

<논 문>

## 스냅스루 좌굴을 이용한 미소스위치의 설계, 제작 및 시험

고정상\* · 조영호\*\* · 곽병만\*\* · 박관흠\*\*\*

(1995년 3월 31일 접수)

### Design, Fabrication and Testing of a Microswitch Using Snap-through Buckling Phenomenon

Jeung Sang Go, Young-Ho Cho, Byung Man Kwak and Kwanhum Park

**Key Words :** Micromachining(마이크로머시닝), Microswitch(미소스위치), Snapthrough Buckling(스냅스루 좌굴), Acceleration Switch(가속도 스위치), Micromaterials(미소재료), Blister Test(블리스터 측정)

#### Abstract

A snapping-beam microswitch has been designed, fabricated and tested. From a design analysis, necessary and sufficient conditions for a snap-through switching function have been derived for a clamped-clamped shallow beam. The necessary condition has resulted in a geometric relation, in which the ratio of beam thickness to initial beam deflection plays a key role in the snapping ability. The sufficient condition for the snapping action has been obtained as a function of the inertia force due to applied acceleration, and the electrostatic force, adjustable by an inter-electrode voltage. For experimental investigations, a set of microbeams of silicon dioxide/p<sup>+</sup> silicon bimorphs have been fabricated. Geometric size and mechanical behavior of each material film have been measured from on-chip test structures. Estimated and measured characteristics of the fabricated devices are compared.

#### 기 호 설 명

$A$ : 단면의 면적	$P$ : 인가압력
$a$ : 박막의 크기	$S$ : 전극의 면적
$E$ : 종탄성계수	$t$ : 박막의 두께
$F_a$ : 관성력	$V$ : 인가전압
$F_{cr}^*$ : 스냅스루 좌굴을 일으키는 임계하중	$w$ : 사각박막 중심에서의 처짐
$F_e$ : 정전기력	$w_0$ : 보 중심에서의 처짐
$h$ : 보의 두께	$\epsilon_0$ : 공기의 유전율
$I$ : 보의 단면관성모멘트	$\lambda$ : 초기변형과 단면의 형상에 관계된 계수
$L$ : 보의 길이	$\sigma_0$ : 초기 잔류응력
$l$ : 전극간 거리	$\nu$ : 푸아송비
$M_\sigma$ : 잔류응력에 의한 모멘트	

#### 1. 서 론

\*회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과  
 \*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과  
 \*\*\*회원, 현대자동차(주) 연구개발부

최근 노광전사(lithography)를 기반으로 한 미소  
 기계구조물 제작기술(micromachining technology)

의 발전에 힘입어, 정밀성과 양산성을 겸비한 마이크로머신의 공정개발 및 제품응용 연구<sup>(1)</sup>가 활발하게 진행되고 있다. 마이크로머신 제조기술은 일반적으로 실리콘 기판자체를 가공하여 구조물을 얻는 기판미세가공법<sup>(2)</sup>과 기판위에 박막을 증착, 가공, 처리함으로써 박막 자체로부터 구조물을 얻는 박막미세가공법<sup>(2)</sup>으로 나눌 수 있다.

마이크로머신 제조기술을 이용하여 만든 미소기계구조물은 집적회로 제조기술로 만든 전자요소와는 달리 공정의 완료후 구조물이 실리콘 기판과 분리되는 경우가 많아 미소구조물내의 잔류응력분포, 탄성계수, 푸아송비 등과 같은 재료의 기계적 물성치의 중요성이 커진다. 특히 잔류응력<sup>(3)</sup>은 미소구조물의 변형, 성능의 저하, 심지어는 구조물의 파손 등을 초래하는 주원인이 되므로, 공정 도중 잔류응력의 발생을 최소화시켜야 한다. 본 연구에서는 마이크로머신 제작시 여러가지 문제를 일으키는 잔류응력을 유리한 측면으로 역이용<sup>(4)</sup>한 것으로, 잔류응력에 의한 구조물의 좌굴을 이용하여 미소스위치를 설계, 제작하였으며, 기본적인 성능시험을 행하였다.

먼저 이론연구에서 초기변형이 있는 양단고정형 미소보의 스냅스루 좌굴조건을 유도하였고, 이를 근거로 미소스위치를 설계하였다. 그 다음 마이크로머신 제조기술을 이용하여 잔류응력이 서로 다른 이중 박막으로 구성된 초기좌굴이 있는 미소보를 제작한후, 정전력(electrostatic force)에 의한 스냅스루 좌굴현상을 시험하였다. 끝으로 실험에서 얻은 스냅스루 좌굴 임계전압과 이론 예측치를 비교하였고, 본 스위치의 정전 바이어스 전압을 조절함으로써 가변가속도 임계스위치로 응용할 수 있는 이론적 가능성을 제시하였다.

## 2. 이론 전개 및 미소스위치 설계

스냅스루 좌굴을 이용한 미소스위치를 설계하기 위하여 먼저 스냅스루 좌굴조건에 관한 이론을 전개하였으며, 설계과정에서는 다음과 같이 세 가지 측면을 고려하였다. 첫째, 제작하고자 하는 미소스위치의 기본구조는 스냅스루 좌굴현상을 일으키기 용이한 양단지지보 형태의 구조물을 선택하였다. 둘째, 그 구조물의 초기좌굴을 얻기위해 잔류응력이 서로 상이한 이중 박막재료를 고려하였다. 끝으로 상세 치수설계단계에서 미소구조물의 크기를 결

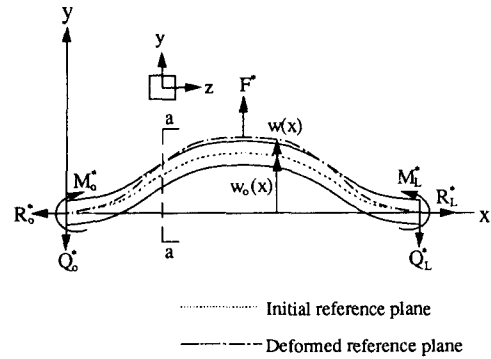


Fig. 1 Geometry of a clamped-clamped shallow beam

정함에 있어서 제작 및 성능시험 용이성을 동시에 고려하였다.

Fig. 1에 도시된 초기변형을 가진 양단고정보<sup>(5)</sup>의 경우, 좌굴해석을 통해 아래와 같이 초기변형과 단면의 형상에 관한 스냅스루 좌굴조건 식을 얻을 수 있다.

$$\lambda = \frac{(w_o)_{\max}}{\sqrt{I/A}} \geq 8 \quad (1)$$

여기서,  $(w_o)_{\max}$ 는 보의 중심에서 처짐,  $I$ 는 보의 단면관성모멘트,  $A$ 는 보의 단면적을 각각 나타낸다. 만약 양단고정보가 높이가  $h$ 인 사각단면보인 경우, 식 (1)은 아래와 같이 간단화된다.

$$\frac{(w_o)_{\max}}{h} \geq \frac{4}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

제작할 스위치의 크기를 결정함에 있어서, 전술한 바와같이 제작 및 측정용이성을 우선적으로 고려하였다. 먼저 식 (1)에서 얻어진 스냅스루 좌굴조건을 만족하는 구조물을 제작하기 위하여 p<sup>+</sup>실리콘, 열산화막, 알루미늄막으로 이루어진 복합층에서 중립축의 위치를 구하였고, 이로부터 선형탄성이론을 적용하여 중심에서의 초기처짐을 아래와 같이 구하였다.

$$w_o = -\frac{M_o L^2}{4 \sum_{j=1}^n E_j I_j} \quad (3)$$

여기서,  $M_o$ 는 박막간 잔류응력 차이에 의해 발생한 모멘트이고  $L$ 은 보의 길이이다. 한편 스냅스루 좌굴을 일으키기 위한 임계 하중을 유도하면 다음과 같다.

$$F_{cr}^* = \left[ \left( \frac{\lambda^2 - 16}{3} \right)^{3/2} - 8\lambda \right] \left( \frac{\pi^2 EI}{L^2} \right) \left( \frac{\pi^2 I}{AL^2} \right) \quad (4)$$

스냅스루 좌굴을 일으키는 임계하중은 전극간 인가 전압에 의한 정전기력과 가속도에 의한 관성력의 합으로 표시할 수 있다.

$$F_{cr}^* = F_a + F_e \quad (5)$$

한편, 전극간 정전력에 의한 하중은 다음과 같이 표시된다.

$$F_e = \frac{\epsilon_0 V^2 S}{2l^2} \quad (6)$$

식 (4)와 식 (6)에서 정전력만에 의한 스냅스루 임계전압은 다음과 같이 표현된다.

$$V = \left\{ \frac{2l^2}{\epsilon_0 S} \left[ \left( \frac{\lambda^2 - 16}{3} \right)^{3/2} - 8\lambda \right] \left( \frac{\pi^2 EI}{L^2} \right) \left( \frac{\pi^2 I}{AL^2} \right)^{1/2} \right\} \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)에서  $\epsilon_0$ 는 공기의 유전율을 나타내고  $V$ 는 전극간 전압,  $S$ 는 전극의 면적, 그리고  $l$ 은 전극간 거리를 나타낸다. 식 (5)는 정전기력과 관성력의 합에 의한 스냅스루좌굴 현상을 나타낸 것으로, 정전력을 변화시킴으로써 스냅스루좌굴이 일어날 수 있는 임계가속도를 조절할 수 있음을 나타낸다.

### 3. 제조 공정

설계된 미소스위치의 구조는 Fig. 2에 도시한 바와 같다. 먼저 붕소가 도핑된 실리콘 박막과 열산화막의 복합막으로 구성된 양단고정보를 제작하고

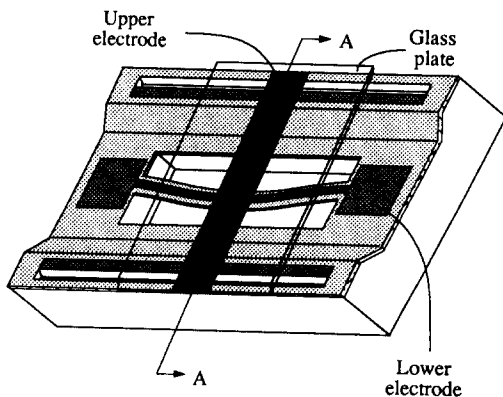


Fig. 2 Schematic diagram of a microswitch

그 위에 전극을 설치하였다. 박막간 평균 잔류응력 차이를 이용하여 양단지지부의 초기변형을 얻은 후, 전극간 인가전압에 의한 정전기력을 이용하여 스냅스루 좌굴현상을 일으킨다. 또한 보의 중심에 질량을 달았을 경우, 스냅스루 임계하중은 정전기력과 가속도에 의한 관성력의 복합력으로 나타나며, 정전기력을 이용하여 스냅스루 좌굴을 일으키는 임계가속도를 조절할 수 있도록 하였다. 미소스위치의 제작에 사용된 마스크(mask)수는 모두 6장이었으며, 이 중 5장은 실리콘 웨이퍼 위에 전극을 가진 양단고정보를 제작하는데 사용하였고 나머지 한장의 마스크는 유리면 위의 알루미늄 전극제작에 사용하였다. 실리콘기판은 두께 490~560  $\mu\text{m}$ 인 (100)방향의 n-type을 사용하였으며, 미소스위치 제조공정의 흐름을 Fig. 3에 나타내었다.

공정 1은 스냅스루 좌굴실험을 하기위해 8.4  $\mu\text{m}$ 의 단차를 만드는 공정이다. 이 공정을 상술하면, 첫째로 웨이퍼를 세척한 후 1000°C에서 건식산화막층을 300 Å 두께로 기른다. 그후 노광전사공정 및 산화막 식각액 BOE(buffered oxide etchant)를 이용하여 산화막 일부를 제거하여 식각 마스크를 형

Process 1. Step etch for snap-through buckling testing

Process 2. Membrane definition after p<sup>+</sup> diffusion

Process 3. Oxidation(300Å) for initial deflection

Process 4. p<sup>+</sup> beam definition

Process 5. Lower electrode patterning

Process 6. Bonding to upper electrode patterned on glass

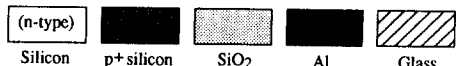


Fig. 3 Fabrication process for the microswitch

성한 다음 KOH용액에서 식각하여  $8.4 \mu\text{m}$ 의 단차를 제작한다. 이 때 산화막층이 존재하는 부분은 KOH용액에 의한 식각률이 낮기 때문에 산화막층이 제거된 부분만이 식각된다. 공정 2는 보의 형성을 위한 박막의 두께를 결정하는 p<sup>+</sup>실리콘 박막을 만드는 작업으로서, 붕소 고체원을 이용하여  $1100^\circ\text{C}$ , 14시간 동안 붕소를 기판에 침투시킨다. 붕소유리층을 제거한 후  $1000^\circ\text{C}$ , 습식방법으로  $0.5 \mu\text{m}$  두께의 습식산화막층을 기판다. 이 산화막층은 실리콘 식각액인 EDP에 대하여 마스크킹 작용을 한다. 다음으로 노광전사공정을 이용하여 산화막식각층을 형성하고 BOE로 산화막을 제거한다. 감광제와 산화막을 마스크로 하여 드러난 p<sup>+</sup>실리콘 표면을 polyetchant를 이용하여 식각한다.

실리콘 표면이 노출된 시편을  $84^\circ\text{C}$ , 26%의 KOH용액에서 3시간 동안 식각한 후 EDP용액에서 3시간 동안 실리콘기판을 식각한다. 이때 먼저 KOH용액에서 식각하는 이유는 식각시간을 줄이기 위한 것이고, 그 후에 사용한 EDP용액은 붕소 도핑된 층에서 식각의 중단을 가져오므로써 보의 두께를 결정하기 위한 것이다. 사용한 EDP용액은 ethylene diamine : pyrocatechol : water을 3 : 1 : 1의 비로 희석하였고 실리콘 식각률은  $0.8 \mu\text{m}/\text{min}$ 이었다.

공정 3은 박막의 초기의 변형을 얻기 위하여 산화막을 형성하는 공정이다. 산화막의 두께를 조절하기 위하여  $900^\circ\text{C}$ 에서  $300 \text{ \AA}$  두께의 건식산화막을 기판다. 공정 4는 양단고성분을 만드는 공정이다.

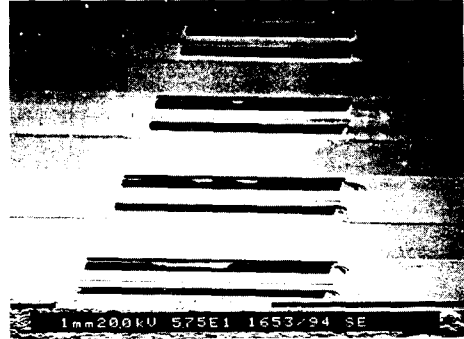


Fig. 4 SEM of microfabricated devices

노광전사공정을 이용하여 보의 형상을 만들고 감광제가 제거된 부분의 산화막을 제거한다. 그리고 polyetchant용액을 이용하여 p<sup>+</sup>실리콘층을 식각하면 초기변형을 가진 보가 얻어진다. 이 때 polyetchant를 이용하여 p<sup>+</sup>실리콘층을 식각하기 때문에 감광제의 마스크킹 시간이 3분 이내로 한정된다. 그러므로 p<sup>+</sup>실리콘층을 모두 제거하고 보를 완성하기 위하여 세번의 노광전사공정을 반복하였다.

공정 5는 전극을 형성하는 작업으로 먼저  $0.5 \mu\text{m}$ 의 알루미늄을 유리와 보위에 증착하고 노광전사공정을 이용하여 전극형상을 만든 후, 알루미늄 식각용액(Al etchant)을 사용하여 원하는 모양의 전극을 얻는다. Fig. 4는 최종적으로 만든 미소스위치보위에 형성한 전극을 찍은 SEM 사진이다.

공정 6은 하단부분인 유리위에 전극을 구성하고



Fig. 5 Top view of microfabricated devices aligned with an upper electrode

UV경화수지를 이용하여 실리콘과 유리를 접합하는 공정으로, 상·하단 전극의 정렬 및 접합 후의 결과는 Fig. 5에 보였다.

## 4. 시험 및 측정

미소스위치 성능시험에 앞서 스위치의 제작에 사용된 각 재료의 탄성계수 및 잔류응력, 그리고 제작된 스위치의 크기를 측정하였다. 다음으로 전극 양단에 전압을 인가하여 전류의 흐름을 측정함으로써 스냅스루 좌굴현상을 실험하였다.

### 4.1 박막 물성치와 잔류응력의 측정

박막의 물성치와 잔류응력은 거시적 재료(bulk material)의 물성치와는 다른 경우가 많고, 특히 공정조건에 의한 영향이 크다. 그러므로 미소구조물의 제작시 박막의 탄성계수와 잔류응력의 측정은 실험결과와 해석에서 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구에서는 스위치의 제작에 사용된 각 박막의 탄성계수와 잔류응력을 실험적으로 측정하였다. 사용한 각종 재료의 박막시편을 제작하여 블리스터 방법<sup>(6)</sup>을 이용하여 재료의 탄성계수와 잔류응력을 측정하였다.

#### 4.1.1 박막의 변형 해석

블리스터 방법은 사각박막에 압력을 가하면서 박막의 최대변형을 측정함으로써, 측정된 압력과 변위와의 관계로부터 탄성계수와 잔류응력을 동시에 얻을 수 있다는 장점이 있다. 먼저 압력에 의한 박막의 변위분포<sup>(7)</sup>를 가정하여 변형에너지를 계산하고, 가상일의 원리를 적용하여 압력과 변위와의 관계식을 얻은 다음, 상용 프로그램인 ABAQUS로부터 얻어진 변위분포를 비교하여 수정된 압력과 변형과의 관계식을 다음과 같이 구하였다.

먼저 단일막의 경우, 압력과 변형과의 관계식은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{Pa^2}{wt} = 1.37(1.496 - 0.431\nu) \frac{E}{1-\nu} \frac{w^2}{a^2} + 3.49\sigma_0 \quad (8)$$

식 (8)에서  $P$ 는 인가한 압력,  $a$ 는 사각박막의 변 길이,  $w$ 는 사각박막의 중심에서 처짐,  $t$ 는 박막의 두께,  $\nu$ 는 푸아송비,  $\sigma_0$ 는 박막에 작용하는 초기 평균잔류응력을 각각 나타낸다. 복합막의 경우, 위와 동일한 방법으로 압력과 변형과의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{Pa^2}{w} = & 1.37(1.496 - 0.431\nu) \frac{E_1 t_1}{1-\nu_1} \frac{w^2}{a^2} \\ & + 3.49\sigma_{01} t_1 + 1.37(1.462 - 0.36\nu) \frac{E_2 t_2}{1-\nu_2} \frac{w^2}{a^2} \\ & + 3.59\sigma_{02} t_2 \end{aligned} \quad (9)$$

#### 4.1.2 물성치 및 잔류응력의 측정

블리스터 측정에 사용된 시편은 p<sup>+</sup>실리콘, 열산화막, 그리고 알루미늄박막이다. 먼저 p<sup>+</sup>실리콘 시편은 크기가 2.84 mm×2.84 mm×1.0 μm인 사각박막이다. 다음으로 p<sup>+</sup>실리콘과 알루미늄의 복합박막은 시편은 크기가 2.84 mm×2.84 mm×1.5 μm인 사각박막이며, 이때 알루미늄박막의 두께는 0.5 μm이다. 마지막으로 p<sup>+</sup>실리콘과 열산화막의 복합박막시편의 크기는 2.84 mm×2.84 mm×1.032 μm이었고 열산화막 두께는 약 320 Å이었다. 세 시편을 이용하여 블리스터 시험을 행하였으며, 측정된 각 재료의 물성치와 잔류응력을 Table 1에 정리하였다.

### 4.2 스냅스루 좌굴현상의 시험

먼저 이론예측치와 실험결과를 비교하기 위하여 보의 크기와 중심에서의 초기처짐을 측정하였고 다음으로 보의 길이에 따라 스냅스루 좌굴현상을 일으키는 임계전압을 측정하였다.

미소스위치용 보는 p<sup>+</sup>실리콘, 산화막, 알루미늄

Table 1 Micromechanical properties measured from thin-film membranes

Materials	E(GPa)±6.5%	σ <sub>0</sub> (MPa)±13%	ν
p <sup>+</sup> Si	125	+77	0.28
Al	65	-15	0.31
SiO <sub>2</sub>	72	-240	0.17

의 복합구조로 되어있으며, 실제 제작된 양단고정 보의 폭은  $230\ \mu\text{m}$ , 길이는  $800\ \mu\text{m}$ ,  $900\ \mu\text{m}$ ,  $1000\ \mu\text{m}$ 의 배열로 이루어져 있다. 박막별 두께는 p<sup>+</sup>실리콘  $2.6\ \mu\text{m}$ , 산화막  $320(\pm 30)\ \text{\AA}$ , 알루미늄  $0.5\ \mu\text{m}$ 이다. 길이가 각  $800\ \mu\text{m}$ ,  $900\ \mu\text{m}$ ,  $1000\ \mu\text{m}$ 인 보의 경우, 각 보의 중심에서의 초기처짐은 각각  $6.5$ ,  $8.7$ ,  $11.7(6.5\%)\ \mu\text{m}$ 로 측정되었다.

스냅스루 좌굴의 실험에서는 반도체소자 측정기(semiconductor parameter analyzer)를 사용하여 인가된 전압에 따른 전류의 흐름을 측정하여 극소형 스위치의 작동여부를 확인하였으며, 전압의 변화에 따른 임계 스위치의 스냅스루 좌굴을 실험한 결과, Fig. 6에 도시한 바와 같이  $800\ \mu\text{m}$ ,  $900\ \mu\text{m}$ ,  $1000\ \mu\text{m}$  길이의 보인 경우, 각각  $32$ ,  $56$ ,  $76.5\ \text{V}$ 에서 스위치가 작동하였다. 그리고 이론적으로 예측한 보의 변위와 실제 측정된 보의 변위, 그리고 측정된 보의 변위와 측정된 단차의 합인 전극간 거리로부터 이론적으로 구한 임계전압과 실제 측정된 임계전압을 Table 2에 각각 정리하였다.

한편 식 (5)에 의해 제작된 미소스위치가 조절 가능한 임계가속도 스위치로 응용될 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3의 미소보 중심에  $7\ \mu\text{g}$ 의 실리콘을 남겨 놓을 경우, 스냅스루 좌굴현상은 식 (5)에서 나타내었듯이 가속도에 의한 관성력과 전압의 인가에 따른 정전기력의 복합력에 의한 결과로 볼 수 있다. 이 경우 길이  $800\ \mu\text{m}$ ,  $900\ \mu\text{m}$ ,  $1000\ \mu\text{m}$ 의 스위치 각각에 대하여 전극간 전압을  $0\sim 32\ \text{V}$ ,  $0\sim 56\ \text{V}$ ,  $0\sim 76.5\ \text{V}$  범위내에서 변화시킬 때 미소스위치가 측정할 수 있는 가속도의 범위는  $0\sim 14\ \text{g}$ ,  $0\sim 35\ \text{g}$ ,  $0\sim 47\ \text{g}$ 가 되며, 각 미소스위치별 전극간 전압과 임계가속도 사이의 관계는 Fig. 7에 도시한 바와 같다. 이때 질량  $7\ \mu\text{g}$ 의 기준은 전극 크기  $230\ \mu\text{m}\times 230\ \mu\text{m}$ , 아래의 실리콘을 높이  $100\ \mu\text{m}$ 로 비등방 식각했을 경우를 고려하여 결정한 값이다.

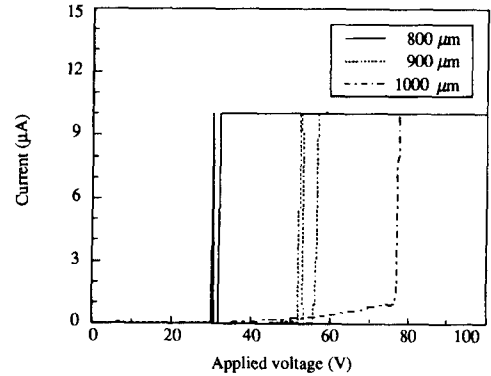


Fig. 6 Measured threshold voltage for electrostatic snap-through

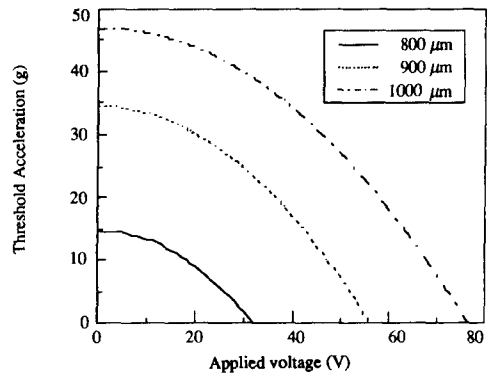


Fig. 7 Estimated acceleration threshold of the microswitch with  $7\ \mu\text{g}$  proof mass under an inter-electrode bias voltage

## 5. 토의 및 고찰

스냅스루 좌굴을 이용한 미소스위치는 정전력을 가함으로서 스위칭기능을 할 수 있음을 확인하였다. 그러나 Table 2의 이론적 예측치와 실험결과 사이의 오차는 스위치의 제작에 사용된 각 재료의 물성치 및 잔류응력, 중심에서의 처짐오차, 그리고

Table 2 Comparison of the measured and estimated performance of microswitches

Beam length( $\mu\text{m}$ )	Beam deflection( $\mu\text{m}$ )		Threshold voltage(V)	
	Measured	Estimated	Measured	Estimated
800	$6.5\pm 0.8$	7.1	$32\pm 1$	10.0
900	$8.7\pm 1.0$	8.9	$56\pm 3$	27.5
1000	$11.7\pm 1.4$	11.0	76.5	40.0

스냅핑 좌굴의 임계하중의 오차 등에서 기인한다고 볼 수 있으며, 각 오차의 원인은 다음과 같다.

물성치 및 잔류응력의 측정에 있어서  $p^+$ 실리콘 단일막의 경우 기준에 발표된 값들과 거의 일치함을 보이지만, 알루미늄과 열산화막의 물성측정에 사용한  $Al/p^+$ 실리콘,  $SiO_2/p^+$ 실리콘 복합막의 경우는 Lin<sup>(6)</sup>의 논문에서도 제시된 바처럼 블리스터 방법을 이용하여 측정된 물성치와 잔류응력의 값은 오차를 가진다. 이러한 사실에도 불구하고 오차를 줄이기 위하여 알루미늄막과 열산화막을 단일막으로 만들지 못하는 이유는  $p^+$ 실리콘막의 제거시 알루미늄막과 산화막도 영향을 받기 때문이다. 측정을 통해서 얻은 알루미늄의 탄성계수는 다른 문헌상의 값들과 비슷한 경향을 보이지만, 잔류응력은 어닐링 효과로 초기 압축잔류응력을 가진다. 블리스터 시험에 의해 얻은 열산화막과  $p^+$ 실리콘 복합막의 압력과 변형과의 관계는 일부구간에서만 선형성을 보인다. 본 실험에서는 먼저 복합박막의 초기 변형을 측정된 후, 그때 산화막에 걸리는 압축잔류응력을 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 추정하는 과정에서 오차가 발생하였을 가능성이 있다.

마지막으로 선형탄성이론으로 얻어진 임계전압과 실제 측정임계전압사이에 큰 오차가 있음을 알 수 있다. 그러나 초기변형의 이론치와 측정치가 거의 일치한다는 사실을 고려할때 임계전압의 오차는 이론에서 고려하지 않은 보내에 재분포된 잔류응력의 영향에 의해 발생한 것으로 보인다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 정전기력을 이용한 임계하중에 대한 스냅스루 좌굴을 일으키는 마이크로 스위치를 설계, 제작하였고 실험을 통하여 스냅스루 좌굴조건을 측정하였다.

이론적 연구결과로 스냅스루 좌굴현상의 필요조건은 단지 두께와 초기변형의 비로 나타나며, 재료의 기계적 물성치와 크기 등에 무관함을 알 수 있었다. 실험적 연구에서는 산화막과  $p^+$ 실리콘의 복합층으로 구성된 미소소 스위치를 설계, 제작하였으며, 사용된 재료의 물성치를 실험에 의해 측정하였다. 스냅스루 좌굴이 발생하는 변형과 임계전압을 측정하였으며, 이론으로 얻어진 값들과 비교하였다. 측정된 임계전압과 이론적 전압간의 오차는 박막의 초기잔류응력에 의한 영향으로 추정된다.

또한 미소스위치의 전극간 전압을 조절함으로써 임계가속도를 조절할 수 있는 가변가속도 스위치의 응용 가능성을 제시하였으며,  $7 \mu g$  질량을 가진 미소가속도스위치에 대해 조절가능한 이론적인 임계가속도 범위를 보였다.

본 미소스위치는 자동차 에어백의 보조센서로 응용이 가능할 뿐 아니라, 비휘발성 미소기계 메모리, 미소밸브 및 펌프, 미소 토글스위치, 미소 광접속 스위치, 미소텔레이 혹은 미소 전압차단기 등 다양한 분야로의 응용이 가능하다.

## 후 기

본 연구의 미소스위치 설계 및 제조공정 개발은 상공자원부 G7과제(차세대 자동차기술 개발사업)의 일환으로 현대자동차(주)가 주관하는 고안전 차체설계(승객보호 장구) 기술개발의 위탁기술과제 일부이며, 블리스터 실험에 의한 미소재료 물성시험은 국방과학연구소에서 시행한 기초연구 사업(UD940065BD)의 일부로 각각 수행한 것이다.

## 참고문헌

- (1) 조영호, 1993, "미소기계집적 시스템에서의 미소 기계공학," 대한기계학회지, 제33권, 제6호, pp. 823~826.
- (2) 조영호, 1993, "마이크로머시닝 기술과 마이크로머신," 기계기술, 제20권, 제12호, pp. 33~35.
- (3) Thornton, J. A., 1989, "Stress-Related Effects in Thin Films," *Thin Solid Films*, pp. 5~31.
- (4) Judy, M. W., Cho, Y.-H., Howe, R. T. and Pisano, A. P., 1991, "Self-Adjusting Micro-Structures," *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop*, pp. 51~56.
- (5) Simitzes, G. J., 1976, *An Introduction to the Elastic Stability of Structures*, Prentice Hall, pp. 189~215.
- (6) Lin, P. and Senturia, S. D., 1990, "The In-Situ Measurement of Biaxial Modulus and Residual Stress of Multi-Layer Polymeric Thin Films," *Proc. MRS*, pp. 41~46.
- (7) Timoshenko, S. P., 1959, *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, pp. 197~205.