

# 표면미세가공시 발생하는 MEMS 구조물의 변형 억제

홍석관<sup>#</sup>, 권순철<sup>\*</sup>, 전병희<sup>\*\*</sup>, 신현재<sup>\*</sup>

## Alleviating Deformation of MEMS Structure in Surface Micromachining

Seok Kwan Hong<sup>#</sup>, Soon Cheol Kweon<sup>\*</sup>, Byung Hee Jeon<sup>\*\*</sup> and Hyung Jae Shin<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

By removing sacrificial layer through ashing process, movable MEMS structure on substrate can be fabricated in surface micromachining. However, MEMS structure includes, during the ashing process, the warping or buckling effects due to stress gradient along the vertical direction of thin film. In this study, we presented method for counteracting the unwanted deflection of MEMS structure and designed using character of deposit process to overcome limited design conditions. Unit cell patterns were designed with character of deposit shape, and their final shapes were adopted using Finite Element Method. Finally, RF MEMS switch was fabricated by surface micromachining as test vehicles. We checked out that alleviation effect for deformation of switch improved by 35%.

**Key Words :** MEMS(마이크로 전기 기계 시스템), RF Switch(알에프 스위치), Surface Micromachining(표면미세가공), Residual Stress(잔류응력), Finite element Method(유한요소법)

### 1. 서론

마이크로 전자공학(microelectronics)에서 가장 급성장하는 분야인 마이크로 전자 기계 시스템(Micro Electro Mechanical Systems : MEMS)은 반도체 공정을 응용한 제작기술들을 이용하여 가공되어 진다. 이들 제작기술의 종류로는 표면 미세가공기술(surface micromachining)과 몸체 미세가공기술(bulk micromachining), LIGA 기술(Lithographie, Galvanoformung, Abformung), 레이저 미세가공(laser micromachining) 등을 들 수 있다.<sup>1</sup>

이중에서 표면미세가공은 에싱(ashing)공정을 통

해 희생층(sacrificial layer)을 제거함으로써 기판 위에 기계적으로 움직이는 구조를 비교적 쉽게 만들 수 있는 제작 기술이다.<sup>2</sup>

그러나 표면 미세가공 기술은 공정 후에 잔류응력(residual stress)이 발생하여 구조물의 형상을 변형시키는 문제점이 있다. 이러한 잔류응력이 발생하는 원인은 Fig. 1에 나타내었듯이, 외부적인 요인으로는 두 가지 이상의 적층된 소재의 열팽창계수의 차이로 인한 원인과 내부적인 요인으로는 결정격자 경계의 불일치, 불순물 등의 원인으로 보고되고 있다.<sup>3</sup>

이러한 구조물의 원하지 않는 변형의 문제를

☞ 접수일: 2005년 2월 1일; 게재승인일: 2006년 6월 16일

# 교신저자: 한국생산기술연구원, 정밀금형팀

E-mail [skhong@kitech.re.kr](mailto:skhong@kitech.re.kr) Tel. (032) 234-0614

\* 삼성종합기술원, MEMS Lab

\*\* 인덕대학 컴퓨터응용설계학과

해결할 수 있는 방법으로 소재 및 공정변수를 조절하여 잔류응력 발생을 줄이는 방법<sup>4</sup>이 사용되고 있다. 그러나 이와 같은 방법은 마이크로 전자 기계 시스템이 반도체와 직접화를 지향하는 상황에서 그 제작방식에 많은 한계를 지닌다. 즉, 생산 효율이나 공정상 제한적인 문제로 인하여 구조물의 변형을 기대치만큼 억제하는 효과를 기대할 수 없다. 특히, 재료특성에 크게 의존하는 경향이 있어 공정변수 제어가 어려운 점도 있다.<sup>5</sup>

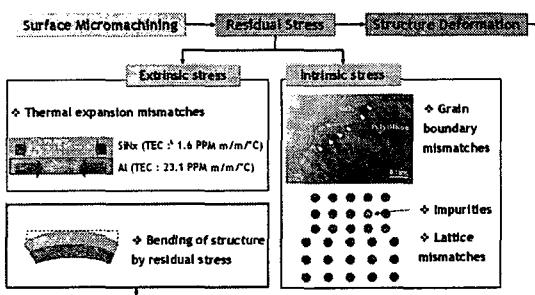


Fig. 1 Cause and effect of residual stress

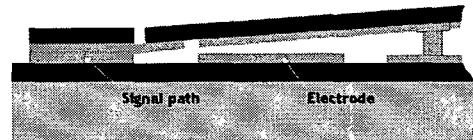
따라서 본 연구에서는 소재나 공정상의 조건은 변경하지 않고 단지 구조물의 형상만을 변경하여 구조물의 변형을 억제하는 방법을 제시하였다. 또한, 구조물의 형상을 변경할 수 있는 설계 변수 중 두께에 대한 설계가 공정에 종속적인 경향이 있어 기계적인 설계방법에서 자유롭지 못하였다. 이와 같은 제한적 설계조건을 극복하기 위해 적층 공정의 특성을 이용하여 설계하였다.

## 2. 잔류응력의 측정 및 해석 모델

본 연구에 적용된 시소형 RF MEMS 스위치의 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 스위치 구조물이 이종 재료(SiNx/Al)로 구성되어 있는 것을 볼 수 있으며, 평상시에는 구조물 아래 기판과 일정한 간극(air gap)을 유지하는 것이 스위치의 기능상 중요한 역할임을 알 수 있다.<sup>6</sup> 그러나 본 스위치를 표면 미세가공을 통해 제작하게 되면 Fig. 3에 보이듯이 원하지 않는 변형이 발생한다. 이는 증착된 막의 두께 방향에 대한 잔류응력구배(stress gradient)로 설명할 수 있다.<sup>7</sup>



a) OFF state with air gap



b) ON state with metal-to-metal ohmic contact

Fig. 2 Cross-section view of RF MEMS Switch

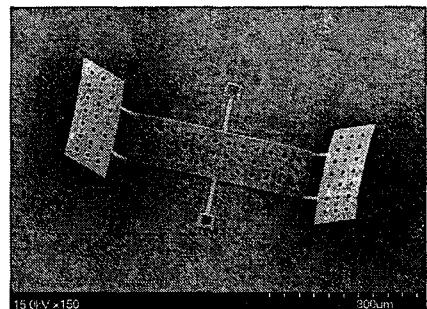


Fig. 3 SEM image of deformed structure by residual stresses

잔류응력 측정용 시편의 제작은 Fig. 4-a 와 같이 길이가 다양한 단순보(cantilever beam)형상을 적층한 후 하부에 사용한 회생총을 에싱(ashing) 공정을 통해 제거하여 부유된 시편을 확보한다. 이 때 시편은 휨 변형을 일으킨다. 이렇게 변형된 시편으로부터 비 접촉식 광학 단차 측정기(Optical profiler)를 이용하면 곡률반경을 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 측정한 결과를 살펴보면, SiNx 소재로 이루어진 시편 (Fig. 4-b)은 끝단이 위쪽으로 향하는 휨 변형이 발생하였고, Al(Fig. 4-c)과 SiNx 와 Al의 이종 복합재로 적층된 시편(Fig. 4-d)은 모두 끝단이 아래로 향하는 휨 변형이 발생하였다. 또한, 이로부터 곡률반경을 측정한 결과를 Table 1에 명시하였다.

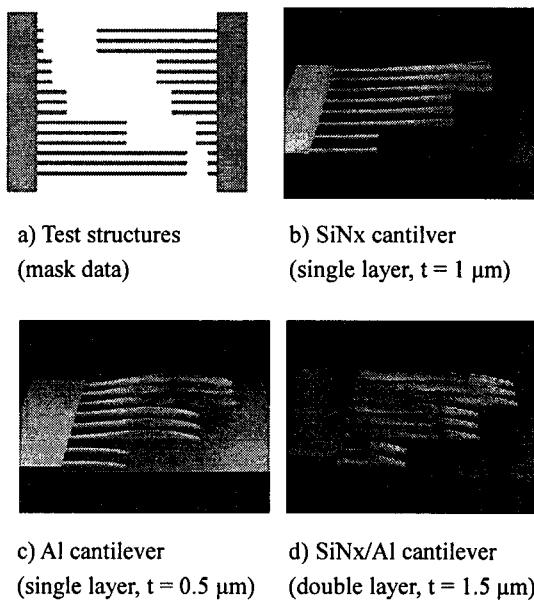


Fig. 4 Optical profile of cantilever specimens

Table 1 Measurement of curvature

	Mode	Thickness ( $\mu\text{m}$ )	Radius of Curvature (mm)
Single Layer	SiNx	1.0	3.80
	Al	0.5	-0.143
Double Layer	SiNx/Al	1.0/0.5	-1.23

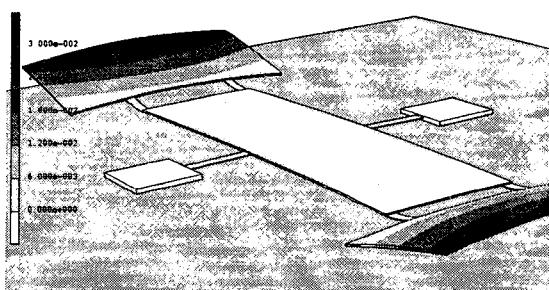


Fig. 5 Simulated shape of RF MEMS Switch under stress gradient

상기의 실험으로 구한 곡률반경과 잔류 응력의 상관 관계를 규명하기 위해 검증된 방법<sup>8-10</sup>을 참고하여 해석 모델을 구성하였다.

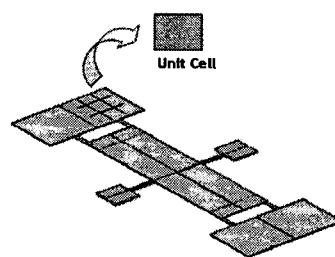
이와 같은 해석 모델의 타당성을 검증하기 위

하여 Fig. 5에 보이는 바와 같이 RF MEMS 스위치 구조물에 해석 모델로부터 산출된 잔류응력을 초기 조건으로 적용하여 휨 변형을 예측하였다. 실제 구조물에 발생한 현상(Fig. 3)과 흡사하게 과도한 휨 변형으로 스위칭 패드가 바닥면과 접촉하여 들려 올라간 것을 볼 수 있다.

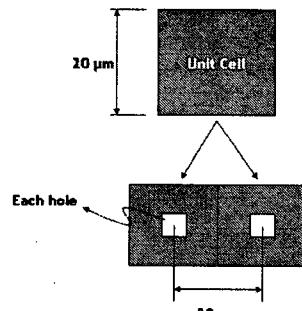
### 3. 변형 억제를 위한 설계

#### 3.1 단위 셀의 도입

모델의 외형을 크게 변경하지 않고 독립적인 설계 변경을 하기 위해서 Fig. 6-a에서 보이듯이 전체 구조물을 단위 셀(unit cell)들의 집합으로 가정하였다. 따라서 단위 셀을 대상으로 휨 변형이 적은 형상으로 설계하여 최종적으로 설계된 단위 셀들을 다시 전체 모델에 조합하는 방법으로 구조물 변형억제에 대한 방안을 제시하였다.



(a) Division of MEMS structure into unit cell



(b) Unit cell Dimension along design rule

Fig. 6 Introduction of unit cell

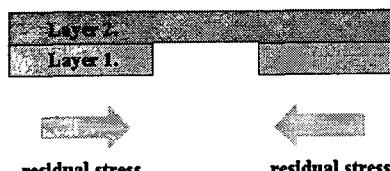
이는 구조물 설계인자와 독립적인 최적화를 통해 구동기 설계자에게 최대한 자유도를 제공할

수 있도록 하기 위해서이다. 단위 셀의 크기와 에성 홀의 크기 및 간격은 디자인룰(Design-Rule)을 고려하여 Fig. 6-b에 표시한 치수와 같이 결정하였다.

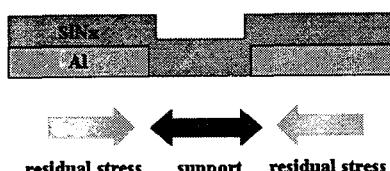
### 3.2 증착 현상을 이용한 설계 기준 정의

표면 미세 가공은 몸체 미세 가공과는 달리 구조물을 제작할 때 증착 장비를 이용하여 재료를 순차적으로 쌓아 올리는 방법으로 가공한다.

Fig. 7-a와 같이 두 층의 판형 구조를 접합해서 구조물을 제작 할 경우 제작 후 각층의 원형이 유지되어 지는 것과 달리 Fig. 7-b와 같이 빈 공간을 갖는 하부층 위로 적층(deposit)을 하게 되면 하부의 빈 공간을 메우게 되는데 이때 매워진 재료가 휨 모멘트에 대한 저항력을 증가시켜 주는 역할을 하게 된다. 따라서 이와 같은 원리를 이용하면 효과적으로 구조물의 변형을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) General composition bonding



(b) Deposition process

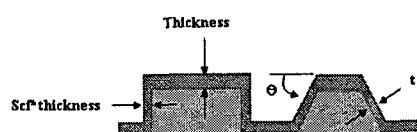
Fig. 7 Alleviation effect of deposit shape

이와 같은 증착 형상을 구체적으로 모델링하기 위해 증착 공정의 종류를 살펴보면 CVD 법(chemical Vapor deposition)과 PVD 법(Physical Vapor Deposition)이 있으며, PVD 법은 전자빔 증착법(e-beam evaporation)과 스퍼터링(sputtering) 증착법으로 다시 나누어 진다.<sup>11</sup> 이러한 증착 공정은 대부분 하부 층 단차에 특정한 형태로 증착이 되는데 그 형태별로 Fig. 8과 같이 콘포말(conformal)형태와 스노우풀(snowfall) 형태 그리고 필(fill) 형태로 나눌 수

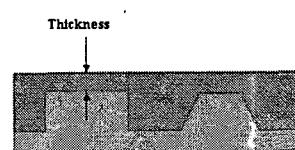
있다. 본 연구에서는 가장 일반적인 콘포말 증착 형태를 선택하였으며, 외벽의 두께( $Scf^*Thickness$ )는 식 (1)에 의해 산출하였다.<sup>12</sup>

$$t = Thickness \sqrt{\cos^2(\theta) + Scf^2 \sin^2(\theta)} \quad (1)$$

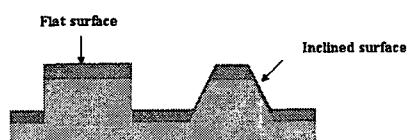
여기서,  $Scf$  (sidewall coverage factor)는 0 ~ 1 사이의 값으로 콘포말 증착 형태로는 0.5에 해당한다. 따라서 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 증을 1μm 증착할 경우 외벽의 두께는 증착 두께의 50%이므로 0.5μm으로 산정된다.



(a) Conformal type



(b) Snowfall type



(c) Fill type

Fig. 8 Three types of deposit process

### 3.3 증착 구조의 설계

상기와 같은 콘포말 증착 방식을 기준으로 Fig 9와 같이 세가지 구조물 형상의 휨 변형량을 비교하기 위하여 유한 요소 모델을 만들고 응력 기울기 모델을 적용하여 해석을 수행하였다. 그 결과를 살펴보면, Fig. 10에 보이는 바와 같이 embedded 형태(Type B)의 경우 x-방향에 따른 처짐량이 다른 증착 형태보다 확연하게 적은 것을 볼 수 있다. 또한, 중심부의 기울기가 수평을 유지하려는 경향을 보이는데 이는 본 변형억제 방법의

효과를 잘 나타내고 있다.

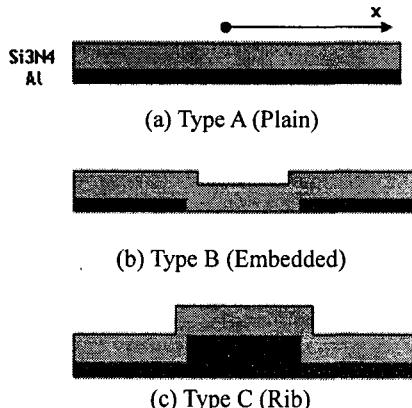


Fig. 9 Three types of deposit structure

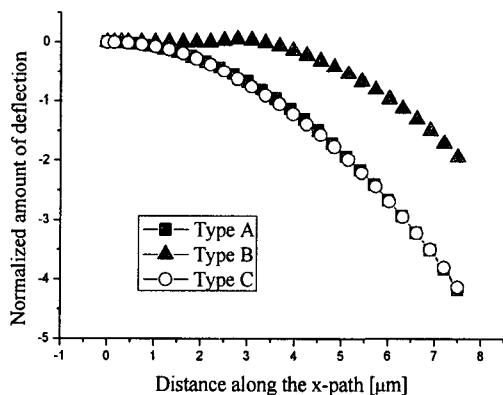


Fig. 10 Deflection of deposit structures

### 3.4 증착 구조를 이용한 단위 셀 설계

마지막으로 단위 셀의 하부 층(Al layer)을 Fig. 11에 나타낸 바와 같이 다양한 무늬(pattern)를 갖는 마스크 층(mask layer)을 이용하여 식각하고 상부 층(Si3N4)을 적층하면 하부 층의 빈 공간이 메워지면서 embedded 형태(Fig. 9)로 증착된다. 이와 같이 증착된 다양한 무늬가 힘 변형 억제에 미치는 영향을 알아 보기 위하여 마찬가지로 잔류응력 모델을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 12는 해석 결과를 보여 주고 있는데 어떤 무늬이든지 무늬가 없는 단위 셀(pattern A)보다 처짐이 적게 발생한 것을 알 수 있다. 이는 상부 층과 하부 층이

공유하는 면적과 관계가 있으며, 무늬 B, C, D 모두 무늬 A 보다 공유하는 면적이 적다. 따라서 이 결과로 본다면 하부 층 무늬의 크기를 크게 구현할 수록 좋은 결과를 얻을 수 있을 것은 자명하다. 하지만 하부 층 무늬를 크게 하여 남아 있는 면적을 줄이게 되면 하부 층이 전송 선로의 접촉부 역할을 할 경우 RF 신호 전달 효율이 낮아지는 문제가 발생하며, RF 스위치의 전극부 역할을 할 경우에는 전극의 면적이 줄어서 구동전압이 상승하는 역 효과가 발생하므로 단순히 고유면적을 줄이는 방법은 옳지 못하다.<sup>13</sup>

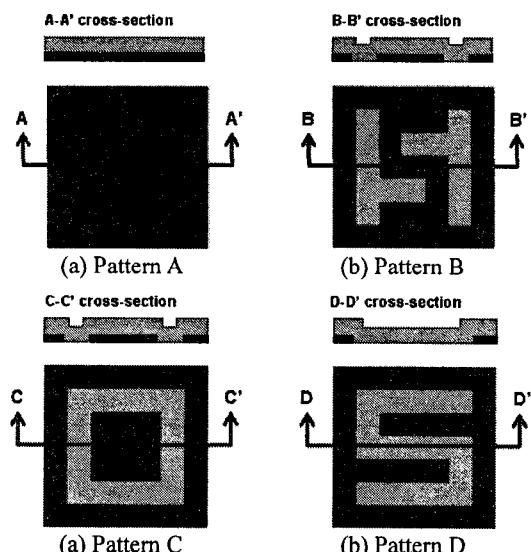


Fig. 11 Variable patterns of unit cell

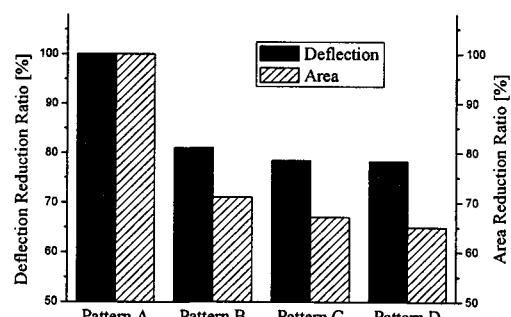


Fig. 12 Deflection and area reduction ratio of variable patterns

한편, 무늬 C 와 D 를 비교하여 보았을 때 하

부총의 면적이 줄어듦에도 불구하고 처짐량의 차이가 미미하다는 것을 알 수 있는데 이와 같은 이유는 무늬의 기하학적 형상도 휨 모멘트의 저항력에 영향을 미치기 때문이다. 따라서 처짐량이 가장 적은 무늬 C 와 D 중 면적이 보다 더 확보된 무늬 C 가 가장 효과적인 단위 셀의 구조로 적합하다 할 수 있다.

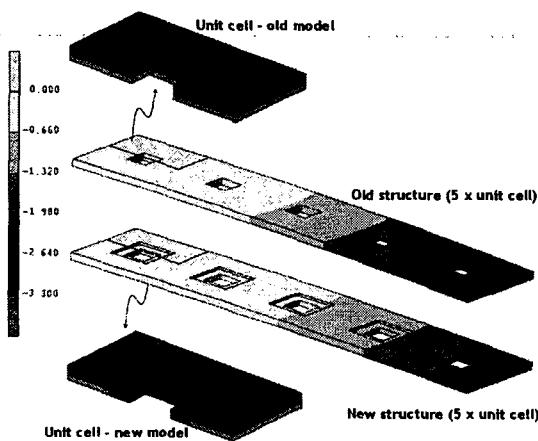


Fig. 13 Simulated shape of new concept structure and old structure

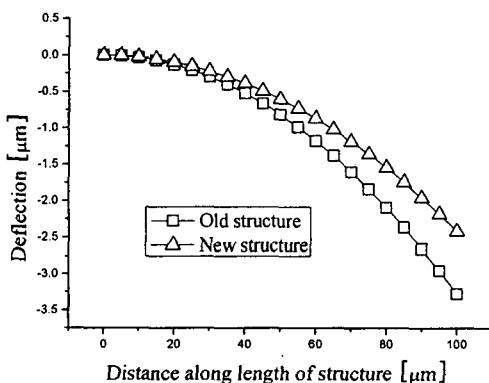


Fig. 14 Deflection of new concept structure and old structure

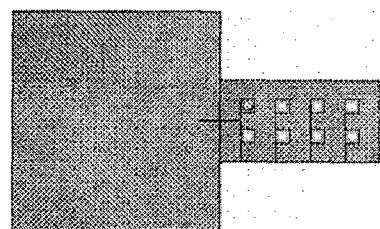
지금까지 단위 셀의 구조를 설계하기 위하여 여러가지 요소들을 평가하였고, 최종적으로 설계된 단위 셀의 효과를 해석적으로 평가하기 위하여 Fig. 13 과 같이 스위치 구조물의 길이와 유사하도록 5 개의 단위 셀을 일렬로 병합하여 잔류응력 모델을

적용하여 해석을 수행하였다. 또한, 실제 공정 모델을 모사하기 위하여 에쉬 홀(ash hole)도 추가하였다. 그 결과 새로 고안된 단위 셀을 사용한 모델(new structure)이 사용하지 않은 모델(old structure)보다 약 26% 개선 된 것을 Fig. 14에서 확인 할 수 있다.

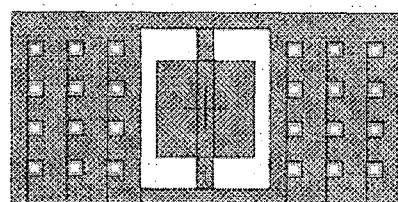
#### 4. 개선된 형상의 실험적 검증

##### 4.1 검증용 시편 제작

새로 고안된 단위 셀을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 15 에 보이는 바와 같이 단순 보 형태와 시소형태로 시편을 제작하고 새로 고안된 단위 셀을 각각의 구조물에 적용하기 전과 후를 비교하였다. 이와 같이 시편을 두 가지 형태로 제작한 이유는 단순보(Fig. 15-a)의 경우에는 고정단의 초기 변형으로 인해 측정의 오차가 크게 나타날 수 있기 때문이다. 따라서 초기 변형량이 비교적 발생하지 않는 자유 양단을 가진 시소형 스위치 구조물(Fig. 15-b)도 포함 시켜 실험을 실시하였다.



(a) Cantilever structure (length 115  $\mu\text{m}$ )

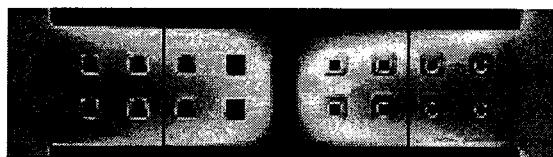


(b) Seesaw structure  
Fig. 15 Specimens to verify

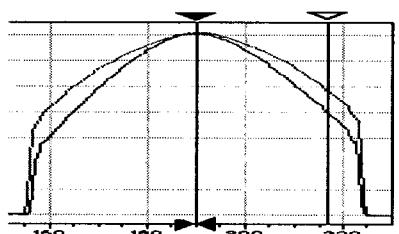
##### 4.2 실험 결과

실험 결과를 살펴보면 해석상의 결과인 26%의 개선 효과와 비교하여 단순 보형 구조 (Cantilever

structure)에서 19%, 시소형 구조 (Seesaw structure)에서 35%의 휨 변형 억제 효과가 있었다.

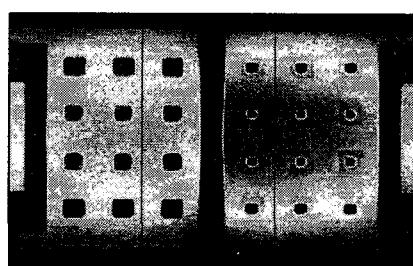


(a) New structure      (b) Old structure

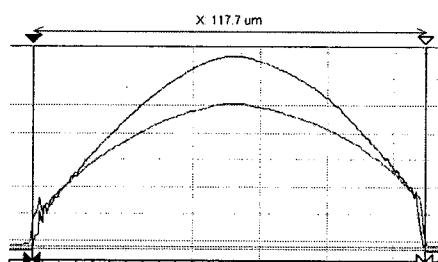


(c) Profile of cantilever test structure

Fig. 16 Experimental result of cantilever structure



(a) New structure      (b) Old structure



(c) Profile of seesaw test structure

Fig. 17 Experimental result of seesaw structure

이와 같은 차이는 Fig. 16과 같이 단순보의 경우 길이방향으로 주 변형이 발생하였으나 측정은 그 수직방향으로 실시 되었고, 시소형 구조물의 경우 Fig. 17와 같이 길이에 비해 측정(붉은 실선)한 폭 방향으로 주 변형이 발생하기 때문이다. 따라서 가로 세로 비가 일정한 단위 셀에 비해 평면 구조물의 폭과 길이의 비에 따라 효과의 차이가 나타난 것으로 단순한 변형억제 측면에서 단위 셀의 도입은 뚜렷한 개선 효과를 확인 할 수 있었다.

## 5. 결론

표면미세가공시 불가피하게 발생하는 잔류응력은 MEMS 구조물의 변형을 일으키는 주된 요인이다. 이와 같이 원하지 않는 변형을 억제시키기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 변형억제 방안을 제시하였다.

(1) 실제 구조물에 사용되는 것과 동일한 소재를 이용하여 측정용 시편을 제작하고 이로부터 휨 변형량을 측정하여 해석모델에 사용하였다.

(2) 다층 구조물의 증착 시 하부 층의 빈 공간이 일정한 형태로 메워지는 현상을 이용하여 적층 구조를 설계하였다.

(3) 적층 구조를 이용하여 단위 셀의 무늬를 설계하였다.

(4) 새로 고안된 단위 셀을 스위치 구조물에 적용하여 테스트한 결과 35%의 개선 효과를 얻을 수 있었다.

## 후기

본 연구는 삼성전자㈜종합기술원과의 “RF Switch 용 MEMS Actuator Design 최적화에 관한 연구개발” 과제의 일환으로 수행되어진 것으로 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Marc, J. M., “Fundamentals of Micro Fabrications,” The Science of Miniaturization, pp. 262-264, 2001.
2. Peroulis, D., Pacheco, S. and Katehi, L. P. B., “MEMS Devices for High Isolation Switching and

- Tunable Filtering," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, pp. 1217-1220, 2000.
3. Baek, C. W., Kim, Y. K., Cho, C. H. and Ahn, Y. M., "Residual Stress Measurement of Micro Gold Electroplated Structure," International Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 72-77, 2002.
4. Yee, Y. J., Park, M. G and Chun, K. J., "A Sticking Model of Suspended Polysilicon Microstructure Including Residual Stress Gradient and Postrelease Temperature," Journal of Semiconductor Technology and Science, Vol. 7, pp. 339-344, 1998.
5. Woloszyn, J., "A Method for Controlling Residual Film Stress in LPCVD Polysilicon Films for Surface Micromachined MEMS," IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, pp. 399-403, 2004.
6. Schauwecker, B., Strohm, K. M., Simon, W., Mehner, J. and Luy, J. F., "A New Type of High Bandwidth RF MEMS Switch-Toggle Switch," Journal of Semiconductor Technology and Science, Vol. 2, pp. 237-245, 2002.
7. Shim, J. J., Kim, T. H., Ahn, S. C., Han, D. S. and Lee, S. W., "Evaluation of the Residual Stress on the Multi-Layer Thin Film made of Different Materials," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 9, pp. 135-141, 2003.
8. Lee, C. S., Lee, J. H., Choi, C. A., No, K. S. and Wee, D. W., "Effects of Phosphorus on Stress of Multi-Stacked Polysilicon Film and Single Crystalline Silicon," J. of Micromech. Microeng, Vol. 9, pp. 252-263, 1999.
9. Peroulis, D., Pacheco, S. P., Sarabandi, K. and Katehi, L. P. B., "Alleviating the Adverse Effects of Residual Stress in RF MEMS Switches," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, pp. 173-176, 2003.
10. Kim, J. H., Hwang, K. C., Lee, B. W., Kim, J. G., Kim, G. S., Baek, C. W., Kim, Y. K., Kwon, D.G and Kim, Y. H., "Deformation analysis of the surface micromachined MEMS structures due to the plasma ashing process," KSAS Journal, Vol. 31, No. 7, pp. 53-62, 2003.
11. Pacheco, S., Katehi, L. P. B. and Nguyen, CT-C., "Design of Low Actuation Voltage RF MEMS Switch," Microwave Symposium Digest, 2000 IEEE MTT-S. International, pp. 165-168, 2002.
12. Peroulis, D., Pacheco, S. P., Sarabandi, K. and Katehi, L. P. B., "Electromechanical Considerations in Developing Low-voltage RF MEMS Switches," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 51, pp. 259-270, 2003.
13. Kwon, U. H. and Lee, W. J., "Three-Dimensional deposition topography simulation based on new combinations of flux distribution and surface representation algorithms," Thin Solid Films, Vol. 445, p. 80, 2003.