

가변 동흡진기 구축을 위한 예비 실험

Preparatory Experiment on the Construction of Tunable Dynamic Absorber

박종훈* · 한상보**

Jong-hoon Park, sangbo Han

ABSTRACT

Preliminary test for the design and construction of a tuned dynamic absorber is a conducted. Proposed tuned dynamic absorber is a cantilevered beam type, and is supposed to adjust its natural frequency according to the changing operation condition of the primary system. The modal mass of the dynamic absorber is the easiest to control, therefore, the position of the attached mass of the dynamic absorber is considered as the main design parameter of the absorber. The effect of the dynamic absorber is experimentally verified under various operation conditions of the primary system.

기호설명

- D = 확대계수
- M_b = 동흡진기로 사용된 외팔보의 유효 질량
- M_c = 주 구조물의 집중질량의 유효 질량
- K_{eff} = 동흡진기로 사용된 외팔보의 유효 강성
- f = 고유진동수 비
- g = 가진진동수 비
- m_1 = 주 구조물의 질량 (beam 질량 제외)
- m_2 = 동흡진기의 질량
- m_b = beam 질량
- m_c = 외팔보에 부착된 집중 질량
- x_0 = 집중질량의 위치 좌표
- ω = 주 구조물의 고유진동수
- ω_n = 동흡진기의 고유진동수
- μ = 질량비 = 동흡진기 질량/주 구조물의 질량
- ζ = 감쇠비
- $\phi(x)$ = 보의 진동형

1. 서론

기계 또는 진동계에 자신의 고유진동수와 거의 일치하는 주파수의 가진력이 작용한다면 과도한 진동이 발생하게 된다. 이와 같은 경우에 진동제어방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다⁽¹⁾. 그 중 능동진동제어는 구조물에 전달되는 진동에 대하여 180도의 위상을 가진 신호를 발생시켜 입력되는 진동을 상쇄시키는 방법이다. 이 제어방법은 뛰어난 성능을 가지지만 부가적인 에너지를 통해 시스템을 가진하기 때문에 제어가 되지 않을 경우는 부가적으로 가해지는 에너지로 인해서 시스템이 불안정해질 수 있다는 단점을 가진다.

반면 동흡진기 등을 이용하는 수동진동제어방법의 경우는 단순히 시스템 내부의 에너지를 외부로 배출해내기 때문에 안정한 시스템에 적용한 제어시스템도 불안해지지 않는다는 장점을 가진다⁽²⁾.

그러나 동흡진기의 효과는 진동제어 대상체의 공진 주파수와 같은 특정한 주파수대에서만 그 효과가 극대화된다는 단점이 있다⁽³⁾. 감쇠를 고려하지 않을 경우 진동 제어 대상체의 공진 주파수에서는 동흡진기의 효과가 아주 뛰어나지만 진동 제어 대상체의 작동 진동수가 조금만 벗어나면 오히려 부정적인 효과를 나타내게 된다. 비교적 넓은 범위의 작동 진동수에 대하여 효과적인 동흡진기를 부착하기 위해서는 진동제어 대상체의 질량에 비례한 동흡진기 자체의 질량, 동흡진기의 감쇠비 등에 대한 최적의 값을 선정하여야 한다⁽¹⁾.

본 논문에서는 주 구조물의 고유 진동수 변화 및 작동 진동수 변화에 대하여 효과적으로 작동하는 동흡진기를 제작하기 위하여 일차원 보 구조물에 집중 질량을 부착시키고

경남대학교 대학원 기계설계학과

* E-mail : jhpark3206@hotmail.com

Tel : (055) 241-1833, Fax : (055) 249-2617

** 경남대학교 기계자동화공학부

이 집중 질량의 위치 제어를 통하여 고유진동수를 변화시킬 수 있는 가변 동흡진기를 제작하여 그 특성을 파악하고 흡진 효과를 실험적으로 검증해 보았다.

2. 동흡진기의 진동 특성

2.1 동흡진기의 운동 방정식

감쇠가 없는 동흡진기를 사용하게 되면 구조물의 원래 공진점에서는 효과적으로 진폭이 감소되지만 동흡진기의 부착으로 인하여 또 다른 공진점 두 개가 발생하게 된다. 비교적 넓은 진동수 범위에 걸쳐 주 구조물의 정상상태 진폭을 감소시킬 필요가 있을 경우에는 감쇠가 있는 동흡진기를 사용하여야 하는데 감쇠를 고려한 동흡진기를 사용할 경우 주 구조물을 Fig. 1과 같은 이상적인 1자유도계 모형으로 가정하면 전체 시스템의 운동방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$m_1 \ddot{x}_1(t) + k_1 x_1(t) + k_2(x_1(t) - x_2(t)) + c_2(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0 \quad (2)$$

정상상태 해를 다음과 같이 가정하면

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t} \quad j = 1, 2$$

주 구조물의 정상상태 진폭 X_1 과 동흡진기의 정상상태 진폭 X_2 를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - 2\omega + ic_2\omega)}{C + E} \quad (3)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + i\omega c_2)}{k_2 - m_2\omega^2 + i\omega c_2} \quad (4)$$

여기서,

$$C = [(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2]$$

$$E = i\omega c_2(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)$$

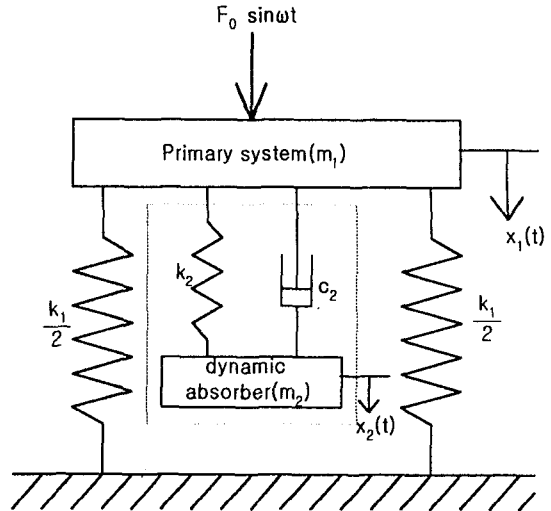


Fig.1 Model of damped dynamic absorber

따라서, 주 구조물의 응답에 대한 확대계수 D 는 다음과 같이 표현된다.

$$D = \frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{F + H} \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서,

$$H = (2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2$$

$$F = (\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2))^2$$

2.2 동흡진기가 부착된 계의 진동 특성

식 (5)는 진동수 변화에 따른 주 구조물의 확대계수를 나타내고 있는데, 이 확대 계수의 값은 주 구조물과 동흡진기의 질량비 μ , 주 구조물의 고유진동수에 대한 동흡진기의 고유 진동수의 비 f , 가진 진동수 비 g 의 함수로 주어진다. 최적의 동흡진기는 넓은 진동수 영역에 걸쳐 주 구조물의 확대 계수의 값이 낮은 값을 갖도록 설계되어야 한다.

Fig. 2는 $\mu = 0.01$ 인 경우에 대하여 감쇠비 변화에 대한 구조물의 확대계수를 나타낸 그림으로 이 그림에 의하면 감쇠비가 작을 경우에는 공진점에서의 흡진 효과가 뛰어나지만 흡진기가 부착된 전체 계의 고유 진동수에 의하여 공진점으로부터 5% 부근에 또 다른 공진점이 발생하는 것을 알 수 있다. 반면 감쇠값이 클 경우, 추가의 공진점은 발생하지 않으나 주 구조물의 공진점에서 흡진 효과가 그다지 크게 나타나지 않는다는 것을 보여 주고 있다.

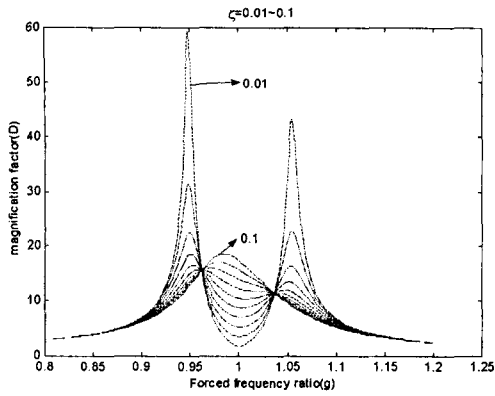


Fig. 2 Magnification factor of the primary system with various damping ratio for a fixed mass ratio of 0.01

따라서, 뛰어난 흡진효과를 얻기 위해서는 흡진기의 감쇠비가 낮을수록 유리하지만 작동주파수가 좁아진다는 단점이 있다.

주 구조물의 공진점 부근에서 비교적 뛰어난 흡진 효과를 얻게되는 $\zeta=0.01248$ 의 값에 대하여 주 구조물과 흡진기의 질량비 변화에 따른 흡진 효과를 알아본 것이 Fig.3에 주어져 있다. 이 결과에 의하면 주 구조물과 동흡진기의 질량비가 클수록 비교적 넓은 진동수 범위에 대하여 흡진 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 그러나 동흡진기의 기본 목적을 고려할 경우 동흡진기의 질량을 무척고 키운다는 것이 비현실적인 것임은 분명하므로 Fig. 2와 Fig. 3의 결과를 바탕으로 최적의 질량비와 감쇠비를 결정하여야 한다. 본 논문에서 시도하고자 하는 동흡진기는 주 구조물과 동흡진기의 질량비를 1/100으로 정하고 이에 따라 최적의 감쇠비를 결정하였다.

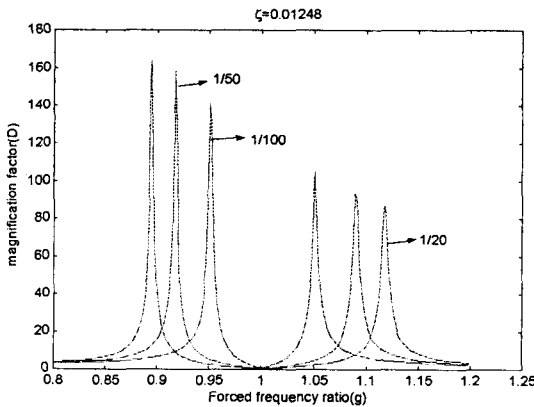


Fig.3 Magnification factor of the primary system with various mass ratio for a fixed damping ratio

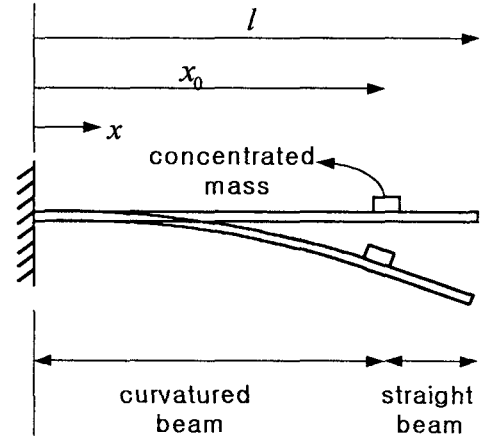


Fig. 4 Cantilever type dynamic absorber with movable concentrated mass

2.3 동흡진기의 고유 진동수 측정

본 논문에서 제작하고자 하는 동흡진기는 주 구조물의 고유진동수 변화 및 가진 진동수 변화에 대하여 효과적으로 작동하는 가변 동흡진기로 그 구조는 일차원 보 구조물에 집중 질량을 부착시키고 이 집중 질량의 위치 제어를 통하여 고유진동수를 조절할 수 있도록 고안된 것이다. Fig. 4는 본 연구에서 제안한 집중 질량을 가진 외팔보형 가변 동흡진기의 모형으로 집중 질량의 위치를 조절을 통하여 고유진동수를 변화시킬 수 있음을 보여 주고 있다.

외팔보의 임의 위치에 집중 질량과 회전 관성을 가진 보의 자유 진동에 대한 엄밀해는 Hamdan과 Dado⁽⁴⁾에 의해 구해진다. 본 논문에서는 근사 에너지법을 사용하여 집중 질량의 위치 변화에 따른 외팔보의 고유진동수를 구하고 이를 실험치와 비교 해보았다.

Fig. 4에 주어진 외팔보의 고유진동수는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\omega_n^2 = \sqrt{\frac{(k_{eff})}{(M_b + M_c)}} \quad (6)$$

여기서,

$$M_b = \rho A \int_0^{x_0} \phi^2(x) dx + \rho A \int_{x_0}^l (\phi'(x_0)(x-x_0))^2 dx$$

$$M_c = m_c \phi^2(x_0)$$

$$K_{eff} = EI \int_0^{x_0} \{\phi''(x)\}^2 dx$$

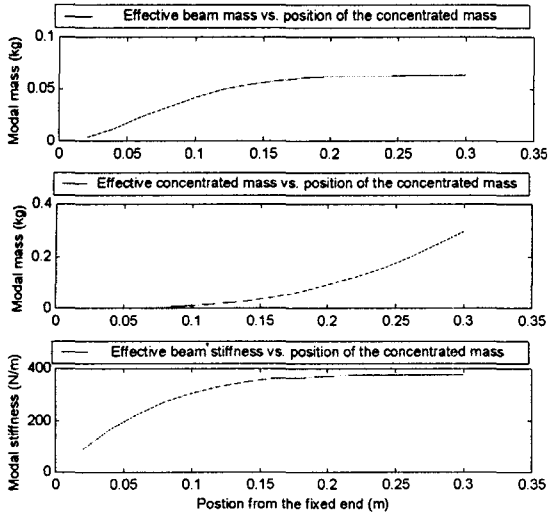


Fig. 5 Variation of effective mass of the beam, concentrated mass, and effective stiffness of the beam with respect to the position of the concentrated mass

으로 본 논문에서는 균일 외팔보의 진동형을 사용하였다.

Fig. 5는 집중 질량의 위치 변화에 따른 보의 유효 질량, 부착된 집중 질량의 유효 질량, 보의 유효강성 변화를 보여 주고 있는데, 집중 질량의 위치가 보의 좌단으로부터 보의 길이가 65% 이상 떨어질 경우 보 자체의 유효 질량과 보의 유효 강성은 거의 변화가 없으며 단지 집중 질량체의 유효 질량 만이 변화한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 동흡진기에 부착된 질량체의 위치 제어를 통하여 고유 진동수 조절 하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다.

Table 1 집중질량 위치에 따른 고유 진동수

질량 위치(m)	이론값(Hz)	실험값(Hz)
0.30	5.1321	5.000
0.28	5.5488	5.500
0.26	6.0276	6.000
0.24	6.5820	6.500
0.22	7.2053	7.000
0.20	7.9047	7.625
0.18	8.6768	8.250
0.16	9.5145	9.375
0.14	10.4103	10.00
0.12	11.3685	10.75

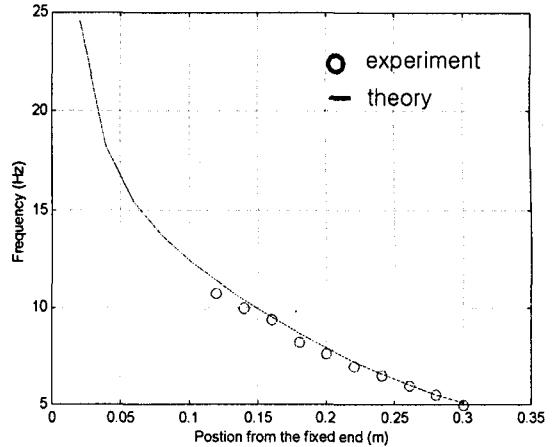


Fig. 6 Variation of the natural frequencies of the cantilever beam with respect to the position of the concentrated mass

Table 1과 Fig. 6는 집중 질량의 좌단으로부터의 위치 변화에 따른 외팔보의 고유진동수를 계산한 값과 실제 실험치와를 비교한 것으로, (6)식을 이용하여 집중 질량의 위치 변화에 따른 고유 진동수의 값을 정확하게 추정할 수 있음을 보여 주고 있다.

2.4 동흡진기의 감쇠비 측정

동흡진기로 사용되는 외팔보의 감쇠비는 본 실험에서 계획된 질량비 1/100에 대하여 최적의 값을 가질 수 있도록 선택되어야 하므로 여러 종류의 복합재료에 대한 실험을 수행

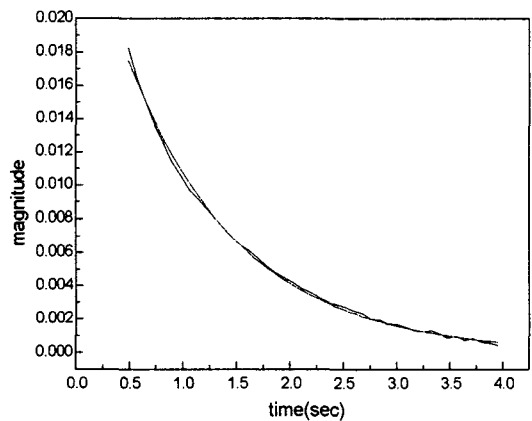


Fig. 7 Logarithmic decrement of the cantilever beam used for the dynamic absorber

하여 이론적으로 계산된 최적값에 가장 근접한 재질을 선택하였으며 실제 제작된 외팔보형 동흡진기의 실제 감쇠비는 Fig. 7과 같은 감쇠 자유진동 신호부터 파악된 대수감소율을 계산하여 얻을 수 있으며 이로부터 추정된 감쇠비 $\zeta=0.01248$ 이다.

3. 실험장치 및 방법

주 구조물은 양단 고정보의 중앙 부근에 불평형 질량을 가지고 작동하는 모터와 보정질량을 부착시켜 구성하였고 이 구조물 위에 집중질량을 가지는 외팔보를 동흡진기로 고정시켰다. 주 구조물과 동흡진기 역할로 사용되는 외팔보의 전체적인 개략과 실험 장치도는 Fig. 8과 같다.

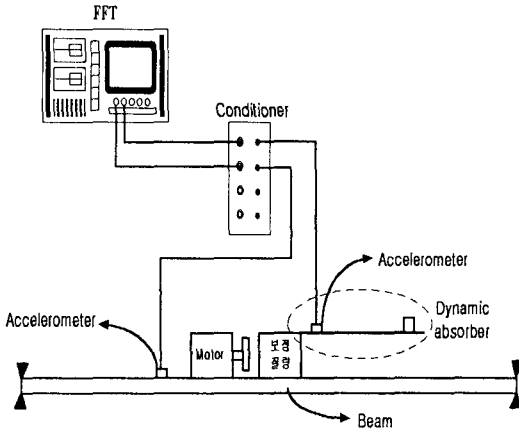


Fig. 8 Experimental set-up for the tuned dynamic absorber

Table. 2 주 구조물과 동흡진기의 재원

구 분	재 원
주 구조물	1230 X 32 X 6 (mm) 연강
모터질량	1.58 kg
보정질량	1.54 kg
동흡진기	300 X 30 X 2 (mm) 복합재료
편심질량	0.07 kg
이동 집중질량	0.04 kg
집중질량 이동거리	100 mm

Table 2는 본 연구에 사용되었던 주 구조물과 동흡진기의 재원이다.

4. 동흡진기의 효과 검증

Fig. 9는 불평형 질량을 가진 모터의 회전진동수를 주 구조물의 고유진동수와 같은 진동수로 작동시켰을 때 주 구조물의 정상상태 진동 가속도와 동흡진기의 고유진동수가 주 구조물의 고유진동수와 같도록 동조시켰을 경우의 진동 가속도를 비교한 그림이다. 동흡진기의 효과가 잘 나타나고 있음을 한 눈에 알 수 있다.

또한 Fig. 10은 주 구조물에 보정질량의 크기를 조절함으로써 고유진동수를 변화시킨 후 이렇게 변화된 고유진동수와 공진이 되도록 모터의 작동진동수를 조절하고 동시에 흡진기의 고유진동수를 주 구조물의 고유진동수와 일치하도록 동조시켰을 때의 정상상태 가속도 크기를 비교한 것이다. 이 경우 공진 진동수가 매우 낮고 따라서 불평형 질량에 의한 가진력이 Fig. 9의 경우에 비하여 10% 정도밖에 되지 않아 흡진기가 작동할 경우의 응답 가속도는 극히 미미한 것을 알 수 있었다. 다양한 주 구조물의 고유진동수 변화와 모터회전수의 변화에 대하여 제시된 가변 동흡진기는 주 구조물의 진동을 효과적으로 감소시킴을 알 수 있었다.

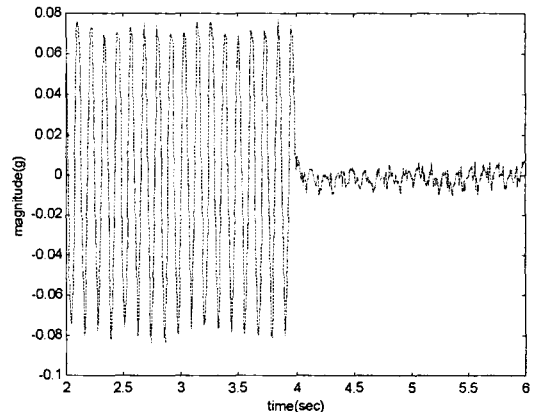


Fig. 9 Steady state response of the primary structure at operation condition I with and without dynamic absorber

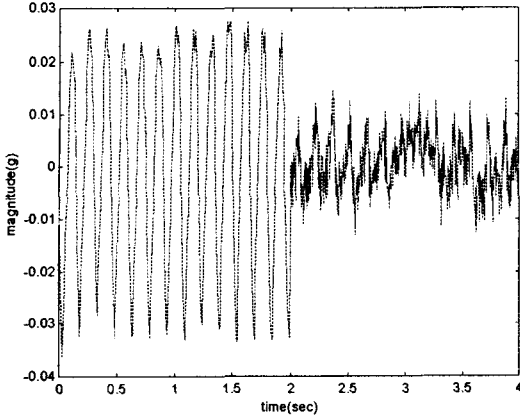


Fig. 10 Steady state response of the primary structure at operation condition II with and without dynamic absorber

5. 결론

본 연구에서는 주 구조물의 고유진동수의 변화와 가진 진동수 변화에 따라 최적의 흡진 효과를 구현할 수 있도록 자신의 고유진동수를 조절할 수 있는 동흡진기의 제작을 위한 사전 실험과 제시된 동흡진기의 흡진 효과를 알아보았다. 효율적인 흡진 효과를 위해서는 동흡진기가 주 구조물에 대하여 적절한 질량비를 가져야 하며 최적의 감쇠비를 가져야 하는데 특징의 최적 조건에서의 흡진기의 효과를 실험적으로 검증할 수 있었다. 또한, 동흡진기의 여러 조건 중 주 구조물의 고유진동수와 동흡진기의 고유진동수를 일치시키는 것이 진동 저감에 가장 효과적인 것을 파악하였다.

참고 문헌

- (1) Singiresu S. Rao, 1995, Mechanical Vibrations Third edition, Addison-Wesley.
- (2) 김태현, 박영진, 김홍기, 2001, "적응 가변형 동흡진기", ICCAS2001,
- (3) A. Soom, Ming-san Lee, 1983, "Optimal Design of Linear and Nonlinear Vibration Absorbers for Damped Systems", Transactions of the ASME, Vol.105, pp. 112-119.
- (4) Cyril M. Harris, 1961, Shock and Vibration Handbook Fourth Edition, McGRAW-HILL.
- (5) Robert D. Blevins Ph. D., 1979, Formulas for Natural Frequency and Mode Shape.