

## 니켈 박막의 공정조건에 따른 탄성계수 변화

김상현<sup>#</sup>

### Sensitivity of Electroplating Conditions on Young's Modulus of Thin Film

Sang-Hyun Kim<sup>#</sup>

#### ABSTRACT

Young's modulus of electroplated nickel thin film is systematically investigated using the resonance method of atomic force microscope. Thin layers of nickel to be measured are electroplated onto the surface of an AFM silicon cantilever and Young's modulus of plated nickel film is investigated as a function of process conditions such as the plating temperature and applied current density. It is found that Young's modulus of plated nickel thin film is as high as that of bulk nickel at low plating temperature or low current density, but decreases with increasing plating temperature or current density. The results imply that the plating rate increases as increasing the plating temperature or current density, therefore, slow plating rate produces a dense plating material due to the sufficient time for nickel ions to form a dense coating.

**Key Words:** Atomic Force Microscope (AFM, 원자현미경), Young's modulus (탄성계수), Thin film (박막), Current density (전류밀도), Resonant method (공진법)

#### 1. 서론

니켈 박막은 일반적으로 진공증착 방법을 이용하여 제작되어 왔지만 최근에는 전기도금으로 제작하는 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 전기도금 방법은 대량생산의 경우 공정의 간단함으로 인해 다른 공정에 비해 비용이 저렴하고 속도가 빠르며 상대적으로 두꺼운 형상을 만들 수 있는 장점을 가지고 있기 때문에 microswitches, microbeam, microactuator 등과 같은 MEMS 분야에서 기계 구조물 재료로 많이 사용되고 있다.<sup>1-3</sup> 하지만 MEMS 구조물의 기계적인 특성은 박막의 제작공정이나

환경, 두께나 형상에 큰 영향을 받으므로 거대 구조물 (bulk structure)의 물성과는 크게 다른 값을 갖게 되어 기존의 벌크 재료의 물성값을 MEMS 설계에 사용할 수 없는 실정이다.<sup>4</sup> 특히 니켈 박막은 전기도금 공정시의 적층 온도 및 허용된 전류밀도 그리고 니켈의 적층용액의 종류에 따라 기계적 물성값이 변하지만 이에 대한 많은 연구가 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 니켈 박막의 전기도금 공정 조건을 고려한 재료의 기계적 물성값에 대한 정밀한 측정이 요구되고 있다.

MEMS 구조물에 사용되는 박막의 기계적 물성을 측정하기 위한 방법으로는 나노 인텐테이션 시

접수일: 2007년 10월 8일; 게재승인일: 2008년 4월 15일  
# 교신저자: 한성대학교 기계시스템공학과  
E-mail: shkim004@gmail.com Tel. (02) 760-8012

험 (nano indentation test), 인장 시험 (tensile test), 빔 벤딩 시험 (beam bending test), 공진 시험(resonance method) 등이 제안되어 왔다.<sup>5-8</sup> 하지만 이러한 측정 방법들은 기계적 물성을 측정하기 위하여 빔이나 외팔보 등과 같은 시편을 제작해야 하며 추가적인 측정장비를 구비해야 하기 때문에 제작 시간 및 비용의 증가를 초래한다.

본 연구에서는 MEMS 구조물로 많이 사용되고 있는 니켈 박막의 기계적 물성값을 간단하게 측정하는 방법을 소개한다. 이 방법은 원자현미경 (Atomic Force Microscope)의 공진을 이용하여 원자현미경의 외팔보를 사용한다. 또한 외팔보의 공진 주파수(resonance frequency)를 측정하기 위하여 추가적인 측정장비를 사용하지 않고 원자현미경 장비에서 제공하는 기능(tapping mode: 원자현미경의 외팔보를 진동시켜 그때의 공진주파수를 측정하는 기능)을 이용한다. 측정하고자 하는 니켈 박막이 원자현미경의 외팔보 표면에 전기도금(electroplating) 방법으로 적층되며 이때의 외팔보의 공진 주파수와 적층된 니켈박막의 두께 변화를 이용하여 다양한 전기도금 공정조건(적층온도 및 허용 전류밀도)에 대한 기계적 물성, 특히 탄성계수 (Young's modulus)를 구하는 방법을 제시한다.

## 2. 측정이론

니켈 박막의 탄성계수 측정에 사용되는 원자현미경 외팔보의 공진주파수는 외팔보의 치수 및 물성값에 영향을 받으며 다음 식으로 표현된다.<sup>9</sup>

$$\omega_{vac} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{0.2427 \rho_c b h L}} \quad (1)$$

여기서  $\omega_{vac}$  는 진공상태에서의 외팔보 공진주파수를 나타내고  $b, h, L$  은 각각 외팔보의 폭, 두께 및 길이를 나타낸다. 또한  $\rho_c$  는 외팔보의 밀도,  $k$  는 스프링상수(spring constant)를 나타낸다. 하지만 진공에서의 공진주파수를 정확히 측정하는 것은 많은 어려움이 따르므로 식 (1)은 실제 적용에 상당히 제한적이다.

진공에서의 공진주파수( $\omega_{vac}$ )는 유체(fluid), 본 실험에서는 공기(air)에서의 공진주파수( $\omega_f$ )로 다음과 같이 쉽게 표현된다.<sup>10</sup>

$$\omega_{vac} = \left[ 1 + \frac{4\Gamma_r(\omega_f)}{Q_f \Gamma_i(\omega_f) - \Gamma_r(\omega_f)} \right]^{\frac{1}{2}} \omega_f \quad (2)$$

여기서  $\omega_f$  와  $Q_f$  는 유체에서의 공진주파수와 Q 값(quality factor)를 나타낸다.  $\Gamma_r$  와  $\Gamma_i$  는 각각 유체함수(hydrodynamic function)  $\Gamma$  의 실수부(real)와 허수부(imaginary components)를 나타내며 이 함수에 대한 수식적 표현은 문헌에 잘 표현되어 있다.<sup>10</sup> 외팔보의 공진주파수 및 Q 값은 원자현미경 장비에서 제공되는 기능으로 쉽게 측정할 수 있다. 식 (1)과 (2)를 이용하면 원자현미경 외팔보의 스프링상수는 공기에서의 공진주파수에 대한 함수로 다음과 같이 표현된다.<sup>9</sup>

$$k = 0.1906 \rho_f b^2 L Q_f \Gamma_i(\omega_f) \omega_f^2 \quad (3)$$

본 연구에서 사용되는 원자현미경 외팔보는 표면에 니켈 박막이 적층되며 이때의 스프링상수 변화는 복합재 빔 이론(laminar composite beam theory)을 이용해서 구할 수 있으며 다음 식으로 표현된다.<sup>12</sup>

$$k = \frac{3E_e I}{L^3} = \frac{3b}{L^3} \sum_i E_i \left( \frac{h_i^3}{12} + h_i (z_i - z_n)^2 \right) \quad (4)$$

여기서  $E_{e_i}$  와  $h_i$  는  $i^{th}$  층의 유효 탄성계수(effective Young's modulus) 및 두께를 나타내고,  $z_i$  는  $i^{th}$  층의 중앙에서 구조의 바닥 면까지의 거리를 나타낸다.  $z_n$  은 외팔보가 변형(bending)될 때 발생하는 응력 (resulting stress)이 0 이 되는 외팔보의 중립축(neutral axis)을 의미하며 이때의 위치는 다음과 같이 표현된다.

$$z_n = \frac{\sum_i E_i z_i h_i}{\sum_i E_i h_i} \quad (5)$$

실험에서 사용되는 원자현미경 외팔보의 치수 및 적층된 니켈 박막의 두께는 실험으로 측정되므로 식 (3)과 (4)를 이용하여 적층된 니켈 박막의

탄성계수를 구할 수 있다.

### 3. 실험방법

본 논문에서는 전기도금(electroplating) 방법으로 적층된 니켈 박막의 탄성계수를 구하기 위하여 일반적으로 많이 사용되고 있는 원자현미경(AFM; Nanoscope IIIA of Digital Instruments)을 사용하였다. Fig. 1은 실험방법에 대한 개요를 나타낸다. 실험에 사용되는 장치는 니켈 박막이 적층되며 작용전극(working electrode)으로 사용되는 실리콘 원자현미경 외팔보 (*NSC16/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>*; MikroMasch, USA), 불용성 상대전극 (insoluble counter electrode, platinum wire, model CHI115; CH Instruments, Inc.), 전기도금 용기 (electrochemical fluid cell) 그리고 전원 공급장치 (power supply)로 구성된다. 전기도금 용액(plating solution)은 니켈 박막 적층시 용기에 있는 니켈 이온량을 균일하게 유지하기 위해 all-sulfates 니켈 용액을 사용하였으며  $(225 \sim 400) \times 10^{-3} g/cm^3$ 의 니켈 황산염(nickel sulfate)과  $(30 \sim 45) \times 10^{-3} g/cm^3$ 의 붕산(boric acid)로 구성된다.<sup>12</sup>

Fig. 1에서 보는 바와 같이 원자현미경의 외팔보는 전기도금 용기의 홀더(holder)로 고정되며 원자현미경에 장착된 후 외부의 전원 공급장치에 연결된다. 외부에서 전원이 공급되면 니켈 이온을 함유한 용액과 외팔보가 전기적으로 반응하여 니켈 박막이 외팔보의 표면에 적층된다. 니켈 박막이 원자현미경 외팔보의 한 면에만 적층되기 위해 외팔보를 절연층(*Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>*)으로 절연하고 적층되는 한 면에만 전도성 물질(*Cr/Au*)을 적층하였다. 박막 적층시 니켈 박막의 탄성계수에 대한 공정조건의 영향을 파악하기 위하여 전류밀도는  $5 \sim 90 mA/cm^2$ , 적층온도는  $20 \sim 80^\circ C$ 로 정하였다. 적층시 전류밀도는 상대전극의 단면적에 영향을 받으며 실험에 사용되는 상대전극의 단면적은  $7.85 \times 10^{-2} cm^2$ 이므로 각각의 허용된 전류밀도에 따라 입력 전류를 적절히 조절해야 한다.

원자현미경의 외팔보에 적층된 니켈 박막으로 인해 외팔보의 질량이 증가하며 이는 외팔보의 공진주파수 변화를 유발한다. 적층된 니켈 박막에 의한 외팔보의 공진주파수 변화량은 원자현미경 장비에서 제공하는 기능으로 구할 수 있으며 각 적층 단계마다 측정된다. 적층된 니켈 박막의 두께는 상용 측정 장치(surface profiler, DEKRAK)를 이용하

여 측정하였다. 니켈 박막은 외팔보 표면의 일부분에 적층되며 이때의 단차가 각 적층 단계마다 적층된 니켈 박막의 두께를 나타낸다. 측정된 박막 두께의 균일성(uniformity)을 검사하기 위하여 박막 표면의 중심과 가장자리의 두께를 측정하였다.

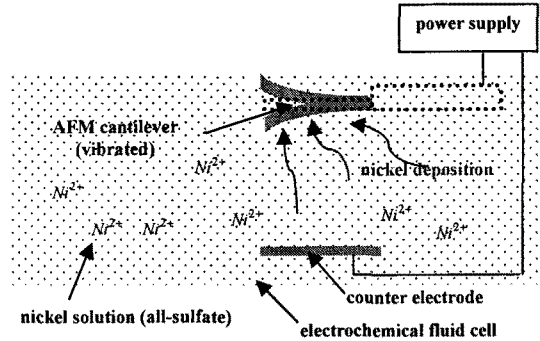


Fig. 1 Schematic drawing of experiment set-up

Table 1 Comparison of measured dimensions and resonant frequency of initial AFM cantilevers

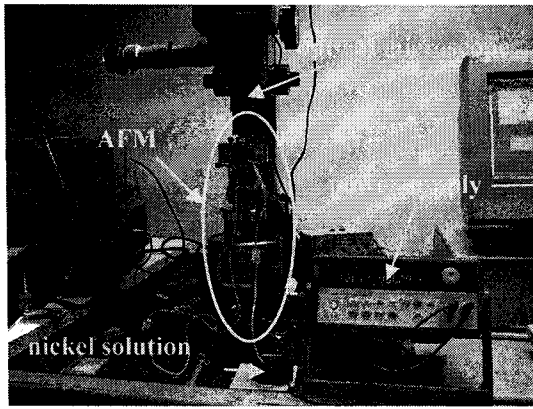
No.	Dimensions ( $\mu m$ )			$\omega_f$ (kHz)
	<i>L</i>	<i>b</i>	<i>h</i>	
A1	230.5	39.75	6.645	166.69
A2	232.5	40.35	6.610	163.19
B1	232.0	39.10	6.690	167.89
B2	229.2	41.45	6.550	160.40
C1	230.1	40.15	6.550	166.05
C2	227.5	40.20	6.505	167.11
D1	234.5	39.50	6.650	163.50
D2	227.5	40.25	6.615	169.70
E1	230.5	40.03	6.595	166.61
E2	234.0	39.50	6.685	166.45
F1	228.5	40.23	6.630	169.26
F2	231.0	40.12	6.620	167.44

### 4. 실험결과

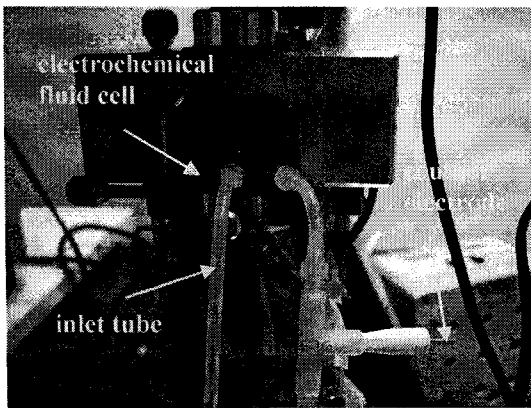
#### 4.1 초기 치수 측정

실험에서 사용되는 원자현미경의 외팔보는 치수가 제작사에서 제공되고 있지만 그 편차

( $L = 230 \pm 5 \mu\text{m}$ ,  $b = 40 \pm 3 \mu\text{m}$ ,  $h = 7.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$ )가 다른 실험 결과에 많은 영향을 미친다. 따라서 각 외팔보에 대한 정확한 치수 측정이 필수적이다. 12 개의 외팔보를 선정하여 그 치수를 측정하였으며 선정된 외팔보의 치수 및 이때의 공진주파수가 Table 1 에 표현되었다. 실험장비는 주사형 전자현미경 (Scanning Electronic Microscope, ESEM-E3)을 사용하였으며 측정오차는 5nm 이다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Experimental set-up picture (b) AFM, electrochemical cell and electrodes

#### 4.2 니켈 박막의 두께 및 탄성계수

외팔보가 원자현미경의 전기도금 용기에 장착되며 니켈 박막이 5 번의 적층 간격으로 각 외팔보 표면에 적층된다. Fig. 1 에 표현된 실험 개요에 대한 실제 실험 장치가 Fig. 2 에 나타나 있다. Fig. 2(a)는 전체 실험 장치를 나타내고 Fig. 2(b)는 원자

현미경에 장착된 전기도금 용기와 상대전극을 나타낸다. Fig. 2 에서 보는 바와 같이 니켈 용액은 외부에서 유입관(inlet tube)을 통해 전기도금 용기로 공급되며 유출관(outlet tube)을 통해 빠져나간다. 또한 상대전극은 T자형 연결구(T-type connector)를 이용하여 유출관에 연결되어 있다. 먼저 적층된 니켈 박막의 탄성계수에 대한 허용 전류밀도의 영향을 보기 위하여 외팔보에 허용된 전류밀도 및 적층시간이 Table 2 에 나타나 있다. 적층된 니켈 박막의 두께는 전류밀도에 비례하기 때문에 동일한 적층 두께에서의 탄성계수 변화를 구하기 위하여 각각의 외팔보에 허용된 적층시간에 변화를 주었다.

Table 2 Applied current density and allowed plating time per step of each sample cantilever

No.	Current Density (mA/cm <sup>2</sup> )	Plating Time per Step (second)
A1, A2	8.6	90
B1, B2	17.2	45
C1, C2	34.4	22.5
D1, D2	51.6	15
E1, E2	68.8	11.25
F1, F2	86.0	9

12 개의 외팔보에 대하여 적층 단계의 적층된 니켈 박막의 두께를 측정하였다. 측정된 박막 두께의 균일성을 위하여 각 외팔보 표면의 세곳, 즉 중심과 가장자리에서 측정하였다. 세곳에서 측정된 니켈 박막의 두께는 조금씩 차이가 있었지만 그 차이는 4.6% 이하였다. 또한 각 측정지점에서 길이방향의 두께는 2.0% 이하의 측정분포를 나타내었다. Fig. 3 은 적층온도가 40 °C일 때 각 적층 단계에서 측정된 니켈 박막의 총 두께를 나타낸다. 적층된 니켈 박막의 두께는 적층 시간이 증가할수록 증가함을 알 수 있었다. 적층 이론식에 의하면 박막의 적층율은 시간에 따라 일정하지만 실험에서 측정된 값은 조금의 차이가 있었으며 이는 측정 장비의 오차나 실제 각 외팔보에 허용된 적층 시간의 차이로 인하여 발생될 수 있다. 또한 본 실험에서 구하는 공진주파수와 탄성계수는 적층 시간이 아닌 적층된 박막의 두께에 영향을 받기 때문에 동일한 적층 시간에 대한 박막의 적층 두

Table 3 Resonant frequencies and spring constants of plated cantilevers ( $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\omega_f$ : kHz,  $k$ : N/m)

No.	1 <sup>st</sup> step		2 <sup>nd</sup> step		3 <sup>rd</sup> step		4 <sup>th</sup> step		5 <sup>th</sup> step	
	$\omega_f$	$k$	$\omega_f$	$k$	$\omega_f$	$k$	$\omega_f$	$k$	$\omega_f$	$k$
A1	166.03	47.68	168.60	55.26	169.77	62.10	172.25	70.52	174.88	78.83
A2	162.26	46.73	164.88	53.95	166.37	60.94	169.21	69.35	171.22	76.84
B1	165.14	46.77	166.75	53.32	168.02	60.24	171.37	68.85	174.09	77.52
B2	164.30	48.26	165.54	54.89	167.91	63.02	169.26	69.80	171.86	77.93
C1	162.11	45.84	163.44	52.30	165.12	58.78	166.03	64.88	167.79	72.52
C2	164.17	46.40	165.41	52.67	166.76	59.40	168.64	66.37	170.68	74.23
D1	158.04	44.01	157.90	49.06	159.02	54.83	159.87	61.12	161.63	67.89
D2	166.47	47.96	167.01	54.06	167.92	60.20	168.77	66.55	171.73	74.26
E1	160.37	44.43	158.66	48.68	158.14	54.08	159.18	60.36	160.96	64.63
E2	158.41	43.65	157.25	48.24	156.66	53.44	156.53	58.90	157.04	63.99
F1	162.11	45.53	158.90	48.87	157.11	53.10	156.25	57.26	154.21	61.19
F2	157.81	43.67	154.83	46.99	152.40	50.76	151.00	55.02	149.94	58.92

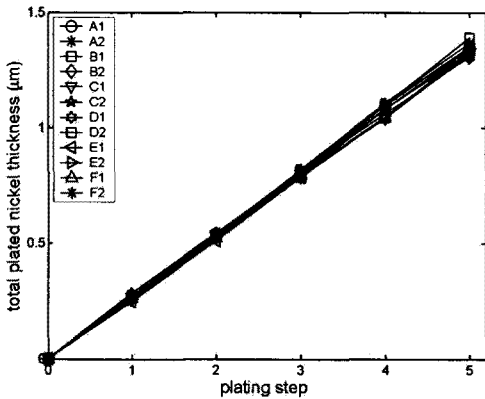


Fig. 3 Total plated nickel thickness of each cantilever during plating step ( $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

께에 대한 차이는 의미가 없다.

각 적층 단계에서 외팔보의 공진주파수를 측정하였다. 먼저 원자현미경의 tapping mode 를 이용하여 각 외팔보의 공진주파수 ( $\omega_f$ )를 측정하였으며 식 (2)를 이용하여 진공에서의 공진주파수 ( $\omega_{vac}$ )를 구하였다. 또한 식 (1)을 이용하여 이때의 각 외팔보의 스프링상수를 구하였으며, 이는 Table 3 에서 보여주고 있다. Table 3 에서 알 수 있듯이 적층 시간이 증가함에 따라 니켈 박막이 외팔보에 적층되

기 때문에 스프링상수는 증가한다.

Table 3 에서 측정된 값과 식 (4)를 이용하여 니켈 박막의 탄성계수에 대한 허용 전류밀도의 영향을 구하였다. Fig. 4 에 나타난 바와 같이 허용 전류밀도가 증가함에 따라 탄성계수는 202GPa 에서 87GPa 까지 감소하였다. 또한 적층온도가 탄성계수에 미치는 영향도 분석하였다. 상기 방법과 동일한 방법을 이용하여 새로운 외팔보에 전류밀도를 공정하고 온도를 변화시켜 니켈 박막을 적층하였다. Fig. 5 는 전류밀도를  $J = 8.6\text{mA/cm}^2$  에 고정시키고 적층 온도를 변화시켰을 때의 탄성계수 변화를 나타낸다. 적층 온도가  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  미만일 때와  $40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  사이에서 박막의 탄성계수는 각각 190GPa 과 203GPa 로 벌크 니켈의 탄성계수와 유사한 값을 가진다. 하지만 적층 온도가  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  를 넘어가면 박막의 탄성계수는 급격히 떨어져서  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  부근에서는 거의 110GPa 로 감소하였다.  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  부근에서 실행한 반복 실험에서도 거의 유사한 결과를 얻었으며 이는 탄성계수 감소가 실험에서 발생할 수 있는 측정오차와는 무관함을 나타낸다. 또한 적층 온도  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  이하에서 탄성계수의 표준편차(standard deviation)는 5 정도였지만 그 이상의 온도에서는 12.2 로 그 산포가 너무 커서 측정된 탄성계수를 신뢰할 수 없다. 이러한 이유로 대부분의 all-sulfate 니켈 용액을 이용한 실험이

60 °C 이하의 저온에서 이루어진다.<sup>12</sup>

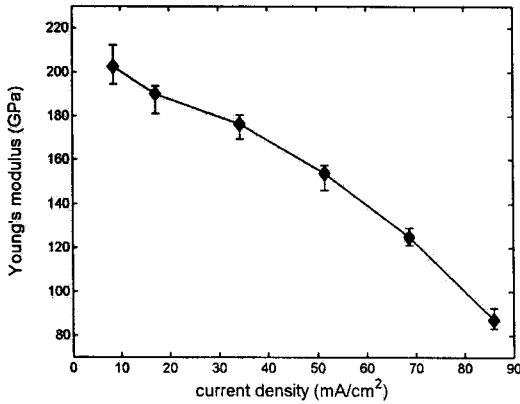


Fig. 4 Young's modulus of electroplated Ni thin films as a function of the applied current density plated at  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

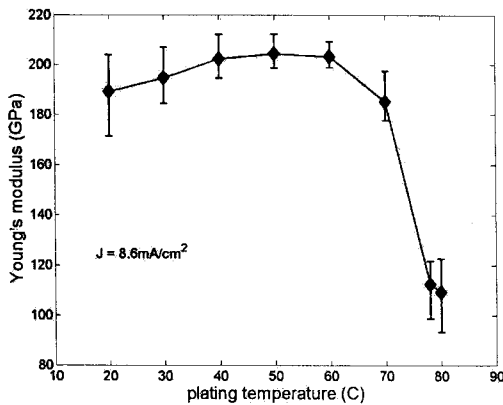


Fig. 5 Young's modulus of electroplated Ni thin films as a function of the plating temperature at  $J = 8.6\text{ mA/cm}^2$

일반적으로 박막의 적층 온도나 전류밀도가 증가하면 박막의 적층율(plating rate)도 증가한다. 박막의 적층율이 낮으면 전기도금 용액의 니켈 이온이 외팔보에 적층될 충분한 시간이 있으므로 보다 밀도가 높은 박막을 적층할 수 있어 벌크와 유사한 탄성계수를 얻을 수 있다. 하지만 적층 온도나 전류밀도가 증가하면 적층율이 증가하여 니켈 박막이 상대적으로 빠르게 적층되므로 이때 발생하

게 되는 박막 내부의 결함(pores or gaps)이 탄성계수의 감소를 유발한다. Fig. 6 에서 나타난 것과 같이 전류밀도가 증가하면 박막의 표면거칠기도 증가함을 알 수 있다. 이러한 현상은 Table 4 에 표현된 것처럼 다른 논문에서도 잘 나타나 있다. 나노 압입시험을 통해 측정된 니켈박막의 탄성계수는 공정조건에 영향을 받지만 93GPa 로 측정되었으며 마이크로 인장시험 측정결과는 92GPa 이었다.<sup>4,5</sup> 또한 Luo et al.의 실험에서는 전류밀도가  $2\text{ mA/cm}^2$  에서 205GPa 로 측정된 탄성계수가  $30\text{ mA/cm}^2$  에서는 85GPa 로 감소하였다.<sup>7</sup>

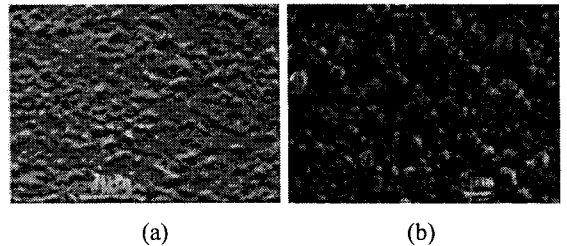


Fig. 6 SEM pictures of Ni thin film plated (a)  $J = 17.2\text{ mA/cm}^2$  and (b)  $J = 68.8\text{ mA/cm}^2$  at  $T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Table 4 The measured Young's modulus of nickel in the literature

method	Young's modulus (GPa) (mA/cm <sup>2</sup> )
tensile test <sup>4</sup>	92
nano	93
beam bending <sup>7</sup>	85 ~ 205
resonance <sup>8</sup>	131 ~ 156

### 4.3 불확실성 해석 (Uncertainty Analysis)

식 (3)과 (4)에서 보는 바와 같이 실험으로 구한 니켈 박막의 탄성계수는 외팔보의 치수와 스프링상수 등과 같은 다양한 실험 변수의 측정 오차에 영향을 받는다. 따라서 본 절에서는 이러한 실험변수의 측정오차가 탄성계수에 미치는 영향을 분석하였다.

불확실성 이론<sup>13</sup> 을 이용하면 식 (3)에 나타난 외팔보의 스프링상수에 대한 측정 오차는 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{u_k}{k} = \sqrt{\left(\frac{u_{\rho_f}}{\rho_f}\right)^2 + \left(\frac{2u_b}{b}\right)^2 + \left(\frac{u_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{u_{Q_f}}{Q_f}\right)^2 + \left(\frac{u_{\Gamma_i}}{\Gamma_i}\right)^2 + \left(\frac{2u_{\omega_f}}{\omega_f}\right)^2} \quad (6)$$

여기서  $u$  는 각 변수의 불확실값, 즉 측정오차를 나타내며 첨자는 각각의 변수를 나타낸다.

공기의 밀도 및 점성은 온도에 대한 함수로 표현되며 실험 중 온도변화( $\pm 1^\circ$ )를 고려하면 공기밀도 및 점성에 대한 상대 측정오차는 각각 0.34%와 0.32%로 나타난다. 고유진동수 측정장비의 정밀도는 0.01KHz 이하이며 외팔보 형상을 고려한 공진주파수 상대 측정오차는 1.0% 미만이다. Q 값은 최대공진주파수( $\omega_{max}$ ) 및 주파수 대역폭( $\Delta\omega$ )의 함수로  $Q_f = 2\pi\omega_{max}/\Delta\omega$ 로 표현되며 공진주파수의 측정오차를 고려하면 Q 값의 상대 측정오차는 1.43%이다. 외팔보 형상에 대한 치수 측정장비의 정밀도는 0.05 $\mu$ m이며 이때의 상대 측정오차는 0.2% 미만이다. 유체함수는 Reynolds 수에 따라 변하고 Reynolds 수( $Re = \rho_f\omega_f b^2/4\eta$ )는 공기점성의 함수이며 공기점성의 오차를 고려한 Reynolds 수의 상대 측정오차는 1.13%이다. 따라서 Reynolds 수의 변화에 대한 유체함수 변화를 고려하면 유체함수의 상대 측정오차는 0.59%이다. 각 실험변수에 대한 상대 측정오차가 Table 5에 나타나 있으며 결과값을 식 (6)에 대입하면 스프링상수에 대한 측정오차는 2.56%이다. 또한 스프링상수 및 각 변수의 상대 측정오차를 식 (4)에 대입하면 니켈박막의 탄성계수의 측정오차는 4.21%로 구해진다.

### 5. 결론

본 연구에서는 MEMS 구조물로 많이 사용되고 있는 니켈 박막의 탄성계수에 대한 적층 온도 및 전류밀도 영향을 원자현미경의 공진을 이용하여 간단하게 구하는 방법을 소개하였다. 이 방법은 원자현미경의 외팔보를 사용하며 측정하고자 하는 니켈 박막이 원자현미경의 외팔보 표면에 적층되며 외팔보의 공기 및 진공에서의 공진주파수와 적층된 니켈의 두께 그리고 스프링상수와 상관계수를 이용하여 탄성계수를 구하였다. 적층 온도가 60 $^\circ$ C 이하거나  $J = 8.6mA/cm^2$ 의 낮은 전류밀도에서 측정된 니켈 박막의 탄성계수는 약 200GPa 정도로 벌크 니켈의 탄성계수와 유사하였

Table 5 Relative uncertainty of each parameter

No.	$u$	nominal	relative uncertainty
공기밀도	0.004	1.1845	0.34 %
공기점성	0.006	1.1866	0.32 %
공진주파수	1~2	170	~1.0 %
외팔보 넓이	0.05	40	0.125 %
외팔보 길이	0.05	230	0.022 %
Q 값			1.43 %
Reynolds수			1.13 %
유체함수	0.0034	0.5719	0.59 %
스프링상수			2.56 %
탄성계수			4.21 %

다. 하지만 그 이상의 적층 온도에서나 전류밀도가 증가하면 박막의 탄성계수는 감소하였다. 이러한 탄성계수의 감소는 적층시 발생하는 박막 내부의 결함과 관계가 있다. 따라서 본 연구에서 나타난 공정조건에 대한 박막의 탄성계수 측정 결과는 MEMS 구조물의 설계 및 제작에 유용하리라고 사료된다.

### 후 기

본 연구는 2007 년도 한성대학교 교내연구비 지원과제임.

### 참고문헌

1. Teh, W. H., Luo, J. K., Graham, M. R., Pavlov, A. and Smith, C. G., "Near-Zero Curvature Fabrication of Miniaturized Micromechanical Ni Switches using Electron Beam Cross-linked PMMA," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, No. 5, pp. 591-598, 2003.
2. Kataoka, K., Kawamura, S., Itoh, T., Ishikawa, K., Honma, H. and Suga, T., "Electroplating Ni Micro-Cantilevers for Low Contact-Force IC Probing," Sensors and Actuators, A, Vol. 103, Issue 1-2, pp. 116-121, 2003.
3. Huang, W. M., Liu, Q. Y., He, L. M. and Yeo, J. H., "Micro NiTi-Si Cantilever with Three Stable

- Positions,” *Sensors and Actuators, A*, Vol. 114, Issue 1, pp. 118-122, 2004.
4. Sharpe, W. N., “MEMS Handbook: Chapter 3-Mechanical Properties of MEMS Material,” CRC Press, pp. 16-22, 2002.
  5. Riley, W. F., Sturges, L. D. and Morris, D. H., “Mechanics of Materials,” Wiley, pp. 141-179, 1999.
  6. Zhou, N. M., Zhou, Y., Yang, C. S., Chen, J. A., Ding, G. F., Ding, W., Wang, M. J. and Zhang, Y. M., “The Evaluation of Young’s Modulus and Residual Stress of Nickel Films by Microbridge Testings,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, Issue 12, pp. 2389-2394, 2004.
  7. Luo, J. K., Flewitt, A. J., Spearing, S. M., Fleck, N. A. and Milne, W. I., “Young’s Modulus of Electroplated Ni Thin Film for MEMS Applications,” *Materials Letters*, Vol. 58, Issue 17-18, pp. 2306-2309, 2004.
  8. Majjad, H., Basrou, S., Delobelle, P. and Schmidt, M., “Dynamic Determination of Young’s Modulus of Electroplated Nickel used in LIGA Technique,” *Sensors and Actuators, A*, Vol. 74, Issue 1-3, pp. 148-151, 1999.
  9. Sadar, J. E., “Calibration of Rectangular Atomic Force Microscope Cantilever,” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 70, Issue 9, pp. 3967-3969, 1999.
  10. Sadar, J. E., “Frequency Response of Cantilever Beams Immersed in Viscous Fluids with Applications to the Atomic Force Microscope,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 84, Issue 1, pp. 64-76, 1998.
  11. Gibson, R. F., “Principles of Composite Material Mechanics,” McGraw-Hill, pp. 4-45, 1994.
  12. Schlesinger, M. and Paunovic, M., “Modern Electroplating,” John Wiley & Sons, pp. 139-200, 2000.
  13. Beckwith, T. G., Buck, N. L. and Marangoni, R. D., “Mechanical Measurements,” Addison-Wesley, Inc., pp. 411-478, 1982.