論 文
48C - 6 - 14

정전형 미소 평판 공진자의 설계 및 제작

Design and Fabrication of an Electrostatic Microplate Resonator

鄭 玉 贊* · 梁 翔 植**
(Ok-Chan Jeong · Sang-Sik Yang)

Abstract - This paper represents an electrostatic micro plate resonator which consists of a rigid plate suspended with four bridges and a counter electrode. The bridges of the resonator are designed corrugated so that the residual stress are released. The FEM simulation results confirmed that the deflection characteristic of the corrugated bridge is hardly affected by the initial residual tensile stress. One resonator with the corrugated bridges and the other with the flat bridges were fabricated by the boron diffusion process and the anisotropic etch process. The vertical deflection of the fabricated electrostatic resonator was measured with a laser vibrometer, and the data were compared with the calculation results. The deflection of the resonator with the flat bridges is smaller than the deflection of that with the corrugated ones because of the residual stress. The residual stress release effect was confirmed by the fact that the measured deflection of the resonator with the corrugated bridges is close to the calculated deflection of the resonator with the flat ones with the initial stress neglected.

Key Words : Electrostatic microplate resonator, Corrugated bridge, $p+$ silicon, Residual stress

1. 서 론

MEMS의 발달과 함께 미소 공진자에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 미소 공진자는 가속도계나 자이로센서 등과 같은 역학센서와 광학소자 등을 구동하는 미소 구동기에 쓰이는 중요한 요소이다. 공진자는 대개 현가 브리지를 통하여 고정된다. 이런 현가 브리지는 원하는 두께로 균일하게 제작되어야 한다. 일반적으로 균일한 두께의 브리지 제작에 사용되는 재료는 주로 폴리 실리콘, $p+$ 실리콘, 산화막, 그리고 질화막 등이다. 그 중에서도 $p+$ 실리콘은 전기전도성이 커서 배선의 역할을 겸할 수 있고 자동 식각 정지법을 이용하여 박막을 적절한 두께로 제작할 수 있으며 그 박막은 투명하고 좌굴(buckling)이 없기 때문에 마이크로 센서와 마이크로 구동기 등의 제작에 널리 쓰인다. $p+$ 실리콘 구조는 고온에서의 부분적인 붕소 확산 공정과 후확산 공정 그리고 습식 식각으로 제작된다. 이 $p+$ 층은 표면에 가까운 곳을 제외하고는 잔류 인장 응력을 갖는다[1]. 구조물내의 잔류 응력은 소자의 동특성에 영향을 미친다[2].

이러한 $p+$ 구조물의 잔류 응력을 완화하기 위하여 박막 구조물을 주름진 형태로 제작하는 연구가 수행되었다[2-4]. 참고문헌[2]에서는 잔류응력하에서의 편평한 $p+$ 박막과 주름진 $p+$ 박막의 정적 변위를 계산하였고, 큰 변위를 얻기 위한 주름진 박막의 설계 요건으로 주름의 깊이와 주름의 주기 등을 제시하였다. 근사적인 방법을 이용하여 주름진 박막의 동특성을 계산한 Yang 등의 연구 결과에 의하면, 잔류 인장 응력이 존재할 때 주름진 박막이 편평한 박막에 비하여 더 유연한 구조이며 잔류응력에 무관한 동특성을 가지나[2], 주름진 박막을 전극으로 하는 경우 구조가 복잡하여 수식유도에 의해 해를 함수의 형태로 나타내는 것은 불가능하고, 수치해석적 방법으로 해를 얻고자할 경우에도 응력-변형 해석과 전장-정전력 해석을 복합적으로 수행하여 그 수렴해를 구하는 것이 용이하지 않다.

본 논문에서는 궤환형 가속도계와 광학 소자 등에 응용할 수 있는 정전 구동 평판 공진자를 설계하고 제작한다. 정전력 해석이 용이하도록 전극판을 변형이 없는 평판으로 하고, 잔류 응력 완화 효과를 얻을 수 있도록 브리지를 설계하고 제작하여 정전 구동 시험 결과를 보인다. 본 논문의 제 2 절에서는 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위를 해석하고 주름진 브리지를 설계하여 공진자의 변위를 수치해석적으로 계산한다. 3 절과 4 절에서는 편평한 브리지를 갖는 공진자와 주름진 브리지를 갖는 공진자를 각각 제작하고 주파수 응답 시험을 수행하여 주름진 브리지의 잔류 응력 완화 효과를 확인한다.

2. 공진자의 정적 변위 해석 및 설계

그림 1은 정전형 평판 공진자의 개략도를 나타낸다. 공진자는 그림 1(a)와 같이 실리콘 평판과 평판의 네 귀퉁이

* 正 會 員 : 亞洲大 制御計測工學科 博士課程
** 正 會 員 : 亞洲大 電子工學部 敎授 · 工博
接受日字 : 1999年 1月 25日
最終完了 : 1999年 5月 03日

를 지지하는 네 개의 $p+$ 실리콘 브리지로 구성된다. 평판은 정전형 구동기의 가동전극이며, 브리지는 편평한 형태와 주름진 형태 등 두 가지 형태를 가질 수 있다. 그림 1(b)는 정전형 공진자의 구조를 나타낸다. 두 대면전극은 적절한 간극을 가지고 있으며 두 전극에 전압을 인가하면 평판이 고정전극쪽으로 움직이게 된다. 2.1 절에서는 편평한 브리지의 변위를 해석하고, 2.2 절에서는 잔류응력을 완화시킬 수 있는 주름진 브리지 구조를 설계한다.

2.1. 편평한 브리지의 변위 해석

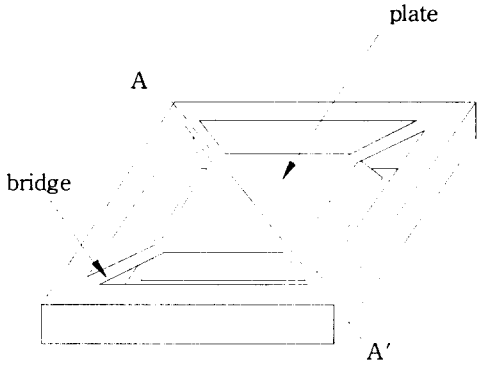
본 절에서는 편평한 브리지 내에 잔류 응력인 초기 인장력이 존재하고 평판에 정전력이 작용하여 수직 변위가 생길 때 브리지의 길이 방향 변형에 따른 인장력 등을 무시하는 경우와 고려하는 경우의 수직 변위를 계산한다.

그림 1과 같은 공진자의 평판 전극과 고정 전극 사이에 전압을 인가하면 전극은 정전력에 의하여 고정 전극 쪽으로 당겨진다. 평판이 브리지에 비하여 두꺼우므로 평판의 변형은 무시하고 브리지의 변형만 발생한다고 가정한다. 평판의 수직 변위를 v라고 하면, 정전력, F_e는

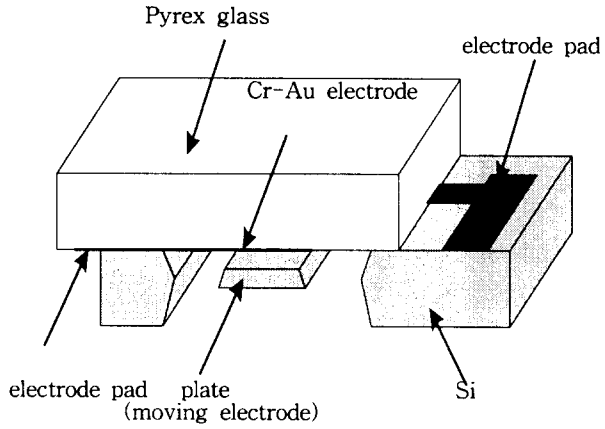
$$F_e = \frac{1}{2}\frac{\varepsilon A V^2}{(d_o - v)^2} \tag{1}$$

이다. 여기서, V는 인가전압, d_o는 두 전극간의 초기간극, ε는 공기의 유전률, A는 평판 전극의 면적이다.

길이가 l인 4 개의 브리지로 지지되는 평판에 작용하는 정전력이 F일 때 네 브리지의 양 끝에 작용하는 전단력은 $F/4$이고, 굽힘 모멘트는 $Fl/8$이다. 그림 1(a)의 A-A′ 단면으로 그린 자유물체도는 그림 2(a)와 같다. 평판은 브리지와 고정된 상태로 수직 방향으로만 운동하며 평판과 고정된 점에서의 보의 기울기는 0이다. 평판의 변형이 없고 좌우의 보가 대칭이므로 평판을 없애고 두 보를 맞붙인 등가 구조, 즉 길이가 $2l$인 양단 고정보의 중점에 평판 질량이 집중되어 있고 그 집중질량에 $F/2$의 힘이 작용하는 것으로 간주하면 보의 변형 해석 과정을 단순화할 수 있다. 이 때, 길이가 l인 보의 양단 경계 조건이 원래 구조와 동일하므로 동일한 보의 변형 해석 결과를 얻을 수 있다.



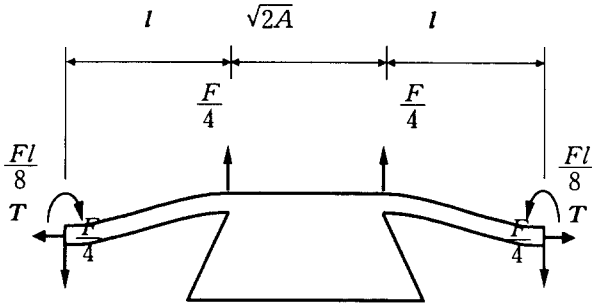
(a) 평판과 브리지의 구조.
(a) The structure of the plate and bridges.



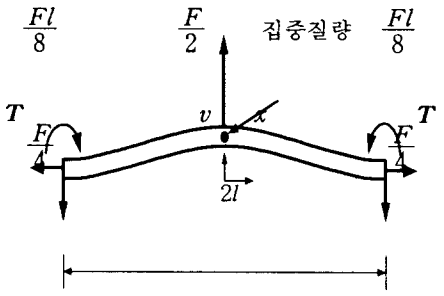
(b) 정전형 공진자의 구조.
(b) The structure of the electrostatic resonator.

그림 1. 미소 평판 공진자의 구조.

Fig. 1. The structure of the micro plate resonator.



(a) 평판이 있는 원래의 구조.
(a) The original structure with the rigid plate.



(b) 집중하중을 갖는 등가구조.
(b) The equivalent structure with a concentrated mass

그림 2. 변형 해석을 위한 자유 물체도. (그림 1(a)의 A-A′ 단면)

Fig. 2. The free-body diagram for the deflection analysis. (The cross-section of A-A′ in Fig. 1(a))

이 등가구조에서 보의 수직변위가 작다고 가정하여 보의 길이 방향 변형에 따른 길이 방향의 인장력을 무시하고 초기인장력이 없을 경우, 즉 T=0 일 때, 집중하중과 보의 중앙의 수직 변위, v와의 관계는

$$\frac{F}{2}=\frac{2Ebh^3}{l^3}v \tag{2}$$

이다[5]. 여기서, b, h, l은 각각 브리지의 폭, 두께, 길이이고 E는 p+ 실리콘의 탄성계수로서 본 논문에서는 일반적으로 알려진 125 GPa로 정한다[6].

그림 3은 공진자의 크기가 표 1과 같고 보의 인장력이 무시할 만큼 작은 경우 공진자에 작용하는 힘과 변위의 관계를 나타낸다. 그림 3에는 인가전압이 0.5 V, 1 V, 2 V 등일 때 식 (1)의 평판 전극의 변위에 따른 정전력을 나타내는 곡선과 식 (2)의 하중과 변위의 관계를 나타내는 직선이 있다. 이 그래프에서 만나는 점은 공진자의 정적 변위의 평형점을 나타내며, 두 개의 평형점이 존재한다. 변위가 큰 평형점은 외란에 의해 공진자의 평판이 고정 전극에 붙게 되는 불안정한 점이고, 변위가 작은 평형점은 안정하게 평형을 이루는 점이다. 인가 전압이 0.5 V와 1 V일 때 안정한 평형점에서의 변위는 각각 0.107 ㎛과 0.53 ㎛이다. 인가전압이 2 V일 때에는 평형점은 없고 평판이 고정전극에 붙게 된다.

식 (2)의 하중과 변위의 관계는 초기장력이 없고 수직 변위가 무시할 정도로 작은 경우에 해당되는 식이다. 만일, 수직변위가 큰 경우, 보의 길이 방향의 변형에 따른 인장력이 변위에 영향을 미치므로 이를 고려해야 한다. 그림 2에서 양단 고정보의 중앙에 집중하중, $F/2$가 작용하고 양단에 걸리는 인장력이 T일 때, 보의 중앙의 수직 변위, v는

$$v(x)=\frac{F}{2T}\sqrt{\frac{EI}{T}}\left[\sinh\sqrt{\frac{T}{EI}}x-\left(1+\cosh\sqrt{\frac{T}{EI}}x\right)\tanh\sqrt{\frac{T}{EI}}\frac{l}{2}\right]+\frac{F}{2T}(l-x) \tag{3}$$

이다[7]. 여기서, I는 관성모멘트로서 $bh^3/12$ 이다. 참고문헌 [7]에서는 초기 인장력을 고려하지 않았으나, 본 논문에서는 초기 인장력을 고려하여 해석한다. 따라서, 식 (3)의 T는 보의 길이의 변화에 따른 인장력, T_i와 초기 인장력, T_b의 합이다. 즉,

$$T=T_i+T_b \tag{4}$$

이다. 초기 인장력은 보의 길이 변화와는 무관하며, 보의 길이 방향의 변형에 따른 인장력, T_i만이 보의 길이 변화와 관계가 있다. 변형 후 보의 1/2에 해당되는 길이, 즉 브리지의 길이를 L이라 하면,

$$L=\int_0^l\left\{1+\left(\frac{dv}{dx}\right)^2\right\}^{\frac{1}{2}}dx \tag{5}$$

이고, $\frac{dv}{dx}$가 1에 비하여 매우 작으면

$$L-l=\frac{1}{2}\int_0^l\left(\frac{dv}{dx}\right)^2dx \tag{6}$$

이다. 따라서,

$$T_i=Ebh\frac{(L-l)}{l}=\frac{Ebh}{2l}\int_0^l\left(\frac{dv}{dx}\right)^2dx \tag{7}$$

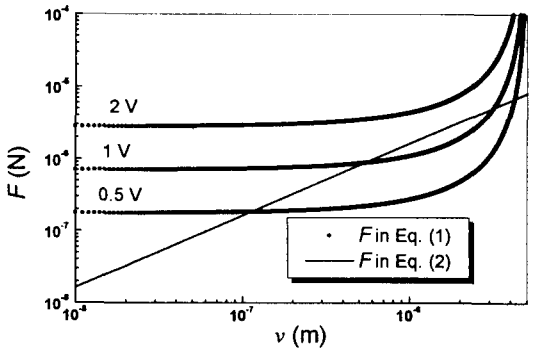


그림 3. 인장력을 무시하는 경우의 힘과 변위 곡선.
Fig. 3. The force-deflection curve with the beam tension neglected.

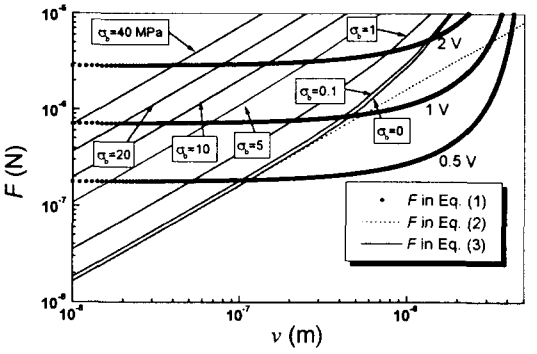


그림 4. 인장력을 고려하는 경우의 힘과 변위 곡선.
Fig. 4. The force-deflection curve with the beam tension considered.

이다. 식 (7)에 식 (3)의 수직변위를 대입하여 우변을 계산하면,

$$T_i=\frac{F^2Ebh}{16(T_i+T_b)^2}\left[3-3\frac{\tanh u}{u}-\tanh^2 u\right] \tag{8}$$

고, 여기서

$$u=\sqrt{\frac{T_i+T_b}{EI}}\frac{l}{2} \tag{9}$$

이다. 임의의 초기장력, T_b에 대하여 외력, $F/2$로 인하여 보에 발생하는 인장력, T_i는 식 (8)의 비선형 방정식에서 해를 구하여 얻고, 식 (4)에서 얻어진 인장력, T를 식 (3)에 대입하면 수직 변위를 구할 수 있다.

그림 4는 공진자의 크기 및 물성이 표 1과 같고 보의 인장력을 고려하는 경우, 공진자에 작용하는 힘과 변위의 관계를 나타낸다. 그림에서 초기 인장응력, σ_b는 T_b/bh이다. 초기 인장력이 없을 경우, 인가전압이 0.5 V, 1 V, 2 V 일 때 변위는 각각 0.107 ㎛, 0.47 ㎛, 1.37 ㎛이다. 이 경우, 같은 인가전압에 대하여 보의 길이 변형에 따른 인장력을 고려한 변위는 이를 무시한 변위에 비하여 작은데, 약 0.6 V 이하인 경우 즉, 수직 변위가 0.139 ㎛ (전체 보의 길이 1400 ㎛ 의 1/10000) 이하일 때에는 그 차이가 1 % 이하로 작으므로 보의 길이 변형에 따른 인장력을 무시하여도 무방하다. 또, 인가전압이 0.5 V, 1 V, 2 V 일 때, 초기 인장응력이 1 MPa인 경우의 변위는 각각 0.050 ㎛, 0.189 ㎛, 0.622 ㎛이고, 5 MPa인 경우의 변위는 각각 0.017 ㎛, 0.064 ㎛, 0.245 ㎛이다. 초기 인장응력이 커질수록 같은 인가전압에 대한 변위가 작아지며, 초기 인장응력이 0.1 MPa 이하이면 초기 인장응력이 변위에 미치는 영향은 약 10 % 이하로 작아짐을 알 수 있다.

2.2 주름진 브리지의 구조 설계

브리지에 주름이 있는 구조는 잔류 인장응력을 완화시켜 정전력에 의한 평판의 변위를 크게 할 수 있다. 주름 형태가 단순하지 않아서 정전력에 의한 응력과 변위를 해석적으로 구할 수 없으므로 수치해석적 방법으로 잔류응력의 영향과 주름 구조에 의한 잔류응력 완화 효과를 알아 보고 이를 근거로 주름의 크기 및 수를 결정한다. 그림 5는 브리지의 길이 방향으로 자른 단면을 나타낸다. 미소 공진자는 PATRAN을 이용하여 브리지 및 평판의 형상을 모델링하고, ABAQUS에서 제공하는 셸 요소 중 하나인 S4R을 이용하여 동력학적 해석을 수행한다. 그림 6은 주름의 수가 4일 때 주름진 브리지를 갖는 공진자를 모델링한 경우 요소의 형상을 보여준다. 그림 7은 인가전압이 0.5 V일 때 편평한 브리지를 갖는 공진자와 주름진 브리지를 갖는 공진자의 변위를 FEM 시뮬레이션으로 얻은 결과이다. 수치 계산에 사용한 공진자의 크기 및 물성은 표 1과 같고, 주름의 형상은 표 2와 같다. 또, $p+$ 실리콘의 포와송비는 0.25이고 밀도는 2340 kg/m3이며, 감쇠계수는 임의의 값 1이다. 그림 7(a)는 편평한 브리지를 갖는 공진자의 잔류 인장응력에 따른 변위 특성을 나타낸다. 잔류응력이 증가할수록 공진자의 변위는 감소하게 된다. 잔류응력이 없을 때와 5 MPa 일 때 정적 변위는 각각 0.106 ㎛와 0.020 ㎛이고 이 값들은 그림 4에 보이는 해석결과와 근사하다. 그림 7(b)는 초기 인장 응력이 40 MPa일 때, 브리지의 주름의 수에 따른 공진자의 변위를 계산한 결과이다. 주름의 수가 4 이상이면 초기 인장응력 하에서 주름의 수와 관계없이 동일한 변위 특성을 갖게 되고, 주름이 없는 경우보다 변위가 큼을 알 수 있다. 그림 7(c)는 주름의 수가 4 일 때 잔류 인장응력에 따른 공진자의 변위 특성 그래프이다. 잔류응력이 없을 때 주름진 브리지의 정적 변위는 0.159 ㎛이며, 편평한 브리지의 정적 변위의 대략 1.5 배이다. 또, 잔류응력이 5 MPa와 40 MPa 일 때 주름진 브리지의 정적 변위는 각각 0.150 ㎛과 0.108 ㎛이고, 편평한 브리지에 비하여 잔류응력의 영향이 매우 작음을 알 수 있다. 본 논문에서는 네 개의 주름이 있는 브리지를 갖는 공진자를 제작한다.

표 1. 정적 변위 계산에 사용된 변수 값.

Table 1. The parameter values in the calculation of the static deflection.

b	140 ㎛
h	2 ㎛
l	700 ㎛
A	4 ㎟
d_o	5 ㎛

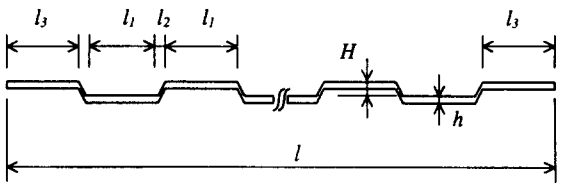


그림 5. 주름진 브리지의 단면 형상.

Fig. 5. The cross-section of the corrugated bridge.

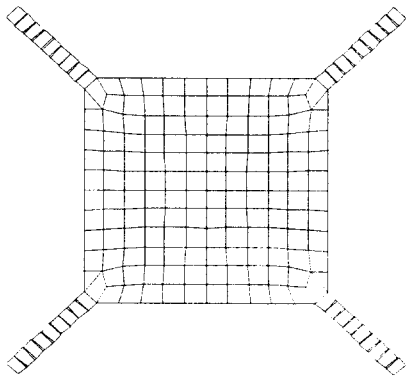
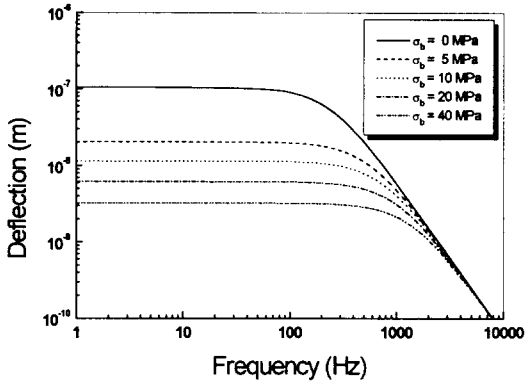
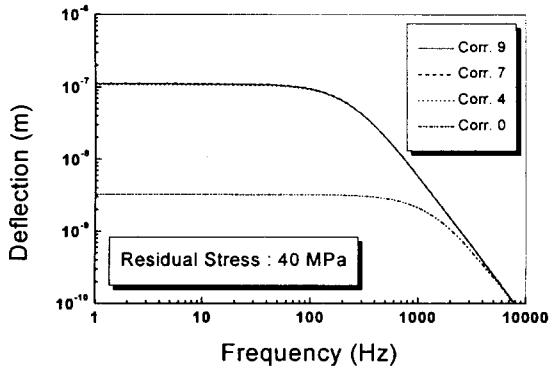


그림 6. 주름진 브리지를 갖는 공진자의 FEM 해석용 요소의 형상.

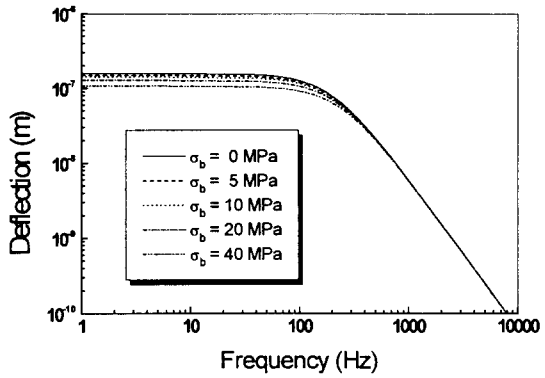
Fig. 6. The elements of the resonator with the corrugated bridges for the FEM analysis.



(a) 편평한 브리지의 잔류응력에 따른 변위.
(a) The deflection of the flat bridges under the various residual tensile stress.



(b) 잔류응력이 40 MPa일 때 주름의 수에 따른 브리지의 변위.
(b) The deflection of the bridges with the various number of the corrugations.



(c) 주름의 수가 4일 때 잔류응력에 따른 변위
(c) The deflection of the corrugated bridges under the various residual tensile stress.

그림 7 FEM 시뮬레이션으로 구한 공진자의 변위 특성.
Fig 7 The deflection characteristics of the bridges using the FEM simulation.

표 2 FEM 시뮬레이션에 쓰인 주름의 치수.
Table. 2 The dimension of the corrugation for FEM simulation.

(단위 : ㎛)

형상변수 \ 주름 수	4	7	9
l_1	70	38	28
l_2	10	10	10
l_3	65	33	22
H	14	14	14
h	2	2	2

3. 공진자의 제작 공정

본 논문에서 공진자 제작에 사용한 웨이퍼는 n형 (100) 웨이퍼로 두께가 525 ± 10 ㎛이고, 정전구동을 위한 대면 전극은 두께가 540 ㎛인 파이렉스 유리 (Corning #7740)를 기판으로하여 제작한다. 평판을 지지하는 브리지는 균일한 두께의 박막을 제작하는 데 용이한 $p+$ 실리콘으로 제작한다. 그림 8은 공진자의 제작 공정 순서를 나타낸다. 우선, 공진자의 진동 공간 형성을 위하여 얕은 식각을 수행하여 5 ㎛ 깊이의 진동 공간을 형성한다. 특히, 주름진 브리지를 갖는 공진자인 경우에는 진동 공간의 형성 후, 주름 형성을 위한 식각을 수행한다. 양면 정렬을 위한 정렬 홈 식각 후, 시편의 뒷면을 EPW (Ethylendiamine : Pyrocathecol : DI Water = 250 mℓ : 40 g : 80 mℓ) 수용액을 이용하여 115 ℃에서 320 분간 약 320 ㎛을 식각한다. 평판 공진자의 브리지와 평판 전극 형성을 위하여 붕소 확산 공정을 수행한다.

먼저, 고체 확산원 BN1100을 사용하여 1100 ℃에서 600 분간 선확산 공정을 수행하고, 연속하여 HF-LTO-HF 공정으로 BSG를 제거한 후, 후확산 공정으로 1100 ℃에서 90 분간 습식 산화 공정을 수행한다. 그림 9는 (100) 실리콘의 습식 식각시 식각 깊이와 하부 식각의 관계를 나타낸다. 만약, <110> 방향과 45° 를 이루는 방향으로 식각 보호막을 정렬하면 식각 깊이와 하부 식각의 깊이가 같게 된다[8]

뒷면을 열산화막으로 보호한 상태로 등방성 식각으로 앞면의 $p+$ 실리콘을 선택적으로 제거한 후, EPW 식각액으로 200 분 식각하여 두께가 2 ㎛인 브리지와 두께가 200 ㎛인 평판 진동추를 완성한다. 그림 10은 제작된 공진자의 사진들이다. 그림 10 (a)는 일괄 공정으로 제작된 주름진 구조와 편평한 구조를 갖는 공진자의 사진이다. 두 가지 형태의 브리지를 갖는 공진자를 일괄 공정으로 제작하였다. 따라서 주름진 브리지와 편평한 브리지는 주름 형성을 위한 식각 공정을 제외하고는 같은 공정 조건을 거치게 된다. 그림 10 (b)는 주름진 브리지를 갖는 평판 공진자의 평면 사진이고, 그림 10 (c)는 주름의 SEM 사진이다. 주름진 브리지의 주름의 주기와 깊이는 각각 160 ㎛과 14 ㎛이다. 고정전극을 제작하기 위하여 파이렉스 유리에 Cr-Au 층을

증착하고, PR 마스크를 이용하여 습식식각을 수행하여 전극을 제작한다. 고정전극이 형성된 파이렉스 유리에 음성 감광제를 0.3 ㎛ 두께로 도포하고 평판 공진자가 형성된 실리콘 웨이퍼와 이용하여 접합함으로써 정전형 평판 공진자의 제작을 완료한다.

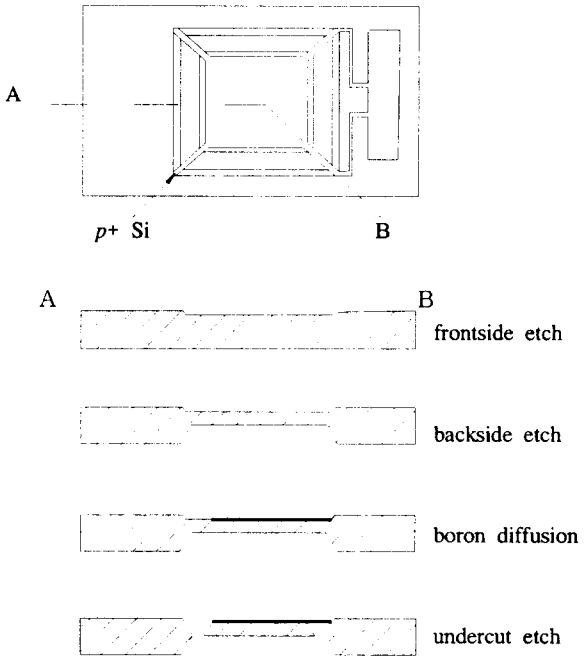


그림 8 정전형 평판 공진자의 제작 공정.

Fig. 8 The fabrication processes of the electrostatic miroplate resonator.

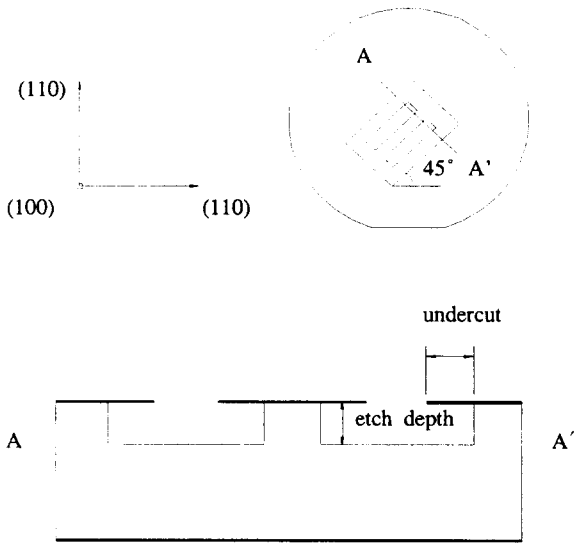
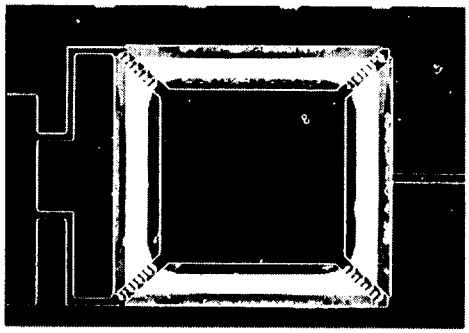


그림 9 보호막의 45° 정렬시 (100) 실리콘 웨이퍼의 식각 깊이와 하부 식각

Fig. 9 The etch depth and under cut in the case of 45° alignment of the passivation layer on (100) silicon wafer.

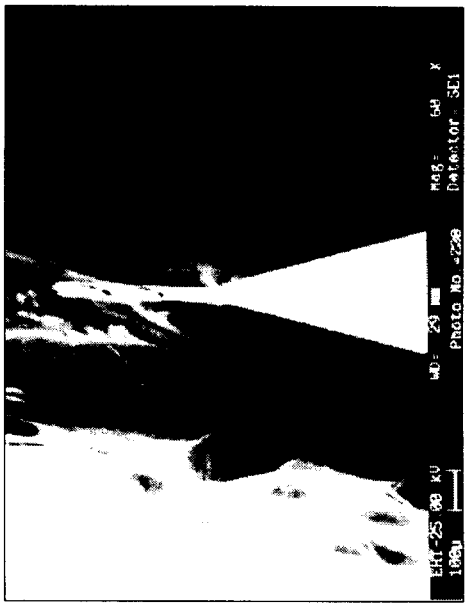
(a) 일괄 공정으로 제작된 공진자의 사진.

(a) The photograph of the resonator fabricated through the batch processes.



(b) 주름진 브리지를 갖는 공진자의 사진.

(b) The photograph of the resonator with the corrugated bridge.



(c) 주름진 브리지의 SEM 사진.

(c) The SEM photograph of the corrugated bridge.

그림 10 제작된 공진자의 사진들.

Fig. 10 The photographs of the fabricated resonator.

4. 동특성 시험

그림 11은 정전형 미소 평판 공진자의 진동을 측정하기 위한 변위 측정 시스템의 개략도이다. 두 전극에 교류 정현파 전압을 두 전극에 인가해 주고, 주파수를 변화시키면서 레이저 진동계 (Polytec OFV352 sensor head with OFV2600 controller)를 이용하여 공진자 평판 중심 속도를 측정한다. 레이저 진동계의 출력 전압 신호는 평판의 속도에 비례한다. FFT Analyzer (Lecroy 9310 Dual Oscilloscope)를 이용하여 인가전압 주파수의 두 배인 주파수에서 출력 전압의 진폭을 얻는다. 공진자의 진동이 정현파 진동이라고 가정하면 공진자의 피크-피크 변위, Y_p를 식 (11)로 부터 계산할 수 있다.

$$Y_p = k\frac{V_o}{\pi f} \tag{11}$$

여기서, V_o와 k는 각각 레이저 진동계 출력 전압 진폭과 변환 상수이고, f는 공진자의 진동 주파수이다. 그리고, 변환 상수, k는 5 mm/s/V이다.

그림 12(a)는 인가 전압 진폭이 0.5 V와 1 V일 때 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위 주파수 응답을 나타낸다. 그림의 점선은 측정된 자료를 MatLab을 이용하여 적합한 (fitting) 곡선이다. 인가 전압 진폭이 0.5 V와 1 V일 때 10 Hz 이하에서의 공진자의 피크-피크 변위는 각각 0.051 ㎛와 0.159 ㎛이다. 또, 두 경우 모두 공진 주파수는 137 Hz이고 감쇠비는 0.32이다. 그림 12(b)는 인가 전압의 진폭이 0.5 V와 1 V일 때, 주름진 브리지를 갖는 미소 공진자의 변위 주파수 응답을 나타낸다. 인가 전압 진폭이 0.5 V와 1 V일 때 10 Hz 이하에서의 공진자의 피크-피크 변위는 각각 0.138 ㎛와 0.547 ㎛이고, 공진 주파수는 각각 140 Hz와 139 Hz이며, 감쇠비는 각각 0.25과 0.28이다.

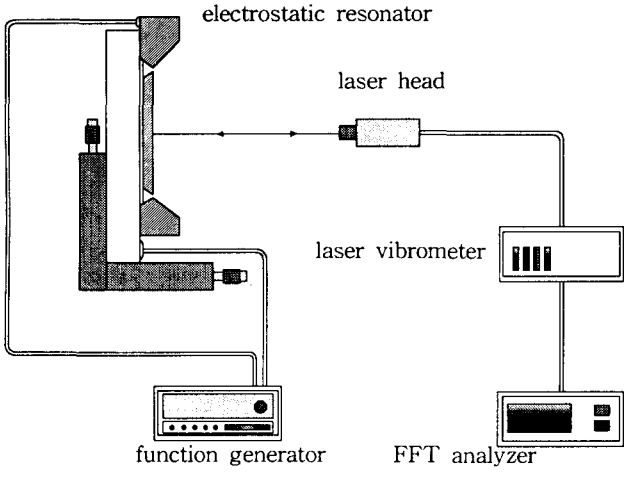
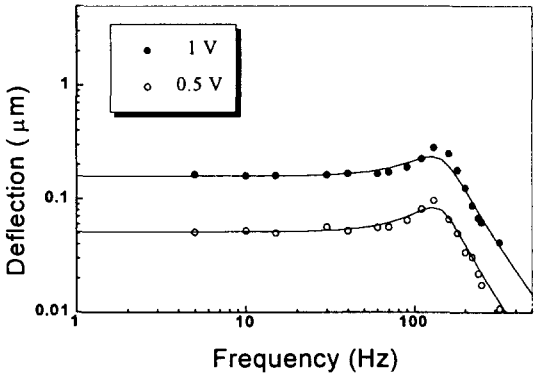
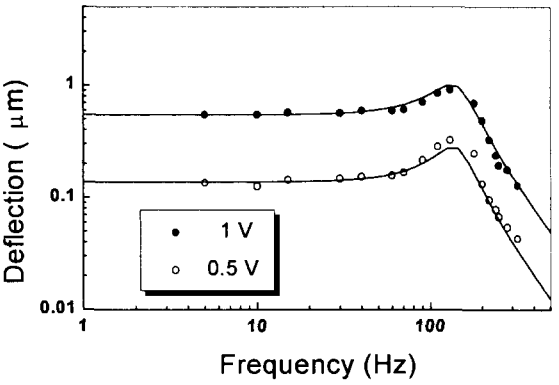


그림 11 변위 측정 시스템의 개략도.
Fig. 11 The schematic diagram of the deflection measurement system.



(a) 편평한 브리지의 경우.
(a) in the case of the flat bridge.



(b) 주름진 브리지의 경우.
(b) in the case of the corrugated bridge.

그림 12 공진자의 변위 주파수 응답.
Fig. 12 The deflection frequency responses of the resonators

5. 토 의

표 3은 4 절의 인가 전압에 따른 두 공진자의 동특성 시험결과와 2.1 절의 정적변위 해석 결과 및 2.2 절의 FEM 계산 결과를 나타낸다. 인가전압에 따른 공진자의 동특성 시험에서 주름진 브리지를 갖는 공진자의 변위가 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위보다 큰 것은 브리지를 이루고 있는 재질인 $p+$ 실리콘에 잔류하는 인장응력이 완화되었기 때문이다.

정적 변위 계산은 잔류응력과 빔의 변형에 따라서 발생되는 인장력을 고려한 세 가지 방법으로 계산하였다. 정특성 해석 I은 공진자의 수직 변위를 고려하여 발생되는 정전력과 브리지의 변형에 따른 공진자의 정적 변위 계산 결과이다. 정특성 해석 II는 초기응력이 없고, 보의 길이 방향 변형에 따른 인장력만을 고려한 계산 결과이다. 정전력이 큰 경우인 1 V 인가시에는 보의 길이 방향 변형이 커서 공진

표 3 정전형 공진자의 측정 및 계산 결과.
Table 3 The measurement and the calculation results of the electrostatic resonators.

구분		브리지형태	편평		주름	
		AC 인가전압 진폭 혹은 DC 인가전압	0.5 V	1 V	0.5 V	1 V
시 험	동특성*	피크-피크 변위 (10 Hz 이하)	0.051 μm	0.159 μm	0.138 μm	0.547 μm
		공진주파수	137 Hz	137 Hz	140 Hz	139 Hz
		감쇠비	0.32	0.32	0.25	0.28
해 석	정특성 I (σ_b = 0, T_i = 0)	정적변위	0.107 μm	0.53 μm		
	정특성 II (σ_b = 0, $T_i \neq 0$)	정적변위	0.107 μm	0.47 μm		
	정특성 III (σ_b = 1.3 MPa, $T_i \neq 0$)	정적변위	0.045 μm	0.18 μm		
	정특성 III (σ_b = 5 MPa, $T_i \neq 0$)	정적변위	0.017 μm	0.064 μm		
FEM 계산	σ_b = 0	정적변위	0.106 μm		0.159 μm	
	σ_b = 5 MPa	정적변위	0.020 μm		0.150 μm	

* 곡선 적합 후 수치임.

자의 변위가 정특성 해석 I에 비하여 감소하게 되나, 0.5 V 인가시에는 길이 방향 변형의 영향이 나타나지 않는다. 정특성 해석 III의 계산 결과는 초기 응력과 인장력을 고려한 계산결과이고, 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위 시험 결과와 비교하여 $p+$ 브리지내의 잔류 응력 크기를 추정할 수 있다. 잔류 인장응력이 1.3 MPa일 때 편평한 브리지를 갖는 공진자의 정특성 해석 III의 결과와 공진자의 시험 결과가 약 13 %의 오차내로 일치한다. 또, 표 3에서 인가 전압이 0.5 V인 경우 주름진 브리지를 갖는 공진자의 실험치는 잔류 인장응력이 0이거나 5 MPa일 때의 FEM 계산치에 비해 작으며, 약 10~15 %의 오차내에 있음을 추정할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 $p+$ 식각 정지법을 이용하여 주름진 브리지와 편평한 브리지를 갖는 평판 공진자를 붕소 확산 공정과 이방성 식각 공정 등으로 제작하였다. $p+$ 박막내에 잔류하는 인장응력과 브리지 길이 변형에 따른 인장력을 고려한 정적 변위를 계산하였고, 레이저 진동계를 이용한 두 공진자의 주파수 특성 시험 결과와 비교하였다. 편평한 브리지를 갖는 공진자의 수직 변위에 대한 FEM 계산 결과는 해석 결과와 일치하고, 이 결과들은 편평한 브리지 내의 잔류 인장응력이 공진자의 수직 변위에 큰 영향을 미침을 보여준다. FEM 계산 결과에 의하면 주름진 브리지의 경우 잔류 인장응력의 영향이 편평한 브리지의 경우에 비하여 매우 작다. 실험 결과에 의하면 주름진 브리지를 갖는 공진자의 변위가 편평한 브리지를 갖는 공진자의 변위보다 크다. 이 결과는 제작된 편평한 브리지 내에 잔류 인장응력이 존재하고 주름진 구조가 잔류응력을 완화시킴을 보여준다.

향후, 주름진 브리지 구조를 갖는 공진자의 실험 결과와

비교하여 영률을 추정하고 평균 응력 측정 구조인 회전 빔 구조를 공진자와 같이 제작하여 수직 변위 계산에 의하여 얻은 브리지의 응력 추정 결과와 비교하여 계산식의 타당성을 검증하고자 한다. 이 결과를 이용하여 좀 더 정확한 잔류응력의 크기를 추정할 수 있다.

이 논문은 1996년 한국학술진흥재단의 학술연구비 (ISRC 96 - E - 4103)에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

[1] E. H. Yang, S. S. Yang and S. H. Yoo, "A Technique for Quantitative Determination of the Profile of the Residual Stress along the Depth of p+ Silicon Films," Appl. Phys. Lett., Vol. 67 (7), 14, pp. 921-914, 1995. 8.

[2] E. H. Yang, S. S. Yang, O. C. Jeong, "Fabrication and Electrostatic Actuation of Thin Diaphragms," KSME International Journal, Vol. 12, No. 2, pp. 161-169, 1998.

[3] P. R. Scheeper, W. Olthuis, and P. Bergveld, "The Design, Fabrication, and Testing of Corrugated Silicon Nitride Diaphragms," IEEE/ASME Journal of MEMS, pp. 36-42, 1994. 3.

[4] E. H. Yang, S. S. Yang, E. J. Park, and S. H. Yoo, "Dynamic Characteristic of Corrugated and Flat p+ Diaphragms Actuated Electrostatically under Residual Stress," ASME Winter Meeting, DSC-Vol. 59, Atlanta, U. S. A., pp. 441-445, 1996. 11.

[5] D. P. Walter, Formulas for stress, strain, and structural Matrices, JohnWiley & Sons, Inc, 1994, p. 526.

[6] Ding, X., Ko, W. H. and Mansour, J. M., "Residual Stress and Mechanical Properties of Boron doped p+ Silicon Films," Proc., IEEE Transducers '89, Vol. 2, pp. 866-871, 1989.

[7] B. K. Choi and E. G. Lovell, "Improved Analysis of Microbeams under Mechanical and Electrostatic Loads," J. Micromech. Microeng, 7, pp. 24-29, 1997.

[8] B. Schmidt, L. Bischoff and J. Teichert, "Writing FIB Implantation and Subsequent Anisotropic Wet chemical Etching for Fabrication of 3D Structures in Silicon," Eurosensors X, Leuven, Belgium, pp. 279-282. 1996. 9.

저 자 소 개

정 옥 찬(鄭 玉 贊)

1972년 6월 28일생. 1997년 아주대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정. 주관심분야 : 마이크로 공전자의 동특성 해석, 설계 및 제작

Tel : 0331-219-2488, Fax : 0331-212-9531
E-mail : memsoku@mems.ajou.ac.kr

양 상 식(梁 翔 植)

1958년 1월 16일생. 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업. 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사). 1988년 U. C. Berkeley 졸업(공박). New lersey Institute of Technology 연구 조교수. 현재 아주대 공대 전자공학부 교수. 주관심분야 : 마이크로 소자의 Mechanism과 Actuation, Motion Control과 Nonlinear Control

Tel : 0331-219-2481, Fax : 0331-212-9531
E-mail : ssyang@madang.ajou.ac.kr