관성형 작동기를 이용한 능동 하이브리드 마운트 시스템의 진동제어 성능 평가

Evaluation of Vibration Control Performance for Active Hybrid Mount System Featuring Inertial Actuator

오 종 석*. 최 승 복†. 벤 쿼 오**. 문 석 준***

Jong-Seok Oh, Seung-Bok Choi, Vien Quoc Nguyen and Seok-Jun Moon

(2011년 7월 8일 접수 ; 2011년 7월 19일 심사완료)

Key Words : Vibration Control(진동제어), Piezostack Actuator(압전작동기), Inertial Actuator(관성형 작동기), One-chip Board(원칩보드), Hybrid Mount(하이브리드 마운트), Feedforward Control(앞먹임 제어)

ABSTRACT

This work presents an experimental investigation on vibration control of the active hybrid mount system for naval ships. To reduce unwanted vibrations, this paper proposes an active mount which consists of rubber element, piezostack actuator and inertial mass. The rubber element supports a mass. The piezostack actuator generates a proper control force and supply it to the mount system. To avoid being broken piezostack actuator, an actuator of the proposed mount is devised as an inertial type, in which a piezostack actuator is positioned between inertial mass and rubber element. Vibration control performances of the active mount system are evaluated via experiment. To attenuate the unwanted vibrations transferred from upper mass, the feedforward control is designed. In order to implement a control experiment, the active mount system supported by four active mounts is constructed. For realization of the controller, one-chip board is manufactured and utilized. Subsequently, vibration control performances of the proposed active mount system are experimentally evaluated in frequency domains.

1. 서 론

함정에 탑재된 각종 기계장치는 함정의 운행 중에 다양한 진동을 생성하게 되며, 이러한 진동은 함정 본체를 거쳐 함정 외부로 전달되게 된다. 이는 함정 본체에 충격을 주며, 특히 군용함정은 적에게 위치를 노출할 수 있어 큰 위험을 초래할 수 있다. 이

에 함정 시스템에서는 성능이 우수한 마운트의 적용이 요구된다⁽¹⁾. 현재 함정용 마운트로 널리 이용되고 있는 것으로는 고무요소로 구성된 마운트와 와이어 로프형 마운트가 있다. 그 중 고무로 이루어진 탄성 마운트는 고주파수 대역에서 매우 우수한 진동 절연성능으로 한국 해군 함정에 탑재되는 장비에 널리 사용되고 있지만, 공진주파수 대역에서는 효과적인 진동절연의 한계를 가지고 있다⁽²⁾. 이러한 제약을 보완하기 위해 제안된 유체 마운트는 공진주파수 대역에서는 개선된 진동절연 성능을 보이고 있지만, 고주파수 영역에서의 성능은 우수하지 않은 것으로 보고되고 있다.

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032)860-7319, Fax : (032)868-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 호치민시티대학교 기계공학과

*** 정회원, 한국기계연구원

이와 같이 수동형 마운트는 주파수대역에 따른 명확한 한계를 가지기에 최근에는 지능재료를 이용한 마운트에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이러한 연구로는 대표적으로 기존의 수동형 고무 마운트를 기본으로 하여 MR 유체(magneto-rheological fluid), ER 유체(electro-rheological fluid)를 이용하여 댐핑 변수들을 제어하는 반능동 마운트^(3,4)와 압전작동기, 전자석 구동기(electromagnetic actuator) 같은 능동적인 힘을 낼 수 있는 작동기를 이용하여 시스템에 적절한 제어력을 인가해줄 수 있는 능동 마운트^(5,6) 등이 있다. 이중에서 지능재료의 하나인 압전작동기는 빠른 응답특성을 가지고 있는 장점이 있으며, 최근에는 큰 힘을 발생시킬 수 있는 적층형 압전작동기를 활용한 능동 마운트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 압전작동기만을 이용하는 마운트의 경우에는 저주파수의 큰 가진변위에 대해서는 안정성 확보에 어려움을 가지므로 고무 요소와 압전작동기를 함께 이용하는 방향으로 연구가 활발히 진행되고 있다^(7,8).

이 연구에서는 고무와 압전작동기로 구성되는 능동 하이브리드 마운트를 이용하여, 합정용 마운트 시스템의 진동제어 성능을 실험적으로 평가하였다. 이 연구에서 제안되어지는 능동 하이브리드 마운트의 구조는 크게 고무 요소, 압전작동기와 관성질량으로 이루어진다. 하이브리드 마운트의 고무 요소는 상부 하중 지지 기능과 전주파수 대역에서 수동적인 진동절연을 위함이고, 압전작동기는 마운트에 능동적인 제어력을 부하하기 위함이다. 또한 압전작동기는 관성질량과 고무 요소 사이에 위치하여, 하부평판과 직렬로 연결되지 않는 관성형 작동기 형태로 마운트를 구성한다. 이러한 마운트 구성은 갑작스런 충격에도 압전작동기를 보호할 수 있다. 진동제어성능 평가를 위하여 상부질량이 4개의 능동 하이브리드 마운트로 지지되는 전체 마운트 시스템을 구축하였다. 또한 실제 합정에서 발생하는 고주파수의 진동과 유사한 진동을 하이브리드 마운트시스템에 부하하기 위하여, 상부질량에 웨이커를 설치하여 넓은 주파수범위를 가지는 진동을 발생시킬 수 있었다. 그리고 마운트의 능동진동제어를 위하여 feedforward 제어기와 FFT analyzer를 설계한 후, 실제 산업현장에서 활용이 용이하도록 원칩보드를 통해 설계된 제어가 구현이 되도록 하였다. 제

작된 원칩보드와 능동 하이브리드 마운트를 이용하여 합정용 마운트 시스템의 진동제어성능을 평가하였다.

2. 능동 하이브리드 마운트

이 연구에서 제안하는 능동 하이브리드 마운트는 Fig. 1과 같이 고무요소, 압전작동기와 관성질량으로 구성된다. 압전작동기는 능동 하이브리드 마운트에 제어기에서 결정된 능동적인 제어력을 제공할 수 있으며, 고무요소는 상부질량의 지지 기능역할과 전

(a) Configuration

(b) Photograph

Fig. 1 Configuration of the active hybrid mount

Fig. 2 Mechanical model of the active hybrid mount

Table 1 Parameters of active hybrid mount

Parameter	Value
Stiffness of rubber(k_1)	859840 N/m
Damping of rubber(c_1)	2778 Nsec/m
Stiffness of piezostack(k_2)	400 MN/m
Inertial mass(m_1)	10.8 kg
Mass of upper mass	2093 kg
Mass of base	876 kg
Pitching moment of equipment	287 kg·m ²
Distance from right edge to center of gravity	640 mm
Thickness of equipment	100 mm

주파수 영역에서의 진동절연 기능을 제공한다. 또한, 예상치 못한 큰 충격이 들어오는 경우에 압전작동기를 보호할 수 있으며, 전자기적인 오작동으로 압전작동기가 작동하지 못 하는 경우에도 마운트가 일반 고무 마운트의 진동 절연 특성을 가질 수 있도록 압전작동기를 관성질량과 연결하는 관성형 작동기를 능동 하이브리드 마운트에 적용하였다⁹⁾. 상부질량은 마운트의 상부 플레이트를 통해 지지되며, 마운트는 하부 플레이트를 통해 지면과 연결된다. 압전작동기의 하부는 관성형 질량과 연결되며, 상부는 볼트와 연결된다. 이러한 구성을 통해 압전작동기는 지지질량과 지면과 직렬로 연결되지 않고 관성형 작동기의 특징을 가지게 된다. 능동 하이브리드 마운트의 시스템 변수들은 Table 1에 나타내었다.

마운트의 기계적 모델을 나타내면 Fig. 2와 같으며, 이로부터 마운트의 지배방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{x}_2 &= k_1(x_0 - x_1) + c_1(\dot{x}_0 - \dot{x}_1) + k_2(x_1 - x_2) + f \\ m_1 \ddot{x}_1 &= k_2(x_2 - x_1) - f \end{aligned} \quad (1)$$

k_1 과 c_1 은 고무요소의 스프링 상수와 댐핑상수를 나타내며, k_2 와 f 는 압전작동기의 스프링 상수와 압전작동기의 힘을 뜻한다. 이 연구에서 사용된 압전작동기는 Piezomechanik사의 Pst 350bp/16/15/VS25 압전작동기를 사용하였다.

3. 능동 하이브리드 마운트 시스템

앞에서 제안된 능동 하이브리드 마운트로 상부질량이 지지되는 능동 하이브리드 마운트 시스템을

Fig. 3 Configuration of the active hybrid mount system

Fig. 3과 같이 구축하였다. 이 연구에서는 마운트로 지지되는 상부질량(upper mass)의 진동이 함정으로 전달되는 것을 차단하는 것이 목적이며, 상부질량은 무게중심점에서의 1개의 병진운동(z)과 2개의 회전운동(θ, φ)을 가지는 강체로 가정하였다. 이와 같은 능동 하이브리드 마운트 시스템의 중요 변수들은 Table 1에 나타내었다. 실제 함정에서 발생한다고 알려진 100 Hz 이상의 넓은 주파수대역의 진동을 모사하기 위해서 셰이커를 이용하였다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 셰이커는 상부질량과 체결되어 있어, 이러한 장치 구성을 통하여 실제 함정과 유사한 고주파수의 진동을 발생시킬 수 있었다.

4. 제어기 설계 및 구현

이 연구에서는 능동 하이브리드 마운트 시스템의 진동제어를 위하여 Fig. 4와 같이 feedforward 제어기와 FFT analyzer를 설계하였다. Fig. 4와 같이 셰이커에서 발생하는 진동을 가속도계로 측정 한 후, 제어입력의 주파수를 결정하기 위하여 FFT analyzing을 수행하여 진동원인 셰이커의 주작동 주파수(p)를 계산하여 얻게 된다. 이렇게 구해진 해당 주파수의 사인파만을 압전작동기에 입력할 수 있도록 하였다. 이때 feedforward 제어기의 게인은 각각의 압전작동기에 입력되는 제어입력인 사인파의 크기와 위상차(W_1, W_2)로써, 사용자가 임의로 조정할 수 있도록 하였다.

$$V_i = W_{1i} \cdot \sin(2\pi p t + W_{2i}), \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

Fig. 4 Block diagram of the feedforward system

(a) Master and slave board of one-chip board

(b) LCD display of one-chip board

Fig. 5 One-chip board for active hybrid mount system

이와 같이 제어기를 구성한 이유는 마운트 시스템에서 발생하는 진동은 장비에서 발생하기에, 정확하게 사전에 측정이 가능하며 다른 요소에서 들어오는 진동은 매우 작기 때문에 feedforward 제어를

Fig. 6 Experimental apparatus of active hybrid mount system

적용하였다. 또한, 압전작동기는 일반적으로 다음 식과 같이 캐패시터로 가정된다.

$$i = C \frac{du}{dt} \quad (3)$$

식 (3)에 나타낸 바와 같이, 압전작동기에 들어가는 전류(i)는 전압의 변화(du/dt)가 커지면 비례적으로 커지게 된다. 이렇게 커진 전류는 전력사용량의 증대로 이어지게 되어 고전압증폭기의 높은 사양을 요구하게 된다. 이 연구에서 제안된 능동 하이브리드 마운트 시스템은 진동원을 제외한 다른 요소에서 들어오는 진동이 매우 작지만, 이러한 진동들 중 특히 고주파수의 노이즈는 압전작동기에서 큰 전압의 변화를 초래하게 된다. 이에 이 연구에서는 FFT analyzer를 이용하여 진동원의 진동만을 고려함으로써, 고전압증폭기의 고사양을 지양할 수 있었다.

그리고 이러한 일련의 과정을 수행할 수 있도록 Fig. 5와 같이 one-chip board를 제작하여 제어실험에 적용하였다. 이 연구에서 제안된 one-chip board는 1개의 마스터 보드와 2개의 슬레이브보드로 구성된다. 각각의 보드는 중앙연산장치인 dsPIC30F6014 (Microchip, Inc) 마이크로 컨트롤러를 가지며, 12C 프로토콜에 의해 서로 통신하게 된다. 마스터보드는 입력되는 네 개의 가속도 성분을 FFT analyzing을 처리한 후 결과를 LCD모니터에 송출하여 사용자가 제어결과를 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다. 또한 슬레이브 보드는 진동원에서 들어오는 가속도 신호를 FFT analyzing을 연산한 후 식 (2)의 순수한 사인파를 생성하여 각각의 압전작동기에 입력될 수 있도록 하였다.

5. 진동제어 성능 평가

Fig. 6과 같이 능동제어 실험을 위하여 능동 하이브리드 마운트 시스템을 제작하였다. 상부평판은 4개의 능동 하이브리드 마운트로 지지되며 상부평판에는 셰이커가 부착되어 있어 마운트 시스템에 진동을 부하할 수 있도록 하였다. 상부평판의 중심점인 셰이커에 가속도계를 설치하여 측정된 가속도 신호가 one-chip board로 입력되어 제어입력이 계산될 수 있도록 하였다. 또한 상부평판에서 하부로의 진동차단을 평가하기 위하여 상부평판 4개의 모서리에 가속도계를 설치하여 제어 전과 후를 비교하였다. 또한 이 4개의 가속도 신호는 one-chip board로 입력되어 사용자가 실시간으로 제어결과를 알 수 있도록 하였다. 그리고 제어입력인 사인파의

(a) Uncontrolled

(b) Controlled

Fig. 7 Control results of the active hybrid mount system under 350 Hz excitation

크기와 위상차는 반복적인 실험을 통해서 최적의 계인을 도출하였다.

이 연구에서는 실제 함정에서 발생한다고 알려진 고주파수의 넓은 주파수 대역의 진동을 셰이커를

(a) Active mount 1

(b) Active mount 2

(c) Active mount 3

(d) Active mount 4

Fig. 8 Control results of the active hybrid mount system in frequency domain

통하여 모사하였다. Fig. 7은 350 Hz의 정형과 가진에 대해 상부평판 모서리 한 곳에서의 제어결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 가속도는 350 Hz에서 제어 전 8.32 m/s^2 에서 1.28 m/s^2 로 크게 감소한 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8에는 상부평판 각각의 모서리에서의 제어결과를 주파수영역에 나타내었다. Fig. 8의 결과를 통해 넓은 주파수대역에서 웨이커에서 발생한 진동이 feedforward 제어를 통해 효과적으로 저감된 것을 확인할 수 있었다. 예를 들면 370 Hz에서 진동이 94.6 %, 96.9 %, 98.7 %, 93.1 % 감소하였으며, 700 Hz에서는 47.7 %, 52.1 %, 78.6 %, 41.8 % 감소한 것을 확인하였다.

6. 결 론

이 연구에서는 관성형 작동기를 특징으로 하는 능동 하이브리드 마운트를 이용하여 합성용 마운트 시스템의 진동제어 실험을 수행하였다. 능동 하이브리드 마운트 설계 및 제작한 후, 이를 바탕으로 4개의 마운트로 이루어지는 능동 하이브리드 마운트 시스템을 구축할 수 있었다. Feedforward 제어기와 FFT analyzer를 이용한 제어를 설계하였으며, 제어기의 구현을 위해 one-chip board를 제작하였다. One-chip board를 이용하여 경제적이면서도 우수한 진동제어성능을 얻을 수 있었다.

후 기

이 연구는 지식경제부와 한국과학기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과입니다.

참 고 문 헌

(1) Moon, S. J., Ji, Y. J., Choi, S. B., Lee, H. Y., Kim, J. H. and Jung, W. J., 2008, A Study on Development of an Active Hybrid Mount for Naval Ships, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 45, No. 159, pp. 288~295.

(2) Yu, Y., Naganathan, N. G. and Dukkupati, R. V., 2001, A Literature Review of Automotive Vehicle Engine Mounting Systems, *Mechanism and Machine Theory*.

(3) Hong, S. R., Choi, S. B., Jung, W. J., Ham, I. B. and Kim, D. K., 2001, Vibration Control of an ER Mount Subjected to High Static Loads, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 242, No. 4, pp. 740~748.

(4) Choi, S. B., Hong, S. R., Sung, K. G. and Sohn, J. W., 2008, Optimal Control of Structural Vibrations Using a Mixed-mode Magnetorheological Fluid Mount, *International Journal of Mechanical Science*, Vol. 50, No. 3, pp. 559~568.

(5) Benassi, L. and Elliot, S. J., 2004, Active Vibration Isolation Using an Inertial Actuator with Local Force Feedback Control, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 276, No. 4/5, pp. 705~724.

(6) Lee, B. H. and Lee, C. W., 2009, Model Based Feed-forward Control of Electromagnetic Type Active Control Engine-mount System, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 323, No. 3/5, pp. 574~593.

(7) Nguyen, V. Q., Choi, S. M. and Choi, S. B., 2009, Sliding Mode Control of a Vibrating System Using a Hybrid Active Mount, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part C, Mechanical Engineering Science*, Vol. 223, No. 6, pp. 1327~1338.

(8) Elliott, S. J., Benassi, L., Brennan, M. J., Gardonio, P. and Huang, X., 2004, Mobility Analysis of Active Isolation Systems, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 271, No. 1/2, pp. 297~321.

(9) Park, D. H. and Choi, S. B., 2008, Active Vibration Control of UAV EO/IR Sensor Mount Using Piezoelectric Actuator, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 18, No. 12, pp. 1278~1285.