

수직방향 수동 영강성 제진기의 비선형 진동 특성

Nonlinear vibration characteristics of a vertical passive zero stiffness isolator

김경홍† · 안형준*

Kyung-Hong Kim and Hyeong-Joon Ahn

Key Words : Passive vibration isolator (수동 제진기), Nonlinear vibration (비선형 진동), zero stiffness (영강성)

ABSTRACT

This paper presents nonlinear vibration characteristics of a vertical passive zero stiffness isolator. The passive isolator can achieve zero stiffness through buckling of notched flexure caused by a compressive force. First, a simulation model of the isolator was built based on elastic beam theory. As increasing the compression force, time and frequency responses of the isolator were simulated. In addition, further nonlinear vibration characteristics were investigated through a bifurcation diagram and a Poincare's map, which shows that even chaotic vibration could happen. The simulations show that as the compressive force increases, the stiffness goes close to zero and the nonlinear characteristic becomes stronger to have a great effect on the isolation performance.

기호설명

| | |
|-------------|--------------------------|
| A | 외력(N) |
| a | 유연보의 선형 강성 상수 |
| b | 유연보의 너비(m) |
| c | 감쇠 계수(kg/s) |
| D | 기생변형의 분모인자 |
| E | 탄성계수(N/m^2) |
| F | 유연보에 작용하는 수직력 (N) |
| h | 유연보 홈 부분의 두께(m) |
| I | 면적 모멘트(m^4) |
| k_c | 수평방향 코일 스프링의 강성(N/m) |
| k_f | 유연보의 비선형 강성(N/m) |
| k_f^l | 유연보의 근사 선형 강성(N/m) |
| k_s | 수직방향 코일 스프링의 강성(N/m) |
| L_a | 유연보의 홈 있는 부분의 길이(m) |
| L_b | 유연보의 홈 없는 부분의 길이(m) |
| m | 질량(kg) |
| M | 모멘트(Nm) |
| n | 유연보의 전체 개수 |
| P | 압축력(N) |
| r | 유연보 기생 변형의 행렬인자 |
| s | 한 쪽 유연보의 개수 |
| w | 외력의 가진 주파수(Hz) |
| X | 무차원화 된 유연보의 길이 |
| x_0 | 수평방향 스프링의 초기 변위(m) |
| y | 수직방향의 변위(m) |
| y_{Total} | 전체 유연보의 수직방향 변형(m) |
| dy/dx | 유연보의 기울기 |

| | |
|------------------|----------------------------|
| δ_x | 유연보의 비선형식 기생변형(m) |
| δ_x^e | 압축력에 의한 유연보 홈 부분 변형(m) |
| δ_x^k | 유연보 홈 부분의 기구학적 변형(m) |
| δ_x^l | 유연보의 선형 기생 변형(m) |
| $\delta_x^{L_a}$ | 유연보 홈 부분의 수평방향 변위(m) |
| δ_y | 유연보 홈 부분의 수평방향 변위(m) |
| δ_θ | 유연보 홈 부분의 각변위 ($radian$) |
| λ | 압축력과 유연보 특성의 무차원수 |
| η | 유연보 홈 없는 부분과 홈 있는 부분 비율 |

*Super scription: 'l' 선형화된 식

1. 서론

최근 반도체 산업등과 같은 첨단 산업들이 발달함에 따라 집적회로와 같은 제품이 고밀도화 되면서 생산기술의 높은 정밀도가 요구된다. 이에 따라 미진동의 허용 한계는 다른 분야에 비해 대단히 엄격해지고 있다. 따라서 생산 현장의 면진 설계가 일반화 되어 있지만 민감한 곳에는 국부적으로 제진기가 사용되고 있다.

공압 제진기가 일반 산업 현장에서 많이 사용되고 있지만 압축 공기의 공급 필요성과 3 Hz 이상의 고유진동수 때문에 고정밀 생산 장비에 적용한계를 가지고 있다. 이러한 공압 제진기의 한계를 극복하고자 최근 몇몇 방식의 영강성 제진기가 개발되고 있다 [1-6]. 그 중에서 본 연구의 대상인 음강성 제진기는 Fig. 1 과 같이 코일 스프링과 유연보로 구성되어 있다. 유연보에 작용하는 압축력이 증가함에 따라 수직방향 강성이 낮아져 제진기의 고유 진동수를 낮출 수 있다. 특히, 음강성 제진기는 1 Hz 이하의 고유진동수를 가지기

† 김경홍; 숭실대학교 기계공학과
E-mail : blue3angel@hanmail.net
Tel : (02) 817-0654, Fax : (02) 820-0668
* 숭실대학교 기계공학과

때문에 공압 제진기보다 제진 성능이 우수하다.

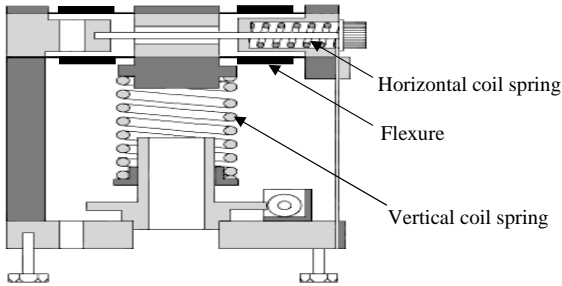


Fig. 1 The vertical isolator using a zero stiffness mechanism

음강성 제진기는 압축력이 증가함에 따라 비선형 진동 특성을 가지는 데 현재까지 선형 해석만 수행하여 그 특성을 정확히 예측하지 못했다. 따라서 정확한 제진기의 성능 해석을 위해 비선형 모델의 유도과 비선형 진동 해석이 필요하다.

본 논문에서는 모의 시험을 통해 수직방향 수동 영강성 제진기의 비선형 진동 특성을 해석하였다. 우선 탄성이론에 의한 유연보의 엄밀한 해석을 통해 음강성을 이용한 수직방향 수동 제진기의 비선형 모델을 유도했고 모의 시험을 수행하기 위한 Simulink 모델을 구성하였다. 또한 수직방향 수동 제진기의 시간 및 주파수 응답을 통해 제진기의 비선형 진동 특성을 살펴 보았고, 분기선도 및 Poincare's map 을 통해 제진기의 성능 한계를 확인하였다.

2. 수직 방향 제진기 모델

2.1 유연보의 비선형 모델

(1) 유연보의 비선형 강성

Fig.1 의 수직 방향 제진기의 핵심 요소인 유연보의 엄밀한 모델을 탄성 이론을 이용하여 유도한다. Fig. 2 와 같이 대칭하중을 유연보는 수직 방향(y_{Total})과 수평방향(δ_x)으로 변형한다, 우선 수직 방향 변형을 구하기 위해 L_b 부분의 변형이 없는 강체로 가정하면 유연보 L_a 부분의 지배방정식은 전체 유연보의 모멘트와 전단력 평형 조건을 이용하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 여기에 끝단 및 대칭 경계 조건을 적용하면 전체의 변형을 식 (2)와 같이 구할 수 있고, 유연보 가해진 힘과 변위 관계로부터 유연보 전체의 강성을 식 (3)과 같이 유도할 수 있다 [7-9].

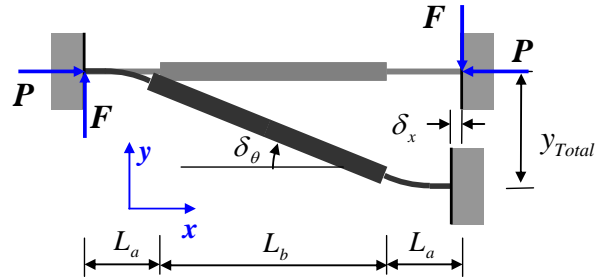


Fig. 2 The notched flexure

$$\frac{dy^4}{dx^4} + \frac{P}{EI} \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = 0 \quad (1)$$

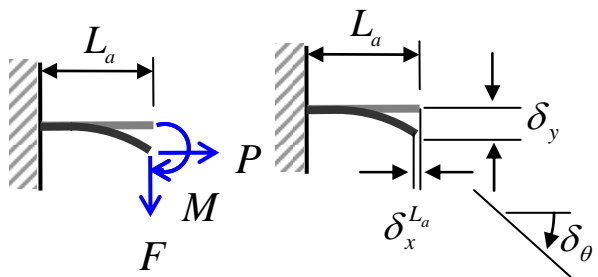
$$y_{Total} = \frac{F}{P} \frac{4L_a \cos \lambda - \left((2L_a + L_b)\eta + 4 \frac{L_a}{\lambda} \right) \sin \lambda}{\eta(\sin \lambda - 2 \cos \lambda)} \quad (2)$$

$$k_f = \frac{F}{y_{Total}} = \frac{P\eta(\sin \lambda - 2 \cos \lambda)}{4L_a \cos \lambda - \left((2L_a + L_b)\eta + 4 \frac{L_a}{\lambda} \right) \sin \lambda} \quad (3)$$

Here, $\lambda = \sqrt{\frac{P}{EI}} L_a$, $X = \frac{x}{L_a}$, $\eta = \frac{L_b}{L_a}$

(2) 유연보의 비선형 기생 변형

L_a 부분 유연보의 자유물체도는 Fig.3(a)와 같으며, 수직력, 압축력 및 모멘트로 인해 Fig. 3(b)와 같은 변형이 발생한다. L_a 부분의 기생 변형은 압축력에 인한 변형(δ_x^e)과 기구적인 변형(δ_x^k)의 합으로 아래 식(4)와 같이 표현할 수 있다.



(a) F.B.D. (b) Deformation

Fig. 3 Notched part of the flexure

$$\delta_x^{L_a} = \delta_x^k + \delta_x^e \quad (4)$$

Here, $\delta_x^e = \frac{P L_a}{b h E}$

유연보의 기구적 변형은 아래와 같은 일련 과정을 거쳐 근사적으로 유도한다. 유연보의 L_a 미소 길이의 변화(ds)는 유연보 기울기(dy/dx)를 이용하여 표현할 수 있고 이는 다시 테일러 (Taylor) 전개를 이용하여 식 (5)와 같이 근사된다. 식 (5)을 변형된 유연보에 대해 적분하면 식 (6)과 같고, 이 적분 결과를 이용하여 기구적 기생 변형을 식(7)과 같이 구할 수 있다. 나아가 기구적 변형을 L_a 지점에서의 수직 및 각도 변형에 연관된 행렬식으로 식 (8)과 같이 유도할 수 있다 [10].

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \cong \left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right) dx \quad (5)$$

$$\int_0^{L_a + \delta_x^e} ds = \int_0^{L_a + \delta_x^{La}} \left(1 + \frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right) dx \quad (6)$$

$$L_a + \delta_x^e = (L_a + \delta_x^{La}) + \int_0^{L_a + \delta_x^e} \frac{1}{2}\left(\frac{dy}{dx}\right)^2 dx \quad (7)$$

$$\delta_x^k = \frac{1}{D} [\delta_y \quad \delta_\theta] \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_y \\ \delta_\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

Here, $D = 2 \frac{\lambda}{L_a} (2 - 2 \cos \lambda - \lambda \sin \lambda)^2$

$$r_{11} = (2 \frac{\lambda}{L_a} \sin(\frac{\lambda}{2}))^2 (2\lambda + \lambda \cos \lambda - 3 \sin \lambda)$$

$$r_{12} = r_{21} = 2 \frac{\lambda}{L_a} \sin^2(\frac{\lambda}{2}) (4 - \lambda^2 - 4 \cos \lambda - \lambda \sin \lambda)$$

$$r_{22} = \lambda^3 + 2\lambda(\cos \lambda - \cos 2\lambda) - 2(1 + \lambda^2) \sin \lambda + (1 - \frac{\lambda^2}{2}) \sin 2\lambda$$

L_b 부분의 변형을 무시하면 L_a 부분의 전체 기생 변형과 끝단 각도를 이용한 L_b 부분 변위의 합으로 전체 유연보의 기생 변형을 식(9)와 같이 구할 수 있다.

$$\delta_x = 2\delta_x^{La} + L_b(1 - \cos \delta_\theta) \quad (9)$$

2.2 전체 비선형 모델

앞에서 구한 비선형 강성과 기생 변형을 이용하여 Fig. 1의 수직 방향 체진기의 개념도를 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

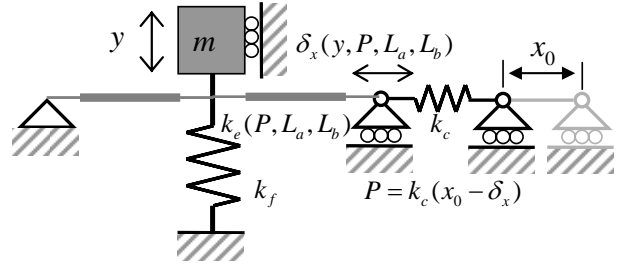


Fig. 4 Schematic of the vertical isolator

압축력은 수평 방향 코일 스프링의 초기 변형(x_0)으로 발생 시키는데 유연보의 기생 변형에 의해 식 (10)과 같이 감소한다.

$$P = k_c(x_0 - \delta_x) \quad (10)$$

개념도에 유연보의 강성식 (3)을 대입하여 수직방향 체진기의 지배 방정식을 구하면 식 (11)와 같다.

$$my'' + cy' + (k_f(P, \delta_x) + k_s)y = A(t) \quad (11)$$

위의 지배 방정식의 모의 시험을 수행하기 위해 구성된 Matlab simulink 모델의 블록 선도는 Fig. 5와 같다. 수평 방향 스프링의 초기 변형에서 구한 압축력과 유연보의 비선형 모델을 이용하여 유연보의 강성과 기생 변형을 구한다. 유연보의 강성은 질량-스프링-댐퍼 시스템의 수직 방향 스프링과 함께 외력에 의한 수직 방향 응답을 결정하고, 기생 변형은 수평 방향 스프링의 초기 변형을 줄여 압축력을 변화시킨다. 결정된 수직 방향 변위와 변화된 압축력에 의하여 다시 유연보의 강성과 기생 변형을 구하는 과정을 반복한다.

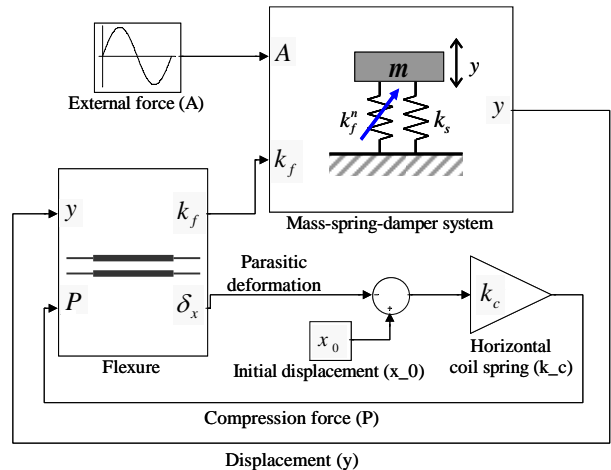


Fig. 5 The block diagram of the simulation model

모의 시험에 사용한 변수들의 값을 Table 1 에 정리하였다.

Table 1. Simulation parameters

| Parameters | Values |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| External force (A) | 0.01~0.05 $\sin(w)N$ |
| Flexure width (b) | 0.0185 m |
| Damping coefficient (c) | 3.5 kg/s |
| Young's modulus (E) | $2 \cdot 10^{11}$ N/m ² |
| Flexure thickness (h) | $3 \cdot 10^{-4}$ m |
| Horizontal coil spring(k_c) | $1 \cdot 10^5$ N/m |
| Vertical coil spring (k_s) | 12250 N/m |
| The notched part of the flexure (L_a) | $1.25 \cdot 10^{-2}$ m |
| Thick part of the flexure(L_b) | $7.6 \cdot 10^{-2}$ m |
| Mass (m) | 23.54 kg |
| Total number of flexure (n) | 8 |
| Number of flexure in one side (s) | 4 |
| Excitation frequency (w) | 0 ~ 2.5Hz |
| Initial deformation of the horizontal coil spring (x_0) | $5 \cdot 10^{-3}$ ~ $6.6 \cdot 10^{-3}$ m |

2.3 선형 모델과 비교

(1) 비선형모델의 선형화

비선형 모델링에서 유연보의 강성식 (3)을 테일러(Taylor) 전개로 선형화하면 식 (12)와 같이 근사화된다.

$$k_f^l = a_1 - a_2 P \quad (12)$$

Here,
$$a_1 = \frac{EI}{\frac{2}{3}L_a^3 + L_a^2L_b + \frac{1}{2}L_aL_b^2}, a_2 = \frac{\frac{1}{3}L_a + \frac{1}{2}L_b}{\frac{2}{3}L_a^2 + L_aL_b + \frac{1}{2}L_b^2}$$

유연보 전체를 강체로 가정하면 유연보의 기생변형은 L_a 부분과 L_b 의 비율에 상관없이 유연보의 총 길이에만 지배된다. 따라서 유연보의 수평방향의 기생 변형은 피타고라스 정리에 의해 식(13)으로 근사할 수 있다.

$$(2L_a + L_b - \delta_x^l)^2 = (2L_a + L_b)^2 - y^2 \quad (13)$$

기생 변형의 크기가 미세하기 때문에 기생 변형의 거듭 제곱항을 작다고 가정하면 수평방향의 기생 변형은 식(14)이 근사화된다. 따라서 기생 변형은 압축력에 상관 없는 수직 변위의 함수가 된다 [9, 10].

$$\delta_x^l \cong \frac{y^2}{2(2L_a + L_b)} \quad (14)$$

압축력은 기생 변형에 의하여 변동하는 식(10)과 같으므로 유연보의 선형 기생 변형 (14)를 식 (10)에 대입하여 강성식을 수직변위 (y)의 함수로 식 (15)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_f^l = a_1 - a_2 k_c x_0 + \frac{k_c}{2(2L_a + L_b)} y^2 \quad (15)$$

위에서 구해진 식(15)를 식 (11)에 대입하여 제진기의 전체 지배방정식을 구하면 식 (16)과 같으며 이는 잘 알려진 Duffing 방정식의 형태를 가진다. 이 선형화된 지배 방정식을 통하여 비선형 모델이 대략적으로 어떠한 비선형 진동 특성을 가질 것인 예상할 수 있다.

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + (a_1 - a_2 k_c x_0 + k_s)y + \frac{k_c}{2(2L_a + L_b)} y^3 = A(t) \quad (16)$$

(2) 비선형 모델과 선형 모델의 비교

압축력에 따른 유연보의 비선형 강성 (3)과 선형 강성 (12)을 비교하여 Fig.6 에 나타내었다. 압축력이 작을 때는 거의 유사한 값을 갖지만 압축력이 증가함에 따라 그 차이가 커진다.

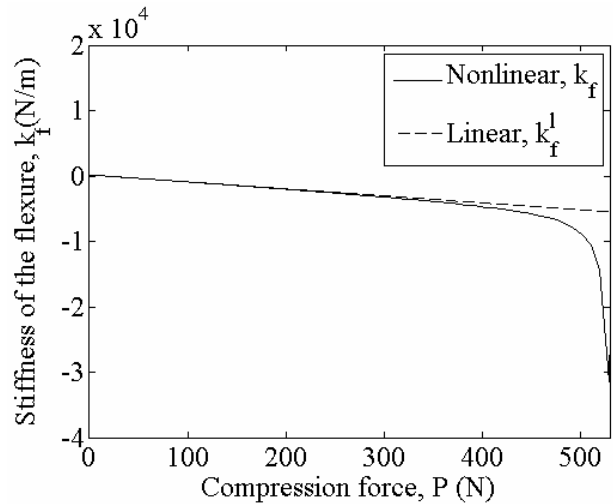


Fig. 6 Vertical stiffness of the flexure with the increase of the compression force

수평방향 압축력에 의한 비선형 기생 변형 (4)와 선형 기생 변형 (14)를 비교하여 Fig.7 에 나타내었다. 선형 기생 변형은 압축력에 상관없이 일정한 값을 가지지만, 비선형 기생 변형은 압축력에 따라 그 값이 크게 변한다. 특히 그 변화의 정도가 비선형 강성보다 훨씬 큼을 알 수 있다.

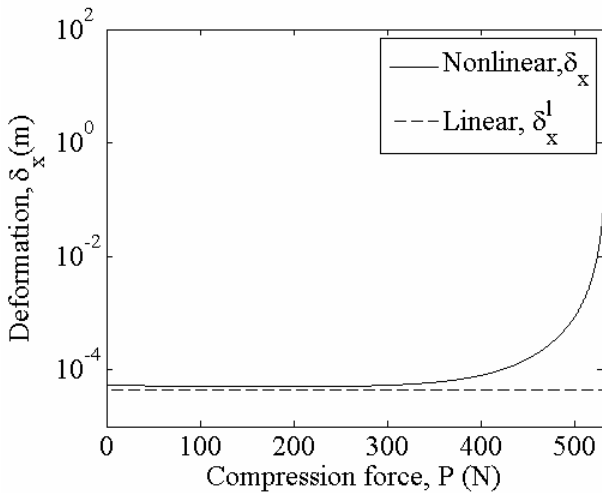


Fig. 7 Horizontal parasitic displacement with the increase of the compression force

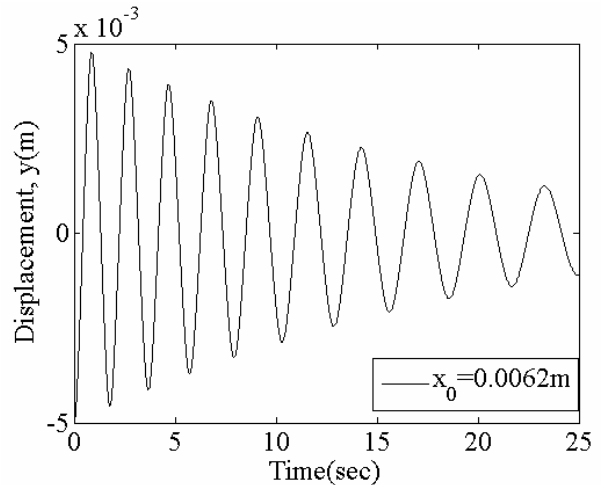
Fig.6 과 Fig.7 은 한 개의 유연보에 작용하는 압축력을 기준으로 나타내었고 500 N 이상의 동일한 압축력에서 강성과 변형이 급격하게 변화하는데 이 지점에서 유연보의 좌굴이 발생한다.

결과적으로 선형화된 강성과 기생변형은 압축력의 증가함에 따라 유연보 해석의 오차를 증가시킨다. 실제 제진기가 사용되는 영역은 상당한 압축력이 작용한 이후이므로 비선형 모델을 이용한 제진기의 진동을 해석하는 것이 필요하다.

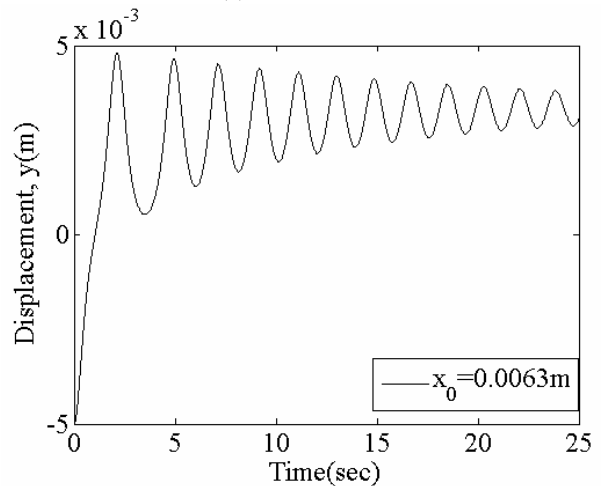
3. 수직 제진기의 모의 시험

3.1 시간 응답

유도된 모델을 이용해 시간 영역에서 제진기의 진동 특성을 파악하기 위해 초기의 수직방향 -0.005 m 변형에 의한 자유 진동 응답을 모의 시험하였다. 수평방향 스프링 초기 변위 (x_0)의 변화, 즉, 압축력의 변화에 따른 제진기의 자유 진동을 Fig. 8 에 나타내었다. 수평방향 스프링의 변위가 증가하면 제진기의 작용하는 압축력의 크기도 증가한다. 압축력의 크기에 따라 유연보의 강성이 결정되고 결국 제진기의 고유진동수도 결정된다. 강성이 양수이면 Fig. 8(a)와 같이 원점에서 오직 한 개의 평형점을 가지며 시간이 지남에 따라 진동의 크기가 줄어들고 비선형 강성의 영향으로 진동의 주기가 길어진다. 하지만 미소한 차이라도 강성이 음수가 되면 Fig. 8(b)와 같이 원점 이외의 평형점이 추가로 발생하고 비선형 강성의 영향으로 진동의 주기가 짧아진다. 특히, 진동의 응답이 평형점을 기준으로 수직 방향 변위에 따라 매우 다른 특성을 보이는데 이는 강성의 비선형 특성을 잘 보여 준다.



(a) Positive stiffness



(b) Negative stiffness

Fig. 8 Free vibration responses with initial deformations of the horizontal spring

3.2 주파수 응답

제진기의 주파수 응답을 파악하기 위해 0.05 N의 정현 함수 외력 (A)를 0~2 Hz 까지 0.02 Hz 씩 변화시키면서 주파수 응답을 모의 시험하였다. 수평 방향 스프링의 초기 변형을 증가에 따른 주파수 응답 변화를 Fig. 9 에 나타내었다. (천이변이 구간을 제거하기 위해서 총 300 초의 응답 중 150 초까지 응답을 제거하였고 응답의 샘플링 주기는 0.001 초로 하였다.) Fig. 9 에서와 같이 압축력의 증가에 따라 제진기의 고유진동수가 낮아지고 제진기의 효율이 증가한다. 압축력의 증가로 제진기의 강성이 0 에 가까워 질수록 주파수 응답이 비대칭 형상이 되는 비선형 진동 특성을 보인다. 또한 진동의 분기가 이루어져 수평 방향 스프링의 초기 변형이 0.0062 m 인 경우 고유진동수 이외에 작은 서브 하모닉 진동이 발생함을 확인할 수 있다.

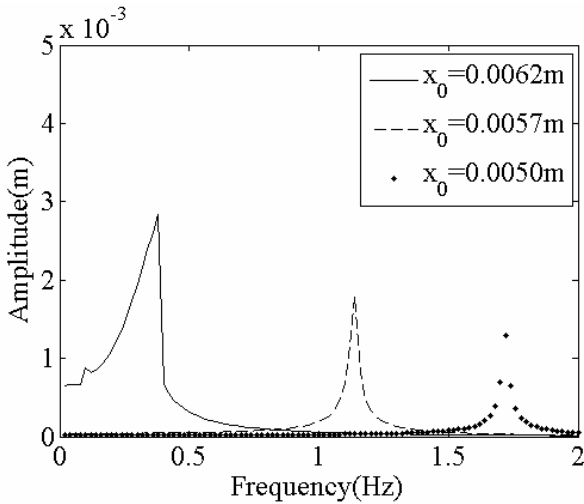


Fig. 9 Frequency responses with initial deformations of the horizontal spring

수평방향 스프링의 초기변위 (x_0)가 0.0062 m 인 지점에서 0.05 N 의 정현파 외력 주파수를 1000 초 동안 0 Hz에서 2.5 Hz까지 증가 및 감소시키면서 주파수 응답을 얻었다. 얻은 응답을 50 개 구간으로 나누고 각 구간의 진폭의 최대값을 Fig. 10 에 나타내었다. 주파수가 증가 및 감소할 때 그 응답의 특성이 현저하게 달라지는 전형적인 비선형성의 특징을 확인할 수 있다 [11].

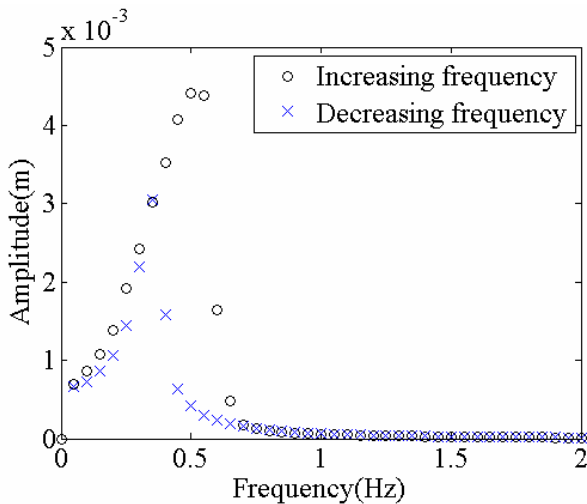


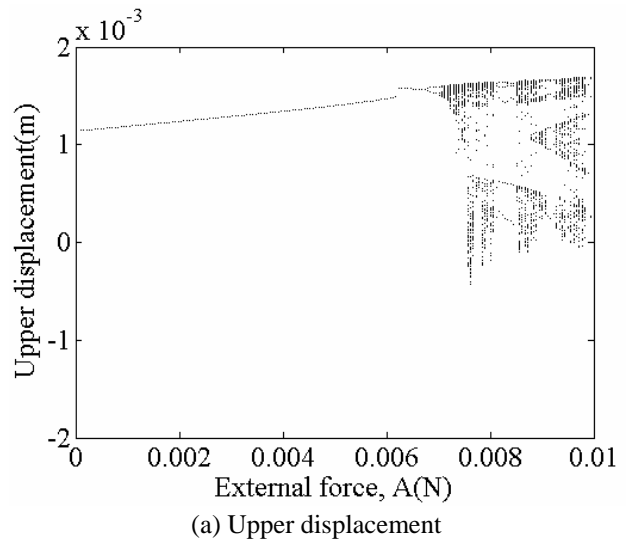
Fig. 10 Frequency responses with increasing and decreasing frequencies of the external force

4. 비선형 진동 특성

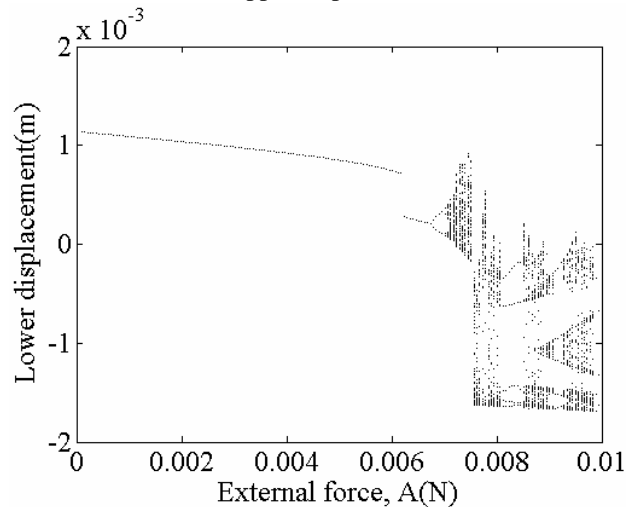
4.1 분기 선도

외력의 크기에 따른 응답 극점의 개수를 표시하여 진동 특성 변화를 나타낸 것이 분기선도이다. 전체 강성이 양에서 음으로 변하도록 수직 방향 스프링의 초기 변위 (x_0)를 0.00624 m 로 선정하

고, 0.5 rad/s 의 정현파 외력의 크기를 0~0.01N 까지 변화시키면서 1000 초 동안 모의 시험하여 응답의 극점들을 Fig. 11 에 나타내었다. 모의 시험 시간을 줄이기 위해 감쇠 계수를 10 kg/s 로 증가시켰고 천이변이 구간을 제거하기 위해서 측정시간의 10%인 100 초간의 응답을 제거하였다. 외력에 따른 응답의 극점이 한 개인 경우는 제진기가 외력의 주기로 진동함을 의미한다. 하지만 외력의 크기가 증가함에 따라 응답의 극점이 2 개 이상이 되는 분기가 발생한다. 즉, 외력의 주기 이외에 또 다른 주기가 합쳐진 합성 주기 진동이 발생한다. 나아가 외력의 크기가 더욱 증가하면 분기점의 개수가 무한히 많아지는 카오스 현상이 발생한다. 합성 주기 진동이나 카오스 현상이 발생하면 진동이 불규칙해지므로 제진기의 진동 예측이 어렵고 제진기의 효율이 크게 떨어진다.



(a) Upper displacement



(b) Lower displacement

Fig. 11 Bifurcation diagram of the vertical isolator

4.2 Poincare's map

Poincare's map 은 외력의 주기 배수 시간마다 진동의 변위와 속도를 얻어 위상 선도에 나타낸 것으로 진동 주기의 비선형성을 판단할 수 있다. 수직방향 스프링의 초기변위(x_0)가 0.00624 m 인 지점에서 0.01 N 크기의 정현파 외력을 0.5 rad/s 의 주기로 2000 주기 동안 가하면서 진동 응답을 모의 시험하였다. 응답의 샘플링 시간은 주기의 $1/500$ 이다. 감쇠 계수를 5 kg/s 로 조정하였고 천이변이 구간 제거를 위하여 0 초부터 주기의 300 배의 시간을 제거한 후 나머지 1700 주기 동안 측정된 데이터를 가지고 Poincare's map 을 Fig. 12 와 같이 작성했다. Poincare's map 이 한 점으로 나타나면 오직 외력의 주기로 진동하는 것을 뜻한다. 하지만 위의 모의 시험 조건과 같이 비선형성이 강해지면 진동의 불규칙적으로 발생하는 Poincare's map 이 Fig.12 와 같이 작성된다. 또한 불규칙 속에 규칙이 있는 현상 즉, 카오스의 현상을 보이게 된다. 카오스 현상이 나타나면 제진기의 진동은 예측하기가 어렵게 되고 제진 효율이 크게 떨어지게 된다 [11].

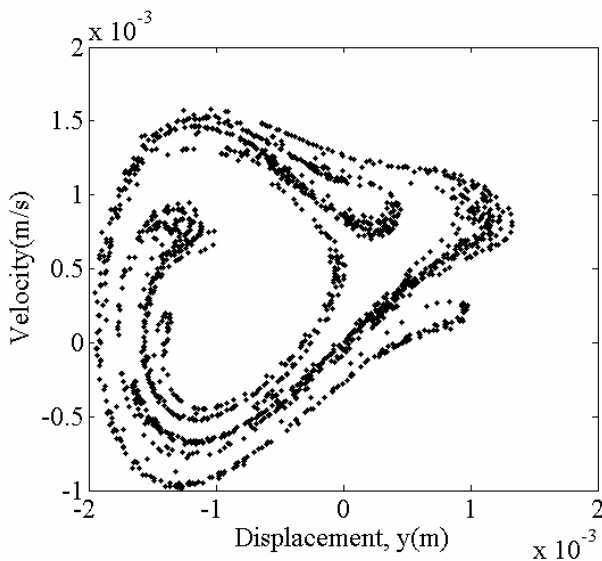


Fig. 12 Poincare's map of a chaotic vibration of the vertical isolator

5. 결론

본 논문에서는 수직방향 수동 영강성 제진기의 사용된 유연보의 비선형모델에 엄밀해를 구해 비선형 진동 특성을 모의 시험을 하였다. 유연보의 비선형 모델과 선형 근사식을 비교하여 제진기 해석에서 엄밀한 비선형 모델 유도의 필요성을 확인하였으며, 유도한 모델을 이용하여 수직방향 수동

제진기의 비선형 진동 특성을 시간 및 주파수 응답을 통해 확인하였다. 또한 카오스적 진동의 분기선도와 Poincare's map 을 통해 비선형 특성에 따른 수직방향 수동 제진기의 성능 한계를 확인하였다. 결론적으로 수직방향 수동 제진기의 강성이 음이 되는 부근에서 평형점이 바뀌고 카오스적 진동이 발생할 수 있다. 이로 인해 제진기의 진동 예측이 불가능해 지며 제진기의 효율을 크게 감소할 수 있음을 확인하였다.

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) 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.
- (5) Zhang, J., Li, D. and Dong, S., 2004, "An ultra-low frequency parallel connection nonlinear isolator for precision instruments," *Key Engineering Materials* 257-258, pp. 231-236.
- (6) Carrella, A., Brennan, M. J. and Waters, T. P., 2007, "Optimization of a Quasi-Zero-Stiffness Isolator," *Journal of Mechanical Science and Technology* Vol.21 No.6, pp. 946-949.
- (7) 장지욱, 안형준, 한동철, 2006, "수동 영강성 기구 제진기의 최적설계", *기계학회 춘계학술대회*
- (8) 장지욱, 2007, "능동 제어형 초저주파 제진기의 설계 및 제어에 관한 연구", *박사학위 논문*, 서울대학교 기계항공공학부
- (9) Stuart T. Smith, 2000, *Flexures (Elements of Elastic Mechanisms)*. Taylor & Francis, London, UK.
- (10) Shorya Awtar, 2004, "Synthesis and Analysis of Parallel Kinematic XY Flexure Mechanisms", Ph.D. thesis, MIT, USA
- (11) Andrea Sconza, Giacomo Torzo, 2005, "The torsion pendulum as a tool to study non-linear oscillations and the transition to deterministic chaos", *GIREP book of selected papers*, M. Michelini and S. Pugliese Ed., pp.148-166, Forum ISBN 88-8420-280-9