

능동 고립 시스템의 성능 실험

김승록[†], 허 석^{*}, 꺾문규^{**}

Experiment on Performance of Vibration Isolation System

Seung-Rok Kim, Seok Heo and Moon K. Kwak

Abstract

This paper is concerned with the experiment of vibration isolation device which can cope with heave, pitch and roll type vibrations. This new device consists of S-shaped piezoceramic actuators supporting each corner of the plate. Small piezoceramic sensors are located at the middle of each side. This paper also presents the development and the movement of the system. The active control technique was also developed to cope with base excitation. Experimental results show that vibrations can be reduced by the new device in the case of base excitation of harmonic type.

1. 서론

다양한 진동원에 노출되어 있는 비행체 탑재장비를 외부 가진원으로부터 보호하고 성능을 보장하기 위해서는 기존의 수동형 마운트로 부족하다. 따라서 장비의 탑재위치, 장착부 강성, 외부 교란에 스스로 적응하여 탑재 장비를 보호할 수 있는 능동 마운트의 개발이 필요하다. 능동마운트의 개발을 위해서는 외부 교란에 대처할 능력을 갖추고 있는 작동기 개발이 선행되어야 한다. 본 연구의 첫 번째 목적은 작동기로서 그 성능을 입증받은 압전체를 이용하여 능동 마운트를 개발하는 것이고 두 번째 목적은 압전형 능동 마운트를 효과적으로 작동하기 위한 제어 알고리즘의 개발이다.

일반적으로 외부 또는 내부로부터의 진동을 작동

기를 사용하여 능동적으로 격리하는 것을 능동진동격리(Active Vibration Isolation, AVI)라고 부른다. 이 기술은 한 물체 또는 구조물로부터 다른 물체로의 진동 전달을 감소시키기 위하여 능동시스템을 사용하는 것을 지칭하며 포괄적으로는 능동진동흡수장치(Active Vibration Absorber)를 사용하여 기계나 구조물의 진동을 감소시키는 것을 포함한다.

능동진동흡수장치의 장점과 단점을 열거하면 다음과 같다. 먼저 지지된 장비의 정적 안정성이 수동진동격리(Passive Vibration Isolation, PVI)에 비해 좋으며 저주파수 대역에서의 성능이 좋다. PVI는 저주파수 대역에서 진동제어 효과가 거의 없다. AVI는 어느 한 지점의 진동제어가 가능하며 장비의 작동 상태에 맞추어 교정이 가능하다. 그러나 에너지를 방출 또는 제공하기 위해서 외부 전원이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 진동억제에 비용이 많이 들며 장비가 강철과 고탄소스프링으로 되어있는 단순한 PVI 시스템에 비해 복잡하다. 내구성 역시 문제가 된다.

능동진동흡수시스템은 현재 지지구조물의 진동

[†] 동국대학교 기계공학과 대학원

^{*} 동국대학교 산업기술연구원

^{**} 동국대학교 기계공학과 교수

으로부터 광학시스템의 격리, 거친 노면으로부터 발생된 타이어 진동으로부터 객실 격리, 기진원으로부터 우주 망원경의 격리, 엔진 진동으로부터 차량의 격리, 로터 기어박스 진동으로부터 헬리콥터 객실의 격리, 중장비 진동으로부터 지면 격리 등에 사용되고 있다.

진동흡수장치를 사용하는 진동격리는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 지지구조물로부터 장비를 격리하는 것, 즉 베이스 기진력으로부터 장비를 격리하는 것이고 다른 하나는 장비 진동을 지지부로부터 격리하는 것이다.

본 연구에서는 베이스에 저주파수 특성을 가지는 외부 교란이 가해지는 경우에 대응할 수 있는 수동-능동 진동흡수기의 설계 제작, 그리고 3자유도로 감지되는 감지기 데이터를 처리하여 작동기의 제어성능을 알아보고자 한다. 본 연구에서 제안한 시스템은 수동시스템과 병렬로 연결된 능동시스템이다.

Karnopp[1]는 능동/반능동 진동격리장치에 대해 논하면서 특히 "sky hook" 알고리즘에 대해 소개하고 있다. 이 논문에서 진동격리장치를 지진에 대한 격리대의 설계 방법과 자동차의 능동현가장치, 반능동 감쇠현가장치에 대해 논하고 있다. Leo와 Inman[2]은 수동-능동 고립진동시스템에 대한 최적제어문제를 다루었으며, Flint등[3]은 교란에 대응하는 제어력을 이용하는 방법을 다루었다. Flangas[4]는 PZT 판을 부착한 S-bracket을 개발하고 H_{∞} 제어를 이용한 성능해석에 대하여 논하였다. Anderson등[5]은 인공위성의 통신 장비 지지대의 초정밀 능동진동 제어 장치(SUITE)에 대한 실험방법과 특성에 대하여 논하고 있다.

2. 방진 시스템의 개발

개발된 시스템의 구성은 수직방향으로 변위가 발생되도록 얇은 알루미늄 판에 압전세라믹을 위아래로 집착하여 극방향으로 전압이 가해졌을 때 윗면의 알루미늄판은 인장을 하고, 아래면의 알루미늄판은 압축을 하게 되어 전체적으로 굽힘이 일어나고 이로 인해 윗판이 수직방향으로 움직이게 된다. 알루미늄 판과 바는 볼트와 너트를 이용하여

고정하였고, 알루미늄판과 판 사이는 NOVITECH사의 방진고무(NYCOTOP series)를 이용하여 연결하였다. 이는 작동기에서 발생하는 굽힘의 방향을 상·하 방향으로만 사용하기 위한 방법으로 방진고무의 부착으로 인하여 좌우로 발생하는 운동방향을 고무자체의 연성으로 서로 상쇄 시켜주는 역할을 하게된다. 작동기로 사용되는 압전세라믹은 알루미늄바에 근접하여 부착함으로써 작동기에서 발생하는 변위를 최대한 이용할 수 있도록 설계하였다. 방진고무와 알루미늄판과의 부착, 압전세라믹과 알루미늄판과의 부착은 DEVCON사의 30분경화용 에폭시를 사용하였다. 이후 압전스택형으로 만들기 쉽도록 상부에 하부와 마찬가지로 알루미늄 바를 볼트와 너트를 이용하여 고정함으로써 최종적인 능동 진동제어장치를 완성하였다. 실험에 사용한 압전세라믹은 Piezo Systems사의 PZT-PSI-5H-S3로서 압전상수 $d_{31} = -260 \times 10^{-12} \text{m/V}$, 두께 $t_p = 14.48 \times 10^{-3} \text{m}$, 폭과 넓이는 각각 55mm이다.

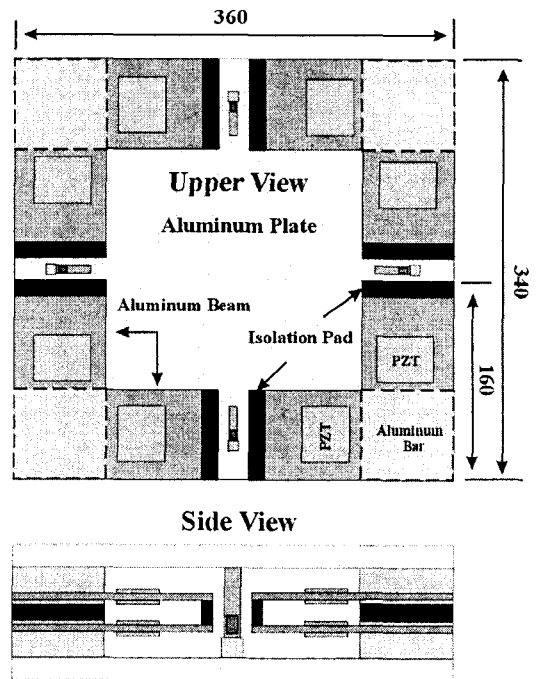


Fig. 1 Active Vibration Isolation System

Fig. 1은 정방형의 판에 네 개의 작동기와 네 개의 감지기를 부착한 것을 보여주고 있다. 그림을 보면 하나의 작동기는 압전세라믹이 모두 4-pair, 8장으로 이루어져있으며 압전세라믹이 부착된 알루미늄 판들은 방진고무와 연결되어 하나의 시스템을 이룬다. 이러한 하나의 작동기 시스템을 정방형 판의 각 모서리에 위치시켜 상판을 지지할 수 있도록 하였다. 이로 인하여 작동기는 3자유도(Pitch, Roll and Heave type Vibrations)의 운동을 가능하게 한다. 감지기는 Fig. 1에서 처럼 각각의 면 중앙에 네 개의 감지기를 위치시켜 모든 운동방향에 대하여 감지할 수 있었다. 감지기는 0.5mm 두께의 스테인레스 재질의 외팔보로 한편의 끝단에 압전세라믹을 부착하여 비스듬히 기울인 형태로 다른 끝단이 상판과 닿게하였다. 아래그림이 최종적으로 상판과 연결되어 완성된 형태를 보여준다.

3. 작동기 위치의 변위 계산

Fig. 2는 시스템을 위에서 바라본 모습이다. 구조적인 형태를 기반으로 각각의 위치에서 감지기들의 변위를 유도해 보면 다음과 같이 쓸 수 있다.

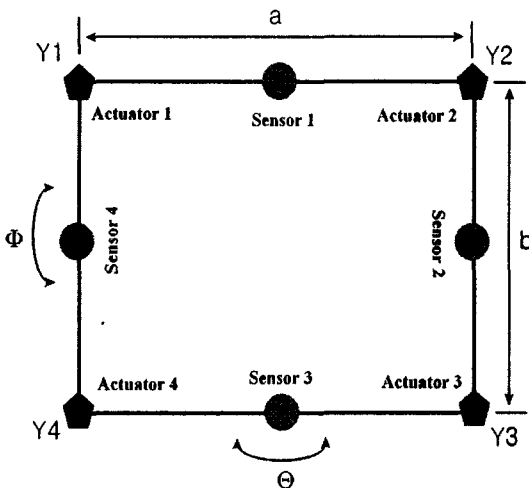


Fig. 2 Schematic of Diagram

$$\begin{aligned} \text{Sensor 1} &= Y + \frac{b}{2} \phi \\ \text{Sensor 2} &= Y + \frac{a}{2} \theta \\ \text{Sensor 3} &= Y - \frac{b}{2} \phi \\ \text{Sensor 4} &= Y - \frac{a}{2} \theta \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 중앙을 기준점으로 볼 때 ϕ 는 pitch angle, θ 는 roll angle을 나타낸다. 식(1)을 다시 표현하면 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & b/2 \\ 1 & a/2 & 0 \\ 1 & 0 & -b/2 \\ 1 & -a/2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$S = A Z$$

또한, 각각의 작동기에서의 변위 $Y_1 \sim Y_4$ 에 관한 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} Y_1 &= Y + \frac{a}{2} \theta + \frac{b}{2} \phi \\ Y_2 &= Y - \frac{a}{2} \theta + \frac{b}{2} \phi \\ Y_3 &= Y - \frac{a}{2} \theta - \frac{b}{2} \phi \\ Y_4 &= Y + \frac{a}{2} \theta - \frac{b}{2} \phi \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a/2 & b/2 \\ 1 & -a/2 & b/2 \\ 1 & -a/2 & -b/2 \\ 1 & a/2 & -b/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$Y = B Z$$

따라서, 식(2)의 감지기에 관한 식을 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$Y = B A^T S \quad (5)$$

식(5)는 각각의 감지기에서 얻은 변위를 이용하여 각각의 작동기 위치에서의 변위를 나타낸다. 이를 이용하여 각각의 작동기에 대한 PPF제어기를 구성할 수 있다. PPF 제어기는 다음과 같은 전달함수로 표현된다.

$$H(s) = \frac{\omega_f^2}{s^2 + 2\zeta_f \omega_f s + \omega_f^2} \quad (6)$$

여기서 ω_f 와 ζ_f 는 PPF 보상회로의 필터 주파수와 감쇠인자이다. 일반적으로 PPF제어기는 ω_f 를

대상 구조물의 고유진동수와 일치시킴으로써 능동 진동제어를 이룩한다. 식(6)을 디지털 제어기로 전환하기 위해서 다음과 같은 Bilinear 변환을 사용한다.

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (7)$$

여기서 T_s 는 디지털 제어기의 Sampling 시간을 나타낸다. (7)식을 (6)식에 대입하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$H(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} \quad (8)$$

여기서

$$b_2 = \frac{\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_1 = \frac{2\omega_f^2}{\Delta}, \quad b_0 = \frac{\omega_f^2}{\Delta},$$

$$a_1 = \frac{(2\omega_f^2 - \frac{8}{T_s^2})}{\Delta} \quad (9)$$

$$a_0 = \frac{(\frac{4}{T_s^2} - \frac{4\zeta\omega_f}{T_s} + \omega_f^2)}{\Delta},$$

$$\Delta = (\frac{4}{T_s^2} + \frac{4\zeta\omega_f}{T_s} + \omega_f^2)$$

(8)식을 이산화된 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$u_k = -a_1 u_{k-1} - a_0 u_{k-2} + b_2 (y_k + 2y_{k-1} + y_{k-2}) \quad (10)$$

4. 실험방법 및 결과

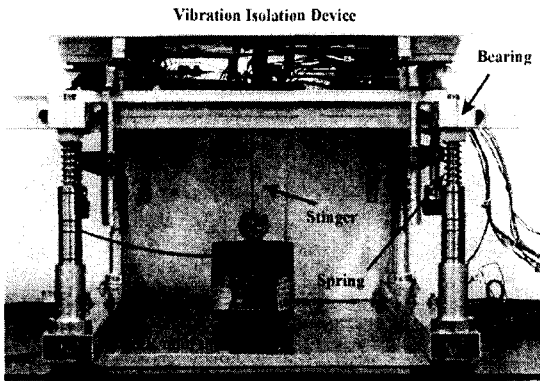


Fig. 3 Schematic of Set-up

Fig. 3에서는 실험을 위한 장비의 구성을 보여주고 있다. 제작된 방진 장치를 지지하기 위하여 스프링과 베어링으로 구성된 네 개의 기둥이 서 있으며 하부에서 들어오는 가진원을 만들어 주기 위하여 B&K 사의 미니웨이커가 중앙에 위치하며 스텐어를 이용하여 방진장치와 연결되었다. 즉, 하부에서 전달되는 진동원으로부터 진동흡수장치를 거쳐 전달되는 상부의 진동을 네 개의 감지기를 이용하여 측정하고 각각의 작동기를 이용하여 제어함으로써 진동흡수장치의 성능을 밝히고자 하는 실험을 수행하였다.

Fig. 4는 방진장치의 성능을 평가하기 위하여 네 개의 작동기 시스템의 신호와 네 개의 감지기 신호를 입력하기 위해서 DSP 보드를 사용하였다. dSPACE사의 DS1102로 펜티엄 PC에서 구동되어 지는데 감지기로부터 받은 신호는 4ch 전하앰프를 통해서 DS1102를 내장한 PC와 연결되며 DSP프로그램을 통해서 하부진동원에 대한 가진신호가 처리되어 각각의 작동기에 증폭앰프를 통해서 제어력이 입력되어진다.

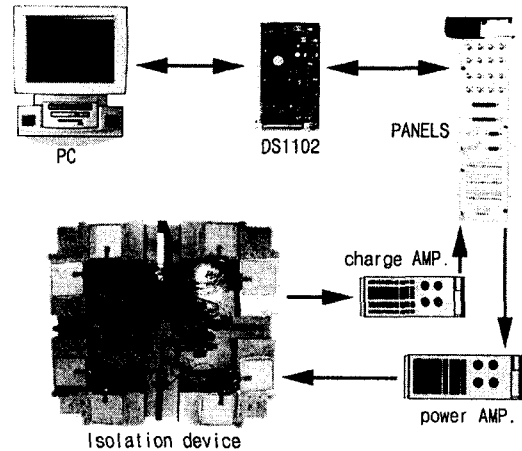


Fig. 4 Schematic of Set-up

Fig. 5는 하부 가진을 시키지 않고 상부에 충격가진을 주었을 경우에 대하여 네 개의 감지기를 이용하여 2초동안 데이터를 수집하고 PPF 제어기를 이용하여 네개의 작동기에 제어력을 입력한 결과를 보여준다. 이때 사용한 PPF 제어기의 ω_f 는 15Hz, ζ_f 는 0.3이며 증폭앰프의 게인은 15이다.

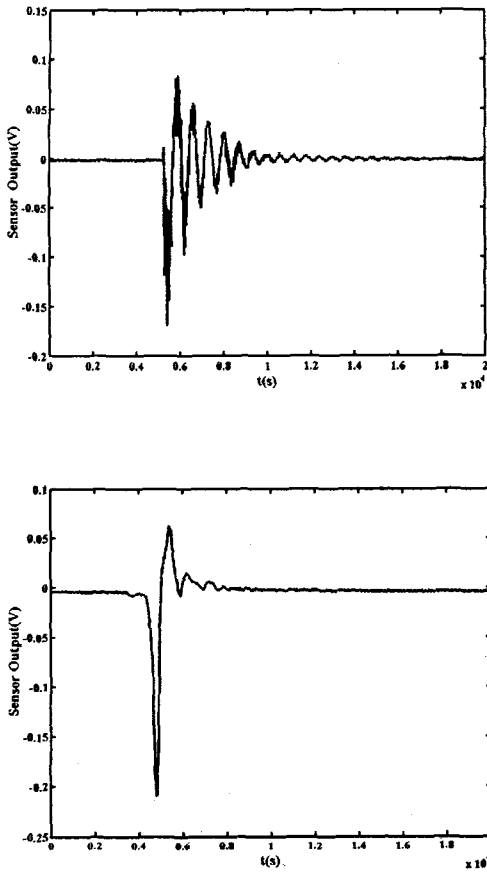


Fig. 5 Response of uncontrol vs. control

Fig. 6은 Fig. 3에서의 실험환경하에서 미니쉐이커를 이용하여 하부에 가진원을 제공하였을때의 제어결과를 보여주고 있다. 먼저 heave type vibration에 대한 제어성능을 알아보았다. 하부가진은 15Hz 사인파를 쉐이커를 이용하여 입력하였으며 하부로 들어오는 진동은 네 개의 감지기로부터 전하앰프를 거쳐 DSP의 A/D 컨버터에 입력되어진다. 네 개의 감지기 데이터를 합하여 4로 나누면 순수하게 상하로 움직이는 변위를 얻게 되는데 이를 이용하여 DSP에 다운로드된 디지털화된 PPF 제어기를 이용하여 네 개의 작동기에 제어력을 인가하였다. 이때 사용한 PPF 제어기의 ω_f 는 15Hz, ζ_f 는 0.3이며 작동기로 입력되는 신호는 4ch 증폭 앰프를 거쳐 입력되었는데 이때 게인은 15로 하였

다. 실험결과 능동적인 제어가 성공적으로 이루어짐을 확인하였다.

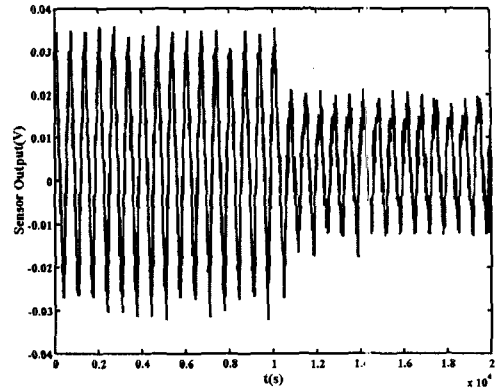


Fig. 6 Response of control for Heave Type Vibration

5. 토의 및 결론

본 연구에서는 수동-능동 압전형 진동흡수장치를 개발하여 그 성능을 실험으로 입증하였다. 진동흡수장치는 알루미늄 판과 방진고무를 결합하여 정방향 판에 4개의 작동기 시스템으로서 부착되었으며 방진고무의 사용과 제작 형상으로부터 제어기를 가동하지 않았을 때에도 수동적인 진동흡수 효과가 있음을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 본 연구에서는 상부의 진동을 4개의 외팔보 형태의 감지기를 이용하여 베이스로부터 전해지는 외부가진을 상쇄할 수 있는 제어기를 개발하였다.

본 연구에서 제작된 진동흡수장치는 저주파 미세진동원을 억제하기 위해 설계되었으며 시스템자체가 가지는 감쇠효과도 효과적임을 알 수 있었다. 실험결과 짧은 시간에 주어지는 외부 충격에 의하여 가진 되는 구조물 진동의 능동진동제어뿐만 아니라 지속적인 외부 교란이 가해지는 구조물 진동의 능동진동제어로서 진동흡수장치가 효과적으로 사용될 수 있음이 확인되었다.

차후에 본 연구에서 유도한 각각의 작동기 위치에
서의 변위식을 PPF 제어기의 변위로 받아 제어
기를 구성하여 pitch와 roll 에 대한 진동억제실험
을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제(UD000038ED)
의 지원에 의하여 이루어졌다. 관계자 여러분께 감
사 드린다.

참 고 문 헌

[1] D. Karnopp, "Active and Semi-Active
Vibration Isolation", Transaction of the ASME,
Special 50th Anniversary Design Issue, Vol 117,
1995, pp.177-185

[2] D. J. Leo and D. J. Inman, "A Quadratic
Programing Approach to the Design of
Active-Passive Vibration Isolation System",
Journal of Sound and Vibration, Vol. 220, No. 5,
1999, pp.807-825.

[3] E. Flint, M. Evert, E. Anderson and P.
Flannery, "Active/Passive Counter-Force
Vibration Control and Isolation Systems", IEEE,
2000, pp.285-298

[4] Eric T. Falangas, "A Vibration Isolation
System Using Active PZT Brackets",
Proceedings of the American Control Conference,
Baltimore, Maryland, 1994, pp.676-680.

[5] E. H. Anderson, J. P. Fumo and R. S. Erwin,
"Satellite Ultraquite Isolation Technology
Experiment (SUITE)", IEEE, 2000, pp.299-313.

[6] Eunsup Sim and Sung W. Lee, "Active
Vibration Control of Flexible Structures with
Acceleration Feedback", J. GUIDANCE, Vol. 16,
No. 2: Engineering Notes