

전자기 작동기와 고무를 이용한 하이브리드 마운트의 설계 및 진동제어 응용

Design of Hybrid Mount Using Rubber and Electromagnetic Actuator with Application to Vibration Control

팽 용 석* · 최 승 복†
Yong-Seok Paeng, Seung-Bok Choi

Key Words : Hybrid Mount(하이브리드 마운트), Electromagnetic Actuator(전자기 작동기), Sliding Mode Controller(슬라이딩 모드 제어기)

ABSTRACT

This paper presents an active vibration control of a 1-DOF system using a hybrid mount which consists of elastic rubber and electromagnetic actuator. After identifying stiffness, damping properties of the elastic rubber and electromagnetic element, a mechanical model of the hybrid mount is established. The mount model is then incorporated into the 1-DOF system and the governing equation of motion is obtained in a state space. A sliding mode controller is designed in order to actively attenuate the vibration of the system control responses such as acceleration and transmitted force of the 1-DOF system are presented in time domain.

1. 서 론

오늘날 산업기술의 발달로 인한 엔진이나 기계류의 고출력화 추세는 종전보다 현격히 높은 소음과 진동 문제를 야기시키며, 이 소음과 진동은 기계의 성능과 수명에 큰 영향을 미친다. 그러므로 산업 전반에서 사용되고 있는 기계와 펌프류에서 발생하는 진동을 감소시키기 위하여 보다 효과적인 진동절연성능을 가진 마운트가 요구된다. 현재 산업기계류의 진동절연에 널리 사용되고 있는 고무마운트는 댐핑과 강성을 가진 고무를 주 재료로 한다. 수동형인 고무마운트는 작은 댐핑으로 인해 고주파수의 비공진 주파수 대역에서는 우수한 진동절연성능을 보이지만 공진주파수 대역에서는 비공진 주파수 대역에서와 달리 진동절연의 성능저감을 보인다.⁽²⁾ 이렇듯 고무마운트는 고주파수 영역의 진동절연에는 효과적이거나, 저주파수 영역에서는 성능요구조건을 만족하지 못한다. 예를들어 펌프나 자동차 엔진과 같은 기계류의 저주파수 영역에서는 가진 변위와 충격력이 크며, 시스템의 공진이 존재한다.^(1,7) 따라서 급격한 움직임을 제한하기 위하여 큰 강성이 필요하며 시스템으로 전달되는 충격력을 줄이기 위하여 큰 감쇠력이 필요

하다. 그러나 고무마운트로는 이러한 조건을 만족시킬 수 없다. 그러므로 고무마운트의 비공진 대역에서의 성능을 향상시키기 위한 새로운 메커니즘이 필요하다.

본 연구에서는 고무마운트와 전자기 작동기를 결합한 능동하이브리드 마운트를 제안한다. 전자기 작동기는 인가전류의 양에 따라 발생력의 세기가 조절되는 장치로 대부분 코일(coil), 플런저(plunger), 케이스(case), 코어(core)로 구성되며 전류인가시 코일을 둘러싸고있는 회로에 자속이 흐르게 되어 플런저에 자기력을 발생시켜 전자기 작동기를 작동하게 된다. 외부에서의 가진력에 따른 전류의 양을 제어 함으로써 발생하는 진동을 제어할 수 있다.⁽⁴⁾ 하이브리드 마운트는 전자기 작동기와 탄성고무재료를 병렬로 연결하여 고무재료는 하중을 지지하는 역할을 하고 전자기 작동기는 진동절연의 역할을 하게 된다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 고무마운트의 동특성을 측정하였고, 하이브리드 마운트가 고려된 시스템의 수학적 지배방정식을 유도하였으며, 효과적인 진동제어를 위하여 시스템의 불확실성을 고려한 강건 슬라이딩모드 제어기(sliding mode controller)를 설계하였다. 제어기를 통하여 시스템의 제어성능을 변위, 가속도, 전달력의 감소 측면에서 평가하였다.

† 책임저자: 정희원, 인하대학교 기계공학과
E-mail : seungbok@inha.ac.kr
Tel : (032) 860-7319, Fax : (032) 898-1716

* 인하대학교 대학원 기계공학과

2. 하이브리드 마운트 시스템 모델링

본 연구에서는 기존의 고무마운트에 능동요소인 전자기 작동기를 결합하여 하이브리드 마운트를 구성하였다. 전자기 작동기는 대부분 코일을 중심으로 자기력에 의해 움직이는 플런저(plunger)와 바깥을 감싸고 있는 케이스 그리고 코일 안의 코어에 해당하는 연자성재료로 자기회로가 형성되어 진다.^(5, 6)

전자기 작동기의 내부코일에 전류가 인가되면 코일을 둘러싸고 있는 자기회로에 자속이 흐르게 되고 자기회로의 자속은 플런저에 자기력을 발생시켜 전자기 작동기를 동작하게 한다. 전류자체는 하나의 자석이므로 전류와 자기장은 서로 힘을 작용하게 하는데, 이 힘을 전자기력이라 한다. 도선에 흐르는 전류의 방향과 자기장의 방향이 수직인 경우, 오른손을 펴고 오른손의 엄지는 전류(I)의 방향, 나머지 손가락은 자기장(B)의 방향으로 향하게 하면 손바닥을 향하는 방향은 전류가 자기장에서 받는 힘(F)의 방향이 되며 이를 "오른손 법칙" 이라 한다. 자기장과 전류가 수직일 때 전류가 자기장에 받는 힘의 크기는 $F=BIL$ 로 나타낼 수 있다.⁽³⁾

본 연구에서 제안한 하이브리드 마운트에 대한 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다. 하이브리드 마운트는 고무마운트가 중앙에 배치되고 그 주위를 총 4 개의 전자기 작동기가 병렬로 결합된 형태이다. 하이브리드 마운트의 모델링에서 전자기 작동기의 발생력과 고무마운트의 강성과 댐핑력만을 이용하여 모델링이 가능하다. 이것은 곧 기존 고무마운트의 특성을 변화시키지 않고 우수한 진동제어 성능을 가질 수 있다는 장점을 제공한다.

하이브리드 마운트의 지배방정식을 도출하기 위하여 고무마운트와 전자기 작동기 각각에 대한 모델링을 수행하였다. 여기서, k_r 과 b_r 은 고무의 강성과 댐핑력을 나타내며 각각 103571 N/m 와 321.81 Ns/m 의 값을 가진다.

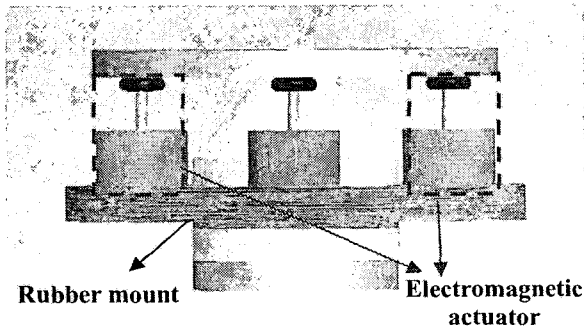


Fig. 1 Configuration of the hybrid mount

본 연구에서 사용된 전자기 작동기의 설계를 Fig. 2 에 나타내었다. 전자기 작동기의 발생력은 자기장 안에 전류를 흘려보내면 힘을 발생한다는 플레밍의 법칙을 근거로 설계하였다. 이를 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_a = B \cdot I \cdot L \cdot N \quad (1)$$

식 (1)에서 B는 자기장의 세기(Tesla), I는 전류의 세기(A), L은 자기장을 수직으로 통과하는 전선의 길이이며, N은 코일을 감은 수 이다. 따라서 작동기의 발생력은 식 (1)를 통해 구할 수 있다.⁽³⁾ 하이브리드 마운트의 기계적 모델은 고무마운트와 식 (1)의 전자기 작동기를 고려하여 Fig. 3 과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 하이브리드 마운트의 상태 공간 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{\Gamma}z(t) \quad (2)$$

여기서,

$$\mathbf{x}(t) = [x_1 \quad x_2]^T, u(t) = F_a, \mathbf{z}(t) = [z_1 \quad z_2] \quad (3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_r/m & -c_r/m \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k_r/m & -c_r/m \end{bmatrix} \quad (4)$$

이고 z_b 는 베이스의 가진 변위이며, m 은 고무마운트의 상부질량을 나타낸다. Fig. 2 에서 플런저 주위에 코어가 상부와 하부에 감겨져 있음을 볼 수 있다. 여기서 상부와 하부의 코일의 감은 방향은 서로 다르며, 이로 인해 상부 코일전류를 흘려주면 윗 방향으로 유도전류가 발생하게 된다. 이때 발생한 유도 전류에 의해 플런저가 전자석이 되어 상판(upper plate)이 윗 방향으로 작동하게 된다. 반면 하부코일에 전류를 흘려주면 유도전류에

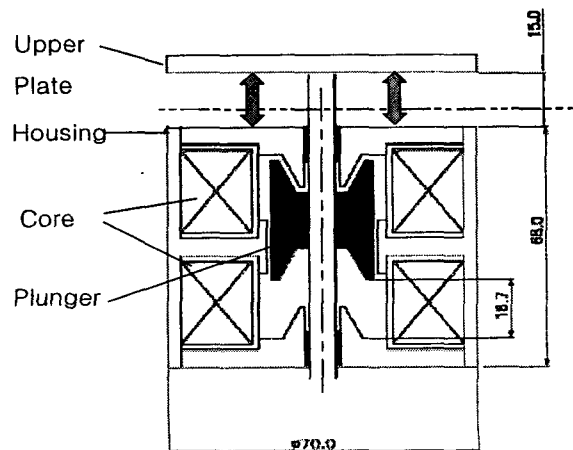


Fig. 2 Design of electromagnetic actuator

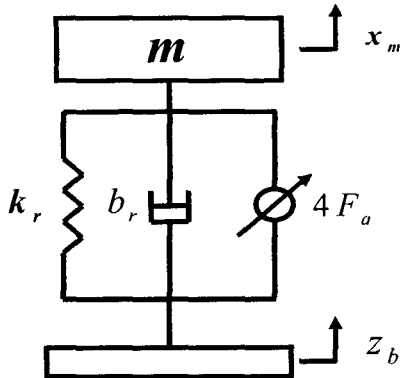


Fig. 3 Mechanical model of the hybrid mount system

의하여 상판은 아래방향으로 작동한다.

3. 제어기 설계

본 논문에서는 시상수와 시스템 불확실성을 고려한 하이브리드 마운트의 발생력을 제어하기 위하여 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다. 하이브리드 마운트의 제어입력을 구하기 위하여 다음과 같이 슬라이딩 서피스를 설정한다.

$$s = \mathbf{Gx}(t) \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{G} (= [g_1 \ g_2])$ 는 슬라이딩 서피스의 기울기이며 슬라이딩 서피스($s=0$)에서 슬라이딩모드가 존재하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s(t)^2 \leq -\eta |s(t)| \quad (6)$$

위 식(6)을 만족하는 슬라이딩 모드 제어기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(t) = -(\mathbf{GB})^{-1}(\mathbf{GAx}(t) + k \cdot \text{sgn}(s(t))) \quad (7)$$

여기서 k 는 불연속 게인(gain)을 나타낸다. 식(7)의 슬라이딩모드제어기는 다음과 같이 식(6)의 슬라이딩모드 조건을 만족한다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} s(t)^2 &= s(t)\mathbf{G}\dot{\mathbf{x}}(t) \\ &= s(t)\{\mathbf{GAx}(t) - \mathbf{GB}(\mathbf{GB})^{-1}\mathbf{GAx}(t) \\ &\quad - \mathbf{GB}(\mathbf{GB})^{-1}k \text{sgn}(s(t) + \mathbf{GFz}(t))\} \\ &= s(t)(-k \text{sgn}(s(t)) + \mathbf{GFz}(t)) \leq -\eta |s(t)|, (\eta > \mathbf{GFz}(t)) \end{aligned} \quad (8)$$

이러한 불연속 제어기는 채터링을 발생시키므로 정해진 경계조건 영역 안에서 불연속 제어를 연속 제어기로 근사화하여 다음과 같은 포화함수로 대체한다.⁽²⁾

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s/\varepsilon & \text{for } |s/\varepsilon| \leq 1 \\ \text{sgn}(s) & \text{for } |s/\varepsilon| > 1 \end{cases} \quad (9)$$

4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안한 하이브리드 마운트에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 하이브리드 마운트 시스템의 질량이 50Kg 이고 강성은 103571N/m 일 때 시스템의 공진주파수는 7.244Hz 이다. 시스템의 가진 주파수를 공진주파수로 입력하고 가진폭은 0.03mm 로 하였다. 그리고 4 개의 전자기 작동기의 발생력을 40N 으로 가정하여 고무마운트의 공진점과 저주파수 영역에 대한 제어를 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 모델 변수를 Table 1에 나타내었다. Fig. 4 에서 Passived 는 전자기 작동기에 제어입력을 부하지 않았을 때의 전달력에 대한 응답이며, Controlled 는 제어 입력을 부하 하였을 때의 응답이다. 공진주파수인 7Hz 에서 제어하지 않은 상태에서의 전달력은 약 27N 으로 측정되었고 제어한 상태에서의 전달력은 약 4N 으로 측정되었다. 전달력에 대한 입력대비 출력력을 계산해보면 16dB 이상의 전달력이 감소한 것으로 나타난다. 이와 같은 시뮬레이션 결과는 전자기 작동기의 발생력으로 상부로 전달되는 힘이 감소한 것을 말한다. Fig. 5 는 시간에 따른 변위 응답을 나타내었다. 0~2 초간은 제어입력이 없는 상태로 측정하고 2 초 후부터 제어입력을 넣는 방법으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5 를 보면 2 초 되었을 때 제어입력이 출력되어 변위가 줄어드는 것을 볼 수 있다. Fig. 6 에서는 시간에 따른 가속도를 나타내었다. Fig. 5 에서 본 변위와 마찬가지로 가속도 역시 줄어들었음을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 7 에서는 하부의 가진에 의한 시스템 상부로의 전달력을 나타내었다. Fig. 5 와 같이 공진점에서 전달력에 대한 차단률이 16dB 감소하였음을 알 수 있다. Fig. 8 에서는 전자기 작동기에 입력되는 전류의 양을 나타내었다. 전자기 작동기가 40N 의 발생력을 낼 때 입력되는 전류의 양은 3A 이다. Fig. 8 에서 2 초가 지난뒤 제어입력이 들어갈 때 전달되는 힘이 약 4N 임을 볼 수 있다. 그렇다면 이때 입력되는 전류의 양은 0.3A 가 되어야 하며 그 결과를 Fig. 7 과 Fig. 8 에서 확인할 수 있다.

Table 1 Model and control parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
k_r [N/m]	103571	k	108.5
b_r [Nsec/m]	321.82	ε	0.021
m [kg]	50	B [Tesla]	0.3
N(n)	600	L [m]	0.03

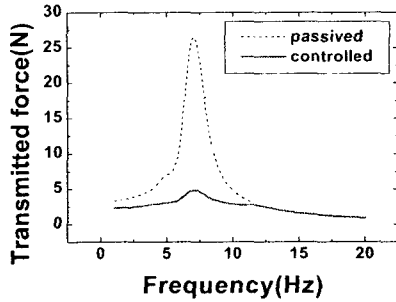


Fig. 4 Frequency vs. Transmitted force

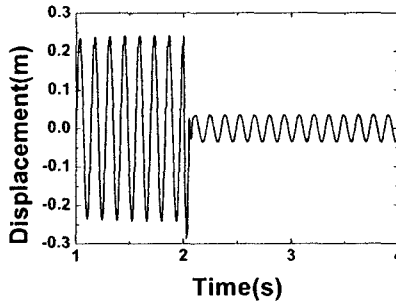


Fig. 5 Time vs. Displacement

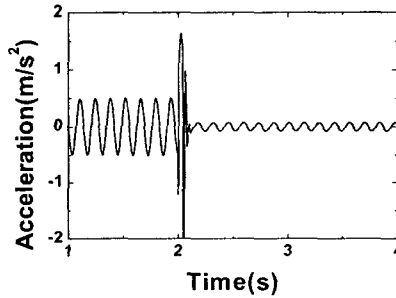


Fig. 6 Time vs. Acceleration

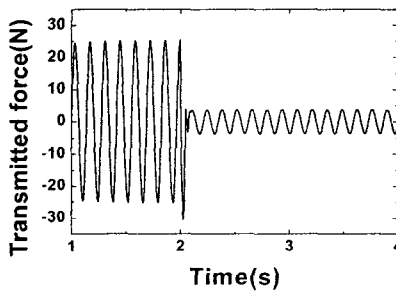


Fig.7 Time vs. Transmitted force

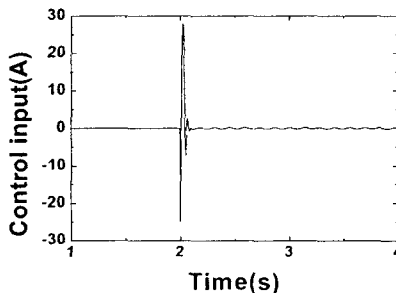


Fig. 8 Time vs. Control input current

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 기계 및 펌프류에서 발생하는 진동 감소를 위해 보다 효과적인 진동절연성능을 갖는 하이브리드 마운트를 제안하였다. 기존의 고무마운트는 작은 댐핑으로 인해 고주파수의 비공진 주파수 대역에서는 우수한 진동절연성능을 보이지만 공진주파수 대역에서는 비공진 주파수 대역에서와 달리 진동절연의 성능저감을 보인다. 이를 해결하기 위하여 저주파수 대역의 큰 가진변위와 충격력에 강한 전자기 작동기를 결합한 하이브리드 마운트를 제안하였다. 그리고 하이브리드마운트가 고려된 1 자유도 시스템의 수학적 지배방정식을 유도하였으며, 효과적인 진동제어를 위해 외란에 강건한 슬라이딩모드 제어를 설계하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 시스템 상부의 변위, 가속도와 전력이 감소되는 것을 확인하였다. 이로써 제어기의 성능이 확인되었으며 기존의 수동형 고무마운트에 비해 진동절연의 효과가 우수함이 입증되었다.

후 기

본 연구는 민군 겸용 기술사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 깊은 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) S. Ikai, K.Ohsawa and K. Nagaya, 2000, "Electromagnetic Actuator and Stacked Piezoelectric Sensor for Controlling Vibration of a Motor on a Flexible Structure", *Journal of sound and vibration*, pp.393~409
- (2) 김승환, 홍성룡, 최승복, 2003, "하이브리드마운트를 이용한 빔 시스템의 능동진동제어", *한국소음진동공학회 논문집*, 제 13 권, 제 7 호, pp. 524~531
- (3) 이보하, 이종원, 2004, "Design of Compact Electromagnetic Actuator with Permanent Magnet for High Efficiency", *한국과학기술원*,
- (4) 허신, 하성도, 최강운, 1995, "전자기 액츄에이터에 의한 2 자유도 모델의 능동진동제어", *한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 252~257
- (5) 김기현, 권대갑, 2005, "영구 자석과 전자석의 상호작용을 이용한 초정밀 양방향 구동기 설계", *한국정밀공학회지*, 제 22 권, 제 9 호.
- (6) H. Gerth, 2004, "An Electromagnetic Actuator for Active Vibration Control without Permanent magnet", *International Conference on New Actuators*.
- (7) K. Kowalczyk, F. Svaricek, C. Bohn, H.-J Karkosch, 2004, "Active Control of Engine Induced Vibrations" *International Conference on New Actuators*.
- (8) Ben Hanson, Martin Levesely, 2004, Self-Sensing Applications for electromagnetic actuator, Sensors and Actuators, A 116 pp. 345~351