

## 사장 케이블 제진을 위한 스마트 제진 기법

### Smart Control Techniques for Vibration Suppression of Stay Cable

정형조\* · 박철민\*\* · 조상원\*\*\* · 이인원\*\*\*\*

Jung, Hyung-Jo · Park, Chul-Min · Cho, Sang-Won · Lee, In-Won

#### ABSTRACT

Stay cables, such as used in cable-stayed bridges, are prone to vibration due to their low inherent damping characteristics. It has been reported that a semiactive control system using MR dampers could potentially achieve both the better performance compared to a passive control system and the adaptability with few of the detractions. However, a control system including a power supply, a controller and sensors is required to improve the control performance of MR dampers. This complicated control system is not effective to most of large civil structures such as long-span bridges and high-rise buildings. This paper proposes a smart damping system which consists of an MR damper and the electromagnetic induction (EMI) part that is considered as an external power source to the MR damper. The control performance of the proposed damping system has been compared with that of the passive-type control systems employing an MR damper and a linear viscous damper.

**Keywords:** smart control, stay cable, wind load, vibration suppression, MR damper, electromagnetic induction

#### 1. 서론

사장교는 풍부한 조형미, 경제적 설계, 합리적 가설 등 여러 가지 우수한 특성 때문에 20세기 중반 이래 현재까지 꾸준한 건설되고 있는 장대교량 형식이다. 사장교는 케이블을 주부재로 한 유연한 구조물이기 때문에 풍하중에 의한 진동으로 인해 내풍 안정성에 문제가 야기될 수 있기 때문에 이에 대한 세심한 주의가 필요하다. 특히, 케이블은 교량에 전달되는 여러 하중을 장력에 의하여 주탑으로 전달시켜 주는 사장교의 주요 부재로써, 시공뿐만 아니라 건설 후 유지관리가 매우 중요하다. 그러나 교량의 장대화로 사장교에 사용된 케이블의 길이가 점차 길어짐으로써 여러 가지 기술적 문제가 야기되어 이를 해결하는 것이 급선무이다.

현재까지는 케이블의 진동을 감소시키기 위하여 부분적으로 케이블의 표면을 변화시키거나 수동 감쇠기를 설치하는 방법 등이 사용되었으나, 최근 들어 능동 감쇠기와 반능동 감쇠기를 설치하여 케이블의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있다는 연구들이 발표되어 왔다. 그러나 능동 및 반능동 감쇠 시스템은 외부하중에 대

\* 정희원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 E-mail: hjung@sejong.ac.kr

\*\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 E-mail: paust0217@hanmail.net

\*\*\* 캐나다 Univ. of Western Ontario, BLTWL, 박사후연구원

\*\*\*\* 정희원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 E-mail: iwlee@kaist.ac.kr

하여 적절한 제어를 할 수 있다는 장점에도 불구하고 복잡한 제어기와 계측장비를 필요하기 때문에 극한 환경에 설치된 토목 구조물에 적용하기 어렵다는 평가를 받고 있다.

따라서, 본 연구진은 능동 및 반능동 감쇠 시스템의 단점을 극복하기 위하여 전자기 유도(electromagnetic induction, EMI) 시스템을 이용한 스마트 감쇠 시스템을 제안하였으며 사장케이블 모델에 적용하여 수치적으로 검증하였다. 또한, 선형 점성 감쇠기와 수동 모드로 구동되는 MR (magnetorheological) 감쇠기를 적용하였을 때의 성능과 수치적으로 비교하여, 제안된 시스템의 진동 제어 성능을 평가하였다.

## 2. 스마트 감쇠 시스템과 사장 케이블 모델

### 2.1 스마트 감쇠 시스템의 소개

스마트 감쇠 시스템은 MR 감쇠기와 EMI 시스템이 결합된 감쇠 시스템이다. EMI 시스템은 수동 모드로 구동되는 MR 감쇠기에 외부 전원과 반능동 제어시스템에서 요구하는 복잡한 제어를 대신하여 전자기 유도 시스템을 도입한 신개념 진동제어 시스템이다. EMI 시스템은 영구자석과 유도코일로 이루어져있으며, Faraday의 전자기 유도 법칙을 따른다. 외부 하중에 의하여 구조물에 변형이 발생되면 EMI 시스템에서 변형에 대응하는 유도 전류가 발생하고, 이 전류가 MR 감쇠기의 감쇠 특성을 변화시킴으로써 효과적으로 구조물의 변형을 제어하게 된다. 이때, EMI 시스템에 유도된 유도 기전력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (조상원, 2004).

$$\varepsilon = -n \frac{d\Phi_B}{dt} = -nB \frac{dA}{dt} = -K \frac{dA}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $\varepsilon$ 는 유도 기전력,  $n$ 은 코일이 감긴 횟수,  $\Phi_B$ 는 Magnetic Flux,  $B$ 는 자기장의 세기,  $A$ 는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적이다.

따라서, 위 식을 고찰하여 보면, EMI 시스템에서 생성되는 전기에너지는 영구자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 감긴 횟수와 코일의 크기 등을 통하여 조절할 수 있고, MR 감쇠기가 설치된 지점의 구조물의 변형 속도에 비례하여 MR 감쇠기의 감쇠 능력을 증가시킨다. 이때,  $K$ 의 값을 조절하여 EMI 시스템의 특성을 결정할 수 있다. 그림 1에서는 EMI 시스템을 구비한 MR 감쇠기의 거동 원리를 개략적으로 보여주고 있다.

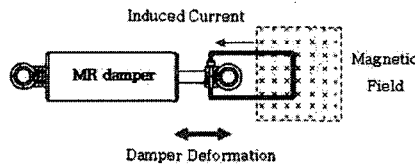


그림 1. EMI 시스템을 구비한 MR 감쇠기의 개략도

## 2.2 스마트 감쇠 시스템을 설치한 사장 케이블 모델

사장 케이블은 일반적으로 커다란 초기 장력을 도입하기 때문에 매우 작은 새그비 (sag-to-span ratio)를 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 대상 케이블 모델이 그림 2와 같이 일정한 크기의 경사각을 갖지만 처짐이 없는 이상적인 사장 케이블로 고려하였고, 이러한 케이블 모델에 대한 지배 미분 방정식을 식 (2)과 같이 구성하였다 (정형조 등, 2005).

$$m\ddot{v}(x, t) + \dot{c}v(x, t) - T\dot{v}''(x, t) = f(x, t) + F_d(t)\delta(x - x_d) \quad (2)$$

여기서,  $v(x, t)$ 는 케이블의 수직방향의 변위,  $f_d(t)$ 는 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력,  $f(x, t)$ 는 외부하중,  $x_d$ 는 케이블 하단부로부터 제진 장치까지의 거리,  $L$ 은 케이블의 길이,  $T$ 는 케이블의 장력,  $m$ 은 케이블의 길이당 질량이다. 케이블 모델의 수직방향에 대한 변위 형상이 유한한 수의 진동 모드로 표현할 수 있다고 가정하고 식(3),(4)와 같은 형상함수와 Galerkin Method를 이용하여 식(5)와 같은 행렬로 이루어진 지배방정식을 산출하였다.

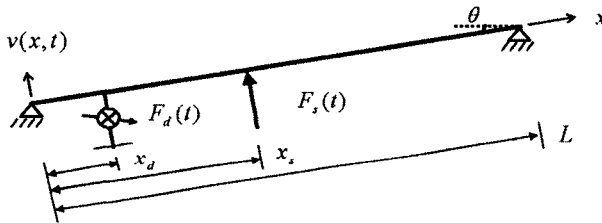


그림 2. 스마트 감쇠 시스템이 설치된 사장 케이블 모델

$$\phi_1(x) = \begin{cases} x/x_d & 0 \leq x \leq x_d \\ (L-x)/(L-x_d) & x_d \leq x \leq L \end{cases} \quad (3)$$

$$\phi_{j+1}(x) = \sin \pi j x \quad (4)$$

$$M\dot{q}(t) + Cq(t) + Kq(t) = F(t) + \varphi_d F_d(t) \quad (5)$$

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

## 3. 해석결과 및 분석

### 3.1 사장 케이블과 MR 감쇠기의 제원

스마트 감쇠 시스템의 사장 케이블 제진 성능을 검증하기 위하여, 중국에서 시공 중인 세계 최장의 사장 교인 Sutong Bridge의 215 미터 길이의 사장 케이블을 수치해석 대상으로 고려하였다 (Sun et al., 2004). 사

장 케이블 모델의 제원은 표 1에 나타난 바와 같다 (Sun et al. 2004).

표 1. 케이블 제원

항목	제원	항목	제원
케이블 길이 $L$ (m)	215.58	모드 감쇠비 $\zeta$	$\zeta_1=0.0008$
단위길이당 질량 $m$ (kg/m)	49.22		$\zeta_2=0.0003$
도입 장력 $T$ (kN)	3955.80	고유 진동수 $f$ (Hz)	$f_1=0.658$
케이블 직경 (mm)	113		$\zeta_3=0.0002$
			$f_2=1.316$
			$f_3=1.974$

또한, 사장 케이블 제진 시 사용된 MR 감쇠기는 최대 감쇠력 2,000 N, 최대 입력 전압 10 V 인 MR 감쇠기이며, 수치해석을 위한 동적 모델 및 모델에서의 상수 값은 아래 그림 3 및 표 2와 같다 (Liao and Lai, 2002).

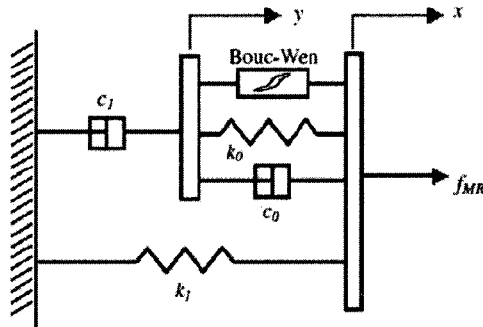


그림 3. MR 감쇠기의 동적 모델

표 2. MR 감쇠기 동적 모델의 상수 값

항목	상수 값	항목	상수 값
$c_{0z}$	$784 \text{ Nsm}^{-1}$	$\alpha_a$	$12441 \text{ Nm}^{-1}$
$c_{0b}$	$1803 \text{ NsV}^{-1}\text{m}^{-1}$	$\alpha_b$	$38430 \text{ NV}^{-1}$
$k_0$	$3610 \text{ Nm}^{-1}$	$\gamma$	$136320 \text{ m}^{-2}$
$c_{0z}$	$14649 \text{ Nsm}^{-1}$	$\mu$	$2059020 \text{ m}^{-1}$
$c_{0b}$	$34622 \text{ NsV}^{-1}\text{m}^{-1}$	$A$	58
$k_1$	$840 \text{ Nm}^{-1}$	$n$	2
$x_0$	0.0245 m	$\eta$	$190 \text{ s}^{-1}$

### 3.2 외부 하중

사장 케이블에 대한 외부 하중은 다음 식과 같이 고려하였다 (Johnson et al. 2002).

$$f(x, t) = W(t) \sin \pi(x/L) \tag{6}$$

여기서,  $W(t)$ 는 가우시안 백색 잡음 (Gaussian white noise)이라 가정하여 사장 케이블을 가진시켰다.

또한, 각 제어 시스템의 적응성을 평가하기 위하여 가우시안 백색 잡음을 적용하여 얻어진 제어 시스템의 최적 설계에 대하여, 백색 잡음과 특성이 다르고 더 큰 변위를 유발하는 풍하중을 적용하여 각 제어 시스템의 제진 성능을 비교, 분석하였다. 여기서 고려된 풍하중은 Yang 등 (2004)에 의하여 제시된 그림 4와 같은 풍하중이다.

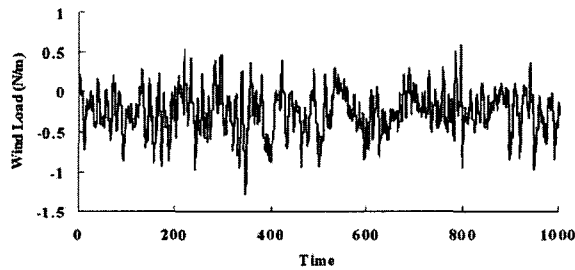


그림 4. Yang et al. (2004)에서 제시된 풍하중

### 3.3 수치해석 결과

사장 케이블 제진을 위해 고려한 제진 장치는 일반적인 선형 점성 감쇠기, 수동 모드 MR 감쇠기 및 본 논문에서 제안된 스마트 감쇠 시스템을 이용한 제진 시스템이다. 세 경우 모두 전체 케이블 길이의 2%인 위치 (즉,  $x_d/L=0.02$ )에 제진 시스템을 설치하는 것으로 고려하였다. 먼저, 외부 하중  $W(t)$ 는 가우시안 백색 잡음 (Gaussian white noise)이라 가정하였고, 이에 대한 수치해석 결과는 그림 5 및 표 3과 같다.

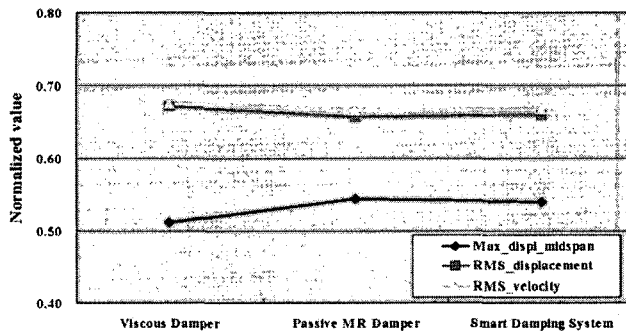


그림 5. 가우시안 백색 잡음 하중을 적용하였을 때의 제진 시스템의 성능

그림 5 및 표 3은 제진 시스템의 최적 상태에서 사장 케이블 중앙 지점에서의 최대 변위, 케이블 전 영역의 RMS 변위 및 RMS 속도를 나타낸 그래프로써, 제어하지 않았을 때의 응답으로 정규화 되어 있다. 그림 및 표에서 알 수 있듯이, 수치해석에서 고려하고 있는 제진 시스템의 성능은 거의 유사하다. 사장 케이블의 중앙 지점에서의 최대 변위는 약 45% 정도 감소시킬 수 있고, RMS 변위 및 속도는 25% 가까이 감소시킬 수 있다.

표 3. 가우시안 백색 잡음을 적용하였을 때의 각 제진 시스템의 성능

	Linear viscous damper ( $c=36000 \text{ Nsec/m}$ )	Passive-mode MR damper ( $\mu=7.5 \text{ V}$ )	EMI system ( $K_{em}=165 \text{ Vsec/m}$ )
Max. displ. at mid-span	0.5115	0.5445	0.5394
RMS displacement	0.6720	0.6571	0.6600
RMS velocity	0.6747	0.6656	0.6666

각 제진 시스템의 외부 하중의 변화에 대한 적응성을 평가하기 위하여, 가우시안 백색 잡음을 적용하여 얻어진 각 제진시스템의 최적 설계에 대하여 백색 잡음과 특성이 다르고 더 큰 변위를 유발하는 풍하중 (Yang et al. (2004))을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 그림 6과 표 4는 이에 대한 해석 결과를 나타내고 있다.

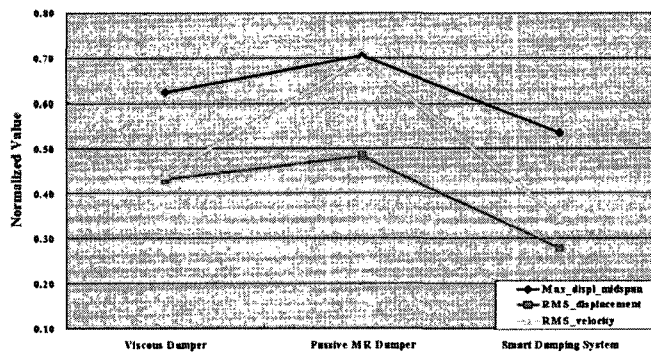


그림 6. 풍하중을 적용하였을 때의 각 제진 시스템의 성능

그림 6 및 표 4에서 알 수 있듯이, 외부 하중이 변함에 따라 수동모드 MR 감쇠기의 경우에는 제어 성능이 크게 저하되었다. 최적의 선형 제어 감쇠기의 경우에도 모든 응답에 대해서 제안된 스마트 감쇠 시스템에 비해 성능이 10~20% 정도 뒤떨어진다.

표 4. 풍하중을 적용하였을 때의 각 제진 시스템의 성능

	Linear viscous damper ( $c=360000\text{Nsec/m}$ )	Passive-mode MR damper ( $v=7.5\text{V}$ )	EMI system ( $K_{emf}=165\text{Vsec/m}$ )
Max. displ. at mid-span	0.6233	0.7048	0.5342
RMS displacement	0.4333	0.4833	0.2778
RMS velocity	0.4426	0.6947	0.3458

본 논문에서 제안된 케이블 제진용 스마트 감쇠 시스템은 외부 하중으로 가우시안 백색 잡음을 적용하였을 때는 다른 수동 제어 시스템과 제진 성능이 비슷하였으나, 주파수 특성 및 하중의 크기가 다른 풍하중을 적용하였을 때는 다른 수동 제어 시스템에 비하여 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 특히, 수동모드 MR 감쇠기의 경우에는 외부 하중의 변화에 의해 제진 성능이 상당히 저하되고 있으나, MR 감쇠기에 EMI 시스템을 도입한 제안된 제진 장치의 경우에는 하중 저하 현상을 나타내고 있지 않기 때문에 사장 케이블의 내풍 대책으로 보다 효과적으로 적용할 수 있으리라 사료된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 현재 중국에서 시공 중인 세계 최대 사장교인 Sutong Bridge의 사장 케이블 모델을 대상으로 스마트 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 수치적으로 검증하였다. 또한, 스마트 감쇠 시스템의 제진 성능을 선형 점성 감쇠기와 수동모드 MR 감쇠기를 적용하였을 때의 성능과 비교, 평가하였다. 가우시안 백색 잡음을 하중으로 적용하여 각 제어 시스템의 성능을 최대로 발휘하는 최적 설계를 얻은 후, 주파수 특성 및 크기가 다른 풍하중을 적용하여 각 제진 시스템의 외부 하중의 변화에 대한 적응성도 평가하였다. 그 결과, 스마트 감쇠 시스템은 선형 점성 감쇠기 및 수동모드 MR 감쇠기를 이용한 수동 제어 시스템에 비하여 적응성이 우수함을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설핵심기술 연구개발사업 (Grant no.: C105A1000021-05A0300-02110) 및 과학기술부·한국 과학재단 지정 “스마트 사회기반시설 연구센터 (SISTeC)”의 연구비 지원으로 수행된 것이므로 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

Johnson, E.A., Baker, G.A., Spencer, Jr., B.F., and Fujino, Y. (2002) Semiactive damping of stay cables neglecting sag, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE.

Liao, W.H. and Lai, C.Y. (2002) Harmonic analysis of a magnetorheological damper for

- vibration control, *Smart Materials and Structures*, 11, pp.288-296.
- Sun, L., Shi, C., Zhou, H., and Cheng, W.** (2004) A full-scale experiment on vibration mitigation of stay cable, *Proceedings of IABSE Symposium*, Shanghai, China.
- Yang, J.N., Agrawal, A.K, Samali, B., and Wu, J.C.** (2004) Benchmark problem for response control of wind-excited tall buildings, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 130(4), pp.437-446.
- 정형조, 조상원, 장지은, 이인원** (2005) 스마트 수동 감쇠 시스템을 이용한 사장 케이블의 진동 제어, *2005년 봄 학술발표회*, 인천.
- 조상원** (2004) Simple control algorithms for MR dampers and smart passive control system, 박사학위논문, 한국과학기술원, 2004
- 조상원, 장지은, 윤우현, 이인원** (2005) 자기유변유체 감쇠기에 기반한 스마트 수동 감쇠 시스템의 성능 평가, *2005년도 한국지진공학회 학술발표회*, 서울.