

유연보를 이용한 준영강성 제진기의 유연보 최적 설계 Flexure optimal design for quasi-zero stiffness isolator using flexure

김경록^{1,*}, 안형준^{2,*}, 유요한¹

K. R. Kim^{1,*}, H. J. Ahn(ahj123@ssu.ac.kr)^{2,*}, Y.H.You¹
¹승실대학교 대학원 기계공학과, ²승실대학교 기계공학과

Key words : Quasi-zero stiffness, Isolator, Flexure, Optimal design

1. 서론

최근 첨단 산업들이 발달함에 따라 집적회로와 같은 제품의 생산기술에 높은 정밀도가 요구됨에 따라 생산현장에서 미진동의 허용한계가 다른 분야에 비해 대단히 엄격해지고 있다.

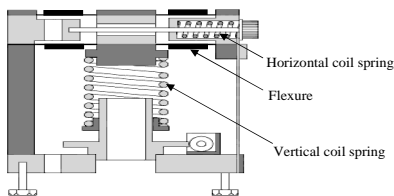
공압 제진기가 많이 사용되고 있지만 압축공기의 필요성과 고유진동수가 3 Hz 이상이기 때문에 고정밀 생산 장비에 적용함에 있어서 한계가 있다. 이러한 공압 제진기의 한계를 극복하고자 최근 몇몇의 준영강성 제진기가 개발되고 있다.^[1-3]

지난 연구에서 유연보를 이용한 준영강성 제진기의 능동제진을 위해 유연보를 무차원화 하여 준영강성 제진기의 제어 모델을 수립하였고 유연보 형상에 따라 제진 성능이 결정됨을 보였다.^[4]

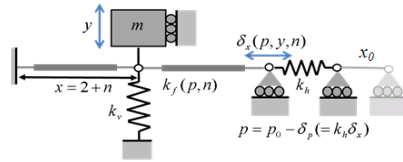
본 연구에서는 유연보를 이용한 준영강성제진기의 공학 모델을 바탕으로 수직 스프링 강성과 유연보 좌굴 조건을 고려한 최적 설계를 수행한다.

2. 유연보를 이용한 준영강성 제진기의 근사 공학 모델

유연보 이용 준영강성 제진기는 Fig.1(a)와 같이 수직 코일스프링과 유연보로 구성되어 있으며 그 개략도는 Fig.1(b)와 같이 나타낼 수 있다. 유연보에 작용하는 수평 스프링의 압축력이 증가함에 따라 수직 방향의 강성이 낮아져 1Hz 이하의 고유 진동수를 갖게 되며 매우 정밀한 수준으로 제진이 가능하다.



(a) Mechanism



(b) Schematic

Fig.1 The vertical QZS isolator using flexures

선행연구에서 준영강성 제진기의 운동 방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.^[4]

$$m\ddot{y} + cy + T_1y + T_2y^3 = w(t) \quad (1)$$

Here,

$$T_1 = k_v + gA_1 - \frac{gA_2k_hx_0}{s}, \quad T_2 = \frac{gA_3A_2k_h}{s},$$

$$A_1 = \frac{6}{3n^2 + 6n + 4}, \quad A_2 = \frac{3n + 2}{(3n^2 + 6n + 4)} + \frac{8}{5(3n^2 + 6n + 4)^2}$$

$$A_3 = \frac{3n + 2}{2(3n^2 + 6n + 4)} + \frac{4}{5(3n^2 + 6n + 4)^2}$$

3. 유연보 최적 설계

Fig.1(a)의 유연보 해석을 위하여 Table.1의 값들을 사용하였다. L_a 는 유연보의 유연부분길이이며, b 는 유연보의 무차원 폭, EI 는 유연보의 탄성계수와 유연부분의 면적관성모멘트의 곱, h 는 유연보의 무차원 두께, g 는 설치된 유연보의 총 수, s 는 한 면에 설치된 유연보의 수, k_v 와 k_h 는 각각 수직스프링과 수평스프링의 무차원 강성 값이다.

Table.1 Parameters for notched flexure

Parameter	Value	Parameter	Value
L_a (m)	0.0126	b	1.5079
EI (Nm ²)	0.0396	h	0.0397
g	8	s	4
k_v	0.4897	k_h	17.408

유연보의 2차 좌굴 모드는 $p_{cr,2} = \pi^2$ 에서 발생한다.^[5] 여기에 안전계수를 적용하여 2차 좌굴 모드가 발생하지 않는 범위의 압축력을 사용해야 한다.

준영강성 특성을 띠려면(선형 강성이 0이 되려면) 식(1)의 T_1 항이 0이 되어야 한다. 따라서 식(2)와 같이 준영강성이 되기 위해 필요한 압축력을 A_1 과 A_2 의 식, 즉 유연보 형상계수(n)의 함수로 표현 가능하다. 식(3)은 2차 좌굴력에 안전계수(γ)가 곱해진 한계 압축력(p_L)이다.

$$p_B = \frac{k_n x_0}{s} = \frac{k_v + gA_1}{gA_2} \quad (2)$$

$$p_L = \gamma \pi^2 \quad (3)$$

Fig.2에 수직 스프링 강성 (k_v)와 유연보 형상계수(n)에 따른 준영강성이 되는 최소 압축력 p_B 을 나타내었다. 수직 스프링 강성이 증가할수록 준영강성이 되기 위해 필요한 최소 압축력은 증가하지만 그 때의 유연보 형상비는 감소한다. 또한, Fig.2를 통해 압축력에 의해 유연보의 좌굴이 발생하지 않는 범위(Limit of comp. force 선의 아래 부분)에서 준영강성이 발생하는 최대 수직 스프링 강성과 그 때 유연보의 최적 형상비를 결정할 수 있다.

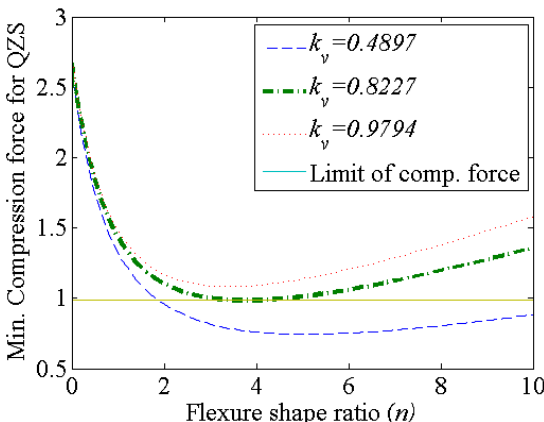


Fig.2 Min. Compression forces with various flexure shape ratios

유연보를 이용한 준영강성 제진기의 최적 설계 과정을 Fig.3에 정리하였다. 첫 번째로 유연보 2차 좌굴모드 안전계수를 결정한다. 이 값에 의해 수직 스프링의 무차원 최대 강성과 유연보의 최적 형상 계수가 결정된다. 유연보의 단면형상, 재질 및 유연보의 길이 등은 제진기의 작동 범위와 제진기의 전체 크기를 고려하여 결정하면 유연보 형상과 수직 스프링 유차원 강성을 결정할 수 있다.

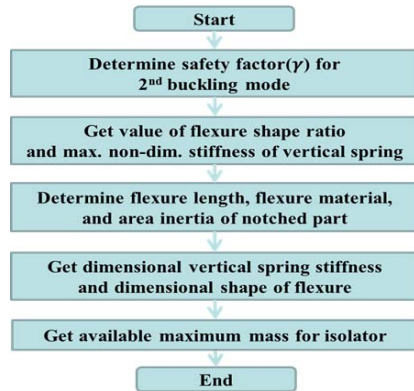


Fig.3 Optimal design procedure

4. 결론

본 논문에서는 유연보를 이용한 준영강성 제진기의 최적 설계 과정을 개발하였다. 설계자가 유연보의 좌굴 안전계수를 설정하면 그에 따른 최대 수직 스프링 강성과 유연보의 최적 형상 계수가 결정된다. 이후 제진기 작동 범위와 크기를 고려해 유연보의 단면형상, 재질 그리고 전체 길이를 설계하고 수직 스프링의 강성을 결정한다.

후기

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업(NIPA-2012-C6 150-1101-0004)과 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업 (No. 00044211)의 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

1. Platus, D.L. 1993, "Smoothing out bad vibes," Machine design, Feb. 26, p. 123-130.
2. Minus-k Technology, 420 S. Hindry Ave., Unit E Inglewood, CA 90301, <http://www.minusk.com/>
3. Mizuno, T., Toumiya, T. and Takasaki, M., 2003, "Vibration isolation system using negative stiffness," JSME international Journal, series C, Vo. 46, No. 3, pp. 807-812.
4. 김경록, 팜반트롱, 윤근위, 이명기, 안형준, 이원, "유연보를 이용한 준영강성 제진기의 제어모델", 대한기계학회 동역학 및 제어부분 춘계학술대회 논문집, 2011.
5. Chang, J. U., "Study on an active sub-hertz vibration isolator design and control", Ph.D. thesis, Seoul national university, 2007.