

## 잔류응력을 고려한 미세구조물의 강도해석

심재준\*(동아대 대학원 기계공학과), 한근조(동아대 기계공학과), 안성찬(동아대 기계공학과),  
한동섭(동아대 대학원 기계공학과)

### Stress Analysis of the Micro-structure Considering the Residual Stress

J. J. Shim(Mech. Eng. Dept., DAU), G. J. Han(Mech. Eng. Dept., DAU), S. C. Ahn(Mech. Eng. Dept., DAU), D. S. Han(Mech. Eng. Dept., DAU)

#### ABSTRACT

MEMS structures Generally have been fabricated using surface-machining, but the interface failure between silicon substrate and evaporated thin film frequently takes place due to difference of linear coefficient of thermal expansion. Therefore this paper studied the effect of the residual stress caused by variable external loads. This study did not analyzed accurate quantity of the residual stress but trend for the effect of residual stress.

Several specimens were fabricated using other material(Al, Au and Cu) and thermal load was applied. The residual stress was measured by nano-indentation using AFM. The results showed the existence of the residual stress due to thermal load. The indentation area of the thermal loaded thin film reduced about 3.8% comparing with the virgin thin film caused by residual stress. The finite element analysis results are similar to indentation test.

**Key Words :** MEMS(미세기전시스템), Thermal load(열하중), Thin film(박막), Residual stress(잔류응력), AFM (원자력현미경), Indentation Test(압입시험),

#### 1. 서론

20세기 집적회로 제조기술의 발전은 전자부품의 크기와 집적도를 상당히 향상시킬 수 있는 원동력이 되었다. 현재 집적회로 제조기술을 응용하여 가공할 수 있는 반도체 구조물의 크기는 원자단위까지 가능하나 실용화 기술의 문제점으로 나노단위(nano scale)에 쉽게 접근하지 못하고 있다. 한편, 이러한 집적회로 제조기술은 미세구조물 가공기술에 응용됨으로써 미세기전시스템(MEMS)이 탄생되었다. MEMS 기술로 만들어진 시스템은 수 밀리미터의 크기이지만 그 자체로 완전한 시스템이다. 응용 분야는 센서(속도계, 가속도계, 유량계, 습도계, 압력계, 온도계), HDD 헤드, 내시경, 세포 또는 DNA 조작기, 유체 소자(マイクロ ポンプ, マイクロ ベルブ, マイクロ 成分 分析器), 마이크로 미러, TV Projector 등 여러 곳에 적용되어 실용되고 있다. 이러한 MEMS 구조물을 제작하는 방법은 Surface Micro-machining과 Bulk Micro-machining으로 크게 분류되며<sup>(1,2)</sup>, 특히, Surface Micro-machining은 모재의 표면에 박막을 적층하여 3차원형상을 구

현하는 방식으로 집적회로 공정과 유사하나 가공소재 및 재료의 특성 차이와 가공하고자 하는 미세구조물의 기하학적인 특징 차이로 많은 문제점이 야기되고 있다.

본 연구에서는 미세가공된 실리콘 박막 구조물에서 열팽창계수의 차이로 인해 실리콘과 박막사이의 계면에서 발생할 수 있는 파손의 영향을 분석하기 위해서 MEMS 구조물에 많이 사용되는 알루미늄, 구리, 금을 실리콘에 증착하고<sup>(3,4)</sup>, 임의로 반복적인 열을 가하여 발생되는 잔류응력을 SPM의 압입시험으로 구조물에 미치는 영향성을 분석하고자 하였다. 이후 유한요소해석을 수행하여 비교 분석하였다. 특히 본 연구는 정확한 정량적인 값보다는 그 경향을 분석하여 실제 구조물의 설계를 위한 기초 자료를 얻고자 하였다.<sup>(5-8)</sup>

#### 2. 실험 방법

##### 2.1 시험편제작

현재 박막 미세 가공에 의한 MEMS 구조물에 많

이 사용되는 금속박막은 알루미늄으로 일반적으로 실리콘 기판에 증착에 의해서 제작하나, 이때 두 재질 사이에는 상당히 큰 열팽창계수의 차이로 열이 가해지면 접합계면에 상당한 응력이 존재하게 된다. 그러므로, 이 두 재료 사이에 다른 재료를 먼저 증착 함으로써 급격한 열팽창계수의 차이를 방지하여 발생하는 응력을 최소화하기 위해 구리와 금을 사용하여 1차증착을 수행하고, 이후 알루미늄으로 2차증착을 수행한 시험편과 알루미늄으로 1차증착만 수행한 시험편 등 세가지종류의 시험편을 제작하였다. 그리고, 동일하게 제작된 시험편에 열을 반복적으로 가함으로써 잔류응력과 잔류변형율이 존재하는 시험편을 제작하였다.

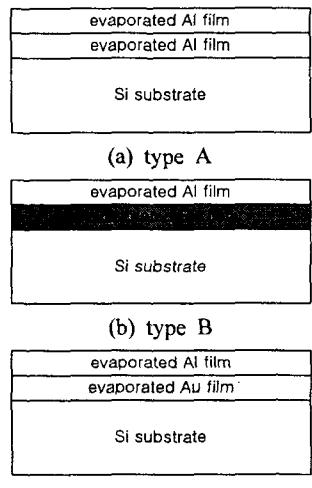


Fig. 1 Fabricated specimens shape using the evaporator

## 2.1 압입시험

제작된 시험편에 Berkovich 압입자를 이용한 압입시험은 DI사의 NanoScope를 사용하여 수행하였으며, 압입면적은 AFM 방식에 의해서 직접 측정하였다. 압입에 사용된 압입자는 다이아몬드로 제작되었으며 정확한 치수는 Fig. 2에 나타내었다. 그리고, 각각 박막에 압입이 되도록 압입력을 세단계로 구분하여 부가하였다.

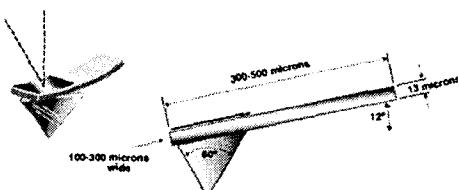


Fig. 2 Dimensions and shape of the Berkovich indenter fabricated with diamond

## 2.2 유한요소해석

### 2.2.1 유한요소모델 및 재료물성치

유한요소해석에서 사용된 프로그램은 범용유한요소해석프로그램인 ANSYS 5.7를 사용하였으며, 간단한 형상은 Fig. 3에 나타내고 있다. 실리콘의 치수는  $10 \times 5 \times 0.55(\text{mm})$ 이고, 증착되는 층의 두께는  $0.005\text{mm}(5\mu\text{m})$ 로 예측하였다. 또한 적용된 물성치는 Table 1에 나타내었으며, 구조물의 전부가 동일하게  $200^\circ\text{C}$ 까지 가열된다고 가정하여 해석을 수행하였다. 실제적으로 실리콘의 열전도도가 매우 낮으나 그만큼 열팽창계수도 낮으므로 해석에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다. 그리고, 각 계면사이에는 완전히 결합된 것으로 가정하였다.

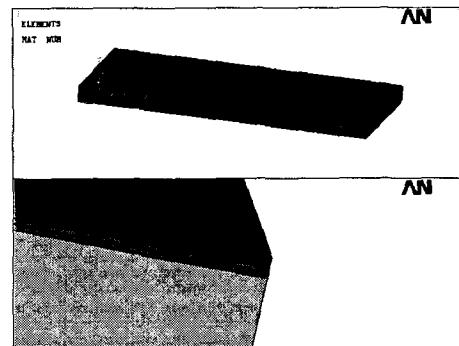


Fig. 3 Finite element model of the specimen coated using various materials

Table 1 The mechanical properties of each materials

|    | E       | poisson's ratio | CTE at $20^\circ\text{C}$      |
|----|---------|-----------------|--------------------------------|
| Si | 150GPa  | 0.17            | $2.7 \times 10^{-6}/\text{C}$  |
| Al | 68GPa   | 0.38            | $27.4 \times 10^{-6}/\text{C}$ |
| Au | 77.2GPa | 0.42            | $15.2 \times 10^{-6}/\text{C}$ |
| Cu | 110GPa  | 0.343           | $20.2 \times 10^{-6}/\text{C}$ |

### 2.2.2 경계조건 및 하중조건

실제 실험에서는 실리콘을  $200^\circ\text{C}$ 에서 약 2시간동안 가열하였으나, 각 시험편의 온도는 정확하게 측정이 어려우므로, 유한요소해석에서는 실리콘과 박막 모두가  $200^\circ\text{C}$ 까지 가열되는 것으로 경계조건을 부과하였다.

## 3. 토의

### 3.1 압입시험

열하중을 가하지 않은 모재와 열하중을 가한 재료에 대해 압입시험을 수행하여, 모재에서 발생하는 압입면적이 열하중을 가한 재료보다 약간 크게 발생

하였으며, Al-Cu 박막을 가진 재료에서 가장 큰 차이가 발생하였다. 재료에 대한 압입특성에 관련된 경향을 조사하였으므로, 가해진 힘과 압입 깊이에 대한 값은 측정하지 않았다. 이것은 열하중에 의해 알루미늄, 구리, 금에 압축잔류응력이 발생된 것으로 사료된다. 또한, Al-Cu 박막과 Al-Au 박막인 경우에 낮은 압입력에 의해서는 발생하는 압입면적은 큰 차이가 나지 않았으나, 구리와 금층에서의 압입시에는 압축잔류응력의 크기차로 인하여 면적에 차이가 발생함을 알 수 있다. Fig. 4에는 AFM에 의해 압입흔적을 측정한 형상을 나타내고 있다.

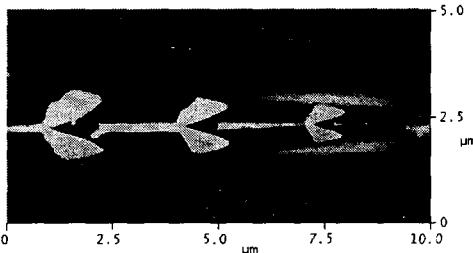


Fig. 3 AFM image of nano-indentation in the evaporated Al film

### 3.2 유한요소해석

전체적으로 발생하는 응력은 최대상당응력과 길이방향에 따른 응력으로 관찰하였다.

#### 3.2.1 Type A (Al-Al-Si substrate)

알루미늄과 실리콘 기판의 접합계면에서 488.91MPa의 상당응력이 발생하였으며, 실리콘 기판에서는 60.18MPa의 인장응력이 발생하고 있으며, 알루미늄 박막에서는 489.91MPa의 압축응력이 발생하고 있으며, 알루미늄에서 발생하는 압축응력은 재료에 충분한 압축잔류소성응력이 발생되었음을 알 수 있다. 그리고, 알루미늄과 실리콘 기판의 계면에서 발생하는 전단응력은 15.75MPa로 비교적 낮게 발생하였으므로, 계면에서 이탈은 없을 것으로 예상된다. 또한 최대변위는 길이방향으로 0.00322mm ( $3.22\mu\text{m}$ )가 발생하였다.

#### 3.2.1 Type B (Al-Cu-Si substrate)

알루미늄과 실리콘 기판의 접합계면에서 528.04MPa의 상당응력이 발생하였으며, 실리콘 기판에서는 61.72MPa의 인장응력이 발생하고 있으며, 구리 박막과 알루미늄 박막에서는 522.64MPa의 압축응력이 유사하게 나타났다. 하지만 알루미늄 박막에서는 끝단에서 길이방향으로 0.5mm까지 국부적으로 낮은 392.79MPa이 발생하였다. 이것은 구리가 알루미늄보다 낮은 열팽창계수를 가지고 있으나 재료자체가 알루미늄보다 강성도가 높으므로 동일한 변형

에 의해서 발생하는 응력도 증가된 것으로 사료된다. 그리고 발생하는 압축응력은 재료에 충분한 압축잔류소성응력을 발생하였음을 알 수 있다. 그리고, 구리와 실리콘 기판의 계면에서 발생하는 전단응력은 16.17MPa로 비교적 낮게 발생하였다. 또한 최대변위는 길이방향으로 0.00322mm ( $3.22\mu\text{m}$ )가 발생하여 알루미늄만으로 증착한 시험편과 거의 유사하게 발생하였다.

#### 3.2.1 Type C (Al-Au-Si substrate)

금과 실리콘 기판의 접합계면에서 301.00MPa의 상당응력이 발생하였으며, 실리콘 기판에서는 47.28MPa의 인장응력이 발생하여 가장 낮은 값이 발생하고 있으며, 금 박막에서도 367.54MPa의 압축응력이, 그리고 알루미늄 박막에서는 489.01MPa이 나타났다. 하지만 금박막에서 발생하는 압축응력은 박막전체적으로 균일하게 발생하고 있음을 Fig. 6에서 나타내고 있다. 또한 압축응력은 재료에 충분한 압축잔류소성응력을 생성할 수 있을 것으로 사료된다. 그리고, 금과 실리콘 기판의 계면에서 발생하는 전단응력은 13.11MPa로 가장 낮게 발생하였다. 또한 최대변위는 길이방향으로 0.00313mm ( $3.13\mu\text{m}$ )가 발생하였다.

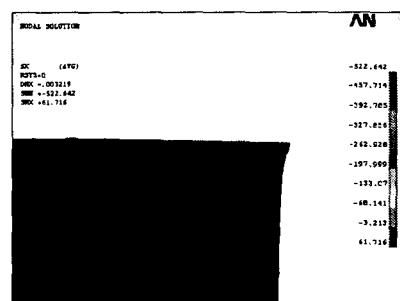


Fig. 5 stress distribution to X-direction in the evaporated Al-Cu film

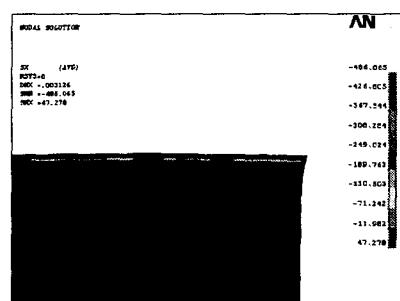


Fig. 6 stress distribution to X-direction in the evaporated Al-Au film

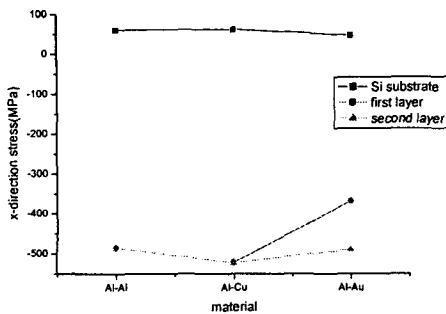


Fig. 7 X-direction stress distribution in each materials

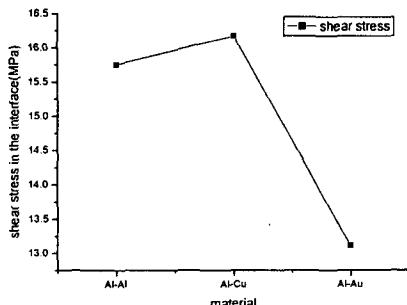


Fig. 8 Shear stress in the interface between substrate and other material

#### 4. 결론

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

1. 압입시험에 의해서 열하중으로 인한 압축 소성 잔류응력으로 인해 모재의 면적이 약 3.8%정도 넓게 발생함을 수 있었으며, 구리박막에서의 발생하는 높은 압축 소성 잔류응력으로 인해 금박막에서 면적이 11.4%정도 면적이 증가하였음을 알 수 있었다.

2. 실리콘 기판에 알루미늄을 증착할 경우에 금을 1차 증착하고 이후에 알루미늄을 2차 증착을 수행하면, 알루미늄보다 낮은 열팽창계수와 강성도를 가진 금으로 인하여 열하중에서 의해서 계면과 박막에서 발생하는 응력을 대략 20%정도의 응력감소효과가 나타남을 알 수 있다.

3. 알루미늄보다 낮은 열팽창계수를 가진 구리를 1차증착, 이후에 알루미늄으로 2차 증착을 수행하면 열하중에 의해서 발생하는 변위는 거의 유사하게 발

생하고 있으나, 구리가 알루미늄보다 강성도가 2배 정도 높아 동일한 변위에 발생하는 응력은 상당히 높게 발생함을 알 수 있었다.

따라서 박막을 이용한 3차원구조물을 생성할 경우에는 각 박막 층사이에는 열팽창계수의 차이를 최소화할 수 있도록 설계하여야 하며, 특히 구리는 높은 강성도로 강건한 3차원 MEMS 구조물을 형성할 수 있지만 열하중에 의해 높은 응력을 발생시키는 반면에 금은 강성도가 낮지만 두 층사이의 응력을 완화할 수 있는 완충효과를 얻을 수 있었다.

#### 참고문헌

1. Milton Ohring, "The Material Science of Thin Film", Academic Press, pp. 79-449, 1992.
2. Marc Madou, "Fundamentals of Microfabrication", CRC press, pp.217-274, 1995.
3. X. Zhang, T. Y. Zhang, M. Wong, Y. Zohar, "Residual-Stress Relaxation in Polysilicon Thin Films by High-Temperature Rapid Thermal Annealing", Sensor and Actuators, pp. 109-115, 1998.
4. Y. G. Shen, Y. W. Mai, "Effect of Oxygen on Residual Stress and Structural Properties of Tungsten Nitride Films Grown by Reactive Magnetron Sputtering", Materials science & Engineering, pp.107-115, 2000.
5. S. Suresh, A. E. Giannakopoulos, "A New Method for Estimating Residual Stresses by Instrumented Sharp Indentation", Acta mater., Vol. 46, No. 16, pp.5755-5767, 1998.
6. P. L. Larsson, A. E. Giannakopoulos, "Analysis of Berkovich Indentation", Int. J. Solids structures, Vol.33, No.2, pp.221-248, 1996.
7. 한준희, 이광렬, 김광석, 이상율, "나노인덴테이션 시험의 원리 및 응용", 한국정밀공학회지, 제 19권, 제 3호, pp.19-26, 2002.
8. A. Gouldstone, H. L. Koh, K. Y. Zeng, A. E. Giannakopoulos, S. Suresh, "Discrete and Continuous Deformation during Nanoindentation of Thin Films", Acta Mater., pp.2277-2295, 2000.