

마이크로 금 전해 도금 구조물의 탄성계수 측정

김덕현¹, 안유민², 백창욱³, 김용권³
 한양대학교 정밀기계공학과¹, 기계공학과², 서울대학교 전기공학부³

Elastic Modulus Measurement of Micro Gold Electroplating Structure

¹Duck-Hyun Kim, ²Yoomin Ahn, ³Chang-Wook Baek and ³Yong-Kweon Kim
¹Dept. of PME, ²Dept. of ME, Hanyang Univ., ³School of EE, Seoul Nat'l Univ.

Abstract - Micro gold electroplating structure is fabricated by surface micromachining process. The made structure is clamped-clamped beam and its 1st natural frequency is measured by resonance method. In order to find residual stress, first natural frequency of beam which has tensile stress inside is analysed using Rayleigh's method. Elastic modulus and residual stress are estimated from the measured natural frequency.

1. 서 론

마이크로 머신의 제작기술이 발달함에 따라 최근에 여러 산업분야에로의 적용이 시도되고 있다. 마이크로 머신의 원활한 작동을 위해서는 정확한 마이크로 구조물의 설계가 필요하다. 특히 기계적 구조물의 설계 시에는 마이크로 제작기술로 만들어진 구조물 소재의 기계적 물성치 자료가 요구된다. 따라서 실리콘이나 절연막 등의 소재에 대해서 탄성계수(영율)와 같은 강성들과 항복응력과 같은 강도들을 측정하는 연구들이 진행되고 있다 [1,2]. 또한 제작과정에서 발생되어지는 잔류응력에 대한 측정 방법도 연구되고 있다 [3].

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 [4]. 본 논문에서는 전해도금 방법으로 양단이 고정 지지된 보 형태의 마이크로 금 구조물을 제작하고 제작된 구조물로부터 마이크로 금 소재의 탄성계수 값을 공진실험으로 측정해 보고자 한다. 그리고 보 구조물 내의 존재하는 잔류응력을 측정하는 방법을 구해 보고자 한다.

2. 본 론

2.1 금 구조물 제작

전해 도금 방법에 의한 보 형태의 마이크로 금 구조물의 제작공정을 그림 1에 나타내었다. 기판으로부터 떨어져 있어 기판에 수직인 방향으로 움직일수 있는 가동 구조물을 제작하기 위해 니켈-금의 이중 도금 공정을 사용하였다. 제안된 공정에서는 희생층으로 니켈, 구조층으로 금을 사용하며, 지지부의 정의를 위해 별도의 anchor patterning을 하지 않고 도금의 등방성을 이용한 과도 도금 방식을 사용하였다. 먼저 기판으로는 열산화막이 5000 Å 두께로 증착되어 있는 n형 실리콘 기판을 사용한다. 기판 위에 도금 기반층으로 사용될 Ti(200Å)-Au(1000Å) 층을 열증착법으로 증착한다 (그림 1(a)). 산화막 기판과의 접착성 향상을 위해 기판을 약 200 °C 정도로 가열하며 증착을 행한다. 다음은 희생층 니켈 도금의 기반층으로 사용될 금 도금을 위해 감광제(AZ5214E)로 1.5 μm 두께의 도금층을 형성

한 후, 금을 약 3000 Å 정도 얇게 도금한다(그림 1(b)). 이 금 도금층이 필요한 이유는 열증착된 도금 기반층 위에서는 희생층 니켈 도금시에 과도 도금이 잘 일어나지 않기 때문이다. 도금이 끝나면 감광제를 제거한 후 Au-Ti 기반층을 차례로 식각하여 전극간을 서로 절연시킨다(그림 1(c)). 다음은 니켈 희생층의 도금을 위해 후막 감광제를 스핀 코팅하여 도금층을 형성한다(그림 1(d)). 약 30 μm 높이의 도금층에 니켈 도금을 행하여 희생층을 형성한다. 이 때 초기에 전류는 그림 1(c)의 구동 전극쪽에만 가해지며, 도금의 등방성 특성 때문에 도금층이 딱딱 있지 않은 부분은 그림 1(e)와 같은 모양으로 니켈이 성장하게 된다. 열방향으로 성장하는 니켈이 지지부 전극에 닿기 직전까지 니켈 도금을 행한 후, 바로 금 도금을 원하는 두께만큼 행하면 그림 1(f)와 같은 형상으로 도금된다. 마지막으로 희생층 니켈을 38% 염산 용액에서 식각해낸 후, 순수 및 IPA 세척을 거친 후 건조시키면 보 형태의 떠 있는 구조물을 얻을 수 있다(그림 1(g)). 니켈 도금액으로는 설파민산 니켈 도금액을 사용하였으며, 금 도금액으로는 상용 비시안계 도금액(NEUTRONEX210, EEJA)을 사용하였다. 제작된 구조물의 SEM 사진을 그림 2에 나타내었다. 표면 마이크로머시닝에서 일어나는 구조물의 점착(stiction) 현상 때문에 길이 700 μm 이상의 구조물은 바닥에 달라붙을 것을 볼 수 있다. 실험을 위해서는 제작된 구조물에서 편평한 부분의 길이가 400 μm이고 폭은 100 μm, 두께는 2.8 μm, 기판과의 간격이 10 μm인 구조물을 사용하였다.

2.2 탄성계수의 측정

탄성계수를 측정하기 위해 공진 실험 장치를 구성하였다. 교류전원에 의해 전압의 크기가 0 V에서 120 V까지 주기적으로 변하는 정전력을 외부 가진력으로 사용하여 마이크로 구조물에 대한 구동실험을 하였다. 정전력의 주파수를 변화시키면서 마이크로 구조물의 공진 주파수를 측정하였다. 측정된 1차 고유진동수는 36.0 kHz이다. 측정된 고유진동수로부터 탄성계수를 추정하기 위해서 다음과 같은 오일러 빔의 진동 이론식을 이용하였다.

$$\omega^2 = \frac{4.730041^2 t}{4\pi l^2} \left(\frac{E}{3\rho} \right) \quad (1)$$

여기서, ω는 1차 고유진동수, t는 보 두께, l은 보 길이, ρ는 소재 밀도, E는 탄성계수이다.

오일러 빔의 진동 이론식은 그림 3(a)와 같이 보 전체가 편평한 경우에 대해 유도된 식이다. 그러나, 본 논문에서 제작된 구조물은 그림 3(b)와 같이 지지부위가 편평하지 않아 지지부위에서 스프링 효과가 발생된다 [5]. 실제 제작된 형상을 식(1)에 적용하기 위해서, 이론적 보 형상에 상응하는 보의 등가길이를 그림 4와 같이 유효요소법 프로그램(ANSYS)을 이용하여 구해 보았다. 해석을 위해서 일반 금 소재의 물성치인 81.2GPa의 탄성계수 값과 19.32g/cm³의 밀도 값을 적용하여 34.692 kHz의 1차 고유진동수를 얻었다 [6]. FEM에 의해 구해진 고유진동수를 갖게 하는 이론적 형

상의 보 등가길이를 식(1)에서 구하면 412.5 μ m이다. 이와 같이 구해진 보의 등가길이 값과 측정된 구조물의 고유진동수를 식(1)에 대입하여 전해 도금된 금 소재의 탄성계수 값이 87.4GPa로 얻어졌다. 이를 표 1과 같이 정리하였으며, 탄성계수가 일반 금 소재의 값과 비교해 큰 차이가 없으며 이 결과는 다른 연구결과와 비슷한 경향이다[1].

표 1. 추정 방법과 추정된 값

추정 방법	주어진 값	추정된 값
유한요소법 ANSYS	$t=2.8 \mu\text{m}$, $l=400 \mu\text{m}$ $\rho=19.32 \text{ g/cm}^3$, $E=81.2 \text{ GPa}$	고유진동수= 34.692 kHz
식 (1)	$t=2.8\mu\text{m}$, 고유진동수=34.692 kHz $\rho=19.32 \text{ g/cm}^3$, $E=81.2 \text{ GPa}$	등가길이= 412.5 μ m
식 (1)	$t=2.8\mu\text{m}$, 고유진동수=34.692 kHz $\rho=19.32 \text{ g/cm}^3$, $l=412.5 \mu\text{m}$	구조물탄성률= 87.4 GPa

2.3 잔류응력

전해 도금된 금 소재의 탄성계수 값이 일반 소재의 경우보다 크게 측정되었는데 이는 구조물 내의 존재하는 인장응력에 의해 마이크로 보 구조물의 강성이 증가되었기 때문이라 가정할 수 있다. 인장응력이 존재하는 이론적 보의 1차 고유진동수를 Rayleigh의 에너지 방법을 이용하여 근사적으로 구할 수 있다. 이론적 형상의 보가 두께 방향으로 진동운동을 할 때에 형성되는 최대 운동 에너지 T_{max} 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{max} = \frac{\omega^2}{2} \rho A \int_0^l Y^2(x) dx \quad (2)$$

여기서 A 는 보의 단면적, x 는 보의 길이방향 위치변수, $Y(x)$ 는 x 위치에서의 두께방향으로의 보의 변위이다. 최대 위치에너지 U_{max} 는 굽힘모멘트에 의한 에너지와 축방향 인장력에 의한 에너지의 합으로 구성되며 다음과 같이 표현된다.

$$U_{max} = \frac{EI}{2} \int_0^l \left(\frac{d^2 Y(x)}{dx^2} \right)^2 dx + \frac{\sigma A}{2} \int_0^l \left(\frac{dY(x)}{dx} \right)^2 dx \quad (3)$$

여기서, I 는 보의 굽힘 관성모우멘트이고, 보 단면 전체에 일정한 인장응력 σ 가 작용한다고 가정하였다.

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

$$\omega^2 = \frac{4\pi^2}{3} \left(\frac{\sigma}{\rho l^2} + \frac{\pi}{3} \frac{E l^2}{\rho A^4} \right) \quad (4)$$

위 식에서 고유진동수 측정값 36.0kHz를 대입하고 탄성계수 값으로 81.2GPa(일반 금 소재)를 가정하면 마이크로 구조물에 존재하는 인장 잔류응력 값이 0.473MPa로 구해진다. 실제 잔류응력의 계산을 위해서는 정확한 전해 도금된 금 소재의 탄성계수 값을 이용해 식(4)를 풀어야 한다. 현재 잔류응력의 효과가 고유진동수에 전혀 영향을 미치는 않는 외팔보 형상에 대해서 공진 실험이 진행되고 있으며, 그 결과로 구해질 탄성계수 값을 이용한다면 보다 정확한 잔류응력 값을 추정할 수 있으리라 기대된다.

3. 결 론

전해 도금 방식으로 제작된 마이크로 금 구조물의 기계적 특성을 알아보기 위해 양단이 고정된 보를 제작하였다. 공진 실험법에 의해 제작된 구조물의 고유진동수를 측정하였다. 측정된 공진 주파수로부터 전해 도금된 금 소재의 탄성계수를 오일러 빔의 진동 이론식을 이용하여 추정하였다. 구하여진 탄성계수 값은 일반 금 소재의 탄성계수 값과 큰 차이를 보이지 않고 있다. 마이크로 구조물의 제작과정에서 발생할 수 있는 잔류응력에 의해 보의 고유진동수가 변화될 수 있다. 인장응력이 존재하는 보 구조물의 1차 고유진동수를 근사적으로 구하는 이론식을 Rayleigh의 에너지 방법을 이용하여 유도하였으며, 유도된 식을 실험결과에 적용하여 보았다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학재단의 연구비 지원(과제번호 96-0102-10-01-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] D. A. Hardwic, "The Mechanical Properties of Films: A Review", Thin Solid Films, Vol. 154 109-124, 1987.
- [2] F. R. Brotzen, "Mechanical Testing of Thin F International Materials Reviews, Vol. 39, No. 1, pp 1994.
- [3] H. Guckel, D. Burns, C. Rutigliano, E. Lovell Choi, "Diagnostic Microstructures for the Measurment Intrinsic Strain in Thin Films", J. Micromech. Mic Vol. 2, pp. 86-95, 1992.
- [4] 심동식, 김용권, "마이크로 구조물 제작을 위한 금 전해 도금의 특성에 관한 연구, 제4회 한국반도체학술대회 논문집 511-512, 1997.
- [5] J. J.-Y. Gill, L. V. Ngo, P. R. Nelson, and C. "Elimination of Extra Spring Effect at the Ste Anchor of Surface-Micromachined Structure", Microelectromechanical Systems, Vol. 7, No. 1 114-121, 1998.
- [6] C. R. Barrett, W. D. Nix, and A. S. Telлма Principles of Engineering Materials, Prentice-Hall, 1973.

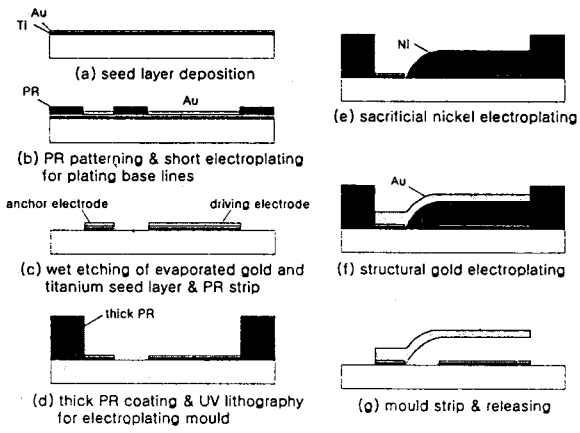


그림 1 . 금 구조물 제작 공정

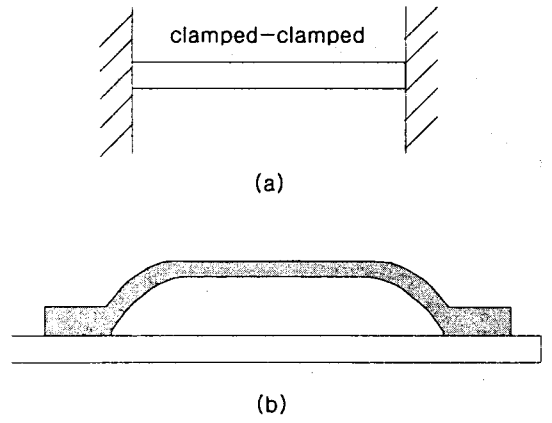
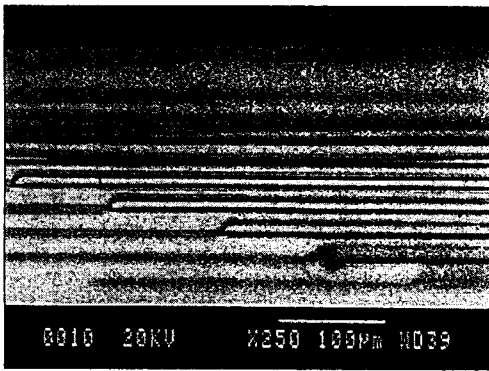
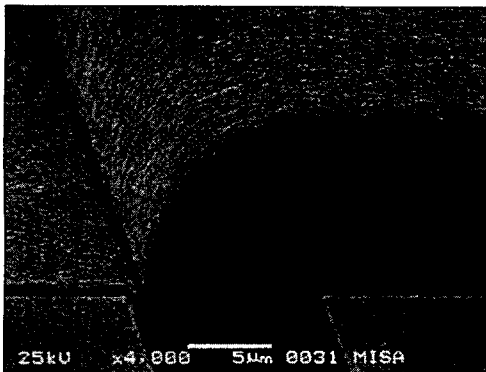


그림 3. (a) 이론적 형상의 보와 (b) 실제 제작된 보 형상



(a)



(b)

그림 2. 제작된 금 마이크로 구조물의 모습

- (a) 희생층 식각 후 떠 있는 보 형상 구조물
- (b) 희생층 식각 전 지지부를 확대한 모습

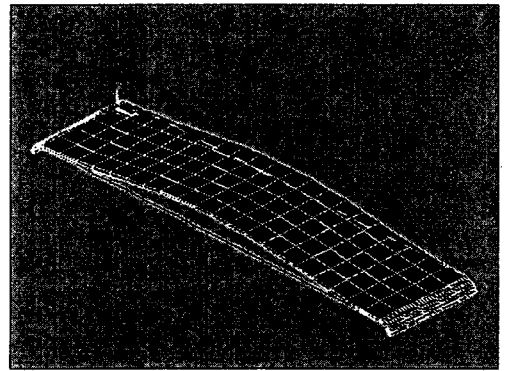


그림.4 FEM에 의한 보 구조물의 1차 모드형상