

압전세라믹을 이용한 능동진동제어장치의 개발

°곽명훈*, 허석*, 곽문규**

Development of the Active Vibration Absorber Using Piezoelectric Actuators

Myoung-Hoon Kwak, Seok Heo, Moon K. Kwak

Abstract

This research is concerned with development of the active vibration absorber using piezoelectric actuators. This active isolation system consists of a-pairs of PZT actuators bonded on a S-shaped aluminum plate and the passive damping material. The active system is connected to the passive system in series. In this paper, one of the popular control techniques which have been successfully applied to the smart structure is the Positive Position Feedback(PPF) control. The digital PPF control lows downloaded to the DSP chip and a main program, which runs SISO PPF algorithm. The structure and dynamic characteristics of the proposed active vibration isolation system and described in detail. To demonstate the effectiveness of the active vibration control, the PPF controller is first employed. Experimental results show that the active vibration isolation is possible by means of the proposed system.

1. 서론

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 진동제어 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 되어있는 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, 증장비 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 초기 실험 결과를 제시하고자 한다. 본 연구에서 제안한 시스템은 수동시스템과 병렬로 연결된 능동시스템 (Fig. 1)이다.

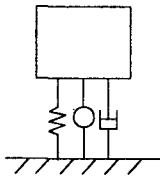


Fig. 1. Passive-Active Vibration Absorber System of Parallel Type

이 장치는 저주파수에서 효과적이거나 고주파수 대역에서는 힘전달이 커 고주파수 성능이 저하되는 것으로 알려져 있다. 특히 유압시스템의 경우에 이 현상이 두드러진다. 만일 저주파수 대역에서 대변형이 일어나면 Magnetostrictive 작동기나 압전체 작동기를 사용하는 것이 어려워진다. 이에 대응하기 위해 공압, 유압 또는 전자기 작동기를 사용할 수 있으나 중량문제, 액체 공급 문제가 대두된다.

Fig. 2는 수동시스템과 직렬로 연결된 능동시스템을 보여주고 있다.

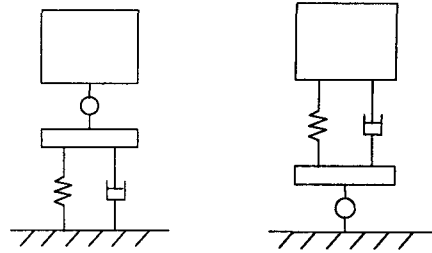


Fig. 2. Passive-Active Vibration Absorber System of Serial Type

이 시스템은 고주파수 대역에서의 성능저하가 없으나 작동기 자체가 장비 중량을 감당해야 하는 단점이 있다. 제어 관점에서는 능동시스템이 지지구조물의 동역학으로부터 분리되어 있다는 장점이 있다. 이 외에도 주시스템에 질량-스프링으로 이루어진 부시스템을 부착하여 진동을 흡수하는 동흡진장치 등이 있으나 본 연구에서는 능동 직렬 진동흡수장치의 설계 및 개발에 대해 논하고자 한다.

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.

본 논문에서는 수동-능동 진동흡수장치를 알루미늄 판과 PZT, 방진고무를 연결하여 “ㄷ”자 형태로 제작하였고, Mini Shaker를 이용하여 외부가진에 대한 구조물의 응답특성을 FFT 해석을 통해 조사하였으며, 검증용 마친 SISO PPF 제어기를 적용 적용하여 능동적으로 적용된 진동 흡수의 효과를 입증하였다. 이때 디지털 PPF 프로그램은 C 프로그램을 이용하여 제작된 알고리즘을 사용하였고,

DSP 보드에 다운로드 된 PPF 제어 프로그램 내의 변수들은 구조물의 응답특성을 조사하여 얻은 결과를 적용하였다.

고정함으로 최종적인 능동 진동제어장치를 완성하였다.

2. 능동진동제어장치의 제작 및 실험

수직방향으로 변위가 발생되도록 얇은 알루미늄 판에 압전세라믹을 위 아래로 접착하여 극방향으로 전압이 가해졌을 때 Fig. 3에서 보듯이 윗면의 압전세라믹 판은 인장을 하고, 아래면의 압전세라믹 판은 압축을 하게 되어 전체적으로 굽힘이 일어나고 이로 인해 윗판이 수직방향으로 움직이게 된다.

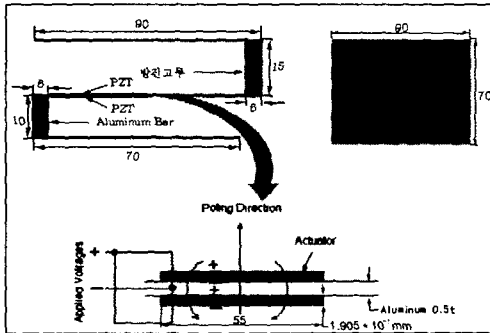


Fig. 3 C-shaped Vibration Absorber

“C” 자 모양의 시편중 아래 베이스에 연결된 깍이는 부분은 알루미늄 바를 볼트와 너트를 이용하여 고정하였고, 위 베이스에 연결될 부분은 NOVITECH 사의 방진고무(NYCOTOP series)를 이용하여 연결하였다. 이는 작동기에서 발생하는 굽힘의 방향을 상·하 방향으로만 사용하기 위한 방책으로 방진고무의 부착으로 인하여 좌우로 발생하는 운동방향을 고무자체의 연성으로 서로 상쇄시켜주는 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 “C” 자 시편 두 개를 나란히 배치하고 알루미늄판 상부와 하부에 Fig. 4처럼 볼트와 너트를 이용하여

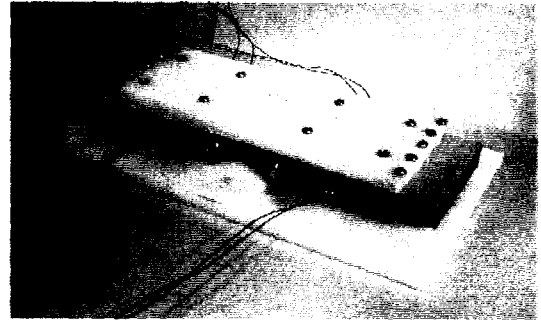


Fig. 4 Active Vibration Isolation System

Fig. 4와 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.

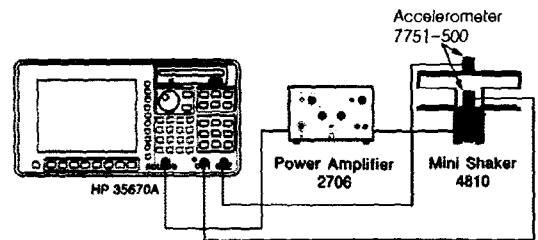


Fig. 5 Schematic of Experimental Set up

먼저 고안된 시편의 주파수 응답을 구하기 위하여 Fig. 5와 같이 시험장비를 구성하였다. HP 35670A Dynamic Signal Analyzer의 소스에서 발생된 신호는 Power Amplifier를 통하여 Mini Shaker 4810을 가진하고 Mini Shaker 위에는 고안된 시편을 부착 하였다.

시편 하단부와 상단부에 ENDEVCO사의 가속도센서인 7751-500(Sensitivity 507.5mV/g)를 각각 부착하였고 하부가진으로 인한 신호는 상부와 하부

의 가속도 센서를 가진하게 되고 이 가속도 센서의 신호를 다시 HP 35670A의 CH1 과 CH2에 연결하여 주파수 응답을 시험하였다. 이때 소스는 Periodic Chirp로 주파수는 2 -102Hz , resolution 300 측정반복회수는 100회로 하였다.

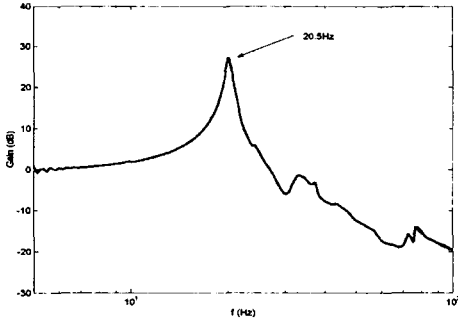


Fig. 6 Uncontrolled Experimental FRFs

Fig. 6은 계측된 주파수 응답곡선이다. 그림과 같이 1차 진동모드는 20.5Hz 근방에 나타남을 알 수 있다. 실험을 통하여 약 1-100Hz 까지의 저주파에 대하여 설계된 시편이 안정적인 특성을 가지고 있다는 것이 입증되었다.

위 실험결과를 토대로 PPF 제어를 적용하여 능동진동제어효과를 검증하였다. 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.

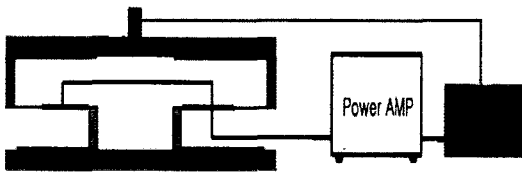


Fig. 7 Frequency Response Plot

Fig. 7은 시편 상단에 일정한 충격을 가했을 때 진동하는 구조물의 상부 진동을 가속도 센서를 상부에 부착하여 측정하고 이를 DSP 보드가 내장된 PC와 연결한 실험장치를 나타낸다. PC에서는 SISO PPF 알고리즘을 구동하여 입력된 센서 값에

대하여 계산과정을 거쳐 Power AMP 에 전달되고 이 신호는 결과적으로 시편에 부착된 작동기인 압전세라믹을 구동시키게 된다.

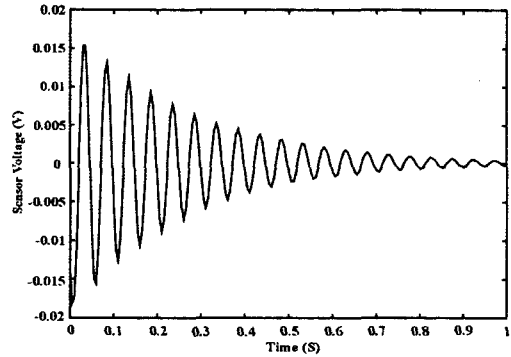


Fig. 8 Free Vibration Response

Fig. 8은 구조물의 자유진동을 살펴본 것이다. Fig. 8에 y 축에 나타낸 Sensor Output 은 Fig. 7에 도식화한 시편의 상부에 부착된 가속도 센서로부터 DSP에서 받은 전압을 나타낸다.

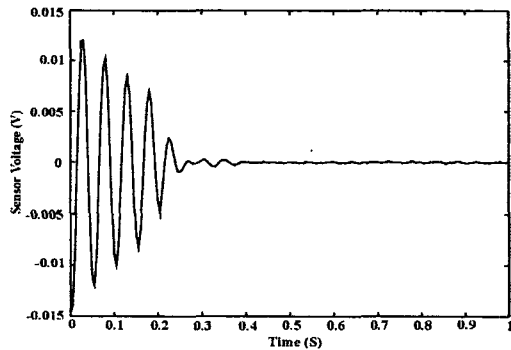


Fig. 9 PPF Controlled Response

Fig. 9는 PPF의 제어 주파수 ω_f 를 20.5Hz 즉, 구조물의 고유진동수에 정확히 튜닝한 다음 0.25초 후에 제어한 결과이다. DSP에서는 실제로 받은 전압을 10분에 1로 축소해서 사용하게된다. 이때 PPF 제어기의 $\zeta_f = 0.2$, 파워앰프의 이득은 70으로 설정하였고 DSP로부터 외부로 나가는 전압은 10배가 되고 알고리즘 상으로 다시 10배를 해 주었으며 이 신호가 파워앰프의 이득이 70배가 곱해져서 약 최대 peak to peak 70V 정도의 전압이 작동

기로 유입되게 된다. 그림으로부터 능동진동제어가 매우 효과적으로 이루어졌음을 확인할 수 있다.

실험결과를 통하여 PPF 제어기의 성능을 확인하였고, 최종적으로 PPF 제어기가 작동하였을 때와 작동하지 않았을 때에 대한 주파수 응답을 비교 분석 함으로써 설계 제작한 수동-능동 압전형 진동흡수장치의 성능을 나타내고자 하였다. Fig. 10은 Fig. 5의 실험장치에 PPF 제어기를 적용하기 위한 장비들을 추가 설치한 것이다.

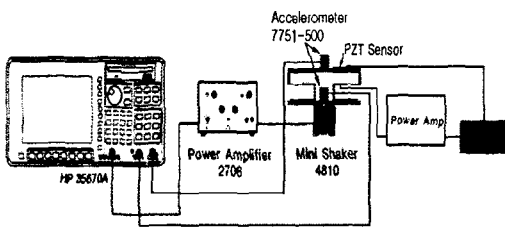


Fig. 10 Schematic of experimental set up

HP 35670A에 두 개의 가속도 센서가 연결되고 15×70mm 정도의 압전세라믹 센서를 제작하고 이를 상당 베이스에 부착하여 PC에 장착된 DSP 보드와 연결하였다. PPF 제어기에서 제어된 신호는 Power AMP를 거쳐 구동기인 압전세라믹에 연결된다. 이때 소스는 Periodic Chirp로 주파수는 2-102Hz, resolution 800 측정반복회수는 100회로 하였다.

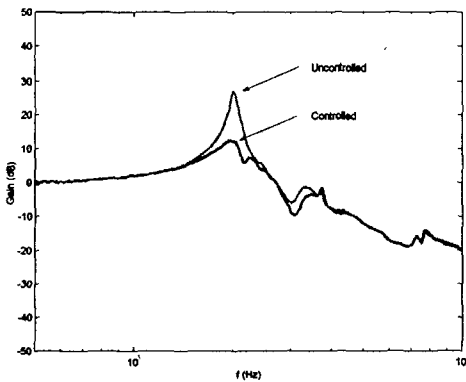


Fig. 11 PPF Controlled Response

Fig. 11에서와 같이 PPF 제어기를 작동하지 않았을 때와 작동하였을 때를 비교하여 제어기를 작동하였을 때 20.5Hz 근방의 1차 고유모드에서 20dB 정도의 진동제어 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. Fig. 5의 실험과는 달리 PPF 제어기에 입력되는 센서의 신호는 가속도 센서가 아닌 자체 제작한 압전세라믹 센서이기 때문에 신호의 크기는 Fig. 5의 실험과는 다르게 나타난다. 본 실험에서는 센서로부터 입력되는 신호를 DSP에서 계산하고 Power AMP 이전에 10배로 늘어나며 Power AMP의 이득은 20으로 설정되어 있으므로 구동기인 압전세라믹에 가해지는 전압은 최대 peak to peak 120V 정도가 된다.

3. 토의 및 결론

본 연구에서는 SISO PPF 제어 알고리즘을 이용한 수동-능동 압전형 진동흡수장치를 개발하고 그 성능을 실험으로 입증하였다. 진동흡수장치는 알루미늄 판과 방진고무를 결합하여 “ㄷ” 형태로 제작되었다. 방진고무의 사용과 제작 형상으로부터 제어기를 가동하지 않았을 때에도 수동적인 진동흡수 효과가 있음을 확인할 수 있었다. SISO PPF 제어기를 사용하였을 경우 1차 고유모드에서 약 20dB의 진동 제어 효과가 있음이 확인되었다. 본 연구에서는 제작된 진동흡수장치를 주파수 응답을 통하여 정확한 동특성을 측정하였고 이를 토대로 PPF 제어기를 설계하여 능동진동제어에 적용하였다.

본 연구에서 제작된 “ㄷ” 자 형태의 진동흡수장치는 저주파 미세 진동원을 억제하기 위해 설계되었으며 단독으로 사용되기 보다는 여러개를 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 감지기와 작동기가 각각 한 개씩인 SISO 제어시스템을 고려하여 PPF 제어를 적용 하였지만 향후 베이스의 진동을 동시에 감지하여 베이스 가진을 상쇄할 수 있는 제어기가 개발중이다.

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 Programming 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] Fanson, J. L., and Caughey, T. K., 1990, "Positive Position Feedback Control for Large Space Structures," AIAA Journal, Vol. 28, 717-724.

[7] Baz, A., Poh, S., and Fedor, J., 1992,

"Independent Modal Space Control with Positive Position Feedback," Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 114-149.

[8] Kwak, M. K., and Han, S. B., 1998, "Application of Genetic Algorithm to the Determination of Multiple Positive Position Feedback Controller Gains for Smart Structures," SPIE Conference on Mathematics and Control in Smart Structures, Vol. 3323.

[9] 라완규, 광문규, 윤광준, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동 진동 제어," 한국항공우주학회지, 제 25권 제 5호, 1997, pp. 76-85.