

스마트 수동 감쇠 시스템을 이용한 사장 케이블의 진동 제어

Vibration Control of Stay Cable Using Smart Passive Damping System

정 형 조* , 조 상 원** , 장 지 은*** , 이 인 원****
Jung, Hyung-Jo Cho, Sang-Won Jang, Ji-Eun Lee, In-Won

ABSTRACT

Stay cables, such as are used in cable-stayed bridges, are prone to vibration due to their low inherent damping characteristics. Several methods have been proposed and implemented to mitigate this problem, though each has its limitations. Recently some studies have shown that active and semiactive control system using MR (Magneto-rheological) damper can potentially achieve both higher performance levels than passive control system and adaptability with few of the detractions. However, a control system including a power supply, controller, and sensors is required to maximize the performance of the MR damper and this complicated control system is not effective to most of large civil structures. This paper proposes a smart passive damping system using MR dampers by introducing electromagnetic induction (EMI) system as an external power source to MR damper and verified the performance of smart passive damping system for mitigating the vibration of stay cables. The performances of smart passive damping system are compared with those of linear viscous damper and passive-mode MR damper.

1. 서론

최근 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 사장교의 건설이 증가하고 있으나, 교량의 장대화로 야기된 여러 가지 기술적 문제는 미결로 남아있는 상태이다. 특히, 사장교의 주요 요소인 케이블은 매우 유연하며 낮은 감쇠비를 갖기 때문에, 풍하중과 활하중으로 인하여 발생하는 진동에 민감하게 반응하게 된다. 이는 케이블과 케이블 연결 부위의 파손을 유발하여 사용기간을 감소시키거나 부식방지처리의 손상으로 인한 잠재적인 문제를 발생시킬 수 있다. 현재까지는 케이블의 진동을 감소시키기 위하여 부분적으로 케이블의 표면을 변화시키거나 수동 감쇠기를 설치하는 방법 등이 소극적으로 사용되었으나, 최근들어 능동 감쇠기와 반능동 감쇠기를 설치하여 케이블의 진동을 매우 효과적으로 감소시킬 수 있다는 연구들이 발표되어 왔다.

그러나 반능동 제어 시스템은 자기유변유체 감쇠기에 전달할 입력전압을 결정하기 위하여 복잡한 제어기와 계측장비를 필요로 하기 때문에 제어 시스템이 장기간 외부 환경에 노출되거나 극한 환경에 설치된 구조물의 경우에는 적용하기 힘들다.

본 연구진은 위와 같은 반능동 제어 시스템의 단점을 극복하기 위하여 전자기유도 (Electromagnetic Induction, EMI) 시스템을 도입하여 MR 감쇠기의 전원 역할과 함께

* 정희원·세종대학교 토목환경공학과 조교수
** BLWTL, University of Western Ontario, Post Doctoral Fellowship
*** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연구원
**** 정희원·한국과학기술원 건설 및 환경공학과 정교수

제어기로서 활용하는 스마트 수동 감쇠 시스템을 제안하고 실험을 통해 얻어진 EMI시스템의 모델을 사용하여 빌딩 구조물에 적용하였을 때의 성능을 수치해석을 통하여 검증한 바 있다.

본 연구에서는 빌딩구조물의 진동 제어 성능이 뛰어난 스마트 수동 감쇠 시스템을 사장 케이블에 적용하였을 때 그 성능을 검증하고, 선형 점성 감쇠기와 수동 모드로 구동되는 MR 감쇠기를 적용하였을 때의 각 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 비교 평가 하였다.

2. 사장케이블과 감쇠 시스템

2. 1. 사장 케이블

케이블은 큰 장력이 가해지기 때문에 일반적으로 작은 처짐을 갖는다. 따라서, 본 연구에서는 그림 1.과 같이 처짐을 갖지 않는 이상적인 사장 케이블을 대상으로 하며, 이때 케이블의 지배 미분 방정식은 식(1)과 같다.

$$m\ddot{v}(x,t) + c\dot{v}(x,t) - Tv''(x,t) = f(x,t) + F_d(t)\delta(x - x_d) \quad (1)$$

여기서, $v(x,t)$ 는 케이블의 수직방향의 변위, $F_d(t)$ 는 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력, $f(x,t)$ 는 외부하중, L 은 케이블의 길이, T 는 케이블의 장력, m 은 케이블의 길이당 질량, 그리고 ζ 는 케이블의 모달 감쇠비(modal damping coefficient)이다.

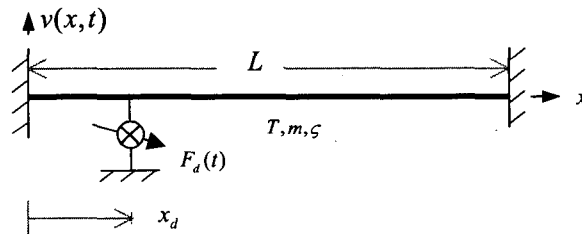


그림 1. 감쇠기가 설치된 케이블 모델

케이블의 수직방향의 변위 형상이 유한한 케이블의 모드들로 표현 되어진다고 가정하고 식(2)와 같은 형상함수와 Galerkin Method를 이용하여 식(1)로부터 식(3)과 같은 행렬로 이루어진 지배방정식을 산출하였다.⁽¹⁾

$$\phi_1(x) = \begin{cases} x/x_d & 0 \leq x \leq x_d \\ (L-x)/(L-x_d) & x_d \leq x \leq L \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi_{j+1}(x) = \sin \pi jx$$

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t) + \varphi_d F_d(t) \quad (3)$$

여기서, M 은 질량행렬, C 는 감쇠행렬, K 는 강성 행렬, F 는 하중 벡터, 그리고 φ_d 는 감쇠력 벡터이다.

2. 2. 감쇠 시스템

본 연구에서는 스마트 수동 감쇠 시스템이 케이블에 적용되었을 때의 제진 성능을 평가하기 위

하여 선형 점성 감쇠기와 수동 모드 MR 감쇠기를 적용 하였을 때의 각 시스템의 진동 제어 성능과 비교 분석하였다.

2. 2. 1. 선형 점성 감쇠기 (Linear viscous damper)

이상적인 선형 점성 감쇠기를 가정 하며, 이때 감쇠력은 식 (4)와 같이 산정 된다.

$$F_d(t) = c \cdot v(x_d, t) \quad (4)$$

2. 2. 2. 수동 모드 자기유변유체 감쇠기

본 연구에서 대상으로 하는 자기유변유체 감쇠기는 전단모드 자기유변유체 감쇠기로서 거동은 그림 3. 과 같이 Bouc-Wen 모델과 한 개의 점성 감쇠 요소를 사용하여 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

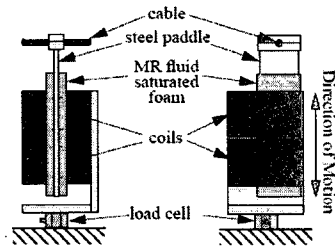


그림 2. 전단 모드 MR 감쇠기

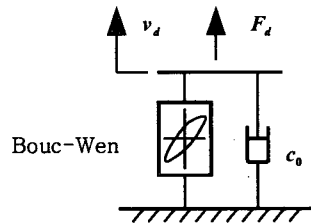


그림 3. 전단 모드 MR 감쇠기 모델

$$\begin{aligned}
 f &= c_0 \dot{x} + \alpha z \\
 \dot{z} &= -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \\
 \text{where } \alpha &= \alpha_a + \alpha_b \\
 c_0 &= c_{0a} + c_{0b} u \\
 \dot{u} &= -\eta(u - v)
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, v 는 입력전압, $c_{0a}, c_{0b}, \alpha_a, \alpha_b, n, \gamma, \beta, A$ 는 감쇠기의 특성을 나타내는 상수이다.

이때, 수동모드 자기유변유체 감쇠기는 감쇠기에 가해지는 입력전압 v 를 일정하게 유지하여 진동 제어 시 감쇠기의 감쇠특성이 변하지 않는 상태로 구동된다.

2. 2. 3. 스마트 수동 감쇠 시스템⁽⁶⁾

스마트 수동 감쇠 시스템은 수동모드 자기유변유체 감쇠기에 외부 전원과 반능동 제어시스템이나 능동 제어시스템에서 요구하는 복잡한 제어기를 대신하여 전자기 유도 시스템을 도입한 제어 시스템이다. 전자기유도 시스템은 영구자석과 유도코일로 이루어져있으며 Faraday의 전자기 유도 법칙을 따른다. 외부하중에 의하여 구조물에 변형이 발생되면 전자기 유도 시스템의 회로와 전자기장의 상대운동에 의해 생긴 유도전류가 자기유변유체 감쇠기에 공급되어 감쇠 특성을 변화시킴으로써 효과적으로 구조물의 변형을 제어하게 된다(그림 4).

이때, EMI 시스템에서 유도된 유도 기전력은 (6)와 같다.

$$\varepsilon = -n \frac{d\Phi_B}{dt} = -n \times B \frac{dA}{dt} = -K_{emf} \frac{dA}{dt} \quad (6)$$

이때, ε 는 유도 기전력, n 은 코일이 감긴 횟수, Φ_B 는 Magnetic Flux, B 는 자기장의 세기, A 는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적이다.

따라서 EMI 시스템에서 생성되는 전기에너지는 영구자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 감긴 횟수와 코일의 크기 등을 통하여 조절할 수 있고, 자기유변유체 감쇠기가 설치된 지점의 구조물의 변형 속도에 비례하여 자기유변유체 감쇠기의 점성을 증가시킨다. 이때, K_{emf} 의 값을 조절하여 EMI 시스템의 특성을 결정할 수 있다.

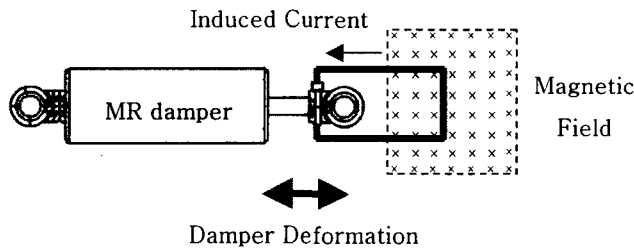


그림 4. EMI 시스템을 구비한 자기유변유체 감쇠기의 개략도

3. 수치해석

케이블 진동에 대하여 스마트 수동 감쇠 시스템의 감쇠 효과를 알아보고 각 제어 시스템의 성능을 비교하기 위해서 다음과 같은 모델에 대해 수치해석을 수행하였다. 제어 시스템은 선형 점성 감쇠기, 수동 모드 자기유변유체 감쇠기, 스마트 수동 감쇠 시스템을 사용하였고 각 제어 시스템을 장착했을 때의 케이블의 중앙 지점의 최대 변위와 케이블 전 영역에서의 RMS 변위와 RMS 속도를 비교 분석하였다.

3. 1. 해석 대상 구조물의 제원

Christenson이 수행한 실험과 동일한 케이블과 감쇠기를 대상으로 수치해석을 수행하였다⁽²⁾. 케이블과 감쇠기의 제원은 표 1. 과 표 2. 와 같다. 이때, 감쇠기의 최대 감쇠력은 10N, 최대 입력 전압은 10V 이다.

3. 2. 외부 하중

대상 구조물의 변형을 유발하기 위하여 식 (7)과 같은 외부 하중을 가정하였다. 이때 외부 하중은 t 와 x 에 관한 항들의 곱으로 나타나며 x 에 관한 항은 케이블의 1차 모드와 동일하게 가정함으로써 감쇠기가 설치 되지 않았을 때는 케이블의 1차 모드가 유발되도록 유도하여 케이블의 거동을 효과적으로 묘사하였다. 이때, $W(t)$ 를 가정함에 따라 하중의 특성을 표현할 수 있다.

$$f(x, t) = W(t) \sin \pi \frac{x}{L} \quad (7)$$

표 1. 케이블 제원

항목	제원	항목	제원
케이블 길이 L	12.65 m	모달 감쇠비 ζ	$\zeta_1 = 0.0015$
길이당 질량 m	0.747 kg/m		$\zeta_2 = 0.003$
			$\zeta_3 = 0.005$
			$\zeta_{i \geq 4} = 0.0005$
케이블 장력 T	2172 N	자유진동수 ω_0	2.89 Hz

표 2. 전단 모드 MR 감쇠기 상수

항목	상수 값	항목	상수 값
γ	1.3×10^5	c_{0b}	125
n	1	α_a	70
β	1.3×10^5	α_b	700
A	200	η	70
c_{0a}	50		

3. 2. 수치해석 결과

3. 2. 1. 가우시안 백색 잡음

그림 5. 부터 그림 13.은 $W(t)$ 를 가우시안 백색 잡음이라 가정하여 사장 케이블을 가진 시켰을 때의 각 제어 시스템의 성능을 나타낸 그래프이다.

그림 5, 6, 7은 각각 선형 점성 감쇠기를 설치 시 감쇠기의 감쇠 계수에 따라 중앙 지점에서의 최대 변위, 케이블 전 영역의 RMS 변위와 속도의 변화를 나타낸 그래프로써, 세 그래프 모두 최적의 성능을 획득하는 감쇠 계수가 있음을 확인 할 수 있으며, 그때의 최적 감쇠 계수 $c = 650N \text{ sec}/m$ 이다.

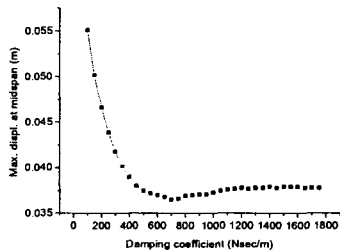


그림 5. 선형 점성 감쇠기 설치 시 중앙 지점의 최대 변위

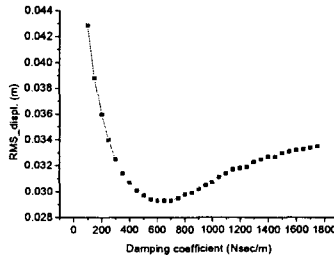


그림 6. 선형 점성 감쇠기 설치 시 RMS 변위

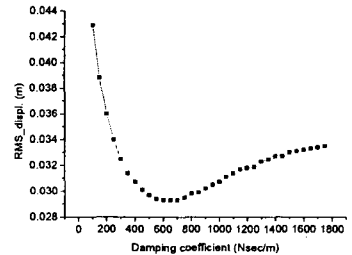


그림 7. 선형 점성 감쇠기 설치 시 RMS 속도

그림 8, 9, 10은 수동 모드 자기유면유체 감쇠기를 적용하였을 때, 감쇠기에 가해지는 입력 전압을 0V부터 최대 입력 전압 10V까지 변화시키면서 그 성능의 변화를 나타낸 그래프이다. 그 경향은 선형 점성 감쇠기와 비슷하며 최적 입력전압은 $v = 3V$ 이다.

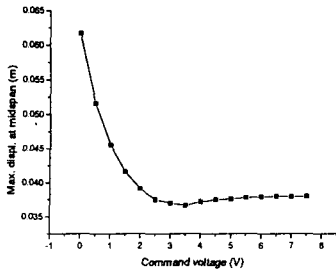


그림 8. 수동 모드 MR 감쇠기 설치 시 중앙 지점의 최대 변위

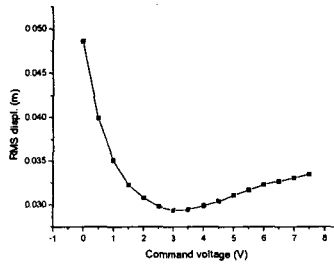


그림 9. 수동 모드 MR 감쇠기 설치 시 RMS 변위

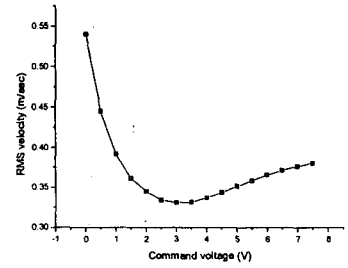


그림 10. 수동 모드 MR 감쇠기 설치 시 RMS 속도

그림 11, 12, 13은 스마트 수동 감쇠 시스템을 적용하였을 때, 감쇠 시스템의 특성을 변화시키는 변수 K_{emf} 의 값을 변화시키며 그 성능의 변화를 나타낸 그래프로써 그 성향은 또한 선형 점성 감쇠 시스템과 유사하나 빠르게 최적 값이 도달하며 최적 범위도 선형 점성 감쇠 시스템이나 수동 모드 자기유변유체 감쇠기를 적용했을 때보다 넓다. 이때, 최적의 K_{emf} 의 값은 $K_{emf} = 175V \text{ sec}/m$ 이다.

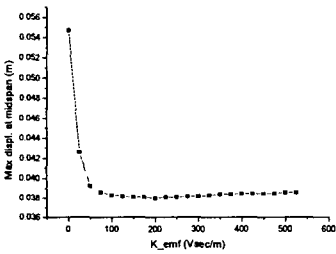


그림 11. 스마트 수동 감쇠 시스템 설치 시 중앙 지점의 최대 변위

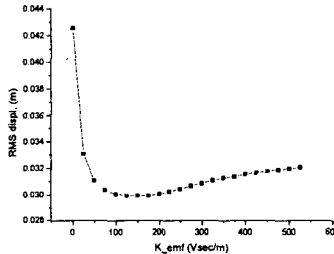


그림 12. 스마트 수동 감쇠 시스템 설치 시 RMS 변위

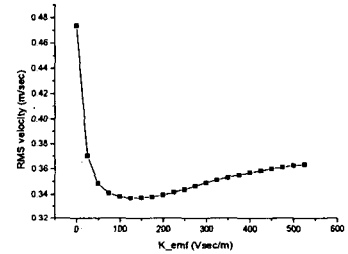


그림 13. 스마트 수동 감쇠 시스템 설치 시 RMS 속도

이때, 각 최적 값들을 나타내면 표 3.과 같다. 각 제어 시스템의 성능은 거의 유사하나 최적의 선형 점성 감쇠기를 적용하였을 때의 성능이 조금 더 우수하다. 특히 케이블 중앙 지점에서의 최대 변위에 대한 선형 점성 감쇠기의 제어 성능이 마트 수동 감쇠 시스템에 비하여 비교적 뛰어나다. 그러나 스마트 수동 제어 시스템은 수동 점성 감쇠기에 비해 작은 감쇠력을 이용하여 효과적으로 케이블을 제어 한 것으로 판단 된다.

표 3. 가우시안 백색 잡음을 적용하였을 때의 각 제어 시스템의 성능 평가

	Linear viscous damper ($c = 650N \text{ sec}/m$)	Passive MR damper ($v = 3V$)	Smart passive damper ($K_{emf} = 175V \text{ sec}/m$)
Max. displ. at midspan (cm)	3.68	3.70	3.81
RMS displ. (cm)	2.93	2.94	3.00
RMS velocity (cm/sec)	32.92	33.08	33.82
RMS damper force (N)	5.18	4.72	4.40

3. 2. 2. 풍하중

각 제어 시스템의 적응성을 평가 하기 위하여 가우시안 백색 잡음을 적용하여 얻어진 각 제어 시스템의 최적 설계에 대하여 백색 잡음과 특성이 다르고 더 큰 변위를 유발하는 풍하중을 적용하여 각 제어시스템의 성능을 비교 분석하였다. 풍하중은 Yang 등에 의하여 제안되어 3rd generation benchmarks for building에서 사용된 그림. 14와 같은 하중을 사용하였다.⁽⁸⁾

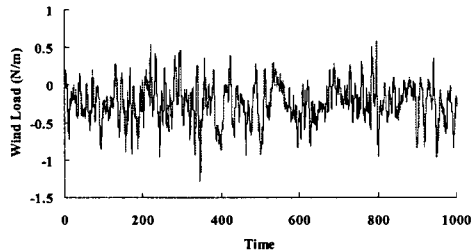


그림 14. 풍하중

(Yang et al. 3rd generation benchmarks for building)

이때의 각 제어 시스템의 성능은 표 4.와 같다. 더 큰 변위를 유발 함에 따라 수동 모드 자기유 변유체 감쇠기는 가우시안 백색 잡음을 사용 하였을 때에 비하여 매우 큰 감쇠력을 사용하였으나 모든 성능은 크게 저하 된 것을 알 수 있다. 최적 선형 제어 감쇠기 또한 케이블의 중앙 지점에서의 최대 변위를 제외하고는 모두 스마트 수동 감쇠 시스템에 비하여 성능이 떨어지며 특히 RMS 속도는 큰 차이로 성능이 저하되었음을 알 수 있다. 이에 비하여 스마트 수동 감쇠 시스템은 더 큰 변위를 유발하는 하중이 가해졌음에도 그 주기가 길다는 특성에 의하여 더 작은 감쇠력을 사용하여 다른 제어 시스템보다 뛰어난 성능을 보이고 있다. 특히 RMS 속도는 크게 감소시키는 우수한 성능을 보이는데, 이는 스마트 수동 감쇠기의 감쇠 특성에 가장 크게 영향을 주는 요소가 감쇠기 위치에서의 케이블의 변형이기 때문으로 판단된다.

또한 가우시안 백색 잡음을 적용하여 각 제어 시스템의 최적 성능을 평가 하였을 때는 성능이 유사하였으나, 특성이 다른 풍하중을 적용하였을 때는 선형 점성 감쇠기나 수동모드 MR 감쇠기의 성능이 매우 저하되는 반면 스마트 수동 제어 시스템은 적응성을 확보하여 그 성능을 유지함을 알 수 있다.

표 4. 풍하중을 적용하였을 때의 각 제어 시스템의 성능 평가.

	Linear viscous damper ($c = 650 \text{ N sec/m}$)	Passive MR damper ($v = 3 \text{ V}$)	Smart passive damper ($K_{emf} = 175 \text{ V sec/m}$)
Max. displ.at midspan (cm)	6.01	7.42	6.38
RMS displ. (cm)	3.68	3.65	3.41
RMS velocity (cm/sec)	23.69	30.55	17.09
RMS damper force (N)	5.46	7.42	2.48

4. 결론

본 논문에서는 수치해석을 통하여 스마트 수동 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 알아보았다. 수치해석은 12.56m의 사장케이블에 한 개의 감쇠기가 설치된 모델을 대상으로 수행되었으며, 스마트 수동 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능은 선형 점성 감쇠기와 수동모드 자기유변유체 감쇠기를 적용하였을 때의 제어 성능과 비교 평가되었다. 가우시안 백색 잡음을 하중으로 적용하여 각 제어 시스템의 성능을 최대로 발휘하는 최적 설계를 얻은 다음 특성이 다른 풍하중을 적용하여 각 시스템의 케이블 진동 제어 성능뿐만 아니라, 적응성도 평가하였다. 그 결과 스마트 수동 감쇠 시스템은 다른 수동 감쇠기에 비하여 적응성이 매우 뛰어나 특성이 다른 하중에도 우수한 성능을 보였으며, 특히 케이블의 속도를 제어하는데 효율적인 것으로 나타났다. 그에 반해 선형 점성 감쇠기와 수동모드 자기유변유체 감쇠기는 특성이 다른 하중이 가해졌을 때 그 성능이 매우 떨어지며 감쇠력을 비효율적으로 사용한다는 것을 알 수 있었다. 스마트 수동 감쇠 시스템은 외부 전원을 요하지 않으며, 비상시의 신뢰성과 저렴한 제작단가 등의 장점들을 가지며 그 성능 또한 다른 수동 시스템과 유사하거나 뛰어나므로 사장 케이블의 진동 제어를 위하여 사용하기에 적합한 것으로 사려된다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 지정 우수연구센터인 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터 (Smart Infra-Structure Technology Center) 지원으로 연구되었으므로 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Johnson, Erik A., Baker, Greg A., Spencer, Jr., B. F., and Fujino, Yozo, "Semiactive Damping of Stay Cables Neglecting Sag," ASCE Journal of Engineering Mechanics, 2002
2. Christenson, Richard E., "Semiactive Control of Civil Structures for Natural Hazard Mitigation: Analytical and Experimental Studies," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, Notre Dame, Indiana, 2001
3. Pacheco, Benito M., Fujino, Yozo, and Sulekh, Ajai, "Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper," Journal of Structural Engineering, Vol. 119, No. 6, June, 1993
4. 조상원, 이헌재, 오주원, 이인원, "MR댐퍼를 기반으로 하는 스마트 수동제어 시스템," 2004년도 대한 토목학회 학술발표회, 평창, 2004. 10..
5. 조상원, "Simple Control algorithms for MR dampers and smart passive control system," 박사학위논문, 한국과학기술원, 2004
6. Sang-Won Cho, Byoung-Wan Kim, Hyung-Jo Jung & In-Won Lee, "The Implementation of Modal Control for Seismic Structures using MR Damper," ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 131, No. 2, pp. 177-184 Feb 2005.
7. 조상원, 장지은, 윤우현, 이인원, "자기유변유체 감쇠기에 기반한 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 평가," 2005년도 한국지진공학회 학술발표회, 서울, 2005. 3. 18.
8. J. N. Yang, A. K. Agrawal, B. Samali and Jo. C. Wu, "Benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings," Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 130(4), 437-446, 2004