

정밀장비의 방진 및 과도응답 제어를 위한 하이브리드 방진시스템

The Hybrid Control System for the Vibration Isolation and the Transient Response Reduction of precision Equipment.

이규섭†·손성완*·이홍기*·한현희*·진종균**

GyuSeop Lee, SungWan Son, HongKi Lee, HyunHee Han and ChongKeun Chun

Key Words : Vibration Isolation(방진),MR Damper(MR댐퍼), Semi-active Control(반능동제어), Precision Equipment(정밀장비)

ABSTRACT

It is very important to control the vibration transmitted from external utilities and the transient response due to the internal sources for the precision equipment, which is very sensitive to the vibration environment. The anti-vibration tables that use air springs have been widely used due to their excellent isolation performance, but the systems with high flexibility have the critical problem of large transient response by the impulsive force of the moving mass in operation of the equipment. In this paper, the hybrid vibration control system is proposed, which is combined the air springs with the semi-active MR dampers in order to satisfy the performances of isolation and vibration reduction simultaneously.

1. 서론

진동에 민감한 초정밀 가공 및 검사 장비를 운용하고 있는 반도체, LCD 등의 생산라인은 우수한 진동환경 조성을 위하여 많은 노력을 하고 있다. 공장 구조설계에 있어서는 충분한 동적강성을 얻기 위하여 동강성 criteria를 적용하고 있으며, 운용 중 각종 유틸리티의 가진 효과에 따른 환경진동 레벨은 Vibration criteria로 주파수 대역별로 관리되고 있다. 이러한 노력에도 불구하고 장비의 정밀화, 대형화의 발전 속도는 더욱 급속하여 바닥구조의 진동이 장비로 전달되는 것을 차단하기 위한 방진시스템을 적용하는 경우가 증가하게 된다. 방진시스템은 외부 가진 주파수와 방진시스템의 고유진동수 비로써 방진효율이 결정되며 정밀방진의 경우 고유진동수는 3Hz 내외로 결정하는 것이 일반적이다.

이러한 방진시스템의 적용에 있어 발생하는 문제점은 초정밀 가공 및 검사장비들이 현미경, 광학장비 혹은 레이저 장비들을 장착하여 장비 상을 이동하며 가공 혹은 검사

하도록 하는 이송장치(Gantry 혹은 stage saddle)의 감속속에 의한 관성력으로 방진시스템 상의 장비는 큰 천이진동(transient vibration)이 발생하게 된다. 이러한 천이진동은 이후 공정의 진행을 방해하므로 이를 줄이기 위하여 고감쇠 댐퍼를 장착하는 경우가 많으나 댐퍼의 적용은 전달률을 증가시켜 방진효율을 저하시키게 된다. 이와 같이 방진과 천이진동의 제진은 상호 배리되는 관계에 있으므로 수동적 방법은 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 수동형 방진시스템의 한계를 극복하기 위하여 감쇠력 제어가 가능한 MR 댐퍼를 이용한 하이브리드 방진시스템을 구성하여 방진성능을 유지하며 천이진동을 효과적으로 제어하고자 한다. 시스템 구성은 그림 1과 같이 방진시스템은 공기스프링과 MR 댐퍼가 평행하게 결합되어 있어 천이진동 발생 시 MR 댐퍼의 작동으로 진동이 제어되며, 작은 진동에 대해서는 MR 댐퍼의 감쇠력도 작으므로 방진효율은 극대화된다.

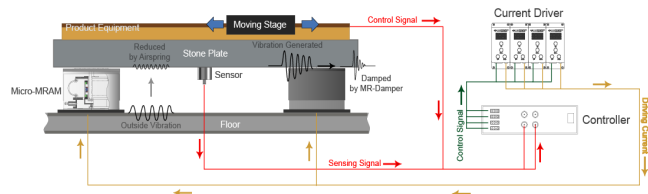


그림 1 하이브리드 방진시스템 개념도

† 교신저자; 알엠에스 테크놀로지(주)
E-mail : rmstech@rmstech.co.kr
Tel : (041) 556-7601, Fax : (041) 556-7603

* 알엠에스 테크놀로지(주)

** 선문대학교 기계공학과

2. 이론

2.1 방진시스템의 운동방정식

정밀장비의 방진시스템은 대부분 그림 2와 같은 직육면체 후판 형태의 Frame 상에 고정되며 3개의 병진운동과 3개의 회전운동으로 6 자유도의 운동계로 표현된다. 이 운동방정식의 일반화는 매우 복잡한 구조를 가지나 실제 적용되는 구조는 그림 2와 같이 2 평면 대칭 혹은 1 평면 대칭 형태가 일반적이며 방진장치도 수직방향 지지(orthogonal support)가 대부분이므로 단순 형태인 2평면 대칭의 경우로 모델링하면 식(1)과 같다.

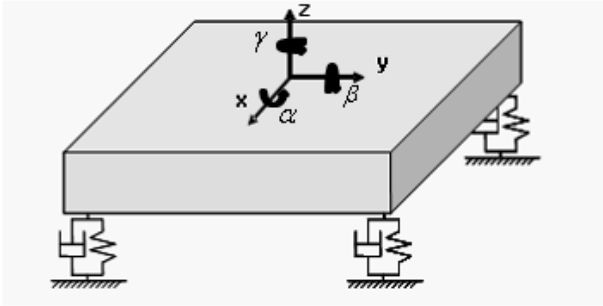


그림 2 평면 대칭 구조 방진시스템

$$\ddot{m}x + c_x(\dot{x} + a_z\dot{\beta}) + k_x(x + a_z\beta) = F_x$$

$$\ddot{m}y + c_y(\dot{y} + a_z\dot{\alpha}) + k_y(y + a_z\alpha) = F_y$$

$$\ddot{m}z + c_z\dot{z} + k_z z = F_z$$

$$I_{xx}\ddot{\alpha} + c_y a_z^2 \dot{y} + (c_y a_z^2 + c_z a_y^2)\dot{\alpha} + k_y a_z y + (k_y a_z^2 + k_z a_y^2)\alpha = M_x$$

$$I_{yy}\ddot{\beta} + c_x a_z^2 \dot{x} + (c_x a_z^2 + c_z a_x^2)\dot{\beta} + k_x a_z x + (k_x a_z^2 + k_z a_x^2)\beta = M_y$$

$$I_{zz}\ddot{\gamma} + (c_x a_y^2 + c_y a_x^2)\dot{\gamma} + (k_x a_y^2 + k_y a_x^2)\gamma = M_z \quad - (1)$$

여기서 m 은 질량, I 는 질량관성 모멘트, c, k 는 감쇠 및 스프링상수이며 a 는 무게중심에서 방진장치 중심까지의 거리이다.

식(1)은 무게중심을 좌표중심으로 유도되었다. 실제 제어시스템의 구성에 있어 센서 및 방진장치의 설치 위치가 무게중심에 있지 않으므로 식(1)의 응답과 센서 및 방진장치의 응답에 관계되는 좌표변환이 필요하다. 그림 3은 시스템의 좌표계와 센서와 방진장치의 설치 위치를 나타내고 있다. x, y 및 γ 는 xy평면 상에서 운동(in plane motion)을 하고 있으며 α, β 및 z 는 xy 평면을 벗어나 운동(out of plane motion)을 하게 된다. 따라서 수직방향으로 설치한 센서의 출력은

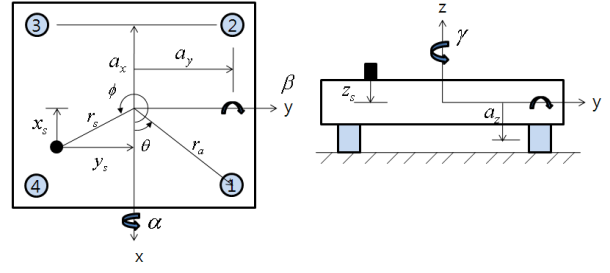


그림 3 시스템의 좌표계와 센서 및 방진장치의 설치 위치

$$S_z = \{1 \ r_s \sin\phi \ -r_s \cos\phi\} \begin{Bmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \quad - (2)$$

또한 x, y 의 수평방향으로 설치한 센서의 출력은

$$S_x = \{1 \ 0 \ -r_s \sin\phi\} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \gamma \end{Bmatrix}, \quad S_y = \{0 \ 1 \ r_s \cos\phi\} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ \gamma \end{Bmatrix} \quad - (3)$$

이 된다. 3축 센서를 사용하여 일반화하면

$$\{S\} = [T_s]\{w\} \quad - (4)$$

의 관계식을 얻는다. 여기서 $\{S\} = \{S_x \ S_y \ S_z\}^T$,

$$\{T_s\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_s \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & r_s \cos\phi \\ 0 & 0 & 1 & r_s \sin\phi & -r_s \cos\phi & 0 \end{bmatrix},$$

$\{w\} = \{x \ y \ z \ \alpha \ \beta \ \gamma\}$ 이다.

센서의 응답출력으로부터 시스템의 응답을 얻는 것은 식(22)의 역변환으로 가능하다. 그러나 변환행렬 $[T_s]$ 가 정방행렬이 아니므로 일반화를 위하여 2개의 3축 센서를 사용하여 6x6의 정방행렬의 좌표변환 행렬을 얻는다. 방진장치의 자유도도 x, y 및 z 의 3 자유도를 가지고 있다. 방진장치의 변위 $\{V\}$ 와 응답 $\{w\}$ 의 변환식도 같은 형태로

$$\{V\} = [T_v]\{w\} \quad - (5)$$

가 된다. 여기서 $\{V\} = \{V_x \ V_y \ V_z\}^T$,

$$\{T_v\} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -r_a \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & r_a \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 & r_a \sin\theta & -r_a \cos\theta & 0 \end{bmatrix}$$

이다. 센서 출력으로 예측되는 방진장치의 응답은

$$\{V\} = [T_v][T_s]^{-1}\{S\} \quad - (6)$$

가 된다.

2.2 제어시스템의 구성

방진/제진시스템은 제진대 상에 설치된 센서를 이용하여 진동을 측정하고 이 진동입력을 이용하여 제어기는 제어

알고리즘을 이용하여 출력값을 current driver 보낸다. Current driver는 이 출력값에 따라 MR Damper에 전류를 인가하여 발생한 진동을 제어하게 된다. 방진/제진시스템의 구성도는 그림 4와 같다.

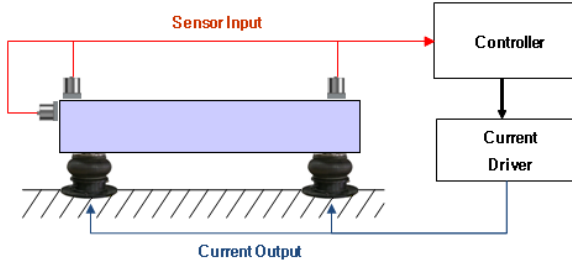


그림 4 하이브리드 방진시스템의 구성도

하이브리드 방진장치는 4개 지점에 설치되어 있으며 2 평면에 대하여 대칭구조를 가지고 있어 식(1)과 같이 3개의 병진운동과 3개의 회전운동으로 총 6개의 자유도를 가지고 있다. 반면에 MR 댐퍼는 수직방향으로만 설치되어 있어, z 방향의 병진운동과 α, β 의 회전운동에 대한 제어가 가능하다. MR 댐퍼를 이용한 제어시스템은 능동제어 방식과 달리 에너지를 흡수하는 방식이므로 항상 안정한 시스템을 유지할 수 있어 센서 개수의 최소화 및 제어 알고리즘의 단순화 등으로 상용화에 장점을 가지고 있다.

사용되는 MR 댐퍼의 모델을 개선된 Bingham 모델을 이용하여 표현하면

$$C_{MR} = (15i + 4) \times 10^4 (\text{Nsec/m}), \quad |v| > v_0 \quad (7)$$

$$C_{MR} = 1.7 \times (i^{1.5} + 0.1) \times 10^4 (\text{Nsec/m}), \quad |v| < v_0$$

이 된다. 여기서 v_0 는 3 mm/sec 이다.

가장 일반적인 구조인 Gantry 구조의 장비를 모사한 pilot 시스템은 그림 5와 같다. 이 시스템은 Linear motor를 이용하여 y축 방향의 이동질량으로 가진하는 방법을 사용한 경우로 운동방정식은

$$\ddot{y} + 0.5736 \dot{y} - 0.095 \dot{\alpha} + 217.2y - 5.83\alpha = \frac{F_y}{2615}$$

$$\ddot{\alpha} - 0.3585 \dot{y} + 1.17 \dot{\alpha} - 135.7y + 644.3\alpha = \frac{M_x - F_{\alpha}}{690.4} \quad (8)$$

이 된다. 센서에서 측정된 진동과 상태변수 y 및 α 의 관계

$$\text{는 } y = S_y, \quad \alpha = \frac{S_z}{r \sin \phi} \text{가 된다.}$$

하이브리드 방진장치의 MR 댐퍼는 z 방향으로만 제어력을 발생하므로 실제 적용 시에는 z 방향의 센서출력 S_z 만을 사용한다. 이때 제어력은

$$F_{\alpha} = C_{MR} \dot{y} \quad (9)$$

이며, MR 댐퍼의 감쇠 C_{MR} 은

$$i = \frac{|K_{\beta} \alpha + K_d \dot{\alpha}|}{Z_{MR}} \quad (10)$$

과 식(7)의 조건으로 결정된다. 여기서 Z_{MR} 은 MR 댐퍼 Core의 Impedance이다. 실험에 사용된 Core의 Impedance는 3.5Ω이며 사용전류는 1.2 A로 제한하고 있다.

Pilot 시스템의 동력학적 모델을 구성하기 위한 주요 물리량은 표 1과 같다. 이 중 이동질량의 크기는 80kg이며 초기 감쇠비는 8% 수준이다.

표 1 Pilot 시스템의 동력학적 모델을 위한 물리량

물리량	방향	크기
질량(kg)	-	2,615
질량 관성모멘트 (kgm^2)	I_{xx}	690.4
	I_{yy}	872.9
	I_{zz}	1,536
무게중심에서 방진장치 설치위치까지의 거리(m)	a_x	± 0.73
	a_y	± 0.715
	a_z	-0.165
스프링 상수 (N/m)	k_x	142,000
	k_y	142,000
	k_z	210,000

3. 실험

3.1 동특성 실험

동특성 실험은 식(1)의 동력학적 모델에 대한 신뢰성을 확인하기 위한 실험으로 모델의 고유진동수와 modal test의 실험적 방법으로 구한 고유진동수를 비교하여 확인한다. 동역학적 모델은 식(1)의 고유치 해석으로 구하며, 유한요소해석은 ANSYS를 사용하였다. 비교결과 5% 이내의 오차범위에서 일치하는 것으로 나타났다.

표 2 Pilot 시스템의 고유진동수

진동 모드	동역학모델	유한요소해석	동적 실험
ω_x	2.28	2.27	2.19
ω_y	2.29	2.29	2.25
ω_z	2.85	2.87	2.82
ω_γ	3.13	3.12	3.14
ω_α	3.63	3.65	3.85
ω_β	4.15	4.17	4.35

3.2 제진 실험

제진시험은 pilot 시스템 상의 이동질량으로 수평방향 관성력을 발생시킨 후 이를 제어하는 방식과 impact hammer를 이용하여 수직 및 수평방향 충격력을 주어 발생하는 진동을 제어하는 방식으로 수행하였다. 그림 5는 pilot 시스템을 나타낸다.

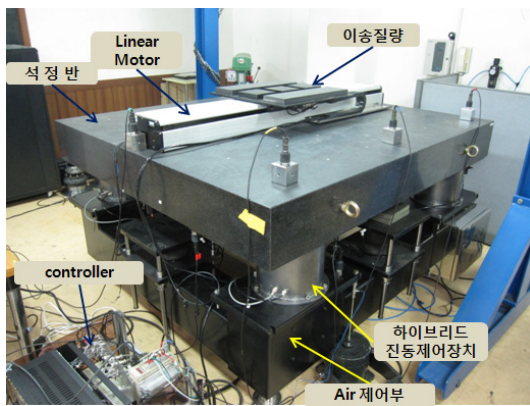
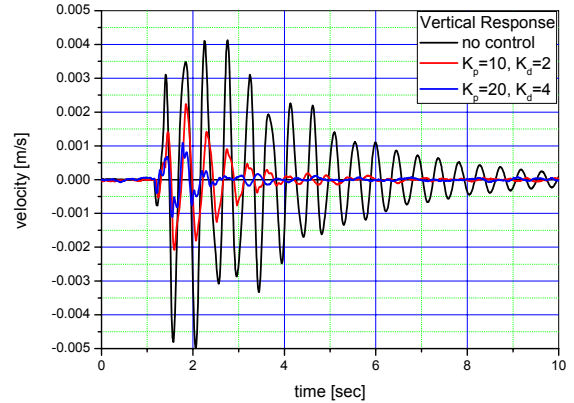


그림 5 Pilot 시스템에 의한 실험 전경

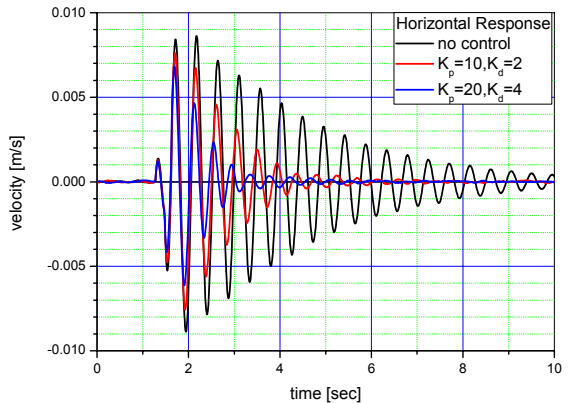
이동질량에 의한 수평방향 가진에 있어서는 제진대 상의 edge부에 수직방향 속도센서 1개를 사용하였다. 제진실험 결과는 그림 6과 같다.

수직방향의 제진효과를 높이기 위해서는 MR 댐퍼의 최대 감쇠력을 증가시키므로써 해결 가능하다. 수직방향에 비하여 효과는 작지만 수평방향 감쇠효과도 나타나고 있다. 이것은 식(8)의 운동방정식에 나타나고 있는 연성효과와 MR 댐퍼의 수평방향 감쇠효과가 결합되어 나타난다. 두가지 요소를 확인하기 위하여 impact hammer를 이용한 충격력에 대한 제진실험을 수행하였다. 수직방향으로 충격력을 주는 경우 나타나는 진동 mode는 z, α 및 β 로 MR 댐퍼가 모두 작동되는 방향이다. 반면에 y 축 수평방향 충격력은 y, γ 및 α 방향의 진동이 발생할 수 있다. 그림 7은 수직방향 제진 실험결과이

며, 그림 8은 수평(y)방향 실험결과이다. 수직방향의 제어효과는 예측한 바와 같이 매우 우수하게 나타났다으며, 수평방향은 연성효과를 줄이기 위하여 중심부에 충격을 주었으나 감쇠효과가 나타나는 것으로 MR 댐퍼의 수평방향 감쇠성분이 작용하는 것으로 판단할 수 있다.



a) 수직방향



b) 수평방향

그림 6 수평방향 관성력에 의한 천이진동의 제어

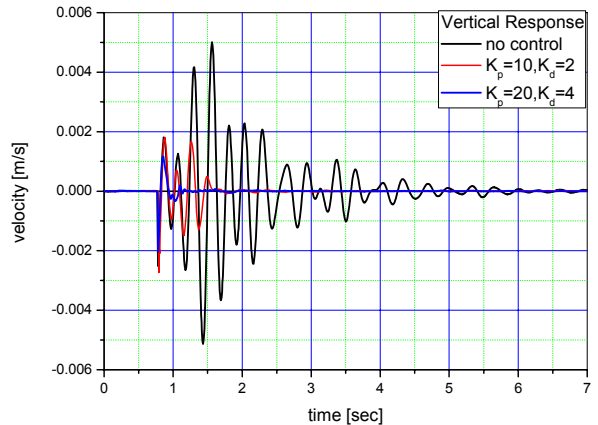


그림 7 수직방향 충격력에 의한 천이진동의 제어

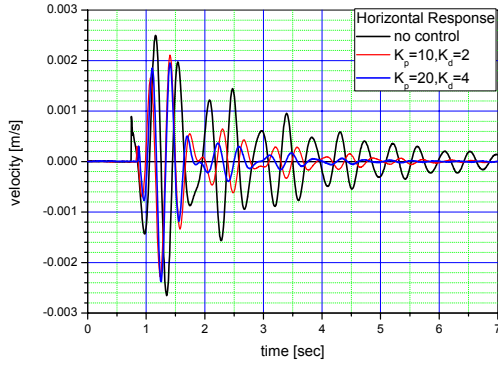


그림 8 수평방향 충격력에 의한 천이진동의 제어

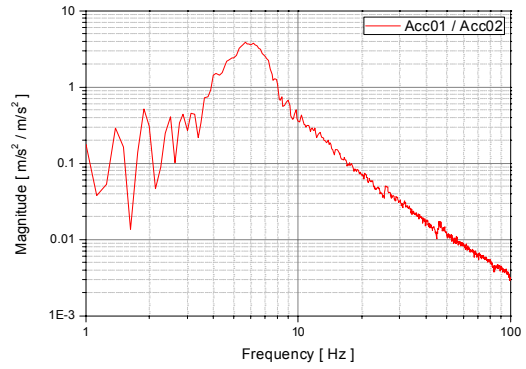


그림 10 전달률 곡선

3.3 방진 실험

하이브리드 방진시스템은 제진을 하지 않는 시점($i=0$)에서는 감쇠력을 최소화하여 방진효율을 높이는 것이 중요하다. 하이브리드 방진시스템의 방진성능시험은 그림 9와 같이 Frame 하단에 위치한 가진기로 random 가진하여 base frame과 석정반 상의 진동가속도 비를 측정하여 구한다.

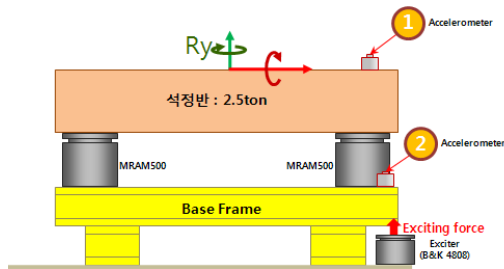


그림 9 방진실험 방법

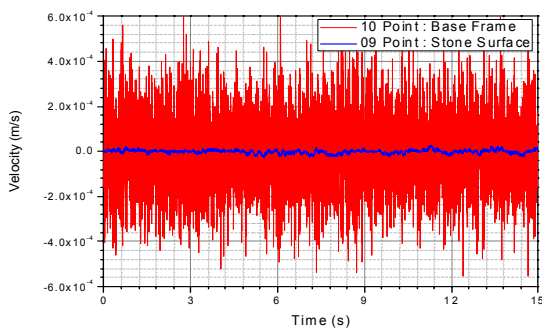


그림 9 방진 장치 상부 및 하부의 진동 응답

4. 결 론

정밀장비의 외부 전달 진동을 차단하기 위한 방진시스템에 장비 내부의 충격성 동하중에 의한 과도응답 제어를 위한 MR 댐퍼를 조합한 하이브리드 방진시스템을 고안하여 제진/방진성능을 확인하였다. 이동질량의 크기가 전체 중량의 10%를 초과하는 장비에 대해서는 관성항의 연성을 고려한 보다 세밀한 동적 모델을 적용하여야 하나 본 논문의 2평면 대칭 구조에 있어서는 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 수평방향으로 MR 댐퍼를 적용함으로써 수평방향 제진성능도 개선시킬 수 있을 것으로 예상하며 시스템 구성이 간단하고 안정된 상태를 유지할 수 있으므로 상용화에 큰 장점을 가지고 있어 향후 미진한 부분의 보완으로 우수한 방진/제진 시스템으로 활용될 것을 기대한다.

후 기

이 논문은 지정부 지원의 중장기기술개발과제로 수행되었으며 관련된 분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 박영필, 손태규, 김규용, 유원희, "전자기력을 이용한 능동제진에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제18호, 5호, pp.1169~1181, 1994
- (2) Lee, S. H. and Choi, S. B., 2000, "Control and Response Characteristics of a Magnetorheological fluid damper for Passenger Vehicles," Journal of Intelligent Material System and Structures, Vol.11
- (3) Nicholas C R. and Norman M. W., 2004, "Volume constrained Optimization of magnetorheological and electrorheological valves and dampers," Smart material and Structures Vol. 13, pp. 1303~1313.