

힘평형 서보 가속도계의 질량지지 장치 설계연구

*김영담, *남효덕, **이두희, ***장호경

*영남대학교 센서 및 시스템공학과

**한국표준과학연구원

***경산대학교 전자물리학과

A Study on Design of a Mass-Spring System for Force-Balance Servo Accelerometer

*Young-Dam Kim, *Hyo-Duk Nam, **Doo-Hee Lee, ***Ho Gyeong Chang

*Department of Sensor and System Engineering, Yeungnam University

**Korea Research Institute of Standard and Science

***Department of Electrophysics, Kyungsan University

요 약

진동가속도를 감지하는 힘평형 서보 가속도계의 성능특성을 결정하는 질량지지 장치를 4개의 팔로 구성된 형태로 설계하고 응답특성을 조사하였다. 스프링의 길이, 폭, 두께에 따른 질량지지 장치의 응답특성을 유한요소법을 이용하여 계산하고, 이를 바탕으로 힘평형 서보 가속도계의 감도, 사용주파수 범위 및 동적 범위를 예측하였다. 그리고 레이저 간섭계를 이용하여 힘평형 서보 가속도계의 각각의 진동 주파수 및 가속도의 크기에 따른 간섭무늬 수의 변화와 이때의 응답전압값을 이용하여 가속도계의 응답특성을 측정하였으며, 수치해석을 통해 얻은 결과와 비교 분석하였다.

1. 서론

힘평형 서보 가속도계(force-balance servo accelerometer)는 주로 저주파 대역의 진동 가속도 측정에 사용되며 closed-loop feedback 측정시스템으로 다른 타입의 변환기들에 비해 높은 정밀도와 동적 성능, 안정도 및 재현성 등 제반 성능특성이 우수하다는 장점이 있다. 다른 타입의 가속도계와는 달리 힘평형 서보 가속도계에서는 관성질량은 전기적으로 구동되는 기계적인 스프링에 의해 한정된 범위 안에서만 자유로이 움직일 수 있다.

자동차, 철도차량, 선박 및 항공·우주산업 등 0.1~100 Hz 범위의 저주파 진동의 정밀측정 및 평가가 요구되는 분야는 대단히 많으며, 안정성 진단을 위한 대형

구조물, 교량 등의 동적 거동 상시 monitoring 시스템의 개발이나 정밀한 저주파 진동제어가 필요한 반도체 제조설비나 정밀 가공기계의 능동 진동제어 등 여러 분야에서 꾸준한 수요 증가가 예측되고 있다. 이에 따라 다른 변환기들에 비해 정밀도, 동적 성능, 안정도 및 재현성 등이 우수한 힘평형 서보 가속도계의 개발이 필요하며 이의 성능특성 평가기술도 개발되어야 한다.

본 연구에서는 힘평형 서보 가속도계의 성능특성을 결정하는 질량지지 장치를 4개의 팔로 구성된 형태로 설계하고, 유한요소법을 이용하여 스프링의 길이, 폭, 두께 그리고 인가질량을 변화시키면서 36개의 서로 다른 질량지지장치를 수치 해석하였다. 그리고 레이저 간섭계를 이용하여 제작된 힘평형 서보 가속도계의 각각의 진동 주파수와 가속도계의 응답특성을 측정하였으며 수치해석을 통해 얻은 결과 비교하였다.

2. 이론적 배경

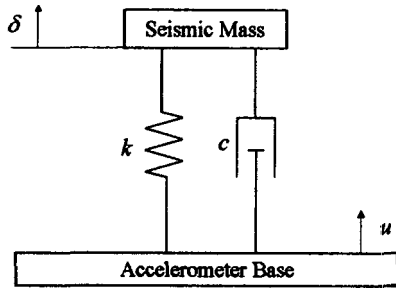


그림 1. 가속도계의 단순모델

힘평형 서보 가속도계에서 입력가속도에 비례하는 변위를 주는 질량지지 장치는 그림1에서 보는 것처럼 관성질량-스프링계로 모델링 할 수 있다. 관성질량 스프링계에서 베이스의 변위를 u , 베이스와 관성질량 사이의 상대변위를 δ 라고 하면 공간상의 어떤 고정된 기준점에 대한 관성질량의 상대변위는 $(\delta+u)$ 로 주어지므로 관성질량 m 을 가속시키는 힘은 $-m d^2(\delta+u)/dt^2$ 으로 스프링과 댐퍼(Damper)에 의하여 관성질량에 가해지는 힘과 같다. 스프링의 강성을 k , 댐퍼의 감쇠계수를 c 로 나타내면 스프링에 의하여 작용되는 힘은 $-k\delta$, 댐퍼에 의하여 작용되는 힘은 $-c \frac{d\delta}{dt}$ 이므로 그림 1의 관성질량-스프링 계에 대한 운동 방정식은 다음과 같은 2차 미분 방정식으로 표현된다.

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} + c \frac{d\delta}{dt} + k\delta = -m \frac{d^2 u}{dt^2} \quad (1)$$

만일 가진 주파수가 정상상태의 진동 주파수라면 진폭 δ_0 는 다음과 같다.

$$\delta_0 = \frac{u_0 \frac{w^2}{w_n^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{w^2}{w_n^2}\right)^2 + \left(2 \frac{c}{c_c} \frac{w}{w_n}\right)^2}} \quad (2)$$

여기서 공진 주파수 w_n 과 임계감쇠상수 c_c 는

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (3)$$

$$c_c = 2\sqrt{Mk} \quad (4)$$

이다.

3. 유한요소해석과 실험방법

실험 실시 전에 미리 질량지지장치의 응답특성을 예측하기 위하여 그림 2와 같은 유한요소모델을 사용하여 분석하였다. 각각의 팔의 폭은 8mm로 하고 길이는 13.25 mm로 하였다. 그리고 두께와 관성질량의 변화에 따라 공진주파수와 1g의 가속도를 가한 상태에서의 진폭변화를 구하기 위하여 스프링의 두께는 0.3 mm, 0.4 mm, 0.5mm로 하고 관성질량은 22.055 gram, 22.971 gram, 23.049 gram으로 변화시켰다. 그림 3은 관성질량이 23.049 그램일 때 팔의 두께를 변화시킨 경우 가진 주파수에 따른 관성질량의 변위 응답특성을 보여준다.

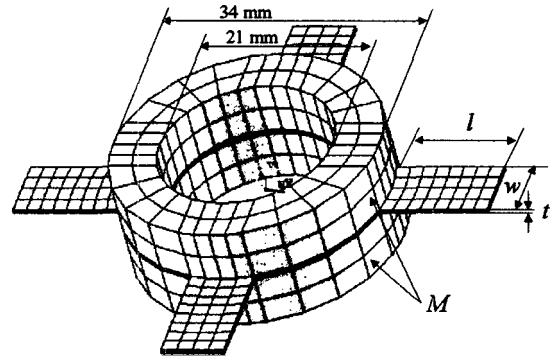


그림 2. 질량지지 장치의 유한요소모델

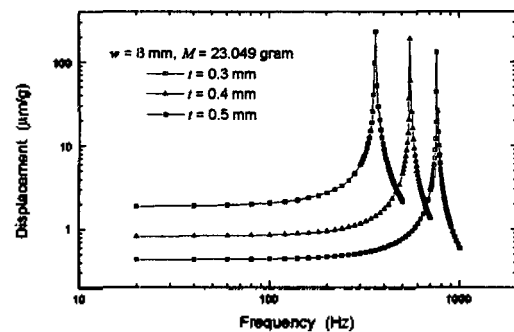


그림 3. 스프링의 두께 변화에 따른 주파수응답특성

관성질량의 변위응답값은 힘평형 서보 가속도계의 감도를 결정하며 공진주파수의 1/3지점까지의 평균변화량은 1.976, 0.856, 0.474 $\mu\text{m/g}$ 로 변하지만 이 1/3지점까

지의 영역에서는 매우 평탄함을 볼 수 있다. 그리고 관성질량의 변위 응답값은 팔의 두께에 세제곱에 반비례함을 알 수 있다. 그림 4는 팔의 두께가 0.5 mm일 때 관성질량을 변화시킨 경우 가진 주파수에 따른 관성질량의 변위 응답특성을 보여준다.

이 경우에 공진 주파수의 1/3지점까지의 평균 변화량은 0.431, 0.45, 0.452 $\mu\text{m/g}$ 로 응답특성의 변화에 큰 영향을 미치지 못하고 있다. 그래서 팔의 두께가 0.5 mm일 때 관성질량과 응답특성의 관계를 알아보기 위해 12개 다른 질량을 적용하여 유한 요소해석을 수행하였다. 그림 5는 관성질량의 변화에 따른 공진주파수 1/3 영역까지의 단위 가속도에서의 응답값을 보여준다.

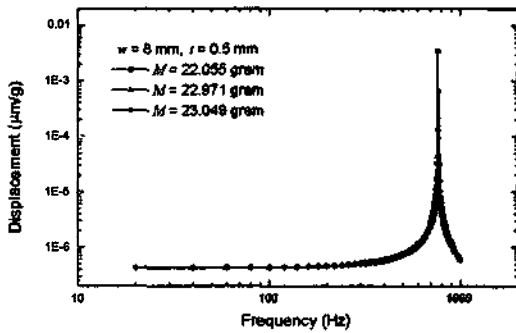


그림 4. 관성질량의 변화에 따른 주파수응답특성

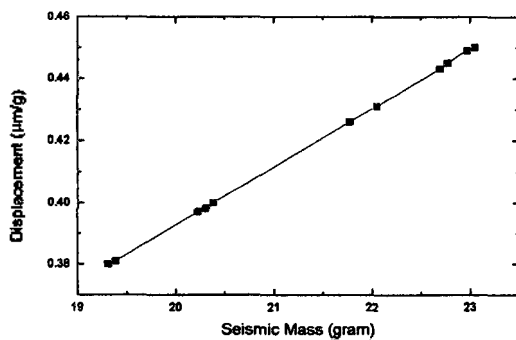


그림 5. 관성질량변화에 따른 변위응답특성

그림 5에서도 볼 수 있듯이 관성질량의 변화에 따라 변위응답값은 비례적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 즉 관성질량을 변화시키는 것보다는 스프링의 두께를 변화시키는 것이 힘평형 서보 가속도계의 응답특성에 미치는 영향이 큼을 알 수 있다.

가속도 감지부인 질량지지 장치와 힘발생기가 일체가 되도록 그림 6에서 보는 것과 같이 원판의 중심에 질량과 힘 발생기가 위치하고 있으며 레이저 간섭계를 이용하여 질량지지 장치의 주파수 응답특성을 측정하고, 영구자석을 사용하여 형성된 균일한 자기장에서 동작하는 힘 발생기의 응답 특성을 조사하였다.

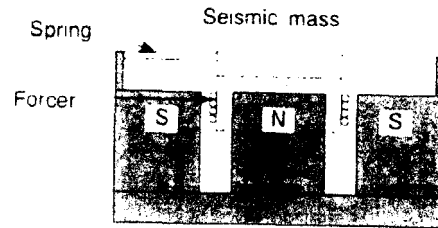


그림 6. 관성질량-스프링계와 힘 발생기

그림 7은 레이저 간섭계를 이용한 관성질량-스프링계의 주파수 응답특성을 측정하기 위한 장치의 구성도를 보여준다. 식(5)을 이용하여 진동진폭 ξ 를 측정할 수 있으며 f_1 는 1초 동안 측정된 간섭무늬의 수, f 는 가진 주파수이다. 광원으로는 파장 λ 가 $6.328 \times 10^{-7}\text{m}$ 인 안정화된 He-Ne 레이저를 사용하였다.

$$\xi = \frac{\lambda}{8} \times \frac{f_1}{f} \quad (5)$$

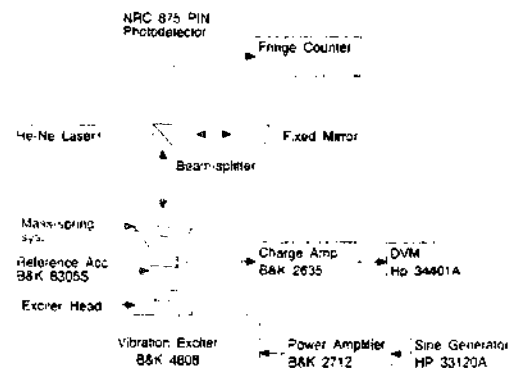


그림 7. 실험장치

보통 가속도계의 사용 주파수 영역은 근사적으로 공진 주파수의 1/3 정도로 간주한다. 그러나 사용주파수를 높이기 위해 공진주파수를 증가시킬 경우 감도가 감소하

게 된다. 즉 용도에 맞게 측정감도와 주파수 범위를 조절하는 것이 중요하다.

4. 결론

유한요소해석을 통해 힘평형 서보 가속도계의 응답특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1) 힘평형 서보 가속도계의 특성을 결정하는 질량지지장치의 변위 응답값은 팔의 두께 새재곱에 반비례관계가 있다.

2) 팔의 폭과 두께를 고정시키고 관성질량만 증가시킬 경우 질량지지장치의 변위 응답값은 비례관계가 있다.

참고문헌

[1] Wang P, Duan SS, Zhao XM, Guo ZQ, "Research on the dynamic test method for force-balance accelerometers (FBAs) with electric stimulation. 2 An improved test method for voltage-source type FBAs" Sensors & Actuators A-Physical, V.57 N.1, 1996 -10 -01

[2]; Bernhard E. Boser and Roger T. Howe, "Surface Micromachined Accelerometers", IEEE Journal of Solid-State Circuits, V.31 N.3, 1996 -03 -01

[3]Tech. Notes of COLUMBIA Force Balance Servo Accelerometers, Columbia Research Labs. INC., Inertia Products Div., NJ (USA)

[4]이우갑, 이두희, 전병수, 남현수, "미소 힘 측정 기술을 이용한 공정 개선 연구", 한국표준과학연구원 연구보고서 KRISS/IR--2000-015, 1999

[5]Byeoung Ha, Yongsoo OH and Cimoo Song, "A Capacitive Silicon Microaccelerometer with Force-Balace Electrodes", Jpn. J Appl. Phy. Vol. 37 (1998) pp. 7052-7057.