

## 압력센서의 배선을 위한 다층 박막의 지지조건 변화에 따른 잔류응력 평가

심재준\*(동아대학교 대학원 기계공학과), 한근조(동아대학교 기계공학과),  
김태형(경남정보대학 기계자동차산업계열), 한동섭(동아대학교 대학원 기계공학과)

### Evaluation of the Residual Stress with respect to Supporting Type of Multi-layer Thin Film for the Metallization of Pressure Sensor

Shim Jae Joon(Mech. Eng. Dept., DAU), Han Geun Jo(Mech. Eng. Dept., DAU), Kim Tae Hyung(Mech. Eng. Dept., KIT) and Han Dong Seup(Mech. Eng. Dept., DAU)

#### ABSTRACT

MEMS technology with micro scale is complete system utilized as the sensor, micro electro device. The metallization of MEMS is very important to transfer the power operating the sensor and signal induced from sensor part. But in the MEMS structures local stress concentration and deformation is often happened by geometrical shape and different constraint on the metallization. Therefore, this paper studies the effect of supporting type and thickness ratio about thin film thickness of the substrate thickness for the residual stress variation caused by thermal load in the multi-layer thin film.

Specimens were made from materials such as Al, Au and Cu and uniform thermal load was applied, repeatedly. The residual stress was measured by FEA and nano-indentation using AFM. Generally, the specimen made of Al induced the large residual stress and the 1st layer made of Al reduced the residual stress about half percent than 2nd layer. Specimen made of Cu and Au being the lower thermal expansion coefficient induce the minimum residual stress. Similarly the lowest indentation length was measured in the Au\_Cu specimen by nano-indentation.

**Key Words** : MEMS (미세기전시스템), Thin film (박막), Residual stress (잔류응력), Evaporation (증착), Metallization(배선)

#### 1. 서론

MEMS 구조물의 구동을 위해 공급되어야 하는 전력과 센서부에서 발생하는 정보를 전달하기 위한 배선은 필수적인 요소로, 일반적으로 금속재료를 이용하여 박막미세가공을 통해서 제작된다. 이러한 박막미세가공은 모재의 표면에 박막을 적층하고 원하는 형상을 구현하는 방식으로, 집적회로 공정과 유사하나 가공소재 및 재료의 특성 차이와 가공하고자 하는 미세구조물의 기하학적인 형상 차이로 많은 문제점이 야기되고 있다.

특히, 배선의 기하적인 형상과 배선이 가지는 지지조건의 차이로 국부적인 응력집중과 변형으로 인

하여 미세한 배선에서는 stress migration이 발생하거나 재료적인 분체로 electron migration이 발생하여 인하는 수명이전에 파손이 발생하기도 한다. 이러한 문제점은 배선의 폭이나 두께를 증가하여 해결하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 다층박막을 가진 미세구조물에서 발생할 수 있는 다양한 지지조건을 단순한 모델로 구현하고, 각 지지조건에서 다양한 금속재료를 증착시켜 제작된 시험편에 외부 열하중을 부가하여 박막에서 발생하는 잔류 응력을 FEM 해석에서 구하여, 지지조건이 금속박막에 미치는 영향성을 평가하고, 이후 박막의 두께변화가 박막의 잔류응력에 미치는 영향성도 평가하였다. 또한, SPM을 이용한 압입시험

을 통하여 열하중에 의해서 발생하는 잔류응력을 정성적으로 분석하여 해석에서 구한 결과값과 비교함으로써 MEMS 구조물에서 실제 배선 설계시에 적용할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 유한요소해석

### 2.1 유한요소모델 및 재료 물성치

이층박막의 두께 변화에 따른 영향성을 분석하기 위해 우선 두 박막의 두께를 0.2~20  $\mu\text{m}$ 로 동일하게 변화하면서 10개의 모델을 생성하였으며, 이때 기판의 실리콘의 치수는  $10 \times 5 \times 0.5(\text{mm})$ 이다. 또한 다양한 금속재료에 따른 특성에 따른 영향을 분석하기 위해 배선에 대표적으로 사용되는 알루미늄, 구리, 금 등을 사용하여 6가지로 조합하여 해석모델을 분류하였다.

이후 두 층의 박막 중 하나의 박막을 5  $\mu\text{m}$ 로 고정하고, 다른 박막의 두께를 0.2~20  $\mu\text{m}$ 로 변화하면서 10개의 모델로 생성하여, 개개 박막의 두께 변화에 대한 영향성을 평가하고자 하였다. 그리고, 증착에 사용된 금속 재료의 탄성해석을 위한 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다.

유한요소해석은 MEMS 구조물의 응력해석에 범용적으로 사용하고 있는 ANSYS 5.7를 사용하였다. 해석을 위해 8절점 3자유도를 가진 요소를 사용하였으며, 증착되는 각 계면사이에는 완전히 결합된 것으로 가정하여 공유하는 절점을 일치시켰다.

### 2.2 지지조건 및 하중조건

간단한 압력센서를 Fig. 1에 나타내고 있으며, 간단하게 살펴보면, 배선은 압전저항 형태의 센서부에서부터 시작하여 구조물의 외곽부까지 연결되어 있으며, 동일한 두께와 재료를 가지고 제작된다. 박막의 센서부는 기판과 다층박막이 외부하중에 대해 충분히 자유롭게 변형이 가능하도록 하였으며, 또한 구조물의 외곽부는 밑부분이 완전히 고정되어 외부하중에 대해 기판과 다층박막의 움직임을 제한하게 된다. 그러므로 MEMS 구조물의 구동과 신호전달을 위한 배선의 지지조건 변화에 따른 다층박막에서 발생하는 응력변화를 고찰하기 위해 모델을 Fig. 2(a), (b)에서처럼 두 가지로 단순화하여, 지지조건은 일단 고정지지와 밑단 고정지지로 분류하여, 지지조건에 따른 이층박막의 응력특성을 분석하고자 하였다.

또한, 미세 구조물은 펌핑기에 의해 외부와의 단절되어 측정되는 압력이외에 다른 임의적인 하중은 발생하지 않으나, 사용되는 환경에 따라 미세 구조물에 열이 전달되거나 구조물 내부에서 열이 발생될 수 있으며, 이러한 열은 기판과 금속박막의 열팽창 계수의 차이로 인해 상당히 큰 열하중으로 구조물에

부가되어 금속재료로 제작되는 배선과 기판사이에서 큰 응력이 발생하므로 잔류응력을 구하기 위해서 재료 비선형을 고려한 탄소성해석을 수행하였다. 그리고, 하중은 외부하중을 제외하고, 순수하게 100 $^{\circ}\text{C}$  열하중만을 부가하였다.

Table 1 The mechanical properties of each material

	E	poisson's ratio	CTE at 20 $^{\circ}\text{C}$
Si	190GPa	0.202	$2.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Al	70GPa	0.35	$23.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Cu	130GPa	0.34	$16.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Au	78GPa	0.44	$14.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

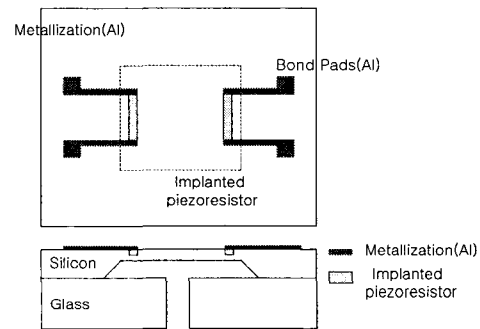


Fig. 1 Schematic shape of simple pressure sensor with piezoresistor

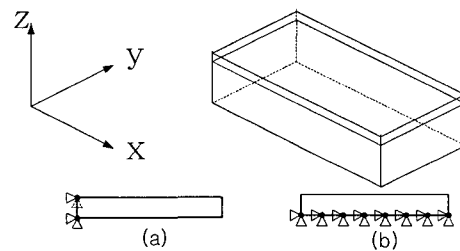


Fig. 2 Fabricated specimens shape according to each supporting type

## 3. 압입시험

n-type 실리콘 기판을 해석모델과 동일하게 자른 다음, basket 방식을 채택한 Jeol 사의 JEE-400을 사용하여 증착을 수행하였으며, 재료마다 각각의 basket를 사용하여 오염을 최소화하였다. 각 박막의 두께를 측정하기 위해 두께 측정용 시험편을 증착할 때마다 제작하여 KLA-TENCOR사의  $\alpha$ -step(AS 500)를 사용하여 박막의 두께를 측정하고, Table 2에 나

타내었다. 모든 조건에 대해 시험편을 제작하기보다는, 유한요소해석에서 구해진 각 지지조건과 두께비의 결과값에 따라 발생한 잔류응력값을 비교하여 측정할 수 있는 모델을 선정하여, 그 조건에 따라 시험편을 제작하여 압입시험을 수행하였다. 시험편은 각 조건에 대해 6개를 제작하여 평균값으로 결과를 도출하였다.

제작된 시험편은 Al-Cu, Au-Cu로 2가지로 분류하였으며, 각각 시험편에 대해 3×6개를 만들어 압입시험을 수행하였다. 지지조건을 구현하기 위해, 고정지그에 2-ton 에폭시(Devcon)를 사용하여 시험편의 한 쪽 끝단과 밑단을 완전히 고정하여 제작하였으며, 이후 열하중을 부가하기 위해 100℃의 노에서 10분간 유지하여 기판 및 박막 전체에 온도가 충분히 동일하게 유지될 수 있도록 하였다.

Table 2 The thickness of thin film evaporated by each material

	Al-Cu	Au-Cu
1st layer thickness	170nm	70nm
2nd layer thickness	160nm	160nm
total thickness	330nm	230nm
substrate thickness	0.5×10 <sup>6</sup> nm	

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1 유한요소해석

###### 4.1.1 일단 고정지지

초기 열하중에 의해 전체구조물이 굽혀지는 현상이 발생되어, Au-Cu 시험편에서는 0.036mm만큼 처짐이 발생하였고, Au-Al 시험편에서는 0.029mm의 처짐이 발생하였다. 또한, 발생하는 응력도 전체적으로 밑단 고정지지보다 높게 발생하고 있다. 2개의 박막이 동일한 두께를 가지며 변화하면서 발생하는 상향잔류응력을 Fig. 3에 나타내고 있다. x축은 기판의 두께에 대한 박막의 두께비로 무차원화하여 나타내었다. 두께비가 2×10<sup>-4</sup>인 경우에 Cu-Al과 Au-Al로 제작된 시험편에서 가장 높은 81.9MPa로 발생하였으며, 두께비가 점차 증가하여, 2×10<sup>-2</sup>인 경우에 Cu-Al에서 63.7MPa, Au-Al에서 66.7MPa이 발생하여 재료 특성이 반영되고 있음을 알 수 있다.

그리고, Cu-Au보다 Au-Cu 시험편에서 두께비가 증가할수록 응력값의 감소가 더 크게 발생하나 최소 잔류응력은 Au-Cu 시험편에서 두께비 2×10<sup>-4</sup>일 때 6.5MPa이 발생하였고, 반면에 열팽창계수가 큰 알루미늄이 포함된 시험편에서 대체적으로 발생하는 응력은 크게 나타남을 알 수 있다. 특히, 2nd 층의 박막이 알루미늄인 경우는 1st층의 박막의 재료에 관계없

이 거의 유사한 응력값을 나타내는 데, 이것은 구리나 금에 비해 상대적으로 큰 열팽창계수의 영향이 잔류응력 값에 지배적임을 알 수 있다. 반면에 알루미늄을 첫 번째 층에 사용하고, 두 번째 층에 열팽창계수가 낮은 재료를 사용하게 되면, 열에 의한 팽창을 양쪽 면에서 억제하는 효과가 나타나게 되어, 두께비가 2×10<sup>-4</sup>인 경우에 Cu-Al 시험편보다 Al-Cu 시험편에서의 응력은 36.5% 감소하였으며, 두께가 증가할수록 감소비율은 49.6%로 증가하여 매우 뛰어난 응력감소 효과를 얻을 수 있다.

또한, 박막 각각의 두께변화가 잔류응력값에 미치는 영향은 대체적으로 동일 두께변화와 유사한 경향을 나타나고 있으나, 두께비에 대한 응력값의 영향은 동일 두께비보다 미비하게 나타나고 있다. 하지만 전체 두께비가 동일한 지점(25μm)에서 발생하는 응력값은 Al-Au인 경우에 47.1MPa이 발생하고, 동일 두께비에 대한 응력값은 46.44MPa로 낮게 발생하나 값의 차이는 미비하다. 하지만, 전단잔류응력은 동일 두께비의 증가에 따라서 증가하나, 최대가 Cu-Al인 시험편에서 3.30MPa로 매우 작다. 그리고, 각각의 박막 두께를 증가시키면, 오히려 감소한다. 그러므로, 이중박막인 경우에 두 박막의 두께비를 동일하게 제작하는 것보다 하나의 박막 두께만을 증가시키는 것이 제작공정에 용이한 것으로 사료된다.

###### 4.1.2 밑단 고정지지

동일한 두 박막의 두께가 증가할수록 응력의 변화는 거의 없으며, 순수하게 재료의 특성만이 잔류응력값에 영향을 미치고 있음을 Fig. 4에서 알 수 있다. 하지만 발생하는 잔류응력은 일단고정지지의 두께비 2×10<sup>-2</sup>에서 Cu-Al인 경우에 66.1MPa, Cu-Au인 경우에는 9.1MPa이 발생하였으나, 밑단 고정 지지인 경우에는 58.0MPa과 3.8MPa로 각각 12.4%, 58.3%정도 낮은 잔류응력이 발생되고 있다. 그리고, 축방향 잔류응력도 열팽창계수가 큰 알루미늄에서 높은 응력이 발생하고, 그 값은 증착순서에 관계없이 두께비 2×10<sup>-4</sup>에서는 56.6MPa로 유사하게 나타난다. 또한, 첫 번째와 두 번째 박막 각각의 두께를 변화시키면서 수행한 잔류응력값은 두 박막의 두께를 동일하게 증가하였을 때와 거의 동일하게 발생하여, 각각 박막의 두께변화가 잔류응력에 미치는 영향은 거의 없을 것으로 사료된다. 또한 전단잔류응력은 대체적으로 두께가 2×10<sup>-2</sup>에서 Au-Al에서 최대 2.28MPa로 낮은 응력이 발생한다. Fig. 8에서는 밑단 고정 지지된 Au-Cu 시험편에서 축 방향 잔류응력분포를 나타내고 있다. 최대가 0.82MPa의 인장잔류응력이 발생되고 있음을 알 수 있으므로, 열하중에 매우 안정적이라고 할 수 있다.

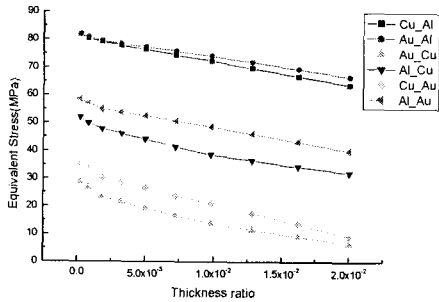


Fig. 3 Residual stress with respect to thin film thickness ratio in each specimen with one edge fixed constraint

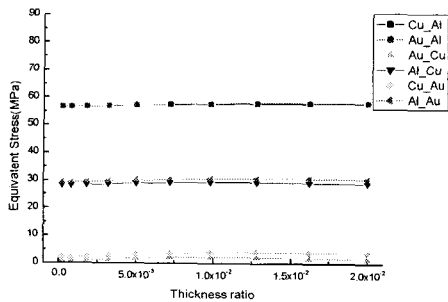


Fig. 4 Residual stress with respect to thin film thickness ratio in each specimen with bottom fixed constraint

#### 4.2 압입 시험

Au-Cu 시험편이 Al-Cu 시험편보다 조금 크게 발생하였다. 그리고, 일단고정지지에서 크기는 상당히 증가함을 알 수 있다. 대체적으로 유한요소해석에서 구한 결과값에 일치하는 경향을 보이고 있다. 하지만, 밀단 고정 지지에서 압입크기는 열처리를 하지 않은 재료와 유사하여 잔류응력의 효과가 잘 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 각 시험에 대한 결과값을 Table 3에 나타내고 있다. 에 비해 증가가 호세 Al-Al 박막은 모재에서 가장 큰 압입깊이가 발생하였으나, 열하중을 부가한 이후에 깊이의 증가는 Al-Au보다 낮게 발생하였다.

Table 3 The length of indentation induced on each different material

Material	Au-Cu	Al-Cu
NIT	129nm	141nm
One Fixed HT	146nm	160nm
Bottom fixed HT	133nm	152nm

#### 5. 결론

MEMS 구조물에서 알루미늄 박막을 증착에 의해서 제작할 때 실리콘 기판과 알루미늄 사이에 열팽창계수의 차에 의해서 발생하는 잔류응력을 최소화하기 위한 연구를 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 일단고정지지에서는 두께비에 따라 발생하는 잔류상당응력은 선형적으로 감소하고, Au\_Cu로 제작된 시험편에서 가장 낮은 잔류응력값을 나타내고 있다. 또한, 하나의 박막두께만을 증가하는 것과 동일두께 증가와 유사한 응력분포를 나타내므로, 실제 사용될 수 있는 금속 재료만의 두께를 증가시키는 것이 공정 및 사용수명 연장에 효과적인 것으로 사료된다.

2. 밀단 고정지지에서는 두께비에 따라 응력값의 변화는 거의 발생하지 않았고, 동일하게 박막 두께의 변화에 따른 응력값도 거의 변동이 없었다. 하지만, 일단고정지지보다 동일 두께비에서 12%정도 낮게 나타나고 있다.

3. 압입시험을 수행한 결과 열하중으로 발생한 인장잔류 응력으로 인해 일단지지조건에서 열하중이 가해진 시험편에서 압입깊이의 증가폭이 가장 크게 나타나고 있으며, Au\_Cu보다 Al\_Cu 시험편에서 압입깊이의 증가폭이 크게 나타났다.

#### 참고문헌

- Marc Madou, "Fundamentals of Microfabrication." CRC press, pp.217-274. 1995.
- Suresh, S., Giannakopoulos, A. E., "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation", Acta mater., Vol. 46, No. 16, pp.5755-5767, 1998.
- Ming Qin, M. C. Poon and C. Y. Yuen, "A Study of nickel silicide film as a mechanical material", Sensors and Actuators, Vol. 87, pp.90-95. 2000.
- Frans Spaepen and Alison L Shull, "Mechanical properties of thin films and multilayers", Solid State & Materials Science, Vol. 1, pp. 679-683. 1996.
- T. F. Young, J. F. Chang and H. Y. Ueng, "Study on annealing effects of Au thin films on Si", Thin Solid Films, Vol. 322, pp.319-322. 1998.
- Hahn, J. H., Lee, K. R., Kim, K. S., Lee, S. Y., "Principal and Application of Nanoindentation Test." Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol. 19, No. 3. pp.19-26. 2002.