. 이러한 광학요소의 위치이동은 렌즈의 수차를 증가시켜, 광학계 구성을 복잡하게 하면서도 음영비가 떨어지는 결과를 낳는다. 따라서 각 박막층의 잔류응력 발생 원인과 보정방법에 대한 연구가 필요하다.

잔류응력에 의한 다층박막 보의 변형은 압전형 마이크로 액추에이터의 구동 해석과 동일하게 이루어 질 수 있으며, 선형 탄성 물질의 경우 잔류응력 분포에 의한 굽힘 모멘트는 다음과 같다.

$$M_r = \sum_i \int_{z_{i-1}}^{z_i} z \sigma_{ri} w dz \tag{7}$$

여기서  $\sigma_{ri}$  는  $i$  번째 층의 잔류응력이며 식(7)에 의한 외팔보의 최대변위는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\delta_{res} = \frac{M_r l^2}{2E_f I_f} \tag{8}$$

외팔보의 초기변형을 최소화하기 위해서는 잔류응력에 의한 굽힘 모멘트의 최소화 와 다층보 강성계수의 최대화가 필요하다. 외팔보에 가해지는 총 모멘트는 압전 구동력에 의한 모멘트와 잔류응력에 의해 발생하는 모멘트의 합으로 구성되며 결과식은 아래와 같다.

$$M_o = M_y + M_r = \int_{z_{1m}}^{z_{1n}} z \sigma_x w dz + \sum_i \int_{z_{i-1}}^{z_i} z \sigma_{ri} w dz \tag{9}$$

식(9)의 전체 모멘트에 의한 압전형 외팔보 미소구동기의 변위는 다음과 같다.

$$\delta_{tot} = \frac{(M_r + M_y) l^2}{2E_f I_f} \tag{10}$$

3. 박막의 기계적 물성 측정

앞 절에서 언급하였듯이, 다층박막 구조의 경우 각 층 재료의 강성계수와 잔류응력이 초기변형에 영향을 준다. 따라서 초기변형 최소화를 위한 설계의 기초 자료로 재료의 영계수 및 잔류응력을 정확히 측정할 필요가 있다.

재료의 기계적 물성치를 측정하는 방법은 여러 가지가 있지만 본 연구에서는 영계수와 잔류응력 두 가지 모두에 관심이 있으므로 블리스터[4] 시험방식을 사용했다. 블리스

터 방식은 박막에 알려진 압력을 가한 후 변형량을 측정하여 힘과 변위와의 관계로부터 영계수와 잔류응력을 구하는 것이다.

사각박막의 압력과 변위와의 관계를 FEM 해석 결과를 이용하여 보정한 이론식[4]은 다음과 같다.

$$p = 3.41 \frac{h \sigma_o w_o}{a^2} + 1.37(1.446 - 0.427\nu) \frac{E h w_o^3}{1-\nu a^4} \tag{11}$$

여기서,  $p$ 는 박막에 가해진 압력을,  $h$ 는 박막의 두께를,  $a$ 는 박막의 한 변 길이의 반을 각각 나타낸다. 또,  $\sigma_o$ 는 박막의 잔류 응력을,  $E$ 는 박막의 영계수를,  $\nu$ 는 포아송의 비를 각각 나타내며,  $w_o$ 는 박막의 중심에서의 변위를 나타낸다. 식(11)을 이용하여  $p a^2 / h w_o$ 와  $(w_o/a)^2$ 의 관계를 그래프에 표시하면, 직선의 기울기와 절편으로부터  $E$ 와  $\sigma_o$ 를 각각 구할 수 있다. 이때 식(11)은 단일박막의 경우에 유효하며, 이는 다층박막의 경우에 대해 다음과 같이 확장[4]된다.

$$p = \frac{w_o}{a^2} [\sum_k C_{1k} h_k \sigma_k] + \frac{w_o^3}{a^4} [\sum_k C_{2k} \frac{E_k h_k f(\nu_k)}{(1-\nu_k)}] \tag{12}$$

여기서,  $C_{1k}$ 와  $C_{2k}$ 는 각각 무차원 상수를 나타내며,  $f(\nu_k)$ 는 형상에 관련된 무차원 함수를 각각 나타낸다. 또한, 하첨자  $k$ 는 각 변수의  $k$ 번째 층에 관한 값을 의미한다.

블리스터 시험시편은 웨이퍼의 앞면에 측정 재료 증착 후 뒷면에서 KOH 식각을 행하여 얻어진 사각박막으로 구성된다. 실리콘 질화막 시편은 질화막이 KOH에 대한 식각 선택성이 커서 박막 생성에 큰 어려움이 없는 반면, 백금 시편은 KOH에 대한 보호가 필요하며 이를 위해 실리콘 질화막과 이중 층으로 제작한다. PZT의 물성치 측정을 위한 시편은 화면표시기 제작과정과 동일한 효과를 갖도록 하기 위하여 PZT-백금-실리콘 질화막의 다층 박막으로 제조하였다.

실리콘 질화막은 증착 과정에서 DCS(Dichlorosilane):NH3의 비가 감소함에 따라 잔류응력이 증가한다[5]. 본 연구에서는 기존의 DCS:NH3의 비를 사용하여 제작한 실리콘 질화막과 기존의 공정에 비해 그 비가 40% 감소한 상태에서 제작한 실리콘 질화막의 두 가지 서로 다른 조건에 대해 잔류응력의 변화를 시도하였다. 즉, 이로부터 DCS:NH3의 비가 잔류응력에 미치는 영향을 검증하고 이로부터 새로운 화면표시기의 제조 공정을 유도하고자 한 것이다. 또한, 제작된 실리콘 질화막의 두께는 기존의 공정을 사용한 경우와 DCS:NH3의 비를 40% 감소시킨 공정을 사용한 경우에 각각 0.385  $\mu$ m와 0.5  $\mu$ m로 측정되었다.

제작된 백금막의 두께는 0.11  $\mu$ m였으며, 기존의 공정을 사용한 실리콘 질화막 위에 제작되었다. 또한, 제작된 PZT 박막의 두께는 4  $\mu$ m이며, 앞서 언급한 바와 같이 기존의 공정을 사용한 실리콘 질화막과 백금막 위에 제작하여 다층 박막을 형성한다.

Fig.3은 블리스터 측정을 위한 측정장치의 구성도를 보여 준다. 작은 공기압 실린더로 시편에 압력을 가하면서 다이알 압력 게이지로부터 인가한 압력을 읽어들인다. 수직 방향의 박막 변위는 현미경의 초점 이동거리로부터 구할 수 있

다. 측정 결과의 정리 과정에서 사용된 포아송비는 실리콘 질화막, 백금, PZT의 경우, 각각 0.25, 0.3, 0.3[6,7]이었다. 각 박막에서 측정된 물성치는 Table 1에 정리하였다.

4. 마이크로 액추에이터 설계

미소 거울 구동기를 대형 화면 표시기에 적용하기 위해서는 미소거울의 회전각이 3° 이상이어야 한다. 초기 미소거울의 회전각은 외팔보 미소구동기의 강성계수와 잔류응력의 복합 요소에 의해 발생된다. 압전 구동력의 효율을 증가시키려면 외팔보의 강성계수를 낮추어야 하지만 작은 강성계수는 잔류응력에 의한 초기 변형을 증가시킨다.

식(1)~식(8)을 근거로 하여 잔류응력에 의한 초기변형을 줄이기 위한 방법으로 다음의 세 가지의 경우를 시도할 수 있다. 첫 번째 방법은 공정개선에 의해 다층박막 전체의 잔류응력을 줄이는 것으로, 이는 잔류응력 자체가 제조공정에 민감하므로 만족할 만한 결과를 기대하기 어렵다. 두 번째 방법은 박막의 두께 등을 조정하여 강성계수를 증가시키는 것으로, 이는 미소거울의 압전구동 범위를 줄이는 결과를 초래하여 화면의 질을 떨어뜨릴 우려가 있다. 마지막으로 고려할 수 있는 방법은 잔류응력 분포를 조절하는 것이다. 다층박막 외팔보의 초기변형은 다층박막 내부에 존재하는 박막별 잔류응력의 분포에 의한 것임을 고려할 때 외팔보 미소구동기의 강성계수 증가 없이도 잔류응력 분포를 조절함으로써 초기변형을 감소시킬 수 있다.

Fig.4에서 보듯이 실리콘 질화막의 잔류응력에 의한 모멘트는 PZT층과 반대로 작용하기 때문에, 실리콘 질화막의 잔류응력을 증가시키면 오히려 초기변형이 줄어든다. 따라서 실리콘 질화막 생성시 DCS:NH3의 비를 감소시켜 잔류응력이 증가하도록 하였다.

잔류응력에 의한 굽힘 모멘트는 PZT층의 두께가 얇을수록 작게 걸리지만, 외팔보의 단면 강성계수가 감소하여 초기 변형이 증가한다. 따라서 전체 외팔보의 강성계수의 감소 없이 PZT층의 두께만을 감소시켜야 한다.

표 1 박막의 기계적 물성 측정치

Table 1 Measured micromechanical properties of thin film layers

|                       | SiNx                 |                  | Pt            | PZT           |
|-----------------------|----------------------|------------------|---------------|---------------|
|                       | Conventional Process | Modified Process |               |               |
| Young' Modulus [GPa]  | 242                  | 328              | 78            | 93            |
| Residual Stress [MPa] | 195 (tensile)        | 610 (tensile)    | 165 (tensile) | 355 (tensile) |

PZT층의 두께는 재료특성상 12V 구동을 위해 최소한 0.3 μm는 되어야 한다. 이때 외팔보 강성계수의 유지를 위해서는 실리콘 질화막의 두께를 증가시켜야 하며, 이러한 두께의 증가는 잔류응력 영역을 넓혀 모멘트의 총합을 감소시킨다. 그러나 두께의 변화만으로는 잔류응력 변화에 비해 초기 변형의 감소에 큰 영향을 줄 수는 없다.

모든 사항을 고려하여 보면, 초기변형 최소화를 위해서는 실리콘 질화막의 두께와 잔류응력 증가, PZT층 두께의 감소가 동시에 이루어져야 한다. 이에 따라 설계된 치수 및 물성치는 실리콘 질화막, 백금, PZT층의 두께가 각각 0.5 μm, 0.1 μm, 0.3 μm이며, 공정조건 변화에 따른 질화막의 잔류응력과 영계수가 610MPa, 328GPa로 각각 조정되었다. 나머지 치수는 기존의 설계치를 따랐다. 개선된 외팔보 마이크로 액추에이터의 초기변형은 기존 경우인 26.1 μm에 비해 42%가 감소된 15 μm 정도이며, 7V의 인가전압에서 10.8 μm의 변형이 예측된다.

상용 해석 프로그램 ANSYS를 사용하여 앞서 계산된 단순화 모델을 검증해 본 결과, 기존 외팔보의 초기변형은 22 μm, 개선된 형태에서는 11.3 μm를 얻었다. FEM 해석시에는 8절 solid element를 사용하였으며, 잔류응력은 열응력으로 변환하여 고려하였으며, 해석 결과의 예를 Fig.5에 나타내었다.

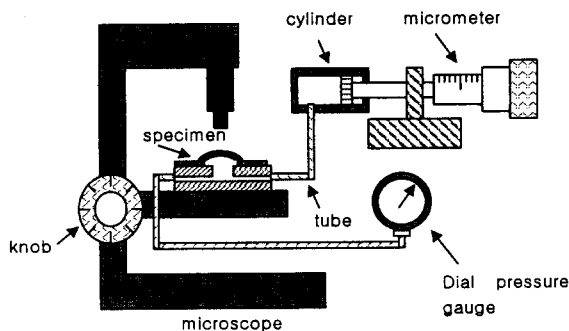


그림 3 블리스터 테스트를 위한 실험 장치 구성도  
Fig. 3 Blister test apparatus

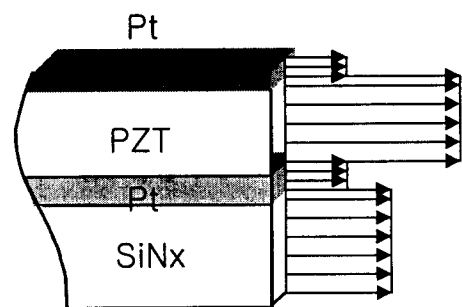


그림 4 다층박막 외팔보 내부의 잔류응력 분포  
Fig. 4 Thin film residual stresses in the multi-layer cantilever microactuator

표 2 실리콘 질화막의 잔류응력과 실리콘 질화막 및 PZT막의 두께 변화에 따른 초기변형과 압전구동 변형의 예측

Table 2 Estimated initial residual deflection and piezoelectric deflection for each design

| Design Case | SiNx    |                | Thickness [ $\mu\text{m}$ ] |     | FEM simulation* [ $\mu\text{m}$ ] |                | Analytical solution* [ $\mu\text{m}$ ] |                |
|-------------|---------|----------------|-----------------------------|-----|-----------------------------------|----------------|--|----------------|
|             | E [GPa] | $\sigma$ [MPa] | SiNx                        | PZT | $\delta_{res}$                    | $\delta_{PZT}$ | $\delta_{res}$                         | $\delta_{PZT}$ |
| 1           | 242     | 195            | 0.4                         | 0.4 | 22.2                              | 4.4            | 26.1                                   | 8.9            |
| 2           | 242     | 195            | 0.5                         | 0.3 | 19.4                              | 5.1            | 24.6                                   | 10.8           |
| 3           | 328     | 610            | 0.4                         | 0.4 | 13.6                              | 4.3            | 16.7                                   | 8.7            |
| 4           | 328     | 610            | 0.5                         | 0.3 | 11.3                              | 5.0            | 15.0                                   | 10.6           |

\* based on the common data listed in the following table

| Length [ $\mu\text{m}$ ] | Width [ $\mu\text{m}$ ] | $\sigma_{Pt}$ [MPa] | $E_{Pt}$ [MPa] | $\sigma_{PZT}$ [MPa] | $E_{PZT}$ [MPa] | $t_{Pt}$ [ $\mu\text{m}$ ] | Voltage [V] |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|----------------|----------------------|-----------------|----------------------------|-------------|
| 100                      | 15                      | 165                 | 78             | 355                  | 93              | 0.1                        | 7           |

FEM 해석의 결과는 앞 절의 이론적 예측치보다 작게 나타났으며, 이는 FEM해석시에는 보의 대변형을 가정한데 반해 단순화된 이론식이 보의 미소변형 가정하에 유도되었기 때문이며, 또한 FEM해석시에는 Fig.5에 나타나 있는 바와 같이 보의 지지부의 변형까지를 포함하여 해석하였으나 이론식은 외팔보의 한쪽 끝이 고정단인 경우에 대하여 유도한 것이기 때문이다.

다층박막 액추에이터에 대한 이론식 및 FEM에 의한 이론적인 예측치는 모두 Table 2에 비교 정리하였다.

### 5. 다층박막 액추에이터의 제작

앞서 설계된 다층 외팔보 구조물을 박막미세가공을 이용하여 제작하였다. 기존 화면표시기 제조 과정에서 실리콘 질화막의 증착 조건 및 두께, PZT층의 두께가 변경되었다. LPCVD 실리콘 질화막의 잔류응력은 DCS와 NH3의 비율 조정하여 변화시켰으며, 개선된 설계변수를 Table 3에 정리하였다.

Fig.6은 다층박막 외팔보 액추에이터의 제조공정을 도시한 것이다. Fig.6(a)는 4" 실리콘 웨이퍼 상에 희생층으로 PSG 1 $\mu\text{m}$ 가 증착된 모습이다. Fig.6(b)에서는 RIE 공정에 의해 지지부가 형성되었으며, Fig.6(c)에서는 개선된 LPCVD 공정에 의해 0.5 $\mu\text{m}$  두께의 실리콘 질화막이 증착되었고, 0.1 $\mu\text{m}$  두께의 백금막이 바닥전극으로 올려졌다. Fig.6(d)에서는 0.3 $\mu\text{m}$  PZT층을 졸겔 방식으로 형성하고 그 후속 공정으로 다시 0.05 $\mu\text{m}$ 의 위쪽 백금전극을 증착하였다. 전극 증착과정이 끝난 후 RIE 공정을 통하여 외팔보 구동기의 형상을 만든 후, 희생층 PSG를 제거하였다.

### 6. 광변조 성능시험 및 결과

초기변형 및 압전 구동변형은 광학 표면 측정기(UBM)를 이용하여 위쪽 전극의 길이 방향으로 주사하여 측정하였다. UBM의 분해능은 0.01 $\mu\text{m}$  이지만 측정시 외란, 웨이퍼 자체의 곡률, 표면 상태 등이 측정 오차를 유발하므로 전체 오차 범위는  $\pm 0.1\mu\text{m}$ 로 예상된다.

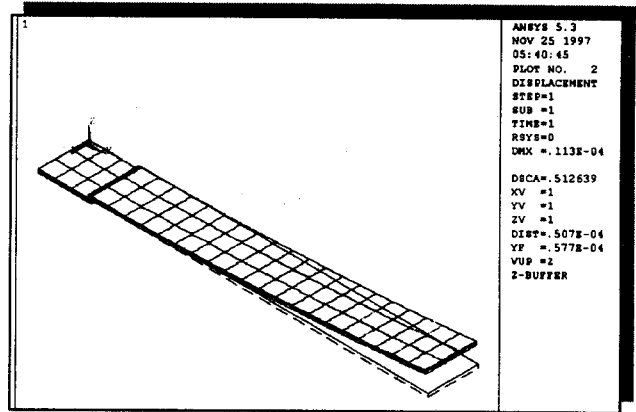


그림 5 외팔보 마이크로 액추에이터의 FEM 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 FEM simulation results of the cantilever microactuator

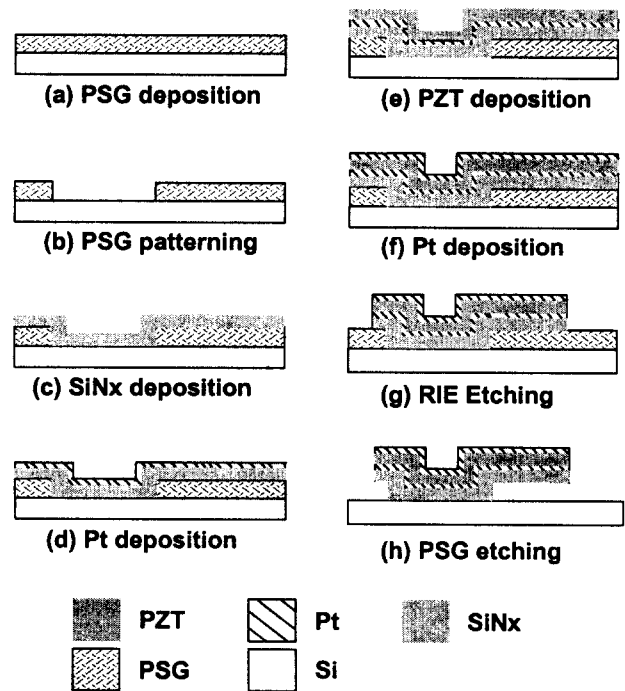


그림 6 제조 공정  
Fig. 6 Microfabrication process

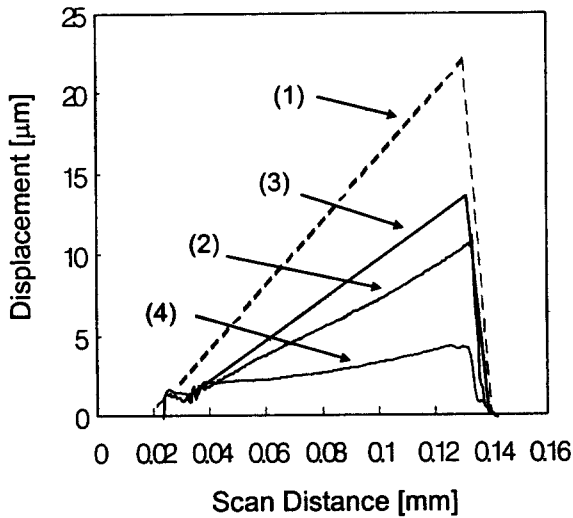


그림 7 외팔보의 초기 변형에 대한 예측치와 측정치 비교: (1)과 (2)는 각각 기존 액추에이터에 대한 FEM 해석 결과 및 측정된 변형량; (3)과 (4)는 각각 제안된 구조의 액추에이터에 대한 FEM 해석 결과 및 측정된 변형량

Fig. 7 Estimated and measured initial deflections along the cantilever microactuators: (1) and (2) show the FEM simulation and the measured values for the conventional actuator; (3) and (4) compare the FEM simulation and the measured values for the modified actuator.

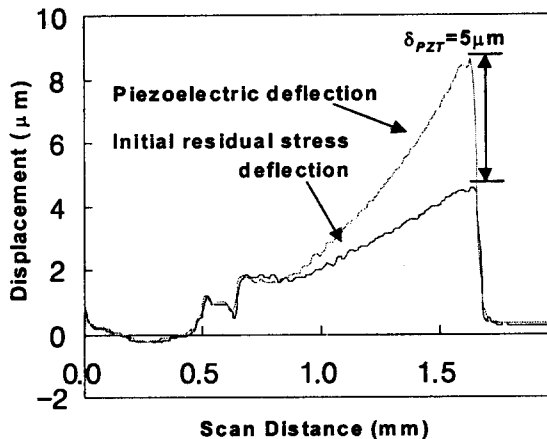


그림 8 직류전압 7V의 압전구동에 의한 액추에이터의 변위 및 초기 변형량의 측정치 비교

Fig. 8 Initial deflection and piezoelectric actuation measured along the cantilever actuator for the DC drive voltage of 7V

표 3 개선된 설계 변수

Table 3 The modified design variables.

|                       | SiNx | Pt        | PZT       |
|-----------------------|------|-----------|-----------|
| Young's Modulus [GPa] | 328  | no change | no change |
| Residual Stress [MPa] | 610  | no change | no change |
| Thickness [μm]        | 0.5  | no change | 0.3       |

증착된 박막의 두께를 측정된 결과 PSG를 제외하고는 모두 설계치수와 같았으며, PSG는 1 μm 설계와는 달리 0.6 μm로 얇게 증착되었다.

제조완료 후 개선된 액추에이터의 초기변형은 1.5 μm ~ 3.4 μm 범위로 측정되었고 평균 2.1 μm의 변형을 보였다. 따라서 개선된 외팔보의 초기변형은 기존 구조에 대해 측정된 초기변형 9.2 μm에 비하여 77%가 감소하였다.

측정된 초기변형은 앞서 2장에서 기술한 해석해나 FEM을 사용하여 해석한 결과보다도 작은 값을 보였으며, Fig. 7에 그 결과를 비교하였다. 이러한 차이는 재료 물성치 측정상의 오차, 각 층 내부에서의 잔류응력 구배의 무시, 층 사이의 계면 응력을 고려하지 않은 결과라 추정된다. 외팔보 미소구동에 DC 7V가 가해졌을 때 외팔보 끝의 최대 수직 변위는 초기 위치로부터 5 μm로서, 이는 화면표시기의 설계조건인 회전각 3°를 만족하는 것이며, 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

### 7. 결 론

본 연구에서는 강성계수의 증가 없이 다층박막 압전형 마이크로 액추에이터의 초기변형 최소화를 위해 구조와 공정의 개선을 시도하였고 제작 후 시험 측정을 행하였다. 구조해석을 통하여 초기변형에 영향을 주는 주요 인자는 강성계수와 잔류응력을 분석하였고, 다층박막을 구성하는 재료들의 물성치를 실험적으로 측정하였다. 구조해석을 통해 실리콘 질화막은 두께 변화와 함께 잔류응력 조절이 초기변형에 큰 영향을 준다는 결과를 보았다. 이러한 결과를 바탕으로 실리콘 질화막과 PZT층의 두께를 외팔보 전체의 강성계수가 감소하지 않는 범위 내에서 조정하였다. 실리콘 질화막의 공정조건 변화를 통해 잔류응력을 195MPa에서 610MPa로 증가시켰으며, 두께도 실리콘 질화막은 0.4 μm에서 0.5 μm로, PZT는 0.4 μm에서 0.3 μm로 각각 변경하였다. 미세박막가공으로 제조가 완료된 후 측정된 초기변형은 평균 2.1 μm로 기존 설계와 공정에 의한 초기변형에 비해 77% 감소하였다. 본 연구에서 제시한 다층박막 액추에이터의 설계 및 공정기술은 다층박막으로 구성된 MEMS 구조물의 초기변형 최소화와 균질성 향상에 응용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.B. Sampsel, "An Overview of the Performance Envelop of Digital Micromirror Device Based Projection Display System," SID '94 Digest, pp. 669-672, 1994.
- [2] S.K. Kim and K.H. Hwang, "Micromachined Thin Film Mirror Array for Reflective Light Modulation," CIRP Annuals, vol. 46/1, pp. 455-458, 1997.
- [3] J. M. Gere and S. P. Timoshenko, Mechanics of Materials, PWS Publishing Company, 1990, pp. 304-307.
- [4] J.Y. Pan, P. Lin, F. Maseeh and S.D. Senturia, "Verification of FEM Analysis of Load Deflection Methods for Measuring Mechanical Properties of Thin Films," IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, June 1990, pp. 70-73.
- [5] M. Sekimoto and H. Yoshihara, "Silicon Nitride Single-layer X-ray Mask," J. Vac. Sci. Technol., Vol.21, No 4, pp. 1017-1021, 1982.
- [6] R. A. Stewart and J. N. Kim, "Young's Modulus and Residual Stress of LPCVD Silicon-rich Silicon Nitride Determined from Membrane Deflection," Sensors and Materials, 2, 5 (1991) 285-298.
- [7] P. Lin and S. D. Senturia, "The In-situ Measurement of Biaxial Modulus and Residual Stress of Multi-layer Polymetric Thin Films," Proc. Mat. Res. Soc. Symp. Vol. 188 (1990) 41-46.

저 자 소 개

김 명 진 (金明震)

1967년 3월 7일생. 1989년 연세대 기계공학과 졸업. 1998년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업(석사). 현재 LGEDS 연구원



조 영 호 (曹永昊)

1957년 8월 10일생. 1980년 영남대 기계공학과 졸업(학사). 1982년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업(석사). 1991년 미국 버클리대 기계공학과 졸업(공학박). 1982년~1986년 한국과학기술연구원 CAD/CAM연구실 연구원. 1987년~1990년 Berkeley Sensor & Actuator Center(BSAC) 연구 조교, 1990년~1991년 BSAC post-doc., 1991년~1994년 KAIST 기계기술연구소 선임연구원. 1994년~현재 KAIST 기계공학과 조교수, 부교수. 관심분야 : 마이크로머신(MEMS), 마이크로 액추에이터, 반도체 관성센서, 미소 자율 구동기관 및 응용  
Tel : 042-869-3038, Fax : 042-869-3050  
E-mail : mems@kaist.ac.kr