

실리콘 펜듈럼 서어보 가속도계의 제작 및 성능 평가

Fabrication and Evaluation of a Silicon Pendulous Servo Accelerometer

°서 재범', 심 규 민', 문 흥 기', 오 문 수', 이 관 섭''

' 국방과학연구소(Tel:042-821-4460; Fax:042-821-2224)

'' 한국철도기술연구원(Tel:0343-61-8531; Fax:0343-62-3317)

Abstracts This paper presents the initial results of development of a inertial navigation grade silicon pendulous accelerometer. This effort focused on developing a bulk-micromachined silicon pendulum and designing a PI-servo controller. Performance data presented in this paper includes threshold, bias short term stability and nonlinearity of scale factor. This accelerometer developed is demonstrated the feasibility of meeting one-nautical-mile-per-hour accuracy.

Keywords Bulk Micromachining, Silicon Pendulum, PI Controller, Inertial Grade Accelerometer

1.서론

가속도, 진동 및 충격 등의 동적 힘을 감지하는 가속도계는 자동차, 기차, 선박, 공장자동화, 해양탐사 및 우주개발에 이르기까지 산업 전 분야에 걸쳐 활용되고 있으며, 성능향상, 소형경량화 및 비용절감을 위한 기술개발을 거듭하여 꾸준히 발전되어왔다. 정밀도와 안정성이 뛰어난 서어보 가속도계는 함정, 항공기, 미사일 등 각종 유도무기의 항법, 유도 및 제어 시스템에 필수적으로 요구되는 핵심 부품으로서의 자리를 굳혀왔다. 고정밀도가 요구되는 군사 분야에 활용되어왔던 기존의 서어보 가속도계는 금속 펜듈럼이 사용되었고, 댐핑오일이 장입됨으로써, 조립공정이 복잡하고, 온도가 일정하게 유지되어야 하며 전력소모가 큰 단점을 가지고 있었다.^[1, 2] 70년대 말기부터 집적회로 제조기술을 기반으로 한 미소기계구조물의 가공기술 발전에 힘입어 보다 간편하고 신뢰도가 높은 다양한 센서들이 개발되어왔다. 그 중 기계적 성질이 우수한 실리콘을^[3, 4] 사용한 실리콘 가속도계는 구조가 간단하여 제작 공정에서 많은 공정을 생략할 수 있으므로 소형화, 경량화 및 저가격화가 가능한 장점을 가지고 있다.^[5]

본 연구에서는 기존의 금속 펜듈럼 대신에 반도체 집적회로 제조 기술을 이용하여 만든 실리콘 펜듈럼을 적용하여 가스 댐핑형 서어보 가속도계를 제작하였고, 정적 성능시험을 통하여 제작된 가속도계의 성능을 평가하였다.

2.기본 원리

2.1 구조 및 동작원리

가속도계는 여러개의 기계 및 전기부품으로 구성된 복합체로서 주요 부품으로는 실리콘 케이스, 펜듈럼, 영구자석, 토커코일 및 감지코일 등으로 구성된다. 그림 1.은 실리콘 펜듈럼 가속도계의 동작원리를 설명하기 위한 개략도를 나타내고있는데, 그림과 같이 +g에 해당하는 가속도가 인가되었을 때 펜듈럼은 아래쪽으로 기울게 된다. 펜듈럼에 부착된 토커코일에는 펜듈럼의 복원전류와 함께 여기(Excitation) 신호인 구형파가 실려있으므로, 이 신호에 의해 상·하 각각의 감지코일에 유도전류가 발생

하게 된다. 이렇게 유도된 두 신호의 차(差)가 가속도 정보를 담고있는 신호가 되며, 이 신호는 서어보 제어기를 통해 가속도량에 비례하는 전류로 변환되어 펜듈럼을 영점에 위치시키기 위한 복원전류로 사용된다. 따라서 복원되는 전류의 양을 정확히 측정함으로써 가속도계에 인가된 가속도량을 알 수 있게 된다.

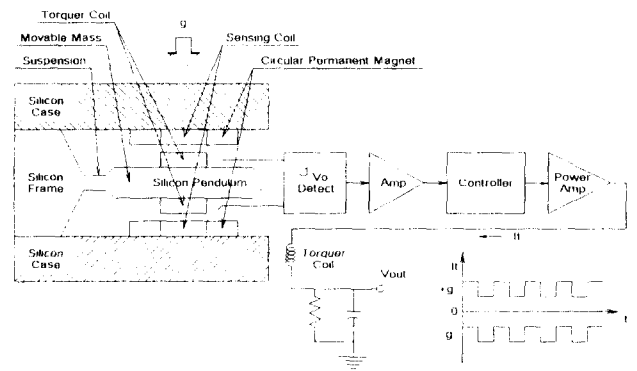


그림 1. 실리콘 펜듈럼 가속도계의 구성도

Fig 1. Schematic diagram of silicon pendulous accelerometer

2.1 출력 방정식

가속도계의 감지축으로 인가된 가속도에 의한 펜듈럼의 운동 방정식은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$J\ddot{\alpha} + B\dot{\alpha} + C_s\alpha + M_0 \pm M_{fr} + M_f = M_{ex} \quad (1)$$

여기서 J는 펜듈럼의 관성모멘트, B는 댐핑계수, C_s는 서스펜션의 강성도, α는 펜듈럼축에 대하여 펜듈럼이 기울어진 각도, M₀는 펜듈럼의 기계적인 Offset 모멘트이고 M_{fr}은 전기적 또는 기계적인 특성에 의한 히스테리시스 모멘트이다. 그리고 M_{ex}는 외부에서 입력되는 가속도에 의해 펜듈럼이 받는 모멘트이고 M_f는 토커전류에 의하여 발생하는 복원 모멘트로서 다음과 같이 표현된다.

$$M_t = K_t I_t + K_t^* I_t^* \text{----- (2)}$$

여기서 K_t 는 토커계수, K_t^* 는 토커계수의 비선형 계수, 그리고 I_t 는 토커코일에 흐르는 전류를 의미한다.

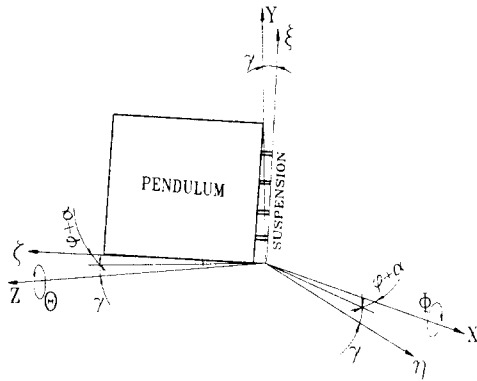


그림 2. 기준축에 대한 펜듈럼의 처짐각도 ($\theta=0, \phi=0$)
Fig 2. Deflection angle of pendulum about reference axis

그리고 가속도계의 감지축(η)과 가속도가 입력되는 방향에 사이의 각도에 따라서 펜듈럼이 받는 토크는 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$M_{ax} = mgl \sin(\theta + \gamma) [\cos \phi \cos(\phi + \alpha) + \sin \phi \sin(\phi + \alpha)] \text{----- (3)}$$

여기서 mgl 은 펜듈럼의 모멘트, l 는 펜듈럼의 축, ξ 는 서스펜션 축, φ 는 펜듈럼축 정렬오차, γ 는 서스펜션의 축오차, θ 는 펜듈럼축을 중심으로 감지축을 회전시킨 각도, 그리고 ϕ 는 서스펜션축을 중심으로 감지축을 회전시킨 각도이다. (그림 2.) 그러면 정적인 상태에서 가속도계 출력 $I_t(\theta, \phi)$ 는 다음과 같이 계산 된다.¹⁶⁾

$$I_t(\theta, \phi) = \frac{1}{K_t + \frac{C_s R}{K_{am}}} \left[\frac{C_s}{K_{am}} U_o - (M_o \pm M_{fr}) + mgl \sin(\theta + \gamma) \{ \cos(\phi + \alpha) \cos \phi + \sin(\phi + \alpha) \sin \phi \} \right] + \frac{K_t^*}{\left(K_t + \frac{C_s R}{K_{am}} \right)^3} \left[\frac{C_s}{K_{am}} U_o - (M_o \pm M_{fr}) + mgl \sin(\theta + \gamma) \{ \cos(\phi + \alpha) \cos \phi + \sin(\phi + \alpha) \sin \phi \} \right]^2 \text{----- (4)}$$

여기서 R 은 토커와 검출저항의 합, K_{am} 은 재평형회로의 이득, 그리고 U_o 는 픽오프의 offset 전압이다.

식 (4)에서 알 수 있듯이 토커코일에 흐르는 전류는 가속도계의 모든 설계인자와 설계오차, 그리고 가속도를 받는 방향각(입력 가속도의 크기)의 함수 임을 알 수 있다.

3. 실리콘 펜듈럼 제작

그림 3은 본 연구에서 설계한 실리콘 펜듈럼의 형상을 보여 주고 있는데, 기존의 2-점 지지 방식과는 달리 4-점 지지(4-Point Suspension) 방식으로 설계되었다. 이와 같은 구조의

가장 큰 장점으로서는 좌굴(Buckling) 현상에 의한 서스펜션(Suspension)의 파손을 방지할 수 있다는 점으로써, 이는 각각 2개의 서스펜션이 인장과 압축력을 교대로 견뎌내기 때문이다.

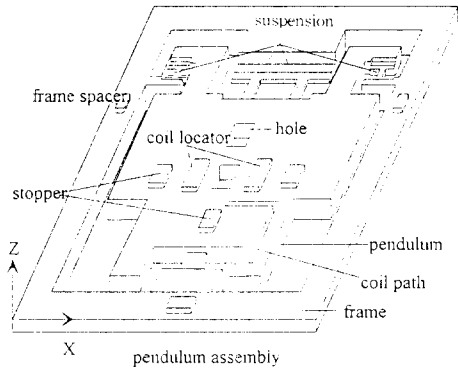


그림 3. 실리콘 펜듈럼의 형상
Fig 3. Shape of silicon pendulum

초정밀 가속도계를 위해서는 매우 정밀한 펜듈럼 제작이 필수적이므로 가장 핵심적인 공정은 펜듈럼 제작공정이라 할 수 있다. 펜듈럼은 μm 단위의 제작 공차로 정밀하게 제작되므로 이와 같은 조건을 만족시키기 위해서 실리콘 웨이퍼를 화학적으로 가공하는 에칭(Etching) 기법을 이용하였다. 이러한 공정을 이용하면 서스펜션 부분의 두께를 매우 얇게 가공할 수 있으므로 단면계수를 작게하여 펜듈럼이 움직일 때 발생하는 탄성력을 매우 작게할 수 있으며, 스프링 상수가 거의 선형적인 특성을 갖게할 수 있다.

그림 4는 다층 박막 및 에칭 기법을 이용한 3차원 실리콘 구조물의 형성 공정에 대한 순서를 개략적으로 나타낸 것이다.

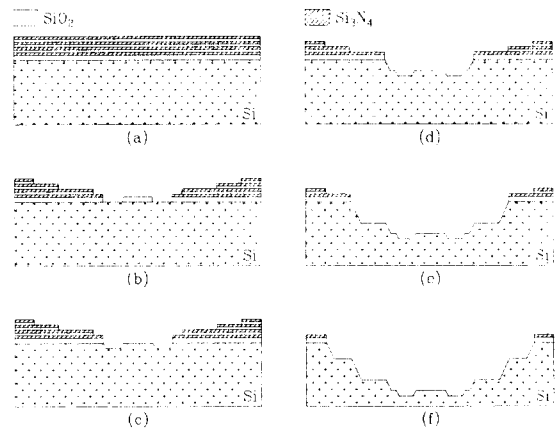


그림 4. 3차원 실리콘 미세 구조물 형성공정
Fig 4. Procedure for constructing of 3-dimensional silicon micro-structure

먼저 그림 4(a)와 같이 실리콘 산화막 및 실리콘 질화막으로 된 다층 박막을 산화 또는 증착을 통해 각 4개층 씩 총 8층을 형성하고, 이 박막층들을 펜듈럼의 각 형상에 따라 사진묘화 공정에 의해 정의하는데, 이는 이후 진행될 건식 및 습식 식각을 통한 실리콘 번크식각시의 식각 방지막으로 사용하기 위함이다. 웨이퍼 양면에 대한 사진묘화 공정 후 질화막 건식 식각과 산화막 습식 식각을 통해 펜듈럼의 각 부위가 질화막의 각층에

형성되므로 6개의 광마스크에 새겨진 각각의 펜듈럼 형상이 실리콘 질화막의 각 층에 정의된다.[그림 4.(b),(c)] 이와 같은 방법으로 각 층에 정의된 형상에 따라 실리콘 벌크 식각을 하게 되며, 펜듈럼의 각 형상에 따른 단차 만큼씩 단계별 식각 깊이가 달라지게 되는데, 이는 시간에 따른 실리콘의 식각률을 고려한 시간 에칭을 통해 이루어진다.¹⁷⁾

표 1.에서는 이와 같은 공정을 통해 제작된 실리콘 펜듈럼의 구조물 중 주요 부위의 치수를 보여준다.

표 1. 실리콘 펜듈럼의 주요부위에 대한 치수
Table 1. Size of important parts on silicon pendulum

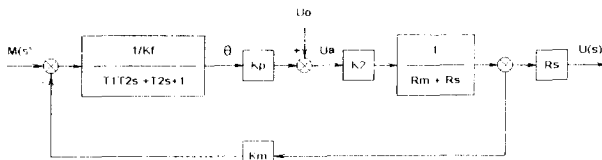
서스펜션의 두께	16 μ m
서스펜션의 폭	1.0nm
서스펜션의 길이	2.2nm
Stopper	15 μ m
공간자의 높이	25 μ m
공진주파수(해석결과)	19.12Hz

4. 제어 시스템

4.1.1 가속도계의 동작 특성 해석

서어보 제어기는 가속도계에 의해 감지된 신호를 증폭, 필터링 그리고 보상기에 의한 신호처리 과정을 거쳐 가속도계의 펜듈럼 조립체가 영점(Null Point) 근처에서 동작할 수 있도록 복원신호를 제공해주며, 또한 가속도계의 모델링 오차 및 외란 등과 같은 불확실한 현상이 발생하였을지라도 항상 만족스러운 성능을 유지시키기 위한 목적으로 사용된다.

그림 5.는 서어보 제어기의 블록 선도를 나타낸다.



- | | |
|---------------------------------|----------------|
| J : 펜듈럼의 관성모멘트 | I : 토크 전류 |
| B : 댐핑계수 | Rs : 감지 저항 |
| Kf : 펜듈럼의 스프링상수 | m : 펜듈럼의 질량 |
| Rm : 토크코일의 저항 | l : 펜듈럼의 길이 |
| θ : 펜듈럼의 회전각도 | K2 : Amp의 이득 |
| a_n : 측정하고자하는 가속도 | Uo : Offset 전압 |
| Km : 토크코일에서 전류와 발생한 토크의 비례상수 | |
| Mm : 토크코일에서 발생한 토크 | |
| Kp : 감지코일의 비례상수 \times Amp 이득 | |
| M : 가속도에 의해 발생한 모멘트 | |

그림 5. 서어보 회로에 대한 블록선도

Fig 5. Block diagram of servo loop

가속도계의 펜듈럼 운동은 스프링 감쇄 시스템으로 모델링될 수 있으며 유도된 전달함수는 다음과 같다.

$$M = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + K_f \theta$$

$$\frac{\Theta(s)}{M(s)} = \frac{1/K_f}{T_1 T_2 s^2 + T_3 s + 1} \quad (5)$$

여기서 $T_1 = J/B$, $T_2 = B/K_f$ 이다

4.1.2 가속도계의 서어보 회로 분석

$M(s) = ml[a_n(s) + a_r(s)\theta]$ 는 가속도로 인해 펜듈럼에 발생한 모멘트로서 가속도계의 입력에 해당한다. 이와 같은 가속도 입력 $M(s)$ 에 대한 출력 $U(s)$ 의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{U(s)}{M(s)} = \frac{\frac{1}{J s^2 + B s + K_f} K_p K_2 R_s}{1 + \frac{1}{J s^2 + B s + K_f} K_p K_2 K_m \frac{1}{R_m + R_s}}$$

$$= \frac{K_p K_2 R_s}{(R_m + R_s) J s^2 + (R_m + R_s) B s + K_f (R_m + R_s) + K} \quad (6)$$

위 식에서 $K = K_p K_2 K_m$ 으로 정의하고, $\frac{K_f (R_m + R_s)}{K} \ll 1$ 라고 가정한 뒤, 분모와 분자를 K 로 나누면

$$\frac{U(s)}{M(s)} = \frac{R_s}{K_m} \frac{1}{T_1 T_3 s^2 + T_3 s + 1} = \frac{R_s}{K_m} \lambda_1(s) = G(s) \quad (7)$$

여기서 $T_1 = J/B$, $T_2 = B/K_f$, $T_3 = B(R_m + R_s)/K$ 이고,

$\lambda_1(s) = 1/(T_1 T_3 s^2 + T_3 s + 1)$ 이다.

따라서 출력 $U(s)$ 는

$$U(s) = G(s)M(s) = \frac{R_s}{K_m} ml [a_n(s) + a_r(s)\theta] \lambda_1(s)$$

$$\approx \frac{R_s}{K_m} ml a_n(s) \lambda_1(s) \quad (\because \theta \approx 0) \quad (8)$$

가속도계는 1-축에 대한 가속도만을 측정할 수 있으므로, 출력 전압은 입력된 가속도 중 a_n 성분만을 감지한 신호이다. 따라서 펜듈럼이 가속도계의 감지축과 일치하지 않는다면 출력전압은 정확한 가속도를 나타내지 못하게 된다. 그러므로 실제 가속도에 대한 출력 전압의 오차를 최소화하기 위해 다음 사항들을 설계 과정에서 고려하였다.

- (1) 펜듈럼의 스프링상수, K_f 는 작아야 한다.
- (2) 전체 시스템의 이득, K 는 커야한다.

그러나 스프링 상수, K_f 를 너무 작게하면 큰 충격 또는 진동에 의해 파손의 위험이 따르며, 시스템 이득, K 를 너무 크게하면 충격 또는 큰 가속도 입력시 제어 시스템이 포화되는 현상을 가져올 수도 있다. 이와 같은 시스템 포화를 억제하기 위해 가속도계의 댐핑계수를 증가시키는 방법이 있다.

본 제어 시스템에서는 가속도에 의한 펜듈럼의 변위 정보를 충실히 얻어내기 위해 25kHz의 여기신호를 사용하였으며, 외란 또는 내부 잡음에 강하고 정상상태오차를 효과적으로 제거할 수 있는 비례-적분 보상기를 설계하여 제어기를 제작하였다.

5. 시험 결과

가속도계의 정적 성능시험을 수행하기 위해 그림 6.과 같이 구성된 시험장비를 사용하였다. 가속도계를 2축 인덱스 테이블에 장착하고 가속도계의 감지축(Sensitive Axis)을 표 2.와 같이 6-가지 위치로 변화시켜가면서 각 위치에서의 중력가속도 입력

에 의한 가속도계 출력을 얻는다.

6-가지 시험 위치에서 얻은 가속도계의 출력값을 이용하여 척도계수(Scale Factor), 바이어스(Bias), 최소감도(Threshold), 축정렬오차(Axis Misalignment), 출력의 안정성(Stability) 및 비선형성(Non-linearity) 등의 성능계수를 구할 수 있다.¹¹⁾

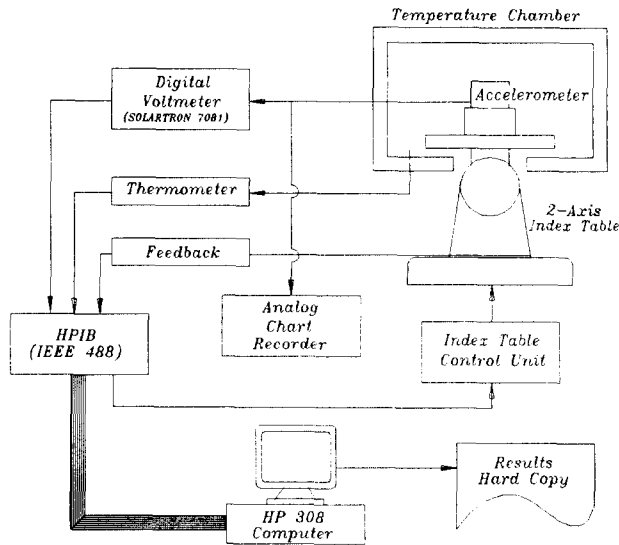


그림 6. 가속도계 시험장비 구성도

Fig 6. Schematic diagram of accelerometer test station

표 2. 정적성능시험을 위한 6-가지 시험위치

Table 2. 6-positions for static performance test

Pos.#(θ, ϕ)	Orientation	Input	Pos.#(θ, ϕ)	Orientation	Input
#1(0,0)		0 g	#2(90,0)		+1 g
#3(180,0)		0 g	#4(270,0)		-1 g
#5(0,90)		0 g	#6(0,270)		0 g

ζ pendulum axis ξ suspension axis η sensitive axis

본 연구에서는 가속도계의 토크 마그네트를 전자석과 영구자석을 사용한 두 종류의 가속도계를 제작하였으며, 각각의 가속도계에 대한 정적성능시험 결과는 표 3.에서 정리하였다.

그림 7.은 영구자석형 가속도계의 주파수응답 특성을 보여주고 있으며, 약 520Hz 정도의 대역폭을 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 8.은 개회로에서의 펜듈럼의 처짐각도에 따른 토크환산계수(Torquer Scale Factor)의 변화를 보여준다. 전자석형 가속도계 (EM#)는 영구자석형 가속도계 (PM#)에 비해 펜듈럼의 처짐 각도가 커짐에 따라 토크환산계수 값이 매우 큰 변동을 나타내었다.

표 3. 실리콘 펜듈럼 가속도계의 성능시험 결과

Table 3. Test results for silicon pendulous accelerometers

성능계수	단위	전자석형 (EM02)	영구자석형 (PM03)
측정 범위	g	± 7	± 20
최소감도	μ g	25.6	7.3
척도계수	mA/g	8.406	1.993
척도계수 안정도	ppm/h	-	12.6
바이어스	mg	4.45	4.97
바이어스 안정도	μ g	53.7	16.8
축오차	arc.min	11.8	3.1
비선형성	%	0.147	0.078

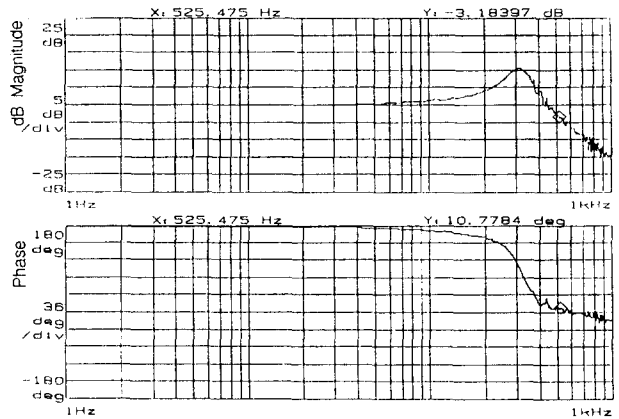


그림 7. 영구자석형 가속도계의 주파수 응답

Fig 7. Frequency response for permanent magnetic type accelerometer.

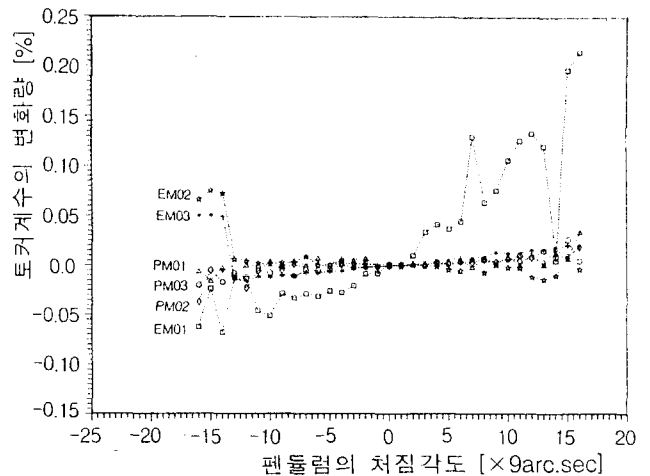


그림 8. 펜듈럼의 처짐 각도에 따른 토크 환산계수의 변화

Fig 8. Torquer scale factor variations according to the pendulum deviation angles

그림 9는 서스펜션 강성도에 따른 가속도계의 불감응영역(Dead Zone)을 보여 준다. 본 연구를 통해 제작된 가속도계의 불감응영역은 $2.5 \times 10^{-6} \sim 3.5 \times 10^{-6}$ 정도의 분포를 보여주었으며, 서스펜션의 강성도와 가속도계의 불감응영역의 크기는 거의 선형적인 비례관계를 갖고있음을 알 수 있었다. 관성등급(Inertial Grade) 가속도계에서 일반적으로 요구되는 불감응영역은 $10^{-5}g$ 이하이므로 이와같은 성능을 만족시키기 위해서는 서스펜션의 강성도를 약 $1.0 \times 10^{-4} Nm/rad$ 이하로 설계해야 됨을 알 수 있다.

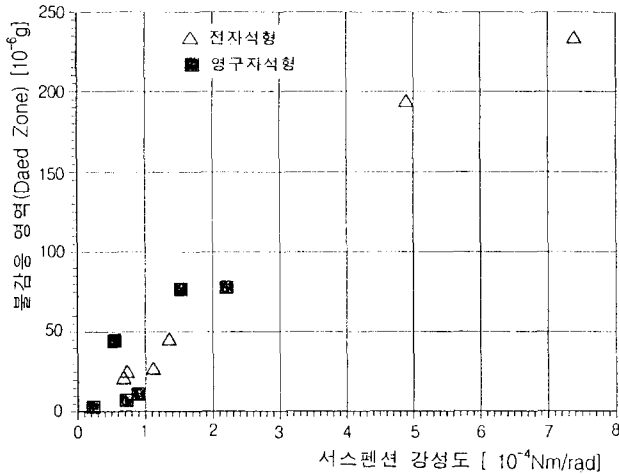


그림 9. 서스펜션 강성도와 불감응 영역과의 관계
Fig 9. Relation between suspension stiffness and dead zone

그림 10은 전자석형 및 영구자석형 가속도계에 대해 6시간 동안의 바이어스 안정도 시험 결과를 나타낸 것이다. 시험은 상온에서 수행하였으며, 8초 간격으로 가속도계의 출력을 기록하였다. 6시간 동안의 바이어스 안정도(1σ 값)는 전자석형 가속도계(EM01)의 경우 $4.3 \times 10^{-5}g$ 이며, 영구자석형 가속도계(PM02)는 $3.7 \times 10^{-6}g$ 로서 영구자석형 가속도계가 약 10배 정도의 안정성을 보여주었다.

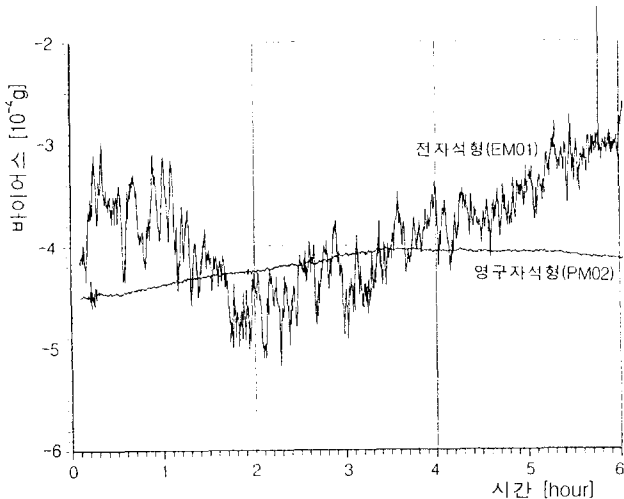


그림 10. 바이어스 안정도 시험 결과
Fig 10. Results of bias stability test

그림 11은 3조의 영구자석형 가속도계에 대한 비선형오차 특성을 보여주는 것으로써 각 가속도계의 최대입력 가속도에 대한 출력의 비선형성 값은 0.078%~ 1.3% 범위내에 존재하였다.

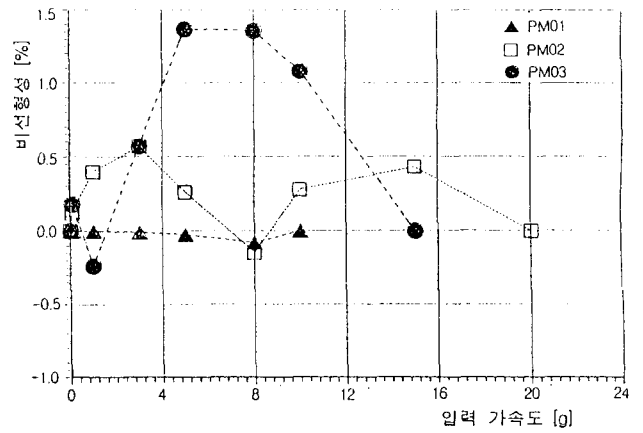


그림 11. 실리콘 펜듈럼 가속도계의 비선형 오차
Fig 11. Non-linearity error of silicon pendulous accelerometer

6. 결론

반도체 집적회로 제조 기술을 이용하여 만든 실리콘 펜듈럼을 적용하여 가스 댐핑형 서어보 가속도계를 제작하고, 이에 대한 성능평가를 수행하였다. 토커 마그네트를 각각 전자석 및 영구자석을 사용한 두 종류의 가속도계를 제작하여 정적성능 시험을 한 결과 영구자석형 가속도계가 전자석형 가속도계에 비해 측정범위, 출력안정도 및 선형도 등에서 우수한 성능을 보여주었다.

영구자석형 가속도계의 경우 최대 측정범위는 $\pm 20g$, 최소감도 및 출력 안정도는 약 $10 \mu g$ 정도의 매우 높은 정밀도를 보여준 반면 출력의 비선형오차는 0.1~1.0% 정도의 성능을 나타내었다.

참고문헌

- [1] J. S. Hunter and W. W. Stripling, "Present and Future Trends in Army Inertial Sensor Concepts", Symposium Gyro Technology 1980, pp. 9.0-9.20.
- [2] B. H. Ahn and J. D. Coccoli, et al., "Inertial Technology for the Future", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. ASE-20, No.4, July 1984, pp. 414-444
- [3] J. C. Greenwood, "Silicon in Mechanical Sensors", J. Phys. E : SCI Instrum., Vol. 10, pp. 239-248, 1986
- [4] K. E. Petersen, "Silicon as a Mechanical Material", Proc. of IEEE, Vol. 70, No.5, pp. 420-457, 1982
- [5] O. Lefort, "A Miniature, Low Cost, Silicone Micro-machined Servo-Accelerometer", Symposium Gyro Technology, 1988
- [6] 심규민, 이관섭, 서재범, 문홍기, 오문수. "실리콘 서어보 가속도계의 성능 및 환경시험", MSDC-417-960309, 국방과학연구소, 1996. 3.
- [7] 전국진, 조동일, 김용권. "유도무기 관성항법장치용 실리콘 가속도계 연구", TR-95-042, 서울대학교 자동차어 특화연구센터, 1996. 2.