

고감지전압 및 가지전극을 이용한 고정도 정전용량형 미소가속도계

한 기 호* · 조 영 호*
(2002년 5월 13일 접수, 2003년 12월 10일 심사완료)

High-resolution Capacitive Microaccelerometers using Branched Finger Electrodes with High-Amplitude Sense Voltage

Ki-Ho Han and Young-Ho Cho

Key Words: Navigation Grade Microaccelerometer(항법용 미소가속도계), Mechanical Noise(기계적 잡음), Electrical Noise(전기적 잡음), High-Amplitude Sense Voltage(고감지전압), Branched Finger Electrode(가지전극), Self Force-Balancing(자율균형력)

Abstract

This paper presents a navigation grade capacitive microaccelerometer, whose low-noise high-resolution detection capability is achieved by a new electrode design based on a high-amplitude anti-phase sense voltage. We reduce the mechanical noise of the microaccelerometer to the level of $5.5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ by increasing the proof-mass based on deep RIE process of an SOI wafer. We reduce the electrical noise as low as $0.6\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ by using an anti-phase high-amplitude square-wave sense voltage of 19V. The nonlinearity problem caused by the high-amplitude sense voltage is solved by a new electrode design of branched finger type. Combined use of the branched finger electrode and high-amplitude sense voltage generates self force-balancing effects, resulting in an 140% increase of the bandwidth from 726Hz to 1,734Hz. For a fixed sense voltage of 10V, the total noise is measured as $2.6\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ at the air pressure of 3.9torr, which is the 51% of the total noise of $5.1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ at the atmospheric pressure. From the excitation test using 1g, 10Hz sinusoidal acceleration, the signal-to-noise ratio of the fabricated microaccelerometer is measured as 105dB, which is equivalent to the noise level of $5.7\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$. The sensitivity and linearity of the branched finger capacitive microaccelerometer are measured as 0.638V/g and 0.044%, respectively.

1. 서론

고정도 미소가속도계는 개인항법장치, 컴퓨터 입력 장치, 게임 그리고 장난감과 같은 새로운 시장 창출의 필수 소자이다. 특히 Table 1에서 보이는 것처럼 항법장치용 미소가속도계는 $3\sim 10\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ⁽¹⁾의 분해능이 요구되나, 기존의 미소가속도계는 $25\sim 800\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ⁽²⁻⁶⁾ 정도의 분해능 수준에 머물러 있다.

정전용량형 미소가속도계에 있어서 분해능은 기계적 잡음⁽⁷⁾과 전기적 잡음⁽⁸⁻⁹⁾으로 구성되는 잡음에 의해 결정된다. 기계적 잡음은 공기의 브라운 운동(Brownian motion)에 의해 발생되며, 질량체의 질량이나 quality 계수(quality factor)의 증가에 의해 감소 될 수 있다. 기존의 박막미세가공

Table 1 Specification of a navigation grade accelerometer

Performance	Values
Detection Range	± 2 [g]
Bandwidth	0 ~ 10 [Hz]
Resolution	< 50 [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]
Nonlinearity	< 0.1 [%]

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과, 디지털 나노구조연구단

E-mail : hkh@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3078 FAX : (042)869-8690

* 회원, 한국과학기술원 기계공학과, 디지털나노구조연구단

기술에 의해 제작된 미소가속도계는 질량이 수 마이크로그램(μg)^(2,3)의 수준을 보였다. 이로 인해 표면미세가공기술에 의해 제작된 미소가속도계의 분해능은 주로 기계적 잡음에 의해 제한되어왔다. 따라서 최근 고정도 미소가속도계를 위한 연구들은 이러한 기계적 잡음을 줄이기 위하여 다층 접합 웨이퍼의 사용,⁽⁴⁾ 표면 및 기관미세가공기술의 혼합 사용⁽⁵⁾ 또는 SOI 웨이퍼의 deep RIE 공정⁽⁶⁾ 등을 사용하여 질량을 증가시켰으며, 이로 인해 기계적 잡음을 전기적 잡음보다 낮은 수준으로 감소시킬 수 있었다. 따라서 현재 고정도 가속도계를 개발함에 있어서 전기적 잡음의 감소 수준이 고정도를 달성하기 위한 기술적 한계 요인이 되고있다.

전기적 잡음은 신호처리부로부터 발생되며, 고정전극과 이동전극 사이의 간격을 줄이거나 감지전압을 증가시킴으로써 해서 감소될 수 있다. 그러나 전극의 간격은 미세가공기술의 제작한계로 인해 1~2 μm 정도로 제한된다.

본 논문에서는 이러한 전기적 잡음을 줄이기 위해 감지전압을 증가시키는 방법을 제안한다. 또한 기존의 직선형 감지전극[Fig.1(a)]의 경우 고 감지전압의 사용은 비선형성 및 불안정성 문제를 유발한다. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 새로운 형태인 가지형 감지전극[Fig.1(b)]을 제안한다.

본 논문에서는 이러한 항법용 가지전극 정전용량형 미소가속도계를 설계, 제작하였고, 감지전압과 공기압의 변화에 따른 미소가속도계의 성능 및 잡음 수준을 측정·분석하였다.

2. 설계 및 해석

2.1 구조 및 거동 분석

미소가속도계는 Fig. 2와 같이 외부 가속도를 감지하기 위한 감지구조부(sense element)와 감지된 신호를 처리하기 위한 신호처리부(detection circuitry)로 구성되어 있다. 미소가속도계에 있어서, 외부 가속도, a_{ext} 에 의해 발생하는 질량체의 변위, x ,는 다음과 같이 2차 도함수로 표현된다.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + k_m \cdot x = F_{ext} = m \cdot a_{ext} \quad (1)$$

여기서 m , b 그리고 k_m 는 각각 질량체의 질량,

미소가속도계의 감쇠 계수 그리고 기계적 강성을 의미한다. 또한 a_{ext} 와 F_{ext} 는 각각 외부 가속도와 이로 인한 관성력을 나타낸다.

식 (1)의 도함수의 라플라스(Laplace) 변환을 고유주파수, $\omega_n = \sqrt{k_m/m}$,와 감쇠비, $\zeta_n = b/(2\sqrt{mk_m})$,를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

여기서 $X(s)$ 과 $A(s)$ 는 각각 변위와 외부 가속도의 라플라스 변환이다.

2.2 잡음 분석

서론에서 설명한 바와 같이 미소가속도계의 잡음은 기계적 잡음과 전기적 잡음으로 분류된다. 먼저, 감지구조부 주위에 존재하는 공기의 브라운 운동에 의해 발생하는 기계적 잡음,⁽⁷⁾ \bar{a}_m ,은 다음과 같다.

$$\bar{a}_m = \sqrt{\frac{4k_B T \omega_n}{m \cdot Q}} \quad (3)$$

여기서 k_B , T 그리고 Q 는 각각 Boltzmann's 상수, 절대온도 그리고 미소가속도계의 quality 계수이다.

식 (3)으로부터 기계적 잡음이 줄어들기 위해서는 질량체의 질량과 quality 계수가 증가해야 함을 알 수 있다.

한편, 전기적 잡음,⁽⁸⁾ \bar{a}_e ,은 Fig. 2(a)에서 보이는 것처럼 전치증폭기 앞단⁽⁹⁾에서 주로 발생한다.

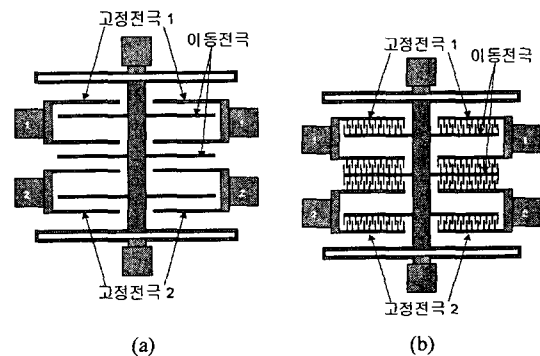


Fig. 1 Schematic of the capacitive accelerometer: (a) straight finger accelerometer; (b) branched finger accelerometer

다. 본 논문에서는 전기 잡음, \bar{v}_e 의 등가가속도를 전기적 잡음, \bar{a}_e 으로 정의하며, 이는 정전용량형 미소가속도계의 경우 다음과 같은 관계가 있다.

$$\bar{a}_e \propto \omega_r^2 \frac{d_0}{V_S} \bar{v}_e \quad (4)$$

여기서 ω_r , d_0 , V_S 그리고 \bar{v}_e 는 각각 미소가속도계의 공진주파수, 고정전극과 이동전극의 간격, 감지전압 그리고 신호처리부의 회로소자들에서 발생하는 전기 잡음을 의미한다.

식 (4)로부터 전기적 잡음은 미소가속도계의 전극 간격 감소 혹은 감지전압의 증가에 의해 감소될 수 있음을 알 수 있다. 일반적으로, 전극 간격, d_0 ,은 제조공정 기술에 의해 약 1~2 μm 정도로 제한된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 전기적 잡음을 줄이기 위해 감지전압을 증가시키는 방법을 제안한다.

고감지전압이 전기적 잡음을 줄일 수 있는 장점이 있음에도 불구하고, 이는 Fig. 1(a)와 같은 기존에 사용되어 왔던 직선전극 정전용량형 미소가속도계의 경우에 선형성과 안정성을 저하시키는 문제를 발생한다. 고감지전압이 직선형 감지전극의 선형성을 저하시키는 원인은 고정전극과 이동전극 사이에 형성되는 비선형적 정전기력 때문이다. 직선전극 정전용량형 미소가속도계의 고정전극과 이동전극 사이에 발생하는 정전기력, F ,과 비선형성은 다음과 같이 표현된다.

$$F \propto \frac{x}{(d_0^2 - x^2)} V_S^2 \quad (5)$$

$$\text{Nonlinearity} = \frac{9C_0}{m\omega_r^6} \left(\frac{a_{ext}}{d_0^2} \right)^2 V_S^2 \times 100\% \quad (6)$$

식 (6)으로부터 직선전극 미소가속도계의 비선형성이 감지전압의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해, 기존의 직선형 감지전극 구조 대신 Fig. 1(b)와 같은 가지형 감지전극 구조를 제안한다. 가지형 감지전극 구조의 경우 정전기력은 변위에 독립적이며, 선형성이 감지전압에 관계없이 유지될 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 논문에서는 고감

지전압 및 가지형 감지전극을 이용한 정전용량형 미소가속도계를 제안하며, 다음 장에서는 이러한 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 성능을 분석한다.

2.3 감지 성능 분석

Figure 2(a)는 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 간단화된 개략도이다. Figure 2(a)로부터 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 등가회로를 Fig. 2(b)와 같이 구할 수 있다. 고정전극 1과 이동전극 사이의 정전용량, C_1 ,과 고정전극 2와 이동전극 사이의 정전용량, C_2 ,은 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$C_1 = C_0 + \Delta C + C_{0P} \quad (7a)$$

$$C_2 = C_0 - \Delta C + C_{0P} \quad (7b)$$

여기서 C_0 , ΔC 그리고 C_{0P} 는 각각 감지정전용량, 변위에 의한 감지정전용량의 변화량 그리고 고정전극과 이동전극 사이의 기생정전용량을 나타낸다. 이때 감지정전용량, C_0 ,은 다음과 같다.

$$C_0 = \epsilon_0 \left[\frac{N_1 \cdot l_0}{d_0} + \frac{l_A}{d_f} + \frac{l_B}{d_s} \right] \quad (8)$$

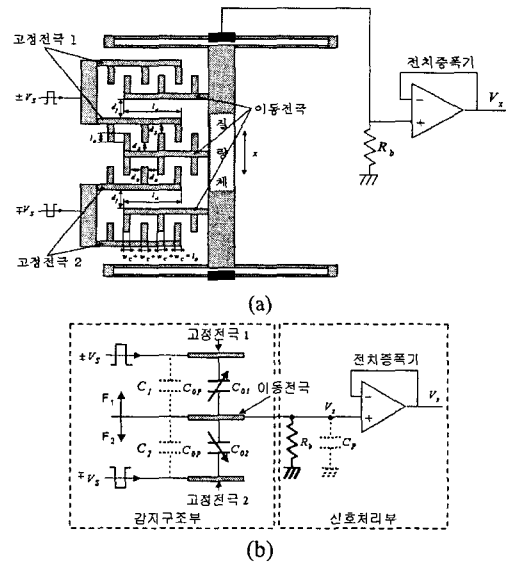


Fig. 2 The branched finger capacitive microaccelerometers: (a) simplified schematic model; (b) equivalent electrical model

여기서 ϵ_0 , t 그리고 N_t 는 각각 공기의 유전율, 구조물의 두께 그리고 빗살전극이 마주 겹치는 갯수를 나타낸다. 또한 l_0 , l_A , l_B , d_f 그리고 d_s 는 각각 Fig. 2(a)에서 보이는 것처럼 빗살전극이 마주하는 길이, 전극이 겹치는 총 길이, 전극과 빗살전극이 마주 겹치는 총 길이, 전극 사이의 거리 그리고 전극과 빗살전극 사이의 거리를 의미한다.

식 (8)로부터 감지정전용량의 변화량, ΔC ,은 다음과 같다.

$$\Delta C = \epsilon_0 \cdot t \cdot l_0 \left[\frac{N_t}{d_0} - \frac{l_A}{d_f^2} + \frac{l_B}{d_s^2} \right] \frac{x}{l_0} \quad (9)$$

Figure 2(b)에서 질량체의 변위, x ,에 의한 감지 출력전압, V_x ,은 다음과 같이 구해진다.

$$V_x = \frac{2\Delta C}{C_1 + C_2 + C_P} V_s = \gamma \frac{x}{l_0} V_s \quad (10)$$

여기서 C_P 는 전치증폭기의 입력단과 신호접지 사이의 기생 정전용량이다. 또한 γ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma = \frac{2\epsilon_0 t l_0}{C_1 + C_2 + C_P} \left[\frac{N_t}{d_0} - \frac{l_A}{d_f^2} + \frac{l_B}{d_s^2} \right] \quad (11)$$

한편, 가지전극 정전용량형 미소가속도계는 가지전극 구조에 의해 자율균형력 현상을 발생한다. 이를 간단히 설명하면 다음과 같다. 예를 들어 변위, x ,가 외부 가속도에 의해 발생하면, 식 (10)에서처럼 감지 출력전압은 가까워진 쪽의 고정전극에 가해지는 감지전압에 비례하게 된다. 이때 가까워진 쪽의 고정전극과 이동전극 사이의 정전기력은 멀어진 쪽의 고정전극과 이동전극 사이의 정전기력에 비해 작게 되며, 이로 인해 이동전극에 작용하는 총 정전기력은 이동전극이 움직이는 방향의 반대 방향으로 작용하게 된다. 이것이 가지전극 정전용량형 미소가속도계에서 발생하는 자율균형력 현상이다.

앞에서 설명된 자율균형력을 이론적으로 전개하기 위하여 먼저 전극간에 발생하는 정전기력을 다음과 같이 수식으로 표현할 수 있다. Figure 2(b)에서 고정전극 1과 이동전극 사이에 발생하는

정전기력, F_1 ,과 고정전극 2와 이동전극 사이에 발생하는 정전기력, F_2 ,은 각각 다음과 같다.

$$F_1 = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} [C_1 (V_s - V_x)^2] \quad (12a)$$

$$F_2 = \frac{1}{2} \frac{d}{dx} [C_2 (V_s + V_x)^2] \quad (12b)$$

식 (10)의 감지 출력전압, V_x ,을 식 (12a)와 (12b)에 대입하면, 변위 발생시 F_1 과 F_2 는 차이가 발생한다. 이로부터 질량체에 발생하는 정전기력이 다음과 같이 얻어진다.

$$F = F_1 + F_2 = \frac{2\epsilon_0 t V_s^2}{l_0^2} \left[-\frac{N_t l_0 (2-\gamma)\gamma}{d_0} + l_A \frac{d(l_0 + d_f)^2}{(d_f^2 - x^2)^2} + l_B \frac{d_s(l_0 - d_s\gamma)^2}{(d_s^2 - x^2)^2} \right] x + \frac{2C_{0P} V_s^2}{l_0^2} \gamma^2 x \quad (13)$$

식 (13)으로부터 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 전기적 강성이 다음과 같이 구해진다.

$$k_e = -\frac{dF}{dx} = \frac{2\epsilon_0 t V_s^2}{l_0^2} \left\{ \frac{N_t l_0}{d_0} (2-\gamma)\gamma - \frac{l_A}{d_f} \left(\frac{l_0}{d_f} + \gamma \right)^2 \left[1 + 3 \left(\frac{x}{d_f} \right)^2 \right] - \frac{l_B}{d_s} \left(\frac{l_0}{d_s} - \gamma \right)^2 \left[1 + 3 \left(\frac{x}{d_s} \right)^2 \right] \right\} - \frac{2C_{0P} V_s^2}{l_0^2} \gamma^2 \quad (14)$$

식 (14)은 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 전기적 강성이 양이 될 수 있음을 보이고 있으며, 이는 서보형(servo) 가속도계의 균형력 발생과 등가 현상이다. 기존의 정전용량형 미소가속도계^(2,3)의 경우 균형력 현상을 얻기 위해 전기적 피드백 루프를 이용하였다. 그러나, 본 논문에서 제안한 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 경우는 균형력 현상이 가지형 감지전극의 구조에 의해 자연스럽게 발생되고, 식 (14)으로부터 이를 확인하였다. 본 논문에서는 이러한 현상을 자율균형력이라 명명한다.

식 (10)과 (13)을 이용하여, 식 (14)의 정전기력을 다음과 같이 감지 출력전압의 관계식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$F = -\frac{l_0}{\gamma} \frac{1}{V_s} k_e V_x \quad (15)$$

식 (15)를 이용하여 가지전극 정전용량 미소가속도계를 Fig. 3과 같은 페루프 블록다이어그램으로 표현할 수 있다. Figure 3으로부터, $|s| < \omega_n$ 의 경우 외부 가속도에 대한 감지 출력전압, V_{sx} 과 기계적 잡음과 전기적 잡음에 대한 감지 출력전압, V_{nx} 을 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{sx} = \left(\frac{1}{\omega_r^2} \frac{\gamma}{l_0} V_S \right) a_{ext} \quad (16a)$$

$$V_{nx} = \left[\left(\frac{1}{\omega_r^2} \frac{\gamma}{l_0} V_S \right)^2 \bar{a}_m^2 + \left(\frac{\omega_n^2}{\omega_r^2} \right)^2 \bar{v}_e^2 \right]^{1/2} \quad (16b)$$

여기서 ω_n 과 ω_r 은 각각 미소가속도계의 고유주파수와 공진주파수이다. 공진주파수, ω_r 는 고유주파수, ω_n , 전기적 강성, k_e , 그리고 질량, m ,에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_r^2 = \omega_n^2 + \frac{k_e}{m} \quad (17)$$

식 (16a)와 (16b)로부터 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SNR = \frac{a_{ext}}{\left[\bar{a}_m^2 + \left(\frac{l_0}{\gamma} \frac{\omega_n^2}{V_S} \right)^2 \bar{v}_e^2 \right]^{1/2}} \quad (18)$$

또한 식 (18)으로부터 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 분해능을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Resolution = \sqrt{\bar{a}_m^2 + \left(\frac{l_0}{\gamma} \frac{\omega_n^2}{V_S} \right)^2 \bar{v}_e^2} \quad (19)$$

식 (19)은 감지전압이 증가함에 따라 전기적 잡음이 감소하고, 따라서 분해능이 향상됨을 보이고 있다. 또한, 식 (17)과 식 (19)으로부터 가지전극 정전용량형 미소가속도계는 감지전압이 증가함에 따라 자율균형력에 의해 주파수응답 범위가 증가하고, 동시에 분해능이 향상되는 장점을 가지고 있음을 알 수 있다.

3. 제조 공정

가지전극 정전용량형 미소가속도계는 Fig. 4에

서처럼 한 장의 마스크를 이용하여 제작되었다. Figure 4(a)에서 미소가속도계는 SOI 웨이퍼의 상부 실리콘을 deep RIE 식각함으로써 형성된다. SOI 웨이퍼의 상부 실리콘은 두께가 40 μ m이고, 인(phosphorus)으로 고농도 확산되어 0.1 $\Omega \cdot cm$ 의 비저항을 가진다. Figure 4(b)에서 PR(PhotoResist: AZ5214)은 deep RIE 식각 공정의 보호층으로 사용된다. Figure 4(c)에서 BOE(Buffered Oxide Etchant)를 이용하여 미소가속도계의 희생층인 2 μ m 두께의 실리콘 산화막을 제거하고, 와이어 본딩을 위해 Fig. 4(d)에서 200Å/2000Å 두께의 Cr/Au 박막을 증착하여 미소가속도계를 완성한다. Figure 5와 Table 2는 각각 제작된 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 전자현미경 사진 및 구조적 특성을 보이고 있다.

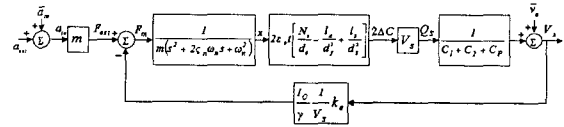


Fig. 3 Functional block diagram of the branched finger capacitive microaccelerometer

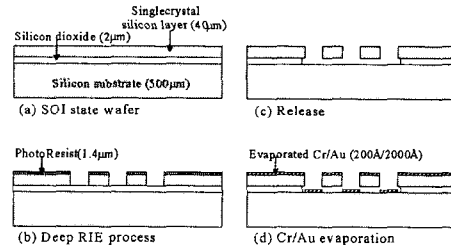


Fig. 4 Single-mask fabrication process

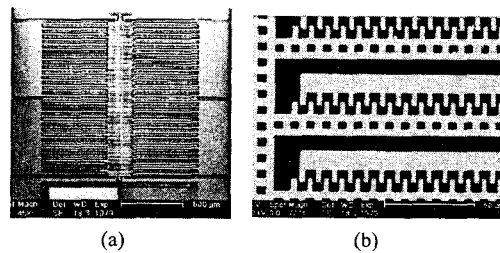


Fig. 5 Fabricated microaccelerometer: (a) top view; (b) enlarged view of the branched finger electrodes

Table 2 Geometric characteristics of the capacitive microaccelerometer

Geometric characteristics	Measured values
Structure thickness, t	33 ± 3 [μm]
Suspension width, w_s	3.7 ± 0.1 [μm]
Suspension length, l_s	580 [μm]
Overlapped length of combs, l_o	2.4 ± 0.1 [μm]
Gap between combs, d_o	1.8 ± 0.1 [μm]
Gap between finger and comb, d_s	5.6 ± 0.1 [μm]
Gap between fingers, d_f	10.6 ± 0.1 [μm]
Mechanical stiffness, k_m	0.88 ± 0.11 [N/m]
Proof-mass, m	42 ± 3.8 [μg]
Sense capacitance, C_o	2.4 ± 0.1 [pF]
Overall size	2×2.2 [mm \times mm]

4. 실험결과 및 분석

4.1 감지전압에 대한 잡음

Figure 6은 제작된 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 동적 특성을 측정하기 위한 장치를 보이고 있으며, Fig. 7은 이에 의해 측정된 미소가속도계의 주파수 응답 특성을 보이고 있다. 이로부터 제작된 미소가속도계의 고유주파수와 quality 계수가 각각 726Hz와 1로 측정되었다.

미소가속도계의 전기적 잡음과 전체 잡음은 저잡음 증폭기와 스펙트럼 분석기를 이용한 Fig. 8에서 보이는 방법에 의해 측정되었다. 감지전압에 대한 전기적 잡음과 전체 잡음의 측정치와 예상치가 Fig. 9(a)에 도시되었다. Figure 9(a)에서 제작된 미소가속도계의 전기적 잡음이 1V의 감지전압에서 $6\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었음을 보이고 있으며, 19V의 감지전압에서 이의 10분의 1 수준인 $0.6\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었음을 보이고 있다. 저감지전압에서 전기적 잡음의 측정치는 예상치와 잘 일치하고 있다. 반면 감지전압이 12V 이상 증가할 때 포화 상태를 보이며, 감지전압이 19V일 때 예상치인 $0.36\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 에 비해 66% 큰 $0.6\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 전기적 잡음을 보이고 있다.

전기적 잡음과 기계적 잡음이 포함된 전체 잡음은 감지전압이 1V에서 $12\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었고, 감지전압이 19V일 때 이의 45% 수준인 $5.5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었다. Figure 9(b)는 감지전압에 독

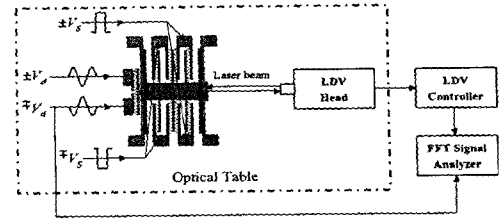


Fig. 6 Instrument set-up for dynamic characteristic measurement of the branched finger capacitive microaccelerometer

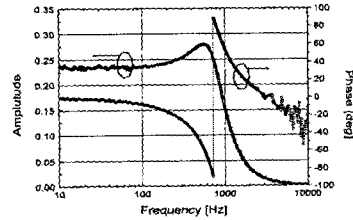


Fig. 7 Frequency response curve of the branched finger capacitive microaccelerometer

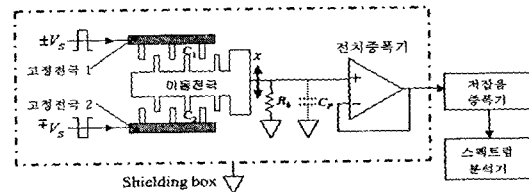


Fig. 8 Instrument set-up for the noise measurement of the branched finger capacitive microaccelerometer

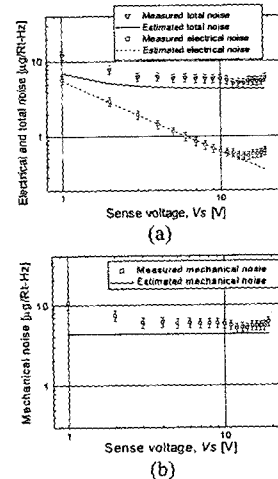


Fig. 9 Measured and estimated noise levels of the branched finger capacitive microaccelerometer for varying sense voltage, VS: (a) electrical and total noise levels; (b) mechanical noise level

Table 3 Geometric characteristics of the capacitive microaccelerometer

감지전압, V_s [V]	1	2	5	10	19
전체 잡음 [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]	12.2	8	6	5.9	5.5
	± 1.6	± 1.02	± 0.8	± 0.76	± 0.72
전기적 잡음 [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]	5.9	2.9	1.2	0.64	0.6
	± 0.76	± 0.38	± 0.15	± 0.08	± 0.075
기계적 잡음 [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]	10.6	7.3	5.9	5.8	5.5
	± 1.85	± 1.12	± 0.8	± 0.76	± 0.76
최소 감지가 가능한 가속도* [μg]	329	215	162	159	148
	± 43	± 27	± 22	± 20	± 19
최소 감지가 가능한 변위 [\AA]	1.5	0.98	0.64	0.41	0.19
	± 0.2	± 0.12	± 0.08	± 0.05	± 0.03

*Based on the bandwidth = 726Hz

립적인 기계적 잡음의 측정치와 예상치를 보이고 있다. Figure 9(b)에서 기계적 잡음의 측정치인 $5.5\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 가 예상치인 $4.3\pm 0.2\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 보다 28% 크게 나타났다. 이는 전체 잡음에서 전기적 잡음을 뺀으로써 구해진 기계적 잡음은 실제 기계적 잡음의 상한선이기 때문으로 판단된다. 잡음의 측정치와 최소 감지 가능한 변위 및 가속도가 Table 3에 정리되어 있다. 이로부터 제작된 미소가속도계의 최소 감지 가능한 변위 및 가속도가 각각 0.19\AA 과 $148\mu\text{g}$ 임을 알 수 있다.

4.2 강성 증가 효과

Figure 10(a)는 감지전압에 대한 미소가속도계의 주파수응답 곡선들을 보이고 있다. 이로부터 미소가속도계의 공진주파수가 감지전압과 함께 증가함을 알 수 있으며, 이는 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 유효강성이 식 (13)에서 보이는 것처럼 자율균형력에 의해 감지전압과 함께 증가하고 있음을 의미한다. 측정 결과로부터 감지전압이 19V일 때 강성이 5.07N/m 이고, 감지전압이 0V일 때 강성이 0.88N/m 임을 알 수 있었다. 이것은 강성 증가가 감지전압의 제곱에 비례하는 강성증가비로 표현될 수 있으며, 본 미소가속도계의 경우 강성증가비가 $0.0116\pm 0.0017\text{N/m/V}^2$ 임을 알 수 있다.

4.3 공기압에 대한 잡음

식 (3)은 미소가속도계의 기계적 잡음이 주위 공기압이 감소함에 따라 줄어들 수 있음을 보이고 있다. Figure 11(a)는 감지전압이 10V일 때 공기압에 따른 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 동적특성을 보이고 있다. 이로부터 Fig. 11(b)

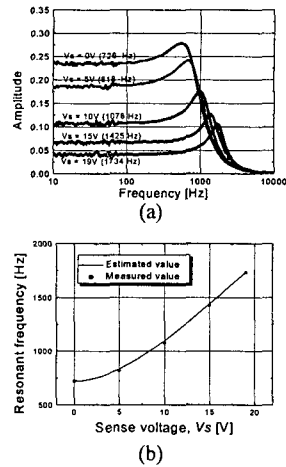


Fig. 10 Dynamic response of the branched finger capacitive microaccelerometer for varying sense voltage, VS: (a) amplitude response; (b) resonant frequency response

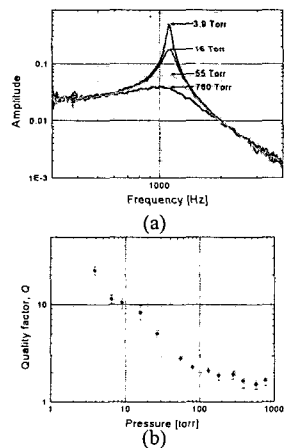


Fig. 11 Dynamic response of the branched finger capacitive microaccelerometer for varying air pressure at the sense voltage of 10V: (a) amplitude response; (b) quality factor response

와 같이 공기압이 감소함에 따라 미소가속도계의 quality 계수가 증가함을 알 수 있다. Quality 계수는 공기압이 3.9torr에서 22로 측정되었고 대기압에서 1.7로 측정되었다.

Figure 12(a)는 감지전압에 대한 전기적 잡음과 전체 잡음의 측정치와 예상치를 보이고 있다. 전체 잡음의 측정치로부터 전기적 잡음의 측정치

Table 4 Stiffness varying ratio for the different type of the branched finger electrodes

Electrode type	BF1	BF2	BF3	BF4	BF5	BF6	BF7	BF8
Number of the branched finger*	30	26	22	18	14	10	6	2
Total branched finger electrode length [cm]	1.635	1.417	1.199	0.981	0.763	0.545	0.327	0.109
Proof-mass, m [μg]	42	36.5	31.2	25.8	20.2	13.7	9.5	4.1
고유주파수, f_n [Hz]	726	738	904	873	960	1369	1559	2155
공진주파수, f_s , $V_s=10\text{V}$ [Hz]	1078	816	967	838	698	986	1216	2012
Stiffness varying rate $\times 10^{-3}$ [N/m/V^2]	11.6 ± 1.7	1.75 ± 0.41	1.45 ± 0.41	-0.61 ± 0.08	-3.46 ± 0.25	-4.87 ± 0.02	-3.55 ± 0.08	-0.97 ± 0.08

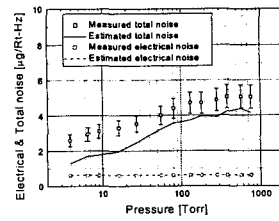
*Length of the branched finger = 545 μm

를 뺀으로써 얻은 기계적 잡음의 측정치가 Fig. 12(b)에서 예상치와 함께 도시되어 있다. Figure 12(a)는 전체 잡음이 공기압이 3.9torr에서 $2.6\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었으며, 대기압에서 $5.1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 측정되었다. Figure 12(a)는 공기압에 독립적인 전기적 잡음의 측정치와 예상치가 잘 일치하고 있음을 보이고 있다. Figure 12b는 기계적 잡음의 측정치와 예상치가 공기압이 감소함에 따라 줄어듦을 보이고 있으며, 측정치가 예상치에 비해 약 $1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 정도 크게 나타나고 있다. 이때 기계적 잡음의 측정치의 불확도는 $\pm 0.7\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이고, 기계적 잡음의 예측치의 불확도는 quality 계수에 의해 $\pm 0.19\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 와 질량에 의한 $\pm 0.27\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 정도이다. 따라서 기계적 잡음의 측정치와 예상치 사이의 차이 $1\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 는 이러한 불확도들에 의한 것으로 판단된다.

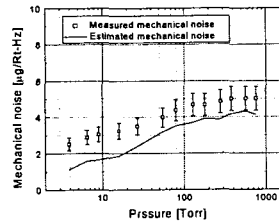
4.4 가지전극 길이에 대한 강성변화

식 (14)에서 알 수 있듯이 가지형 감지전극의 전기적 강성은 첫 번째 양의 항과 나머지 세 음의 항들로 구성되어 있다. 식 (14)로부터 강성변화비(Stiffness Varying Ratio, SVR)를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$SVR = \frac{k_e}{V_s^2} = \frac{2\epsilon_0 t}{l_0^2} \left\{ \frac{N_f l_0}{d_0} (2-\gamma)\gamma - \frac{l_A}{d_f} \left(\frac{l_0}{d_f} + \gamma \right)^2 \right. \\ \left. \left[1 + 3 \left(\frac{x}{d_f} \right)^2 \right] - \frac{l_B}{d_s} \left(\frac{l_0}{d_s} - \gamma \right)^2 \left[1 + 3 \left(\frac{x}{d_s} \right)^2 \right] \right\} - \frac{2C_{OP}}{l_0^2} \gamma^2 \quad (20)$$



(a)



(b)

Fig. 12 Measured and estimated noise levels of the branched finger capacitive microaccelerometer for varying air pressure at the sense voltage of 10V: (a) electrical and total noise levels; (b) mechanical noise levels

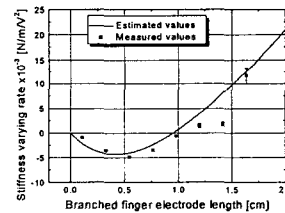


Fig. 13 Measured and estimated stiffness varying rate for different branched finger electrode length

식 (20)에서 강성변화비는 가지형 감지전극의 치수에 좌우됨을 볼 수 있으며, 특히 가지형 감지전극 길이에 대한 함수임을 알 수 있다. 이러한 가지형 감지전극 길이의 변화에 대한 강성변화비의 변화를 측정하기 위하여 본 논문에서는 가지형 감지전극 총 길이가 다른 여덟 종류의 시편을 설계·제작하였다. Table 4에 감지전극 총 길이가 다른 제작된 여덟 종류의 가지전극 정전용량형 미소가속도계들의 치수들과 측정된 강성변화비를 정리하여 놓았다.

Figure 13은 가지형 감지전극의 길이에 대한 강성변화비의 측정치와 예상치를 보이고 있다. 이로부터 제작된 가지전극 정전용량형 미소가속도계의 전기적 강성은 감지전극의 총 길이가 약

Table 5 Performance comparison of the navigation grade microaccelerometers

Performance	Case	Present microaccelerometer*	Navigation grade accelerometer ⁽¹⁾
Detection range		±2 [g]	±2 [g]
Resonant frequency		1.73 [kHz]	BW: 1~10 [Hz]
Resolution		5.5±0.72 [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]	< 50 [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]
Sensitivity		0.638 [V/g]	N/A
Nonlinearity		< 0.044 [%]	< 0.1 [%]
Minimum detectable displacement		0.19±0.03 [Å]	N/A

* At the sense voltage of 19V

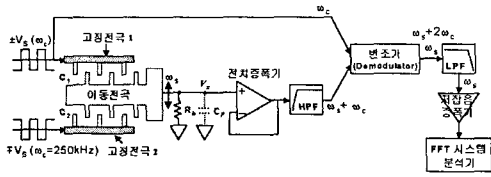


Fig. 14 Instrument set-up for the performance measurement of the branched finger capacitive microaccelerometer using an electromagnetic exciter

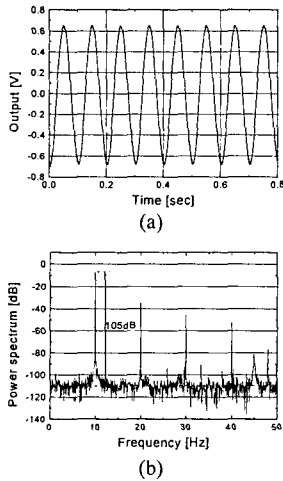


Fig. 15 Output of the fabricated microaccelerometer measured at the sense voltage of 19V for a 10Hz, 1g sinusoidal acceleration: (a) voltage output; (b) power spectrum output

1cm 이상일 때 양이 뒹을 알 수 있다. 이러한 측정 결과로부터 양의 전기적 강성을 얻기 위한 최소 가지형 감지전극의 총 길이에 대한 설계 조건을 얻을 수 있었다.

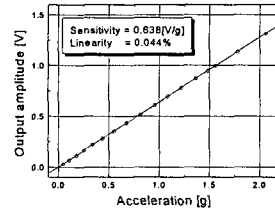


Fig. 16 Microaccelerometer output for varying acceleration measured for a 10Hz acceleration at the sense voltage of 19V

4.5 가진 실험

제작된 미소가속도계의 가진 실험을 위하여 Fig. 14와 같이 250kHz 역위상 고감지전압과 진폭변조 방법을 이용한 신호처리부가 이용되었다. Figure 15(a)와 15(b)는 각각 감지전압이 19V이고 1g, 10Hz 가속도 가진시 발생된 출력 신호와 이의 파워 스펙트럼을 보이고 있다. Figure 15(b)로부터 미소가속도계의 잡음에 대한 신호비가 105dB임을 알 수 있고, 이는 5.7 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 분해능으로 환산된다. 또한 이 측정결과는 앞의 4.1절에서 측정된 결과인 5.5 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 와 잘 일치한다. Figure 16은 입력 가속도에 대한 미소가속도계의 출력 신호 크기를 보이고 있다. 이로부터 제작된 미소가속도계의 감도가 0.638V/g이고 비선형성이 0.044% 이하임을 알 수 있었다.

Table 5는 본 미소가속도계의 측정 성능과 항법용 가속도계의 사양을 비교하여 보이고 있으며, 이로부터 본 미소가속도계의 성능이 항법용 가속도계의 성능을 만족하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 고감지전압과 가지전극을 이용한 항법용 미소가속도계를 개발하였다. SOI 웨이퍼와 deep RIE 공정을 사용하여 제작된 가지전극 정전용량형 미소가속도계로부터 감지전압이 19V일 때 5.5 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 수준의 분해능과, 0.0116±0.0017N/m²의 강성변화비를 얻었다. 공기압 실험에서 감지전압이 10V이고 공기압이 대기압에서 3.9torr로 감소함과 함께 전체 잡음도 5.1 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 에서 2.9 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 로 줄어들었다. 여덟 종류의 가지형 감지전극의 총 길이가 다른 미소가속도계들로부터 감지전극 길이

에 대한 강성변화비를 측정하였다. 이로부터 양의 전기적 강성을 얻기 위한 최소 감지전극의 총 길이에 대한 설계 조건을 얻을 수 있었다. 1g, 10Hz 가속도 가진 실험에서 잡음에 대한 신호비가 105dB로 측정되었고, 이는 $5.7\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 의 분해능에 해당한다. 또한 제작된 가지전극 정전용량형 미소가속도계는 감도가 0.638V/g이고 비선형성이 0.044% 이하로 측정되었다. 이러한 측정결과들로부터 본 미소가속도계는 항법용 가속도계의 사양을 만족함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 창의적연구진흥사업의 일환인 “생체모사기법을 응용한 디지털나노구동기관의 구현에 관한 연구” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Brown, R.G. and Hwang, Y.C., 1997, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons Inc., New York, 3rd edition, Chap.10.
- (2) Chau, K.H.-L., Lewis, S.R., Zhao, Y., Howe, R.T., Bart, S.F. and Marcheselli, R.G., 1995, “An Integrated Force-balanced Capacitive Accelerometer for Low-g Applications,” *Tech. Dig. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers95)*, pp. 593~596.
- (3) Offenber, M M., Larmer, F., Elsner, B., Munzel, H. and Riethmuller, W., 1995, “Novel Process for a Monolithic Integrated Accelerometer,” *Tech. Dig. 8th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers95)*, pp. 589~592.
- (4) Warren, K., 1994, “Navigation Grade Silicon Accelerometer with Sacrificially Etched SIMOX and BESOI Structure,” *Tech. Dig. Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, pp. 69~72.
- (5) Yazdi, N. and Najafi, K., 1999, “A High Sensitivity Capacitive Microaccelerometer with a Folded-electrode Structure,” *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference (MEMS99)*, Orland, Florida, USA, January 17-21, pp. 600~605.
- (6) Lemkin, M.A., Juneau, T.N., Clark, W.A., Roessig, T.A. and Broshihan, T.J., 1999, “A Low-Noise Digital Accelerometer using Integrated SOI-MEMS Technology,” *Tech. Dig. 10th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers99)*, Sendai, Japan, June 7-10, pp. 1294~1297.
- (7) Gabrielson, T.B., 1993, “Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors,” *IEEE Trans. Ele. Dev.*, Vol.40 No.5, pp. 903~909.
- (8) Gray, P.R. and Meyer, R.G., 1977, *Analysis and Design of Analog Integrated Circuits*, Wiley, 3rd edition.
- (9) Bordoni, F., 1990, “Noise in Sensors,” *Sensors and Actuators*, A21-23, pp. 17~24.