정전 용량형 MEMS 공진기의 비이상적 주파수 응답 모델링

고 형 호[†]

Modeling of non-ideal frequency response in capacitive MEMS resonator

Hyoung-ho Ko[†]

Abstract

In this paper, modeling of the non-ideal frequency response, especially “notch-and-spike” magnitude phenomenon and phase lag distortion, are discussed. To characterize the non-ideal frequency response, a new electro-mechanical simulation model based on SPICE is proposed using the driving loop of the capacitive vibratory gyroscope. The parasitic components of the driving loop are found to be the major factors of non-ideal frequency response, and it is verified with the measurement results.

Key Words : Non-ideal frequency response, parasitic capacitance, capacitive MEMS resonator

1. 서 론

MEMS 공진기(resonator)는 자이로스코프의 구동부, 공진형 가속도 센서, 전기기계적 클럭 발진기 등 다양한 분야에 적용되고 있다. MEMS 공진기는 정전 용량형, 압저항형, 전자기형 등 다양한 형태로 구현될 수 있으며, 특히 정전 용량형 구조는 우수한 온도 특성과 저잡음/저전력 특성으로 인하여 널리 사용되고 있다^[1-3].

정전 용량형 MEMS 공진기는 주로 자기 발진 루프를 통하여 기계적 구조물의 공진 주파수에서의 공진을 유지하는 방식으로 구현된다. 이때, 공진기의 기계적 구조물이 지속적으로 공진을 유지하기 위해서는 자기 발진 루프의 개루프 이득이 1 이상이며, 위상차가 180도가 되어 Barkhausen criteria를 만족해야 한다. 따라서 정전 용량형 MEMS 공진기의 설계를 위하여 기계적 센서 구조부 및 발진 회로를 포함한 자기 발진 루프의 이득 및 위상의 정밀한 예측이 필수적이다.

기존에 발표된 MEMS 공진기의 모델링은 대부분 질량체, 스프링 및 감쇠기로 구성된 2차 시스템을 기반으로 구성되어 있다^[4,5]. 특히 높은 Q값을 확보하기 위

하여 진공 상태에서 구현된 공진기의 경우 저감쇠된(underdamped) 2차 시스템으로 모델링 할 수 있다. MEMS 공진기를 저감쇠 2차 시스템으로 모델링 할 경우 주파수 응답 파형을 살펴보면, 공진점에서 magnitude는 최대값을 가지며, phase변화는 -90도가 된다. 그러나 실제 측정되는 주파수 응답은 이상적인 2차 시스템과는 다른 비이상적 거동을 보인다.

Fig. 1은 정전 용량형 MEMS 공진기의 실제 측정되는 전형적인 주파수 응답 파형을 도시한 것이다. 특히 주파수 응답의 magnitude에서 발생하는 노치(notch)와 스파이크(spike) 현상 및 위상 지연 왜곡 현상은 실제 측정되는 주파수 응답에서 발생하는 대표적인 비이상적 특성이다.

본 논문에서는 기존의 2차 시스템으로 설명되지 않은 정전 용량형 MEMS 공진기의 비이상적 주파수 응답을 재현한 모델링을 제안한다. 본 모델링은 대표적인 정전 용량형 MEMS 공진기인 자이로스코프의 구동부를 대상으로 구현되었다. 기존의 모델링은 실측에서 발생하는 비이상적 주파수 응답을 재현할 수 없을 뿐 아니라, 대부분 전압으로 출력을 제공하여, 주변 회로와의 정밀한 모의 실험(simulation)이 어려운 단점이 있다.

본 논문에서 제안하는 정전 용량형 MEMS 공진기의 모델링은 기존의 2차 시스템 모델링에 기생 용량 성분을 추가하여, 기존 모델로는 설명할 수 없는 비이

서울대학교 전기·컴퓨터공학부(School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University)

[†]Corresponding author khh2000@snu.ac.kr

(Received : January 29, 2010, Revised : March 18, 2010

Accepted : March 22, 2010)

Fig. 1. Typical non-ideal frequency response of microresonator.

상적 주파수 응답을 재현하였다. 이를 통하여 정전 용량형 MEMS 공진기의 주파수 응답을 실측과 유사하게 예측할 수 있으며, 보다 정밀한 MEMS 공진기의 구현이 가능해진다. 본 모델링은 주변 회로부를 포함한 정전 용량형 공진 센서의 용이한 설계를 위하여 SPICE로 구현되었으며, 센서의 용량 변화를 그대로 출력하여 보다 정밀한 모의 실험이 가능하다. 이는 자이로스코프 구동부 뿐 아니라 유사한 원리로 동작하는 전기기계적 발진기 및 공진형 가속도계 등 다양한 정전 용량형 MEMS 공진 센서에 적용될 수 있다.

2. 자이로스코프 구동부의 모델링

2.1. 자이로스코프의 동작 원리

본 논문에서는 대표적인 정전 용량형 MEMS 공진 센서인 자이로스코프의 구동부를 모델링 대상으로 한다. Fig. 2는 본 논문에서 모델링 하고자 하는 자이로스코프의 개략도이다^{6,7}. 본 자이로스코프는 구동부와 검지부로 구성된 분리형(decoupled) 구조로 설계되었으며, 높은 Q값의 구현 및 민감도 향상을 위하여 웨이퍼 수준 진공 패키지 공정을 이용하여 제작되었다.

본 자이로스코프의 동작 원리는 다음과 같다. Fig. 3에 도시된 바와 같이, 본 자이로스코프는 구동부와 검지부의 서로 수직인 두가지 동작 모드에서 동작한다. 평상시 구동부와 검지부는 x축 방향으로 진동하고 있으며, 외부 z축 각속도 입력시 식 (1)과 같은 코리올리 힘이 발생하여 검지부 질량체의 y축 방향 변위를 발생시킨다. 이때 M , Ω , V 는 각각 질량체, 인가 각속도, 진동 속도를 나타낸다.

$$\vec{F}_c = 2M(\vec{\Omega} \times \vec{V}) \quad (1)$$

X축 방향의 진동은 구동부의 정전 용량형 구동기로

Fig. 2. Schematic of MEMS vibratory gyroscope.

Fig. 3. (a) overall view (b) actuation mode and (c) sensing mode of gyroscope.

발생하며, 이때 발생하는 구동부의 변위는 구동 감지부에서 용량 변화로 감지된다. 이 때, 센서의 민감도를 향상시키기 위하여 구동부에 인가되는 구동 신호의 주파수는 구동부의 공진 주파수와 정확히 일치하여야 하며, 이를 위하여 자기 발진 루프의 구현이 필수적이다.

2.2. 자이로스코프 구동부의 모델링

Fig. 4는 자이로스코프 구동부 모델링의 블록 다이어그램이다. 자이로스코프 구동부를 진동시키기 위하여 서로 반대 위상과 DC 오프셋을 가진 두 구동 전압 (V_{actp} 및 V_{actn})이 두 입력 단자로 인가된다. 이 때 V_{actp} 와 V_{actn} 에 의하여 발생하는 정전력(F_{actp} 및 F_{actn})은 식 (2) 및 (3)과 같이 표현할 수 있으며, 따라서 구동 질량

Fig. 4. Block diagram of proposed modeling.

체에 가해지는 알짜 힘(F_{net})은 식 (4)와 같이 표현된다. 이때 ϵ 은 유전율, n_{act} 는 구동 콤의 개수, d_{act} 는 구동 콤의 간격, t 는 구조물의 두께, V_{DC} 는 구동 전압의 DC 오프셋, V_{AC} 는 구동 전압의 AC 성분을 나타낸다.

$$F_{actp} = \frac{\epsilon n_{act} t (V_{DC} + V_{AC})^2}{2d_{act}} \quad (2)$$

$$F_{actn} = \frac{\epsilon n_{act} t (V_{DC} - V_{AC})^2}{2d_{act}} \quad (3)$$

$$F_{net} = F_{actp} - F_{actn} = \frac{2\epsilon n_{act} t V_{DC} V_{AC}}{d_{act}} \quad (4)$$

이러한 구동 방식은 정전 구동력의 제공 향을 제거하여, 하모닉 성분을 효과적으로 제거할 수 있다. 따라서 DC 오프셋 전압과 AC 구동 전압의 곱으로만 이루어진 하모닉 성분이 없는 구동 전압을 인가할 수 있다.

정전력에 의한 구동부의 변위는 식 (5)와 같이 저감쇠 2차 시스템으로 표현될 수 있으며, SPICE의 ELa-pace 모델을 이용하여 구현할 수 있다^[8]. 이때 m , b , k , ω_0 , Q 는 각각 구동부 질량, 감쇠 계수, 탄성 계수, 공진 주파수, Q 값을 나타낸다.

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + bs + k} = \frac{\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (5)$$

구동부에서 발생한 변위는 구동 감지부에서 용량 변

Fig. 5. VCCAP(voltage controlled capacitor).

화로 출력되며, 이 용량 변화를 시뮬레이션으로 재현하기 위하여 Fig. 5와 같은 VCCAP(voltage controlled capacitor)를 구현하였다. VCCAP은 SPICE의 CCVS (current controlled voltage source)와 CCCS(current controlled current source)를 이용하여 구현되었다^[6]. VCCAP의 출력 용량은 식 (6)과 같이 기준 용량 (C_{ref})과 입력 전압의 곱으로 표현된다. 따라서 구현된 VCCAP을 이용하여 전압으로 표현되는 구동부 변위를 용량 변화로 출력할 수 있다.

$$C_{out} = \frac{it}{V_2} = \frac{C_{ref} \times (V_1 \times V_2)}{V_2} = C_{ref} \times V_1 \quad (6)$$

구동 감지부의 용량 변화(C_{actsep} , C_{actsem})는 VCCAP을 이용하여 구현할 수 있으며, 식 (7) 및 (8)과 같이 표현된다. 이때, n_{actsen} , d_{actsen} , x_0 , x 는 각각 구동 감지 콤 개수, 구동 감지 콤의 간격, 구동 감지 콤의 오버랩 길이, 구동부의 변위를 나타낸다.

Fig. 6. Schematic of charge amplifier.

$$C_{actsenp} = \frac{\epsilon n_{actsenp}}{d_{actsenp}} (x_0 + x) \quad (7)$$

$$C_{actsenm} = \frac{\epsilon n_{actsenm}}{d_{actsenm}} (x_0 - x) \quad (8)$$

이와 같이 구현할 경우, 구동 전압 입력에 따라 출력 용량이 변화하는 자이로스코프 구동부를 모델링 할 수 있다. 그러나, 본 절에서 현재까지 구현한 모델링으로는 실제 측정되는 노치와 스파이크 현상 및 위상 지연 왜곡 현상을 설명할 수 없다. 이를 설명하기 위하여 본 모델링에서는 기생 용량인 C_{p1} 과 C_{p2} 를 구동 전압 인가 단자와 출력 용량 단자 사이에 추가하였다.

기생 용량으로 인한 비이상적 주파수 응답 특성은 다음과 같이 설명할 수 있다. Fig. 6과 같은 형태의 널리 사용되는 전하 증폭기를 이용하여 용량 변화를 전압으로 변환할 경우, 전하 증폭기의 출력 전압은 식 (9)과 같이 표현할 수 있다. 이때, ΔC 는 구동 감지부에서 발생하는 용량 변화를 의미하며, V_t 는 연산 증폭기의 DC 바이어스 전압을 의미한다.

$$V_{out} = \frac{(2\Delta C)A_{cv}V_t}{1 + \epsilon n_{actsenp}} + \underbrace{C_{p1}A_{cv}(V_t - V_{actp}) + C_{p2}A_{cv}(V_t - V_{actn})}_{1 + \epsilon n_{actsenp}}$$

Fig. 7. Simulated frequency response with ideal modeling.

Fig. 8. Simulated frequency response with proposed modeling.

$$\text{Here, } A_{cv} = \frac{j\omega R_f}{j\omega C_f R_f + 1} \quad (9)$$

식 (9)에서 첫번째 항은 이상적인 2차 시스템의 용량 변화가 전압으로 변환된 것으로, 구동 신호에 대하여 공진점에서 최대의 magnitude와 -90도의 phase lag을 가진다. 그러나 두번째 항은 기생 성분으로 인해 생성된 원하지 않는 신호 전달 경로로 인하여 발생한 항으로, 첫번째 항과는 다른 magnitude와 phase lag을 가지며, 이로 인하여 왜곡된 magnitude와 phase 특성이 발생한다.

3. 시뮬레이션 및 측정 결과

3.1. 시뮬레이션 결과

Fig. 7 및 Fig. 8은 각각 이상적인 2차 시스템을 이용한 모델링과 기생 용량의 효과를 포함한 모델링을 이용한 전하 증폭기의 출력 시뮬레이션 결과이다. 이때 구동 전압 인가 단자와 출력 용량 단자 간의 기생 용량

Table 1. Design parameters of microgyroscope

Driving part	
mass	8.3E-8 kg
spring constant	75 N/m
spring length	274 μ m
simulated resonant frequency	4.775 kHz

Fig. 9. Fabricated microgyroscope.

은 2 pF으로 시뮬레이션 되었다. Fig. 8에 도시된 바와 같이, 기생 용량으로 인한 왜곡된 magnitude 및 phase를 가지는 항이 추가될 경우, 실제와 유사한 노치(notch)와 스파이크(spike) 현상 및 위상 지연 왜곡 현상이 재현됨을 알 수 있다. 본 시뮬레이션에서 사용된 주요 파라미터는 Table 1과 같다.

3.2. 측정 결과

정전 용량형 MEMS 공진기의 주파수 응답을 측정하기 위하여 Fig. 2에 도시된 구조의 자이로스코프가 제작되었으며, Fig. 9는 제작된 자이로스코프의 주사전 자현미경 사진이다. Fig. 10은 제작된 자이로스코프와 Fig. 6의 전하 증폭기가 장착된 회로의 모습이다.

Fig. 11은 이를 이용하여 자이로스코프 구동부의 주파수 응답을 측정한 결과이다. 측정 결과 magnitude에서 노치(notch)와 스파이크(spike) 현상이 발생하였으며, phase의 변동 역시 왜곡된 현상을 보인다. Table 2에 측정 결과와 Fig. 8에서 보인 기생 용량을 포함한 주파수 응답 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Fig. 11의 magnitude가 주파수에 따라 증가하는 경향을 보이는 것은, 측정에 이용된 전하 증폭기의 고역 통과 주파수 특성이 반영된 것이다. 측정 결과와 시뮬레이션 결과의 차이는 공정 산포 및 모델링된 기생 용량과 실제 기생 용량 간의 차이에 기인한 것으로 추정되며, 본 논문에서 제안한 정전 용량형 MEMS 공진기의 모델링이 실

Fig. 10. PCB implementation of gyroscope and charge amplifier.

Fig. 11. Measured frequency response.

Table 2. Comparison of simulation results and measurement results

	Sim.	Meas.	Δ
Resonant frequency [Hz]	4794	4775	-19
Magnitude spike [dB]	29.1	31.2	2.1
Magnitude notch [dB]	-2.3	-17.1	-14.8
Phase lag distortion [deg]	140	131	-9

제 주파수 응답을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 기생 용량 성분을 포함하여 정전 용

량형 MEMS 발진기의 비이상적 주파수 응답을 재현할 수 있는 모델을 제안하였다. 이를 이용하여 기존의 모델으로는 설명할 수 없었던 노치(notch)와 스파이크(spike) 현상 및 phase지연 왜곡 현상을 시뮬레이션으로 재현하였다. 또한 실측치와의 비교를 통하여 제안한 모델이 실제 정전 용량형 MEMS 발진기의 주파수 응답을 잘 반영하고 있음을 검증하였다. 제안된 모델링을 이용하여 실제 주파수 응답을 보다 정확하게 예측할 수 있으며, 이는 자이로스코프 구동부, 전기기계적 발진기, 공진형 가속도계 등 다양한 정전 용량형 MEMS 공진 센서에 적용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] N. Yazdi, F. Ayazi, and K. Najafi, "Micromachined inertial sensors", *Proc. IEEE*, vol. 86, pp.1640-1659, 1998.
- [2] 홍윤식, 이종현, 김수현, "대칭형 2자유도 수평 공진기를 이용한 마이크로 자이로스코프의 동특성 해석 및 평가", *센서학회지*, 제10권, 제1호, pp. 1-8, 2001.
- [3] 정귀상, 이태원, "다결정 SiC 마이크로 공진기의 제작과 그 특성", *센서학회지*, 제17권, 제6호, pp. 425-428, 2008.
- [4] S. Li and S. Chen, "Optimization, simulation, and fabrication of a microgyroscope", *Proc. SPIE*, pp. 36-42, 2001.
- [5] A. Burstein and W. J. Kaiser, "The microelectromechanical gyroscope -analysis and simulation using SPICE electronic simulator", *Proc. SPIE*, pp. 225-232, 1995.
- [6] J. Kim, et al., "Robust SOI process without footing and its application to ultra high-performance microgyroscopes", *Sensors and actuator A*, vol. 114, pp. 236-243, 2004.
- [7] A. Lee, et al., "Micro-gyroscope of a high-performance, high-yield at the vacuum state of wafer level", *Proc.13th Conf. Guided Munition*, pp. 376-379, 2005.
- [8] Star-Hspice Manual. Avant! Corporation 1998.

고 형 호

- 2003년 3월 서울대학교(공학학사)
- 2008년 8월 서울대학교(공학박사)
- 현재 삼성전자 메모리사업부 책임 연구원
- 주관심분야: Physical sensor/Analog integrated circuit