전해 도금된 마이크로 금 구조물의 기계적 특성 측정

論 文
50C-2-7

Measurements of the Mechanical Properties of Electroplated Gold Microstructure

白 昌 煜* · 金 容 權** · 安 裕 民***
(Chang-Wong Baek · Yong-Kweon Kim · Yoomin Ahn)

Abstract - Mechanical properties of electroplated gold microstructures were determined from the micromachined beam structures. Cantilever and bridge beam structures of different length were fabricated by electroplating-surface micromachining technique, which is specially designed to realize an anchor structure close to an ideal fixed-boundary condition. Fabricated beams were electrostatically excited and their resonance frequencies were measured by optical system composed of laser displacement meter with dynamic signal analyzer. Young's modulus and mean residual stress were calculated from the measured frequencies of microbeams. In addition, stress gradient was measured using deformation of released cantilever beam structure.

Key Words : Young's modulus, residual stress, stress gradient, electroplated gold, resonance frequency

1. 서 론

박막 재료의 미세 구조 및 여러 가지 물리 화학적 성질에 관한 연구는 금속 및 재료 화학 분야의 중요한 관심사가 되어 왔다. 특히 최근 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 분야가 발전함에 따라 박막 재료의 기계적 특성에 대한 관심도가 점차 증가하고 있다. MEMS 분야에서는 반도체 공정에서 확립된 여러 가지 제작 기법을 이용하여 마이크로 센서 및 액추에이터 등의 디바이스를 제작하게 되는데, 이 때 박막 재료들이 기계적 운동부로서 사용된다. 이러한 기계적 구동부는 구동 메커니즘에 의해 기계적인 변형을 겪게 되므로 사용되는 박막 재료의 영률이나 잔류 응력과 같은 기계적인 특성들이 제작된 디바이스의 성능이나 신뢰성, 내구성 등에 큰 영향을 미치게 된다.

그런데 이러한 박막 구조에서 나타나는 기계적 특성은 보통의 벌크 재료에서 보이는 특성과는 다른 값을 나타낼 수 있다[1,2]. 이러한 차이는 기본적으로는 박막의 성질이 박막 제조 공정에 매우 민감하게 변화하기 때문에 나타나게 된다. 또한 MEMS에서는 박막이 증착된 상태로만 사용되지 않고 구조물 형태로의 패터닝 공정을 거치거나, 기판으로부터 분리시켜 움직일 수 있게 하는 릴리즈 공정 등의 후속 공정들을 거치게 된다. 이러한 성막 후 공정들도 MEMS 박막 구조물의 기계적 특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 제작된 디바이스의 동작 특성을 정확히 알기 위해서는 제작이 완료된 후의 재료의 기계적 특성을 정확히 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 마이크로 빔 구조물의 공진 특성 및 릴리즈 후의 변형을 이용하여 전해 도금된 금 구조물의 기계적 특성을 측정하였다. 금의 경우 도금을 이용한 후막 제작이 용이하며 전기 전도도가 높아 최근 RF MEMS 분야에서 기계적인 구조물로서의 활용도가 점차 증가하고 있다[3,4]. 제작된 마이크로 구조물을 정전 구동하면서 공진 주파수를 측정하고 이로부터 구조물의 영률 및 잔류 응력을 추정하고, 릴리즈 후 외팔보의 변형의 크기를 측정하여 구조물 내부의 응력 기울기를 추정하였다.

2. 측정 이론

2.1 빔 구조물의 공진을 이용한 영률 및 잔류 응력 측정

본 논문에서는 간단한 형태의 빔 구조물의 특성을 이용하여 재료의 기계적 특성을 측정한다. 그림 1과 같이 이상적으로 고정된(clamped) 외팔보(cantilever) 및 양단 고정보(bridge) 구조물이 기계적으로 움직일 경우의 공진 주파수는 빔 구조물의 기하학적 형상과 재료의 밀도, 그리고 영률 및 잔류 응력과 같은 기계적인 특성에 의해 결정된다. 따라서 주어진 형상의 빔 구조물의 공진 주파수를 측정하면 이로부터 재료의 기계적 특성을 유추할 수 있다.

그림 1(a)의 외팔보의 경우에는 기판에서 빔을 릴리즈 시키면 빔의 한쪽 끝단이 자유롭게 움직일 수 있으므로 내부에 존재하는 빔 길이 방향 응력은 빔의 길이 방향 팽창이나 수축을 통해서 완화된다. 또한 빔의 두께 방향으로의 응력의 차이가 있을 경우에는 자유단의 휨 변형을 통해 내부 응

* 正 會 員 : 서울大 半導體 共同硏究所 特別硏究員 · 工博
** 正 會 員 : 서울大 電氣 · 컴퓨터工學部 副敎授 · 工博
*** 正 會 員 : 漢陽大 機械工學科 助敎授 · 工博
接受日字 : 2000年 10月 14日
最終完了 : 2001年 2月 9日

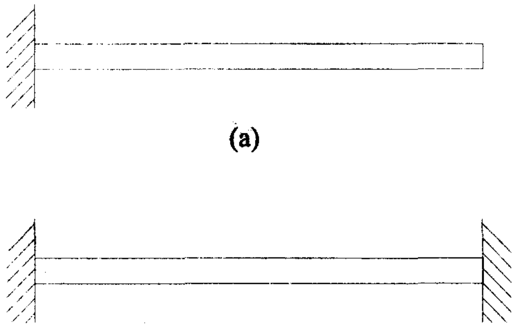


그림 1 이상적으로 고정된 마이크로 빔 구조물 : (a) 외팔보, (b) 양단 고정보

Fig. 1 Ideally clamped microbeams : (a) cantilever, (b) bridge

력이 완화된다. 따라서 외팔보의 경우에는 빔 내부의 잔류 응력에 의한 강성 변화 효과를 무시할 수 있다. 따라서 외팔보 빔 구조물의 1차 공진 주파수 f_c는 식 (1)과 같이 주어진다[5].

$$f_c = 0.16154\frac{h}{L^2}\sqrt{\frac{E_e}{\rho}} \qquad (1)$$

여기서 h는 빔의 두께, L은 빔의 길이를 나타내며 E_e는 재료의 유효 영률(effective Young's modulus), ρ는 재료의 밀도이다. 제작된 빔 구조물의 길이, 두께 및 사용된 재료의 밀도를 알고 제작된 마이크로 빔 구조물의 공진 주파수를 측정하면 식 (1) 로부터 재료의 유효 영률을 계산할 수 있다.

식 (1)에서 유효 영률 E_e는 빔의 형상에 따라 달라지게 된다. 빔의 폭 (w)이 빔의 두께에 비해 상대적으로 넓은 경우 빔은 평면 변형률(plane-strain) 조건 하에 놓이게 되어 폭 방향의 변형이 억제되는 효과를 고려하여야 한다[6-8]. 이 때 유효 영률은 포와송 비(Poisson's ratio)에 관계되어 변화하게 된다. 빔의 폭이 두께에 비해 충분히 큰 경우(약 $w>5h$) 유효 영률 E_e는 $E_e = E/(1-\nu^2)$로 표현된다[7]. 대개의 MEMS 구조물의 폭은 두께에 비해 큰 경우가 많기 때문에 실제의 특성 계산에 유효 영률 E_e를 사용하는 것이 일반적이다. 빔의 폭이 작은 ($w<5h$) 경우의 유효 영률 E_e는 E와 같게 된다.

그림 1(b)와 같이 양단이 고정되어 있는 빔 구조물의 횡진동은 외팔보의 경우와는 다른 거동을 보이게 된다. 양단이 고정된 빔에서는 끝단의 변형이 불가능하여 응력이 완화될 수 없으므로, 잔류 응력이 존재하는 경우 이러한 내부 응력이 빔의 강성을 변화시켜 공진 주파수의 변화를 일으키게 된다. 이 경우는 Rayleigh's energy method를 이용한 근사해를 구함으로서 공진 주파수의 식을 얻어낼 수 있다. 양단 고정보 구조물에 빔 길이 방향으로 작용하는 잔류 응력 σ_u가 전 빔 단면에 균일하게 존재하는 경우 빔의 1차 공진 주파수 f_b는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[9].

$$f_b = \frac{(4.730)^2}{2\pi\sqrt{12}}\frac{h}{L^2}\left(\frac{E_e}{\rho}\right)^{1/2}\left[1+0.295\frac{\sigma_u}{E_e}\left(\frac{L}{h}\right)^2\right]^{1/2} \qquad (2)$$

여기서 σ_u는 빔 내부에 존재하는 인장 잔류 응력을 나타낸다. 외팔보의 경우와 마찬가지로 빔의 폭이 두께에 비해 충분히 넓은 경우에는 증착된 상태의 박막에 존재하는 양축 응력(biaxial stress) σ_b를 빔 내부에서의 단축 응력(uniaxial stress) $\sigma_u = \sigma_b(1-\nu)$ 형태로 변환하여 식 (2)에 적용해야 한다[7,8]. 식 (2)로부터 빔 내부에 인장 잔류 응력이 존재하는 경우 양단 고정보의 공진 주파수는 응력이 없는 경우에 비해 증가하게 됨을 알 수 있다. σ_u가 음의 값인 압축 응력이 존재하는 경우 공진 주파수는 작아지게 된다. 따라서 제작된 양단 고정보의 공진 주파수를 측정하고, 식 (1)에서 얻어진 영률의 값을 사용하면 식 (2)로부터 빔 내부에 존재하는 잔류 응력의 종류 및 크기를 구할 수 있다.

2.2 외팔보의 휨 변형을 이용한 응력 기울기의 측정

일반적으로 박막 내부에는 증착되는 박막과 증착이 이루어지는 기판 사이의 열팽창 계수의 차이에 의해 발생하는 균일한 잔류 응력과, 박막/기판 계면으로 진행하는 원자의 확산이나 내부 결함(defect) 등의 원인에 의해 발생하는 두께 방향으로의 변화하는 응력이 공존하게 된다[10]. 식 (2)에 의한 잔류 응력 σ_u는 빔 단면에 두께 방향으로는 균일한 크기의 응력이 존재한다는 가정하에 구하였으므로 빔 내부에 존재하는 응력 분포의 평균값을 나타낸다. 그러나 대부분의 경우 실제 박막 내부의 응력 분포는 균일하지 않고 두께 방향으로 응력의 차이가 존재하게 된다. 이러한 불균일한 응력 분포는 마이크로 구조물이 릴리즈되었을 때 구조물에 그림 2와 같은 휨 변형을 일으키면서 완화된다. 이로 인해 발생하는 구조물의 변형은 정전 구동시의 문턱 전압과 같은 전기, 기계적인 구동 특성을 변화시켜 디바이스의 특성이 설계값과 다르게 나타나는 원인이 되므로 이를 줄이는 방향으로 공정이 진행되어야 한다.

이러한 두께 방향으로의 응력 변화의 크기는 제작된 외팔보 형태의 마이크로 빔이 릴리즈된 후의 휨 변형의 크기로부터 계산할 수 있다. 두께 방향으로의 응력 분포의 변화가 선형적이라고 가정하면 응력 기울기(stress gradient) σ'은 빔에 작용하는 굽힘 모멘트와 휨 변형의 크기의 관계식으로부터 얻어낼 수 있으며, 식 (3)과 같이 주어진다[11].

$$\sigma' = \frac{d\sigma}{dy} = \frac{2E'\delta}{L^2} \qquad (3)$$

여기서 δ는 자유단이 중성면으로부터 두께 방향으로 변형된 최대 크기를 나타낸다. 따라서 두께 방향으로의 응력 변

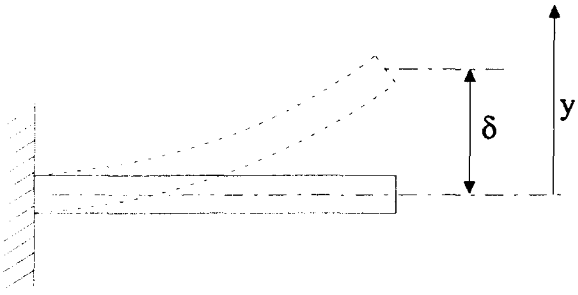


그림 2 구조물 내부의 응력 기울기에 의한 외팔보의 변형

Fig. 2 Bending of the cantilever due to the internal stress gradient

화가 선형적이라면 외팔보의 끝단의 변형량은 빔의 두께와 무관하게 영률과 빔 길이만으로 결정된다. 따라서 외팔보의 빔 길이를 알고 자유단의 변형량을 측정하면 응력 기울기를 계산할 수 있으며, 빔 내부에서의 개략적인 응력 분포를 예측할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 전해 도금을 이용한 마이크로 빔 구조물 제작

제안한 방법으로 기계적 특성을 측정하기 위해 감광막 회생층 및 금 전해 도금 공정을 이용하여 그림 3과 같은 형태의 정전 구동이 가능한 마이크로 빔 구조물을 제작하였다. 지지부(anchor) 전극과 빔 하부의 구동 전극간에 전압을 인가하여 정전력에 의해 빔이 하부로 움직일 수 있으며, 구동 전극 위에 절연층을 형성하여 구동시 전기적 단락을 방지할 수 있도록 하였다. 빔의 폭은 공진 주파수 검출시 사용할 광학계의 사양을 고려하여 100 ㎛로 하였으며, 100~1000 ㎛ 범위의 다양한 길이를 가지는 빔 구조물을 제작하였다. 그림 4에는 구조물 제작을 위한 전체 공정도를 나타냈다. (100) 실리콘 기판 위에 절연을 위한 산화막을 형성한 후 지지부 및 구동 전극용 도금 기반층을 증착하고 패터닝한다(그림 4(a)). 그 위에 전극간 단락 및 감광제 잔류물 제거를 위한 산화막을 형성하고(그림 4(b)), 감광막을 코팅하고 열처리하여 6.6 ㎛ 두께의 회생층을 형성한다(그림 4(c)). 회생층 위에 빔 부분 도금을 위한 상부 기반층을 증착, 패터닝하고 회생층 패터닝을 위한 건식 식각 마스크로 산화막을 올린 후 지지부 부분만을 식각한다(그림 4(d)). 이방성 O_2 RIE 공정으로 지지부를 식각하고 식각 마스크로 사용된 산화막과 RIE 후 드러난 하부의 산화막 층을 습식 식각하여 제거한다(그림 4(e)). 이 과정으로 RIE 후 하부 산화막 위에 존재하는 감광막 찌꺼기들을 효율적으로 제거할 수 있다[12]. 다음은 전체 구조물 도금을 위해 후막 감광막을 코팅 후 현상하여 지지부 및 빔 형상의 도금틀을 형성하고(그림 4(f)), 금 도금을 행한다(그림 4(g)). 마지막으로 도금틀을 아세톤으로 제거한 후 구조물 릴리즈를 위해 감광막 회생층을 등방성 산소 플라즈마 애싱(ashing) 공정을 사용하여 제거하면 구동 가능한 빔 구조물이 얻어진다(그림 4(h)).

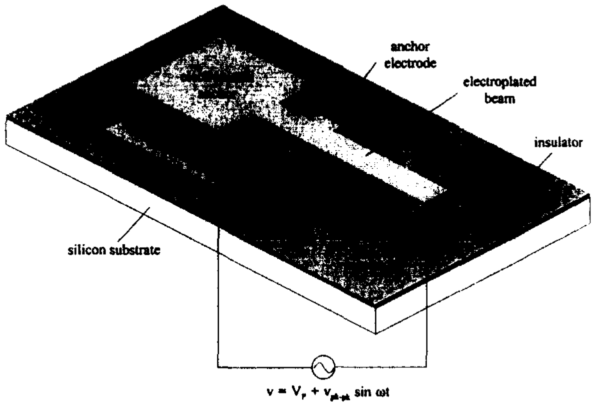


그림 3 기계적 특성 측정을 위한 실험용 빔 구조물의 개략도

Fig. 3 Schematic view of test beam structure for the measurement of mechanical property

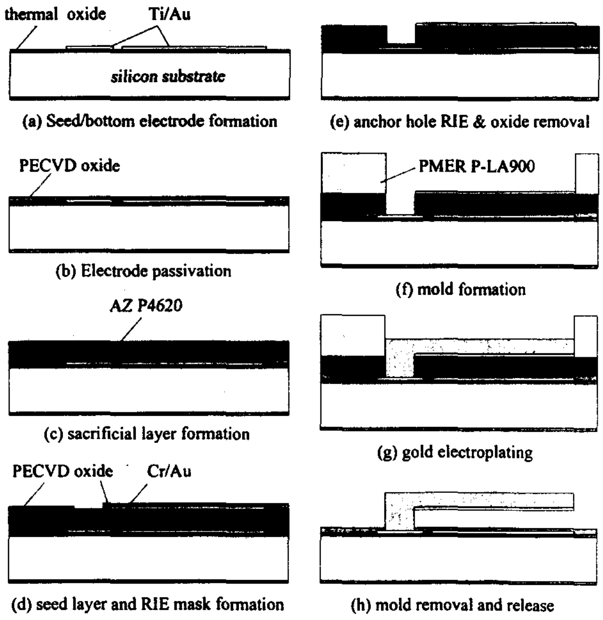


그림 4 제작 공정도

Fig. 4 Fabrication process flow

금 전해 도금에는 도금틀로 사용한 감광막의 손상을 방지할 수 있도록 상용 중성 금 도금액(NEUTRONEX210, EEJA)을 사용하였다. 자체 제작한 도금조를 사용하여 용액의 기계적 교반을 행하면서 65 ℃의 온도에서 도금을 행하였으며, 전류 밀도에 따른 변화를 알아보기 위해 2 또는 4 mA/cm^2의 두 가지 조건에서 도금하였다. 일반적 표면 마이크로머시닝 기술로 빔 구조물을 제작할 경우 지지부가 완만한 형상으로 나타나므로 스프링 효과에 의한 공진 주파수 변화가 발생할 수 있다. 이와 같은 현상을 줄이기 위해 빔 구조물 도금에 있어서 그림 4의 제작 공정과 같이 지지부 및 빔 구조물 부분의 도금 기반층을 따로 형성하는 방법을 사용하였다[13]. 그림 4(a)와 4(d)와 같이 지지부와 구조물부의 도금

기반층을 분리해 놓은 후, 도금시 지지부 전극에만 전류를 인가한다. 이 경우 지지부 주위는 도금틀에 의해 막혀 있으므로 성장하는 금속막은 지지부에만 성장하게 된다. 시간이 지나 도금막이 희생층 두께만큼 성장하게 되면 희생층 위에 형성해 놓은 빔 구조물을 위한 기반층과 전기적으로 연결되므로, 이 때부터는 지지부와 빔 구조물부가 같은 높이로 동시에 성장하게 된다. 따라서 최종적인 구조물은 일반적 경우와 다르게 수직 스프링이 없어진 이상적 형상의 구현이 가능하다.

3.2. 공진 주파수 측정 장치 구성

그림 5에는 인가된 전압에 의해 빔 구조물이 기판과 수직한 방향으로 구동될 때의 움직임을 측정하기 위해 구성한 광학 측정 시스템의 개략도를 나타냈다. 빔 구조물의 움직임은 비접촉식 레이저 변위계(non-contact laser displacement meter, LC2420, KEYENCE)를 이용하여 검출하였다. 사용된 레이저 변위계는 position-sensitive photodiode를 이용하여 측정 대상이 움직인 변위를 검출할 수 있고, 측정 가능한 변위의 해상도는 0.01 ㎛, 샘플링 주파수는 50 kHz 이다. 측정할 시편을 PCB 기판에 고정시킨 후 와이어 본딩(wire bonding)하여 외부에서 전압을 인가할 수 있도록 한 후, XYZ 스테이지에 고정시킨다. 공진 주파수의 측정을 위해서는 동신호 분석기(dynamic signal analyzer, HP 35670A, Hewlett-Packard)를 이용하였다. 신호 분석기 내에서 가변하는 주파수를 가지는 정현파 전압을 발생시키게 되고, 이 신호를 전압 증폭기를 이용하여 증폭한 후 빔 구조물에 인가한다. 이와 동시에 증폭 전의 구동 전압과 레이저 변위계에서 검출된 빔 변위 출력 신호를 신호 분석기에 입력하면, 구동 전압에 대한 변위 출력 전압의 비를 계산하여 주파수 특성 곡선을 얻을 수 있다. 주파수 특성 곡선에서 출력 변위가 최대가 되면서 위상이 변화하는 점이 공진 주파수가 된다.

4. 실험 결과 및 검토

4.1. 구조물 제작 결과

그림 6에는 최종적으로 희생층 제거가 완료되어 기판으로부터 완전히 분리된 빔 구조물의 전자 현미경 사진을 나타냈다. 그림 6(a)와 6(b)에서처럼 외팔보 및 양단 고정보 구조물을 성공적으로 제작하였다. 그림 6(a)와 같이 외팔보 형태의 구조물의 경우 릴리즈 후 기판 위쪽 방향으로 휨 변형이 나타난 것을 볼 수 있으며, 양단 고정보 구조물의 경우에는 빔 자체의 휨 변형이 없이 완전히 편평한 상태로 구조물이 릴리즈되었다. 그림 6(c)에는 제안된 공정에 의해 제작된 지지부 형상의 확대 사진을 나타냈다. 공정에서 의도한 것처럼 빔 구조물의 상단과 지지부 상단이 편평한 상태로 같은 높이로 도금되어 있음을 확인할 수 있으며, 제작된 형상은 이상적으로 고정된 지지부 형상에 가깝게 제작되었다. 제안된 제작 공정을 사용하면 지지부의 스프링 효과[14]에 의해 나타날 수 있는 공진 주파수의 변화를 줄일 수 있다.

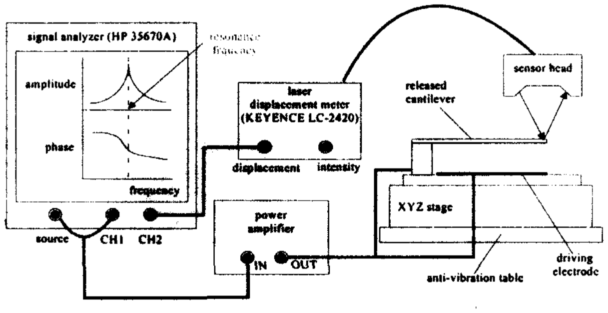


그림 5 공진 주파수 검출을 위한 측정 시스템의 개략도
Fig. 5 Schematic diagram of measurement system for resonance frequency detection

4.2. 측정 결과

4.2.1. 전해 도금된 외팔보의 휨 변형

그림 6(a)에서와 같이 빔 내부에 존재하는 두께 방향으로의 응력 분포 차이에 의해 릴리즈 후 모든 외팔보 구조물에 휨 변형이 발생하였다. 제작된 빔은 모두 기판에서 멀어지는 방향으로 휨 변형을 나타내었으며, 이로부터 빔 구조물은 밑면 쪽은 압축 응력을, 윗면 쪽은 인장 응력을 가짐을 알 수 있다[10]. 그림 7에는 같은 식각 조건에서 120 분간 플라즈마 애싱하여 릴리즈된 경우, 레이저 프로파일러(VF-7500, KEYENCE)로 측정한 외팔보의 자유단 휨 변형의 크기를 나타냈다. 시편 A~C는 2 mA/cm^{2}의 전류 밀도에서, 시편 D~F는 4 mA/cm^{2}의 전류 밀도로 도금하였으며, 애싱시에 발생하는 열 효과를 감소시키기 위해 5분 식각, 5분 휴식의 과정을 반복하여 릴리즈를 행하였다. 그림에서 나타난 것처럼 빔의 길이가 증가함에 따라 휨 변형이 점차 커지는 것을 볼 수 있다. 같은 전류 밀도에서 도금된 경우, 시편에 따라 길이가 같은 빔인 경우에도 휨 변형의 크기는 차이를 나타내고 있으나 한 시편 내부에서 길이의 증가에 따른 변형의 크기는 식 (3)에서 예측한 것처럼 길이의 제곱에 비례하여 커지는 경향을 보이고 있다. 전류 밀도가 2 mA/cm^{2}에서 4 mA/cm^{2}로 증가한 경우에는 같은 식각 조건에서 릴리즈했을 때 휨 변형의 크기가 약 2 배 정도 커지는것을 볼 수 있다. 두께 방향 응력 분포를 선형이라고 가정하고 빔 두께 차이를 무시하면 전류 밀도가 증가한 경우 빔 내부의 응력 기울기의 크기가 증가하였음을 알 수 있다.

4.2.2. 플라즈마 애싱 시간에 따른 외팔보 휨 변형의 변화

도금 구조물 자체 제작시 형성되는 내부 잔류 응력은 후속 공정에 의해 변화될 수가 있다. 본 논문에서는 구조물의 릴리즈를 위해 플라즈마 애싱을 사용하였는데 그림 8에는 같은 시편의 애싱 시간을 증가시켰을 때 측정된 외팔보 자유단의 변형을 나타냈다. 그림에서 명확히 나타나는 것과 같이 식각 시간이 증가함에 따라 빔의 변형도 따라서 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. 릴리즈된 빔 내부에 존재하는

(a)

(b)

(c)

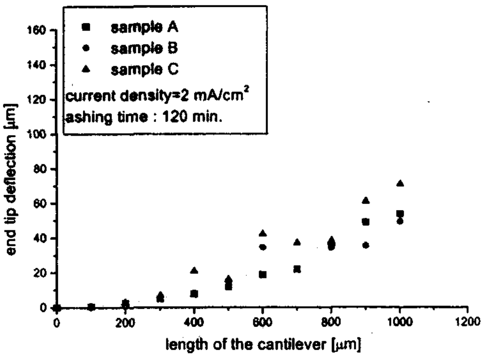
그림 6 릴리즈된 금 마이크로 구조물의 전자현미경 사진 : (a) 외팔보 (b) 양단 고정보 (c) 지지부를 확대한 모습

Fig. 6 SEM photographs of released gold microstructure : (a) cantilevers (b) bridges (c) magnified view of anchor part

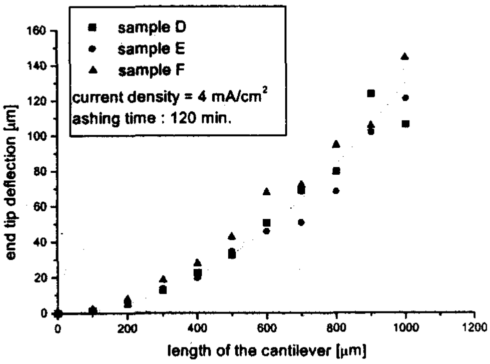
응력이 전해 도금시에 형성된 응력만을 가지고 있다면 릴리즈 시간에 관계없이 동일한 크기의 휨 변형을 나타내어야 한다. 위 실험 결과로부터 희생층 건식 식각 공정이 빔 내부의 응력 분포에 영향을 미쳐 응력 기울기가 증가하였음을 알 수 있으며, 이러한 현상은 플라즈마 식각 장비 내에서 공정 중에 발생하는 열응력에 의해 발생하게 된다.

4.2.3. 영률의 측정

영률의 측정을 위해 도금된 외팔보 구조물과 구동 전극 사이에 주파수가 가변되는 정현파 전압을 인가하면서 외팔보 끝단에서 측정된 변위 신호를 동신호 분석기로 분석하여 빔 구조물의 공진 주파수를 측정하였다. 외팔보 측정시 바이어스 전압 V_P = 5 V, 구동 전압 v_{pk-pk} = 800 mV를



(a)



(b)

그림 7 120분간 플라즈마 애싱한 후의 외팔보의 끝단 변형량 : (a) 2 mA/cm^{2}로 도금된 경우, (b) 4 mA/cm^{2}로 도금된 경우

Fig. 7 End-tip deflections of cantilever beams after 120 min. plasma ashing : (a) samples plated at 2 mA/cm^2, (b) samples plated at 4 mA/cm^2

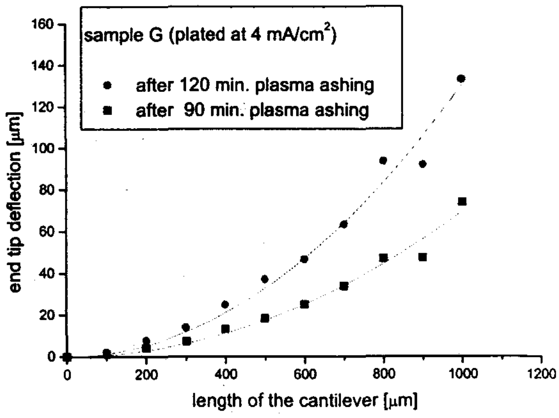


그림 8 애싱 시간이 증가하였을 경우의 외팔보 끝단 변형량의 변화

Fig. 8 Change of end-tip deflection of cantilever beam in a sample when the ashing time is increased.

인가하였으며, 사용한 가변 주파수 대역은 0~6.4 kHz 이다. 그림 9에는 주파수 측정의 예로 길이 800 ㎛의 외팔보에서 얻은 주파수 특성 곡선을 나타냈다. 진폭이 최대가 되는 점의 주파수는 1304 Hz이고, 이 때 위상이 급격하게 변하는 것을 볼 수 있으며 이 점을 공진 주파수로 정할 수 있다. 주파수 측정의 해상도는 주어진 대역에서 ± 8 Hz 이다. 단일 빔 측정에 의해서 나타나는 측정 오차를 줄이기 위하여 빔 길이가 600~1000 ㎛ 범위 내에 있는 4개 이상의 빔에 대해 공진 주파수를 측정하고 그림 10과 같이 측정된 데이터를 $f-L^{-2}$ 평면에 나타낸 후 선형 근사에 의해 평균하여 영률을 측정하였다.

표 1에는 이와 같은 방법으로 측정한 각 시편의 유효 영률 E_e 및 금의 포와손 비를 ν=0.4로 보았을 때의 영률 E의 값을 나타냈다. 계산에 사용된 밀도는 도금액 제조 회사에서 제공한 값인 19.2 g/cm^{3}를 사용하였다. 벌크 금 소재의 알려진 영률의 값인 80 GPa에 비해 측정한 값은 약 절반 정도의 값을 보이고 있으며, 박막 소재에 대해 측정한 타 논문들에서 보고된 값(39~78 GPa)[15,16]과 비교해 보면 비교적 낮은 영역의 값을 보이고 있다. 벌크 값과 측정된 영률의 차이는 도금되는 재료가 주상(columnar)으로 성장하면서 두께 방향과 빔 길이 방향으로 결정립 크기가 서로 달라지기 때문에 생기는 이방성 때문으로 생각된다[17]. 또한 표 1에서 전류 밀도가 증가한 경우 영률이 약간 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이것은 전류 밀도 변화에 따른 밀도의 차이와 그레인 크기의 변화 등에 기인한 것으로 생각된다. 그러나 레이저 프로파일러(VF-7500, KEYENCE)로 측정한 석

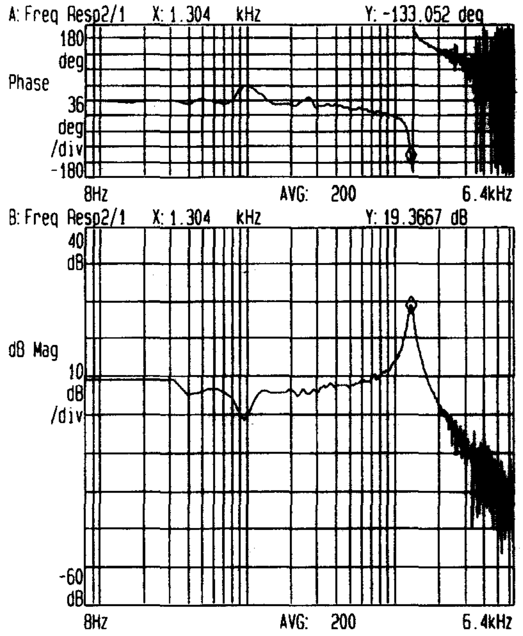


그림 9 외팔보의 주파수 특성 곡선의 측정 예 (빔 길이 L = 800 ㎛, 시편 B의 경우)

Fig. 9 Typical frequency response curve of a cantilever beam (L = 800 ㎛ in sample B)

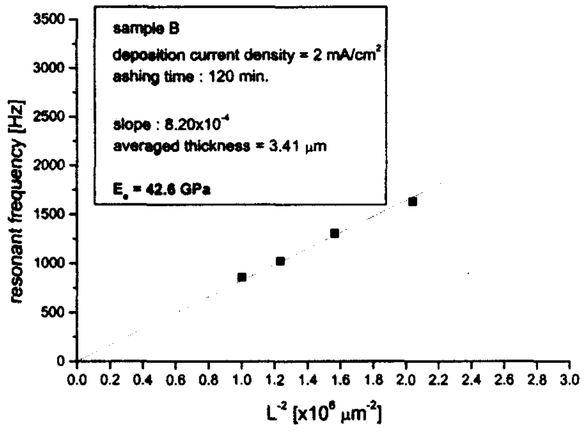


그림 10 선형 근사를 이용한 영률의 계산 예 (시편 B의 경우)

Fig. 10 Calculation example of Young's modulus using linearization method (for sample B)

표 1 측정된 영률

Table 1 Measured Young's modulus

sample ID	averaged beam thickness [㎛]	deposition current density [mA/cm^2]	$E_e = E/(1-\nu^2)$ [GPa]	E [GPa]
A	3.30	2	41.9	35.2
B	3.41		42.6	35.8
C	3.34		44.5	37.4
D	4.05	4	52.3	43.9
E	4.21		52.1	43.8
F	4.00		48.8	40.1

출물의 표면 거칠기는 R_a~0.056 ㎛ 정도로 전류 밀도에 따라 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 사용된 금 도금액의 전류 밀도 허용 범위가 좁아(1~4 mA/cm^2) 실험한 두 가지 전류 밀도 조건에서는 특성에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 생각된다. 영률이 차이가 나는 정확한 원인을 알기 위해서는 마이크로 구조에 대한 좀 더 세밀한 분석이 요구된다.

4.2.4. 평균 잔류 응력의 측정

평균 잔류 응력의 측정을 위해 외팔보의 경우와 마찬가지 방식으로 양단 고정보 구조물의 공진 주파수를 측정하였다. 양단 고정보는 외팔보에 비해 강성이 증가하여 높은 구동 전압이 필요하므로 바이어스 전압 V_P = 28 V에 v_{pk-pk} = 4 V의 전압을 인가하였으며, 가변 주파수 대역은 0~51.2

kHz 까지로 이 때 얻을 수 있는 측정 해상도는 ±128 Hz 이었다. 측정된 공진 주파수를 식 (2)에 대입하고, 외팔보 공진 실험으로 측정된 영률을 사용하여 평균 잔류 응력을 계산하였다. 측정값은 빔 길이 700~1000 ㎛ 범위 내의 3개의 데이터를 평균하여 결정하였으며, 표 2에 계산된 평균 잔류 응력을 나타냈다. 측정된 평균 잔류 응력은 모두 인장 응력으로 나타났으며, 시편에 관계없이 거의 비슷한 값을 보이고 전류 밀도 변화에 의한 심각한 평균 잔류 응력의 변화는 관찰되지 않았다.

4.2.5. 응력 기울기의 측정

4.2.1절에서 측정한 외팔보의 자유단 변형량을 이용하여 응력 기울기 σ'를 계산하였다. 두께 방향 응력 변형이 선형이며 도금시 모든 빔이 같은 응력 분포를 가지도록 도금되었다면 식 (3)으로부터 빔의 길이 L과 측정된 빔의 자유단 변위 δ는 2차 함수 관계를 가져야 한다. 앞서와 마찬가지로 단일 빔 측정에서 나타나는 오차를 줄이기 위해 응력 기울기의 평균치를 구하였다. 그림 11과 같이 $L-\delta$ 평면상에 개별 빔에서 측정된 끝단 변위를 도시한 후, 2차 함수 $y=ax^2$의 형태로 최소 자승법을 이용해 근사시키면 2차항의 계수 $a=\sigma'/2E_e$으로 표현되므로, 이로부터 응력 기울기를 계산할 수 있다. 측정된 자유단 변위는 2차원 곡선을 비교적 잘 따르고 있으며, 내부 응력 분포가 선형적 응력 기울기의 가정에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있다.

표 3에는 측정된 응력 기울기의 값을 나타냈는데 같은 전류 밀도에서 도금된 시편 내에서는 응력 기울기의 평균을 고려하면 같은 도금 조건 내에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 전류 밀도가 증가하면 식각 시간이 같은 경우에도 변형이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 결과로부터 희생층 식각 과정에서 나타나는 외부의 열응력 효과가 같다고 볼 때 도금 과정에서 형성되는 두께 방향의 응력의 변화가 전류 밀도가 높은 경우에 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.

표 2 측정된 평균 잔류 응력
Table 2 Measured mean residual stress

sample ID	current density [mA/cm²]	$\sigma_u=\sigma_b(1-\nu)$ [MPa]	σ_b [MPa]
A	2	43.8	73.0
B		44.1	73.5
C		43.7	72.8
D	4	40.1	66.8
E		41.7	69.5
F		44.1	73.5

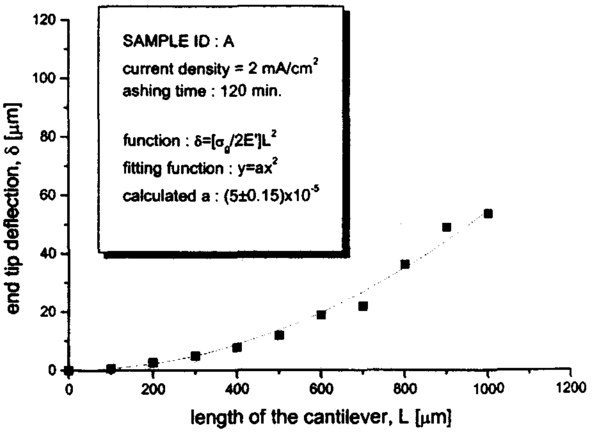


그림 11 최소 자승법에 의한 응력 기울기의 계산 예 (시편 A의 경우)
Fig. 11 Calculation example of stress gradient using second-order least square fit (for sample A)

표 3 측정된 응력 기울기
Table 3 Measured stress gradient

sample ID	current density [mA/cm²]	mean stress gradient, σ' [MPa/㎛]
A	2	4.19
B		4.26
C		6.23
E	4	13.6
F		12.5
G		12.7

5. 측정 결과 고찰

영률 측정을 위하여 제작된 실제의 마이크로 외팔보 구조물의 형상은 그림 1(a)와 같은 이상적인 형상에서 약간 벗어나 그림 2에서와 같이 휨 변형이 존재하며, 그림 3에서와 같이 빔지지 부위에서 위면 쪽으로의 완벽한 구속(clamping)을 얻을 수 없다. 이와 같은 형상 오차 때문에 영률 측정 값에 대한 오차가 존재할 수가 있다. 그리고 빔의 휨 변형 형성이 잔류 응력에 의한 것이라고 한다면, 잔류 응력 형성이 이루어지기 위해서는 빔 구조물 내에서 소성변형이 수반되어야 한다. 이와 같이 구조물 내에 소성변형 영역이 형성된다면 영률 측정에 있어 오차가 발생할 수가 있다. 이와 같은 현상들에 의한 오차 발생 정도를 알아보기 위하여 유한요소법(FEM)에 의한 공진 주파수 해석을 수행하였다.

세 가지 형태의 FEM 해석이 수행되었다. 첫 번째로 그림 3에서와 같이 측정용 구조물로 설계된 형태에 대해서 1차

공진 주파수를 구해보았다. 이 경우에는 구조물에 전혀 휨 변형이 없으며 구조물 내의 잔류 응력, 즉 소성 변형 영역이 존재하지 않는다고 가정하였다. 두 번째 경우에는 구조물 내에 잔류 응력과 소성 변형은 없지만 실제 제작된 구조물에서 얻어진 만큼의 휨 변형이 있는 구조물에 대해서 해석을 수행하였다. 마지막으로 구조물 내에 소성 변형에 의한 잔류 응력이 존재하는 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 잔류 응력을 발생시키기 위해서 빔 자유단 끝 부분에 두께 방향으로 외력을 가하여 빔을 소성 변형 시켰다. 이 과정에서 빔 끝단에서의 변형량이 실제 제작된 측정용 구조물에서 얻어진 변형량과 비교해 오차가 1 % 이내가 되도록 외력의 크기를 조절하였다. 이렇게 얻어진 잔류 응력 분포는 실제 제작 공정에 의해 형성되는 잔류 응력의 형태를 완전히 동일하게 구현할 수는 없으나, 이렇게 해석한 경우가 실제 제작된 구조물 내부의 소성 변형량을 가장 가깝게 모사할 수 있다. 따라서 위의 세 가지 경우의 FEM 해석 결과를 비교함으로서 이론적 형상으로부터 벗어나는 실제 구조물 상태가 공진 주파수에 미치는 영향을 예측할 수 있다.

해석을 위하여 사용된 금 소재의 기계적 물성값은 측정된 값을 사용하지 않고 벌크 재료의 값을 사용하였다. 계산에 사용된 영률은 82 GPa, 포와송 비는 0.4, 항복 강도는 40 MPa, 인장강도는 220 MPa, 연신율은 0.5, 밀도는 19.3 g/cm^3 이다[18]. 유한 요소 해석을 위해 상용 기계 해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 해석 모델은 그림 12와 같으며 절점 수가 20 개인 3차원 solid 요소를 사용하였다. 이는 quadratic 요소로서 적은 요소 수로도 빔의 휨을 정확하게 계산하기에 적합하다. 요소 수는 고정부 본체의 경우 길이 방향으로 5 개, 폭 방향으로 12 개, 두께 방향으로 5 개의 요소, 즉 총 300 개의 요소이고 빔은 길이 방향으로 15 개, 폭 방향으로 4 개, 두께 방향으로 2 개의 요소, 즉 총 120 개의 요소를 사용하였다. 경계 조건으로는 고정부 본체의 바닥면의 변위만을 고정시켰다.

해석결과에 의하면 빔 길이가 길어질수록 각 세 가지 우간의 고유진동수 차이가 커지지만, 상대 오차가 모두 1 % 이내로서 별다른 차이가 없음이 밝혀졌다. 따라서 본 실험의 경우에 잔류 응력 즉 소성 변형이나 휨 변형이 존재함에

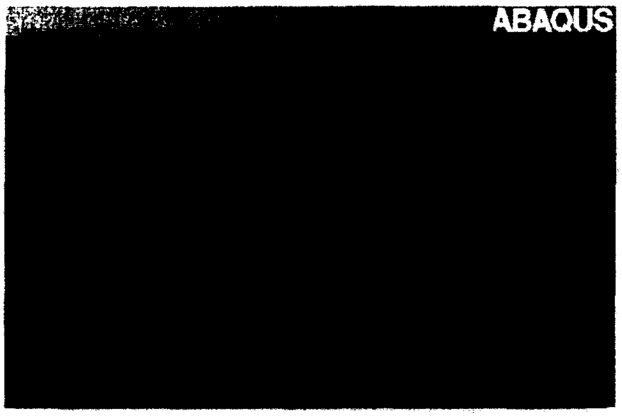


그림 12 제작된 외팔보 빔의 유한 요소 해석 모델
Fig. 12 Finite element modeling of the fabricated cantilever beam

따른 공진 주파수의 변화는 무시할 만하다고 하겠다. 실제 제작된 빔 상태에 가장 가깝다고 할 수 있는 세 번째 해석 결과와, 실제 영률 계산에 사용한 이상적인 오일러 빔 이론에 기초한 식 (1)을 이용한 해석 결과를 비교한 결과를 표 4 및 그림 13에 나타냈다. 두 가지 전류 밀도 조건 모두에 대해서 살펴보면, 식 (1)에 의한 해석 결과가 유한 요소법에 의한 결과보다 약간씩 크게 얻어지고 있다. 빔 길이가 커질수록 두 해석결과 간의 차이가 커지는 경향을 보이고 있으며, 상대 오차 범위는 1~7 % 정도이다. 따라서 본 실험에서 공진 주파수 측정에 의해 얻어진 영률 값에는 최대 약 7% 정도의 오차가 있는 것으로 추정된다. 표 5에는 실험 데이터로부터 얻어진 전해 도금된 금 재료의 기계적 특성을 정리하였다.

표 4 이상적 오일러 빔과 실제 변형된 빔의 공진 주파수
Table 4 Resonance frequency data of ideal Euler beam and actual curled beam

beam length [㎛]	resonance frequency [Hz]			
	current density = 2 mA/cm²		current density = 4 mA/cm²	
	Euler beam	curled beam with stress	Euler beam	curled beam with stress
100	121585	119608	148333.6	145343
200	30396	29490	37083.4	35884
300	13509	12977	16481.5	15816
400	7599	7255.2	9270.9	8849.5
500	4863.4	4624.7	5933.3	5647.5
600	3377.4	3202.5	4120.4	3917
700	2481.3	2347.8	3027.3	2870.7
800	1899.8	1794.5	2317.7	2196.3
900	1501	1416	1831.3	1737.7
1000	1215.85	1145.6	1483.3	1406

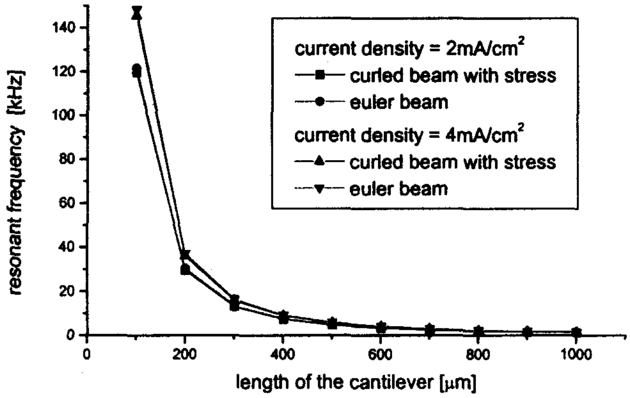


그림 13 잔류 응력이 존재하고 휨 변형된 외팔보와 이상적 오일러 빔의 경우에 대해 계산된 공진 주파수
Fig. 13 Calculated resonance frequencies of curled beam with residual stress and ideal Euler beam

표 5 측정된 전해 도금된 금의 기계적 특성의 요약
Table 4 Summary of the measured mechanical properties of electroplated gold

current density [mA/cm^2]	E_e [GPa]	σ_u [MPa]	stress gradient, σ' [MPa/㎛]
2	43±0.7	43.9±0.1	4.9±0.7
4	51±1.1	42.0±1.2	12.9±0.3

6. 결 론

전해 도금된 마이크로 금 구조물의 기계적 특성을 빔 구조물의 공진 특성 및 외팔보의 휨 변형을 이용하여 측정하였다. 릴리즈된 후의 빔 구조물은 기판에서 멀어지는 방향으로 휨 변형을 일으켰으며, 이로부터 양의 응력 기울기를 가짐을 알 수 있었다. 측정된 영률은 벌크 재료의 영률에 비해 낮은 값을 나타냈다. 또한 전류 밀도에 따라 영률이 다소 증가하는 경향을 보였는데, 이러한 영률값의 차이는 도금 구조물의 이방성 특징에 의해 나타나는 것으로 생각된다. 측정된 평균 잔류 응력은 인장력으로 나타났으며 도금 조건에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나, 두께 방향의 응력 기울기는 전류 밀도가 커짐에 따라 크게 증가하였다. 수치 해석 결과 실제 제작된 구조물의 형상 변화에 의한 측정 오차는 상대적으로 작은 것으로 나타났으며, 해석적인 식으로부터 얻어진 영률 측정 결과는 최대 7 % 정도의 측정 오차를 가지는 것으로 예상된다. 본 실험으로부터 구조물 형성 전·후 공정에 의해 발생하는 모든 특성의 변화를 포함하는 재료의 기계적 특성을 정확히 알 수 있었으며, 동일한 공정에 의해 제작되는 마이크로 구조물의 동작 특성을 예측하는 데 매우 유용한 방법으로 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정연구과제 연구비 지원(과제번호 : 96-0102-10-1-3)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] W. D. Nix, "Mechanical properties of thin films," *Metallur. Trans. A*, Vol. 20A, pp. 2217-2245, 1989.
[2] F. R. Brotzen, "Mechanical testing of thin films," *Int. Mater. Rev.*, Vol. 39, No. 1, pp. 24-44, 1994
[3] J. -H. Park, H. -T. Kim, Y. Kwon and Y. -K. Kim, "A tunable millimeter-wave filter using coplanar waveguide and micromachined variable capacitors," Digest of Papers, *Transducer 99'*, Sendai, Japan, 1999, pp. 1272-1275.
[4] J. Y. Park, G. H. Kim, K. W. Chung and J. U. Bu, "Electroplated RF MEMS capacitive switch," *Proc. IEEE MEMS*, Miyazaki, Japan, 2000, pp. 639-644.
[5] X. Y. Ye, Z. Y. Zhou, Y. Yang, J. H. Zhang and J. Yao, "Determination of the mechanical properties of microstructures," *Sensors and Actuators*, A 54, pp. 750-754, 1996.
[6] S. Timoshenko, *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, New York, 1987, pp. 4-6, 118, 125.
[7] P. M. Osterberg and S. D. Senturial, "M-TEST : A test chip for MEMS material property measurement using electrostatically actuated test structures," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 6, No. 2, pp. 107-118, 1997.
[8] S. Bouwstra and B. Geijselaers, "On the resonance frequencies of microbridges," *Transducers 91'*, 1991, pp. 538-542.
[9] H. A. C. Tillmans and R. Legtenberg, "Electrostatically driven vacuum-encapsulated polysilicon resonators, Part II. Theory and performance," *Sensors and Actuators*, A 45, pp. 67-84, 1994.
[10] W. Fang, "Determining mean and gradient residual stresses in thin films using micromachined cantilevers," *J. Micromech. Microeng.*, 6, pp. 301-309, 1996.
[11] F. Ericson, S. Greek, J. Soderkvist and J. -A. Schweitz, "High-sensitivity surface micromachined structures for internal stress and stress gradient evaluation," *J. Micromech. Microeng.*, 7, pp. 30-36, 1997.
[12] 백창욱, 김용권, "미세 도금틀 형성을 위한 폴리이미드의 이방성 O_2 RIE 식각에 관한 연구," 대한 전기학회 논문지, Vol. 46, No. 2, pp. 298-300, 1997.
[13] C. -W. Baek, Y. -K. Kim and Y. -M. Ahn, "Mechanical property measurement of electroplated gold microstructure using resonance method," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (to be published).
[14] J. J. -Y. Gill, L. V. Ngo, P. R. Nelson and C. -J. Kim, "Elimination of extra spring effect at the step-up anchor of surface micromachined structure," *J. Microelectromech. Syst.*, Vol. 7, No. 1, pp. 114-121, 1998.
[15] C. A. Neugebauer, *J. Appl. Phys.*, 31(6), pp. 1096-1101, 1960.
[16] T. P. Weihs, S. Hong, J. C. Bravman and W. D. Nix, "Mechanical deflection of cantilever microbeams : A new technique for testing the mechanical properties of thin films," *J. Mater. Res.* 3(5), pp. 931-942, 1988.
[17] W. N. Sharpe Jr., D. A. Lavan, and R. L. Edwards, "Mechanical properties of LIGA-deposited nickel for MEMS transducers," *Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers 97')*, Chicago, June 1997, pp. 607-610.
[18] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, Engineering Materials 1, Pergamon, Oxford, 1980.[1] A. Ghosh, S. Devadas, K. Keutzer and J. White, "Estimation of Average Switching Activity in Combinational and Sequential Circuits," *ACM/IEE Design Automation Conf.*, pp. 253-259, 1992.

저 자 소 개

백 창 욱 (白 昌 煜)

1970년 11월 12일생. 1993년 서울대 전기공학과 졸업. 2000년 서울대 전기·컴퓨터 공학부 대학원 졸업(공박). 현재 서울대학교 반도체 공동연구소 특별연구원

Tel : 02-880-8482, Fax : 02-880-8483
E-mail : baekrose@chollian.net

김 용 권 (金 容 權)

1960년 10월 23일생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 동경대학교 전기공학과 대학원 졸업(공박). 1990~1992년 히타치 중앙연구소 연구원. 현재 서울대 전기·컴퓨터공학부 부교수.

Tel : 02-880-7440, Fax : 02-873-9953
E-mail : yongkkim@chollian.net

안 유 민 (安 裕 民)

1961년 2월 2일생. 1984년 서울대 기계설계학과 졸업. 1992년 Purdue대 산업공학과 대학원 졸업(공박). 1993~1994년 서울대 정밀기계설계공동연구소 특별연구원. 현재 한양대 기계공학과 조교수.

Tel : 031-400-5281, Fax : 031-406-5550
E-mail : ahnym@email.hanyang.ac.kr