

대칭형 2자유도의 폴리실리콘 공진 구조체에 대한 진동특성 분석

홍윤식*, 이종현**, 김수현*

Investigation on the Vibration Characteristics of a Symmetric 2DOF Polysilicon Resonator

Yoon Shik Hong*, Jong Hyun Lee**, and Soo Hyun Kim*

ABSTRACT

A new resonator that is fabricated by single polysilicon layer process is presented. The resonator can move in two orthogonal direction on the plane parallel to the substrate. And the resonant frequencies of the two modes are intrinsically designed to be identical since the overall structure of the resonator is symmetric about the two directions of motion. Since the resonator ideally has two identical vibration mode, it can be applied to various micro-devices that requires multi DOF motion, especially to microgyroscopes. To investigate the feasibility of application of the resonator, dynamic model of the resonator including the nonlinear behavior of driving electrodes is derived and evaluated with the fabricated one, and the self-tuning characteristics are proved though experiments.

Key Words : Polysilicon (다결정 실리콘), Resonator (공진기), Microgyroscope (마이크로 자이로스코프), Self-tuning (자가동조)

1. 서론

미세가공기술을 이용한 공진 구조체는 소형, 저가, 고성능의 여러 센서를 개발하는데 필요한 핵심 요소로 각광 받고 있다. 미세 공진 구조체를 응용한 소자로는 가속도 센서, 압력 센서, 가속도 센서 등이 있으며 활발한 연구가 이루어져 왔다. 최근 평면상의 2자유도 운동이 가능한 공진기를 개발하여 센서로 응용하려는 시도가 많이 이루어지고 있다^[1,2]. 그러나 공진 구조체의 수평 2자유도가 동일한 강성을 갖도록 제작되는 시도는 없었다. 동일한 수평 2자유도 강성을 갖는 공진 구조

체는 각각의 자유도 운동에 대한 공진 모드 또한 동일하므로 미세 구조 진동형 자이로스코프로의 응용에 큰 장점을 갖는다.

미세 가공된 수평 공진구조체는 크게 진동 질량, 스프링, 구동 전극 및 검출 전극의 구조로 나뉘고, 그 다양한 형태에 따라 각기 다른 진동 특성 및 거동을 보인다. 미세구조의 운동을 일으키고 검출하는 두 가지의 대표적인 전극이 빗살 구동 전극과 평판형 전극이다. 미세구조를 움직이는데 가장 많이 쓰이는 구동 방법은 선형성이 우수하고 구동 범위가 큰 빗살 형태의 전극을 이용한 방법이다^[3]. 반면에 빗살 전극을 변위 검출 전극으

* 한국과학기술원 기계공학과
** 광주과학기술원 기전공학과

로 사용하기에는 정전 용량 변화량이 평판형 전극에 비해 현저히 작다. 기존의 1 자유도 미세구조 공진기는 거의 모두 빗살 구동 전극을 이용하여 구동에 따른 비선형성의 문제를 해결하고 있지만, 빗살 전극의 구조상 구동 방향과 수직인 방향으로 변위의 발생이 제한된다. 이러한 원인으로 수평 2 자유도 공진기의 구동 및 검출에는 빗살 전극을 사용하는데 제약이 있다. 미세구조의 변위 검출에 가장 많이 사용되는 평행한 판 형태의 평판형 전극은 작은 변위에 대해 큰 정전용량의 변화를 발생시킬 수 있다. 평판형 전극을 구동 전극으로 사용할 경우 정전력에 따라 변위가 비선형적으로 변하는 결과를 보이지만, 빗살 전극과는 상반되게 구동 방향에 수직인 방향으로 변위 발생의 제한이 없으므로 수평 2 자유도 공진기의 구동 및 검출에 유리하다.

본 연구에서는 새로운 형태의 수평 2 자유도 마이크로 공진기를 제안한다. 새로운 형태의 수평 2 자유도 공진기는 동일한 공진 모드를 고유의 특성으로 갖도록 설계되므로 자가 동조(self-tuning)된 2 개의 진동 모드를 갖는다고 할 수 있다. 또한 수평 2 자유도 공진기는 평판형 구동 및 검출 전극을 갖는데, 평판형 전극은 비선형 특성을 가지므로 비선형 특성이 공진기의 구동에 미치는 영향을 해석하고자 비선형 모델링을 수행한다. 미세 가공 기술을 이용해 제작된 공진기로 이용해 비선형 모델 검증하고 자가 동조 특성에 대해서도 평가한다.

2. 대칭형 수평 2 자유도 공진기

Fig. 1 은 x 와 y 축에 대해 대칭의 구조를 갖는 공진기로서 기판과 평행한 평면 위의 2 자유도 운동을 하여 x 축과 y 축의 직선 진동이 주 진동 모드가 되도록 설계된 공진기이다. 중앙에 원형의 앵커가 위치해 열 산화 막으로 기판에 고정되어 있고 구멍이 뚫린 사각 판 형태의 진동 질량이 곡선 보 스프링(curved beam spring)으로 앵커에 연결되어 지지 된다. 구조체의 상하와 좌우측에는 동일한 형태의 전극이 구비되어 구동 및 검출을 수행한다. 원형 앵커로부터 방사형으로 휘어져 나가 진동 질량을 지지하는 8 개의 곡선 보 스프링 또한 중앙의 x 와 y 축에 대해 대칭 형태를 이루고 있어 x 와 y 방향으로 동일한 강성을 지닌다. 상하와 좌우

측에는 동일한 형태의 전극이 위치해 있다. 이동 구조체와 고정자 사이에 다수의 측면 정전 용량 감지 전극이 외팔 보의 형태로 형성되어 있고, 다수의 외팔 보 전극은 좁은 전극 간격과 넓은 전극 간격을 차례로 이루며 배열되어 있다. 이러한 전극의 형태는 평판형 전극의 유효 정전 면적을 넓히기 위해 고안되었다. 이하, x 와 y 축에 대해 대칭의 구조를 갖는 2 자유도 수평 공진기를 대칭형 수평 공진기라 칭한다.

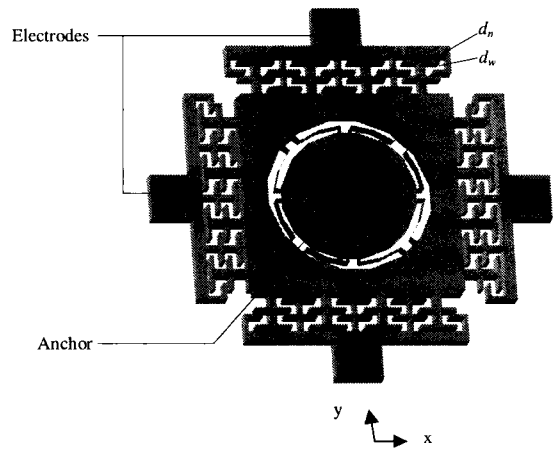


Fig. 1 Laterally driven 2 DOF resonator symmetric about x and y axes

위 Fig. 1 의 각 전극에 구동 신호를 가할 수도 있고 검출 회로와 연결을 통해 공진 구조체의 진동 변위를 측정할 수도 있다. 이때 구조체 중앙의 앵커는 직류 전압이 인가 되어 진동 변위에 따른 검출 전극의 정전 용량 변화를 발생시킬 수 있도록 한다.

평판 전극은 고정 전극과 진동 전극간에 전위차가 존재할 경우 기계적인 강성을 감소시키는 정전 강성이 존재하게 되는데, 본 연구에서 제안한 공진기는 대칭의 형태를 이루므로 정전 강성의 값이 x 와 y 축에 대해 동일하게 설계되었다. 일반적인 공정의 불 균일 성으로 인해 제안된 대칭형 수평 공진기의 치수 변화는 불가피하다. 그러나 공정의 결함에 의해 8 개의 곡선 보 스프링의 제조된 치수가 변하면 공진 구조체의 강성은 따라서 변하지만 각각의 스프링의 치수가 동일하게 변하므로 x 와 y 방향으로의 강성은 계속 일치하게 된다. 그러므로 제안된 대칭형 구조체는 xy 평면상에

서 x 와 y 방향으로 동일한 강성을 갖도록 설계된 수평 2자유도 공진기라 할 수 있다.

그러나 실제 동일하게 설계된 공진기가 한 웨이퍼 위에 여러 개 제작되어도, 공정에서 기인하는 불균일성에 의해 제작된 구조체의 치수가 영향을 받으므로 각각의 공진기가 완전히 동일한 공진 주파수를 가지기는 불가능하다. 공진 주파수가 가장 큰 영향을 미치는 공진기의 치수는 공진기 스프링의 폭이다. 실제 제조 공정에서 보의 폭에서 발생하는 제조 허용 오차는 약 10%인데, 보의 치수는 웨이퍼 상의 상대 거리가 가까울수록 균일하게 제조되고 멀수록 불균일하게 제조되는 경향을 보인다.

수평 2자유도 공진기는 2자유도 운동이 각기 독립적이기 위해 서로 수직이고, 우수한 자가동조 특성을 갖기 위해서는 2자유도 운동을 안내하는 스프링의 치수가 가능한 균일하도록 가깝게 제조되어야 한다. 이러한 조건을 만족시키는 구조는 x 축과 y 축에 대해 대칭인 구조를 갖는 스프링의 형태이다. 우수한 자가동조 특성을 갖는 2자유도 공진기는 고감도의 진동형 마이크로 자이로스코프의 응용이 가능하다.

3. 대칭형 수평 공진기의 운동 방정식

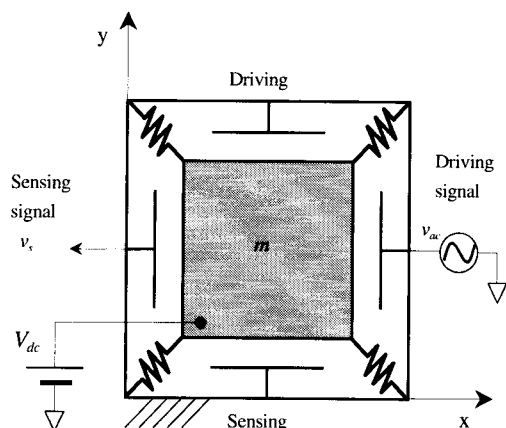


Fig. 2 Schematic diagram of the symmetric planar resonator

Fig. 2에 보이는 대칭형 수평 2자유도 공진기의 간략한 집중 질량 모델은 진동 질량 m , 스프링 시스템, 두 쌍의 평판형 전극으로 구성되어 있

다. 대칭형 수평 공진기의 운동 방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_x x + \frac{\partial U_e}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + k_y y + \frac{\partial U_e}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

여기서 k_x 는 x 방향 강성, k_y 는 y 방향 강성, U_e 는 정전 위치 에너지이다. x 축의 평판형 정전 전극간에는 V_{dc} 의 직류 전압이 인가되어 있고, 좌측 전극이 검출 전극 우측 전극이 구동 전극이며, 구동 전극으로부터 v_{ac} 의 교류 전압이 가해진다고 가정할 경우, 정전 에너지의 x 편미분으로부터 x 축 방향의 정전력을

$$\frac{\partial U_e}{\partial x} = -\epsilon A_3 V_{dc}^2 \left\{ \frac{d_n x}{(d_n^2 - x^2)^2} + \frac{d_w x}{(d_w^2 - x^2)^2} \right\} - \frac{\epsilon A_3 V_{dc}}{2} \left\{ \frac{1}{(d_n - x)^2} - \frac{1}{(d_w + x)^2} \right\} v_{ac} \quad (3)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 α 유전율, A_3 는 정전 전극간의 면적, d_n 와 d_w 은 각각 좁은 전극 간격과 넓은 전극 간격이다. 마찬가지로 상측 전극이 구동 전극이고 하측 전극이 검출 전극이며, x 방향과 같은 전위 연결이 이루어 졌을 경우, y 방향의 정전력을

$$\frac{\partial U_e}{\partial y} = -\epsilon A_3 V_{dc}^2 \left\{ \frac{d_n y}{(d_n^2 - y^2)^2} + \frac{d_w y}{(d_w^2 - y^2)^2} \right\} - \frac{\epsilon A_3 V_{dc}}{2} \left\{ \frac{1}{(d_n - y)^2} - \frac{1}{(d_w + y)^2} \right\} v_{ac} \quad (4)$$

와 같이 표현할 수 있다. 두 방향의 운동이 독립적이고 운동 방정식이 동일하므로 x 방향의 운동만을 고려하여 비선형 운동방정식을 세우면

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_x x - \left\{ \frac{\epsilon A_3 V_{dc}^2 d_0}{(d_n^2 - x^2)^2} + \frac{\epsilon A_3 V_{dc}^2 d_1}{(d_w^2 - x^2)^2} \right\} x = \left\{ \frac{\epsilon A_3 V_{dc}}{2(d_n - x)^2} - \frac{\epsilon A_3 V_{dc}}{2(d_w + x)^2} \right\} v_{ac} \quad (5)$$

이 된다. 식(5)을 살펴보면 비선형 강성 항과 함께 비선형 정전 구동력의 항이 존재함을 알 수 있다. 비선형 강성 항은 전극 간격에 비해 구동 모드의 변위 x 가 작다고 가정하여 정전 스프링상수 k_e 를

$$k_e \approx \left(\frac{\alpha^3 + 1}{\alpha^3} \right) \frac{\epsilon A_s V_{dc}^2}{d_n^3} \quad (6)$$

로 정의하고

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_x x - k_e x = \left\{ \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2(d_n - x)^2} - \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2(d_w + x)^2} \right\} v_{ac} \quad (7)$$

로 표현하여 모델링 할 수 있다. 비선형 구동 모드의 진동 해석, 즉 구동 전압 v_{ac} 에 대한 x 축 변위 x 의 계산은 Runge-Kutta 방법을 이용한 해석방법으로 수행된다. 구조체의 공진주파수에 거의 동일한 주파수를 갖는 구동 파형이 가해지면 x 방향의 진동은 구동파형과 동일한 주파수로 가진 되고 시간에 따라 진폭이 변하는 파형의 결과를 보인다. 구동 모드의 진동은 좌측 전극인 구동 검사전극으로부터의 출력 전압을 조사함으로써 가능하므로 구동 모델의 최종 출력은 구동 검사전극의 출력 전압이 된다. 구동 검사 전극의 출력 전압을 결정하는 전류 i_s 은 다음과 같이 표현된다.

$$i_s = \frac{\epsilon A_s V_{dc}}{2} \left\{ \frac{1}{(d_n - x)^2} - \frac{1}{(d_w + x)^2} \right\} \dot{x} \quad (8)$$

앞선 해석에 x 를 y 로 대치하면 y 방향의 운동방정식을 구할 수 있다.

4. 대칭형 수평 공진기의 제조 및 평가

4.1 대칭형 수평 공진기의 제조

대칭형 수평 공진기 구조체는 Fig. 3 에서 보이는 바와 같은 공정에 의해 제조된다. $3\mu\text{m}$ 열 산화막 희생층 위에 $6\mu\text{m}$ 의 다결정 실리콘이 증착되어 절연막 위의 다결정 실리콘 박막 구조를 형성한다. 절연막 위의 다결정 실리콘 박막 위에 식각 마스크로 쓰일 $1\mu\text{m}$ 의 저온 산화막(LTO layer)이

증착되고 패터닝 된다. 그 다음 6 m 의 다결정 실리콘 박막은 반응 이온 식각(RIE) 공정을 통해 구조체로 형성되고 식각 마스크인 저온 산화막이 제거된 다음, 다결정 실리콘 구조체는 POCl_2 확산 공정으로 도핑된다. 그 다음 3000 \AA 의 Al 박막이 전체 구조체에 스퍼터링으로 증착된 후 금속 박막의 패터닝 및 제거 공정을 통해 금속 패드를 형성한다. 마지막으로 최종의 구조체는 고착이 없는 HF 기상 식각(GPE) 공정을 통해 기판으로부터 뜨게 된다^(4,5).

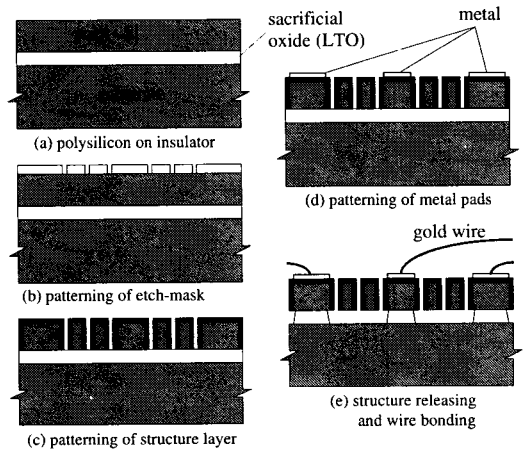


Fig. 3 Fabrication processes of the planar resonator

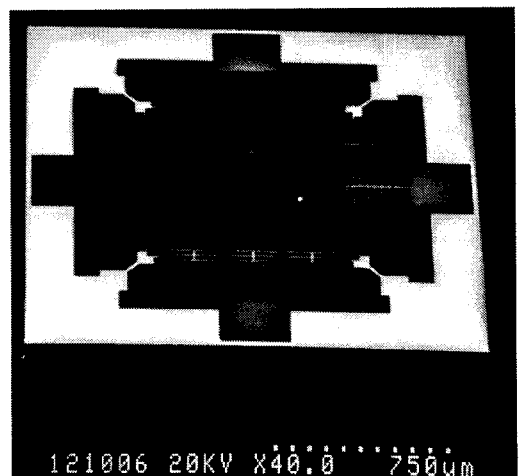


Fig. 4 SEM of the laterally driven resonator

제조된 구조체의 금속 전극과 검출 회로간에는 Au 와이어 본딩으로 직접 연결한다. 제조된 수평

공진기의 SEM 을 Fig. 4 에서 보이고 있다.

4.2 대칭형 수평 공진기의 매개변수 추정

대칭형 수평 공진기의 모델링 평가를 위해 먼저 매개변수를 추정한다. 대칭형 수평 공진기의 집중 질량 모델에 대한 선형 매개변수는 진동 질량 m , 곡선 보 스프링의 탄성 계수 k_x 와 k_y 그리고 점성 감쇠 계수 c 이다. 이중 진동 질량은 설계 치수로부터 계산 가능한데 계산된 질량은 $6.7042 \times 10^{-9} \text{kg}$ 이고 공정에 의한 오차는 10% 이내이다. 공진기의 탄성 계수는 공진 주파수를 측정함으로써 계산 가능하고 점성 감쇠 계수는 공진기의 Q 값을 측정함으로써 계산 가능하다. 실험은 300mtorr 의 진공 챔버 안에 시편을 삽입하고 진공 펌프로 챔버 내의 압력을 낮춘 다음 수행한다. 질량 $6.7042 \times 10^{-9} \text{kg}$, 보 스프링 단면의 너비가 $2.5 \mu\text{m}$ 일 경우 설계 치수로부터 유한 요소 모델을 이용해 해석적으로 계산한 x 및 y 방향의 탄성 계수는 동일하게 161N/m 이다. 설계 치수로부터 계산한 진동 질량 m 이 정확한 질량이라고 가정하고 측정된 공진 주파수로부터 계산한 탄성 계수는 120.338 N/m 이다. 구조체에 가해지는 직류 전압의 제곱에 반비례해 공진 주파수는 이동을 한다. 그러므로 탄성계수를 계산하기 위한 공진주파수는 구조체에 직류전압을 가하지 않고 측정한다. 제작된 공진기의 치수가 설계 치수와 정확히 맞지 않으므로 인해 공진 주파수 및 탄성 계수의 해석과 실험치 사이에는 오차가 발생한다. 점성 감쇠 계수 c 를 추정하기 위해서는 공진기의 주파수 응답 특성을 측정하여 Q 값을 얻는다. 주파수 응답 특성은 진동의 각 모드를 식 (1) 및 (2)와 같은 집중 질량 모델로 가정하고 출력 변위를 측정함으로써 구한다. 점성 감쇠 계수 c 와 Q 값 사이에는

$$c = \frac{m\omega}{Q} \quad (9)$$

의 관계식이 성립하고 여기서 ω 은 공진 주파수이다. 제작된 시험 공진기로 측정된 주파수 응답 특성 곡선과 함께 진공 상태를 변화해가며 측정된 Q 값이 Fig. 5 에 나타나 있다. 300mtorr 에서 선택된 공진기의 Q 값은 4815.4 이고 점성 감쇠 계수 c 는 $1.784 \times 10^{-7} \text{Ns/m}$ 이다. 공진기의 기준

작동 압력을 300mtorr 로 가정하였을 때 Q 값은 대기압일 경우와 비교해 약 50 배 증가하고 압력이 낮을수록 Fig. 5(b)의 특성을 갖는다. 주파수 응답 측정 시에는 구조체에 직류 전압을 가해 변위를 측정하므로 강성을 측정하는 경우에 비해서 감소한 공진주파수의 값이 측정된다.

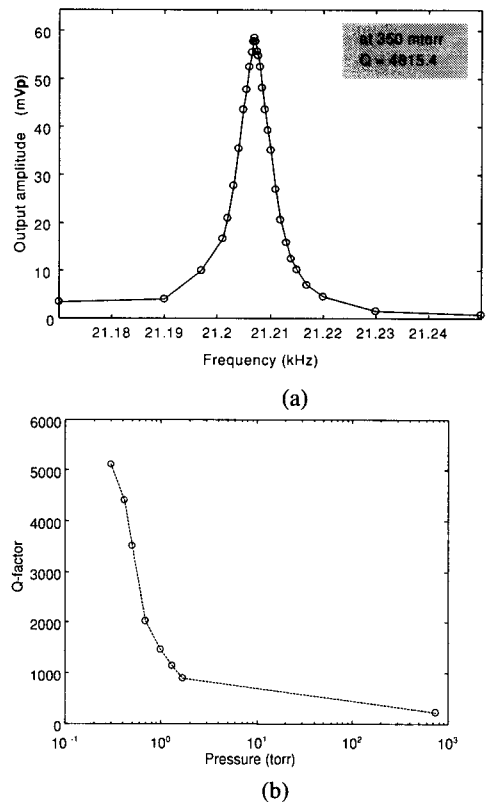


Fig. 5 Frequency response plot(a) and the Q-factor versus pressure(b) of the resonator

4.3 대칭형 수평 공진기의 비선형 모델 검증 및 특성 평가

먼저 Runge-Kutta 방법을 이용하여 V_{ac} 가 변할 때 발생하는 진동 진폭과 식(8)에 보인 구동 검사전극의 전류를 계산하고 실험과 비교 검증한다. 비선형 해석 방법을 이용하여 진동 진폭을 계산하는 조건도 시험 조건과 동일하게 한다. 입력 교류 전압을 매우 작게 주면 그에 따른 진동 진폭도 작게 발생하므로 구동 모드의 비선형 영향이 줄어들고 진동 진폭이 커질수록 비선형성은 강해진다. 여기서 구동 감시 전극의

전압 V_s 는 정전 용량의 변화로부터 발생하는 전류에 $50M\Omega$ 의 저항을 곱하여 계산된다.

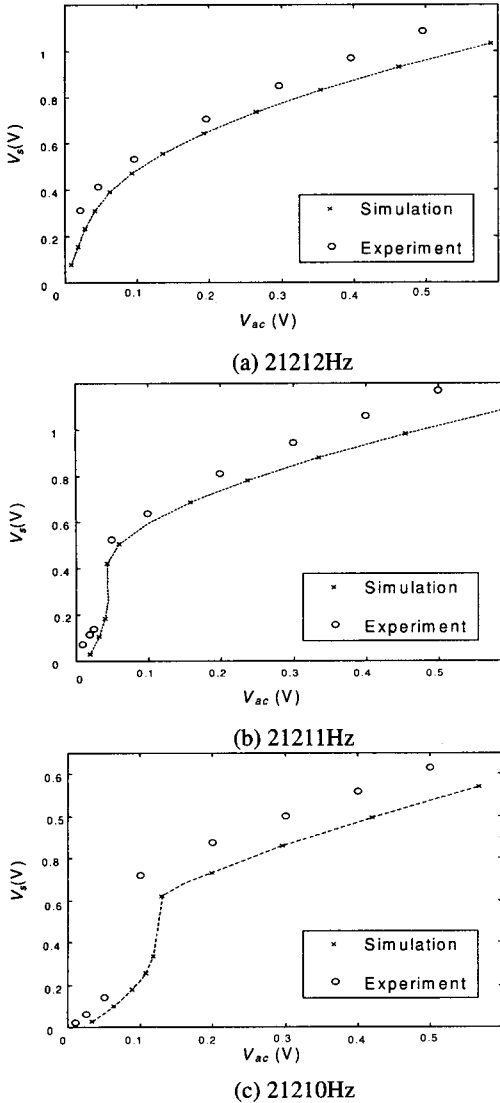


Fig. 6 Comparison between driving mode model and experiment

Fig. 6에서는 직류 전압에 의해서 비선형 진동계의 공진 주파수가 이동하는 현상에 관한 해석을 수행하였다. 비선형성이 강한 대칭형 수평 공진기의 진동은 교류전압의 크기를 변화 시켜도 진동계의 공진 주파수가 변하는데 실험을 통해 측정해 본 결과 입력 교류 전압의 변화에 대해

변화하는 주파수는 매우 작지만 교류 전압에 대한 검출 전극의 출력 전압 V_s 가 독특한 경향성을 보였다. 진공 상태와 구동 교류 전압의 주파수 등의 구동 조건을 달리한 실험에 대해서도 Runge-Kutta 방법을 이용한 비선형 해석이 구동 출력의 경향을 예측하는 가를 알아보기 위해 100mtorr의 진공 중에서 5V 직류 전압을 가하고 입력 교류 전압을 달리하며 실험해 보았다. 실험은 미세하게 달리한 세 점의 공진 주파수에 대해서 수행되었다. 실험과 해석의 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. Fig. 6의 (a)는 구동 주파수 21312Hz에서, (b)는 구동 주파수 21311Hz에서 수행한 실험이고

Table 1 Eight sets of primary and secondary resonant frequencies, and detuned frequency

Sample No.	Resonant frequency of		Detuned frequency (Hz)
	primary mode x-dir. (Hz)	secondary mode y-dir. (Hz)	
1	21211	21143	68
2	22620	22547	73
3	22481	22400	81
4	23095	23011	84
5	22509	22419	90
6	24471	24363	108
7	24290	24178	112
8	24788	24670	118
Standard deviation of each mode	1231.8	1214.1	Average of detuned frequency 91.75

(c)는 구동 주파수 21310Hz에서 수행한 실험이다. 측정치와 비교된 해석 결과는 입력 교류 전압에 대한 출력 전압의 도약 특성 및 출력 전압의 진폭에 대해 실험치와 유사한 결과를 보였다. 수차례의 실험을 통해 비선형 구동 모델의 Runge-Kutta 해석 방법이 정확한 출력 전압 V_m 을 예측하기에는 미흡하지만 구동 출력의 V_{ac} 에 대한

경향을 예측할 수 있는 도구로서의 타당성은 검증할 수 있다. 해석 결과는 출력 신호의 파형과 불안정한 발산 진동의 여부를 검사하는 도구로도 사용 가능하다. 시뮬레이션에 의해 구동 직류전압 5V 일때 구동 교류전압이 2.8V 이면 구동모드에 불안정성이 발생하는 결과를 보인 반면 실험에서는 2.2V 에서 불안정 출력신호가 발생하였다. 진동형 자이로스코프등의 응용을 위해서는 2자유도 공진기의 두 모드가 가능한 일치하는 특성이 매우 중요하고 본 연구에서 제안된 구조체는 고유한 자가 동조 특성을 갖도록 설계 되었다. 그러므로 실제 제작된 공진기에 대해 자가 동조 특성을 실험함으로써 대칭형 2자유도 수평 공진기의 특성을 평가할 수 있다.

이상적으로 제작된 대칭형 수평 공진기는 내재된 자가동조 특성을 갖지만 실제 제작된 공진기의 치수가 완벽하게 x 축과 y 축에 대해 대칭으로 제작되기가 불가능하므로 x 와 y 방향의 공진 모드의 주파수에 차이를 보인다. 제조된 공진기를 이용해 실험된 결과가 Table 1 에 나타나 있다. 8 개의 시편에 대한 x 및 y 방향 모드에 대한 공진 주파수의 표준 편차는 각각 1231.81Hz 와 1214.1Hz 이지만, 각 시편의 비동조된 공진 주파수 차이의 평균값은 91.75Hz 로 공진주파수의 표준편차에 비해 10 분의 1 이상 줄어든 결과를 보인다. 그러므로 대칭형 공진기가 우수한 자가동조 특성을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 제조 공정의 한계로 인한 비동조 주파수는 계속 존재 하므로, 제조 공정의 균일성 개선을 통해 공진기의 자가동조 특성을 개선하는 노력이 요구된다.

5. 결론

평면상의 x와 y축에 대해서 대칭의 형태를 가지고 2자유도의 진동이 가능한 수평 공진기가 설계되고 다결정 폴리실리콘의 미세 가공 공정으로 제작되었다. 본 연구의 대칭형 수평 공진기는 평판형 전극을 이용하여 구동 및 검출이 이루어지므로 단일 스프링 시스템이 두 방향의 서로 직교하는 진동을 안내할 수 있는 반면, 구동 변위에 따른 비선형성이 존재한다. 그러므로 해석을 통해 공진기의 비선형 거동을 해석하고 제조된 공진기의 실험과 비교 검증하였다. 비선형 모델은 실험치와 유사한 결과를 보여 구동

입력에 따른 진동을 예측하는 유용한 도구로서의 검증이 이루어졌다.

본 연구에서 제안된 구조의 대칭형 수평 공진기는 2자유도의 공진 모드가 동일한 자가동조 특성을 갖도록 고안되었다. 실험을 통해 측정된 공진기 시험 시편의 공진 주파수에 대한 표준편차는 약 1200Hz인 반면 공진기의 두 가지 진동 모드 사이의 공진 주파수 차이는 평균 91.75Hz를 보여 우수한 자가 동조 특성을 나타냄을 보였다. 이러한 자가동조 특성을 갖는 수평 공진기는 고감도 진동형 자이로스코프 등으로 응용 가능하므로 추가 연구를 통해 응용 센서로의 개발이 예상된다.

후기

본 논문은 BK21 사업지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. W. A. Clark, R. T. Howe and R. Horowitz, "Surface Micromachined Z-Axis Vibratory Rate Gyroscope," *Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, South Carolina, pp. 283~287, June 1996.
2. Y. S. Hong, J. H. Lee, C. S. Lee, W. I. Jang, C. A. Choi, S. Kim, and Y. Kwak, "Bandwidth analysis of a microgyroscope vibrating in x, y axis and its optimal design," *Proceedings SPIE Vol.3680, Design, Test, and Microfabrication of MEMS and MOEMS*, Paris, pp. 939~947, April 1999.
3. W.C.Tang et al. "Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures," *Proc. IEEE Workshop on Microelectromech. Syst.*, Salt Lake City, Utah, pp. 53-59, Feb. 1989.
4. C. A. Choi, C. S. Lee, W. I. Jang, Y. S. Hong, J. H. Lee and B. K. Sohn, "Stress characteristics of multi-layered polysilicon film for the fabrication of micro resonators," *Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 38, Part 1, No. 6A*, pp. 3693~3699, June 1999.
5. J.H. Lee, W. I. Jang, C. S. Lee, Y. I. Lee, C. A. Choi, J. T. Baek and H. J. Yoo, "Characterization of anhydrous HF gas-phase etching with CH₃OH for sacrificial oxide removal," *Sensor and Actuator A 64*, pp. 27~32, 1998.