

케이블 진동 저감을 위한 스마트 복합 감쇠 시스템의 성능평가

Performance verification of Smart Complex Damping System for Suppressing Vibration of Stay Cable

박철민^{*} · 정형조^{**} · 고만기^{***} · 이인원^{****}

Park, Chul Min · Jung, Hyung Jo · Ko, Man Gi · Lee, In Won

ABSTRACT

Stay cables, such as used in cable-stayed bridges, are prone to vibration due to their low inherent damping characteristics. Recently some studies have shown that active and semiactive control system using MR 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 complex damping system which consists of toggle system and MR dampers by introducing electromagnetic induction(EMI) system as an external power source to MR damper. The performance of the proposed damping device has been compared with that of the passive-type control systems employing a MR damper, a linear viscous damper, and EMI system.

1. 서 론

사장교는 풍부한 조형미, 경제적 설계, 합리적 가설 등 여러 가지 우수한 특성 때문에 20세기 중반 이래 현재까지 꾸준히 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.

* 학생회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 석사과정

** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과, 조교수

*** 정회원 · 공주대학교 토목공학과, 교수

**** 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 교수

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

따라서, 본 연구진은 능동 및 반능동 감쇠 시스템의 단점을 극복하기 위하여 전자기 유도(Electromagnetic Induction, EMI) 시스템과 토글시스템(Toggle System)을 결합한 스마트 복합 감쇠 시스템을 제안하였으며 사장케이블 모델에 적용하여 수치적으로 검증하였으며, 선형 점성 감쇠기와 수동 모드로 구동되는 자기유변유체 감쇠기를 적용하였을 때의 각 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 비교 평가하였다.

2. EMI-TOGGLE 시스템과 사장 케이블 모델

2.1 차세대 스마트 감쇠시스템의 소개

스마트 복합 감쇠 시스템은 EMI 시스템과 토글시스템이 결합된 감쇠시스템이다. 토글 시스템은 변위증폭 메커니즘을 이용한 가새장치이다. 지금까지의 토글 시스템은 주로 건축 구조물을 대상으로 연구되어져 왔다. 각 토글 시스템의 개념과 거동 원리, 실제 적용 가능성 등을 검토한 결과, 가위-잭 형태의 토글 시스템이 사장 케이블에 적용하기 적합하다는 사실을 도출해냈다. 그림 1은 사장 케이블에 스마트 복합 감쇠 시스템을 설치한 예를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 가위-잭 토글 장치는 사장 케이블의 변위 u 에 의해 감쇠기의 상대변위 u_D 를 직접적으로 발생시킨다. 따라서 다음과 같은 선형차원의 증폭계수를 가진다.

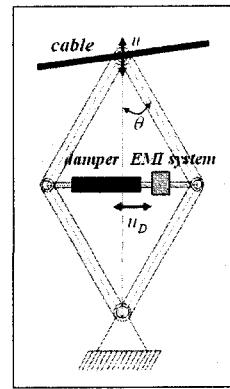


그림 1. 사장케이블을 위한 고성능 복합 감쇠 시스템

$$\alpha = 1/\tan\theta \quad (1)$$

이 경우의 증폭계수는, $\theta = 30^\circ, 25^\circ, 20^\circ$ 일 때 각각 $\alpha = 1.73, 2.14, 2.75$ 이다. 이때 각도 θ 는 케이블의 수직변위와 토글 시스템의 한 트러스 부재가 이루는 각이다.

다음으로 EMI 시스템은 수동모드 자기유변유체 감쇠기에 외부 전원과 반능동 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 특성을 변화시킴으로써 효과적으로 구조물의 변형을 제어하게 된다. 또한, 이때, 전자기 유도 시스템에 유도된 유도 기전력은 식 (2)와 같다.

$$\varepsilon = -\alpha \times n \frac{d\Phi_B}{dt} = -\alpha \times n \times B \frac{dA}{dt} = -\alpha \times K_{emf} \frac{dA}{dt} \quad (2)$$

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

따라서, 위 식을 고찰하여 보면, EMI 시스템에서 생성되는 전기에너지에는 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_{ref} 의 값을 조절하여 EMI 시스템의 특성을 결정할 수 있다. 또한 토글시스템은 변위확대 메커니즘을 통하여 다양한 외부하중에 대응할 수 있는 EMI 시스템의 유도기전력 증폭효과와 자기유변유체 감쇠기에 서 나오는 감쇠력을 증폭시켜줌으로써 상대적으로 감쇠장치 및 전자기 유도 시스템의 용량 감소라는 두 가지 이점을 가지고 있다.

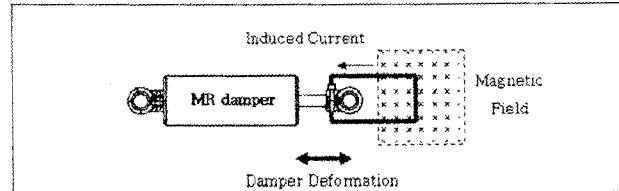


그림 2. EMI 시스템을 구비한 자기유변유체 감쇠기의 개략도

2.3 스마트 복합 감쇠 시스템을 설치한 사장케이블 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 3와 같이 일정한 크기의 경사각을 갖지만 처짐이 없는 이상적인 사장 케이블로 고려하였고, 이러한 케이블 모델에 대한 지배 미분 방정식을 식(3)와 같이 구성하였다.

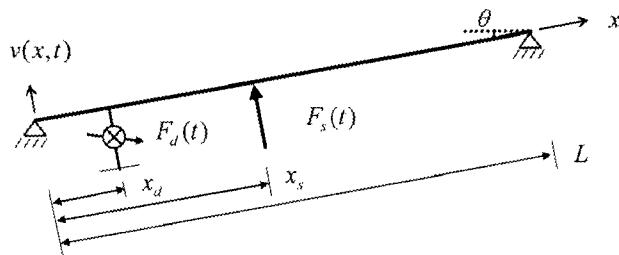


그림 3. 제진 시스템이 설치된 케이블 모델

$$m\ddot{v}(x,t) + c\dot{v}(x,t) - Tv''(x,t) = f(x,t) + F_d(t)\delta(x - xd) \quad (3)$$

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(4)와 같은 형상함수와 Galerkin Method를 이용하여 식(5)로부터 식(7)과 같은 행렬로 이루어진 지배방정식을 산출하였다.

$$\phi_1(x) = \begin{cases} x/x_d & 0 \leq x \leq x_d \\ (L-x)/(L-x_d) & x_d \leq x \leq L \end{cases} \quad (4)$$

$$\phi_{j+1}(x) = \sin \pi j x \quad (5)$$

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = F(t) + \varphi_d F_d(t) \quad (6)$$

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

3. 수치해석

3.1 사장 케이블과 자기유변유체 감쇠기의 제원

스마트 복합 시스템의 케이블 제진 성능을 검증하기 위하여 Christenson(2001)이 수행한 실험과 동일한 케이블 모델을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 케이블 모델의 제원은 표 1에 나타난 바와 같으며, 케이블 제진 시 사용된 자기유변유체 감쇠기는 최대 감쇠력 10N, 최대 입력 전압 10V 인 전단 모드 MR 감쇠기이며 그 제원은 표 2와 같다.

표 1. 케이블 제원

항목	제원	항목	제원
케이블 길이 L	12.65 m	모달 감쇠비 ζ	$\zeta_1 = 0.0015$ $\zeta_2 = 0.003$ $\zeta_3 = 0.005$ $\zeta_{j \geq 4} = 0.0005$
길이당 질량 m	0.747 kg/m	자유진동수 w_0	2.89 Hz
도입 장력 T	2172 N	설치 경사각 θ	20.53 °

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 외부하중

사장 케이블에 대한 외부 하중은 다음 식과 같이 고려하였다.

$$f(x, t) = W(t) \sin \pi (x/L) \quad (8)$$

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 각 제어시스템의 최적 설계에 대하여 백색 잡음과 특성이 다르고 더 큰 변위를 유발하는 풍하중을 적용하여 각 제어시스템의 성능을 비교 분석하였다. 풍하중은 Yang 등에 의하여 제안된 3rd generation benchmarks for building에서 사용된 그림. 4와 같은 하중을 사용하였다.

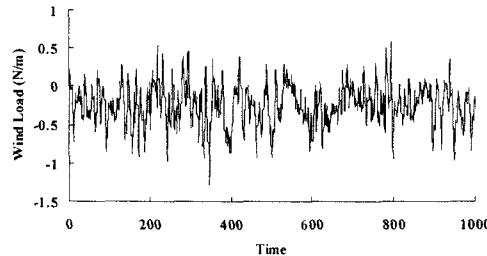


그림 4. Yang et al. 3rd generation benchmarks for building

3.3 수치해석 결과

3.3.1 가우시안 백색 잡음

케이블 제진을 위해 고려한 제진 장치는 일반적인 선형 점성 감쇠기와 수동모드 자기유변유체 감쇠기와 본 논문에서 제안된 스마트 복합 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, $W(t)$ 는 가우시안 백색 잡음 (Gaussian white noise)이라 가정하여 사장 케이블을 가진하였을 때의 각 제어 시스템의 성능을 나타낸 그래프이다.

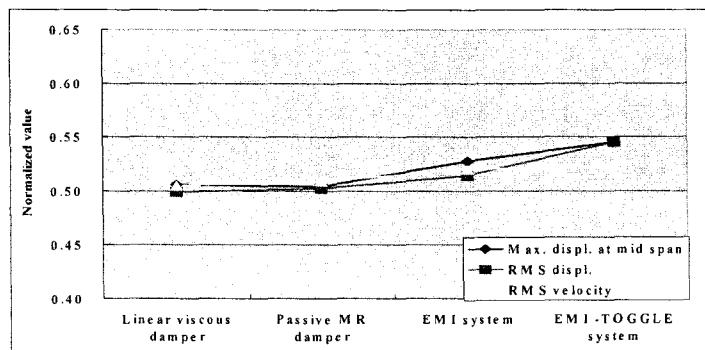


그림 5. 가우시안 백색 잡음 하중을 적용하였을 때의 제어 시스템의 성능 평가

그림 5은 제어 시스템의 최적 상태에서 중앙 지점에서의 최대변위, 케이블 전 영역의 RMS 변위와 속도의 변화를 나타낸 그래프로써, 제어하지 않았을 때의 응답으로 정규화 되어져 있다. 이때, 각 최적 값들을 나타내면 표 3과 같다. 각 제어 시스템의 성능은 거의 유사하나 최적의 선형 점성 감쇠기를 적용하였을 때의 성능이 조금 더 우수하다. 그러나 스마트 복합 감쇠 시스템은 수동 정성 감쇠기에 비해 작은 감쇠력을 이용하여 효과적으로 케이블을 제어한 것으로 판단 된다. 또한 여기서 스마트 복합 시스템은 기존의 EMI 시스템에 비해 더욱 작은 감쇠력과 K_{emf} 을 이용하여 효과적으로 케이블을 제어함으로써 기존의 EMI 시스템의 단점을 극복한 것으로 판단된다.

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

	Linear viscous damper ($c = 650 \text{ Nsec/m}$)	Passive MR damper ($v = 4V$)	EMI system ($K_{emf} = 450 \text{ Vsec/m}$)	EMI-TOGGLE system ($K_{emf} = 60 \text{ Vsec/m}$)
Max. displ. at mid span(cm)	0.037 (0.505)	0.037 (0.504)	0.038 (0.527)	0.040 (0.545)
RMS displ.(cm)	0.029 (0.499)	0.030 (0.503)	0.030 (0.514)	0.032 (0.545)
RMS velocity(cm/sec)	0.329 (0.505)	0.332 (0.509)	0.339 (0.520)	0.341 (0.523)
RMS damper force(N)	5.18	5.90	4.40	2.55

3.3.2 풍하중

각 제어 시스템의 적응성을 평가하기 위하여 가우시안 백색 잡음을 적용하여 얻어진 각 제어시스템의 최적 설계에 대하여 백색 잡음과 특성이 다르고 더 큰 변위를 유발하는 풍하중(Yang et al. 3rd generation benchmarks for building)을 적용하여 각 제어시스템의 성능을 비교 분석하였다.

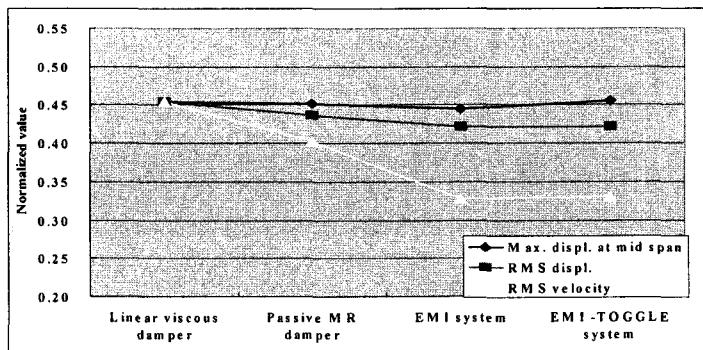


그림 6. 풍하중을 적용하였을 때의 각 제어 시스템의 성능 평가

이때의 각 제어 시스템의 성능은 표 4.와 같다. 더 큰 변위를 유발함에 따라 수동 모드 자기유변유체 감쇠기는 가우시안 백색 잡음을 사용하였을 때에 비하여 매우 큰 감쇠력을 사용하였으나 모든 성능은 크게 저하된 것을 알 수 있다. 최적 선형 제어 감쇠기 또한 케이블의 중앙지점에서의 최대 변위를 제외하고는 모두 스마트 복합 감쇠 시스템에 비하여 성능이 떨어지며 특히 RMS 속도는 큰 차이로 성능이 저하되었음을 알 수 있다. 이에 비하여 스마트 복합 감쇠 시스템은 모든 평가 기준에서 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있다. 특히 RMS 속도는 크게 감소시키는 우수한 성능을 보이는데, 이는 스마트 복합 감쇠 시스템의 감쇠 특성에 가장 크게 영향을 주는 요소가 감쇠기 위치에서의 케이블의 변형이 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 복합 감쇠 시스템은 적응성을 확보하여 그 성능을 유지함을 알 수 있다. 여기서 또한 스마트 복합 시스템은 기존의 EMI 시스템에 비해 더욱 작은 감쇠력과 K_{emf} 값을 이용하여 효과적으로 케이블을 제어함으로써 그 우수성을 입증하고 있다.

표 4. 풍하중을 적용하였을 때의 각 제어 시스템의 성능 평가

	Linear viscous damper ($c = 650 \text{ Nsec/m}$)	Passive MR damper ($v = 4V$)	EMI system ($K_{emf} = 450 \text{ Vsec/m}$)	EMI-TOGGLE system ($K_{emf} = 60 \text{ Vsec/m}$)
Max. displ. at mid span(cm)	0.065 (0.454)	0.065 (0.452)	0.064 (0.445)	0.065 (0.455)
RMS displ.(cm)	0.037 (0.454)	0.035 (0.437)	0.034 (0.421)	0.034 (0.421)
RMS velocity(cm/sec)	0.237 (0.453)	0.210 (0.403)	0.171 (0.328)	0.172 (0.330)
RMS damper force(N)	5.46	5.12	2.48	0.95

4. 결론

본 논문에서는 Christenson이 수행한 실험과 동일한 케이블 모델을 대상으로 스마트 복합 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 선형 점성 감쇠기와 수동모드 자기유변 유체 감쇠기를 적용하였을 때의 제어 성능과 비교 평가하였다. 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 복합 감쇠 시스템은 다른 수동 감쇠기에 비하여 적응성이 매우 뛰어나 특성이 다른 하중에도 우수한 성능을 보였으며, 특히 케이블의 속도를 제어하는데 효율적인 것으로 나타났다. 또한 스마트 복합 감쇠시스템은 기존은 EMI시스템의 단점으로 지적되는 K_{emf} 값을 효과적으로 줄여줌으로써 실제 사장 케이블의 진동 제어를 위한 적용 가능성을 보여주고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설핵심기술연구개발사업 (No. C105A1000021)와 과학기술부·한국과학재단 지정 “스마트 사회 기반시설 연구센터”에서 연구비 지원으로 수행된 것으로 연구비 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- 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
- 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
- 정형조, 조상원, 장지은, 이인원, “스마트 수동 감쇠 시스템을 이용한 사장 케이블의 진동 제어,” 2005년 봄 학술발표회 논문집, 인천, 2005, 4
- 박철민, 정형조, 정운, 이인원, “케이블 진동 저감을 위한 고성능 감쇠 장치의 제진성능 평가,” 2005 대한토목학회 정기학술대회, 제주, 2005, 10
- 조상원, "Simple Control algorithms for MR dampers and smart passive control system,"

박사학위논문, 한국과학기술원, 2004

6. Sigaher, A. N., and Constantinou, M. C., "Scissor-Jack-Damper Energy Dissipation System," *Earthquake Spectra*, 19(1), 133~158, 2003.
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