

## 사장교의 케이블 진동저감을 위한 수동 제어시스템

## Passive Control System for Mitigation of Cable Vibration in Cable-Stayed Bridges

황인호\* · 이종세\*\*

Hwang, Inho · Lee, Jong Seh

## Abstract

Rain-wind induced cable vibration can cause serious problems in cable-stayed bridges. Externally attached dampers have been used to provide an effective means to suppress the vibration of relatively short stay-cables. For very long stay-cables, however, such damper systems are rendered ineffective, as the dampers need to be attached near the end of cables for aesthetic reasons. This paper investigates a new control system to mitigate the cable vibration. The proposed control system which consists of a laminated rubber bearing and an internal damper may be installed inside of the cable anchorage. A simple analytical model of the cable-damper system is developed first based on the taut string representation of the cable. The response of a cable with the proposed control system is obtained and then compared to those of the cable with and without an external passive damper. The proposed stay-cable vibration control system is shown to perform better than the optimal passive viscous damper, thereby demonstrating its applicability in large cable-stayed bridges for mitigation of rain-wind induced vibration of stay-cables.

**Keywords** : cable-stayed bridge, isolation, vibration control, wind loads

## 요 지

사장교 케이블은 구조적으로 휨강성과 감쇠력이 작아 풍우에 의해 쉽게 유해진동이 발생한다. 이러한 풍우진동을 저감시키기 위한 효과적인 방법으로 부가댐퍼를 장착하여 케이블의 감쇠력을 증가시키는 제어시스템이 널리 사용되어왔다. 그러나 사장교의 장대화로 인해 구조적으로나 미적으로 충분한 감쇠력을 제공할 수 있는 위치에 부가댐퍼를 장착하기 어렵게 되었다. 그러므로 본 논문은 사장교의 미관을 해치지 않으면서 기존의 제어시스템보다 효과적으로 케이블의 진동을 저감시킬 수 있는 새로운 개념의 제어시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 케이블 앵커리지에 적층고무베어링과 같은 유동이 가능한 장치와 내부댐퍼로 구성되었으며, 제어성능평가를 위해 해석모델을 개발하였다. 제안된 시스템의 제어성능 분석을 위해 수치해석을 수행하였으며 기존의 부가 댐퍼시스템과 진동 저감효과를 비교하였다. 제안된 제어시스템은 기존의 부가댐퍼 시스템 보다 효과적으로 진동을 저감시킬 수 있었으며 사장교 케이블의 풍우진동 저감을 위해 효과적인 시스템으로 사료된다.

**핵심용어** : 사장교, 면진, 진동제어, 풍하중

## 1. 서 론

최근 들어 사장교는 구조적 효율성과 경제성 및 미적인 장점으로 인해 세계적으로 건설이 증가하며 장경간화가 급속히 진행 되고 있다. 그러나 사장교 주요 부재인 케이블은 강성 및 자체 구조 감쇠비가 매우 작아서 바람 또는 비바람에 의해 쉽게 진동이 발생한다(Watson & Stafford 1988). 이러한 진동은 케이블의 수명을 단축시키고 접합부의 피로 파괴를 야기시킬 뿐만 아니라 교량의 사용성에도 막대한 영향을 미치므로 적절한 진동저감대책이 요구된다.

일반적으로 케이블의 진동제어는 크게 공기역학적 방법, 고 유진동수 변화에 의한 방법 그리고 감쇠비 증가에 의한 방법이 있다. 이 중 댐퍼를 장착하여 케이블의 감쇠력을 증가

시키는 방법은 가장 효과적인 진동저감법으로 그 동안 많은 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로 Kovacs(1982)에 의해 수동댐퍼를 부착한 케이블의 최대 감쇠율과 최적의 감쇠계수를 결정하는 근사해가 개발되었으며, Pacheco 등 (1993)은 무차원 변수를 사용하여 댐퍼의 위치에 따른 최적의 감쇠계수를 산정할 수 있는 설계곡선을 제안하였다. Krenk(2000)은 팽팽한 케이블에서 댐퍼의 위치에 따른 저차 모드에서의 감쇠율을 계산할 수 있는 정확해를 개발하였으며, Main 등 (2002)은 점성댐퍼가 부착된 케이블의 복소고유치 문제를 해석적으로 체계화하였다. 또한 반능동 댐퍼를 이용하여 케이블의 진동을 저감시키고자 하는 해석적 연구도 수행되어 Johnson 등(1999)은 반능동 댐퍼를 이용하여 케이블의 진동을 수동댐퍼보다 효과적으로 제어할 수 있음을 보였다.

\*교신저자 · 한양대학교 토목환경공학과 박사과정(E-mail : hinho@hanyang.ac.kr)

\*\*정회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수(E-mail : jonglee@hanyang.ac.kr)

댐퍼의 부가에 의해 발생하는 부가 감쇠력은 케이블에 부착된 댐퍼 단부의 상대 운동량에 비례하므로 케이블의 정착 단으로 부터 멀리 떨어져 댐퍼를 설치하여야만 효과적인 제어 성능을 발휘할 수 있다. 그러나 오늘날 사장교는 설계 및 시공 기술의 발달로 인해 나날이 장대화되어 최장 케이블의 길이가 일본의 Tataro교(Endo 등 1999)와 프랑스의 Normandie교(Virloguex 등 1994)에서와 같이 450m가 넘게 되었으며, 주경간장이 1,018m에 이르는 Stonecutters교(Russell 1999)가 홍콩에 건설될 예정이다. 이에 따라 장대화 된 사장교는 구조적으로나 미적으로 충분한 부가감쇠력을 제공할 수 있는 위치에 부가 댐퍼를 장착하기가 어렵게 되었다.

그러므로 본 논문에서는 사장교의 미관을 해치지 않으면서 기존 제어시스템보다 효과적으로 케이블의 진동을 저감시킬 수 있는 새로운 개념의 사장교 케이블 진동제어시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 케이블 정착부에 적층고무베어링과 같은 유동이 가능한 장치와 내부댐퍼로 구성되어 있으며, 제어성능평가를 위해 해석모델을 개발하였다. 제안된 시스템의 제어성능 분석을 위해 수치해석을 수행하였으며 기존의 부가 댐퍼시스템과 진동 저감효과를 비교하였다.

## 2. 사장교 케이블 진동제어 시스템의 지배방정식

일반적으로 사장교 케이블은 그림 1과 같이 소켓이나 앵커헤드를 이용하여 교량상판이나 앵커리지에 정착된다. 그러나 본 논문에서는 적층고무베어링(LRB: Laminate Rubber Bearing)과 같은 베어링 장치와 내부댐퍼, 또는 고감쇠고무 베어링(HDRB: High Damping Rubber Bearing)으로 이루어진 새로운 개념의 제어장치를 그림 2와 같이 교량상판과 소켓 사이에 장착하여 케이블의 진동을 저감시키는 새로운 개념의 사장교 케이블 진동제어 시스템을 제안하였다.

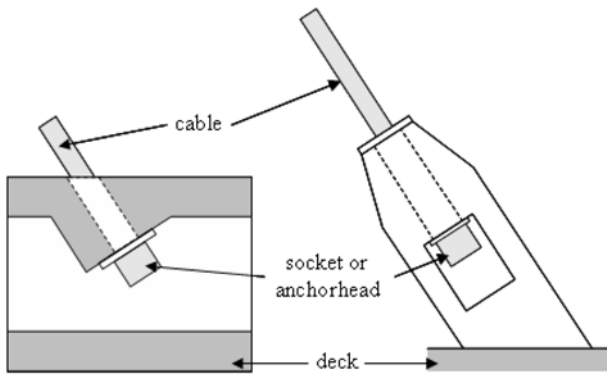


그림 1. 사장교의 일반적인 정착단

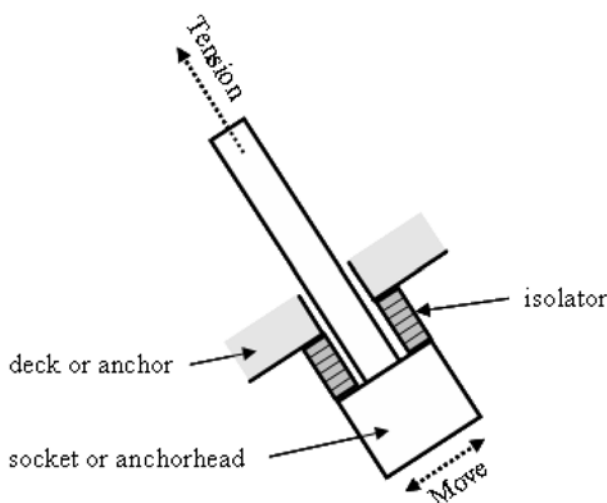


그림 2. 제안된 사장교 케이블 진동제어 시스템

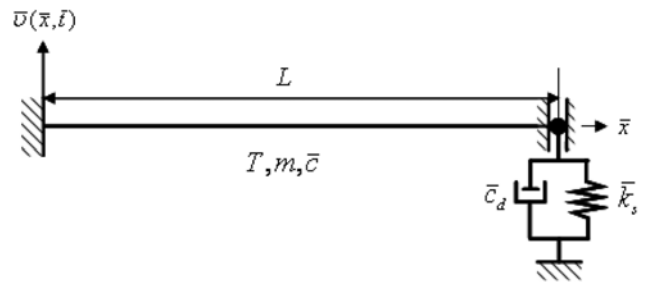


그림 3. 제안된 사장교 케이블 진동제어 시스템의 해석모델

Bearing)과 같은 베어링 장치와 내부댐퍼, 또는 고감쇠고무 베어링(HDRB: High Damping Rubber Bearing)으로 이루어진 새로운 개념의 제어장치를 그림 2와 같이 교량상판과 소켓 사이에 장착하여 케이블의 진동을 저감시키는 새로운 개념의 사장교 케이블 진동제어 시스템을 제안하였다.

제안된 시스템은 그림 3과 같이 세그(sag)를 가지지 않는 팽팽한 케이블(Irvine, 1981)의 단부에 베어링 장치가 장착되도록 모델링하였다. 케이블의 동적 거동은 선형 범위 안에서 다음과 같은 편미분방정식으로 표현된다.

$$m \frac{\partial^2 \bar{u}(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{t}^2} + c \frac{\partial \bar{u}(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{t}} - T \frac{\partial^2 \bar{u}(\bar{x}, \bar{t})}{\partial \bar{x}^2} = \bar{f}(\bar{x}, \bar{t}) + \bar{F}_1(\bar{t}) \delta(\bar{x} - L) \quad (1)$$

식 (1)의 경계조건은 다음과 같다.

$$\bar{u}(0, \bar{t}) = T \frac{\partial \bar{u}(L, \bar{t})}{\partial \bar{x}} + \bar{k}_s \bar{u}(L, \bar{t}) = 0 \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 케이블의 단위질량,  $c$ 는 케이블의 자체 감쇠계수,  $T$ 는 케이블의 초기 인장력,  $\bar{u}(\bar{x}, \bar{t})$ 는 케이블의 변위,  $\bar{f}(\bar{x}, \bar{t})$ 는 풍하중에 의해 케이블에 가해지는 분포하중,  $\bar{F}_1(\bar{t})$ 는 베어링 장치에 의해 케이블 단부에 가해지는 힘,  $\delta(\cdot)$ 은 Dirac delta 함수 그리고  $\bar{k}_s$ 는 베어링 장치의 강성 계수이다.

식 (1)과 (2)는 무차원 변수를 이용하면 다음과 같은 무차원 편미분방정식과 경계조건이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} - \frac{1}{\lambda_0^2} \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = f(x, t) + F_1(t) \delta(x - 1) \quad (3)$$

$$v(0, t) = \frac{\partial v(1, t)}{\partial x} + \frac{\bar{k}_s L}{T} v(1, t) = 0 \quad (4)$$

여기서 무차원 변수는 다음과 같이 정의하였다.

$$t = \bar{\omega}_0 \bar{t}, x = \bar{x}/L, c = \bar{c}/m \bar{\omega}_0, v(x, t) = \bar{u}(\bar{x}, \bar{t})/L$$

$$\bar{\omega}_0^2 = T \bar{\lambda}_0^2 / mL^2, \lambda_i = \bar{\lambda}_i L, \delta(0) = L \delta(0) \quad (5)$$

$$f(x, t) = L \bar{f}(\bar{x}, \bar{t}) / \bar{\lambda}_0^2 T, F_1(t) = \bar{F}_1(\bar{t}) / \bar{\lambda}_0^2 T$$

케이블의 동적변위는 일반적인 모달해석 방법을 이용하여 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^n q_i(t) \phi_i(x) \quad (6)$$

여기서  $q_i(t)$ 는 시간에 따른 일반적인 좌표값이며,  $\phi_i(x)$ 는 형상 함수로 다음과 같이 가정하였다.

$$\phi_i(x) = \sin \lambda_i x \quad (7)$$

여기서  $\lambda_i$ 는 다음 방정식의 해로부터 얻어진다.

$$\tan \lambda_i = \lambda_i \frac{T}{\bar{k}_s L} \quad (8)$$

여기서  $T/\bar{k}_s L$ 는 제안된 시스템 변수로서 각각 대상 케이블의 제원에 따라 결정된다. 즉 시스템 변수를 달리 가정함에 따라 다양한 종류의 케이블 진동제어 성능을 확인할 수 있다.

식 (4)~(8)을 식 (3)에 대입하고 형상함수  $\phi_i(x)$ 를 기중함수로 하여 다음과 같은 직교성을 이용한 Galerkin 방법을 적용하면

$$\int_0^L \phi_i(x) \phi_j(x) dx = \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{4\lambda_i} \sin 2\lambda_i \right) \delta_{ij} \quad (9)$$

제안된 제어 시스템의 행렬 운동방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = f + \varphi F_f(t) \quad (10)$$

여기서 질량, 감쇠 그리고 강성 행렬은 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M &= \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{4\lambda_i} \sin 2\lambda_i \right) \delta_{ij} \\ C &= c \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{4\lambda_i} \sin 2\lambda_i \right) \delta_{ij} \\ K &= \frac{\lambda_i^2}{\lambda_0^2} \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{4\lambda_i} \sin 2\lambda_i \right) \delta_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

그리고  $q = [q(t)]$ 는 변위벡터,  $f = f(t) = [f_1 f_2 \dots f_m]^T$ 는 풍하중에 의한 외력벡터이고  $\varphi = \varphi(x_1) = [f_1(x_1) f_2(x_1) \dots f_m(x_1)]^T$  케이블 단부의 위치벡터이다.

### 3. 선형 상태공간 방정식 및 풍하중

제안된 사장교 케이블 진동제어시스템의 동적해석을 위해 상태공간방정식(State-Space Equation)을 유도하였으며, 외력인 풍하중을 가정하였다. 또한 제어성능 평가를 위한 RMS(Root Mean Square) 방법을 적용하였다. 먼저 LRB와 내부댐퍼로 구성된 베어링 장치에 의해 케이블 단부에 가해지는 감쇠력은 다음과 같이 표현된다.

$$F_f(t) = -k_s v(1, t) - c_d \dot{v}(1, t) \quad (12)$$

여기서  $k_s$ 와  $c_d$ 는 무차원 강성계수와 감쇠계수로 다음과 같다.

$$k_s = \bar{k}_s L / \lambda_0^2 T, \quad c_d = \bar{c}_d / m L \omega_0 \quad (13)$$

식 (10)으로부터 제안된 사장교 케이블 진동제어 시스템의 선형 상태공간 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{\eta} &= A_p \eta + Gf \\ z &= C_p \eta + Hf \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $\eta = [q^T \dot{q}^T]^T$ 는 상태 벡터이며  $z = [q^T \dot{q}^T]^T$ 는 각각 변위, 속도, 가속도에 관련된 벡터이고  $A_p$ ,  $G$ ,  $C_p$  그리고 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_p &= A + A_i \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1}K_s & M^{-1}C_d \end{bmatrix} & G &= \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} \\ C_p &= C + C_i \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ M^{-1}K_s & M^{-1}C_d \end{bmatrix} & H &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 베어링 장치의 강성행렬과 감쇠행렬은 각각 다음과 같다.

$$K_s = -k_s \varphi \varphi^T, \quad C_d = c_d \varphi \varphi^T \quad (16)$$

일반적으로 비비람에 의한 케이블의 진동은 저차모드에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Main & Jones 1999). 그러므로 본 연구에서는 다음과 같이 풍하중에 의해 발생하는 분포하중을 다음과 같이 1차 모드로 가정하였다.

$$f(x, t) = W(t) \sin \pi x \quad (17)$$

여기서  $W(t)$ 는  $E[W(t)W(t+\tau)] = \delta(\tau)$ 인 Zero-mean Gaussian White Noise로 가정하였다.

제안된 시스템의 제어성능을 평가하기 위해 RMS 방법을 적용하였다. RMS 변위는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{disp}^2(t) = E \left[ \int_0^L v^2(x, t) dx \right] = \text{trace} \{ M^{1/2} E[q(t)q^T(t)] M^{1/2} \} \quad (18)$$

선형시스템인 경우 위식은 다음과 같은 Lyapunov 방정식의 해를 구함으로써 얻을 수 있다.

$$A_p \Omega + \Omega A_p^T + G^2 \pi S_0 G^T = 0 \quad (19)$$

여기서,  $S_0$ 는 스펙트럼 밀도행렬이다.

식 (19)의 해는  $\Omega = E[\eta \eta^T]$  이므로 RMS 변위는  $E[qq^T] = [I \ 0] \Omega [I \ 0]^T$ 와 같이 나타낼 수 있다.

### 4. 수치해석에 의한 제어성능 평가

제안된 사장교 케이블 진동제어시스템의 제어성능을 평가하기 위해 케이블의 감쇠율과 RMS 변위를 기존의 부가댐퍼

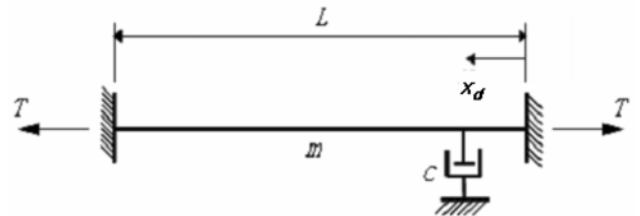


그림 4. 기존 부가댐퍼시스템의 해석모델

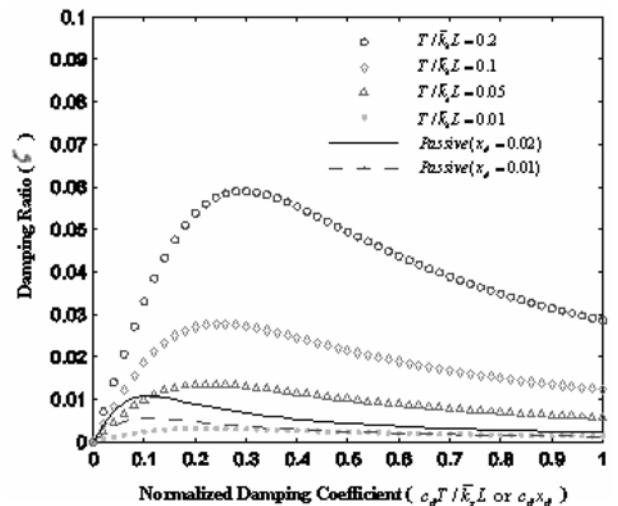


그림 5. 케이블의 감쇠율

시스템(그림 4)과 비교, 분석하였다(Pacheco 등 1993, Krenk 2000). 여기서 기존 부가댐퍼시스템의 댐퍼 부착 위치( $x_d$ )를 각각 0.01과 0.02로 가정하였으며, 제안된 시스템의 경우 시스템변수( $T/\bar{k}_s L$ )를 각각 0.01, 0.05, 0.1, 0.2로 변화시키면서 수치해석을 수행하였다.

그림 5는 제안된 시스템과 기존 부가댐퍼시스템의 감쇠율을 비교한 그래프이다.

여기서,  $x$ 축은 각각  $c_d T/\bar{k}_s L$ 와  $c_d x_d$ 로 일반화된 감쇠계수로 나타내었고 이에 따른 케이블의 감쇠율을  $y$ 축으로 하였다.

그림에서와 같이 기존 시스템은 부가댐퍼의 위치가 1%와 2%로 즉,  $x_d=0.01$ 과  $x_d=0.02$ 일 때 따라 약 0.5%와 1%의 최대 감쇠율을 보였으나, 제안된 시스템의 경우  $T/\bar{k}_s L = 0.01$  일 경우를 제외하고는 모두 기존 부가댐퍼 시스템보다 높은 감쇠율을 보였으며, 시스템 변수가 증가함에 따라 감쇠비도 증가하였다.

그림 6는 기존 부가댐퍼시스템과 제안된 시스템의 RMS 변위를 비교한 그래프이다. 그림 5에서와 같이  $x$ 축은 각각  $c_d T/\bar{k}_s L$ 와  $c_d x_d$ 로 일반화된 감쇠계수로 나타내었고 이에 따른 RMS 변위를 지수함수로  $y$ 축에 도시하였다.

그림에서와 같이 RMS 변위는 또한 시스템 변수가  $T/\bar{k}_s L = 0.01$  일 경우를 제외하고는 모두 기존 부가댐퍼 시스템보다 적은 RMS 값을 보였으며, 시스템 변수가 증가함에 따라 기존의 부가댐퍼시스템에 비해 적은 값을 가지게 된다. 그러므로 제안된 시스템은 시스템변수( $T/\bar{k}_s L$ )를 적절히 조절함으로써 높은 제어성능을 갖게 할 수 있음을 알 수 있다.

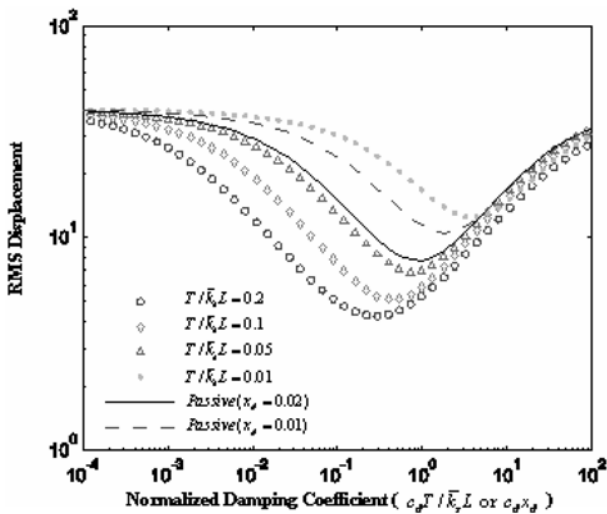


그림 6. RMS 변위

표 1. 최대 감쇠율과 최소 RMS 변위

구분	시스템 변수	감쇠율		RMS 변위	
		최대감쇠율 (%)	최적 감쇠계수	최소RMS 변위	최적 감쇠계수
제안된 사장교 케이블 진동제어 시스템	$T/\bar{k}_s L = 0.2$	5.9	1.45	4.28	1.48
	$T/\bar{k}_s L = 0.1$	2.77	2.50	5.13	2.20
	$T/\bar{k}_s L = 0.05$	1.36	4.60	6.88	4.01
	$T/\bar{k}_s L = 0.01$	0.31	22.00	12.43	19.88
기존의 부가댐퍼 시스템	$x_d=0.02$	1.08	5.25	7.74	4.44
	$x_d=0.01$	0.56	10.50	10.50	8.93

표 1은 두 시스템의 최대 감쇠율과 최소 RMS 변위를 나타내고 있다. 이 표에서와 같이 제안된 시스템의 최대 감쇠율은 시스템 변수( $T/\bar{k}_s L$ )가 0.01에서 0.2로 증가함에 따라 각각 0.31%, 1.36%, 2.77%, 5.9%로 증가하였고, 최소 RMS 변위 또한 각각 12.43, 6.88, 5.13, 4.28로 줄어들었다. 또한 케이블의 최대 감쇠율 및 최소 RMS 변위를 가지는 최적의 감쇠계수를 확인할 수 있다. 즉 적절한 시스템 변수를 선정하고 이에 따른 최적의 감쇠계수를 산정하면 효과적으로 사장교 케이블의 진동을 제어할 수 있다.

그러므로, 사장교 케이블의 제원이 결정되면 케이블 장력( $T$ )과 길이( $L$ )가 정해지고 시스템 변수는 베어링 장치의 강성( $\bar{k}_s$ )에 의해 결정되므로 베어링 장치의 강성을 작게 함에 따라 케이블의 감쇠비가 증가한다. 또한 최대의 제어성능을 제공하기 위해서는 최적의 감쇠계수를 결정하여야 한다.

그림 7은 제안된 시스템 변수에 따른 최적의 감쇠계수를 제공한다. 예를 들어 사장교 케이블의 제원이 정해지고 이에 따른 시스템 변수가 결정되면 최소의 RMS 변위 위치가 찾아지고 그림 7을 이용하여 최적의 감쇠계수를 결정할 수 있다.

그림 7로 부터 구한 최적의 감쇠계수를 적용하여 제안된 시스템의 제어성능을 비감쇠 시스템 및 최적의 부가댐퍼 시스템 그리고 비감쇠 시스템과 비교하였다. 그림 8에서와 같이 제안된 시스템은 시스템 변수( $T/\bar{k}_s L$ )가 각각 0.01, 0.05, 0.1, 0.2일 경우이고, 기존의 부가댐퍼시스템은 부가댐퍼의 위치( $x_d$ )가 각각 0.01, 0.02로 가정하였다. 제어성능 평가를 위해 케이블 전구간에서의 RMS 변위를 그래프로 나타내었다.

그림에서와 같이 케이블의 RMS 변위는 케이블 중앙 지점에서 가장 높은 값을 가지며 제안된 시스템은 정착부를 제외한 모든 지점에서 비감쇠 시스템 뿐 아니라 기존의 부가댐퍼 시스템 보다 월등히 적은 RMS 변위를 보여 사장교 케이블의 진동을 저감시키는 데 효과적인 시스템으로 사료된다. 그러나 기존 시스템과는 달리 정착부에서의 횡방향 변위가 발생하는데 시스템 변수( $T/\bar{k}_s L$ )가 증가함에 따라 정착부에서의 RMS 변위도 증가함을 알 수 있다.

표 2는 케이블의 중앙지점과 정착부에서의 RMS 변위를 나타내고 있다. 비감쇠 시스템의 경우 중앙지점에서 51.11의 RMS 변위를 가지며 제안된 시스템은 각각 시스템 변수( $T/\bar{k}_s L$ )가 0.01에서 0.2로 증가함에 따라 중앙지점에서의

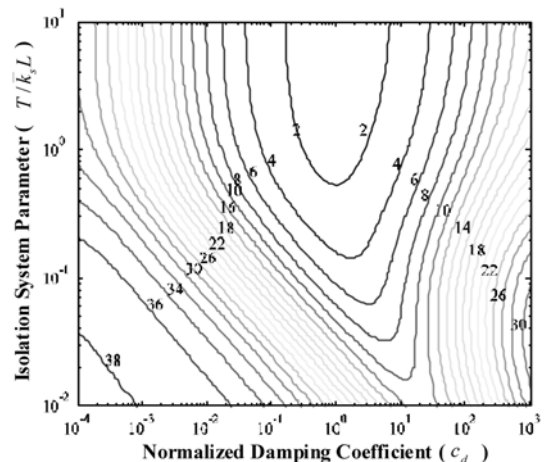


그림 7. 시스템 변수와 감쇠계수에 따른 RMS 변위

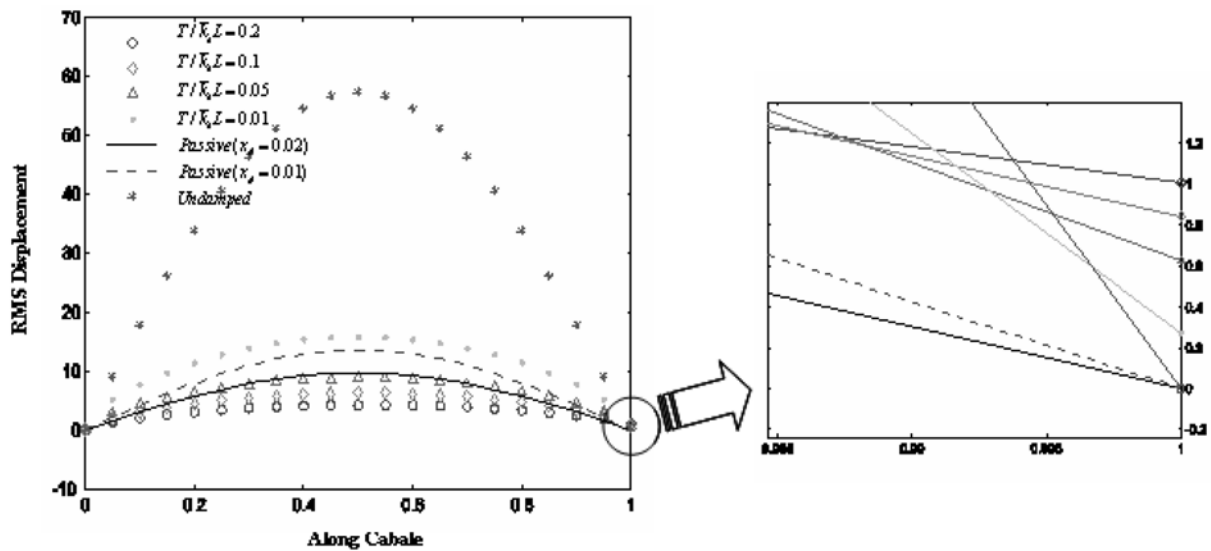


그림 8. RMS 변위를 통한 제어성능 평가

표 2. 케이블 중앙과 정착부 RMS 변위

구분		중앙부 RMS 변위	정착부 RMS 변위
제안된 사장교 케이블 진동제 어 시스템	$T/\bar{k}_s L = 0.2$	4.28	1.01
	$T/\bar{k}_s L = 0.1$	6.26	0.84
	$T/\bar{k}_s L = 0.05$	8.75	0.63
	$T/\bar{k}_s L = 0.01$	15.75	0.27
기존의 부가댐 퍼 시스템	$x_d = 0.02$	9.65	0
	$x_d = 0.01$	13.53	0
비감쇠 시스템	$C=0$	57.11	0

RMS 변위는 감소하나 정착부에서의 RMS 변위는 증가함을 보이고 있다. 그러나 비감쇠 시스템의 최대 변위에 대한 제안된 시스템의 정착부 변위는 약 2%내에 존재함으로 적절한 시스템변수를 선정함에 따라 정착부에서의 횡방향 변위를 제어할 수 있다. 그러므로 제안된 시스템의 적용 시 정착부에서의 허용 변위를 산정할 필요가 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 사장교 케이블의 진동 저감을 위해 새로운 개념의 진동제어 시스템을 제안하였으며, 케이블 단부에 적층고무베어링과 내부댐퍼로 구성된 시스템의 제어성능 평가를 위해 해석모델을 개발하였다. 최적의 감쇠계수를 적용하여 제안된 시스템의 제어성능을 비감쇠 시스템과 기존의 수동댐퍼 시스템과 비교하여 평가하였다. 수치해석결과 제안된 시스템은 베어링장치의 강성을 작게 할수록 수동댐퍼 시스템 보다 감쇠율과 RMS 값 모두 월등히 우수한 성능을 보이는 것으로 판명되었으며, 또한 최대의 제어 성능은 비감쇠 시스템 및 최적의 감쇠계수와 비교하여 베어링 장치가 장착된 케이블의 단부를 제외한 모든 위치에서 적은 RMS 변위를 나타내었다. 그러므로 본 연구를 통하여 제안된 사장교

케이블 진동제어 시스템은 기존의 댐퍼시스템보다 효과적으로 유해진동을 제어할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- Endo, T., Iijima, T., Okukawa, A., and Ito, M. (1991) The technical challenge of a long cable-stayed bridge: tataro bridge. *Cable-stayed Bridges: Recent Developments and Their Future*, Elsevier, pp. 417-436.
- Irvine, H.M. (1981) *Cable Structures*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Johnson, E.A., Spencer, B.F., Jr., and Fujino, Y. (1999) Semiactive damping of stay cables: a preliminary study. *Proc. 17th Int. Modal Analysis Conf.*, Society for Experimental Mechanics, Inc., Bethel, Conn., pp. 417-423.
- Kovacs, I. (1982) Zur Frage der Seilschwingungen und der Seildämpfung. *Die Bautechnik*, 10, pp. 325-332, (in German).
- Krenk, S. (2000) Vibrations of a taut cable with an external damper. *J. Applied Mech.*, ASME, 67, pp. 772-776.
- Main, J.A. and Jones, N.P. (1999) Full-Scale measurements of stay cable vibration. In Larsen, Larose, and Livesey (eds.), *Wind Eng. into the 21st Century*, Balkema, Rotterdam, pp. 963-970.
- Main, J.A. and Jones, N.P. (2002) Free Vibrations of Taut Cable with Attached Damper. I: Linear Viscous Damper. *J. Eng. Mech.*, Vol. 128, No. 10, pp. 1062-1071.
- Naeim, F., and Kelly, J.M. (1999) *Design of Seismic Isolation Structures*, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Pacheco, B.M., Fujino, Y., and Sulekh, A. (1993) Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper. *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 119, No. 6, pp. 1961-1979.
- Russell, H. (1999) Hong kong bids for cable-stayed bridge record. *Bridge Design and Engineering*, No. 15 (second quarter), 7.
- Virloqueux, M., et al. (1994) Design of the normandie bridge. *Proc. Int. Conf. Cable-stayed and Suspension Bridges*, IABSE, 1, pp. 605-630.
- Watson, S.C. and Stafford, D. (1988) Cables in trouble. *Civil Eng.*, ASCE, Vol. 58, No. 4, pp. 38-41.

(접수일: 2006.4.6/심사일: 2006.5.27/심사완료일: 2006.6.22)