

압전 하이브리드 마운트의 진동제어 성능에 대한 실험적 고찰

한영민

아주자동차대학 자동차계열 교수

Experimental Investigation on Vibration Control Performances of the Piezoelectric Hybrid Mount

Young-Min Han

Professor, Division of Automotive Engineering, Ajou Motor College

요약 본 연구에서는 자동차 엔진에 적용되는 고무마운트의 성능을 극대화하여 시동초기 진동특성을 개선하기 위해 능동형 하이브리드 마운트를 제안하고 진동절연 성능을 실험적으로 고찰하고자 한다. 제안된 하이브리드 마운트는 수동형 고무요소와 능동형 압전작동기로 구성되었으며, 동적 특성과 제어력의 실험적 고찰을 통해 하이브리드 마운트가 제작되었다. 수직방향의 진동을 고려하여 관성질량을 갖는 압전-고무 하이브리드 마운트의 동적 지배방정식을 수학적으로 모델링하였으며 상태 공간 방정식으로 표현하였다. 본 연구에서는 진동을 절연하기 위해 강건한 슬라이딩 모드 제어가 구성되어 진동제어 실험에 적용되었다. 마지막으로 넓은 주파수 영역에서 진동제어 성능을 실험적으로 고찰하였으며 주파수 영역에서의 전달율과 시간영역에서 진동절연 성능을 평가하였다.

주제어 : 하이브리드 마운트, 압전재료, 관성형 작동기, 차량엔진, 슬라이딩모드 제어기, 진동제어

Abstract A hybrid mount featuring rubber element and piezoelectric actuator is devised to reduce vibration when starting a vehicle engine. As a first step, a passive mount adopting rubber element is manufactured and its dynamic characteristics are experimentally evaluated. After evaluating dynamic characteristics of the manufactured inertial piezoelectric actuator, the proposed hybrid mount is then established by integrating the piezoelectric actuator with the rubber element for performance improvement at non-resonant high frequencies. A mathematical model of the established active vibration control system is formulated and expressed in the state space form. Subsequently, sliding mode controller (SMC) is designed to attenuate the vibration transmitted from the base excitation. Finally, control performances of the proposed hybrid mount are evaluated such as transmissibility in frequency domain and time responses.

Key Words : Hybrid Mount, Piezoelectric Material, Inertial Actuator, Vehicle Engine, Sliding Mode Controller, Vibration Control

*Corresponding Author : Yong-Min Han(ymhan@motor.ac.kr)

Received September 14, 2020
Accepted November 20, 2020

Revised November 4, 2020
Published November 28, 2020

1. 서론

오늘날 자동차 기술의 발달로 인한 차량의 경량화와 더불어 엔진의 고효율화가 이루어지고 있으며, 환경오염에 대한 관심이 급증함에 따라 엔진 배출가스 저감 및 연비 개선하기 위한 노력이 활발히 이루어지고 있다[1]. 이러한 과정에서 엔진과 같은 구조물에서 필연적으로 발생하는 진동 문제는 점점 악화되고 있다. 따라서 엔진으로부터 야기되는 자동차의 소음 및 진동 문제를 해결하기 위해 엔진마운트의 설계 및 제어를 위한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다[2,3].

엔진마운트는 엔진과 차체를 연결하는 부품으로 엔진의 지지와 더불어 차체로 전달되는 진동을 절연하는 역할을 한다. 가장 일반적인 방법은 손실계수가 큰 점탄성 물질을 이용하여 진동을 절연시키는 방법이다. 대표적인 점탄성 물질로는 고무가 있다. 기계류 진동절연에 널리 적용되고 있는 고무마운트는 작은 강성과 댐핑으로 인해 고주파수의 비공진 주파수 대역에서는 우수한 진동절연의 성능을 갖지만 공진 영역에서 진동 절연의 한계를 보인다. 또한 유체 마운트는 유체의 점성과 관성트랙을 이용하여 공진 주파수 대역에서 우수한 진동절연 효과를 얻을 수 있는 반면에 비공진 주파수 성능이 저하된다 [4].

이러한 수동형 마운트의 한계를 극복하기 위하여 지능 재료를 활용한 마운트의 연구가 진행되고 있다 [5,6]. ER(electro-rheological)

또는 MR(magneto-rheological) 유체를 이용한 반능동형 마운트는 전기장 또는 자기장을 이용하여 유동저항을 발생 시킴으로써 연속적인 댐핑력의 조절을 통한 효과적인 진동절연이 가능하다[7]. 압전작동기는 다양한 분야에 활용되고 있으며[8,9], 특히 압전스택 마운트는 고주파 영역에서 능동적인 제어력을 제공함으로써 효과적인 진동절연이 가능하다[10,11].

특히 최근에는 정차 시 엔진을 꺾다가 재출발 시 자동으로 엔진의 시동이 걸리게 하는 ISG (Idle Stop and Go) 시스템을 통해 도심주행이나 교통체증이 있는 도로 상황에서 공회전 시간을 줄이기 위한 노력이 이루어지고 있다. 이러한 시스템은 배출가스 저감이나 연비 개선에는 도움이 되고 있으나 차량 시동 이후 엔진이 아이들 상태에 이르기까지 엔진 진동이 가장 큰 구간에 반복적으로 노출되는 단점을 안고 있다[12].

본 연구에서는 자동차 엔진에 적용되는 수동형 고무마운트의 성능을 극대화하여 아이들상태에 이르기 이전 시동 초기 진동특성을 개선하기 위해 고무와 압전작동기를

결합한 능동형 하이브리드 마운트의 진동절연 성능을 실험적으로 고찰하고자 한다. 제안된 하이브리드 마운트는 수동형 고무요소와 능동형 압전작동기로 구성되며 고무요소와 관성형 압전작동기의 동적특성을 조사하고 실험을 통하여 검증한 다음 이 두 요소를 결합한 하이브리드 마운트가 제작되었다. 피스톤의 상하진동에 의해 주요하게 발생하는 수직방향의 진동을 고려하여 관성질량을 갖는 압전작동기와 고무요소로 구성된 하이브리드 마운트의 동적 지배방정식을 모델링하였으며 상태 공간 방정식으로 표현하였다. 본 연구에서는 진동을 절연하기 위해 슬라이딩 모드 제어가 구성되어 진동제어 실험에 적용되었다. 마지막으로 넓은 영역의 주파수 범위에서 진동 제어 성능을 실험적으로 고찰하였으며 주파수 영역과 시간 영역에서 진동절연 성능을 평가하였다.

2. 하이브리드 마운트

2.1 고무 마운트

본 연구에서는 충분한 작동력과 변위를 확보하기 적합한 적층형 압전작동기와 수동형 고무요소를 이용하여 하이브리드 마운트를 구성하였다. 하이브리드 마운트에서 고무요소는 정적하중을 지지하고 고주파수에서 진동전달을 억제하는 역할을 한다. Fig. 1은 하이브리드 마운트를 위해 실제 상용 마운트의 크기를 고려하여 제작된 고무요소를 보여주며, 높이와 직경은 각각 45mm, 110mm이다. 본 연구에서 도입된 고무요소의 기계적 특성은 실험을 통해 측정되었으며, 먼저 Fig. 2와 같이 고무요소의 주파수 응답특성이 실험적으로 도출되었으며, 가진 변위와 전달력으로부터 계산된 고무요소의 동적강성은 Fig. 3과 같다. 이 때 동적 강성은 대표적인 점탄성모델인 Voigt 모델로 표현할 수 있으며, 다음과 같이 수학적으로 표현된다.

$$k_d(j\omega) = k_r + j\omega b, \quad (1)$$

여기서 $\omega (= 2\pi f)$ 는 가진 주파수이다. 따라서 Voigt 모델의 변수 k_r 과 b_r 은 각각 130.4kN/m와 152.4N/ms이다.

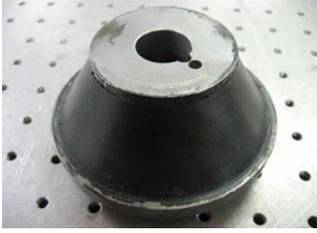


Fig. 1. Rubber element

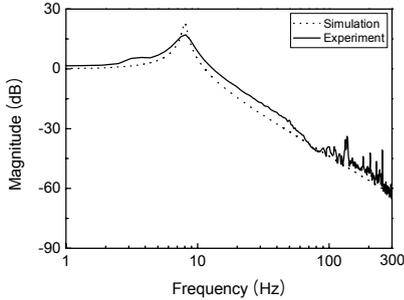


Fig. 2. Frequency response of the rubber element

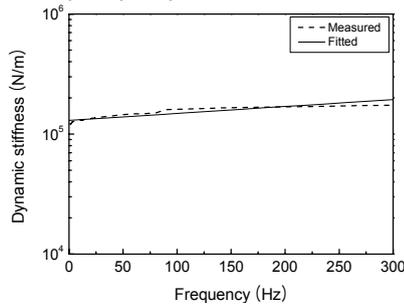


Fig. 3. Dynamic stiffness of the rubber element

2.2 압전 작동기

압전작동기를 구성하는 압전재료는 전기장을 인가했을 경우 그에 해당하는 변형이 발생하는 역압전효과를 이용하고 있다. 이러한 압전작동기의 압전효과 혹은 역압전효과는 다음과 같이 표현된다[11].

$$\begin{aligned} D &= d_{33}T + \varepsilon_{33}^T E \\ S &= \frac{1}{c}T + d_{33}E \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 D 와 S 는 각각 압전변위텐서와 스트레인텐서이며, T 와 E 는 각각 스트레스텐서와 전기장이다. 그리고 d 는 압전재료 상수, ε^T 는 유전율, c 는 컴플라이언스이다. 이로부터 작동력 $f_p(t)$ 는 다음과 같다[12].

$$f_p(t) = \frac{Ac}{l}\delta(t) - f_{ex}(t) = \frac{Acd_{33}}{l}V(t) \quad (3)$$

여기서 $V(t)$ 는 입력전압, A 는 작동기 단면적, f_{ex} 는 프리로드, l 은 작동기의 길이를 나타낸다.

고무 요소를 기본으로 진동 및 충격을 흡수하고 능동 작동기를 이용하여 진동 및 소음원에 적절한 제어력을 부가하여 진동 및 소음을 저감하는 능동 하이브리드 마운트는 능동 작동기와 수동 요소인 고무의 연결 방식에 따라 관성형태(Inertial type), 병렬형태(Parallel type), 직렬형태(Series type)로 분류할 수 있다[13]. 본 연구에서 적용된 직렬로 연결된 형태(Series type)는 능동 작동기가 가진원과 매개질량 사이에 위치하므로 고주파수 영역에서 작동기의 힘이 구조물로 효과적으로 전달될 수 있는 장점이 있다. 관성력을 발휘하는 매개질량을 크게 한다면 보다 효과적인 작동력의 전달할 수 있다.

본 연구에서는 Fig. 4와 같이 관성질량과 스택형 압전 작동기로 구성되는 관성형 압전작동기를 적용하였다. 따라서 전기장 인가에 따른 압전효과에 의해 발생한 힘은 관성질량에 작용하고 작동기의 반대 방향으로 관성력에 의한 반작용이 전달된다. 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같은 운동방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_1(t) + k_p x_1(t) + f_a(t) &= 0 \\ F_i(t) &= m\ddot{x}_1(t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 x_1 은 관성질량(m)의 변위이며, $F_i(t)$ 는 관성력이다. 그리고 k_p 는 압전작동기의 강성이며 60MN/m이다. 관성질량의 무게는 마운트 시스템에서 요구되는 최대 150N의 제어력을 고려하여 관성질량을 1.2kg로 결정하였다. Fig. 5는 작동력을 측정된 결과를 주파수 영역에서 나타낸 것이다. 이 때 작동력 $f_a(t)$ 는 다음과 같이 입력 전압의 함수 나타낼 수 있다.

$$f_a(t) = \alpha_p V_p(t) \quad (5)$$

여기서 비례계수 α_p 는 2.4N/V이다.

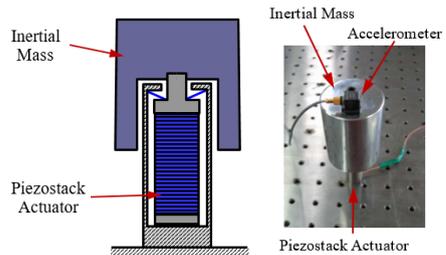


Fig. 4. Inertial type of piezostack actuator

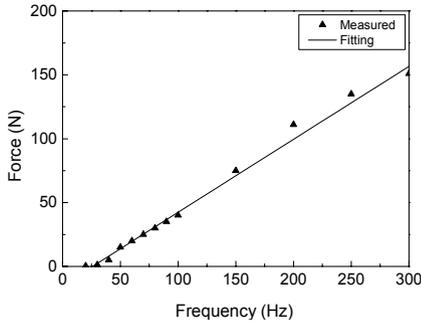


Fig. 5. Measured actuating force of the actuator

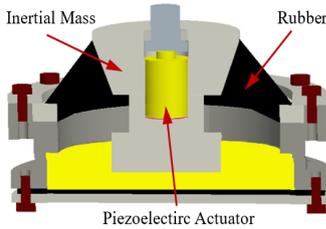


Fig. 6. Schematic configurations of the hybrid mount

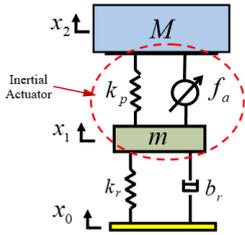


Fig. 7. Mechanical model of the system

2.3 동적 모델링

Fig. 6은 고무요소와 압전작동기가 직렬로 구성된 하이브리드 마운트의 개략적인 구성도를 나타낸 것이다. 스택형 압전 작동기의 상부는 하중질량에 고정되어 있고 하부는 관성질량을 거쳐 고무요소와 연결되어 있다. 그리고 하이브리드 마운트는 전자기 가진기(Model VS-200-2, IMV, Japan)와 하중 질량 사이에 위치하게 된다. 따라서 마운트 하부의 가진기에 의해 발생하는 진동을 절연하기 위해 압전작동기를 구동하고 이에 따라 작동력이 하중질량에 전달된다.

제안된 하이브리드 마운트의 역학적 모델은 Fig. 7과 같으며, 동적 지배방정식은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 M\ddot{x}_2(t) &= -k_p(x_2(t) - x_1(t)) + f_a \\
 m\ddot{x}_1(t) &= -b_r(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_0(t)) - k_r(x_1(t) - x_0(t)) \\
 &\quad + k_p(x_2(t) - x_1(t)) - f_a
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 M 과 m 은 각각 하중질량과 관성질량을 나타내며, $x_0(t)$, $x_1(t)$, $x_2(t)$ 는 각각 가진변위, 관성질량 및 하중질량의 변위를 나타낸다. 그리고 b_r 과 k_r 은 고무요소의 감쇠계수와 강성이며, k_p 와 f_a 는 압전작동기의 강성과 작동기에 발생하는 힘을 나타낸다.

3. 제어기 설계

본 연구에서는 고무요소와 스택형 압전작동기로 구성된 하이브리드 마운트의 진동제어를 위해 강건 제어알고리즘이 도입되었다. 먼저 제어대상이 되는 시스템의 상태 모델로 도출되었으며 진동을 줄이기 위해 슬라이딩모드 제어기가 설계되었다. 따라서 식 (4)와 (5)의 제안된 하이브리드 마운트의 동적 모델은 다음과 같이 상태공간 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{\Gamma}d(t) \\
 y(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \\
 \mathbf{x}(t) &= [x_1(t) \quad \dot{x}_1(t) \quad x_2(t) \quad \dot{x}_2(t)]^T \\
 u(t) &= f_a \\
 d(t) &= [x_0(t) \quad \dot{x}_0(t)]^T
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-(k_p + k_r)}{m} & \frac{-b_r}{m} & \frac{k_p}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{k_p}{M} & 0 & \frac{-k_p}{M} & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ m \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1] \quad \mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m} & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

여기서 $y(t)$ 는 하중질량(M)의 속도에 해당하는 시스템 출력이며, $d(t)$ 는 하부로부터 가진되는 외란이다. 그리고 $u(t)$ 는 압전작동기로부터 인가되는 작동력으로서 제어입력에 해당한다.

본 연구에서의 제어목적은 하부로부터 가진되는 진동이 하중질량으로 전달되지 않도록 하는 것이며, 이를 위해 외란 및 불확실성에 강건한 슬라이딩모드 제어기가 도입되었다. 먼저 슬라이딩 평면 $s(t)$ 가 다음과 같이 정의된다[14,15].

$$\mathbf{s}(t) = \mathbf{g}\mathbf{x}(t) \tag{8}$$

여기서 \mathbf{g} 는 슬라이딩 평면의 기울기 행렬이다. 이

때 시스템의 상태가 슬라이딩 평면 $\mathbf{s}(t)=0$ 으로 향하기 위해서 제어로직은 다음과 같은 조건을 만족하도록 선택되어야 한다.

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \mathbf{s}(t)^2 \leq -\eta_d |\mathbf{s}(t)| \quad (9)$$

여기서 η_d 는 순양 상수이다. 식 (9)를 만족하면 상태 벡터 $\mathbf{x}(t)$ 는 슬라이딩 평면 $\mathbf{s}(t)=0$ 로 수렴하게 된다. 따라서 시스템의 상태를 슬라이딩 평면으로 수렴시킬 수 있는 제어기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t) &= -(\mathbf{gB})^{-1}(\mathbf{gAx}(t) + \mathbf{k}(\mathbf{x}) \cdot \text{sgn}(\mathbf{s}(t))) \\ \mathbf{k} &= \text{diag}(k_1, k_2), \quad k_1, k_2 > |\mathbf{g}\Gamma d(t)| + \eta_d \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\text{sgn}(\cdot)$ 는 부호함수이며, \mathbf{k} 는 불연속 계인이다. 실제로 불확실성이나 외란의 상한은 실험을 통해 적절히 추정될 수 있으며, 식 (9)는 다음과 같이 만족된다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \mathbf{s}(t)^2 &= \mathbf{s}(t)\mathbf{g}\dot{\mathbf{x}}(t) \\ &= \mathbf{s}(t)\{\mathbf{gAx}(t) - \mathbf{gB}(\mathbf{gB})^{-1}\mathbf{gAx}(t) \\ &\quad - \mathbf{gB}(\mathbf{gB})^{-1}\mathbf{k} \text{sgn}(\mathbf{s}(t) + \mathbf{G}\Gamma d(t))\} \\ &= \mathbf{s}(t)(-\mathbf{k} \text{sgn}(\mathbf{s}(t)) + \mathbf{g}\Gamma d(t)) \leq -\eta_d |\mathbf{s}(t)|, \end{aligned} \quad (11)$$

$(\eta_d > \mathbf{g}\Gamma d(t))$

제어입력을 결정하기 위해서는 모든 시스템의 상태를 알 수 있어야 하지만 본 연구에서는 상태 $x_2(t)$ 만 하중질량(M)의 가속도를 측정하여 적분을 통해 얻을 수 있다. 따라서 시스템의 상태를 알기 위해 관측기가 요구되며 본 연구에서는 추정 상태 벡터 $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ 를 결정하기 위해 다음과 같은 루엔버거 관측기(Luenberger observer)를 도입하였다.

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}(t) = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) - \mathbf{L}(y(t) - \mathbf{C}\tilde{\mathbf{x}}(t)) \quad (12)$$

여기서 \mathbf{L} 은 관측 계인 행렬이며, 제어기는 관측된 $\tilde{\mathbf{x}}(t)$ 에 기반하여 제어입력을 결정한다. 나아가 제어입력의 채터링 문제에 의해 슬라이딩 평면상에서 반복적으로 나타나는 짧은 주기의 스위칭 현상을 막기 위해 포화함수를 적용하였다. 마지막으로 압전작동기에 인가되는 제어입력은 다음과 같이 결정된다.

$$\mathbf{u}(t) = -(\mathbf{gB})^{-1}(\mathbf{gA}\tilde{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{k} \text{sat}(\mathbf{s})) \quad (13)$$

여기서 \mathbf{k} 는 불연속 계인이며, $\text{sat}(\mathbf{s})$ 는 포화함수로서 다음과 같다.

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} s / \varepsilon & \text{for } |s / \varepsilon| \leq 1 \\ \text{sgn}(s) & \text{for } |s / \varepsilon| > 1 \end{cases} \quad (14)$$

여기서 ε 은 경계층의 두께를 나타낸다. Fig. 8는 본 연구에서 도입된 제어시스템의 블록다이어그램을 표현한 것이다.

4. 진동제어

본 연구에서 제안된 하이브리드 마운트의 진동제어 성능을 평가하기 위해 Fig. 9와 같은 실험장치가 구성되었다. 하중질량이 마운트의 상부에 설치되었으며, 전자기 가진기(Model VS-200-2, IMV, Japan)에 의해 하부 베이스로부터 가진 되었다. 가진 범위는 80~300Hz이며, 이는 본 연구의 목적인 ISG (Idle Stop and Go) 시스템에서 아이들상태(약 600rpm)에 도달하기 이전의 초기 진동특성 개선을 평가하기 위해 설정되었다. 그리고 상부의 하중질량에는 가속도계가 설치되어, 적분기를 통해 속도로 변환되었다.

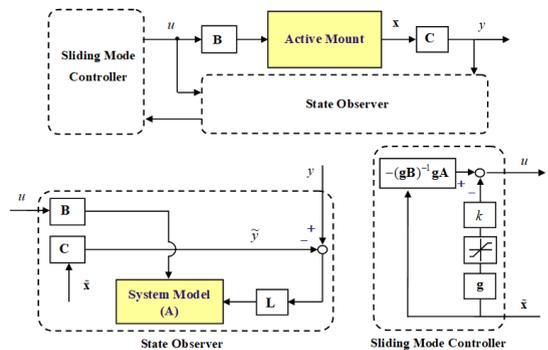


Fig. 8. Block diagram of the control system

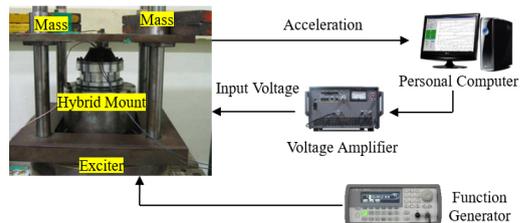


Fig. 9. Experimental setup for the vibration control

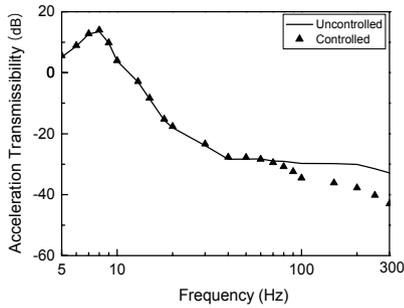


Fig. 10. Transmissibility activating the piezostack

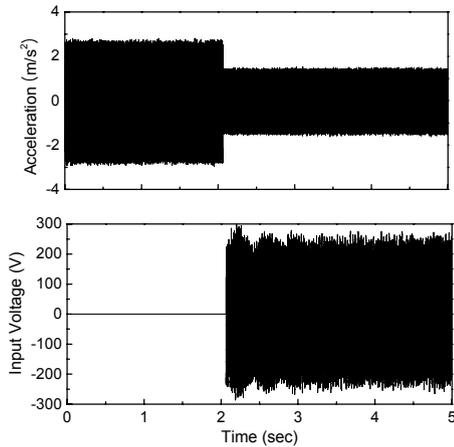


Fig. 11. Time responses at 100Hz

베이스로부터 마운트를 통해 상부의 하중질량으로 전달되는 진동을 저감하기 위해 슬라이딩모드 제어가 적용되어 dSPACE DSP 보드 DS1104를 통해 구현되었다. 이 때 샘플링 주파수는 10kHz이며, 슬라이딩모드 제어를 구성하는 슬라이딩 평면 기울기 \mathbf{g} 는 $[54 \ 0 \ 1 \ 0]$ 이고, 관측기 게인 행렬 \mathbf{L} 은 $[-37.5 \ -566490 \ -2.53 \ 9884]^T$ 이다.

본 연구에서 제안된 하이브리드 마운트의 가속도 전달율은 Fig. 10과 같다. 비공진 영역에서 진동제어 성능이 매우 향상되었음을 알 수 있으며 고주파 영역으로 갈수록 그 효과가 극명하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 11은 100Hz의 가진 주파수하에서 진동제어 효과를 시간영역에서 보여주고 있다. 결과에서 나타난 바와 같이 압전작동기에 제어입력이 인가되면서 구체적으로 80~300Hz 영역에서 약 1.7~10dB이 감소하여, 고주파수 영역에서 최대 10dB의 진동이 줄어들고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 ISG (Idle Stop and Go) 시스템을 도입한 자동차의 시동초기 진동특성을 개선하기 위해 고무와 압전작동기를 결합한 능동형 하이브리드 마운트의 진동절연 성능을 실험적으로 고찰하고자 한다. 먼저 고무요소와 관성형 압전작동기의 동적특성을 실험적으로 고찰한 다음 이를 결합한 하이브리드 마운트가 제작되었다. 그리고 동적 지배방정식의 모델링을 통해 상태 공간 방정식으로 표현하였다. 제안된 하이브리드 마운트의 진동을 절연하기 위해 슬라이딩 모드 제어기가 구성되어 진동제어 실험에 적용되었으며, 우수한 진동제어 성능을 확인하였다. 그리고 제안된 하이브리드 마운트를 통해 자동차 ISG 시스템에 의한 시동초기 엔진 진동 특성을 개선할 수 있음을 입증하였다. 다만 본 연구에서 도입된 관성형 압전작동기의 특성상 저주파의 공진 영역에서는 제어 효과가 미미하였으며, 이를 보완하기 위해 향후 감쇠효과를 고려한 후속연구가 필요할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] W. Fedor, J. Kazour, J. Haller, K. Dauer & D. Kabasin. (2016). GDI cold start emission reduction with heated fuel. *SAE Technical Paper*, 2016-01-0825.
- [2] M. Bernuchon. (1984). A new generation of engine mounts, *SAE*, 840259, 230-236.
- [3] G. Kim & R. Singh. (1995). A study of passive and adaptive hydraulic engine mount systems with emphasis on non-linear characteristics. *Journal of Sound and Vibration*, 179(3), 427-453.
- [4] S. R. Hong & S. B. Choi. (2005). Vibration control of a structural system using magneto-rheological fluid mount. *Journal of Intelligent Material System and Structures*, 16(11-12), 931-936.
- [5] E. W. Williams, S. G. Rigby, J. L. Sproston & R. Stanway. (1993). Electrorheological fluids applied to an automotive engine mount. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 47, 221-238.
- [6] J. Y. Andrew & H. H. Colin. (1996). Control of flexural vibration in stiffened structures using multiple piezoceramic actuators. *Applied Acoustics*, 49(1), 17-48.
- [7] K. Kowalczyk, F. Svaricek, C. Bohn & H. J. Karkosch. (2004). Active control of engine induced vibrations. *International Conference on New Actuators*, 275-278.
- [8] C. Niezrecki, D. Brei, S. Balakrishnan & A. Moskalik. (2001). Piezoelectric actuation: state of the art. *The*

Shock and Vibration Digest, 33(4), 269-280.

- [9] S. S. Muhlen. (1990). Design of an optimized high-power ultrasonic transducer, *IEEE Ultrasonics Symposium, Honolulu, USA*, 1631-1634.
- [10] F. X. Li, R. K. N. D. Rajapakse, D. Mumford & M. Gadala. (2008). Quasi-static Thermo-electro-mechanical Behaviour of Piezoelectric Stack Actuators. *Smart Materials and Structures*, 17(1), 1-10.
- [11] S. B. Choi & Y. M. Han. (2010). *Piezoelectric Actuators: Control Applications of Smart Materials*. CRC Press.
- [12] H. Jung, Y. An & J. Park. (2018). Development of an Idle-Stop-and-Go System Controller for City Buses, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 27(6), 546-551.
- [13] C. Howard. (1999). Active isolation of machinery vibration from flexible structures, Ph. D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Adelaide, South Australia, Australia.
- [14] S. B. Choi, Y. T. Choi & D. W. Park. (2000). A sliding mode control of a full-car electrorheological suspension system via hardware in-the-loop simulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 122, 114-121.
- [15] C. Edwards & S. K. Spurgeon. (1998) *Sliding mode control: theory and application*, Taylor & Francis Ltd.

한 영 민(Yong-Min Han)

[정회원]



- 1995년 2월 : 인하대학교 기계공학과 (공학사)
- 1997년 2월 : 인하대학교 기계공과(공학석사)
- 2005년 8월 : 인하대학교 기계공과(공학박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 아주자동차대학

자동차계열 교수

- 관심분야 : 스마트 작동기, 설계 및 제어
- E-Mail : ymhan@motor.ac.kr