

MR 유체를 이용한 스퀴즈모드형 마운트의 동특성

Dynamic Properties of Squeeze Type Mount Using MR Fluid

안 영 공 †

Young Kong Ahn

(2003년 4월 28일 접수 : 2003년 5월 26일 심사완료)

Key Words : Mount(마운트), Magneto-rheological Fluid(자기점성유체), Variable Damping(가변 감쇠), Variable Stiffness(가변 강성), Vibration Isolation(진동 절연)

ABSTRACT

This paper presents investigation of damping characteristics of squeeze mode type MR (magneto-rheological) mount experimentally. Since damping property of the MR fluid is changed by variation of the applied magnetic field strength, squeeze mode type MR mount proposed in the study has variable damping characteristics according to the applied magnetic field strength. In the present work, the performance of the mount was experimentally investigated according to the magnetic field strength and exciting frequencies. The experimental results present that the MR mount can effectively reduce the vibration in a wide range of frequency by controlling the applied electromagnetic field strength. Viscous damping and stiffness coefficients of the MR mount tend to be changed according to the variation of the applied currents in this study and MR effect is reduced by increasing exciting frequency.

1. 서 론

마운트는 차량의 엔진 및 정밀기기 등의 진동 제진을 위한 요소로서 산업전반에 널리 사용되고 있다. 마운트 내부에 유체가 있는 경우와 없는 경우로 크게 두 종류로 나뉘어진다.⁽¹⁾ 유체가 충전된 마운트의 경우가 없는 경우에 비해서 공진주파수에서의 감쇠특성이 우수하고, 이와 같은 마운트의 성능을 더욱 향상시키기 위해서 마운트 설계변수의 최적화 연구⁽²⁾ 혹은 유체의 점도 특성을 변화시킴으로써 마운트의 감쇠력을 조절하여 제진 성능을 향상시키고자 하는 연구^(3,4) 등이 이루어져 왔다.

외부에서 부가하는 전장과 자장에 따라서 유체의 점도 특성이 변화하는 유체인 ER(electro-

rheological)과 MR(magneto-rheological) 유체는 진동제진 소재로서 잘 알려져 있다.⁽⁵⁾ 특히 MR 유체는 ER 유체에 비해서 점도특성의 변화 폭이 크고, 또한 내구성이 우수하여 산업계에 적용 가능성이 높은 유체로 평가되어 MR 유체를 이용한 응용연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.^(3~11)

본 연구에서는 MR 유체를 이용한 스퀴즈모드형 마운트를 개발하여 마운트의 성능 및 부가하는 자장의 변화에 따른 마운트의 동특성을 실험적으로 검토하였다.

2. 스퀴즈모드형 MR 마운트

Fig. 1은 스퀴즈모드형 MR 마운트가 하나의 질량을 지지하는 실험장치를 나타내고 있다. 전자석 코어는 자기 투자율이 높은 순철이 사용되었고, 이는 전자석 코일이 설치된 하부코어와 질량을 지지하는 상부코어로 나뉘어진다. MR 유체는 상 하부코어 사이에

† 책임저자, 정회원, 부경대학교 기계공학부

E-mail : ahn@mail1.pknu.ac.kr

Tel : (051) 620-1618, Fax : (051) 620-1405

충전되어 있고, 또한 고무판으로 밀봉되어 있다. 하부 코어부분이 가진 되면 상부코어는 하부코어에 대한 상대변위를 일으키게 되고, 상 하부코어사이의 상대변위가 작아지면 두 코어사이로 스퀴즈작용이 발생하며, 상대변위가 증가하면 두 코어사이로 유체의 흡입작용이 발생한다. 이때 MR 유체의 점도가 증가함에 따라서 스퀴즈작용 및 흡입작용에 대한 저항이 증가하여 감쇠력이 상승하게 된다. 사용된 MR 유체는 Lord사의 MRF-126QD이고, MR 마운트 시스템의 주요 치수 제원은 Table 1에 나타내었다. 질량부의 수직방향 이외의 진동을 구속하기 위하여 sliding 베어링 및 봉을 설치하였다. MR 유체에 부가하는 자기장의 세기에 따른 감쇠특성을 검토하기 위하여, Fig. 1의 MR 마운트 시스템을 가진기 위에 설치하고, 전자석 코일에 부가하는 전류의 세기의 변화에 대한 가진 실험을 행하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 2는 가진 실험으로부터 측정된 질량부와 가진부의 변위로부터 전달률을 주파수에 대해서 나타낸 그림이다. 마운트 시스템의 피크주파수는 약 26 Hz이

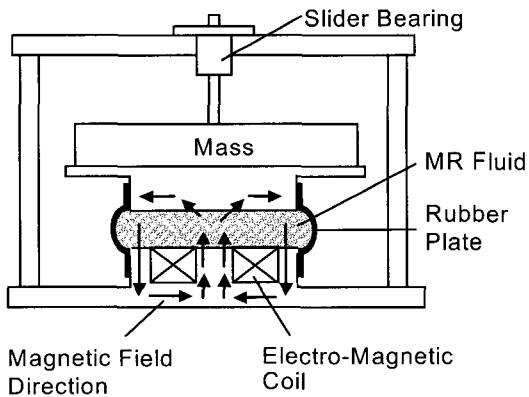


Fig. 1 Experimental apparatus of the MR mount

Table 1 Principal dimensions of MR mount

Mass	2.1 kg
Outer damper diameter	45 mm
Electric coil turns	650
Electric coil resistance	9.2 Ω
Electric coil diameter	0.35 mm
Gap between upper and lower cores	5.0 mm

고, 피크주파수는 고무의 강성계수에 크게 영향을 받는다. 마운트에 부가하는 전류가 증가함에 따라서 공진피크는 감소하지만, 공진주파수는 증가한다. 이 현상은 1자유계에서 질량을 지지하는 점성감쇠계수가 증가할 때에 공진주파수가 감소하는 것과는 상반된다. 전류를 부가하지 않았을 경우에 비해서 0.6 A 전류를 부가했을 때, 피크의 진폭과 피크주파수는 약 76% 감소 및 33% 증가하였다.

전류가 증가함에 따라서 공진주파수가 상승하는 현상은 일반적으로 MR 혹은 ER 유체를 이용한 마운트의 경우에 나타나는 현상이다.^(3, 9, 13~15) 그런데, 이와 같은 현상은 일반적으로 MR 혹은 ER 유체가 Bingham 유체의 특징인 쿨롱 감쇠의 특성을 나타내기 때문으로 가정하고 해석하는 경우가 대부분이다. 그 이유는 한쪽 방향으로 전단이 발생하는 점도계로 측정된 ER 혹은 MR 유체의 특성은 전장이나 자장을 부가함에 따라서 Bingham 유체의 특성이 나타나기 때문이다. 그러나 이 특성은 진동과 같은 왕복운동이 일어날 때의

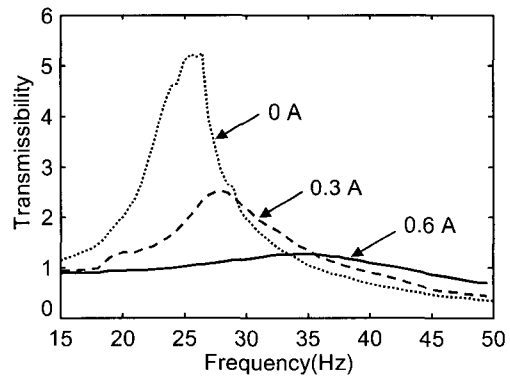


Fig. 2 Transmissibility under various magnetic fields

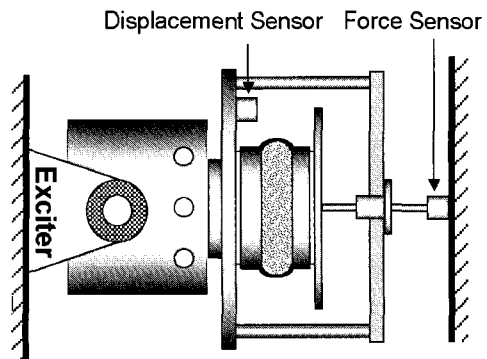


Fig. 3 Test setup for MR mount identification

특성과는 차이가 있지만, 많은 연구자들은 ER 혹은 MR 유체를 이용한 감쇠기나 마운트에 전장 혹은 자장을 부가 하였을 때 쿨롱감쇠가 작용하는 것으로 판단하는 경우가 많이 있고,^(3, 10~13) 또한 MR 혹은 ER 유체의 점도 특성을 Bingham 모델을 이용하여 표현함으로써 이들 유체를 이용한 장치의 지배방정식을 비교적 단순하게 유도할 수 있는 장점이 있다. 따라서 가진 주파수가 낮은 영역에서 Bingham 모델을 이용한 모델링에 대한 연구도 많이 제안되어 있다.^(7, 14) 그러나 이들 연구에서 장치자체가 가지고 있는 쿨롱 감쇠력과 이들 유체의 감쇠력이 결합되어 있기 때문에 쿨롱 감쇠력이 작용하지 않는 상태에서 이들 유체에 가해지는 전장 혹은 자장의 변화에 따라서 나타나는 감쇠특성이 검토되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 MR 마운트에 전류를 부가하였을 경우에 어떤 특성이 변화하는지 실험적으로 검토하기 위하여 Fig. 3과 같은 MR 마운트의 실험장치를 구성하였다. 고정부에 힘 센서와 가진부에 변위계가 설치되어 있고, 이들 센서로부터 가진부의 변위와 마운트에 의해서 전달되는 힘이 측정되어진다.

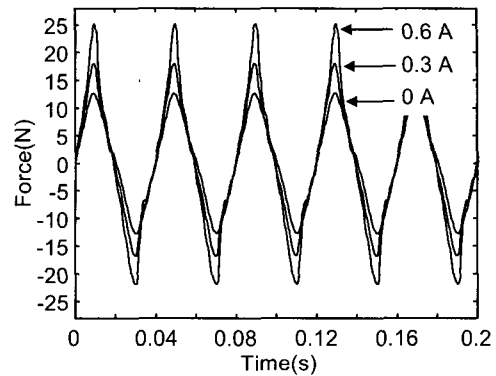
Fig. 4의 그림 (a)는 주파수 25 Hz, 변위 0.1 mm로 가진 하였을 때, 얻어진 시간에 대한 힘의 파형을 나타내고 있다. 부가하는 전류가 증가함에 따라서 전달력이 증가하고 있음을 그림 (a)에서 알 수 있다. 이 전달력의 특성을 파악하기 위하여 그림 (a)의 힘 파형, 가진부의 변위 파형, 시간에 대한 변위 파형으로 얻은 속도파형을 이용하여 그림 (b) 및 (c)와 같이 힘-변위 및 힘-속도선도로 나타내었다.

Fig. 4의 그림 (a)에서 파형이 정현파 형태를 나타내지 못하는 것과 그림 (c)에서 높은 자기장이 부가되었을 때 속도가 낮은 부분에서 히스테리시스의 종축방향의 폭이 좁아지는 것은 MR 유체를 밀봉하는 고무가 상부코어를 균일한 힘으로 지지하지 못하기 때문에 발생하는 현상으로 추정된다.

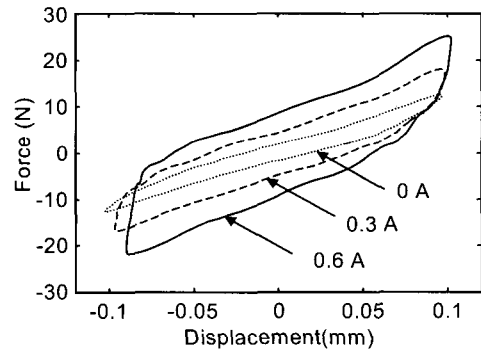
그림 (b)의 힘-변위선도에서 직사각형 형태가 나타나면 쿨롱 감쇠력이 마운트에 작용하는 것으로 볼 수 있다. 그러나 타원형태의 히스테리시스 루프이므로 점성 감쇠력과 강성력이 함께 존재하는 것으로 판단된다. 전류가 증가함에 따라서 루프의 장축 방향의 기울기와 종축 방향의 루프내부의 폭이 증가함으로써 강성 및 점성 감쇠계수가 증가하고 있음을 알 수 있다.

힘-속도선도에서 힘이 속도의 크기에 무관하고 속

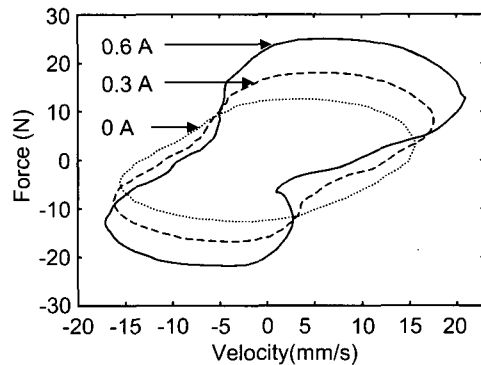
도의 방향에만 관계할 때 쿨롱 감쇠력이 작용하는 것으로 판단할 수 있지만, 그림 (c)에서는 히스테리시스 루프이므로 점성 감쇠력과 강성력이 함께 존재하고 전류의 세기가 증가함에 따라서 루프의 기울기가 상승하며, 또한 종축방향의 루프내부의 폭이 증가함으로써 점성 감쇠 및 강성계수가 증가하는 것으로 판단된



(a) Force vs. time



(b) Force vs. displacement hysteresis loop



(c) Force vs. velocity hysteresis loop

Fig. 4 Experimentally measured force for 25 Hz sinusoidal excitation with an amplitude of 0.1 mm

다. 그러나 일반적으로 알려진 바와 같은 쿨롱 감쇠 특성이 지배적이지 않다.

힘-변위선도에서 루프내부의 면적 A 와 힘-속도선도의 루프내부의 면적 B 를 이용하여 다음과 같이 점성 감쇠계수 C 와 강성계수 K 를 유도할 수 있다.⁽¹⁶⁾

$$C = A / (\pi\omega X^2) \quad (1)$$

$$K = B / (\pi\omega X^2) \quad (2)$$

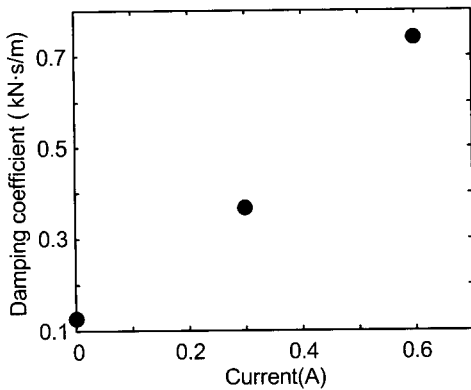
여기서 ω 는 가진 주파수, X 는 최대 가진 진폭이다. 면적 A 와 B 는 1주기 동안의 점성감쇠에 의한 손실에너지와 강성에 의한 탄성일률과 같다. 따라서 식 (1)과 (2)를 이용하여 Fig. 4의 그림 (b)와 (c)로부터 얻은 점성 감쇠 및 강성계수 값을 구하였고, 이를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 전류의 세기가 증가

함에 따라서 감쇠 및 강성계수가 증가하고 있음을 알 수 있다.

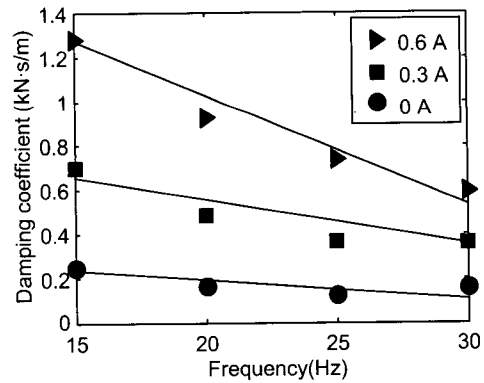
다음은 마운트의 가진 주파수에 대한 응답특성을 검토하기 위하여 가진 변위는 0.1mm로 일정하게 유지하고, 가진 주파수를 변화시키면서 전달력을 측정하고 이들 파형과 식 (1)과 (2)로부터 점성 감쇠 및 강성계수 값을 구하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 가진 속도가 증가함에 따라서 점성 감쇠 및 강성계수가 낮아지고 있는데, 이 현상은 동일한 가진 주파수에서 진폭이 큰 경우에 이들 계수가 낮아짐을 의미한다. 즉, 동일한 진폭에서 가진 주파수가 증가함에 따라서 MR 유체의 효과가 떨어짐을 알 수 있고, 이 결과는 한쪽 방향으로 전단이 발생하는 점도계에서 측정된 결과와 일치한다.⁽⁶⁾

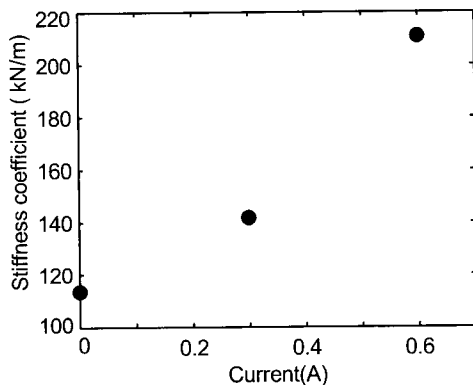
본 연구의 실험결과 및 참고문헌 (4)를 이용하여



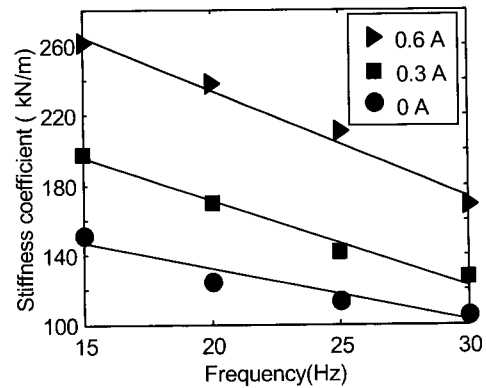
(a) Equivalent damping coefficient vs. electric current



(a) Equivalent damping coefficient vs. exciting frequency



(b) Equivalent stiffness coefficient vs. electric current



(b) Equivalent stiffness coefficient vs. exciting frequency

Fig. 5 Response of the MR mount under various magnetic fields

Fig. 6 Response of the MR mount under various exciting frequencies

얻은 마운트의 운동방정식을 종래의 운동방정식과 비교하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + F_{MR}(H) \operatorname{sgn}(\dot{x}) = f \quad (3)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + C_{MR}(H, \dot{x})\dot{x} + K_{MR}(H, x)x = f \quad (4)$$

여기서 m 은 부하질량, x 는 부하질량의 변위, k 는 전류를 부가하지 않은 상태의 고무강성과 체적강성계수의 합, c 는 전류를 부가하지 않은 상태의 고무감쇠계수와 체적감쇠계수의 합, F_{MR} , C_{MR} , K_{MR} 은 부가하는 전류의 함수인 자장 H 에 따라서 변화하는 쿨롱 감쇠력, 점성감쇠 및 강성계수이며 또한 C_{MR} 및 K_{MR} 은 속도 \dot{x} 및 변위 x 의 함수, f 는 가진 입력이고 외부 마찰력은 없다.

식 (3)은 MR 유체의 특성을 Bingham 혹은 Herschel-Bulkley 모델⁽¹⁷⁾로서 표현을 하여 얻은 식으로, F_{MR} 항은 질량부의 속도 크기에는 무관하고 그 부호에만 관계하는 쿨롱 감쇠력을 나타내지만 본 실험에서 쿨롱 감쇠력은 존재하지 않았고, 반면에 식 (4)와 같이 전류의 변화에 따라서 점성 감쇠력 및 강성력이 변화함을 실험적으로 확인하였다. 또한 식 (3)을 이용한 수치 시뮬레이션에서 쿨롱 감쇠력을 변화시켜도 실험결과에서 나타난 것과 같이 전류가 증가함에 따라 공진주파수가 상승하여 0.6 A의 선과 0 A의 선이 만나는 주파수 이상의 주파수에서 공진피크가 나타나는 경우를 확인할 수 없었다. 따라서, 식 (3)은 MR 마운트의 특성을 나타내는 운동방정식이 될 수 없음을 의미한다. 한편 식 (4)로부터 시행착오적인 방법으로 강성과 점성 감쇠계수를 조작하면, Fig. 2의 실험결과와 일치하도록 할 수 있다. 그러나 정확하게 본 MR 마운트의 매개변수를 동정하는 것이 중요하므로, 향후에 최적화 기법을 이용하여 매개변수의 동정에 관한 연구를 수행할 계획이다.

5. 결 론

본 연구에서는 MR 유체를 이용한 스쿼즈모드형 마운트를 개발하여 실험적으로 마운트의 응답특성을 검토하였고, 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) MR 유체를 이용한 마운트에 부가하는 전류를 조절함으로써 폭 넓은 주파수 영역에서 진폭을 보다 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

(2) MR 마운트에 부가하는 전류가 증가함에 따라서 쿨롱 감쇠력이 증가하는 것이 아니고, 점성 감쇠력이 증가하며, 또한 강성력이 증가하여 마운트의 공진 주파수가 상승하는 것을 확인하였다.

(3) MR 유체의 감쇠효과는 고주파수 영역에 비해서 저주파수 영역에서 보다 효과적임을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) Flower, W. C., 1985, "Understanding Hydraulic Mounts for Improved Vehicle Noise Vibration and Ride Qualities," Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper No. 850975.

(2) 안영공, 송진대, 양보석, 김동조, 2002, "인공생명 알고리즘을 이용한 유체마운트의 최적설계," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 8 호, pp. 598~608.

(3) 정우진, 정의봉, 홍성룡, 최승복, 2002, "200 kg 급 압착모드형 ER마운트의 진동제어성능 고찰," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 11 호, pp. 882~889.

(4) 안영공, 양보석, Morishita, S., 2001, "자기점성 유체를 이용한 가변감쇠 마운트의 모델화," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 1 호, pp. 141~146.

(5) Weiss, K. D., Duclos, T. G., Carlson, J. D., Chrzan, M. J. and Margida, A. J., 1993, "High Strength Magneto- and Electro-Rheological Fluids," Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper No. 932451.

(6) Lukianovich, A., Ashour, O., Thuston, W. and Rogers, C., 1996, "Electrically-controlled Adjustable-resistance Exercise Equipment Employing Magnetorheological Fluid," SPIE Proceedings, Vol. 2721, pp. 283~291.

(7) Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1996, "Modeling and Control of Magneto-rheological Dampers for seismic Response Reduction," Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp. 565~575.

(8) Zhu, C., Robb, D. A. and Ewins, D. J., 2002, "Dynamics of Over-hung Rotor with a Disc-Type Magneto-rheological Fluid Damper," IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics,

pp. 607~614.

(9) Simon, D. and Ahmadian, M., 2001, "Vehicle Evaluation of the Performance of Magneto Rheological Dampers for Heavy Truck Suspensions," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 123, pp. 365~375.

(10) 정시영, 최상규, 강덕형, 1997, "무한 소폭 전 기유변 스퀴즈 필름 댐퍼에 관한 이론적 근사해," 한국유체학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp. 60~67.

(11) Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., 1988, "An Electroviscous Damper for Rotor Applications," Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 112, No. 3, pp. 440~443.

(12) 임승철, 채정재, 박상민, 윤은규, 2002, "ER 유체 감쇠기를 이용한 유연 회전축계의 진동제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 5 호, pp. 365~373.

(13) 이현희, 최승복, 2001, "MR 유체를 이용한 엔진마운트의 진동제어," 한국소음진동공학회 추계학술

논문집, pp. 213~128.

(14) Carlson, J. D. and Spencer Jr., B. F., 1997, "Magneto-rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control," Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, September 1-6, Chiba, Japan, III, 35~40.

(15) Kim, J. H., Lee, C. W. and Lee, S. K., 1996, "Modeling of Magneto-rheological Fluid Based Semi-Active Mount," 3rd International Conference On Motion and Vibration Control, Japan, pp. 164~169.

(16) Rao, S. S., 1995, "Mechanical Vibrations with Disk (3rd Edition)," Addison-Wesley, New York, pp. 152~157.

(17) Lee, D. Y. and Wereley, N. M., 2000, "Analysis of Electro- and Magneto-rheological Flow Mode Dampers Using Herschel-Bulkley Model," Proceeding of SPIE Vol. 3989, pp. 244~255.