

# 케이블 진동 감쇠를 위한 반능동 제어 장치 성능의 실험적 평가

## Experimental Verification of Semiactive Control Systems for Stay Cable Vibration

장 지 은\*                      정 형 조\*\*                      정 운\*\*\*                      이 인 원\*\*\*\*  
Jang, Ji Eun                      Jung, Hyung Jo                      Jeong, Woon                      Lee, In Won

### ABSTRACT

In this paper, the efficacy of the MR damper-based control systems for vibration suppression of stay cables has been experimentally investigated. The performance of the several control strategies for the semiactive control system, such as the clipped-optimal control, the Lyapunov stability theory-based control, the maximum energy dissipation and the modulated homogeneous friction, has been compared with that of the passive-type control systems employing MR dampers. To do this, the full-scale stay cable, which is the same as used for the in-service cable-stayed bridge in Korea, is considered. The acceleration and the displacement of the stay cable as well as the damping force of the MR damper are measured. The velocity of the cable at the damper location, which is needed for some control algorithms, is obtained by differentiating the measured displacement. The damping ratios of the cable system employing the MR damper, which can be estimated by the Hilbert transform-based method, shows effectiveness of each control strategy considered.

### 1. 서론

사장교는 수려한 외관과 시공 상의 장점 때문에 최근 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 그 이용이 증가하고 있다. 그러나 그러한 사장교의 장점을 이용하기 위하여 주로 해양의 영향을 받는 도서지방이나 지반이 취약하여 건설이 어려운 지역에 설치되기 때문에, 그 해석, 설계 및 시공이 정밀한 기술을 요하게 된다. 특히, 케이블은 교량에 전달되는 여러 하중을 장력에 의하여 주탑으로 전달 시켜주는 사장교의 주요 부재로써, 시공뿐만 아니라 건설 후 유지관리가 매우 중요하다. 그러나 교량의 장대화로 사장교에 사용된 케이블의 길이가 점차 길어짐으로써 여러 가지 기술적 문제가 야기되어 졌으며 이를 해결하기 위한 많은 연구가 수행되어지고 있다. 케이블은 매우 유연하여 외부 하중으로 인하여 발생된 변형을 억제 할 수 없으며, 매우 낮은 감쇠비를 갖기 때문에 진동에너지를 소산시키지 못한다. 이는 케이블과 케이블 연결 부위의 수명을 감소시키거나 부식방지처리의 손상으로 인한 잠재적인 문제를 발생시킬 수 있으므로 케이블의 진동을 감소시키기 위한 다양한 방법이 시도되어졌다. 현재까지는 케이블의 진동을 감소시키기 위하여 부분적으로 케이블의 표면을 변화시키거나 수동 감쇠기를 설치하는 방법 등이 소극적으로 사용되었으나, 케이블의 표면을 변화시키는 방법은 일정 영역의 진동수의 진동만을 억제 시키며 수동 감쇠기를 설치하는 방법은 케이블의 길이가 길어짐에 따라 그 제어 능력이 현저히 떨어지는 한계점이 발견되었다. 이러한 소극적인 방법들을 대체하기 위하여 능동 제어를 설치하여 케이블의 진동을 매우 효과적으로 감쇠시키는 방법이 제안 되어졌으나 능동 제어기의 높은 전력 소모와 전원에 대한 의존도 때문에 실제 적용성이

\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 · E-mail: jejang@kaist.ac.kr - 발표자  
\*\* 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 조교수 · E-mail: hjung@sejong.ac.kr  
\*\*\* 현대건설기술개발원 주임연구원 · E-mail: maskwj@hdec.co.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: iwee@kaist.ac.kr

떨어진다. 최근 들어 반능동 감쇠기가 이러한 능동 제어기의 단점을 보완하는 동시에 수동 감쇠기와 능동 제어기의 장점을 효과적으로 이용할 수 있다는 연구들이 발표되어 짐에 따라, 본 연구에서는 실험을 통하여 이러한 반능동 감쇠기가 실제 케이블에 적용될 수 있음을 보이고, 그 경우 케이블에 설치된 반능동 감쇠기의 성능을 살펴보았다. 나아가 반능동 제어 알고리즘으로 제안된 여러 알고리즘을 적용하여 케이블의 진동 제어에 대한 각 알고리즘의 성능을 비교 분석하였다.

## 2. 반능동 감쇠 시스템

### 2.1 케이블에 설치된 반능동 감쇠 시스템 구성

반능동 감쇠 시스템은 그림 1.과 같이 케이블에 외부 하중이 전달되어 변형이 발생하는 경우 감쇠기가 설치된 지점에서 측정된 케이블의 변위와 가속도, 그리고 감쇠력을 이용하여 반능동 제어 알고리즘을 통하여 Magnetorheological (MR) 감쇠기를 제어하여 케이블의 진동을 감쇠시킨다.<sup>(3)</sup>

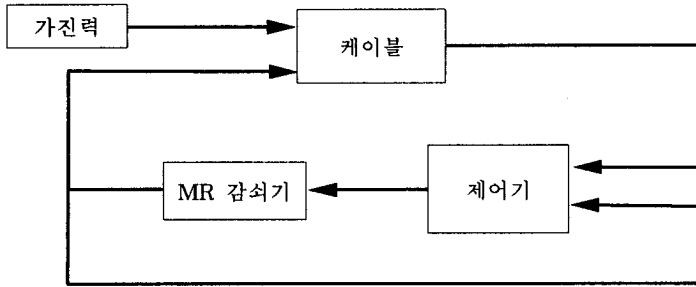


그림 1. 반능동 감쇠 시스템

### 2.2 케이블 모델

본 연구에서 대상으로 사용한 케이블은 PVC 피복을 갖는 고장력 케이블로서, 현대건설기술연구소에 그림 2.과 같이 설치되어있으며 케이블의 제원은 표 1.과 같다. 케이블 모형의 단면은 7가닥의 7연선으로 구성되어져 있고, 케이블의 초기 장력은 하부 지점에 설치된 유압잭에 의하여 도입된다.<sup>(7)</sup>

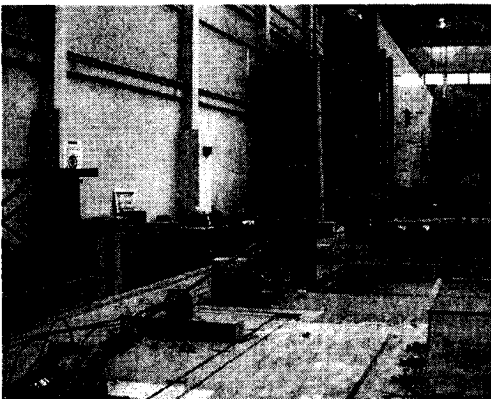


그림 2. 반능동 감쇠기와 가진기가 설치된 케이블 모델

표 1. 케이블 제원

물성	기호	크기
케이블 길이	$L$	44.7m
길이당 질량	$m$	0.090KN/m
도입 장력	$T$	500KN
모달 감쇠비	$\zeta$	$\zeta_1 = 0.0015$ $\zeta_{i \geq 2} = 0.0005$
자유진동수	$\omega_0$	2.44Hz
설치 경사각	$\theta$	8.37°

실험을 실시할 때의 사장 케이블은 500KN의 초기장력이 도입되었으며, 새그비(Sag-to-span ratio)는 0.10%로 매우 작은 처짐을 갖는다. 따라서 대상 케이블의 모델이 그림 3.과 같이 처짐을 갖지 않는 이상적인 사장 케이블과 유사하다고 가정하여, 식(1)과 같은 지배 미분 방정식을 구성하였다.<sup>(1)</sup>

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

여기서,  $v(x,t)$ 는 케이블의 수직방향의 변위,  $F_d(t)$ 는 반응동 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력,  $F_s(t)$ 는 가진기로부터 케이블에 전달되는 가진력 그리고  $c$ 는 케이블의 길이당 감쇠비이다.

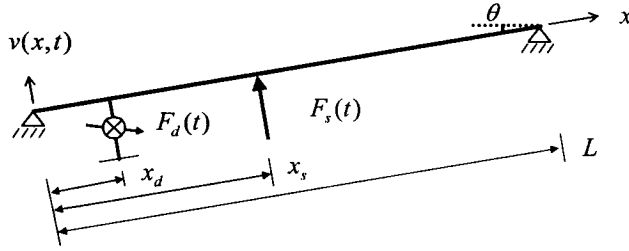


그림 3. 반응동 감쇠기와 가진기가 설치된 케이블 모델

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

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

$$\phi_2(x) = \begin{cases} x/x_s & 0 \leq x \leq x_s \\ (L-x)/(L-x_s) & x_s \leq x \leq L \end{cases} \quad (2)$$

$$\phi_{j+2}(x) = \sin \pi jx$$

$$M\dot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = \psi_s F_s(t) + \psi_d F_d(t) \quad (3)$$

여기서,  $M$ 은 질량행렬,  $C$ 는 감쇠행렬,  $K$ 는 강성 행렬,  $\psi_s$ 는 가진력 벡터,  $\psi_d$  그리고 는 감쇠력 벡터이다.

### 2.3. 자기 유변 유체(MR) 감쇠기

실험에 사용된 반응동 감쇠기는 LOAD사에서 제작된 유변 유체 감쇠기(모델명:RD-1097-01)로써(그림 4.), 그림 5.와 같이 케이블 하부 지지점으로부터 1.34m(전체 케이블 길이의 3%) 떨어진 지점에 케이블과 수직으로 두 개가 설치되었다. 케이블의 최대 감쇠력은 약  $\pm 100N$ 이고 최대 전압입력은 1.4V이다.

### 2.4. 케이블 가진 시스템



그림 4. 반능동 감쇠기



그림 5. 반능동 감쇠기가 설치된 케이블 모델

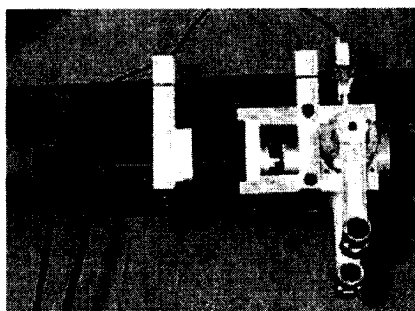


그림 6. 케이블 가진기

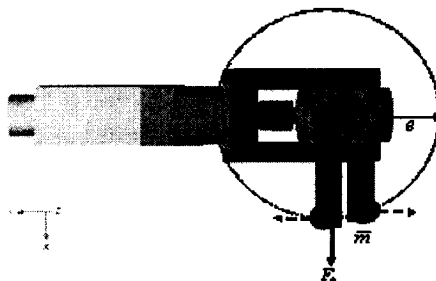


그림 7. 가진기의 케이블 가진 원리

케이블의 진동을 발생시키기 위하여 그림 6.과 같이 가진시스템을 사용하였다. 케이블 가진 시스템은 불평형 가진 추 질량을 서로 반대방향으로 회전시켜 케이블의 수직방향으로 조화 가진력을 발생시키게 된다(그림 7.).<sup>(7)</sup>

## 2.5. 반능동 제어기

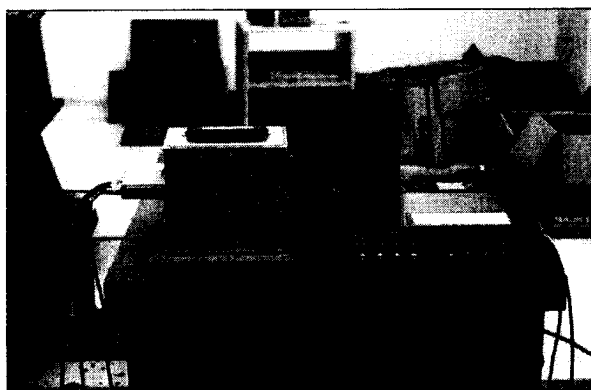


그림 8. 반능동 제어기

반능동 제어기는 MS visual C++를 이용하여 실행되는 Matlab real-time workshop으로 구성되었다. 반능동 감쇠기가 설치된 지점의 케이블의 변위와 가속도, 그리고 MR 감쇠기의 감쇠력을 측정하여 그 값을 NI DAQCard-6062E를 통하여 디지털 값으로 전환한다. 제어기는 그 입력을 사용하여 각 제어 알고리즘으로부터

케이블의 진동을 제어하는 최적의 MR 감쇠기 입력 전압을 산출한다.

## 2.6. 반능동 제어 알고리즘

제어 알고리즘은 대상구조물의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있는 제어력을 산출하는 소프트웨어를 일컫는다. 그러나 반능동 제어기의 일종인 MR 감쇠기는 능동 제어기와는 달리 원하는 감쇠력을 직접 케이블에 전달할 수 없고, 감쇠기에 주어진 전압과 케이블의 거동에 따라 감쇠력이 정해진다. 따라서 반능동 제어 알고리즘도 그러한 반능동 감쇠기의 특성을 고려하여 케이블의 거동에 따라 필요한 감쇠력을 발휘할 수 있는 감쇠기의 전압을 산정하는 식을 제안하고 있다. 현재까지 반능동 제어기를 효율적으로 제어하는 다양한 알고리즘들이 발표되어졌으며 본 연구에서는 다음 네 가지 알고리즘을 적용하였다. 각 알고리즘의 자세한 내용은 참고문헌 2.를 참고하기 바란다.

### 1. Lyapunov 안정성 이론을 이용한 제어 알고리즘 (Control based on Lyapunov Stability Theory)<sup>(2)</sup>

Lyapunov 안정성 이론은 Lyapunov 함수값의 변화율이 negative semidefinite일때 그 시스템은 Lyapunov 관점에서 안정하다는 이론이다. 따라서 Lyapunov 안정성 이론을 이용한 제어 알고리즘은 이 이론을 이용하여 최대한 Lyapunov 함수값이 음이 되도록 하는 감쇠력을 구조물에 전달하게 된다. 이때, Lyapunov 함수에 따라 제어 알고리즘이 다양하게 제시될 수 있으며, 이 논문에서는 Leitmann(1994)이 반능동 제어기에 사용한 Lyapunov 이론을 사용하여 식(4)과 같이 전단 모드 MR 감쇠기에 주어지는 전압을 결정한다.

$$v_i = V_{\max} H((- \eta)^T PBF_d) \quad (4)$$

### 2. Clipped Optimal 제어 알고리즘<sup>(2)</sup>

MR 감쇠기의 특성을 잘 나타내도록 Dyke 등이 제안한 알고리즘으로, Linear Optimal Controller로부터 감쇠력을 산출한다. 그러나 MR 감쇠기의 특성상 구조물의 반응에 제한되어 작용되기 때문에 식(5)을 통하여 반능동 감쇠기가 최대한 산출된 감쇠력과 유사한 감쇠 효과를 발휘하도록 유도하는 알고리즘이다.

$$v_i = V_{\max} H(\{F_{dci} - F_d\}F_d) \quad (5)$$

### 3. MED(Maximum Energy Dissipation) 알고리즘<sup>(2)</sup>

MED 알고리즘은 Lyapunov 안정성 이론을 이용한 제어 알고리즘의 일종으로 Lyapunov 함수로 대상구조물의 진동 에너지를 사용하여 에너지 소산량이 최대가 되도록 감쇠기를 제어 하는 알고리즘이다. 이때 감쇠기의 전압입력은 다음과 같다.

$$v_i = V_{\max} H(-\dot{v}_d F_d) \quad (6)$$

### 4. MHF(Modulated Homogeneous Friction) 알고리즘<sup>(2)</sup>

MHF(Modulated Homogeneous Friction) 알고리즘은 마찰 감쇠기를 위하여 Inaudi(1997)가 제안한 알고리즘이나 마찰 감쇠기와 MR 감쇠기의 거동상의 유사성으로 인하여 반능동 감쇠기에 대한 제어 알고리즘으

로도 사용될 수 있다. 이 알고리즘은 최대 변위가 일어나는 시점을 기준으로 감쇠력을 산정하며, 다음 최대 변위가 일어날 때까지 일정한 감쇠 효과를 구조물에 가하게 된다. 이때 감쇠력은 반능동 제어 장치의 변위에 비례하게 산정되며 반능동 감쇠기에 주어지는 입력 전압은 식(7)을 통하여 결정된다.

$$v_i = V_{\max} H(F_{d_m} - |F_d|) \quad (7)$$

### 3. 반능동 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능 평가 실험

#### 3.1. 케이블 자유 진동 실험

본 연구에서는 반능동 제어 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 평가 하기 위하여 MR 감쇠기가 설치된 케이블의 자유 진동 실험을 수행하였다. 사장 케이블에 설치된 가진 시스템을 이용하여 케이블의 1차 고유 진동수를 갖는 조화하중을 가하여 케이블의 공진을 유발한다. 일정시간동안 케이블을 가진 하여 충분한 진폭을 확보한 후 가진 시스템을 멈추면 케이블은 주로 1차 모드로 자유진동 하게 된다. 감쇠기의 성능을 비교하기 위하여 자유진동 시 하단 지지점으로부터 10.2m 지점의 자유진동 변위를 측정 한 후, Hilbert Transform을 이용한 케이블의 감쇠 추정기법을 사용, 케이블의 변위에 대한 감쇠비 변화 그래프를 얻었다.<sup>(8)</sup>

#### 3.2 수동 MR 감쇠기의 케이블 진동 제어 성능 비교 평가

수동 감쇠기의 성능을 반능동 제어 시스템의 제어 성능과 비교하기 위하여 반능동 제어 시스템을 적용하기 이전에 수동형으로 사용된 MR 감쇠기의 진동 제어 성능을 측정하였다. 수동형으로 사용된 MR 감쇠기는 0V부터 1.4V사이의 전압 값이 제어하는 동안 일정하게 주어지며 감쇠기의 감쇠비는 일정하게 유지된다.

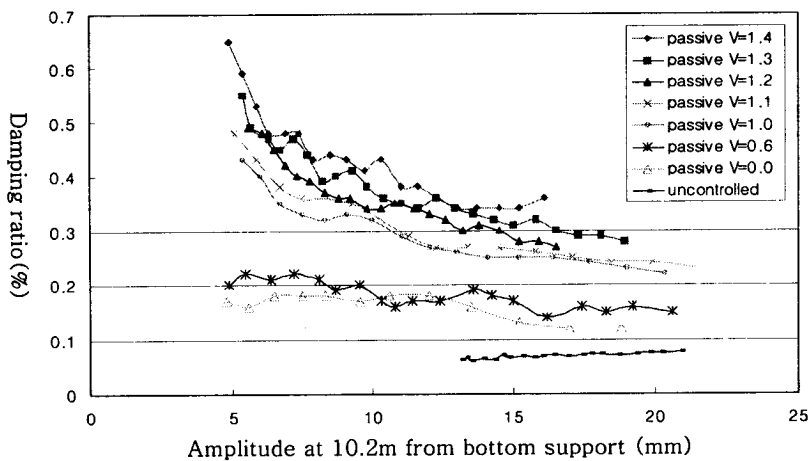


그림9. 수동 MR 감쇠기를 사용했을 때의 케이블의 감쇠비

수동 MR 감쇠기를 사용했을 때 진폭에 대한 케이블의 감쇠비를 나타 낸 그림 9.로부터 제어 하지 않은 경우 0.1% 미만 이었던 케이블의 감쇠비가 수동 MR 감쇠기를 사용했을 경우 진폭이 5mm 일 때 최대 0.65%까지 증가 되었으며 케이블의 진폭이 작아질수록 감쇠비는 더욱 증가된 다는 것을 알 수 있다. 또한 수동 MR 감쇠기 중 MR 감쇠기의 전압 입력이 1.4V로 주어진 경우가 다른 수동 MR 감쇠기보다도 좋은 성능을 보였다.

### 3. 3. 반능동 MR 감쇠기의 케이블 진동 제어 성능 비교 평가

반능동 제어 시스템을 구성한 후 반능동 제어 알고리즘에 따라 MR 감쇠기의 입력전압으로 0V 와 1.4V 를 산출 하도록 하였다. 이 입력 전압은 즉시 반능동 MR 감쇠기에 전달되어 케이블의 변위를 효과적으로 제어하도록 MR 감쇠기의 감쇠비를 변화시키게 된다. 반능동 제어 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 평가 하기 위하여 입력전압이 0V인 Passive off 와 입력전압이 1.4V인 Passive on, 그리고 네 개의 반능동 제어 알고리즘을 적용하여 실험을 수행하였다.

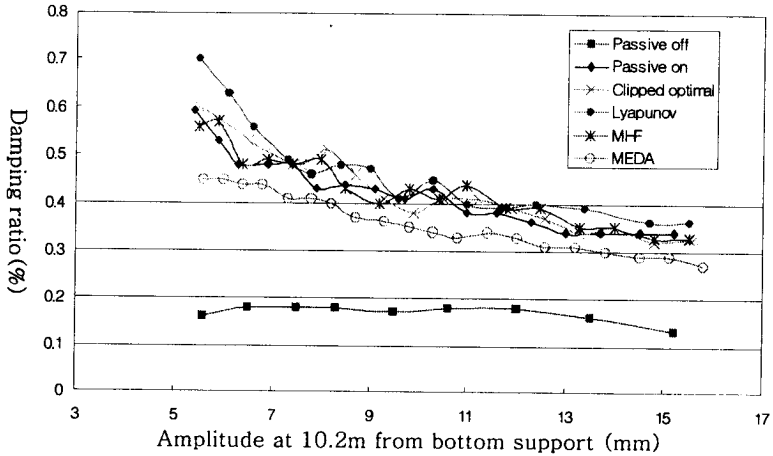


그림10. 반능동 MR 감쇠기를 사용했을 때의 케이블의 감쇠비

그림 10.으로부터 반능동 제어 시스템은 Passive off를 적용하였을 경우 케이블의 감쇠비가 0.2% 미만 인 것에 비하여 매우 좋은 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. MED 알고리즘은 Passive on에 비하여 성능 이 떨어지나 MHF 알고리즘은 유사한 성능을 보이고 Clipped Optimal 제어 알고리즘과 Lyapunov 안정성 이론에 기반한 제어 알고리즘은 Passive on에 비하여 향상된 성능을 보인다.

그러나 본 실험에서 사용한 반능동 제어 시스템은 수동 감쇠기에 비하여 복잡한 제어 시스템과 다수의 센서를 사용하였음에도 불구하고, 수동 감쇠기와 유사하거나 약간 향상된 성능만을 보여 주고 있다. 이러한 현상은 반능동 제어 시스템의 비효율성을 의미 하는 것이 아니라, 본 연구의 케이블 진동 제어 실험 시 적용 된 두가지 가정사항으로부터 유발된 것으로 사려되어 진다.

우선 그림 9.와 10.에서 보듯이 케이블 거동이 비선형성이 강하지만, Lyapunov 안정성 이론에 기반한 제어 알고리즘은 전 영역의 변위를 추정하기 위하여 선형 Kalman Filter를 사용하였으며, Clipped Optimal 제어 알고리즘은 제어력을 산정하기 위하여 선형 제어 시스템인 LQG를 사용하였다. 또한 선형 Observer나 선형 제어 시스템을 사용하지 않은 MED 알고리즘과 MHF 알고리즘은 그 시스템의 단순성을 장점으로 부각 시킬 수 있으나, 제어 시스템에 제공된 정보가 극히 적음으로써 케이블의 진동을 효과적으로 제어하지 못한 것으로 보인다.

그리고 케이블의 자유 진동을 유발하기 위하여 적용한 조화하중은 케이블의 1차 모드만을 가진 시킴으로 서 강인성과 다양한 하중에 좋은 적응성을 보이는 반능동 제어 시스템의 장점을 부각시키지 못한 것으로 생각된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 사장 케이블의 진동을 효과적으로 감쇠시키기 위하여 제안된 여러 가지 반능동 제어 시스템을 MR 감쇠기와 제어기를 사용하여 실제 구현하고 케이블에 적용하여 그 성능을 비교 분석하였다. 알고

리즘의 성능 평가 지표로서 케이블의 비선형성을 고려할 수 있도록 Hilbert Transform을 사용하여 얻은 케이블의 진폭에 따른 등가 점성 감쇠비를 사용하였다. 그 결과 반능동 제어 시스템은 하부 지지점으로부터 10.2m 떨어진 지점의 케이블의 진폭이 약 5mm 일 때, 케이블의 등가 점성 감쇠비를 최대 0.7%까지 증가시켰으며, 제어하지 않은 경우 0.1% 미만의 등가 점성 감쇠비에 비해서 매우 큰 감쇠비를 보여주었다. 또한 반능동 제어 시스템을 위하여 제안된 여러 반능동 제어 알고리즘 중 Lyapunov 안정성 이론에 기반한 제어 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보이며, 반능동 감쇠기를 설치한 경우 케이블의 비선형성이 더욱 강해져 진폭이 줄어들어 따라 감쇠비가 크게 증가함을 알 수 있다.

## 감사의 글

이 연구는 한국학술진흥재단의 2003년도 신진교수 연구지원 사업 (KRF-2003-003-D00460) 및 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술 연구개발 사업 (03 산학연C103A2000010-03A0200-01010)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

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. Jansen, Laura M., and Dyke, Shirley J., "Semiactive Control Strategies for MR Dampers: Comparative Study," Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 8, August, 2000
3. 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
4. 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
5. Inaudi, J. A., "modulated Homogeneous Friction: A semi-active damping strategy," Earthquake Engrg. And Struct. Dyn., 26(3), 361-376
6. Leitmann, G., "Semiactive Control for Vibration Attenuation," Journal of Intelligent Mat. Sys. And Struct., 5, September, 841-846
7. 김남식, 정운, 서주원, 안상섭, "사장교 케이블 동특성 평가를 위한 케이블 가진시스템 개발," 한국지진공학회 논문집, 제7권 제4호, 2003년 8월
8. J.M.Ko, Z.Q.Chen, Y.F.Duan, and Y.Q.Ni, "Field Vibration Tests of Bridge Stay Cables Incorporated with Magnetorheological Dampers", Smart Structures and Materials, 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, S.C. Liu and D.J.Pines(eds.), SPIE Vol.4696