

정밀측정기용 준영강성 제진기의 비선형 모델 Nonlinear model of quasi-zero stiffness isolator for precision instruments

*김경홍¹, #안형준²

*K. H. Kim¹, #H. J. Ahn (ahj123@ssu.ac.kr)²

승실대학교 대학원 기계공학과¹, 승실대학교 기계공학과²

Key words : Vibration isolator, Zero stiffness

1. 서론

최근 첨단 산업들의 발달함에 따라 집적회로와 같은 제품들의 생산기술의 높은 정밀도가 요구됨에 따라 생산현장에서 미진동의 허용한계가 다른 분야에 비해 대단히 엄격해지고 있다. 먼진 설계가 일반화되어 있지만 국부적으로 제진기가 사용되고 있다.

공압용 제진기는 생산현장에서 많이 사용되고 있지만 압축공기의 필요성과 3Hz 이상의 고유진동수 때문에 고정밀 생산장비에 적용한계를 가지고 있어 공압용 제진기의 한계를 극복하고자 최근 몇몇의 영강성 제진기가 개발되고 있다 [1-3]. 본 연구 대상인 준영강성 제진기는 Fig.1(a)과 같이 코일스프링과 유연보로 구성되어 있다. 유연보에 작용하는 압축력이 증가함에 따라 수직방향의 강성이 낮아져 1Hz 이하의 고유진동수를 갖는다.

본 논문에서는 준영강성 제진기의 핵심 요소인 유연보의 비선형 거동을 해석하고 Matlab의 simulink을 이용하여 준영강성 제진기의 전체 모델을 구성하여 모의시험을 수행하였다. Fig. 1(b)의 Manus-K사 준영강성 제진기를 이용하여 유연보 비선형 모델 뿐만 아니라 제진기 전체 모델의 진동 특성도 실험을 통하여 검증하였다.

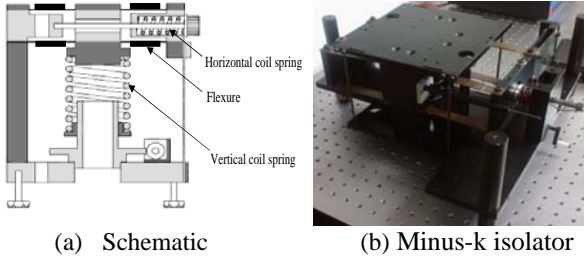


Fig. 1 A quasi-zero stiffness vertical isolator

2. 유연보의 비선형 모델

Fig.1의 영강성 제진기의 핵심 요소인 유연보는 Fig.2(a)와 같은 형상을 갖고 있다. L_a 부분의 변화에 비해 L_b 부분의 변화가 미미하여 강체로 가정할 수 있으며, 미분방정식을 이용하면 유연보의 수직변위 식 (1)을 얻을 수 있다 [4, 5]. 유연보의 자유물체도는 Fig.2(a)와 같으며, 수직력, 압축력 및 모멘트로 인해 Fig.2(b)와 같은 수평변위가 발생한다. L_a 부분의 수평변위는 압축력에 인한 변위(δ_x^c)와 기구적인 변위(δ_x^k)의 합으로 아래 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

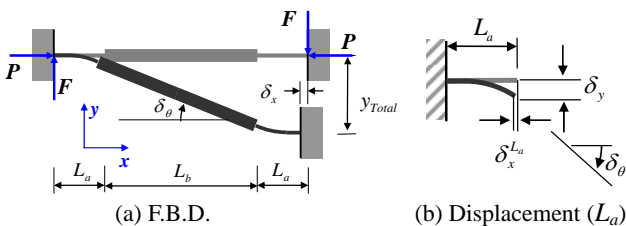


Fig. 2 Flexure

$$y_{Total} = \frac{F}{P} \frac{4L_a \cos \sqrt{\frac{P}{EI}} L_a - \left((2L_a + L_b) \frac{L_b}{L_a} + 4 \sqrt{\frac{EI}{P}} \right) \sin \sqrt{\frac{P}{EI}} L_a}{\frac{L_b}{L_a} \left(\sin \sqrt{\frac{P}{EI}} L_a - 2 \cos \sqrt{\frac{P}{EI}} L_a \right)} \quad (1)$$

$$\delta_x^k = \delta_x^c + \delta_x^e = \delta_x^k + \frac{P L_a}{b h E} \quad (2)$$

유연보 전체 수평방향 변위는 다음 과정을 통해 근사적으로 유도한다. 유연보의 L_a 미소 길이의 변화(ds)는 유연보 기울기(dy/dx)를 이용하여 표현할 수 있고 테일러 (Taylor) 전개를 이용하여 2 차식으로 근사된다. 근사식을 유연보 길이에 대해 적분하면 수평변위를 얻을 수 있고, 나아가 기구적 변위를 L_a 지점에서의 수직 및 각도 변형에 연관된 행렬식(3)으로 유도할 수 있다 [6, 7].

$$\delta_x^k = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} \delta_y & \delta_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_y \\ \delta_\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

3. 제진기 모델

Fig.1의 제진기의 모델을 Fig.3(a)와 같이 단순화하여 모델링을 할 수 있고 이것의 지배방정식은 식 (4)와 같다. 이 제진기 모델을 simulink로 Fig.3(b)와 같이 수평변위에 따른 변형된 스프링의 변화를 되먹임을 이용하여 모델링하였다.

$$m y'' + c y' + (k_f(P, \delta_x) + k_s) y = A(t) \quad (4)$$

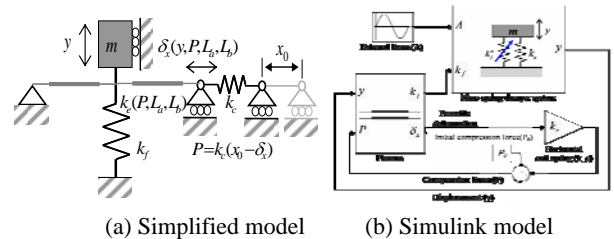


Fig. 3 Dynamic model of the isolator

4. 제진기 실험장치 구성

실험에 사용된 제진기의 사양들은 Table.1 과 같다.

Table 1 Specifications of the isolator for experiment

Parameters	Values
Flexure width (b)	$1.896 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Damping ratio (ζ)	0.0028
Young's modulus (E)	$2 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$
Flexure thickness (h)	$5.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
Horizontal coil spring(k_c)	$3.70 \cdot 10^5 \text{ N/m}$
Vertical coil spring (k_s)	$1.02 \cdot 10^2 \text{ N/m}$
The notched part of the flexure (L_a)	$1.25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Thick part of the flexure(L_b)	$7.66 \cdot 10^{-2} \text{ m}$
Mass (m)	17.91 kg
Total number of flexure (n)	8
Number of flexure in one side (s)	4

Fig.4 와 같이 수평변위는 레이저 센서(Sensor1, Keyence)로, 압축력은 로드셀(Sensor2, CAS)로, 그리고 수직변위는 레이저 센서(Sensor3, Keyence)로 동시에 측정하였다.

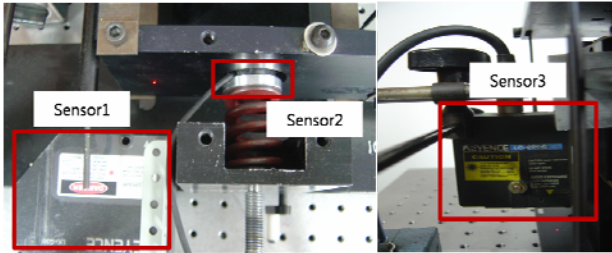


Fig. 4 Sensors for experiment

5. 실험을 통한 제진기의 모델 검증

일정한 압축력을 부가한 후 수직 하중을 증가시켜 발생하는 수직 변위를 측정하여 제진기의 정적 강성을 계산하였고, Fig.5(a)에 나타내었다. 전체강성은 수직방향 스프링과 유연보의 강성의 합으로 표현되어, 수직 방향 스프링 강성을 제거하면 유연보의 강성을 구할 수 있다. 강성은 이론과 약 98% 일치한다. Fig.5(b)는 수직 변위에 따른 수평 변위를 측정한 것으로 압축력에 따라 편차는 있지만 10%이내로 이론 값과 일치한다.

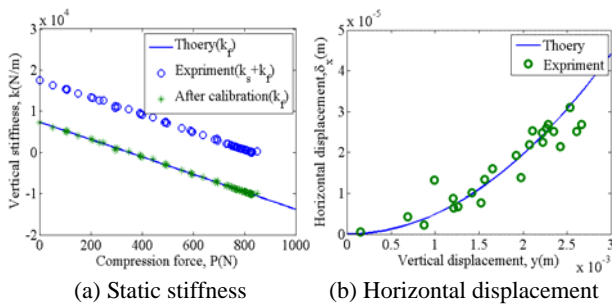


Fig. 5 Experimental verification of the flexure model

유연보의 초기 압축력(500N)을 부가하고 초기 수직 변위(0.0024m)에 따른 제진기 자유 진동의 수직 및 수평 변위를 측정하여 Fig.6 과 7 에 나타내었다. 수평 변위의 측정시에 제진기의 앞과 뒤 고정 지지대에서 변형이 발생하여 이를 고려한 모의시험을 수행하였다. 모의 시험 결과는 수직 변위에서 약 95%, 수평 변위는 약 85% 일치하였다.

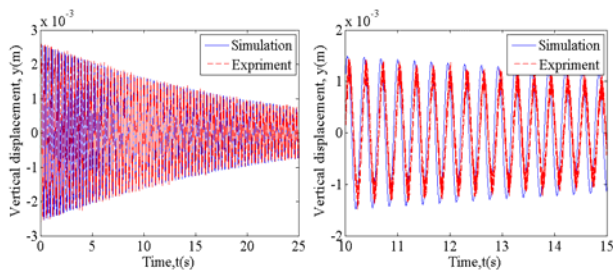


Fig.6 Vertical displacement (m=17.91kg)

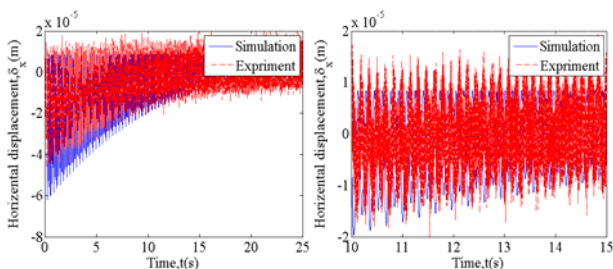


Fig.7 Horizontal displacement (m=17.91kg)

평형점의 변화에 따른 수직 및 수평 변위를 살펴 보기 위해 추가 질량(0.22kg)를 부가한 후 초기 수직변위를 0.0028m로 하여 자유 진동 실험과 모의시험을 수행하여 수직 및 수평변위를 각각 Fig.8 과 9 에 나타내었다. 평형점의 변화로 수직변위의 변화는 미미하지만 수평변위는 두 개의 최대 값을 가지며 진동한다. Fig. 8 과 9 에서와 같이 실험이 모의 시험과 잘 일치함을 알 수 있다.

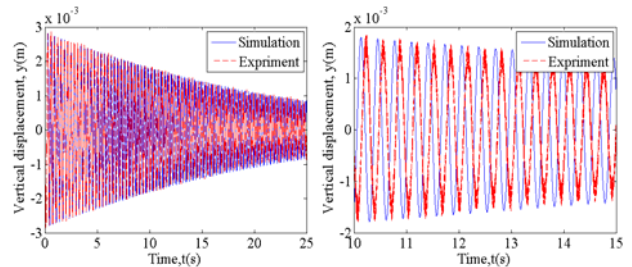


Fig.8 Vertical displacement (m=18.13kg)

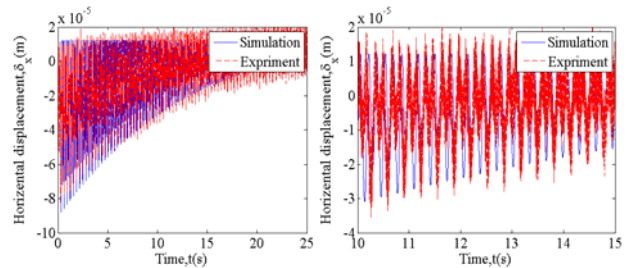


Fig.9 Horizontal displacement (m=18.13kg)

6. 결론

본 연구에서는 준영강성 제진기의 비선형 진동 방정식을 유도하고 모의시험 모델을 수립하였으며, Manus-K 사의 수직방향 제진기를 이용하여 비선형 모델을 실험적으로 검증하였다. 유연보의 비선형 모델을 유도하여 준영강성 제진기의 비선형 모델을 수립하였고 실험을 통해 검증하였다. 마지막으로 전체 준영강성 제진기의 비선형 진동 모델을 수립하여 모의시험하고 이를 실험과 비교 및 검증하였다. 실험 결과 수직 변위는 95%이내, 수평 변위는 85%이내의 일치성을 보였다. 수립된 비선형 모델은 준영강성 제진기의 최적 설계 및 진동 제어에 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Platus, D.L. 1993, "Smoothing out bad vibes," Machine design, Feb. 26, p. 123-130.
2. Platus, D.L. 1999, "Negative-stiffness-mechanism vibration isolation systems," SPIE conference on Current Developments for Optomechanical systems, Denver, Colorado, USA. SPIE Vol. 3786.
3. Minus-k Technology, 420 S. Hindry Ave., Unit E Inglewood, CA 90301, <http://www.minusk.com/>
4. 장지욱, 안형준, 한동철, 2006, "수동 영강성 기구 제진기의 최적설계", 기계학회 춘계학술대회
5. 장지욱, 2007, "능동 제어형 초저주파 제진기의 설계 및 제어에 관한 연구", 박사학위 논문, 서울대학교 기계항공공학부
6. Shorya Awtar, 2004, "Synthesis and Analysis of Parallel Kinematic XY Flexure Mechanisms", Ph.D. thesis, MIT, USA
7. 김경홍, 안형준, 2007, "수직방향 수동 영강성 제진기의 비선형진동 특성", 소음진동학회 추계학술대회