

# MR 유체 감쇠기를 이용한 사장 케이블 제진 시스템의 실험적 검증

## Experimental Verification of Control Systems for Stay Cable Using MR Fluid Damper

장 지 은\* · 정 형 조\*\* · 정 운\*\*\* · 이 인 원\*\*\*\*

Jang, Ji Eun · Jung, Hyung Jo · Jeonng, Woon · Lee, In Won

### 1. 서 론

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 감소시키거나 부식방지처리의 손상으로 인한 잠재적인 문제를 발생시킬 수 있으므로 다양한 방법으로 케이블의 진동을 감소시키려는 연구가 진행되어졌다. 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 논문들이 발표되어 왔다. 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. 케이블 진동 제어 시스템

#### 2.1. 사장 케이블

본 연구에서는 반능동 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능을 평가 하기 위하여 그림 1.과 같이 실내에 설치된 케이블 모형을 대상으로 실험을 수행하였다. 케이블 모형은 실제 사장교에 적용된 PVC 피복을 갖는 고장력 케이블로서, 케이블 제원은 표 1.과 같다.

본 연구에서 대상으로 한 사장 케이블은 500KN의 장력이 도입되었을 때 0.10%의 작은 새그비를 가지므로 그림 2.와 같이 처짐을 갖지 않는 이상적인 사장 케이블과 유사하다고 가정하여, 식(1)과 같은 지배 미분 방정식을 구성하였다.<sup>(1)</sup>

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

여기서,  $v(x, t)$ 는 케이블의 수직방향의 변위,  $F_d(t)$ 는 반능동 감쇠기로부터 케이블에 전달되는 감쇠력,

\* 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: iwlee@kaist.ac.kr

$F_s(t)$ 는 가진기로부터 케이블에 전달되는 가진력,  $L$ 은 케이블의 길이,  $T$ 는 케이블의 장력,  $m$ 은 케이블의 길이당 질량, 그리고  $\zeta$ 는 케이블의 모달 감쇠비(modal damping coefficient)이다.



그림 1. 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°

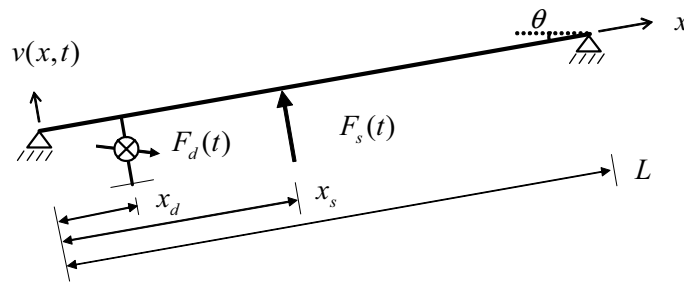


그림 2. 반능동 감쇠기와 가진기가 설치된 케이블 모델

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

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

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

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

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

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

다.

## 2.2. 반능동 감쇠 시스템

### 2.2.1. 반능동 감쇠 시스템의 구성

본 연구에서 구성한 반능동 감쇠 시스템은 그림 3.과 같이 나타낼 수 있다. 반능동 감쇠 시스템은 크게 제어기와 MR 감쇠기로 나뉘어지며 제어기는 케이블의 응답과 MR 감쇠기의 감쇠력을 입력으로 케이블의 진동을 최소화 하는 감쇠력을 산정하여 MR 감쇠기를 제어한다.

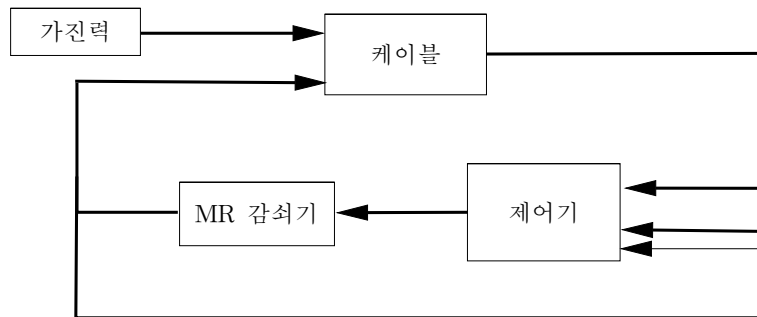


그림3. 반능동 감쇠 시스템

### 2.2.2. 자기 유변 유체(MR) 감쇠기

실험에 사용된 반능동 감쇠기는 그림 4.에 나타난 LOAD사에서 제작된 자기 유변 유체 감쇠기(모델명:RD-1097-01)로써, 그림 5.와 같이 케이블과 수직으로 두 개가 설치되었다. 자기 유변 유체 감쇠기는 제어기에서 산출된 입력 전압에 따라 감쇠계수가 변화되어 감쇠력을 케이블에 전달한다.



그림4. 반능동 감쇠기



그림5. 반능동 감쇠기가 설치된 케이블 모델

### 2.2.3. 반능동 제어 알고리즘

제어 알고리즘이란 대상 구조물의 진동을 효과적으로 감소시킬 수 있는 최적의 감쇠력을 산출하는 소프트웨어를 일컫는다. 그러나 반능동 제어기의 일종인 자기 유변 유체 감쇠기는 능동 제어와는 달리 원하는 감

쇠력을 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 세가지 알고리즘을 적용하였다.

**1. Lyapunov 안정성 이론을 이용한 제어 알고리즘(Lyapunov Stability Theory)<sup>(2)</sup>**

Lyapunov 안정성 이론은 Lyapunov 함수를 도입하여 함수값의 변화율이 negative semidefinite 일때 그 시스템은 Lyapunov 관점에서 안정하다는 이론이다. 이 이론을 이용하여 최대한 Lyapunov 함수값이 음이 되도록 하는 감쇠력을 구조물에 전달하는 것이 제어 알고리즘의 목적이 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.

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

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

MR 감쇠기의 특성을 잘 나타내도록 Dyke 등이 제안한 알고리즘으로, Linear Optimal Controller 로부터 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.

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

**3. 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 알고리즘으로 사용할 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(6)을 통하여 결정된다.

$$v_i = V_{\max} H(F_{dmi} - |F_d|) \tag{6}$$

**3. 반능동 감쇠 시스템의 케이블 진동 제어 성능 평가 실험**

**3.1. 케이블 자유 진동 실험**

본 연구에서는 반능동 감쇠 시스템의 성능을 평가하기 위해서 케이블의 자유진동실험을 수행하였다. 김남식등에 의해 개발된 케이블 가진 시스템을 사용하면 케이블의 공진을 유발할 수 있다.<sup>(7)</sup> 일정 시간동안 케이블을 가진하여 충분한 진폭을 확보한 다음 가진기를 정지하고 케이블의 자유진동 변위응답과 가속도 응답을 측정한다. 실험을 수행한 제어 시스템은 앞에서 소개한 반능동 제어 알고리즘과 MR 감쇠기의 입력전압을 일정하게 0V 와 1.4V로 유지하는 수동형태의 제어 알고리즘인 Passive off와 Passive on을 사용하였다.

3.2. 반능동 제어 시스템의 성능 비교 평가

본 연구에서 반능동 제어 시스템의 성능 평가 지표로서 자유 진동 실험으로부터 얻은 감쇠비를 사용하였다. 케이블은 비선형성이 매우 강하여 진폭에 따라 등가 점성 감쇠비가 달라지는 뚜렷한 이력감쇠 특성을 나타내므로, 감쇠비를 구하기 위하여 널리 쓰이는 Logarithmic Decrement 방법이나 Half Amplitude 방법 등을 사용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 케이블의 비선형성을 반영할 수 있는 Hilbert Transform을 사용하여<sup>(8)</sup> 케이블의 고정단으로부터 10.2m 떨어진 지점의 진폭에 따른 케이블의 등가 점성 감쇠비를 그림 6.과 같이 산출하였다.

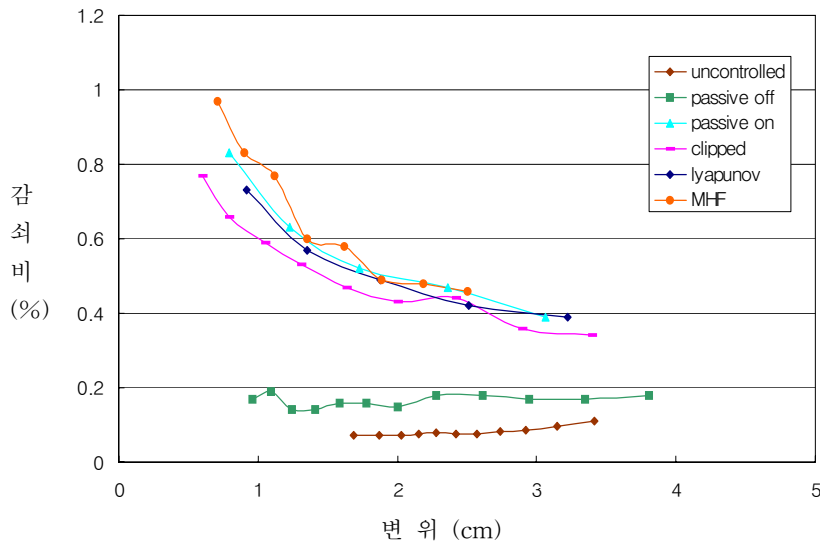


그림 6. 진폭에 따른 케이블의 등가점성 감쇠비

그림 6.로부터 반능동 제어 시스템은 제어하지 않은 경우에 비해서 케이블의 감쇠비를 크게 증가 시켰다는 것을 알 수 있다. 반능동 제어 시스템 중 가장 좋은 성능을 보이고 있는 제어 알고리즘은 MHF 알고리즘으로 케이블의 변위가 작을수록 감쇠비가 증가하는 현상을 보이고 있다. 또한 표 2.로부터 알고리즘의 성능은 케이블에 전달된 RMS 감쇠력과 비례한다는 것을 알 수 있다.

표 2. RMS 감쇠력

제어 알고리즘	RMS 감쇠력
Passive off	14.99N
Passive on	64.31N
Lyapunov	63.41N
Clipped optimal	52.79N
MHF	70.16N

4. 결 론

본 연구에서는 사장케이블에 반능동 제어 시스템을 적용하여 반능동 제어 시스템의 제어 성능을 평가하는 실험을 수행하였으며, 여러 반능동 제어 알고리즘을 적용하여 각 알고리즘의 성능을 비교 분석하였다. 알고리즘의 성능 평가 지표로서 케이블의 비선형성을 고려할 수 있는 Hilbert Transform을 사용하여 얻은 케이블의 진폭에 따른 등가 점성감쇠비를 사용하였다. 그 결과 반능동 제어 시스템은 케이블의 등가 점성 감쇠비를 최대 0.98%까지 증가시켰으며, 제어하지 않은 경우의 등가 점성 감쇠비에 비해서 매우 큰 감쇠비를 보여주었다. 또한 반능동 제어 시스템을 위하여 제안된 여러 반능동 제어 알고리즘 중 MHF 알고리즘이 가장 우수한 성능을 보이며, 각 알고리즘의 성능은 케이블에 전달된 RMS 감쇠력에 비례함을 알 수 있다.

### 감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥 재단의 지원 (KRF-2003-003-D00460)과 한국과학재단 지정 우수연구센터인 한국과학기술원 스마트 사회기반시설 연구센터(Smart Infra-Structure Technology Center) 지원으로 연구되었으므로 이에 감사 드립니다.

### 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," 한국지진공학 회 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