

사장교 케이블 진동저감을 위한 능동제어시스템

Active Control System for Mitigation of Cable Vibration in Cable-Stayed Bridges

황인호† 정철오* 이종한** 이종세***
Hwang, In-ho Jeong, Cheol-Oh Lee, Jong-Han Lee, Jong-Seh
(논문접수일 : 2007년 4월 5일 ; 심사종료일 : 2007년 7월 16일)

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 댐퍼를 케이블의 정착부 부근에 설치할 수밖에 없는 구조적 한계로 인하여 충분한 감쇠력을 발휘하기 어렵다. 그러므로 본 논문은 수동제어시스템 보다 효과적으로 풍하중에 의한 케이블 진동을 제어하기 위한 능동제어시스템을 제안하였다. 제안된 능동제어시스템은 케이블의 정착단에 베어링 장치를 장착하여 케이블 단부에서 횡방향 변위가 가능하도록 모델링하였으며, 앵커리지 내부에 장착된 능동댐퍼를 이용하여 적절한 제어력을 제공하도록 하였다. 능동제어를 위하여 최적제어 이론을 이용 LQG 조정기를 설계하였으며, 수치해석은 실제 교량인 서해대교의 최장 케이블을 대상으로 하여 기존의 댐퍼 시스템과 수동, 능동 댐퍼 부착에 따른 케이블의 진동제어성능을 비교 및 분석하였다. 연구결과 제안된 능동제어시스템은 효과적으로 사장교 케이블의 진동을 저감시킬 수 있는 시스템임을 입증하였으며, 기존의 부가댐퍼 시스템 보다 효과적으로 진동을 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 사장교, 댐퍼, 진동제어, 풍하중, 능동제어

Abstract

Rain-wind induced cable vibration can cause serious problems in cable-stayed bridge. External dampers attached to the cables have become widely accepted as an effective means for stay-cable vibration suppression. For very long stay-cables, however, such damper systems are rendered ineffective, as the dampers need be attached near the end of cables for aesthetic reasons. A recent study by the authors proposed that a movable anchorage system is replaced direct fixed support of the cable with a support through a bearing and damper. This paper extends the previous work by adding active control system to mitigate the cable vibration. The response of a cable with the proposed active control system is obtained and then compared to those of the cable with and without an external passive damper. The results show that the active control system can provide superior protection than the passive control system for a cable vibration.

Keywords : cable-stayed bridge, damper, vibration control, wind loads, active control

1. 서 론

최근 들어 사장교는 구조적 효율성과 경제성 및 미적인 장점으로 인하여 세계적으로 건설이 증가하고 있으며 장경간화가 급속히 진행되고 있다. 그러나 사장교의 주요 부재인 케이블은 매우 유연하여 활하중 또는 풍하중과 같은 외력에 의

해 발생하는 진동에 매우 민감할 뿐만 아니라(Watson 등, 1988), 구조적으로 매우 낮은 감쇠율로 인해 진동에너지를 효과적으로 소산시키기 어렵다. 이는 케이블의 수명을 단축시키고 접합부의 피로파괴를 야기시킬 뿐만 아니라 교량의 사용성에도 막대한 영향을 미치므로 적절한 진동저감 대책이 요구된다.

† 책임저자, 정회원 · 한양대학교 토목공학과 박사후 연구원
Tel: 031-416-7201 ; Fax: 031-400-4103
E-mail: hinho@hanyang.ac.kr

* 한라산업개발(주) 사원

** 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*** 정회원 · 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론회를 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

일반적으로 케이블의 진동제어는 크게 공기역학적 방법, 고유진동수 변화에 의한 방법 그리고 감쇠비 증가에 의한 방법이 있다. 이 중 댐퍼를 장착하여 케이블의 감쇠력을 증가시키는 방법은 가장 효과적인 진동저감법으로 그 동안 많은 연구가 진행되어왔다. 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)는 팽팽한 케이블에서 댐퍼의 위치에 따른 저차 모드에서의 감쇠율을 계산할 수 있는 정확해를 개발하였으며, Main 등(2002)은 점성댐퍼가 부착된 케이블의 복소고유치 문제를 해석적으로 체계화하였다. 국내에서도 다양한 수동댐퍼를 이용한 케이블의 진동제어에 대한 연구가 수행되어 왔다(안상섭 등, 2001).

그러나 댐퍼의 부가에 의해 발생되는 부가 감쇠력은 케이블에 부착된 댐퍼 단부의 상대 운동량에 비례하므로 케이블의 정착단으로부터 멀리 떨어져 댐퍼를 설치하여야만 효과적인 제어 성능을 발휘할 수 있다. 또한 수동제어는 바람과 같이 예측하기 힘든 하중에 대하여 효과적인 진동제어가 힘들며, 케이블이 점점 더 길어짐에 따라 댐퍼 부착위치가 전체 길이의 5%정도에 위치시키는 것이 실제적으로 어렵게 되어 케이블 전체 길이의 1%, 2% 거리에 위치되어야 함에 따라 수동 댐퍼를 이용해서는 충분한 감쇠효과를 얻는데 한계가 있다.

이를 해결하기 위해 황인호 등(2006)은 사장교의 미관을 해치지 않으면서 케이블의 유해진동을 저감시킬 수 있는 새로운 개념의 수동제어시스템이 제안하였다. 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.

본 논문에서는 사장교의 미관을 해치지 않으면서 케이블의 감쇠율을 확보하며 기존 제어시스템의 단점을 보완하여 보다 효과적인 제어성능을 가진 능동제어시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 케이블 정착부에 적층고무베어링과 같은 유동이 가능한 장치와 구조물의 진동 응답에 따라 외부에서 제어력을 공급하여 구조물의 진동제어가 효과적으로 가능한 능동 댐퍼로 구성된 사장교 케이블 능동제어시스템을 모델링하고, 상태-공간방정식을 이용하여 능동제어시스템 행렬을 구하였다. 제안된 시스템의 제어성능 평가를 위해 실제 교량인 서해대교의 최장케이블을 대상으로 하여 풍하중에 대한 수치해석을 수행하고, 기존의 부가 댐퍼시스템과 진동 저감효과를

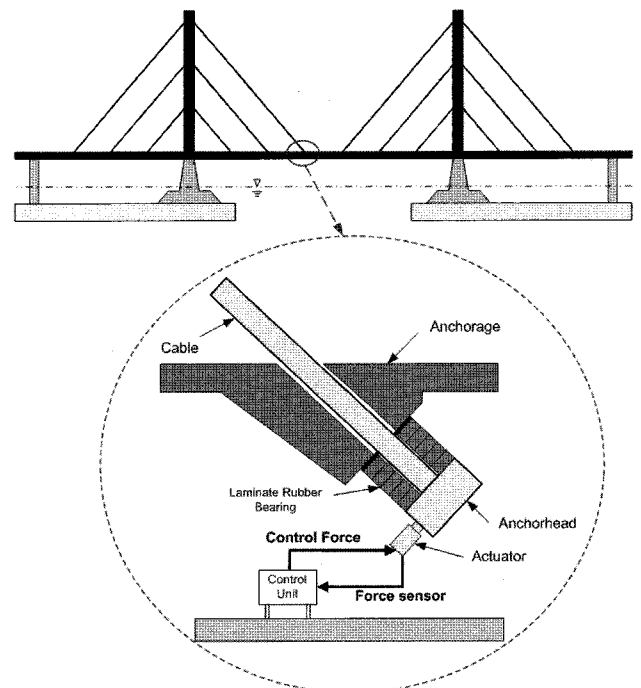


그림 1 제안된 능동 진동 제어시스템

비교하였다.

2. 사장교 케이블 진동제어 시스템의 지배방정식

일반적으로 사장교 케이블은 교량상판 또는 앵커리지에 소켓이나 앵커헤드를 이용하여 교량상판이나 앵커리지에 정착된다. 그러나 본 논문에서는 그림 1과 같이 교량상판과 소켓 사이에 적층고무베어링(LRB: Laminate Rubber Bearing)과 같은 베어링 장치를 설치하여 횡방향 변위가 가능하도록 하였고, 이 때 케이블 단부에 설치된 센서가 횡방향 변위와 가속도를 측정하고 제어알고리즘을 이용하여 적절한 제어력을 결정한 후 액츄에이터를 통하여 다시 케이블 단부에 제어력이 전해져 횡방향 변위를 제어함으로써 케이블의 진동을 제어하는 능동제어 시스템을 제안하였다.

제안된 시스템은 그림 2와 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(황인호 등, 2006).

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

식 (1)의 경계조건은 다음과 같다.

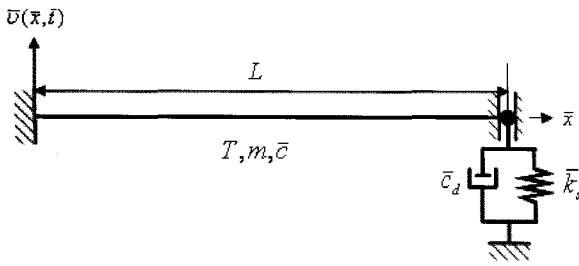


그림 2 제안된 사장교 케이블 진동제어 시스템의 해석모델

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

여기서 m 은 케이블의 단위질량, \bar{c} 는 케이블의 자체 감쇠계수, T 는 케이블의 초기 인장력, $\bar{v}(x, \bar{t})$ 는 케이블의 변위, $\bar{f}(x, \bar{t})$ 는 풍하중에 의해 케이블에 가해지는 분포하중, $\bar{F}_I(\bar{t})$ 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.

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

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

여기서 무차원 변수는 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} t &= \bar{\omega}_0 \bar{t}, \quad x = \bar{x}/L, \quad c = \bar{c}/m \bar{\omega}_0, \quad v(x, t) = \bar{v}(\bar{x}, \bar{t})/L \\ \bar{\omega}_0^2 &= T \bar{\lambda}_0^2 / mL^2, \quad \lambda_i = \bar{\lambda}_i L, \quad \delta(0) = L \bar{\delta}(0) \\ f(x, t) &= \bar{L} \bar{f}(\bar{x}, \bar{t}) / \bar{\lambda}_0^2 T, \quad F_I(t) = \bar{F}_I(\bar{t}) / \bar{\lambda}_0^2 T \end{aligned} \quad (5)$$

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 λ_i 는 다음 방정식의 해로부터 얻어진다.

$$\tan \lambda_i = -\lambda_i \frac{T}{k_s L} \quad (8)$$

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(황인호 등, 2006).

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

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

제안된 제어 시스템의 행렬 운동방정식은 다음과 같이 구해진다.

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = f + \varphi F_d(t) \quad (10)$$

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 $x = [q_i(t)]$ 는 변위벡터, $f_w = f_w(t) = [f_1 f_2 \dots f_m]^T$ 는 풍하중에 의한 외력벡터, $\varphi = \varphi(x_1) = [\phi_1(x_1) \phi_2(x_1) \dots \phi_m(x_1)]^T$ 케이블 단부의 위치벡터이고, $F_d(t)$ 는 능동댐퍼의 제어력이다.

3. 선형 상태공간 방정식 및 풍하중

제안된 사장교 케이블 진동제어시스템의 동적해석을 위해 상태공간방정식(State-Space Equation)을 유도하였으며, 외력인 풍하중을 가정하였다. 식 (10)으로부터 제안된 사장교 케이블 진동제어 시스템의 선형 상태공간 방정식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= Aq + Bf \\ y &= C_y q + D_y f \\ y_m &= C_m q + D_m f \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $q = [x^T \dot{x}^T]^T$ 는 상태벡터이며, $y = [x^T]^T$ 는 출력벡터로써 케이블의 변위이다. $y_m = [x^T \ddot{x}^T]^T$ 는 각각 변위, 가속도에 관련된 출력벡터이다. 그리고 $f = [f_w^T f_d^T]^T$ 는 각각 외부하중과 제어력에 관련된 벡터이고, 각 시스템 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 A &= A + A_i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1}K_s & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1} & M^{-1}\phi \end{bmatrix} \\
 C_y &= [I \ 0] \quad D_y = [0 \ 0] \\
 C_m &= C + C_i = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1}K_s & 0 \end{bmatrix} \quad D_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M^{-1} & M^{-1}\phi \end{bmatrix} \quad (13)
 \end{aligned}$$

여기서 K_s 는 적층고무베어링 장치의 강성행렬로써 다음과 같다.

$$K_s = -k_s \phi \phi^T \quad (14)$$

일반적으로 비바람에 의한 케이블의 진동은 저차모드에서 발생하는 것으로 알려져 있다(Main 등, 1999). 그러므로 본 연구에서는 다음과 같이 풍하중에 의해 발생하는 분포하중 $f(x, t)$ 을 다음과 같이 1차 모드로 가정하였다.

$$f(x, t) = W(t) \sin \pi x \quad (15)$$

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

4. 능동제어를 위한 LQG 조정기

제안된 능동제어시스템의 케이블 진동제어 성능을 평가하기 위해 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서는 최적 feedback 제어 이론을 이용하여 LQ조정기와 칼만상태 추정기가 결합된 형태로써 조정 수행과 제어노력이 필요가 없는 LQG 조정기를 설계하여 능동제어를 하였다.

LQ조정기의 2차 가격함수 J 는 주어지는 상태 공간 모델을 통하여 식 (16)과 같이 얻어지며,

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt = J_1 + J_2 \quad (16)$$

상태 피드백 제어법칙 u 는 다음과 같이 주어진다.

$$u = -Kx = -R^{-1}B^T P x \quad (17)$$

따라서 최소화 이득 행렬 K 는 다음과 같이 된다.

$$K = R^{-1}B^T P \quad (18)$$

여기서 P 는 양의 한정 대칭행렬이고 다음과 같은 Riccati 방정식의 유일한 해이다. 이 최소화 이득 행렬 K 는 식 (19)와 같은 대수 리카치 방정식(algebraic Riccati equation)을 풀이함으로써 얻어진다.

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (19)$$

결과적으로 LQ조정기의 설계는 상태 가중 행렬 Q 와 제어 가중 행렬 R 을 선정하는 문제로서, 중요한 매개변수가 되므로 적절히 선택하여야 하고 조정기의 성능과 제어 효과 사이의 관계를 정의한다. 가중행렬은 시행착오를 통하여 결정되어진 제어가중행렬 $R = (2kM)^{-2}$, 상태가중행렬 $Q = \begin{bmatrix} q'_{drifts} I & 0 \\ 0 & q'_{accels} I \end{bmatrix}$ 를 사용하였으며, $q'_{drifts} = 86.03$, $q'_{accels} = 2.67$ 을 사용하였다.

칼만 상태 추정기는 추정 오차의 공분산(convariance)을 가격 함수 J 로 두면 다음 식과 같다.

$$J = \lim_{t \rightarrow \infty} E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T] = \lim_{t \rightarrow \infty} E[e \cdot e^T] \quad (20)$$

따라서 가격 함수 J 를 최소화시키는 추정치 \hat{x} 를 유도해 낼 수 있다. 이와 같은 상태추정기를 칼만 필터라 하며, 칼만 필터의 동역학 식은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + L(y - C_m \hat{x}) \\
 L &= PC_m^T R_n^{-1} \quad (21)
 \end{aligned}$$

여기서 P 는 양의 한정 행렬이고 다음과 같은 리카치 방정식의 유일한 해이다. 칼만 필터 이득 행렬 L 은 식 (22)와 같은 필터 대수 리카치 방정식을 풀이함으로써 얻어진다.

$$A^T P + PA - PC_m^T R_n^{-1} C_m P + GQ_n G^T = 0 \quad (22)$$

칼만 필터의 동역학 식 (21)을 정리하면 식 (23)과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = (A - C_m L)\hat{x} + Bu + Ly \quad (23)$$

따라서 칼만 필터의 안정도는 $(A - LC_m)$ 의 고유값에 의해서 결정된다는 것을 알 수 있으며, 칼만 상태 추정기에

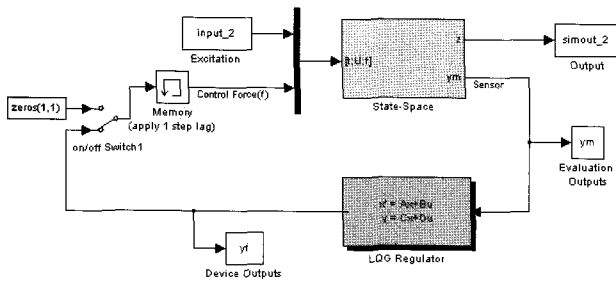


그림 3 능동제어시스템의 구조

서 필요한 공분산 데이터는 시행착오를 통하여 각각 $Q_n = 3 \times 10^9$, $R_n = 2 \times 10^{-6}$ 으로 결정하였다.

LQG 조절기는 LQ 조절기와 칼만 상태 추정기로 구성되어지고, 이들 두 요소를 독립적으로 설계한 후에 LQG 조절기의 형태를 구하면 된다.

따라서 본 논문에서는 앞에서 구하여진 LQ 조절기의 이득 행렬 K와 칼만 추정기 Kest의 결합으로 LQG 조절기를 설계하였으며, K와 Kest를 이용하여 제어시스템 행렬을 구하여 제어력을 얻었다. 그림 3은 LQG 조절기가 적용된 능동 제어시스템 구조를 나타내고 있다.

5. 수치해석에 의한 제어성능 평가

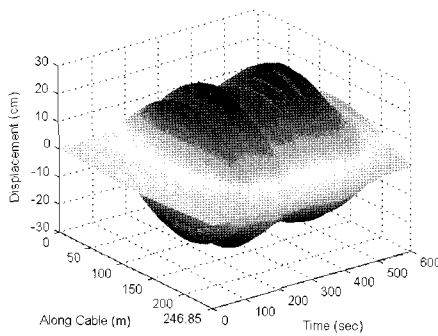
장대화 되어가는 추세에 있는 사장교의 케이블 진동 저감을 위해 구조적으로나 미관상으로 기존의 수동댐퍼 시스템에

의해 효과인 부가 감쇠력을 발휘할 수 없는 장대 케이블을 대상으로 제안된 진동제어시스템의 현장 적용성을 평가하기 위해 실교량에 적용하여 적절한 베어링 장치를 설계, 수치해석을 통해 제어성능 및 적용성을 평가하였다.

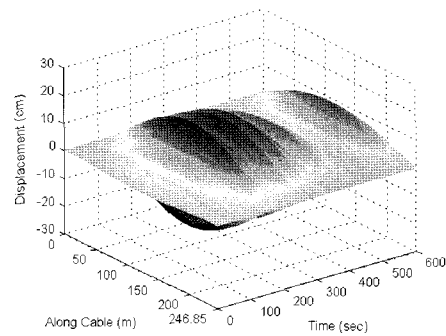
대상 구조물은 서해안고속도로 구간 중 경기도 평택시와 충청남도 당진군을 잇는 국내 최대규모의 사장교로인 서해대교로 2개의 주탑과 144개의 케이블로 상판을 지지하고 있으며 주탑과 주탑 사이의 거리가 470m이다. 최장 케이블의 길이는 246.85m, 단위중량은 125.3kg/m, 케이블의 지름은 28cm, 초기 인장력은 6261kN이다.

제안된 능동제어 시스템의 제어 성능 평가를 위하여 부가 감쇠 장치가 없는 경우, 기존 부가댐퍼시스템, 수동제어 시스템의 결과와 비교·분석 하였다. 기존 부가댐퍼시스템의 댐퍼 부착 위치(x_d)는 0.01로 가정하였으며, 제안된 시스템은 시스템변수($T/k_s L$)를 0.1로 가정하였으며, 이때 적층고무 베어링의 전단강성은 $2.6 \times 10^4 \text{N/m}$ 이고 댐핑계수는 $5.6 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{s/m}$ 으로 케이블 장력에 의한 압축력과 좌굴에 충분히 저항하도록 설계하였다. 그리고 제안된 시스템의 경우 능동댐퍼와 수동댐퍼를 장착하여 그 성능을 비교하였다.

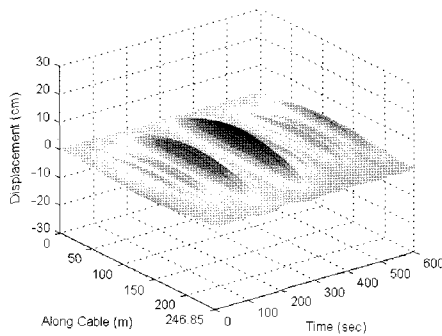
그림 4는 각 시스템별 동적거동 시뮬레이션 결과이다. 그림에서와 같이 제안된 시스템은 기존의 부가댐퍼시스템에 비해 효과적으로 케이블의 진동을 제어 할 수 있으며 제안된 시스템 중에서도 능동제어시스템이 더욱 좋은 결과를 보여주



(a) 비감쇠 시스템



(b) 기존의 수동댐퍼시스템



(c) 수동제어시스템

(d) 능동제어시스템

그림 4 서해대교 최장케이블의 동적거동 시뮬레이션

고 있다. 그러나 그림 4 (c)와 (d)에서와 같이 다른 시스템과는 달리 제안된 진동제어 시스템은 케이블 단부에서 미소한 횡방향 변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이는 적층고무베어링과 같은 장치가 횡방향 변위를 가능하게 하여 케이블 전체의 진동을 제어시키며 단부의 횡방향 변위는 수동, 능동 댐퍼가 제어함을 알 수 있다.

그림에서와 같이 풍하중에 의한 초기 거동은 제안된 시스템에서 다소 높게 발생한다. 그러나 시간이 지남에 따라 비감쇠 시스템(Undamped)의 케이블은 최대 $\pm 30\text{cm}$ 정도의 진동을 보이고 있으며, 기존의 부가댐퍼 시스템(Passive damper)은 약 $\pm 20\text{cm}$ 정도로 진동 저감 효과를 보이고 있다. 이에 반해 제안된 수동제어시스템(Passive system)이 장착된 케이블의 진동은 $\pm 10\text{cm}$ 정도로 기존 수동댐퍼 시스템에 비하여

50%정도의 진동 저감효과를 나타내었으며, 능동제어시스템(Active system)은 $\pm 5\text{cm}$ 정도의 진동으로 75%의 우수한 진동 제어 성능을 보이고 있다. 이는 케이블 단부에서 횡방향 변위가 가능하여 초기 진동이 쉽게 발생하나 감쇠율의 증가로 인해 케이블의 진동 제어력도 증가함을 알 수 있었다. 그리고 제안된 시스템에서 수동댐퍼가 장착된 경우와 능동댐퍼가 장착된 진동제어시스템의 성능을 평가하기 위하여 케이블의 중앙점과 단부에서의 횡방향 변위를 비교·분석하였다.

그림 5와 6은 수동제어시스템과 능동제어시스템의 제어 성능을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 능동제어시스템이 수동댐퍼시스템보다 50%정도의 더 나은 진동제어 성능을 보이고 있다. 단, 단부의 횡방향 변위는 능동제어시스템이 수동제어시스템보다 30%정도 크게 나타나고 있으나 중앙

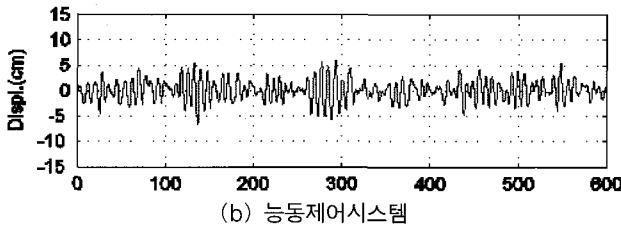
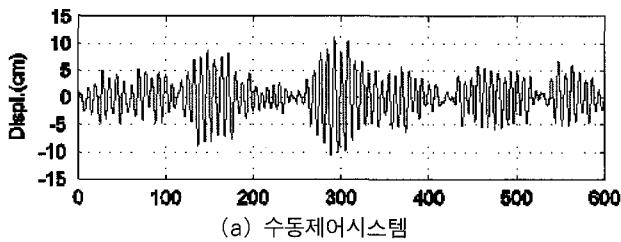


그림 5 케이블 중앙점에서의 횡방향 동적거동

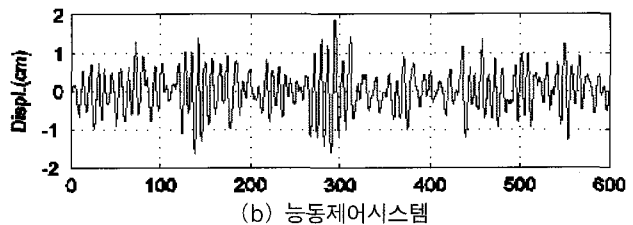
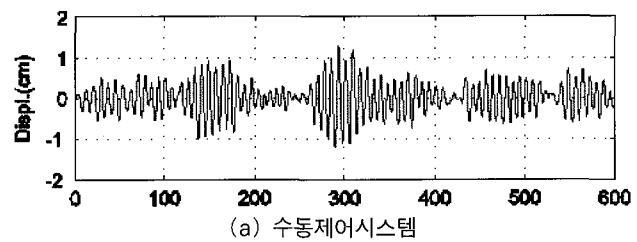


그림 6 케이블 단부에서의 횡방향 동적거동

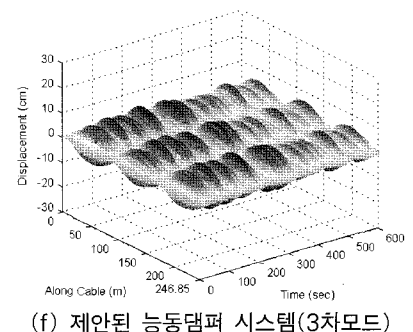
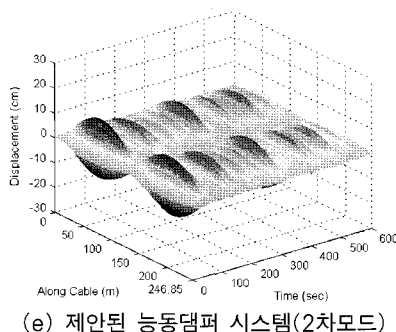
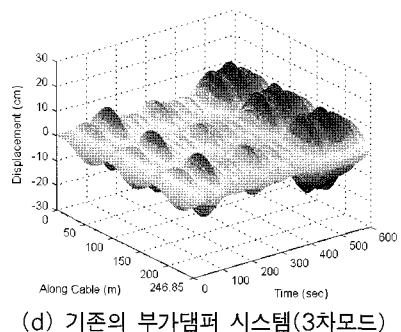
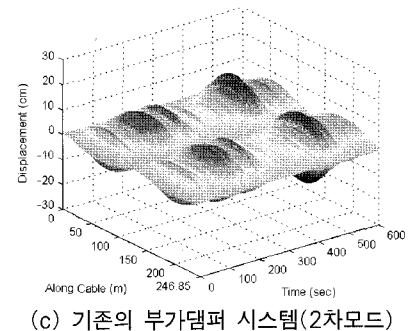
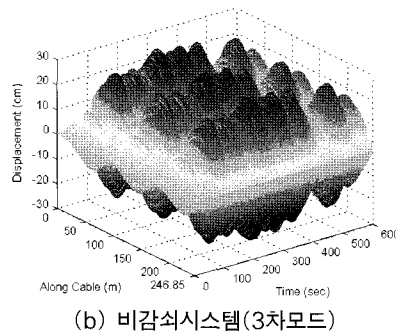
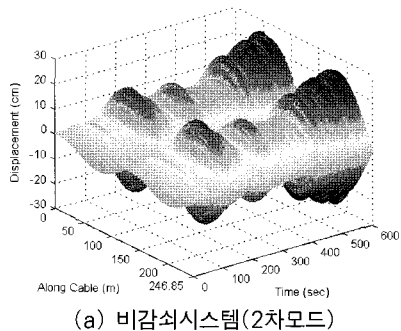


그림 7 2, 3차 모드의 동적 시뮬레이션

점에서의 변위와 단부의 횡방향 변위를 비교하였을 때 능동 제어시스템이 더욱 효과적인 시스템임을 알 수 있다.

그림 7은 제안된 능동제어시스템의 제어성능을 2, 3차 모드에서 비감쇠 시스템 및 기존의 부가댐퍼시스템과 비교한 결과이다. 그림에서와 같이 일반 케이블에서 진동 발생이 가능한 저차 모드에서도 효과적으로 제어성능을 발휘할 수 있음을 보여다.

6. 결 론

본 논문에서는 사장교 케이블의 효과적인 진동제어를 위한 능동제어시스템을 제안하고, 무차원 변수를 사용하여 모델링 하였다. 능동제어를 최적 Feedback 제어 이론을 이용하여 LQ 조정기와 칼만 상태 추정기를 병합하여 만든 LQG 조정기를 설계하여 사용하였다. 제안된 능동제어 시스템의 제어 성능 및 현장 적용성을 평가하기 위하여 풍하중을 가정하고, 실제 교량인 서해대교의 최장케이블을 대상으로 동적거동 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 풍하중에 의한 초기 거동은 제안된 시스템에서 다소 높게 발생하나 시간이 지남에 따라 기존의 부가댐퍼 시스템에 비하여 수동제어시스템의 경우는 50%, 능동제어시스템의 경우는 75%정도 향상된 진동제어 성능을 발휘하였다. 이는 케이블 단부에서 횡방향 변위가 가능하여 초기 진동이 쉽게 발생하나 감쇠율의 증가로 인해 케이블의 진동 제어력도 증가함을 알 수 있었다. 그리고 수동제어시스템과 제안된 능동제어시스템의 성능을 비교·평가하기 위하여 각 시스템의 중앙점과 단부에서의 변위를 분석한 결과 능동제어시스템이 수동제어시스템에 비하여 단부의 횡방향 변위가 30%정도 증가하였으나, 중앙점에서의 동적거동은 50%의 진동제어 효과를 발휘하며 수동제어시스템에 비하여 효과적인 진동제어가 가능함을 확인하였다. 그러므로 본 연구를 통하여 제안된 능동제어시스템이 케이블의 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 시스템임을 확인하였고, 다른 진동제어시스템보다 우수한 진동제어성능을 발휘 할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- 안상섭, 정운용** (2001) 특수 교량 케이블 부재의 진동 저감 기준 연구, 연구보고서, 한국도로공사 도로연구소, 도로연 01-32.
- 황인호, 이종세** (2006) 사장교의 케이블 진동저감을 위한 수동 제어시스템, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 26 (5), pp.881~885.
- Irvine, H. M.** (1981) *Cable Structures*, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Johnson, E. A., Spencer, B. F., Jr., 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 Seildampfung. *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., 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., Jones, N. P.** (2002) Free Vibrations of Taut Cable with Attached Damper. I: Linear Viscous Damper. *J. Eng. Mech.*, 128(10), pp.1062~1071.
- Pacheco, B. M., Fujino, Y., Sulekh, A.** (1993) Estimation Curve for Modal Damping in Stay Cables with Viscous Damper. *J. Struct. Eng.*, ASCE, 119(6), pp.1961~1979.
- Watson, S. C., Stafford, D.** (1988) Cables in Trouble. *Civil Eng.*, ASCE, 58(4), pp.38~41.