

능동 하이브리드 마운트 시스템의 진동제어 성능 평가 : 실험적 고찰

Evaluation of Vibration Control Performance for Active Hybrid Mount System : Experimental Investigation

오종석* · 최승복† · 벤큐오* · 문석준*** · 최상민***

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

Key Words : Active Vibration Control (능동진동제어), Piezostack Actuator (압전작동기), Hybrid Mount (하이브리드 마운트), Feedforward Control (앞먹임 제어)

ABSTRACT

In this work, an active hybrid mount using piezostack actuator and rubber element is manufactured, and its vibration control performance is evaluated via feedforward control. A hybrid active mount featuring inertia type of piezostack actuator is proposed and manufactured. After describing the configuration of the hybrid mount, a mount system is then constructed. To attenuate vibrations from vibration sources, a feedforward controller is experimentally implemented to the system. Vibration control performances are evaluated at each mount. Effective Control performances such as accelerations are obtained and presented in frequency domains.

1. 서 론

합정에 탑재되고 있는 각종 기계/전자 장비들은 외부 충격이나 엔진으로부터 오는 진동 및 소음이 빈번히 노출되어 있다⁽¹⁾. 이러한 진동 및 소음이 장비로 전달되는 것을 차단하기 위하여 합정의 엔진 하부에 다양한 형태의 마운트가 설치되어 있다. 합정용 마운트로서는 고무요소로 구성된 마운트와 와이어 로프형 마운트가 널리 이용되고 있다. 그 중 고무로 이루어진 탄성 마운트는 매우 우수한 진동 절연성능으로 한국 해군 합정에 탑재되는 장비에

널리 사용되고 있지만, 공진주파수 대역에서는 효과적인 진동절연의 한계를 가지고 있다⁽²⁾. 이러한 제약을 보완하기 위해 제안된 유체마운트는 공진 주파수 대역에서는 개선된 성능을 보이고 있지만, 고주파수 영역에서의 진동절연 성능은 우수하지 않은 것으로 보고되고 있다.

이와 같이 탄성재질이나 유체를 사용하는 수동형 마운트는 명확한 한계를 가지기에 최근에는 지능재료를 이용한 마운트에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다⁽³⁾. 이러한 연구로는 대표적으로 기존의 수동형 고무 마운트를 기본으로 하여 MR 유체(magneto-rheological fluid), ER 유체(electrorheological fluid)를 이용하여 마운트의 댐핑 변수들을 제어하는 반능동 마운트와, 압전작동기를 이용하여 시스템에 적절한 제어력을 인가해줄 수 있는 능동 마운트 등이 있다. 지능재료의 하나인 압전작동기는 전압 인가에 따른 힘 제어가 가능하고, 수 마이크로초 단위의 빠른 응답특성을 가지고 있는 장점이 있으며, 최근에는 큰 힘을 발생시킬 수 있는

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : seungbok@inha.ac.kr

Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 868-1716

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 한국기계연구원

*** (주)슈퍼센츄리

적층형 압전작동기를 활용한 능동 마운트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^(4,5). 그러나, 압전작동기만을 이용하는 마운트의 경우에는 저주파수의 큰 가진변위에 대해서 제어성능에 한계와 안정성 확보에 어려움을 가지므로 고무 요소와 압전작동기를 함께 이용하는 방향으로 연구가 활발히 진행되고 있다^(6,7). 하지만 지금까지 이루어진 많은 연구 중에서 실제 시스템에 대한 연구가 많이 수행되지 않은 실정이다.

본 연구에서는 고무와 압전작동기로 구성되는 능동 마운트를 이용하여, 효과적인 진동 제어 성능을 실험적으로 평가하였다. 하이브리드 마운트의 고무 요소는 상부 하중 지지 기능과 전주파수 대역에서의 진동절연을 위함이고, 압전작동기는 제어목표주파수영역인 고주파수대역에서 작은 가진 변위에 대한 진동제어를 수행하는 역할을 한다. 능동 하이브리드 마운트의 구조는 압전작동기와 관성질량인 마운트와 하부평판과 직렬로 연결되지 않는 관성형 작동기 형태로 마운트를 구성한 후 하이브리드 마운트의 단품을 제작하고, 이를 바탕으로 4 개의 능동 하이브리드 마운트로 지지되는 전체 마운트 시스템을 구축하였다. 실제 합성에서 발생하는 진동과 유사한 진동을 하이브리드 마운트시스템에 부하하기 위하여 펌프와 모터를 이용하였다. 그리고, Feedforward 제어기와 Frequency Estimator 를 설계한 후, 실제 산업현장에서 활용이 용이하도록 원칩보드를 제작하여 설계된 제어기와 원칩보드를 전체 마운트 시스템의 진동제어성능을 평가하였다.

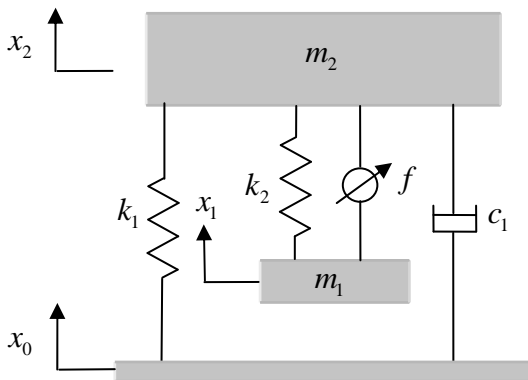


Fig. 1 Mechanical model of the active hybrid mount

2. 능동 하이브리드 마운트

본 연구에서는 제작된 능동 하이브리드 마운트를 고무부분과 압전작동기로 구성하였다. 압전작동기는 능동 하이브리드 마운트에 고주파수 영역에서 적절한 제어력을 제공할 수 있으며, 고무요소는 상부질량의 지지 기능역할과 전 주파수 영역에서의 진동절연 기능을 제공한다. 또한 예상치 못한 전자기 오작동으로 압전작동기가 제 기능을 못하는 경우에도 마운트가 일반 고무 마운트의 진동 절연 특성을 가질 수 있도록 압전 작동기를 관성질량과 연결하는 관성형 작동기를 제안하여 능동 하이브리드 마운트에 적용하였다⁽⁸⁾. Fig. 1 에는 마운트의 기계적 모델은, Fig. 2 에는 마운트의 구성을 나타내었다. Fig. 1로부터 마운트의 지배방정식을 유도하게되면 다음과 같다.

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

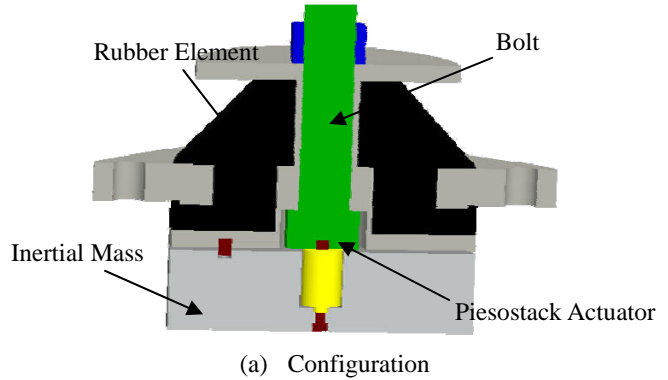


Fig. 2 Configuration of the active hybrid mount

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

Table 2 Parameters of Active Hybrid Mount System

Parameter	Value
Mass of equipment	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

k_1 과 c_1 은 마운트에서 고무요소를 나타내며, k_2 과 f 은 마운트에서 압전작동기를 뜻하며 m_1 은 관성질량을 뜻한다. f 는 부하전압 V 로 조절되는 압전작동기의 힘을 나타내며 압전작동기의 관계식을 구하면, 우선 다음과 같이 압전재료의 전기적인 상태와 기계적인 상태에 관한 식으로 표현할 수 있다.

$$D = \epsilon_{33}E + d_{33}T \quad (2)$$

$$S = d_{33}E + \frac{1}{c}T$$

여기서 D 는 전기변위 (Electric Displacement), d_{33} 은 압전전하상수 (Piezoelectric Charge Constant), ϵ_{33} 은 유전상수 (Dielectric Constant)를 나타낸다. 압전작동기의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_p = AT = AcS - Acd_{33}E \quad (3)$$

$$= \frac{Ac}{l}(x_2 - x_1) - Acd_{33}\frac{n}{l}V$$

$$= k_2(x_2 - x_1) - \alpha V = k_2(x_2 - x_1) - f$$

여기서 A 는 압전작동기의 단면적, l 은 압전작동기의 길이, f_p 는 압전작동기에 가해지는 힘, T 는 응력, S 는 변형률, n 은 압전작동기의 압전디스크가 적층된 갯수를 의미한다. 능동 하이브리드 마운트의 시스템 변수들은 Table 1 에 나타내었다. 본 연구에서

사용된 압전작동기는 Piezomechanik 사의 Pst 350bp/16/15/VS25 압전작동기를 사용하였다.

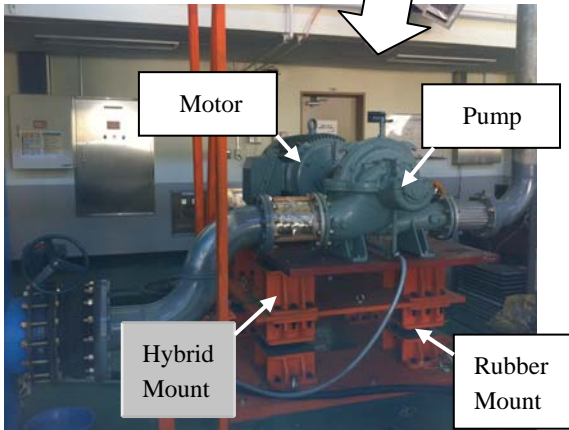
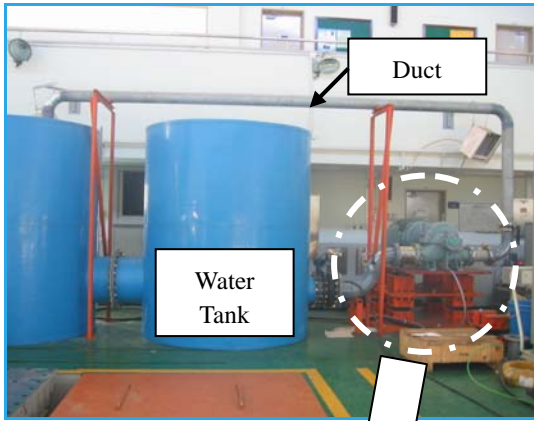
3. 능동 하이브리드 마운트 시스템

앞에서 제작된 능동 하이브리드 마운트를 바탕으로 4 개의 능동 하이브리드 마운트로 이루어지는 전체 시스템을 Fig. 3 과 같이 구축하였다. 본 연구에서는 마운트로 지지되는 장비 (Equipment)의 진동이 함정으로 전달되는 것을 차단하는게 목적이며, 장비는 4개의 능동 하이브리드 마운트로 지지된다. 장비는 강체로 가정하며 장비의 무게중심점에서의 1 개의 병진운동(z)과 2 개의 회전운동(θ, φ)을 가진다고 가정하였다. 또한 하부로 전달되는 전달력 및 가속도의 측정이 용이하도록 능동 하이브리드 마운트 하부에 하부 평판 (Base)을 추가하고, 이 하부 평판 또한 고무 마운트로 지지되도록 시스템을 구성하였다. 능동 하이브리드 마운트 시스템의 중요 변수들은 Table 2에 나타내었다. 실제 진동원인 장비를 모사하기 위하여 펌프와 모터를 이용하였다. Fig. 3과 같이, 모터를 이용하여 펌프를 작동시키게 되면, 펌프가 두 개의 수조탱크의 물을 덕트를 통해서 순환시킨다. 실제 함정에서는 100 Hz 이상의 고주파수의 진동이 발생한다고 알려져 있기에, 이러한 모터와 펌프를 이용한 장치 구성을 통하여 실제 함정과 유사한 고주파수의 진동을 발생할 수 있었다.

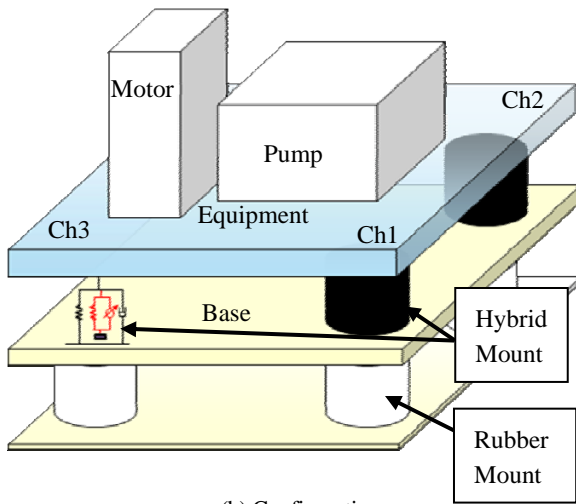
4. 제어기 구현 및 성능 평가

본 연구에서는 실제 함정에서 발생한다고 알려져 있는 100 Hz 이상의 주파수대역을 제어 목표 주파수 영역으로 설정하고, 이러한 진동제어를 위하여 Fig. 4 와 같이 Feedforward 제어기와 Frequency Estimator 를 설계하였다. Fig. 4 와 같이 장비에서 발생하는 진동을 가속도계로 측정된 후 Frequency Estimator 를 통해 FFT Analyzing 을 수행하여 수많은 주파수를 가지는 진동원 중 가장 큰 크기를 가지는 사인파의 주파수 (p)를 알아내어 해당주파수의 사인파만을 압전작동기에 입력할 수 있도록 하였다. 이때 다음 식과 같이 각각의 압전작동기에 입력되는 제어입력인 사인파의 크기와 위상차 (W_1, W_2)는 조정할 수 있도록 하였다.

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



(a) Photograph



(b) Configuration

Fig. 3 Active hybrid mount system

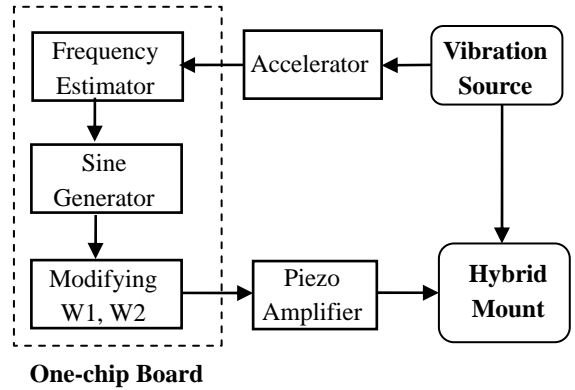


Fig. 4 Control strategy for active hybrid mount system

이와 같이 제어기를 구성한 이유는 마운트 시스템에서 발생하는 진동은 정확하게 사전에 측정이 가능하며, 다른 요소에서 들어오는 진동은 매우 작기 때문이다. 그리고 다른 요소에서 들어오는 진동은 상대적으로 매우 작고, 이러한 진동이 압전작동기에 동시에 입력되게 되면 다른 진동을 발생시킬 수 있기 때문에 Frequency Estimator를 사용하여 측정되는 가속도 성분 중 펌프에서 발생하는 진동만을 검출할 수 있도록 하였다. 그리고 이러한 일련의 과정을 수행할 수 있도록 Fig. 5와 같이 One-Chip Board를 제작하여 제어실험을 수행하였다. One-Chip Board 중 Master Board는 하부 평판(Base)의 가속도 신호를 검출하여 FFT Analyzing을 수행하도록 한 후 LCD 모니터에 제어 결과를 출력하여 사용자가 실시간으로 제어결과를 확인할 수 있도록 하였다. 또한 One-Chip Board 중 2 개의 Slave Board는 Frequency Estimator와 Sine Generator가 설계되어 있어 Feedforward 제어기를 수행할 수 있도록 하였다. 그리고 제작된 One-Chip Board의 성능을 확인하기 위하여 Fig. 6과 같이 실험장치를 구성하고 1200 Hz의 동일한 진동을 One-Chip Board와 dSPACE로 동시에 측정하여 두 측정결과를 비교하였다. Fig. 7에 나타난 것과 같이 One-Chip Board는 1200 Hz의 사인파를 정확히 측정하고 있는 것을 확인하였고 앞에서와 같이 설계된 제어기를 바탕으로 진동제어실험을 수행하였다. Fig. 8과 같이 4 개의 모서리중 하나의 제어실험결과를 주파수 영역에서 나타내었다. 결과 그래프와 같이 가속도의 여러 성분 중 제일 큰 요소인 180 Hz를 Frequency Estimator를 통해서 검출한 후 제어입력을 마운트 시스템에 인가하였다.



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

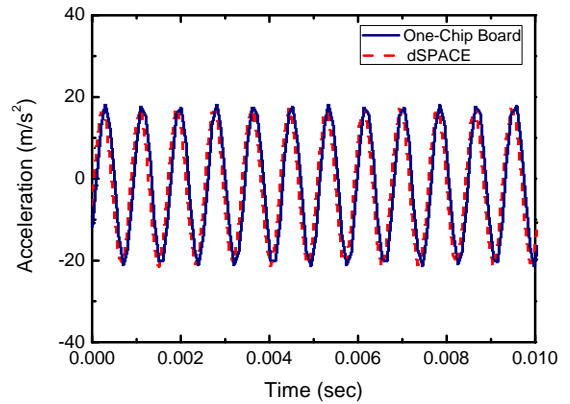
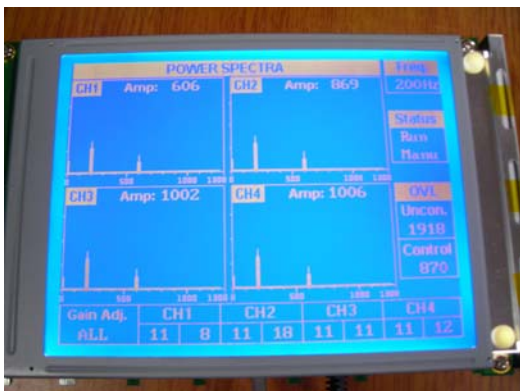


Fig. 7 Performance result of one-chip board



(b) LCD display of one-chip board

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

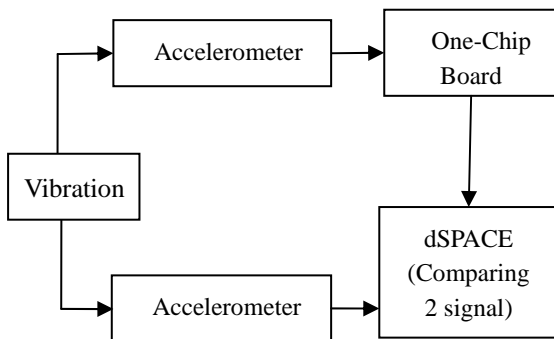


Fig. 6 Configuration of performance evaluation for one-chip board

그리고 압전작동기에 입력되는 제어입력인 사인파의 크기와 위상차는 반복적인 실험을 통해서 최적의 계인을 도출하였다. Table 3에는 모든 모서리에서 180 Hz 에서의 제어결과값을 나타내었다. 평균적으로 37%의 진동이 감소한 것을 확인할 수가 있었다.

5. 결 론

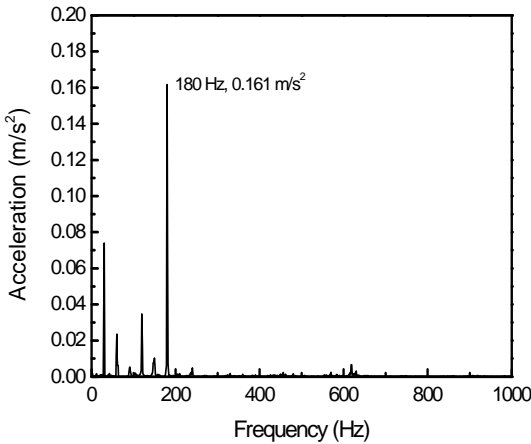
본 연구에서는 압전작동기를 사용한 능동 하이브리드 마운트를 이용하여 함정용 마운트 시스템의 능동 진동제어 실험을 수행하였다. 마운트 단품을 제작한 후, 이를 바탕으로 4개의 독립적인 마운트로 이루어지는 능동 하이브리드 마운트 시스템을 구축할 수 있었다. Feedforward 제어기와 Frequency Estimator 를 통하여 제어기의 설계가 간단하면서도 비교적 우수한 진동제어성능을 얻을 수 있었다. 향후 넓은 주파수 영역에서의 진동제어성능을 평가하기 위하여 셰이커를 활용한 진동제어실험을 수행할 예정이다.

후 기

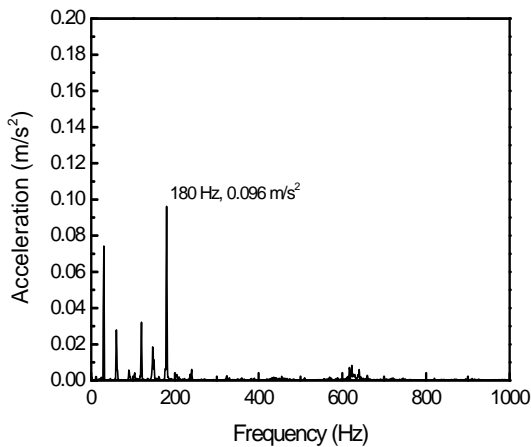
이 연구는 민군 겸용 기술사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

Table 3 Control Results of Active Hybrid Mount

	Uncontrolled (m/s^2)	Controlled (m/s^2)
Ch1	0.161	0.096
Ch2	0.074	0.047
Ch3	0.097	0.066
Ch4	0.139	0.083



(a) Uncontrolled (Ch1)



(b) Controlled (Ch1)

Fig. 8 Control results of active hybrid mount system

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., Dukkupati, R. V., 2001, "A Literature Review of Automotive Vehicle Engine Mounting systems", Mechanism and Machine Theory, Vol. 36, No. 1, pp. 123~142.
- (3) Kim, S. H., Hong, S. L. and Choi, S. B., 2002, "Active Vibration Control of a Beam Structure Using Hybrid Mount", Proceedings of the KSNVE Autumn Conference, pp. 440~445.
- (4) Kim, J. S., 1992, "Active Vibration Control of Flexible Beam Using Piezoelectric Actuator", Transaction of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 2, No. 3, pp. 173~180.
- (5) Takayoshi, K., Takafumi, F., Takayoshi, H., Takeo, A., Nobuyoshi, M., Satoru, A. and Kohtaro, T., 1997, "Active Vibration Control of Frame Structure with Smart Structure Using Piezoelectric Actuators (Vibration Control by Control of Bending Moment of Columns)", Smart Material and Structures Vol. 6, pp. 448~456.
- (6) Park, D. H. and Choi, S.B., 2008, "Active Vibration Control of UAV EO/IR Sensor Mount Using Piezoelectric Actuator", Transaction of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, vol. 18, no. 12, pp. 1278~1285.
- (7) Lee, D. Y. and Choi, S. B., 2009, "Control of Active Engine Mount System Featuring MR Fluid and Piezostack via HILS", Transaction of the Korea Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 122~128.
- (8) Benassi, L., Elliot, S. J., and Gardonio, P., 2004, "Active Vibration Isolation Using an Inertial Actuator with Local Force Feedback Control", Journal of Sound and Vibration, Vol. 276, No. 1/2, pp. 157~179