

Step-Up 구조를 갖는 다층박막 초소형 구동소자의 초기변형 최소화에 관한 연구

이 희 중* · 강 신 일†

(2002년 4월 3일 접수, 2002년 8월 24일 심사완료)

Minimization of Initial Deflection of Multi-Layered Micro-Actuator with Step-Up Structure

Heejoong Lee and Shinill Kang

Key Words: Multi-Layered Micro Actuator(다층 초소형 구동소자), Residual Stress(잔류응력), Anchor(지지부), Step-Up Structure(계단식 구조), Initial Deflection(초기 변형)

Abstract

In the present study, a new anchor design was proposed to minimize the initial deflection of micro multi-layer cantilever beam with step-up structure, which is a key component of thin film micro-mirror array. It is important to minimize the initial deflection, caused by residual stress, because it reduces the performance of the actuation. Theoretical and experimental studies were conducted to examine the cause of the initial bending deflection. It was found that the bending deflection at the anchor of the cantilever beam was the primary source of initial deflection. Various anchor designs were proposed and the initial deflections for each design were calculated by finite element analysis. The analysis results were compared with experiments. To reduce the initial deflection a secondary support was added to the conventional structure. The optimal shapes were obtained by simulation and experiment. It was found from the analysis that the ratio of horizontal and vertical dimensions of secondary support was the governing factor, which affected the initial deflection.

1. 서 론

Microelectronics의 핵심인 집적회로(IC) 가공 기술을 응용한 마이크로머시닝(Micromachining) 기술을 기반으로 μm 단위의 2차원 및 3차원의 미세 구조를 구현하는 MEMS(Micro-Electro-Mechanical System)기술⁽¹⁾은 크게 두 가지로 구분 할 수 있는데, Si등의 기판에 다층막을 형성한 후 기판의 일부분을 녹여내서 기계적인 구동 등이 가능한 Air Gap을 형성하는 Bulk Micromachining과 실리콘에

다결정 실리콘, 실리콘 질화막, 산화막 및 금속막 등을 증착하여 설계된 형상에 따라 구조물을 제작하는 표면미세가공(Surface Micromachining)으로 나눌 수 있다. 표면미세가공 기술은 AFM tip,⁽²⁾ Bolometer,⁽³⁾ 그리고 RF resonator 등의 다양한 미세기계가공 제작에 응용되고 있다.

표면미세가공의 대표적인 구조인 Step-Up 구조의 초소형 다층박막 외팔보의 경우에 있어서, 계속되는 고온 고압의 제조공정을 거치게 되면, 지지구조에 잔류 굽힘 응력이 발생하게 되고, 이 잔류 굽힘 응력의 구배에 의해 구조물에 초기 굽힘 변형이 발생하게 된다. 이럴 경우 그 구조물 성능의 정확성이 저하되는 문제가 발생하게 되어, 극소형, 초정밀 제품에 적용할 경우 여러 가지 문제점을 발생시키게 된다.

* 회원, 삼성전자(주) DM연구소

† 책임저자, 회원, 연세대학교 공과대학 기계공학부

E-mail : snlkang@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2829 FAX : (02)362-2736

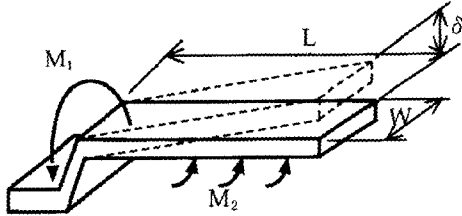


Fig. 1 Bending moment of surface micromachined micro-actuator with step-up structure⁽¹⁰⁾

주상백,⁽⁴⁾ Cho 등^(5,6)은 이러한 문제점을 해결하기 위해 박막의 증착 조건과 두께 변화를 통해 다층박막 표면에 분포된 잔류응력을 제거함으로써 초기 굽힘 변형을 감소시켰다. Ngo 등⁽⁷⁾은 지지구조에 hump를 추가하여, 공진 주파수 특성을 비교, 분석하였다. 또한 Kim 등^(8,9)은 표면미세 가공 기술로 제작된 전형적인 Step-up 구조의 초기 굽힘 변형에 영향을 미치는 두 종류의 굽힘 모멘트 M_1 , M_2 중에서 Step-up부에 작용하는 초기 굽힘 모멘트가 지배적임을 실험을 통해 규명하였다.

본 연구에서는 이러한 Surface Micromachining의 대표적인 구조인 Step-Up 구조의 초소형 다층박막 외팔보 구조물의 지지구조에 발생하는 초기 굽힘 변형을 최소화시키기 위해 새로운 지지구조 형상을 가지는 기본 모델을 제안하고, 이를 유한요소법(FEM)을 이용하여 초기변형을 해석한다. 또한, 제안된 지지구조를 제작한 뒤, 초기변형을 측정하고 그 결과를 해석치와 비교·분석함으로써, 초기 굽힘 변형이 가장 작은 지지구조를 제안하고자 한다. 또한, 이러한 결과들을 가지고 초기 굽힘 변형을 최소화시킬 수 있는 지배인자를 도출하여, 최종적으로 초기 굽힘 변형을 최소화할 수 있는 지지구조 선정에 대한 방법론을 제시하고자 한다.

2. 모델링

2.1 모델제안

Step-Up 부에 발생하는 초기 변형을 최소화시키는 최적의 지지구조를 알아내기 위해, Fig. 2와 같이 4가지의 서로 다른 지지구조 형상을 가지는 Step-Up 구조의 초소형 박막 외팔보를 제안하였다.

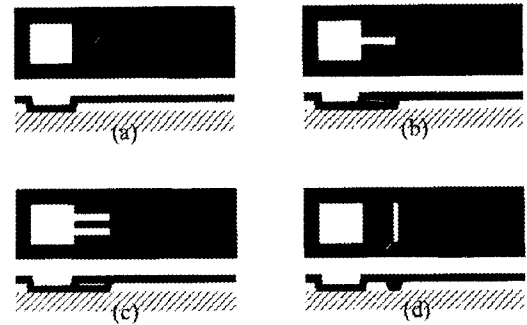


Fig. 2 Various support designs

(a)는 기존의 Step-Up 구조를 갖는 다층박막 초소형 박막 외팔보의 지지구조 형태이고, 나머지 (b)~(d)는 새로 제시된 지지구조 형태를 가지는 초소형 박막 외팔보를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 (b)~(d) 구조는 기존의 지지구조 형태에 추가 지지구조를 형성하도록 디자인되어 있는데, 이러한 지지구조를 가지는 초소형 외팔보를 제작하기 위해서 제조공정의 변화나 추가 공정 단계를 거치지 않고, 단순히 회생층의 마스크(Mask) 패턴 디자인만을 바꾸어 제조하면 된다.

2.2 3차원 유한요소 모델 및 해석

4가지 모양의 서로 다른 지지구조 형태를 가진 Step-Up 구조의 초소형 박막 외팔보를 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 본 연구에서 제안된 4가지 모양의 서로 다른 모델은 길이방향을 기준으로 좌우 대칭 형태이므로 요소수를 줄이고, 모델을 단순화시키기 위하여 1/2 모델링으로 2개의 층을 가지는 3차원 솔리드 모델링이 가능하였다. 외팔보의 Step-up 바닥면의 경계조건은 X, Y, Z 방향의 변위와 회전을 0으로 제한하였다. 또한, 1/2 절단면의 기준축에 대한 대칭조건으로 Y 방향으로 변위를 0으로 하였다. 모델에 적용된 물성치는 Blister Test 법⁽¹¹⁾에 의해 측정된 물성치를 사용했다. 두께 층 각각의 지지구조의 Step-Up부에 온도차를 발생시켜 초기변형을 발생시켜, 유한요소 해석방법을 이용해서 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 제안된 모델의 치수를 나타낸다.

3. 실험

3.1 다층박막 초소형 구동소자의 제작

Step-Up 구조의 초소형 다층박막 외팔보를 새로운 제조 공정을 추가하지 않고, 단지 희생층의 마스크(masking)를 여러 가지 형상으로 제작하였다. 먼저, PSG(Phosphosilicate Glass)를 증착하고, 그 위에 LPCVD(Low pressure chemical vapor deposition) 방법으로 식각방지막(Etch stop layer)으로 불산(HF)에 강한 폴리실리콘(Poly-Si) 희생층을 형성하고, 외팔보의 Step-Up 부분을 형성하게 하기 위해서 패터닝(Patterning) 공정에서 형상이 서로 다른 마스크(Mask)를 사용하여 식각 함으로써 서로 다른 구조의 지지구조 형상을 구현하였다. 패터닝 작업이 끝나면 사진식각 작업을 통해 지지부분(Anchor)의 희생층을 제거하였다. 그 위에 질화실리콘(SiNx)으로 만들어진 지지층을 증착해서 형성하고, 하부전극인 백금막(Pt), 압전 박막 재료인 PZT를 Sol-Gel 방법을 사용하여 형성하였다. 그리고, 상부 전극은 압전 박막에 하부 전극과 더불어 전계를 형성하기 위한 것으로 백금(Pt)을 순차적으로 형성한다. 순차적 증착에 의해 구동소자를 구성하는 박막을 증착한 후, 드라이 에칭을 통해 식각 한다. 액추에이터 부분을 가공한 후에 신호전압을 인가하기 위한 통로를 액티브 매트릭스의 드레인(Drain) 패드와 하부전극 사이에 가공한 후, 희생층(sacrificial layer)을 제거한다. Fig. 5는 본 연구에서 제작한 Step-up 구조의 SEM 사진이다.

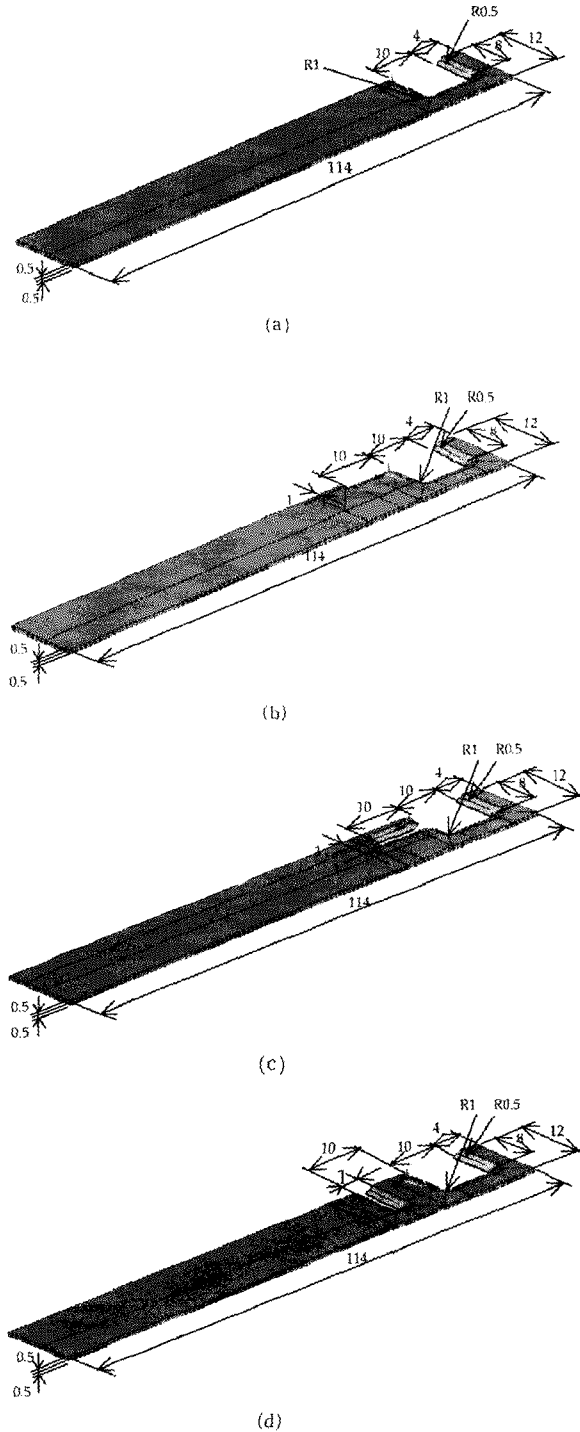


Fig. 3 Modeling of suggested designs for FE analysis. Unit of the dimension is μm

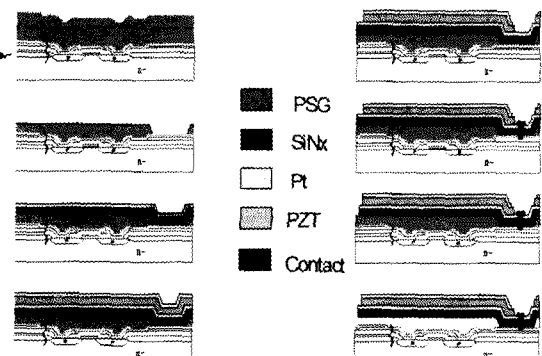


Fig. 4 Fabrication process for the present cantilever beam with step-up structure

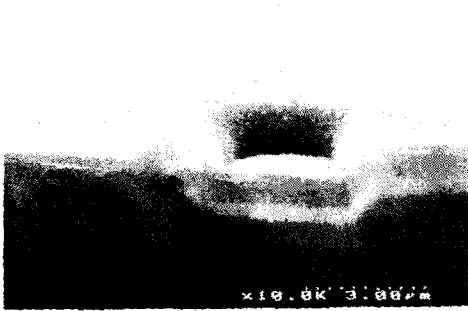


Fig. 5 SEM image of the present step-up structure

Table 1 Comparison of simulation and experimental results

	Anchor type	FEM (μm)	Experiment (μm)
Conventional Type	(a)	9.911	9.3
Proposed Types	(b)	3.285	5.0
	(c)	5.919	6.4
	(d)	8.971	8.5

3.2 실험결과 및 측정

위 제조 공정을 통해서 제작된 4가지 모양의 서로 다른 지지구조 형태의 박막 외팔보에 대한 외팔보 끝단에서의 초기 굽힘변형량을 미소변위 측정장비인 UBR 202/204를 사용하여 측정하였다.

3.3 해석결과와 실험결과의 비교

Table 1과 Fig. 6은 해석을 통해 구한 초기 굽힘 변형량과 시편을 제작해서 측정한 변형량을 비교해서 나타낸 것이다.

유한요소법을 이용해서 해석한 결과와 시편을 제작해서 실험을 통해 측정한 결과치가 일치된 경향을 보임을 알 수 있다. (b), (c) 그리고 (d) 형태의 박막 외팔보 모두는 기존의 지지구조의 박막 외팔보 (a)의 경우보다 외팔보 끝단에서의 초기 굽힘변형량이 작게 나타났다. 그 중에서도 (b) 형태의 지지구조를 가지는 Step-Up 구조의 초소형 박막 외팔보의 경우 외팔보 끝단에서의 초기 굽힘변형량이 가장 작게 나타났다.

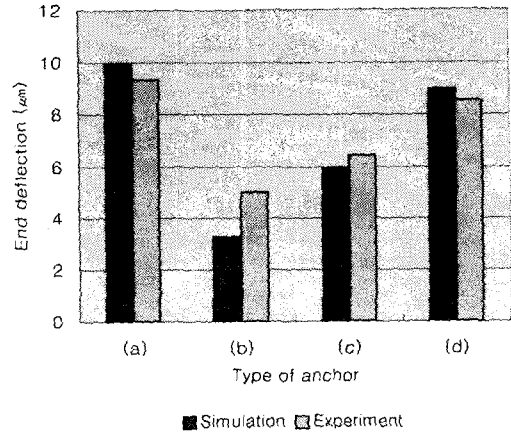


Fig. 6 Comparison of simulation with experiment for initial end deflections

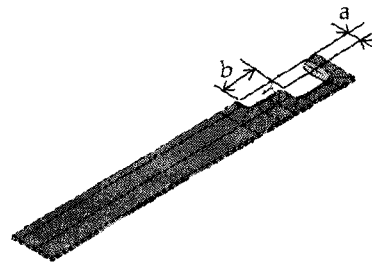


Fig. 7 Design for ratio a/b

Table 2 Correlation of end deflections with the ratio of a/b

a(μm)	b(μm)	ratio a/b	End deflection(μm)
2	10	0.2	3.285
3	10	0.3	3.792
5	10	0.5	4.649
6	10	0.6	5.028
8	10	0.8	5.756
10	10	1.0	6.510

3.4 가로-세로 비와 변형량과의 관계

새로 추가된 지지구조의 가로-세로 비에 따른 Step-Up 구조의 초소형 다층박막 외팔보 끝단에서의 초기 굽힘변형량과의 관계를 고찰하였다.

Fig. 7과 같이 유한요소 해석과 실험 결과에서 외팔보 끝단에서의 초기 굽힘변형량이 가장 작게 나타났던 (b) 모델링의 추가 지지구조의 세로치수

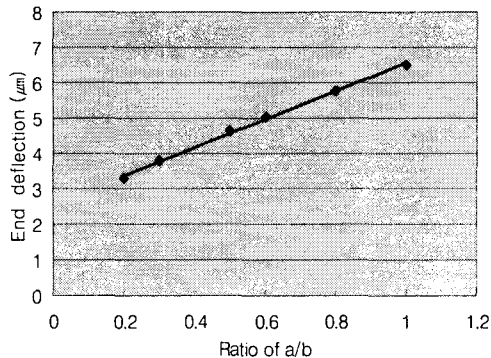


Fig. 8 Correlation of end deflections with the ratio of dimensions a/b

b 값 10을 고정시키고, 가로치수 a 값을 점차 증가시키면서, 끝단에서의 초기 변형량이 어떻게 변화하는지를 유한요소 해석을 통해 분석하였다. Table 2와 Fig. 8에서 보듯이 Step-Up 구조의 초소형 다층박막 외팔보의 추가 지지구조의 가로-세로비가 증가할수록 외팔보 끝단에서의 초기 굽힘변형량이 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 추가 지지구조에서 가로-세로비가 작아지도록 추가 지지구조를 디자인함으로써 초소형 박막 외팔보의 초기 굽힘변형량을 현저하게 감소시킬 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Surface Micromachining의 대표적인 구조인 Step-Up 구조의 초소형 다층박막 외팔보 구조물의 지지구조에 발생하는 초기 굽힘변형을 최소화시키기 위한 지지구조 선정에 대한 방법론을 제시하였다.

여러 형태의 추가 지지구조를 가지는 박막 외팔보를 모델링하고, 이를 통하여 초기변형량을 감소시킬 수 있는 구조를 제안하였다. 본 연구에서 제안된 디자인을 검증하기 위해 다층박막 초소형 구동소자를 제작하고, 각각에 대해 변형실험을 수행하고 초기 굽힘 변형을 측정하였다. 측정 결과 본 연구에서 제안된 구조가 타당함을 확인하였다.

또한, 이러한 결과들을 통하여 최종적으로 제안된 Step-Up 구조의 초소형 박막 외팔보의 추가

지지구조 형상의 가로-세로 비가 작게 되도록 디자인하는 것이 박막 외팔보 끝단에서의 초기 굽힘변형량을 크게 감소시킬 수 있음을 보였다. 그러나 본 연구에서 제안된 지지구조의 가로방향을 고정하였을 경우 가로-세로 비를 감소시키기 위해 세로방향 치수를 과도하게 증가시킬 경우 구동성능을 저하시킬 수 있으므로 이에 관련된 실험적 고찰이 필요하리라 사료된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단지정 정보저장기기연구센터의 지원 (과제번호: 2001G0203)으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Kim, C. J., 1993, "Micromachining Technologies of MEMS," *Transactions of the KSME*, pp. 499~514.
- (2) Kim, Y. K., Bae, J. M., Son, S. Y., Choi, J. H. and Kim, S. G., 1999, "High speed Atomic Force Microscope Cantilevers with Built-in Piezoelectric Actuator," *MOEMS*.
- (3) Ju, S. B., Yong, Y. J. and Kim, S. G., 1999, "Design and Fabrication of a High Fill-Factor Micro-Bolometer Using Double Sacrificial Layers," *SPIE*.
- (4) Ju, S. B., Jung, S. H., Kim, D. K., 1997, "Optimization of cantilever manufactured by a thin film process," *Transactions of the KSME*, Vol. 37, No. 9, pp. 38~42.
- (5) Cho, Y. H. and Kim, M. J., 1999, "Residual Stress and Thickness Control of Piezoelectric Multi-Layer Cantilever Microactuators for Initial Deflection Minimization," *Proc. Symposium on Micromechanical Systems, Inter. Mechanical Engineering Congress and Exposition, ASME*, Livermore, California, U.S.A., pp. 101~103.
- (6) Cho, Y. H. and Kim, M. J., 1999, "Design, Fabrication and Characterization of Piezoelectric Multi-Layer Cantilever Microactuators for the Minimum Initial Deflection," *Proc. 10th Int. Conf.*

- Solid-State Sensors and Actuators*, Sendai, Japan, pp. 1758~1761.
- (7) Ngo, L. V., Nelson, P. R. and Kim, C. J., 1996, "Surface-Micromachined Beams Without Spring Effect of Anchor Step-Up," *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, SC, Tech. Dig., June.
- (8) Hwang, K. H., Choi, Y. J., Min, Y. K., Bae, J. M. and Kim, S. G., 1997, "Micromachined Thin-Film Mirror Array for Reflective Light Modulation," *Annals of the CIRP* Vol. 46, No. 1, pp. 455~458.
- (9) Hwang, K. H., Choi, Y. J., Min, Y. K., Bae, J. M. and Kim, S. G., 1997, "Effect of Anchor Design on the Deflection of Micromachined Cantilever Beams," *Proc. of International Conf. on Micromechatronics for Information and Precision Equipment*, Tokyo, pp. 763~766.
- (10) Lober, T. A., Huang, J., Schmidt, M. A. and Senturia, S. D., 1988, "Characterization of the Mechanisms Producing Bending Moments in Polysilicon Micro-Cantilever Beams by Interferometric Deflection Measurements," *IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, SC, Tech. Dig., pp. 92~95.
- (11) Tabata, O. and Kawahata, K., 1989, "Mechanical Property Measurements of Thin Films using Load-deflection of Composite Rectangular Membrane," *IEEE MEMS*, Salt Lake City, pp. 152~156.