

# 압전세라믹과 방진고무를 이용한 진동흡수장치의 제작과 동적특성 연구

°허석\*,곽문규\*\*

## A Study on the Manufacturing and Dynamic Charateristics of Vibration Absorber Using Piezoceramics and Isolation Pad

Seok Heo, Moon K. Kwak

### ABSTRACT

This research is concerned with the study of an active vibration absorber using piezoelectric actuators and Isolation pad. The active isolation system consists of 4-pairs of PZT actuators bonded on the surface of an aluminum plate and a passive damping material. The active system is connected to the passive system in series. The signals of the accelerometers are fed into the PZT actuator through the controller. We proposed a new control technique which can deal with the shock as well as the base excitation in this study. The Positive Acceleration Feedback(PAF) tuned to the natural frequency of the vibration isolation system is used to suppress the vibrations caused by the shock using the top accelerometer signal. The Negative Acceleration Feedback (NAF) based on the base acceleration signal is used to counteract the base motion. Experimental results show that the proposed active vibration isolation system can suppress vibrations.

### 1. 서 론

일반적으로 외부 또는 내부로부터의 진동을 작동기를 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 고무스프링으로 되어 있는 단순한 PVI 시스템에 비해 복잡하다. 내구성 역시 문제가 된다.

\* 동국대학교 기계공학과 대학원

\*\* 동국대학교 기계공학과 교수

능동진동흡수시스템은 현재 지지구조물의 진동으로부터 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 지부로부터 격리하는 것이다.

본 연구에서는 베이스에 저주파수 특성을 가지는 외부 교란이 가해지는 경우에 대응할 수 있는 수동-능동 진동흡수기의 설계 제작, 그리고 초기 실험 결과를 바탕으로 역 가속도 궤환(negative acceleration feedback)과 양 가속도 궤환(positive acceleration feedback)을 혼합한 제어결과를 제시하고자 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 제어문제를 다루었으며, Flint등[3]은 교란에 대응하는 제어력을 이용하는 방법을 다루었다. Flangas[4]는 PZT 판을 부착한 S-bracket을 개발하고  $H_{\infty}$  제어를 이용한 성능해석에 대하여 논하였다. Anderson등[5]은 인공위성의 통신 장비 지지대의 초정밀 능동진동 제어 장치(SUITE)에 대한 실험방법과 특성에 대하여 논하고 있다.

본 논문에서는 이전에 개발한(Fig. 1) 수동-능동 진동흡수장치를 수정하여 Fig. 2와 같은 장치를 제작하였다.

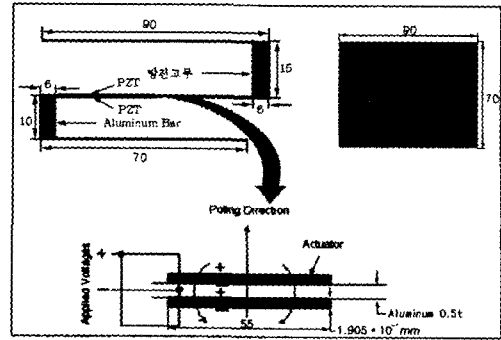


Fig. 1 L-shaped Vibration Absorber

## 2. 능동진동제어장치의 제작

제작된 장치는 수직방향으로 변위가 발생되도록 얇은 알루미늄 판에 압전세라믹을 위 아래로 접착하여 극방향으로 전압이 가해졌을 때 그림에서 보듯이 윗면의 알루미늄판은 인장을 하고, 아래면의 알루미늄판은 압축을 하게 되어 전체적으로 굽힘이 일어나고 이로 인해 윗판이 수직방향으로 움직이게 된다.

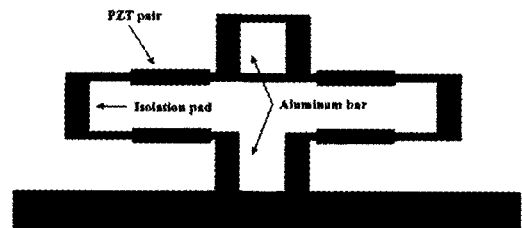
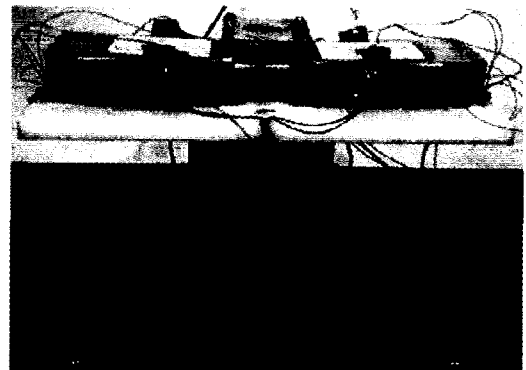


Fig. 2 Active Vibration Isolation System

아래에 있는 베이스에 연결된 꺾이는 부분은 알루미늄 바를 볼트와 너트를 이용하여 고정하였고, 알루미늄판과 판 사이는 NOVITECH 사의 방진고무(NYCOTOP series)를 이용하여 연결하였다. 이는 작동기에서 발생하는 굽힘의 방향을 상하 방향으로만 사용하기 위한 방책으로 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 DEVCON 사의 30분 경화용 에폭시를 사용하였다. 이후 압전스택형으로 만들기 쉽도록 상부에 하부와 마찬가지로 알루미늄 바를 볼트와 너트를 이용하여 고정함으로써 최종적인 능동 진동 제어장치를 완성하였다.

Fig. 2와 같은 능동진동제어장치를 제작한 후 하부에 전달되는 진동원으로부터 진동흡수장치를 거쳐 전달되는 상부의 진동을 측정하여 비교함으로써 진동흡수장치의 성능을 밝히고자 하는 실험을 수행하였다. 실험에 사용한 압전세라믹은 Piezo Systems 사의 PZT-PSI-5H-S3 로서 압전상수  $d_{31} = -260 \times 10^{-12} \text{m/V}$ , 두께  $t_p = 14.48 \times 10^{-3} \text{m}$ , 폭과 넓이는 각각 55mm이다.

### 3. Positive Acceration Feedback Control (PAFC)

PAFC는 Sim and Lee[6]가 제안했으며 이 논문에서 이 제어기가 안정적임을 증명하였고, 실제에서는 가속도신호를 Positive Position Feedback하는 방식으로 구현함을 보여주었다.

먼저, Fig. 3에 보이는 것과 같이 실험장치를 준비하고 시편 하단부와 상단부에 ENDEVCO사의 가속도센서인 7751-500(Sensityvity 507.5mV/g)를 각각 부착하여 하부가진으로 인한 진동형태가 상부에 어떻게 미치는가를 조사하고 PAFC를 이용한 제어성능을 조사하였다. 실험을 위해 함수발생기로

부터 15Hz sine wave를 발생시켜 미니 웨이커에 전달하였으며 상부에 부착된 가속도계의 신호를 DSP가 장착된 컴퓨터에 입력신호로 받아들였다. DSP에는 앞의 실험결과에서도 밝혔던 SISOPPF 제어가 다운로드되어 지는데 필터링을 위하여 17Hz로 튜닝하였으며 입력신호에 대하여 8배를 증폭하여 증폭기로 출력하였다. 소프트웨어상의 증폭은 실험을 통하여 가장 최적화된 값을 사용하였으며 증폭기로 입력된 신호는 다시 10배로 증폭되어 압전작동기에 입력되었다. Fig. 4는 제어성능에 대한 응답을 보여준다.

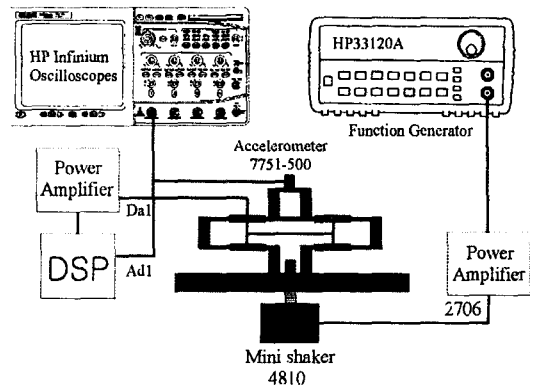


Fig. 3 PAFC

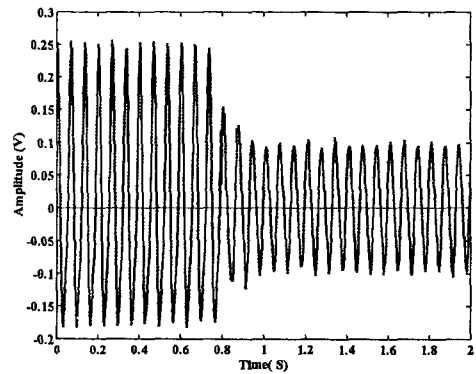


Fig. 4 Time Response

### 4. Negative Acceration Feedback Control (NAFC)

Fig. 5는 Fig. 3과 실험방법은 같지만 베이스에서 얻은 가속도 신호를 이용하여 실험결과에서도 밝혔던 SISOPPF 제어가 다운로드되어 지는데 필터링을 위하여 60Hz로 튜닝하였으며 입력신호에 대하여 역으로 변환하여 증폭기로 출력하였다. Fig. 6은 실험결과를 보여주고 있으며 Fig. 4와 비교하여 보면 Fig. 4가 진폭이 더 줄어들었음을 알 수 있다.

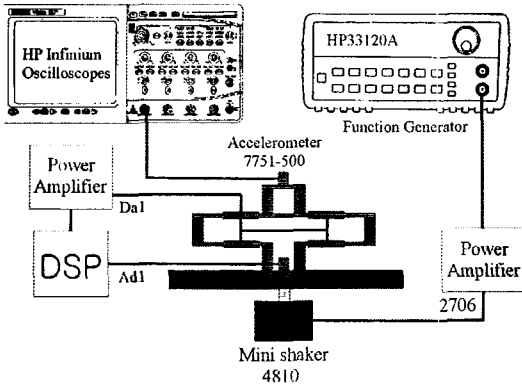


Fig. 5 NAFC

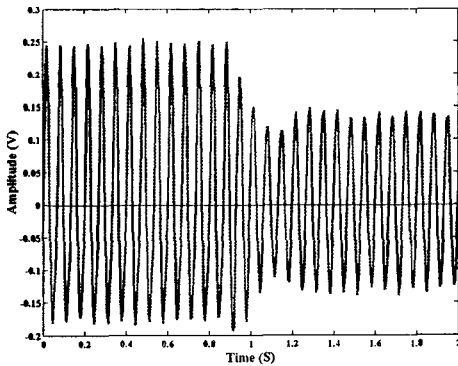


Fig. 6 Time Response

## 5. Positive and Negative Acceleration Feedback Control (PNAFC)

위 실험결과를 토대로 Fig. 7과 같은 실험을 수행하였다. 즉, 베이스에서 들어오는 외부가진원에 의한 진동을 NAFC로 제어하고 남게되는 진동은 상부의 가속도신호를 이용하여 PAFC로 제어하였다.

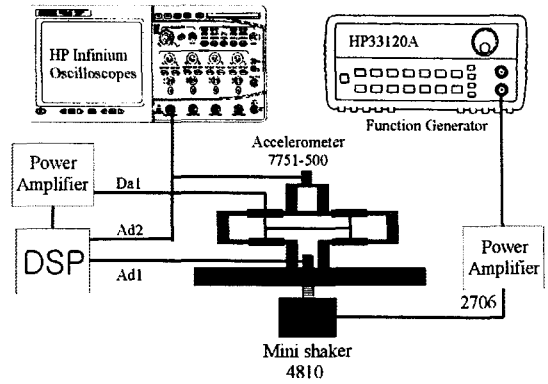


Fig. 7 PNAFC

마찬가지로 필터주파수는 NAFC는 60Hz, PAFC는 17Hz에 튜닝하였다. Fig. 8은 그 결과를 보여주고 있다. Fig. 4와 6을 비교해보면 진폭이 더 줄었음을 알 수 있다.

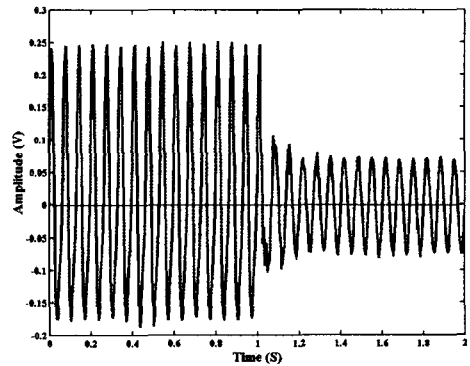


Fig. 8 Time Response

위의 결과를 생각해 볼 때 two-input one-output의 시스템을 구성하며 어느 한 개의 제어가 작동을 않더라도 진동을 제어할 수 있음을 보여주고 있으며 두 개의 제어가 혼합되었을 때 보다 효과적임을 알 수 있다.

위에서는 PPF 제어를 가진 주파수에 적용하여 진동제어를 하지 않았다. 보다 효과적인 능동진동 제어효과를 얻기위해서는 PAFC의 필터주파수를

가진 주파수에 튜닝하는 것이 바람직하다. PPF 제어기의 장점은 특정한 모드를 가장 효과적으로 제어할 수 있고, 특정모드의 감쇠를 극대화 할 수 있으며, 제어하지 않는 다른 모드를 불안정화 시키지 않지만, 제어기 설계 시에 고유진동수가 산정 되어야 하는 단점을 가지고 있다.

이러한 결과를 바탕으로 외부가진원을 17Hz sine wave로 바꾸어 위의 3가지 실험을 수행하였다. NAFC의 필터주파수는 60Hz, PAFC는 17Hz, 댐핑 계수는 0.3, 파워앰프의 게인은 10으로 설정하였으며 그 결과는 다음과 같다. 초기진폭은 약 0.5 Vpp 이다.

Table 1.

control	NAFC	PAFC	NAFC+PAFC
Amplitude (Vpp)	0.35	0.13	0.08

Fig. 9는 혼합된 제어기의 시간응답을 보여주고 있다. Fig. 8의 결과와 비교할 때 PAFC 필터주파수의 튜닝값에 따라 제어성능이 확연히 구분되는 것을 볼 수 있다.

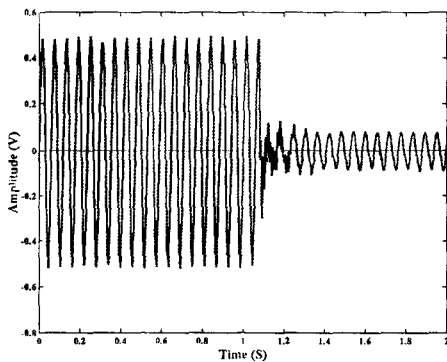


Fig. 9 Time Response

그림에서 보듯이 PNAFC를 작동시켰을 때 대략 85%의 감쇠효과를 얻을 수 있었다.

## 6. 토의 및 결론

본 연구에서는 Negative Acceleration Feedback 제어와 Positive Acceleration Feedback 제어를 이용한 수동-능동 압전형 진동흡수장치를 개발하고 그 성능을 실험으로 입증하였다. 진동흡수장치는 알루미늄 판과 방진고무를 결합하여 초기"ㄷ" 형태에서 상부를 하나로 통합된 것으로 제작되었다. 방진고무의 사용과 제작 형상으로부터 제어기를 가동하지 않았을 때에도 수동적인 진동흡수 효과가 있음을 초기 주파수응답실험을 통하여 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 앞서 수행된 실험결과를 토대로 베이스의 진동과 상부의 진동을 동시에 감지하여 베이스로부터 전해지는 외부가진을 상쇄할 수 있는 제어기를 개발하였다.

본 연구에서 제작된 진동흡수장치는 저주파 미세진동원을 억제하기 위해 설계되었으며 단독으로 사용되기보다는 여러 개를 조합하는 형태로 사용한다면 더욱 효과적으로 사용될 수 있다.

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.

본 연구에서는 PPF 제어기를 적용하였지만 앞서 개발된 APPF(Adaptive PPF)제어기를 사용하여 혼합한다면 필터주파수의 튜닝문제를 제거할 수 있을 것이다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소 위탁과제(UD000038ED)의 지원에 의하여 이루어졌다. 관계자 여러분께 감사 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