한국정밀공학회지 제 17 권 제 12 호 (2000 년 12 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 17, No. 12, December 2000.

마이크로 금 전해 도금 구조물의 잔류응력 측정

백창욱*, 안유민**

Residual Stress Measurement of Micro Gold Electroplated Structure

Chang-Wook Baek* and Yoomin Ahn**

ABSTRACT

In order to find a residual stress in the micro-machined beam, first natural frequency of the beam that has the residual stress inside is analyzed using the Rayleigh's energy method. Micro gold electroplated structure is fabricated by surface micro-machining process. The made structure is clamped-clamped beam and its 1st natural frequency is measured by resonance method. For the better estimation of the residual stress, an equivalent length of micro-machined beam to ideal beam is calculated by FEM. The residual stress is estimated from the equivalent length and the measured natural frequency.

Key Words : Micro-structure (미소 구조물), Surface micro-machining (표면 미세가공), Gold electroplating (금 전해도금), Residual stress (잔류응력)

1. 서론

MEMS 분야에서 마이크로 머신의 원활한 작동을 위해서는 정확한 마이크로 구조물의 설계가 필요하다. 특히 기계적 구조물을 설계할 때에는 마이크로 가공법으로 제작된 구조물 소재의 기계적 물성치 자료가 요구된다. 따라서 실리콘이나 절연막 등의 소재에 대해서 영율과 같은 강성들과 항복응력등의 강도들을 측정하는 연구들이 진행되고 있다[1,2]. 설계에 의한 제작 후에 마이크로 머신의 원활한 작동을 위해서는 구조물 내의 잔류응력이 작아야 한다. 따라서 제작과정에서 발생되어지는 잔류응력에 대한 측정 방법도 연구되고 있다[3]. 이러한 물성치들을 측정하기 위해 사용되는 시험법으로써는 나노 경도시험법[4], 인장시험법[1], 외팔보 진동시험법[5], 박판 변형시험법[6] 등이 있다.

금도금 방법은 지금까지 전자나 전기 부품공업에 주로 사용되고 있으나 마이크로 머신에는 그 응용 예가 그리 많지 않았다. 그러나 금은 생체세포와 친화적인 특성이 우수하여, 앞으로 마이크로 의료기구 분야에서 금도금 방법이 많이 사용되리라 기대되고 있다[7].

본 논문에서는 금 전해도금 방법으로 마이크로 구조물을 제작할 때에 잔류응력의 저 발생을 위한 기초 연구로서, 잔류응력 측정법에 대해서 연구해 보았다. 잔류응력 측정을 위해서, 먼저 전해도금 방법으로 양단이 고정 지지된 보 형상의 마이크로 금 구조물을 제작하고 제작된 구조물의 고유진동수를 공진 실험법으로 측정하였다. 그리고 측정된 고유진동수를 Rayleigh 에너지 법으로 해석하여 보 구조물 내의 존재하는 잔류응력을 근

* 서울대학교 3 차원 밀리미터파 연구단
** 한양대학교 기계공학과

사적으로 구해 보았다.

2. 잔류응력 측정이론

양단이 고정된 빔 형태인 보 구조물에 인장 잔류응력이 존재하게 되면, 고유진동수가 증가하게 된다. 이것은 구조물 내의 존재하는 인장응력에 의해 마이크로 보 구조물의 강성이 증가되었기 때문이라 가정할 수 있다. 인장응력이 존재하는 보 구조물의 1 차 고유진동수를 Rayleigh 의 에너지 방법을 이용하여 근사적으로 구할 수 있다. 오일러 빔 이론을 적용할 수 있는 이상적 형상의 보가 두께 방향으로 진동운동을 할 때에 형성되는 최대 운동에너지 T_{max} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{\max} = 2\pi^2 f^2 \rho A \int_0^l Y^2(x)dx \tag{1}$$

식에서 f 는 고유진동수, A 는 보의 단면적, x 는 보의 길이방향 위치변수, l 은 보의 전체 길이, ρ 는 소재 밀도, $Y(x)$는 x 위치에서의 두께방향으로의 보의 변위함수이다. 최대 위치에너지 U_{max} 는 굽힘모멘트에 의한 에너지와 길이방향 인장력에 의한 에너지의 합으로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$U_{\max} = \frac{EI}{2}\int_0^l \left(\frac{d^2Y(x)}{dx^2}\right)^2 dx + \frac{\sigma A}{2}\int_0^l \left(\frac{dY(x)}{dx}\right)^2 dx \tag{2}$$

식에서 I 는 보의 굽힘 관성 모우멘트이고 E 는 탄성계수이다. 보 단면 전체에 일정한 인장응력 σ 가 작용한다고 가정하였다.

변위함수 $Y(x)$를 보의 경계조건을 만족하고 근사적으로 1 차 모드 형상을 띄는 $\cos(2\pi x/l)$-1 로 가정하고 최대 운동에너지와 최대 위치에너지는 서로 같다는 조건($T_{max}=U_{max}$)을 적용하면 보의 1 차 고유진동수 f[Hz]가 다음과 같이 유도된다.

$$f^2 = \frac{1}{3}\left(\frac{\sigma}{\rho l^2} + \frac{\pi^2}{3}\frac{Et^2}{\rho l^4}\right) \tag{3}$$

식에서 t 는 보 두께이다. 식(3)에 고유진동수 측정값을 대입하고 보 구조물 소재의 탄성계수 값을 대입하면 마이크로 보 구조물 내에 존재하는 인장 잔류응력 값이 구해진다.

3. 마이크로 금 구조물 제작

Fig.1 은 잔류응력 측정대상으로 설계된 마이크로 양단 지지보 구조물의 반쪽 형상이다. 그리고 설계된 형상의 마이크로 금 구조물을 전해 도금 방법으로 제작하는 공정 순서는 Fig. 2 와 같다. 기판으로부터 떨어져 있어 기판에 수직한 방향으로 움직일 수 있는 가동 구조물을 제작하기 위해 니켈-금의 이중 도금 공정을 사용하였다. 제안된 공정에서는 희생층으로 니켈, 구조층으로 금을 사용하며, 지지부의 정의를 위해 별도의 anchor patterning 을 하지 않고 도금의 등방성을 이용한 과도 도금 방식을 사용하였다.

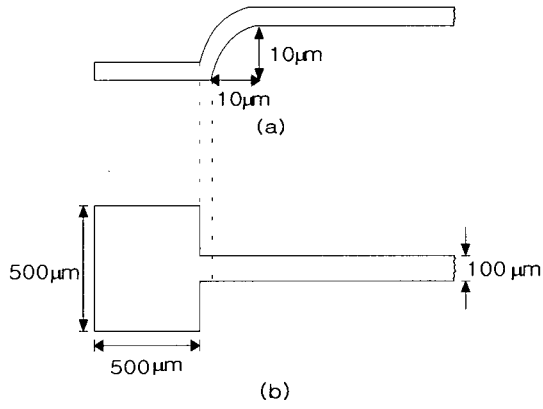


Fig. 1 (a) Side view and (b) plane view of specimen

먼저 기판으로는 열산화막이 5000 Å 두께로 증착되어 있는 n 형 실리콘 기판을 사용한다. 기판 위에 도금 기반층으로 사용될 Ti(200Å)-Au(1000 Å) 층을 열증착법으로 증착한다(Fig. 2(a)). 산화막 기판과의 접착성 향상을 위해 기판을 약 200 ℃ 정도로 가열하며 증착을 행한다. 다음은 희생층 니켈 도금의 기반층으로 사용될 금 도금을 위해 감광제(AZ5214E)로 1.5 ㎛ 두께의 도금틀을 형성

한 후, 금을 약 3000 Å 정도 얇게 도금한다(Fig. 2(b)). 이 금 도금층이 필요한 이유는 열증착된 도금 기반층 위에서는 희생층 니켈 도금시에 과도 도금이 잘 일어나지 않기 때문이다.

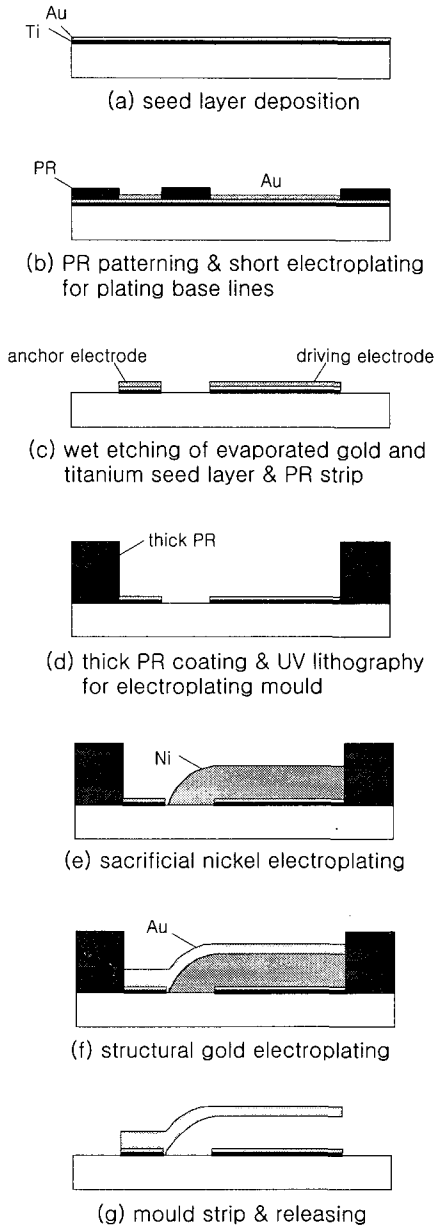


Fig. 2 Fabrication process of micro-structure

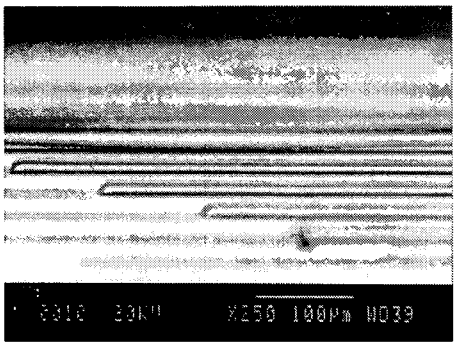
도금이 끝나면 감광제를 제거한 후 Au-Ti 기반층을 차례로 식각하여 전극간을 서로 절연시킨다 (Fig. 2(c)). 다음은 니켈 희생층의 도금을 위해 후막 감광제를 스핀 코팅하여 도금틀을 형성한다 (Fig. 2(d)). 약 30 ㎛ 높이의 도금틀에 니켈 도금을 행하여 희생층을 형성한다. 이 때에 초기 전류는 전류 경로를 패터닝하여 Fig 2(c)의 구동 전극쪽에만 가해지며, anchor 전극에는 전류가 흐르지 않는다. 이렇게 하면 구동 전극에서만 도금이 시작되며, 산화막으로 기판이 절연되어 있으므로 anchor 에는 도금이 이루어지지 않는다. 그러나 도금의 등방성 특성 때문에 도금틀로 막혀 있지 않은 부분은 Fig. 2(e)와 같은 모양으로 니켈이 옆방향으로 성장하게 된다. 옆방향으로 성장하는 니켈이 anchor 전극에 닿기 직전까지 니켈 도금을 행한 후, 바로 금 도금을 원하는 두께만큼 행하면 Fig. 2(f)와 같은 형상으로 도금된다. 옆방향으로 성장하는 니켈이 anchor 전극까지 도달하여 전기적으로 연결되어 버리면 anchor 전극에도 니켈이 도금되어 버리므로, 그 위에 구조층이 도금된다 하더라도 희생층을 식각할 때 구조물이 지지되지 못하고 떨어지므로 주의해야 한다. 전해 도금할 때에 전류밀도가 2 mA/cm^{2}가 되게 하였다.

마지막으로 희생층 니켈을 38% 염산 용액에서 식각해낸 후, 순수 및 IPA 세척을 거친 후 건조시키면 보 형상의 떠 있는 구조물을 얻을 수 있다 (Fig. 2(g)). 니켈 도금액으로는 설파민산 니켈 도금액을 사용하였으며, 금 도금액으로는 상용 비시안계 도금액(NEUTRONEX210, EEJA)을 사용하였다.

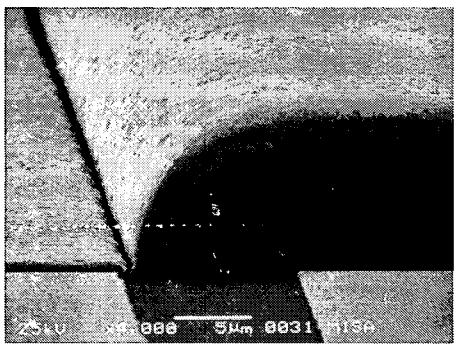
보의 길이를 다양하게 하여 다수의 마이크로 양단 지지보 구조물을 제작하였다. 제작된 구조물들의 SEM 사진을 Fig. 3 에 나타내었다. 길이 700 ㎛ 이상의 구조물은 표면 미세 가공 과정에서 일어나는 구조물의 점착 때문에 보가 바닥에 달라붙은 현상이 발생하였다. 그리고 Fig. 3(b)에서 보면 고정단 부위가 구부러진 형태임을 알 수가 있다. 구부러진 부위의 실제 형상을 보면 Fig.1 의 설계 도면과 같이 정확한 원호가 되지를 않음을 확인할 수 있었다. 높이방향 길이는 10 ㎛가 되었지만 옆방향 길이가 7 ㎛ 밖에 되지 못했다.

구부러진 형상이 어떻게 되느냐는 니켈 도금의 등방성이 얼마나 유지되는가에 달려 있다. 이론상 도금이 완전 등방성으로 성장한다면, 양방향 길이가 정확히 10 ㎛ 씩 똑같게 지만, 실제로는 옆쪽 방향으로 도금되는 속도보다 위쪽 방향으로

도금되는 속도가 더 빨라서 보 두께 방향으로의 치수가 더 큰 형상이 되는 것 같다. 이것은 도금액 성분에 어떠한 첨가물을 넣는가에 따라 달라지게 된다. 예를 들어 사카린 등을 첨가하면 위쪽 방향 속도가 더 빨라진다. 하지만 곡면 형상을 정확히 조절하는 것은 매우 어려운 실정이다.



(a)



(b)

Fig. 3 SEM photographs of (a) whole view of released gold micro-structures and (b) magnified view of anchor part of it

4. 측정 실험장치

마이크로 양단 지지보 구조물의 공진 실험을 위한 구동 및 계측장치 시스템은 Fig. 4 와 같다. 보 구조물에 작용하는 정전력의 방향을 주기적으로 변화시키면서 보의 진동 변위량을 레이저 변위 검출기를 이용하여 측정하였다. 이론적으로 예상되는 진동 모으드에 기초하여 공진 때에 최대 변위가 일어나는 부위를 측정하였다. 정전력의 주기 주파수를 서서히 변해가면서 진동 변위량이 급격히 커진 상태를 모니터링하여 공진 주파수를 알아내었다.

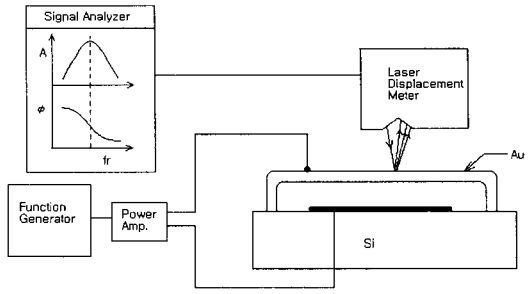


Fig. 4 Schematic of measurement system for resonance frequency

실험에 사용된 레이저 변위 검출기의 빔 직경이 20 ㎛정도이고 0.01 ㎛의 정밀도로 10 ㎜정도까지 측정 가능하므로 제작하고자 하는 구조물의 형상치수는 실험에 지장이 없으나, 최고 샘플링 가능 주파수가 50 ㎑이어서 실험대상 구조물의 1 차 공진 주파수가 대략 25 ㎑이하가 되는 형상치수의 구조물에 대해서 실험을 하게 되었다. 따라서 잔류응력 측정을 위해서는 제작된 구조물들 중에서 편평한 부분의 길이가 400 ㎛이고 폭은 100 ㎛, 두께는 2.8 ㎛, 기판과의 간격이 10 ㎛인 구조물을 사용하였다. 측정 정밀도가 0.01 ㎑인 레이저 변위기 외에 현미경을 통한 육안 검사도 병행하였다.

5. 실험결과 및 고찰

공진 실험 장치를 이용하여 고유진동수를 측정하였다. 측정을 위해 교류전원을 이용하여 전압의 크기가 0 V 에서 120 V 까지 주기적으로 변하는 정전력을 마이크로 구조물에 대해서 외부 가진력으로 가하였다. 정전력의 주파수를 변화시키면서 마이크로 구조물의 공진 주파수를 측정하였다. 실험결과 측정된 1 차 고유진동수는 36.0 ㎑이다.

측정된 고유진동수를 식(3)에 대입하여 잔류응력을 추정하기 위해서는 탄성계수(E) 값이 필요하다. 본 실험과 동일한 금 전해도금 방식으로 구조물을 제작하여 탄성계수 값을 구하여 본 앞선 연구결과[8]에 의하면 전류밀도가 2mA/cm^2 일 때에는

탄성계수 값이 43GPa 이며, 이 값을 이용하여 잔류응력을 구하였다

잔류응력 추정을 위해 유도된 식(3)은 오일러 빔 형태인 Fig. 5(a)와 같이 보 전체가 편평한 경우에 대한 것이다. 그러나, 본 논문에서 제작된 구조물은 Fig. 5(b)와 같이 지지부위가 편평하지 않아 지지부위에서 스프링 효과가 발생된다[9]. 실제 제작된 형상을 식(3)에 적용하기 위해서, 이론적 보 형상에 상당하는 실제 보의 등가길이(l_e)를 구해 보았다. 먼저 잔류응력이 존재하지 않는 경우에 대해서 Fig. 6 과 같이 유한요소법 프로그램(ANSYS)을 이용하여 실제 제작된 보 형상에 대한 1 차 고유진동수를 구해 보았다. 해석을 위해서 일반 금 소재의 물성치[10]인 81.2GPa 의 탄성계수 값과 19.32g/cm^3 의 밀도 값을 적용하여 34.692 ㎑의 1 차 고유진동수를 얻었다.

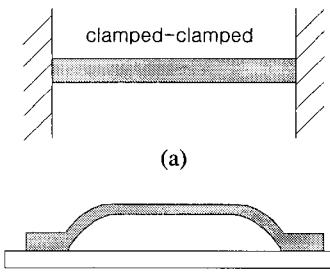


Fig. 5 (a) Ideal and (b) micromachined bridge type microbeams

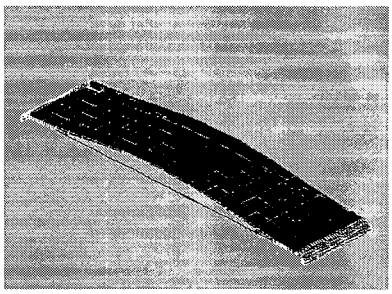


Fig. 6 1st mode shape of micro-beam by FEM

다음 식과 같은 오일러 빔의 진동 이론식을 이용하면 잔류응력이 없는 이상적 형상의 양단 지지 보에 대한 1 차 고유진동수를 구할 수가 있다.

$$f = \frac{4.730041^2 t}{4\pi l^2}\sqrt{\frac{E}{3\rho}} \tag{4}$$

앞서 FEM 에 의해 구한 고유진동수와 똑 같은 고유진동수를 갖는 이상적 형상의 보의 길이를 식(4)에서 구하면 412.5 ㎛이다. 이렇게 구해진 길이를 실제 제작된 보의 등가길이(412.5 ㎛)로 하여 실제 길이(400 ㎛) 대신에 잔류응력 추정에 사용하였다. 이를 정리하면 Table 1.과 같다.

Table 1 Calculation of equivalent beam length(l_e)

Method	Given values	Calculated value
FEM (ANSYS)	t = 2.8 ㎛, l = 400 ㎛, ρ =19.32 g/cm^3, E = 81.2 GPa	f = 34.692 kHz
Equation (4)	t = 2.8 ㎛, f = 34.692 kHz, ρ =19.32 g/cm^3, E = 81.2 GPa	l_e = 412.5 ㎛

식(3)에서 고유진동수 측정값 36.0 ㎑을 대입하고 보의 전체길이를 412.5 ㎛ 라 하고 탄성계수 값은 43GPa 이며 마이크로 소재의 밀도는 일반 소재의 밀도와 같다고 가정하면 마이크로 구조물에 존재하는 평균 인장 잔류응력 값이 6.26MPa 로 구해진다. 따라서 표면 미세 가공법으로 금 전해도금된 마이크로 구조물을 제작하면, 구조물 내에 무시 못할 크기의 인장 잔류응력이 형성된다. 이와 같은 표면 미세 가공법으로 제작된 마이크로 머신이 원활한 작동 및 성능을 유지 발휘하기 위해서는 제작과정에 형성되는 잔류응력의 감소에 관한 연구가 필요하다고 하겠다.

도금물은 도금조건에 따라 기계적 특성 및 잔류응력 등이 크게 변화될 수 있다. 그리고 잔류응력 측정방법의 재현성도 좋지 않은 편이다. 잔류응력 추정 결과의 정확도 정도를 확인하고자 한다면 마이크로 전해 도금된 금 소재의 밀도 값이 일

반 소재와 차이가 없는지 검증이 되어야 하겠다. 근사적이 아닌 정확한 잔류응력의 추정을 위해서는 실제 마이크로 소재의 밀도 값을 구하여 사용하여야 되겠다. 그리고 보의 고정단 부분의 실제 형상을 고려한 등가길이를 적용하는 것보다는 공정이 어렵겠지만 고정단 부분이 되도록 평평한 구조물을 제작하여 측정 실험을 하는 것이 필요하겠다.

6. 결론

전해 도금 방식으로 제작된 마이크로 금 구조물의 잔류응력의 크기를 되도록 간단히 근사적으로 측정하는 방법을 구하여 보았다. 마이크로 구조물의 제작과정에서 발생될 수 있는 잔류응력에 의해 보의 고유진동수가 변화될 수 있다. 인장응력이 존재하는 보 구조물의 1 차 고유진동수를 근사적으로 구하는 이론식을 Rayleigh 의 에너지 방법을 이용하여 유도하였다. 유도된 식을 적용하기 위해서 양단이 고정된 보 형태의 마이크로 금 구조물을 전해도금을 비롯한 표면 미세 가공법으로 제작하였다. 제작된 구조물의 고유진동수를 공진 시험법에 의해 측정하였다. 측정된 공진 주파수로부터 전해 도금된 금 소재의 잔류응력을 유도된 식으로부터 추정하였다. 보다 정확한 추정을 위하여, 이상적 보 형상에 상당하는 실제 제작된 보 형상의 등가길이를 구하여 이용하였다. 추정결과 인장 잔류응력이 마이크로 구조물 내에 존재함이 밝혀졌다.

후 기

본 연구는 한국 과학재단의 연구비 지원 (과제번호 : 96-0102-10-01-3)에 의해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Hardwic, D.A. "The Mechanical Properties of Thin Films: A Review," Thin Solid Films, Vol. 154, pp. 109 - 124, 1987.
2. Brotzen, F.R. "Mechanical Testing of Thin Films," International Materials Reviews, Vol. 39, No. 1, pp. 24 - 45, 1994.
3. Guckel, H., Burns, D., Rutigliano, C., Lovell, E., and Choi, B., "Diagnostic Microstructures for the Measurement of Intrinsic Strain in Thin Films," J. Micromech. Microeng., Vol. 2, pp. 86 - 95, 1992.
4. Baker, S.P. and Nix, W.D., "Mechanical Properties of Compositionally Modulated Au-Ni Thin Films: Nanoindentation and Microcantilever Deflection Experiments," J. Mater. Res., Vol. 9, No. 12, pp. 3131 - 3144, 1994.
5. Kiesewetter, L., Zhang, J.-M., Houdeau, D, and Steckenborn, A., "Determination of Young's Moduli of Micromechanical Thin Films Using the Resonance Method," Sensors and Actuators A, Vol. 35, pp. 153 – 159, 1992.
6. Vlassak, J.J. and Nix, W.D., "A New Bulge Test Technique for the Determination of Young's Modulus and Possion's Ratio of Thin Films," J. Mater. Res., Vol. 7, No. 12, pp. 3242 - 3249, 1992.
7. 심동식, 김용권, "마이크로 구조물 제작을 위한 금 전해 도금의 특성에 관한 연구," 제 4 회 한국반도체학술대회 논문집, pp. 511 - 512, 1997.
8. 백창욱, 김용권, 안유민, "전해도금된 마이크로 금 구조물의 기계적 특성 측정," 제 2 회 MEMS 학술대회 논문집, pp. 89 –98, 2000.
9. Gill, J.J.-V., Ngo, L.V., Nelson, P.R., and Kim, C.J., "Elimination of Extra Spring Effect at the Step-Up Anchor of Surface-Micromachined Structure," J. Microelectromechanical Systems, Vol. 7, No. 1, pp. 114 - 121, 1998.
10. Barrett, C.R., Nix, W.D., and Telelman, A.S., The Principles of Engineering Materials, Prentice-Hall, p. 540, 1973.