한국동력기계공학회지 제21권 제4호 pp. 18-25 2017년 8월 ISSN 1226-7813(Print) ISSN 2384-1354(Online)
Journal of the Korean Society for Power System Engineering http://dx.doi.org/10.9726/kspse.2017.21.4.018
Vol. 21, No. 4, pp. 18-25, August 2017

MR마운트 진동제어 성능 향상을 위한 슬라이딩 모드 제어
Sliding Mode Control for Improving Performance of Mount with MR(Magneto-Rheological) Fluid

안영공*† · 김성하** · 정석권***
Young Kong Ahn*† , Sung-Ha Kim** and Seok-Kwon Jeong***

(Received 02 February 2017, Revision received 22 June 2017, Accepted 22 June 2017)

Abstract: This paper deals with vibration control of a small mount with MR(Magneto-Rheological) fluid as a functional fluid mount for precision equipment of automobiles. Damping and stiffness coefficients of the mount with MR fluid are changed by variations of the applied magnetic field strength. We present the robust control scheme, based on a conventional sliding mode control theory, for the design of a stable controller that is capable of vibration control due to various disturbances such as impact and periodic excitations, and is insensitive to dynamic properties of the mount. We got stable controller by using Lyapunov stability theory. The controller is then realized by using a semi-active control condition in simulations. Chattering problem of the sliding mode control is eliminated by saturation function instead of signum function. The sliding mode control with Lyapunov stability theory is superior to passive and Sky-Hook control in performance.

Key Words : Sliding Mode Control, Magneto-Rheological Fluid, Lyapunov Function Candidate, Vibration Isolation and Control, Sky-Hook Control

1. 서 론

자동차 탑승자의 편의성, 안정성 및 쾌적성을 향상시키기 위한 자동차의 전자화는 점점 가속화되고 있다. 전자화의 핵심적인 부품인 전자장치의 작동 신뢰성을 확보시키기 위해 고점도 실리콘유를 주입한 소형 마운트 등이 현재 사용되고 있다. 이들 마운트는 기본적으로 수동적인 감쇠기이므로, 차체로부터 발생되는 다양한 진동을 감쇠시킬 수 있는 성능이 부족하다. 예를 들어서 불규칙적인 충격에 의한 진동, 주기적인 진동으로 발생되는 다양한 주파수 영역에서의 진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 없고, 특정 주파수 영역에서의 진동 감쇠에 대한 성능은 우수하지만 다른 주파수 영역에서는 오히려 진동이 높아지는 것이 일반적 수동 마운트의 단점이다.

이와 같이 수동 마운트의 성능을 향상시키기 위한 반능동형[1,2] 마운트의 개발은 지속적으로 추진되고 있고, 반능동 마운트는 제진 성능과 높은

*† 안영공(교신저자) : 한국생산기술연구원
E-mail : blueahn@kitech.re.kr, Tel : 052-249-3033
**김성하 : 부경대학교
***정석권 : 부경대학교 냉동공조공학과

*† Young-Kong Ahn(corresponding author): Korea Institute of Industrial Technology.
E-mail : blueahn@kitech.re.kr, Tel : 052-249-3033
**Sung-Ha Kim : Pukyong National University.
***Seok-Kwon Jeong : Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering, Pukyong National University.

성능의 신뢰성, 낮은 제작비용 및 낮은 구동 에너지 소비 등으로 주목을 받고 있다.

그 중에서도 상용화 가능성 및 점성 변화비율이 높은 자기점성유체(Magneto-Rheological fluid; MR유체)를 이용한 반능동형 개발연구는 다양하게 추진되고 있다. 본 논문의 저자 역시 MR유체를 이용한 소형 마운트를 제작하여 외부에서 부가하는 전류 변화에 따른 제진성능 변화에 관하여 실험적 연구를 수행하였다. 또한 MR마운트(MR유체를 이용한 마운트)의 모델화를 통하여 제진 메커니즘을 이론적으로 고찰하였다.[3)]

본 연구에서는 MR마운트의 진동제어 성능을 향상시키기 위하여 MR마운트의 기계적 모델을 도출하고, 이 모델을 바탕으로 진동제어 알고리즘을 제안하였다. 비선형 특성을 갖는 고무 소재의 챔버 내부에 MR유체가 충진된 마운트의 동특성을 강성계수와 감쇠계수로 모델링을 할 수 있지만 계수 값을 정확히 추정 및 측정하는 것은 어렵다. 이와 같은 불확실성과 외란에 강인한 제어시스템을 구성하기 위해, 로버스트(robust) 제어 중 하나인 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control) 이론[4)]을 이용하여 마운트의 진동제어 성능을 향상시키고자 한다. 즉 감쇠력을 직접적으로 나타내는 이 제어기는 설계 파라미터의 불확실성을 고려하여 계산된다. 그리고 전달률의 공진영역 및 진동절연 주파수 영역에서 수동형 및 Sky-Hook 제어[5)]에 비해 우수한 제진 성능을 제공할 수 있음을 수치 시뮬레이션으로 검증하였다.

2. MR마운트의 운동방정식

Fig. 1은 MR마운트의 개략도를 나타내고 있다. 소형의 고무 마운트 내부에 MR유체가 충진되고, MR유체의 점성을 제어하기 위한 전자석은 마운트 하단부에 설치되어 있다. 외부에서 전자석 코일에 전류를 인가하여 자기장이 발생하면 마운트 내부로 자기장이 형성되어 MR유체에 자기장이 부가된다. 부가되는 자기장 세기에 따라서 마운트 내부 MR유체의 점성이 변화하게 된다. MR마운트의 감쇠 및 강성 특성이 달라지는 특성[3)]을 나타내기 위하여, Fig. 2와 같은 기계적 모델을 도출하였다.

Fig. 2의 모델로부터 뉴턴의 법칙을 이용하여 마운트의 운동방정식을 유도하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}_1 = -k_1(x_1 - y) - c_v(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \tag{1}$$

$$c_v(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = k_2(x_2 - y) \tag{2}$$

여기서, k_1은 고무의 강성계수, $k_2(=A_p^2/c_1)$는 체적강성계수, c_1은 마운트 챔버의 컴플라이언스(체적변화/압력변화), c_v는 체적 감쇠계수를 각각 나타낸다. MR유체의 점성변화에 따른 마운트의 동특성 변화는 체적 감쇠계수 c_v값의 변화로서 표현되어진다.

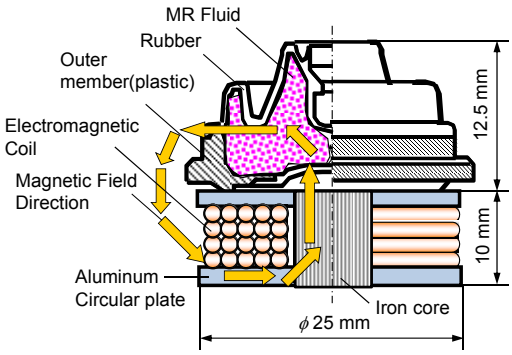


Fig. 1 MR fluid mount for electronic equipment inside a car

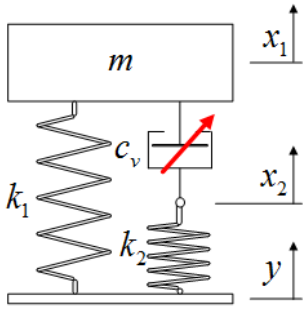


Fig. 2 Mechanical model of the MR fluid mount

3. 슬라이딩 모드 제어기 설계 및 안정성 해석

유체가 충진된 고무 챔버의 동특성은 진동 진폭 및 진동 주파수에 따라서 일반적으로 비선형 특성을 나타낸다. MR유체가 충진된 마운트의 경우도 마찬가지이다. 따라서 마운트의 강성과 감쇠의 정확한 특성 값을 측정 및 추정하기 어렵고, MR유체에 부가되는 전류의 세기에 따라서 마운트의 감쇠계수 c_v가 변화한다. 또한 감쇠계수의 변화에 따라 마운트의 강성이 변하며, 주파수에 대해 비선형성을 갖는 등 다양한 불확실성을 고려하여 마운트의 변수들은 식 (3)과 같은 범위 내에 값들이 존재하는 것으로 가정한다. 따라서 강성 및 감쇠계수는 식 (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$0 < k_m \le k_1 \le k_M,\ 0 < c_m \le c_v \le c_M \tag{3}$$

$$\begin{aligned} k_m &= k_0(1-\rho_1),\ k_M = k_0(1+\rho_1) \\ c_m &= c_0(1-\rho_2),\ c_M = c_0(1+\rho_2) \end{aligned} \tag{4}$$

여기서, 하첨자 m과 M은 각각 최소값과 최대값, k_0와 c_0는 MR유체에 자기장을 부가하지 않은 경우의 값, ρ_1과 ρ_2는 가중치 값을 각각 나타낸다. 또한 임의의 가진 변위의 크기도 다음과 같은 범위 내의 값으로 가정한다.

$$|y| < \psi \tag{5}$$

제어력을 $f = c_v(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$라 하면, 추정 제어력은 다음과 같이 정한다.

$$\left.\begin{aligned} f &= f_0 + \delta f,\ |\delta f| \begin{cases} \le \rho_2 c_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \\ \le \rho_2 f_0 \end{cases} \\ f_m &= (1-\rho_2) f_0,\ f_M = (1+\rho_2) f_0 \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

제어게인의 최소값 b_m, 최대값 b_M, 그리고 제어력 u를 다음과 같이 정의한다.[4)]

$$b_m = 1-\rho_2,\ b_M = 1+\rho_2,\ f_0 = u \tag{7}$$

이들 식들을 이용하면, 식 (1)의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k_0}{m}x_1 - \frac{1}{m}bu + \frac{1}{m}\varphi(x_1) + \frac{k_1}{m}y \tag{8}$$

여기서, $\varphi(x_1) = (k_0 - k_1)x_1$는 강성계수의 불확실성을 나타내는 항이다. b는 제어게인으로서 알 수 없는 변수이므로 다음과 같은 경계조건을 부여할 수 있다.

$$0 < b_m \le b \le b_M \tag{9}$$

제어게인의 추정 값을 $\hat{b} = \sqrt{b_m \cdot b_M}$로 가정하면, 다음과 같은 경계조건 식을 얻을 수 있다.

$$\beta^{-1} \le \frac{\hat{b}}{b} \le \beta,\ \beta = \sqrt{b_M / b_m} \tag{10}$$

슬라이딩 모드제어의 슬라이딩 평면(sliding surface)은 다음과 같이 정의한다.[6)]

$$s = \dot{x}_1 + \lambda x_1,\ \lambda > 0 \tag{11}$$

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{x}_1 + \lambda \dot{x}_1 \\ &= -\frac{k_0}{m}x_1 - \frac{1}{m}bu + \frac{1}{m}\varphi(x_1) + \frac{k_1}{m}y + \lambda \dot{x}_1 \end{aligned} \tag{12}$$

또한 제어기는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$u = \frac{1}{\hat{b}}(-k_0 x_1 + m\lambda \dot{x}_1 + m\bar{u}) \tag{13}$$

여기서, $\bar{u}$ 는 불연속의 제어입력으로서 (19) 식에서 정의하였다. (13) 식을 (12) 식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\dot{s} = (1-\frac{b}{\hat{b}})(-\frac{k_0}{m}x_1 + \lambda\dot{x}_1) + \frac{1}{m}\varphi(x_1) + \frac{k_1}{m}y - b\hat{b}^{-1}\bar{u} \quad (14)$$

안정성을 판별하기 위해 다음과 같은 리아프노프 후보함수(Lyapunov function candidate)를 정의한다.[7)]

$$V = \frac{1}{2}s^2, \quad V > 0 \quad (15)$$

식 (15)를 미분하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned}\dot{V} = s\dot{s} &= \left|\left[(1-\frac{b}{\hat{b}})(-\frac{k_0}{m}x_1 + \lambda\dot{x}_1) + \frac{1}{m}\varphi(x_1) + \frac{k_1}{m}y\right]\cdot s\right| - \frac{b}{\hat{b}}\bar{u}\cdot s \\ &\le \left|(1-\frac{b}{\hat{b}})\right|\cdot\left|(-\frac{k_0}{m}x_1 + \lambda\dot{x}_1)\right|\cdot|s| + \frac{1}{m}|\varphi(x_1)|\cdot|s| + \frac{k_1}{m}|y|\cdot|s| - \frac{b}{\hat{b}}\bar{u}\cdot s \end{aligned} \quad (16)$$

만약, $|\varphi(x_1)| = |k_0 - k_1|\cdot|x_1|$ 이고,

$\varepsilon = \max|[k_0,\, k_0] - [k_m,\, k_M]|$ 이라 하면, $|k_0 - k_1| \le \varepsilon$ 이므로, 다음과 같은 부등식이 성립한다.

$$|\varphi(x_1)| \le \varepsilon|x_1| \quad (17)$$

또한 $|y| < \psi$ 이므로, 다음과 같은 부등식이 성립한다.

$$\frac{k_1}{m}|y| \le \frac{k_1}{m}\psi \quad (18)$$

궤적이 슬라이딩 평면에 도달하였을 때 그 평면에 수렴시키기 위한 불연속 제어입력 $\bar{u}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\bar{u} = -\eta(x_1)\mathrm{sgn}(s) \quad (19)$$

여기서, $\mathrm{sgn}(s) = \begin{cases} 1 & s > 0 \\ -1 & s < 0 \end{cases}$, 스위칭게인 $\eta(x_1)$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\eta(x_1) \ge \frac{\hat{b}}{b}(\frac{1}{m}\varepsilon|x_1| + \frac{k_1}{m}\psi + \eta_0) + \left|(\frac{\hat{b}}{b} - 1)\right|\cdot\left|(-\frac{k_0}{m}x_1 + \lambda\dot{x}_1)\right| \quad (20)$$

(19) 식을 (16) 식에 대입하면, 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{V} \le -\eta_0|s| < 0, \quad \eta_0 > 0 \quad (21)$$

(21) 식으로부터 제어된 시스템은 점근적 안정(asymptotically stable)임을 알 수 있다. 그리고 동시에 (13) 식과 (19) 식으로부터 제어기도 다음과 같이 유도된다.

$$u = \frac{1}{\hat{b}}(-k_0x_1 + m\lambda\dot{x}_1 + m\eta(x_1)\cdot\mathrm{sgn}(s)) \quad (22)$$

식 (22)의 제어입력 u를 준능동제어 제어 규칙에 적용하면[8)] 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$c_{smc} = \begin{cases} u/(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \;\; for\; \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{y}) > 0 \\ \min(c_{smc}) \quad for\; \dot{x}_1(\dot{x}_1 - \dot{y}) \le 0 \end{cases} \quad (23)$$

여기서, 가변 감쇠계수 c_{smc} 는 $\min(c_{smc}) \le c_{smc} \le \max(c_{smc})$ 의 범위 내에서 인가되는 전류에 따라 변화한다.

4. 수치 시뮬레이션 및 고찰

제어성능을 검증하기 위하여 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하고 초기변위, 충격 및 주기성 외란에 대해, 수동 마운트의 응답, Sky-Hook 제어 및 제안된 슬라이딩 모드 제어를 적용한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 사용된 마운트 변수들의 값을 Table 1에 나타내었다. 코일에 인가되는 전류에 따라 감쇠 계수는 Fig. 3과 같이 선형적으로 변하는 것으로 가정한다.

Table 1 Parameters of controlled system

m	2 kg	ρ_2	0.1
k_1	40 N/m	η_0	0.2
k_2	120 N/m	ψ	0.003 m
λ	2	Φ	0.002 m
ρ_1	0.1	min(c_v)	1 N/ms

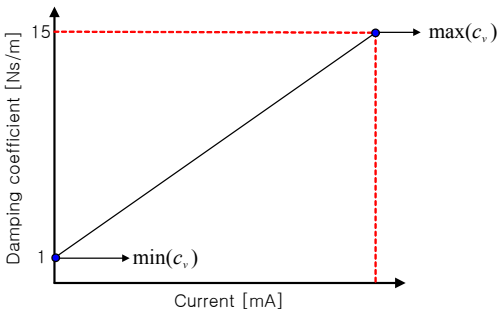


Fig. 3 Damping coefficient vs. electric current

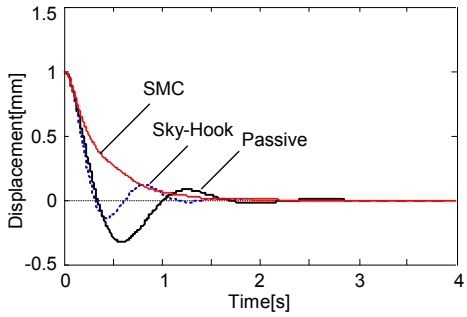
Fig. 4와 Fig. 5에는 초기변위 및 충격 가진에 의한 마운트의 자유진동을 수동 마운트, Sky-Hook 및 슬라이딩 모드 제어기가 작동한 세 경우의 진동감쇠 성능을 나타내었다. 두 그림의 (a) 및 (b)에서, 슬라이딩 모드 제어의 경우가 진동 변위 및 속도의 수렴속도가 가장 빠르고, 진동흡수 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 또한 두 그림의 (c)에서 나타내는 위상평면궤적에 대해서는 진동궤적이 슬라이딩 제어기가 작동됨에 따라서 슬라이딩 평면을 따라서 진동진폭 및 진동속도가 적절하게 수렴함을 확인할 수 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5의 (c)의 위상평면궤적을 확대하여 Fig. 6 및 Fig. 7의 (a)에 나타내었다. 여기서 슬라이딩 모드 제어의 전형적인 문제점인 채터링 현상을 확인할 수 있다. 따라서 슬라이딩 모드 제어기의 채터링(chattering)[6]의 단점을 개선하기 위해서, (22) 식에 포함된 부호함수 식 (24)를 식 (25)와 같은 포화함수(saturation function)로 대체하였다.[4] 즉 아래 식과 같이 대체하였다.

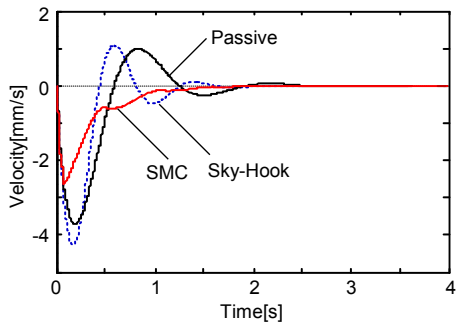
$$\mathrm{sgn}(s) \cong sat(\frac{s}{\Phi}) \tag{24}$$

$$sat(\frac{s}{\Phi}) = \begin{cases} s/\Phi & |s| \le \Phi \\ \mathrm{sgn}(s/\Phi) & otherwise \end{cases} \tag{25}$$

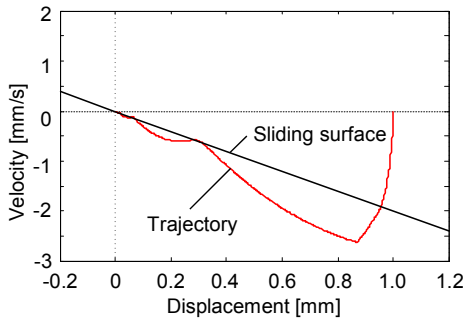
여기서, Φ 는 포화함수의 경계선 계수이고, 포화함수는 아래 Fig. 8과 같다.



(a) Comparison of displacements

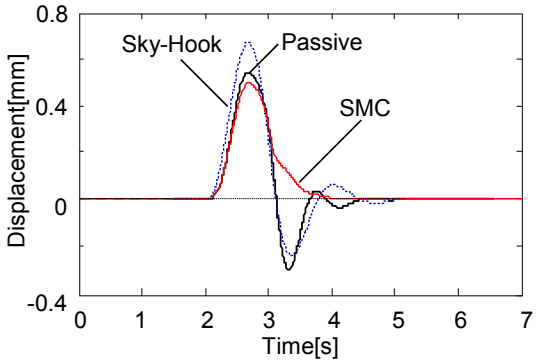


(b) Comparison of velocities

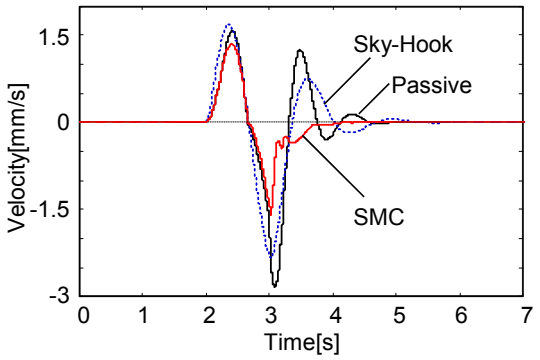


(c) Phase plane trajectory of the MR mount

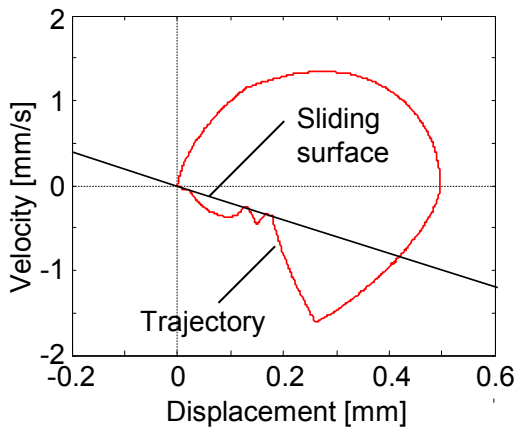
Fig. 4 Comparison of characteristics of sliding mode control with other control methods for free vibration



(a) Comparison of motions with different types of control theories

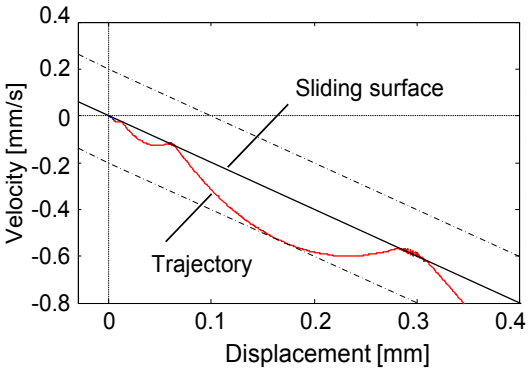


(b) Comparison of motion with different types of control theories

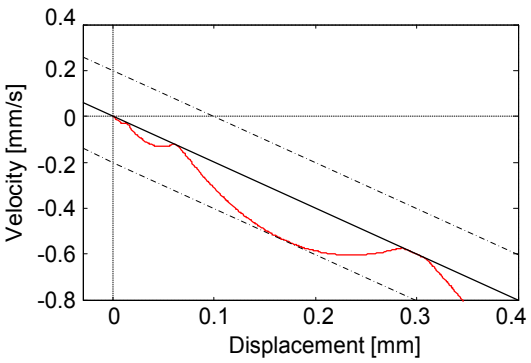


(c) Phase plane trajectory of the MR mount

Fig. 5 Impulse responses with sliding mode control



(a) Chattering as a result of imperfect control switching

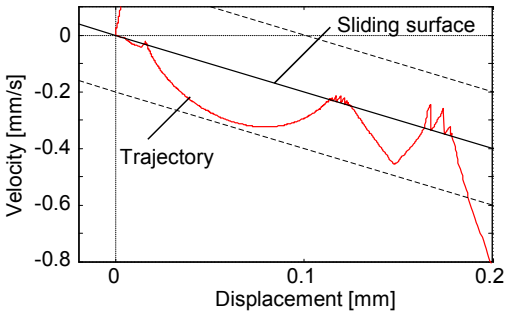


(b) Result of perfect control switching

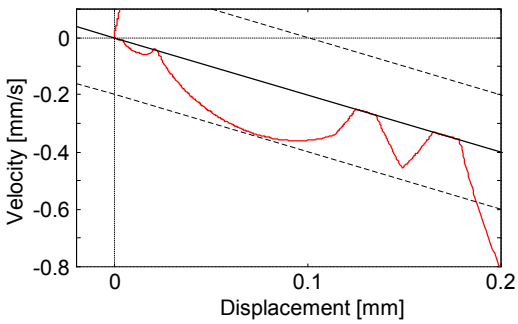
Fig. 6 Comparison between perfect and imperfect sliding mode control with initial displacement

포화함수를 활용한 슬라이딩 모드 제어가 적용된 진동궤적의 결과를 Fig. 6 및 Fig. 7의 (b)에 나타내었고, (a)에 나타난 채터링이 제거되었음을 알 수 있다. 또한 포화함수가 적용된 슬라이딩 모드 제어, Sky-Hook 제어[5] 및 수동형 마운트의 전달률을 Fig. 9에 나타내었다.

슬라이딩 모드제어에 의한 전달률이 공진영역 및 절연영역에서도 가장 우수하게 진동이 제어되고 있음을 알 수 있다. Sky-Hook 제어의 결과는 5 Hz 이상의 영역에서 제어 불안정 특성이 나타남을 확인할 수 있다.



(a) Chattering as a result of imperfect control switching



(b) Result of perfect control switching

Fig. 7 Comparison between perfect and imperfect sliding mode control with impulse

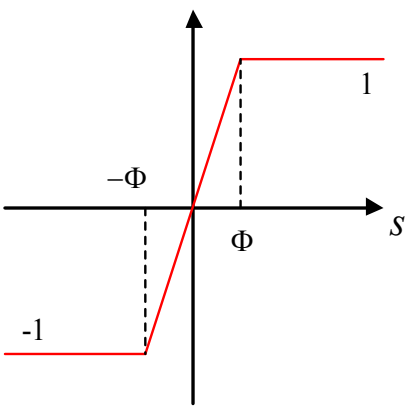


Fig. 8 Saturation function

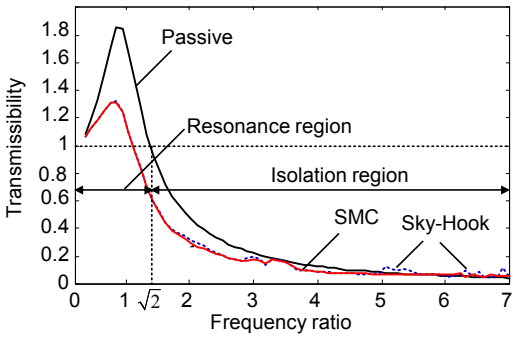


Fig. 9 Comparison between sliding mode control and Sky-Hook control

5. 결 론

본 논문에서는 기능성 유체 중의 하나인 MR유체를 이용한 마운트의 진동 감쇠성능을 향상시키기 위하여, 새로운 형태의 슬라이딩 모드 제어 기법을 제안하였다. 또한 제안된 제어기법에 의한 진동 제어성능은 대표적 준능동 제어 기법인 Sky-Hook 제어결과와 비교하여 제어성능을 검증하였다. 제안된 슬라이딩 모드 제어는 Lyapunov 이론을 이용하여 안정성 판별 및 제어기를 설계하였다. 수치 시뮬레이션으로 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 제안한 기법은 자유진동 및 충격력이 작용하는 진동의 경우에 Sky-Hook 및 수동 마운트의 경우에 비해서 진동 변위 및 속도의 수렴성능이 우수하였다.

2) 제안한 기법과 Sky-Hook 제어의 전달률을 상호 비교한 결과, 높은 감쇠력이 요구되어지는 공진영역에서는 Sky-Hook 제어에 의한 결과와 유사하였다. 다만, 감쇠력의 최소화가 요구되어지는 진동 주파수 영역인 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상에서는 Sky-Hook 제어의 경우 제어의 불안정성이 나타나는 반면, 제어 채터링 문제를 해결한 슬라이딩 모드 제어는 안정적으로 진동이 제어됨을 확인할 수 있었다.

일반적으로 준능동 마운트의 경우 통과 주파수 영역인 공진 주파수 영역에서는 감쇠력을 증가시

켜서 진동 피크를 감쇠시키지만, 감쇠력의 최소화가 요구되는 진동수비가 $\sqrt{2}$ 이상의 진동 절연 영역에서 진동진폭이 수동형 마운트의 진폭보다도 증가하는 트레이드오프(trade off) 문제가 발생하지만, 본 연구에서 제안한 제어이론을 활용함으로써 공진피크는 물론 진동절연 주파수 영역에서도 수동형 마운트의 진폭보다 낮고, 안정적으로 감쇠시킬 수 있는 것은 의미가 있으며, 실용적으로도 가치가 있는 연구결과로 판단된다.

References

1. M. Elahinia, C. Ciocanel, TheM. Nguyen, and S. Wang, 2013, "MR- and ER-Based Semiactive Engine Mounts: A Review", Smart Materials Research, Vol. 2013, Article ID 831017.
2. O. S. Kim, W. C. Park and H. C. Lee, "Control Performance for Semi-active Mount Featuring Magneto-Rheological Fluid", Journal of The Korean Society for Power System Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 53-58.
3. Y. K. Ahn, B. S. Yang, S. Morishita, 2001, "A Modeling of a Variable-damping Mount Using Magneto-Rheological Fluid", Journal of KSNVE, Vol. 11, No. 11, pp. 141-146.
4. J-J E. Soltine and W. Li, 1991, "Applied Nonlinear Control", 1st ed., Prentice-Hall Inc.
5. L. R. Miller and C. M. Nobles, 1988, "The Design and Development of a semi-active Suspension for a Military Tank", SAE Technical paper Series No. 881133.
6. K. Nonami and K. Den, 1994, "Sliding Mode Control", Corona Publishing Co., Ltd.
7. V. Utkin, J. Guldner, J. Shi, 1999, "Sliding mode Control in Electromechanical Systems", Taylor & Francis.
8. F. Sadek, et al., 1998, "Semiactive Control Algorithms for Structures with Variable Dampers", Journal of Engineering Mechanics, pp. 981-990.