

On-Off 형태의 LQG 알고리즘을 이용한 복합제어 시스템

Hybrid Control System Using On-Off Type LQG Algorithm

박 규 식† 정 형 조* 윤 우 현** 이 인 원***
Park, Kyu-Sik Jung, Hyung-Jo Yoon, Woo-Hyun Lee, In-Won
(논문접수일 : 2004년 8월 2일 ; 심사종료일 : 2005년 6월 13일)

요 지

본 논문에서는 지진하중을 받는 사장교에 납고무받침과 유압식 가력기를 결합한 복합제어 시스템을 적용하였다. 복합제어 시스템은 다중의 제어장치로 인해 제어성능의 향상을 기대할 수 있지만 추가적으로 사용되는 능동제어 장치로 인하여 전체 제어시스템의 강인성이 저하될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 복합제어 시스템의 강인성을 향상시키기 위해 기존의 LQG 알고리즘에 납고무받침의 응답에 따른 on-off 형태의 알고리즘을 결합하였다. 수치해석 결과 on-off 형태의 LQG 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템은 납고무받침을 사용한 수동제어 시스템이나 유압식 가력기만을 사용한 능동제어 시스템과 비슷한 최대제어력이나 평균제어력을 사용하면서 제어성능이 향상되었으며, 기존의 성능에 초점을 둔 LQG 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템과 유사한 제어성능을 나타냈다. 또한 제안된 제어시스템은 구조물의 강성행렬에 교란이 있을 때 기존의 LQG 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템에 비해 강인성이 향상되었으며 교란된 시스템에 대해 불안정성을 보이지 않았다. 제안된 제어시스템은 설계지진뿐만 아니라 다른 입력지진에 대해서도 제어성능을 유지하였다. 따라서 On-Off 형태의 LQG 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템은 불확실성이 많은 지진하중을 받는 사장교에 개선된 제어기법으로 제안될 수 있다.

핵심용어 : 복합제어 시스템, On-Off 형태의 LQG 알고리즘, 강인성 해석, 강성행렬 교란, 지진응답제어

Abstract

This paper presents a hybrid control system combining lead rubber bearings and hydraulic actuators for seismic response control of a cable stayed bridge. Because multiple control devices are operating, a hybrid control system could improve the control performances. However, the overall system robustness may be impacted negatively by additional active control devices. Therefore, a secondary on-off type controller according to the responses of lead rubber bearings is combined with LQG algorithm to improve the controller robustness. Numerical simulation results show that control performances of the hybrid system controlled by an on-off type LQG algorithm are improved compared to those of the passive and active control systems and are similar to those of performance oriented hybrid system controlled by a LQG algorithm with the similar peak and normed control forces. Furthermore, it is verified that the hybrid system with an on-off type LQG controller is more robust for stiffness matrix perturbation than conventional hybrid control system, and there are no signs of instability in the overall system. The proposed control system also maintains the control performance under not only the design earthquakes but also the other earthquakes. Therefore, the hybrid control system using on-off type LQG algorithm could be proposed as an improved control strategy for seismically excited cable-stayed bridges containing many uncertainties.

keywords : hybrid control system, on-off type LQG algorithm, robust analysis, stiffness matrix perturbation, seismic response control

† 책임저자, 정회원·한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사 후 연수연구원

전화: 042-869-3658 ; Fax: 042-864-3658

E-mail: kysik@kaist.ac.kr

* 정회원·세종대학교 토목환경공학과 조교수

** 정회원·경원대학교 산업환경대학원 부교수

*** 정회원·한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적으로 복합제어 시스템이란 수동과 능동제어 장치를 결합한 시스템이다. 이 시스템은 다중의 제어장치로 인해 각 제어장치만을 사용했을 때 발생할 수 있는 문제점이나 제한사항을 어느 정도 완화시킬 수 있다. 따라서 높은 제어 성능을 확보할 수 있다. 또한 복합제어 시스템은 전력원의 파괴 시에도 수동제어 장치로 인해 제어성능을 발휘하기 때문에 순수 능동제어 시스템에 비해 신뢰성이 높다.

현재까지 40여개의 건물과 시공 중에 10여개의 교량에 진동제어 시스템이 적용되었다(Spencer 등, 2003). 복합 질량감쇠기(hybrid mass damper)는 토목구조물에 적용된 일반적인 복합제어 시스템이다. 복합질량감쇠기는 동조 질량감쇠기(tuned mass damper)와 능동제어 장치가 결합된 시스템이다. 이 장치는 많은 사장교와 현수교의 시공 중에 진동을 제어하기 위해 사용되었다(Rainbow교, Tsurumi 교, Hakucho교, Akashi Kaikyo교 등). 복합질량감쇠기는 동조질량감쇠기의 기본거동에 의해 구조물의 응답을 감소시키고 추가적인 능동제어력으로 인해 제어효율성을 향상시킨 것이다. 또 다른 형태의 복합제어 시스템에는 지진격리장치(base isolation device)와 능동제어장치를 결합한 능동지진격리시스템(active base isolation system)이 있다. 지진격리장치는 간단하고 신뢰성이 뛰어나며 효과적이기 때문에 건물과 일반교량에 많이 적용되어 왔다. Kelly (1982 ; 1986)는 이러한 능동지진격리시스템의 기반이 되는 지진격리장치에 관한 많은 연구내용을 정리하였다. 능동 지진격리장치는 지진격리장치의 변형을 줄이면서 구조물에 전달되는 지진력을 감소시키는 역할을 한다.

사장교는 구조적인 효율성이나 경제성 등으로 인하여 세계적으로 건설이 증가하고 있다. 하지만 이러한 사장교는 낮은 구조감쇠를 갖는 매우 유연한 구조물이기 때문에 지진과 같은 동적하중에 매우 취약하다. 사장교의 주탑과 상판의 연결형태는 사장교의 시공 전후의 진동제어에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 과거에는 주로 상부구조물을 지진하중으로부터 격리시켜 교량에 전달되는 지진력을 최소화하기 위해 케이블(cable)로 상판을 지지하는 방법을 사용하였다(Ali 등, 1995). 하지만 사용하중이나 동적하중에서 상판변위가 크게 발생하는 문제점이 있었다. 따라서 많은 연구자들은 상판과 주탑의 연결형태에 관해 연구하였다. 예를 들어 탄성 케이블 감쇠기(Takahashi 등, 1984), 스프링 슈(spring shoe, PWRI, 1986) 펜듈럼 형태의 링크(short pendulum type link, Sakai 등, 1989), 날개(vane) 감쇠기(Kitazawa 등, 1991)등이 있다.

Park 등(2003)은 미국토목학회에서 제시한 지진하중을 받는 벤치마크(benchmark) 사장교(Dyke 등, 2003)를 이용해 납고무받침(lead rubber bearing)과 유압식 가력기(hydraulic actuator)를 결합한 복합제어 시스템의 적용 가능성을 조사하였다. 또한 박규식 등(2003)은 같은 시스템의 강인성을 조사하였으나, 이때 사용된 납고무받침은 선형모델을 사용하였다. 납고무받침의 비선형 모델을 사용한 복합제어 시스템의 강인성 해석결과 구조물의 강성행렬의 불확실성에 대해서 강인성을 확보하지 못하는 결과를 나타냈다(정형조 등, 2004). 따라서 본 연구는 복합제어 시스템에 사용된 능동제어 장치에 on-off 형태의 LQG 제어 알고리즘을 적용하여 전체 시스템의 강인성을 향상시키는데 그 목적이 있다. 제안된 제어 알고리즘을 이용한 복합제어 시스템의 제어성능은 최대제어력이나 평균제어력에 기초해 수동, 능동, 반능동 및 LQG 알고리즘만을 사용한 성능에 초점을 둔 기존 복합제어 시스템과 비교하였으며 구조물의 강성행렬의 불확실성에 따른 강인성을 능동, 반능동 및 기존 복합제어 시스템과 비교하였다.

2. 복합제어 시스템

2.1 제어장치 및 센서(sensor)

납고무받침을 복합제어 시스템의 수동제어 부분에 사용하였다. 납고무받침의 주된 기능은 격리된 구조물의 고유주기를 증가시켜 지진하중의 주된 에너지를 피하는 것이다. 하지만 사장교는 지진에너지가 집중되지 않은 영역으로 이미 고유주기가 증가된 장주기 구조물이다. 그럼에도 불구하고 Ali 등(1995)은 납고무받침의 에너지 소산능력에 의해 적절한 설계와 위치에 따라 구조물에 전달되는 지진에너지를 상당히 감소시킬 수 있음을 보였다. 하지만 납고무받침의 납이 항복한 후 상판변위가 크게 발생하는 문제점이 있었다. 이러한 증가된 상판변위(납고무받침의 변형량)는 추가적인 수동감쇠기나 능동제어장치로 감소시킬 수 있다.

납고무받침의 설계는 Ali 등(1995)이 제안한 방법을 사용하였다. 이때 설계과정에서 납의 전단항복강도는 납고무받침이 부담하는 상판무게의 10%를 사용하였으며, 교대와 교각에 사용된 납고무받침의 소성강도 비는 1로 가정하였다. 설계과정을 통해 각 교대와 교각에 6개씩 총 24개의 납고무받침이 교량에 설치되었다(그림 1(b) 참고). 설계된 납고무받침의 물성치는 표 1과 같으며, 비선형거동을 묘사하기 위해 Bouc Wen모델(Bouc, 1967 ; Wen, 1976)을 사용하였다. 각 납고무받침의 제어력은 식 (1)과 같다.

$$f_{LRB}(x_r, \dot{x}_r) = \alpha k_e x_r + (1 - \alpha) k_e D_y \dot{y} \quad (1)$$

여기서 k_e 와 α 는 탄성강성과 탄성강성이 복원력에 미치는 영향을 나타낸 계수이며, x_r 과 \dot{x}_r 은 각각 납고무받침의 상대변위와 상대속도이다. 그리고 D_y 와 y 는 각각 납의 항복변위와 다음의 비선형 미분방정식을 만족하는 변수이다.

$$\dot{y} = \frac{1}{D_y} (A_i \dot{x}_r - \gamma |\dot{x}_r| |y|^{n-1} y - \beta \dot{x}_r |y|^n) \quad (2)$$

여기서, A_i , r , β , n 은 납고무받침의 이력거동에 관련된 변수로서 본 연구에서는 $A_i = n = 1$ 과 $r = \beta = 0.5$ 를 사용하였다. 최종적으로 수동제어력은 식 (3)과 같다.

$$f_{passive} = G_{LRB} f_{LRB} = 3I_{8 \times 8} f_{LRB} \quad (3)$$

여기서, G_{LRB} 는 납고무받침의 개수를 나타내는 이득행렬 (gain matrix)이다.

표 1 납고무받침의 물성치

물 성 치	값
탄성강성, $k_e (N/m)$	3.571×10^7
소성강성, $k_p (N/m)$	3.139×10^6
납의 항복변위, $D_y (cm)$	0.765
납의 전단항복강도, $Q_d (kg)$	2.540×10^4

능동제어 장치로는 벤치마크 문제(Dyke 등, 2003)에서 사용된 총 24개의 유압식 가력기를 사용하였다. 교각 2와 3에는 각각 8개의 유압식 가력기가, 교대 1과 교각 4에는 각각 4개의 유압식 가력기가 각각 설치되었다(그림 1(b) 참고). 유압식 가력기의 동역학은 무시하였으며, 각각 1,000 kN의 용량을 가진다고 가정하였다. 유압식 가력기의 용량이나 개수에 따라 제어성능의 변화가 있으나 본 연구에서는

이러한 제어장치의 최적 개수나 용량에 관해서는 고려하지 않았다. 유압식 가력기에 의한 능동제어력은 다음 식들과 같다.

$$f_{active} = G_{HA} f_{HA} = \begin{bmatrix} 2I_{2 \times 2} & 0 & 0 \\ 0 & 4I_{4 \times 4} & 0 \\ 0 & 0 & 2I_{2 \times 2} \end{bmatrix} f_{HA} \quad (4)$$

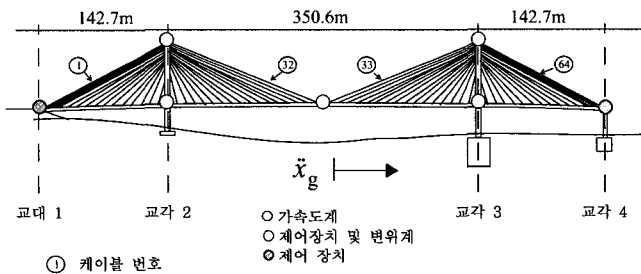
$$f_{HA} = D_{HA} u = D_{HA} I_{8 \times 8} u \quad (5)$$

여기서, G_{HA} 는 유압식 가력기의 개수를 나타내는 이득행렬, D_{HA} 는 제어력과 입력전압과의 관계를 나타내는 이득, 그리고 u 는 제어알고리즘을 통해 결정되는 볼트(volt) 단위의 제어명령이다. 디지털/아날로그 변환기(D/A converter)의 작동범위를 ± 10 볼트로 가정하였기 때문에 D_{HA} 는 100 kN/V이다(10볼트=1,000kN).

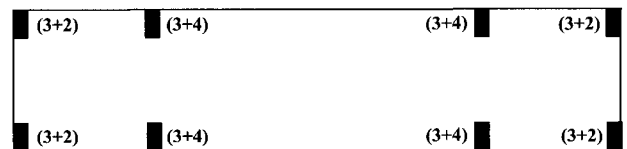
제어알고리즘의 되먹임(feedback)을 위해 5개의 가속도계와 4개의 변위계를 사용하였다(그림 1(a) 참고). 4개의 가속도계는 주탑 꼭대기에 그리고 1개의 가속도계는 중앙상판에 설치하였고, 교각 2와 3에 각각 2개씩의 변위계가 설치되었다. 모든 센서는 교축방향의 응답을 측정하며 센서의 고유주파수가 교량의 최고 고유주파수 보다 10배 이상 높다고 가정하였기 때문에 센서의 동역학은 무시하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_s = D_s y_m + v \quad (6)$$

여기서, y_s 는 볼트단위로 측정된 절대가속도와 변위벡터, y_m 은 물리적 단위를 갖는 측정된 절대가속도와 변위벡터이고 v 는 측정잡음이다. 측정잡음은 아날로그/디지털 변환기(A/D converter)의 작동범위의 0.03%에 해당하는 RMS (Root Mean Square) 값으로 0.003볼트를 고려하였다. 센서 이득행렬 D_s 는 다음 식과 같다.



(a) 제어장치 및 센서의 위치



(b) 제어장치 배치도(납고무받침+유압식 가력기)

그림 1 Bill Emerson Memorial 교와 제어장치 및 센서의 위치

$$D_s = \begin{bmatrix} G_a I_{5 \times 5} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & G_d I_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, G_a 는 가속도계에 대한 이득이고 G_d 는 변위계에 대한 이득이다. 아날로그/디지털 변환기의 범위안에 있도록 가속도계와 변위계의 민감도는 각각 $7V/g$ ($7볼트=9.81 m/s^2$)와 $30.30 V/m$ ($10볼트=0.33m$)를 사용하였다.

2.2 제어알고리즘

2.2.1 LQG 알고리즘(1차 제어기)

수치적 효율성을 위해 제어기 설계시 축소차수 모델이 사용되었다. 이 모델은 평가모델로부터 구해지며 30개의 상태(state)를 가진다. 축소과정은 상대적으로 작은 가제어성 그래미안(controllability grammian)과 가관측성 그래미안(observability grammian)을 응축하여 균형실현(balanced realization)을 통해 구성되었다(Laud 등, 1987). 최종적인 상태공간시스템(state space system)은 다음 식들과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}}_d = \mathbf{A}_d \mathbf{x}_d + \mathbf{B}_d \mathbf{f}_{active} + \mathbf{B}_d \mathbf{f}_{passive} + \mathbf{E}_d \ddot{\mathbf{x}}_g \quad (8)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}_d^z \mathbf{x}_d + \mathbf{D}_d^z \mathbf{f}_{active} + \mathbf{F}_d^z \ddot{\mathbf{x}}_g \quad (9)$$

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{D}_s (\mathbf{C}_d^y \mathbf{x}_d + \mathbf{D}_d^y \mathbf{f}_{active} + \mathbf{F}_d^y \ddot{\mathbf{x}}_g) + \mathbf{v} \quad (10)$$

여기서, \mathbf{x}_d 는 설계 상태벡터, $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 는 지반가속도, $\mathbf{A}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{E}_d$ 는 시스템행렬, \mathbf{z} 는 사상행렬(mapping matrix) $\mathbf{C}_d^z, \mathbf{D}_d^z, \mathbf{F}_d^z$ 를 통해 얻어지는 평가출력값을 포함한 제어된 응답벡터이

다. 유사하게 잡음을 포함함 측정치, \mathbf{y}_s 는 사상행렬 $\mathbf{C}_d^y, \mathbf{D}_d^y, \mathbf{F}_d^y$ 를 통해 구해진다.

본 연구에서는 1차 제어기로 LQG 알고리즘을 사용하였다. 이때 사용된 비용함수(cost function)는 다음 식과 같다.

$$J = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} E \left[\int_0^{\tau} \left\{ (\mathbf{C}_d^z \mathbf{x}_d + \mathbf{D} \mathbf{u})^T \mathbf{Q} (\mathbf{C}_d^z \mathbf{x}_d + \mathbf{D} \mathbf{u}) + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} \right\} dt \right] \quad (11)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{D}_d^z \mathbf{G}_{HA} \mathbf{D}_{HA} \mathbf{I}_{8 \times 8} \quad (12)$$

여기서, \mathbf{R} 은 제어력 가중행렬로서 8차의 단위행렬이고 \mathbf{Q} 는 응답 가중행렬이다. LQG 알고리즘과 같은 최적제어 알고리즘에서 제어성능의 향상을 위해서는 적절한 응답 가중행렬의 선택이 매우 중요하다. 본 연구에서는 최대응답접근방식(Park 등, 2002 ; 2003)을 다음과 같이 사용하였다. i) 표 2에 주어진 응답과 같이 전체 교량의 응답을 효과적으로 나타낼 수 있는 대표응답을 선택한다; ii) 다양한 가중변수를 변화시켜 가면서 수치해석을 통해 가장 좋은 결과를 주는 가중변수 2개를 선택한다. 이때 해석결과는 능동제어 시스템의 경우 제어하지 않은 경우의 결과로, 복합제어 시스템의 경우 수동 제어된 경우의 결과로 정규화한다; iii) 전 단계에서 선택된 2개의 가중변수를 동시에 변화시켜 가면서 3차원 해석을 통해 최종적인 응답가중행렬을 구한다. 이때 사용된 입력지진은 벤치마크 문제에서 주어진 3개의 지진을 사용했으며 3개의 지진에 대한 결과 중 구조물의 최대응답을 최소화하는 응답 가중행렬을 선택했다. 이때 비선형 면진장치의 강성은 시스템 행렬 \mathbf{A}_d 에 고려하지 않고 식 (8)과 같이 납고무반침에 의해 발생하는 에너지 소산력을 외부

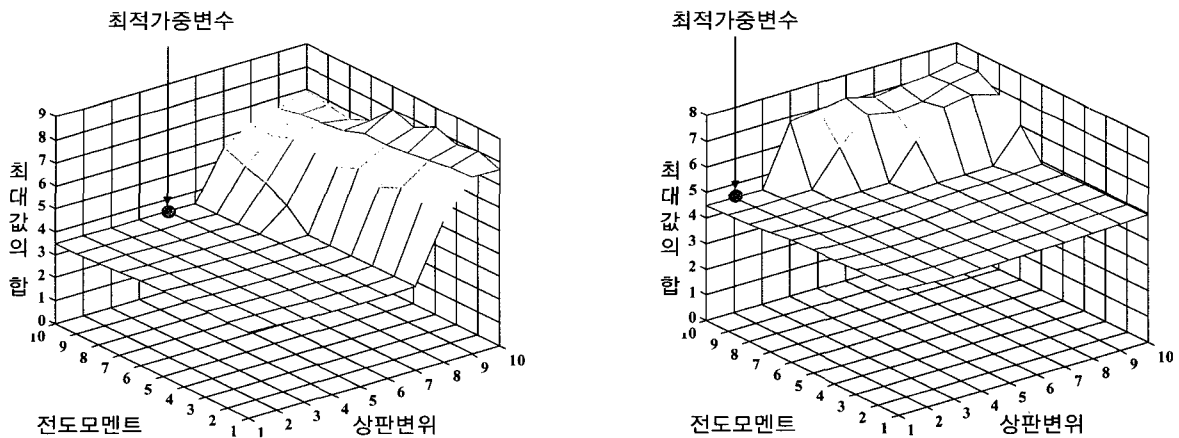


그림 2 선택된 2개의 가중변수에 대한 3차원 해석

입력으로 가정하였다. 따라서 최대응답접근방식을 사용할 때 시스템 행렬 A_d 에 납고무받침의 강성을 포함시키지 않은 상태에서 구한 LQG 제어 이득을 이용하여 구조물의 최대응답을 최소화시키는 응답 가중행렬을 구하였다. 그림 2는 능동과 복합제어 시스템의 응답가중행렬을 결정하기 위한 3차원 해석을 나타낸 것이다.

표 2 최적응답가중행렬 선택을 위한 응답

응답	가중변수
교각 2와 3의 밑면 전단력	q_{bs}
교각 2와 3의 상판에서의 전단력	q_{sd}
교각 2와 3의 전도모멘트	q_{om}
교각 2와 3의 상판에서의 모멘트	q_{md}
교대 1과 교각 4의 상판변위	q_{dd}
주탑 1과 2의 꼭대기 변위	q_{td}

이렇게 함으로써 비선형으로 모델링 된 납고무받침의 에너지 소산력의 영향을 고려해 선택된 최적의 응답 가중행렬은 다음과 같다.

$$Q_{om_dd} = \begin{bmatrix} q_{om} \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & q_{dd} \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}, \quad q_{om} = 5 \times 10^{-9}, q_{dd} = 9 \times 10^3$$

(능동제어 시스템)

$$Q_{om_dd} = \begin{bmatrix} q_{om} \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & q_{dd} \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}, \quad q_{om} = 5 \times 10^{-9}, q_{dd} = 2 \times 10^3$$

(복합제어 시스템)

2.2.2 On-Off 알고리즘(2차 제어기)

복합제어 시스템에서 능동제어력은 수동제어 장치만으로

는 부족한 제어성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 수치모델과 실제교량과의 차이 등과 같은 불확실성 때문에 발생하는 능동제어 신호의 오차로 인하여 전체 시스템의 강인성에 문제가 발생할 수 있다(정형조 등, 2004). 따라서 납고무받침의 응답에 따라 유압식 가력기를 on-off 시키는 2차 제어기를 LQG 알고리즘과 결합하였다.

본 연구에서 사용된 복합제어 시스템의 납고무받침을 기반으로 하기 때문에 유압식 가력기의 on-off 조건을 결정하기 위해 표 3과 같은 납고무받침의 응답을 고려하였다.

표 3 유압식 가력기의 on-off 조건을 결정하기 위한 납고무받침의 응답

납고무받침의 응답	상대변위 (m)	상대속도 (m/sec)	상대가속도 (m/sec ²)
유압식 가력기의 작동 조건	$ (x_r)_{LRB} \geq 0.005$	$ \dot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.02$	$ \ddot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.3$
	$ (x_r)_{LRB} \geq 0.010$	$ \dot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.03$	$ \ddot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.4$
	$ (x_r)_{LRB} \geq 0.020$	$ \dot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.04$	$ \ddot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.5$
	$ (x_r)_{LRB} \geq 0.040$	$ \dot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.05$	$ \ddot{(x_r)_{LRB}} \geq 0.6$

그림 3~5는 on-off 조건식에 따른 3개 지진에 대한 최대 평가기준과 구조물의 강성행렬에 $\pm 7\%$ 의 불확실성이 있을 때 3개 지진에 대한 평가기준의 최대변화율을 나타낸 것이다. 그림에서 평가기준 J1~J11은 최대/평균 밑면 전단력(J1/J7), 최대/평균 상판에서의 전단력(J2/J8), 최대/평균 전도모멘트(J3/J9), 최대/평균 상판에서의 모멘트(J4/J10), 최대/평균 케이블 인장력(J5/J11) 그리고 교대 1과 교각 4에서의 최대상판변위(J6)로서 각 지진에 대해 제어하지 않은 경우(충격전달장치가 설치된 경우)의 결과로 정규화 된 것이다.

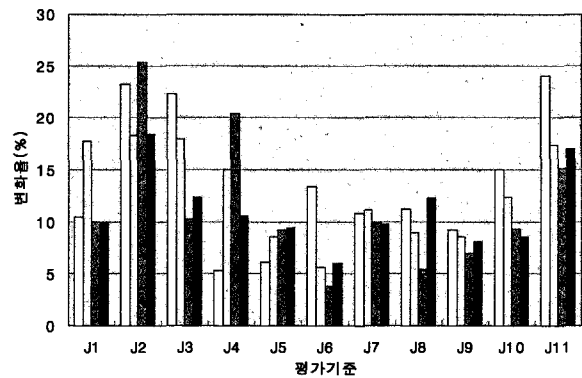
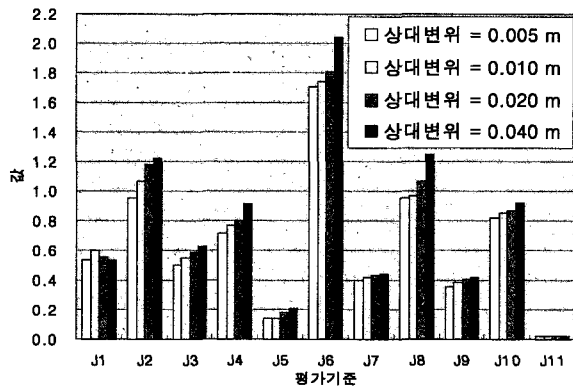


그림 3 상대변위 조건식에 따른 제어시스템의 성능 및 강인성 변화

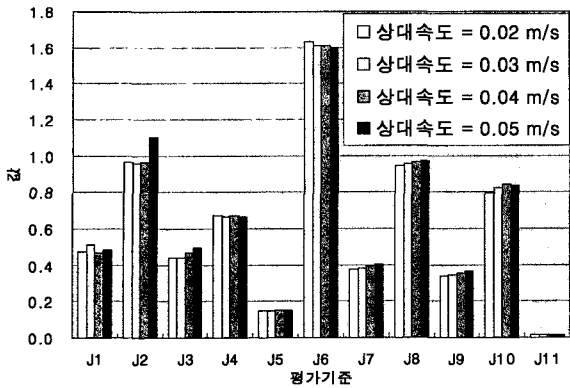


그림 4 상대속도 조건식에 따른 제어시스템의 성능 및 강인성 변화

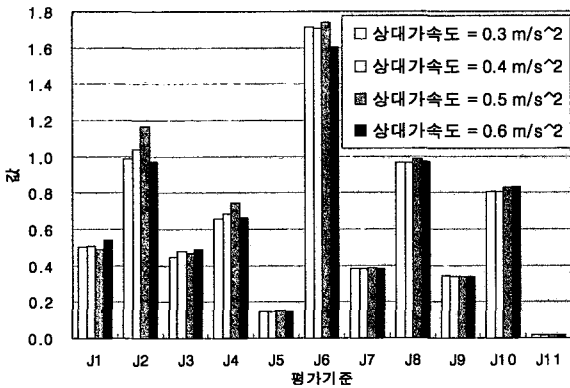
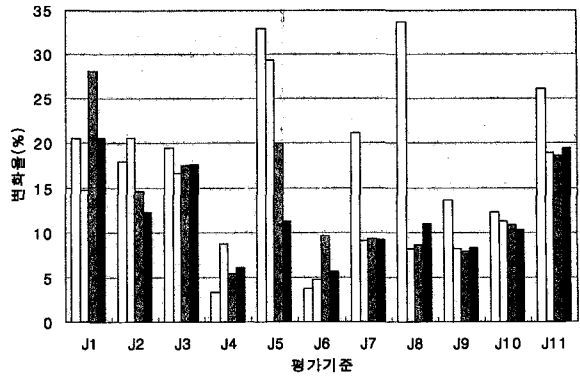
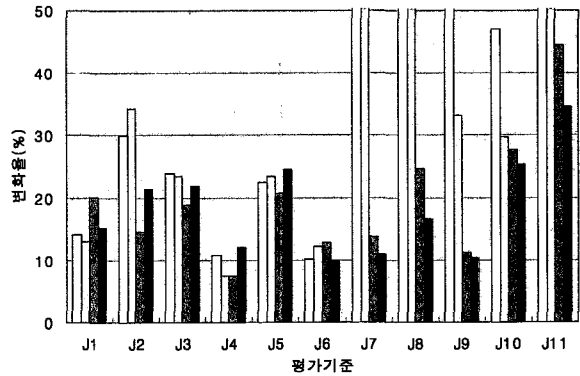


그림 5 상대가속도 조건식에 따른 제어시스템의 성능 및 강인성 변화



납고무받침의 상대변위를 유압식 가력기의 on-off 조건식으로 사용한 경우 그림 3(a)와 같이 제어성능은 상대변위가 증가할수록 저하됨을 알 수 있다. 이때 강인성에서는 특별한 경향을 찾기 어렵지만 몇몇 경우를 제외하고는 유사한 강인성을 나타냈다. 상대속도를 on-off 조건식으로 사용한 경우 제어성능은 큰 변화를 나타내지 않은 반면 강인성에서는 0.02m/sec와 0.03m/sec를 사용한 경우, 나머지 두 경우에 비해 강인성이 떨어졌다. 마지막으로 상대가속도를 on-off 조건식으로 사용한 경우 상대속도 조건식과 유사하게 제어성능에는 큰 변화가 없지만 0.3m/sec²과 0.4 m/sec²을 사용한 경우 강인성이 현저히 떨어졌다(평가기준의 최대변화율이 100%이상임). 그림 3~5를 비교해 볼 때 상대변위와 상대속도 조건식이 상대가속도 조건식에 비해 제어성능과 강인성 면에서 더 좋은 결과를 보이고 있다. 따라서 상대변위와 상대속도를 결합하여 유압식 가력기의 on-off 조건식을 결정하였다. 상대변위와 상대속도는 위상차를 가지고 있어 그림 6에서 보듯이 외부하중이 클 경우에는 일반적인 복합제어 시스템과 같이 유압식 가력기의 작동시간이 많기 때문에 유사한 제어성능을 발휘할 수 있다. 반면

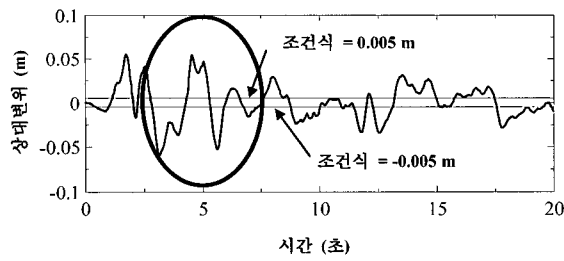
복합제어 시스템에서 문제가 되는 지진 후반부의 응답(정형 조 등, 2004)에서 유압식 가력기를 정지시킴으로써 강인성 향상을 기대할 수 있다.

그림 6에서 f_a 는 유압식 가력기의 제어력, $(f_a)_c$ 는 작동 조건식을 적용하기 전의 계산된 유압식 가력기의 제어력이다. 위와 같은 과정을 통해 최종적으로 결정된 유압식 가력기의 작동조건은 다음과 같다.

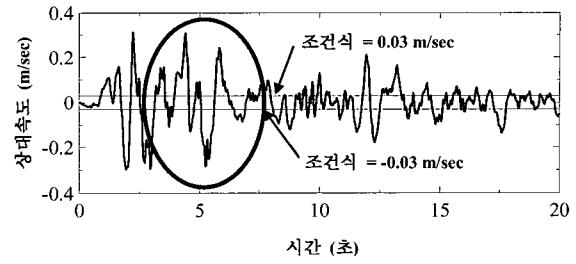
$$f_{HA,i} = \begin{cases} (f_{HA,i})_c, & |(\dot{x}_r)_{LRB,i}| \geq 0.03 \text{ m/s}^2 \text{ or } |(x_r)_{LRB,i}| \geq 0.005 \text{ m} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

여기서, $f_{HA,i}$ 는 i번째 유압식 가력기의 제어력, $(f_{HA,i})_c$ 는 계산된 제어력, $|(\dot{x}_r)_{LRB,i}|$ 와 $|(\ddot{x}_r)_{LRB,i}|$ 는 각각 i번째 납고무받침의 상대속도와 상대변위의 절대값이다. 작동조건이 작으면 작을수록 LQG 알고리즘만을 사용한 제어기에 가까워진다(즉, 능동제어 장치가 납고무받침의 응답에 관계없이 항상 작동함).

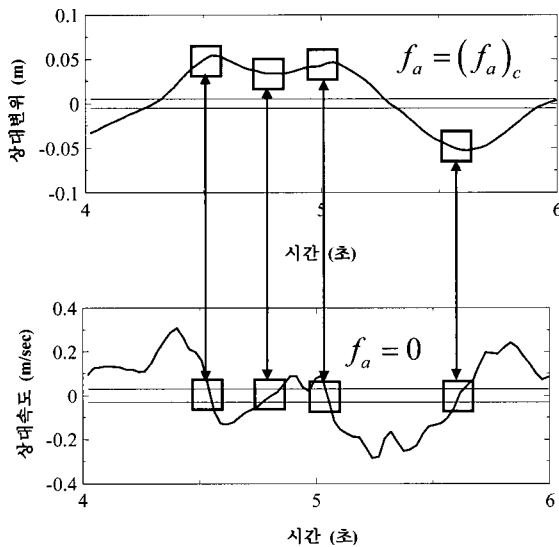
1차 제어기인 LQG 알고리즘에서 제어성능과 관련된 응



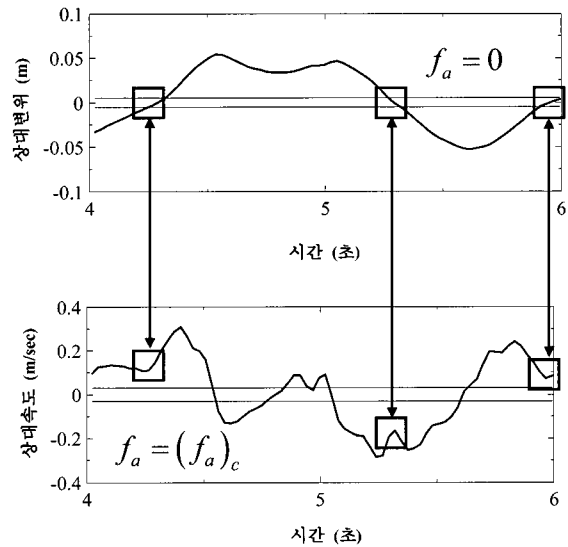
(a) 남고무발침의 상대변위 및 조건식



(b) 남고무발침의 상대속도 및 조건식



(c) 상대변위 조건식에 의해 발생하는 능동제어력



(d) 상대속도 조건식에 의해 발생하는 능동제어력

그림 6 El Centro 지진에서 상대변위와 상대속도 조건식에 따른 교각 2에 설치된 유압식 가력기의 제어력

답 가중행렬과 2차 제어기에서 강인성과 관련된 on-off 조건식은 구조물의 형태나 입력지진에 따라 달라질 수 있다. 그러나 구조물의 최대응답을 최소화 시키는 최대응답접근방식과 제어기의 강인성을 향상시키기 위한 on-off 조건식을 구하는 앞의 과정을 따른다면 다른 구조물이나 다른 설계지진에 대해서도 응답 가중행렬과 on-off 조건식을 구할 수 있다. 이때 변화된 구조물이나 설계지진에 대해 2.2.1과 2.2.2에서 언급된 과정을 반복해야 한다.

3. 수치예제

3.1 교량모델

본 연구에서 사용된 교량은 사장교의 제어기법 개발을 위해 만들어진 벤치마크문제(Dyke 등, 2003)에서 사용된 Bill Emerson Memorial교이다. 이 교량은 2개의 주탑과 128개의 케이블, 그리고 12개의 추가적인 교각으로 구성되어 있다. 교량의 개략도는 그림 1(a)에 나타나 있다.

교량의 상세한 도면에 기초해 Dyke 등(2003)은 교량의 복잡한 거동을 잘 나타낼 수 있는 3차원 선형모델을 개발하였다. 선형모델에 사용된 강성행렬은 교량의 사하중하에서 ABAQUS®(ABAQUS®, 1996)로 비선형 정적해석을 통해 구성된 것이다(Wilson 등, 1991). 교량이 기반암에 건설되었기 때문에 지반 구조물 상호작용은 무시하였다. 지진 하중은 교축방향으로 모든 교각에서 동시에 가해진다고 가정하였다.

보요소, 케이블요소, 그리고 강결요소를 사용한 유한요소 모델은 많은 자유도를 포함하고 있다. 따라서 정적응축(static condensation)을 통해 419개의 자유도를 가지는 평가모델을 구성하였다. 구조물의 감쇠는 교량 설계시와 같은 가정사항인 각 모드(mode)에 3%의 감쇠비를 적용하였다. 교량의 원설계에서는 상판과 주탑의 연결부에 16개의 충격전달 장치(shock transmission unit)를 설치하였는데 이 모델의 처음 10개의 비감쇠 고유주파수는 0.2899, 0.3699, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203Hz이다. 또한 이 모델은 제어

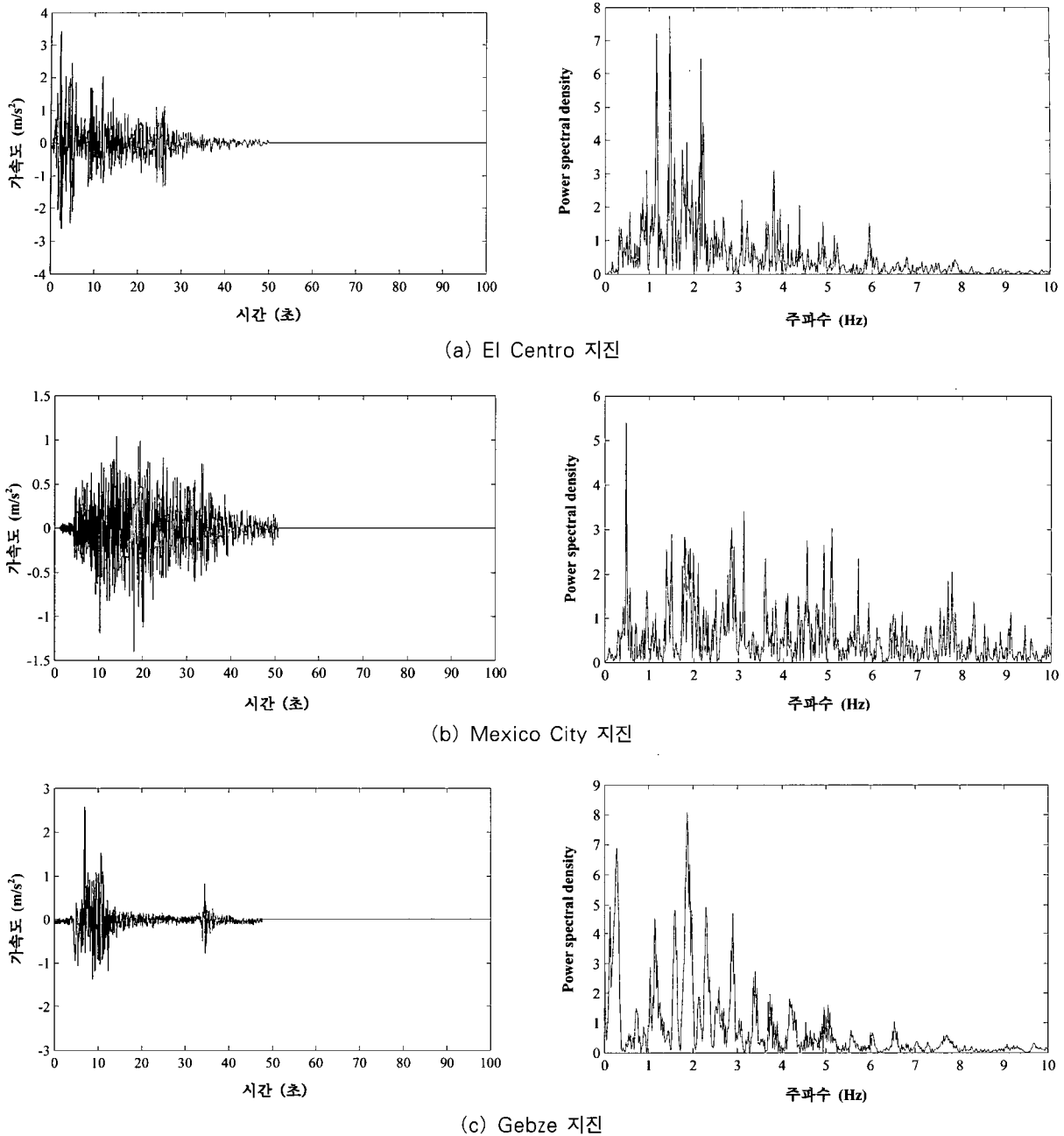


그림 7 입력지진의 가속도 시간이력곡선과 power spectral density

시스템이 설치된 경우와 비교하기 위한 기준으로 사용된다. 이와 반대로 교축방향으로 거동하는 제어장치를 설치하기 위해 상판과 주탑 연결부의 충격전달 장치를 제거한 또 다른 평가모델의 처음 10개의 비감쇠 고유주파수는 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7904Hz이다.

El Centro지진(1940), Mexico City지진(1985), 그리고 Gebze지진(1999)에서 제어시스템의 성능을 평가하기 위해 MATLAB[®](MATLAB[®], 1997)을 이용하여 수치해

석을 수행하였다. Mexico City지진은 교량이 건설된 지역이 Mexico City지역과 유사하기 때문에 고려하였고 나머지 2개의 지진은 다른 특성을 가진 지진에서 제어시스템의 성능을 평가하기 위해 고려하였다. 3개 지진 모두 설계 지반 가속도 0.36g이하의 최대지반가속도를 가진다. 그림 7은 입력지진의 가속도 시간이력곡선과 멱스펙트럼밀도(power spectral density)를 나타낸 것이다.

지진하중을 받는 사장교의 경우 중요한 응답은 사용성 보다는 구조물의 파괴에 관련된 것들이다. 이러한 응답 중 가

장 중요한 것은 상판높이의 전단력과 모멘트, 주탑지지부의 모멘트이다. 일반적으로 수직방향의 변위는 중요하지 않지만 교축방향으로는 주탑과 상판이 분리되는 것을 방지하기 위해 벤치마크 사장교의 교대 1과 교각 4에서 변위가 30 cm 이상 발생하면 안 된다(Turan, 2001). 이와 같은 응답을 포함하여 각 연구자들이 제안한 제어시스템의 성능을 공정하게 평가하기 위한 18개의 평가기준이 벤치마크 문제에 제시되었다. 2.2.2에서 설명한 11개의 평가기준 외에 최대 제어력(J₁₂), 최대 stroke(J₁₃), 최대순간전력(J₁₄), 최대총 전력(J₁₅), 제어장치개수(J₁₆), 센서개수(J₁₇), 그리고 제어 알고리즘에 사용된 상태개수(J₁₈)는 제어시스템에 관련된 기준이다. 교량모델, 평가기준 등을 포함한 벤치마크 문제에 대한 자세한 설명은 Dyke 등(2003)의 논문에 제시되어 있다.

3.2 해석결과

3.2.1 제어성능

그림 8은 교각 2에서의 제어하지 않은 경우와 제안된 시스템으로 제어된 경우의 밀면 전단력을 나타낸 것이다. 시간응답 그림에서 보듯이 복합제어된 경우의 밀면 전단력이 제어하지 않은 경우보다 상당히 감소한 것을 알 수 있다. 주파수응답 그림을 보면 제어된 응답이 저주파수 영역(주파수 3rad/sec)에서는 낮은 진폭을 보이고, 특히 중간주파수 영역($3\text{rad/sec} \leq \text{주파수} < 10\text{rad/sec}</math>)에서는 원으로 표시된 부분과 같이 최대진폭이 상당히 많이 감소한 것을 알 수 있다.$

· 표 4~6은 각 지진에 대해 구조물의 응답과 관련된 11개

표 4 El Centro 지진에서의 평가기준 및 제어력

평가기준	수동제어	능동제어	복합제어 1	복합제어 2
J ₁ : 최대밀면전단력	0.3967	0.2678	0.2671	0.2663
J ₂ : 최대상판높이의전단력	1.1846	0.7923	0.7225	0.7243
J ₃ : 최대전도모멘트	0.3054	0.2547	0.2379	0.2374
J ₄ : 최대상판높이의모멘트	0.6077	0.4668	0.3763	0.3756
J ₅ : 최대케이블인장력변화	0.2077	0.1477	0.1433	0.1428
J ₆ : 최대상판변위	1.4250	0.9721	0.7380	0.7295
J ₇ : 평균밀면전단력	0.2304	0.1988	0.1996	0.2016
J ₈ : 평균상판높이의전단력	1.0909	0.7238	0.6821	0.6820
J ₉ : 평균전도모멘트	0.2473	0.1960	0.1916	0.1948
J ₁₀ : 평균상판높이의모멘트	0.7128	0.5082	0.4740	0.4707
J ₁₁ : 평균케이블인장력변화	2.2327e-2	1.6365e-2	1.7067e-2	1.6776e-2
최대제어력 (kN)	685	1000	LRB: 466 HA: 1000 LRB+HA: 1338	LRB: 468 HA: 1000 LRB+HA: 1338
평균제어력 (kN)	105	142	LRB: 90 HA: 108 LRB+HA: 120	LRB: 94 HA: 105 LRB+HA: 113

표 5 Mexico City 지진에서의 평가기준 및 제어력

평가기준	수동제어	능동제어	복합제어 1	복합제어 2
J ₁ : 최대밀면전단력	0.5459	0.4900	0.4854	0.4607
J ₂ : 최대상판높이의전단력	1.1097	0.9362	0.9183	0.9157
J ₃ : 최대전도모멘트	0.6188	0.4528	0.4427	0.4395
J ₄ : 최대상판높이의모멘트	0.4468	0.4151	0.3417	0.3406
J ₅ : 최대케이블인장력변화	4.8766e-2	4.4131e-2	4.6737e-2	4.2323e-2
J ₆ : 최대상판변위	2.0197	1.6496	1.0576	1.0829
J ₇ : 평균밀면전단력	0.4211	0.3758	0.3770	0.3762
J ₈ : 평균상판높이의전단력	0.9634	0.8088	0.7469	0.7457
J ₉ : 평균전도모멘트	0.3989	0.3509	0.3375	0.3378
J ₁₀ : 평균상판높이의모멘트	0.6536	0.6910	0.5081	0.4979
J ₁₁ : 평균케이블인장력변화	5.1805e-3	6.2950e-3	5.9365e-3	5.5744e-3
최대제어력 (kN)	396	641	LRB: 325 HA: 418 LRB+HA: 582	LRB: 325 HA: 411 LRB+HA: 600
평균제어력 (kN)	85	74	LRB: 68 HA: 52 LRB+HA: 79	LRB: 70 HA: 45 LRB+HA: 73

표 6 Gebze 지진에서의 평가기준 및 제어력

평가기준	수동제어	능동제어	복합제어 1	복합제어 2
J_1 : 최대벌면전단력	0.4230	0.4128	0.3767	0.3756
J_2 : 최대상관높이의전단력	1.4616	1.1468	0.9214	0.9250
J_3 : 최대전도모멘트	0.5012	0.3391	0.2771	0.2768
J_4 : 최대상관높이의모멘트	1.2656	0.8801	0.6558	0.6546
J_5 : 최대케이블인장력변화	0.1589	0.0908	0.0914	0.0914
J_6 : 최대상관변위	3.8289	1.8356	1.5532	1.5598
J_7 : 평균벌면전단력	0.3340	0.2928	0.2785	0.2807
J_8 : 평균상관높이의전단력	1.5502	0.9657	0.8986	0.9035
J_9 : 평균전도모멘트	0.4815	0.3470	0.3209	0.3256
J_{10} : 평균상관높이의모멘트	1.4429	0.7809	0.7277	0.7503
J_{11} : 평균케이블인장력변화	1.7129e-2	9.1631e-3	9.3642e-3	9.0869e-3
최대제어력 (kN)	1102	1000	LRB: 599 HA: 972 LRB+HA: 1324	LRB: 601 HA: 972 LRB+HA: 1323
평균제어력 (kN)	110	97	LRB: 70 HA: 63 LRB+HA: 84	LRB: 70 HA: 61 LRB+HA: 75

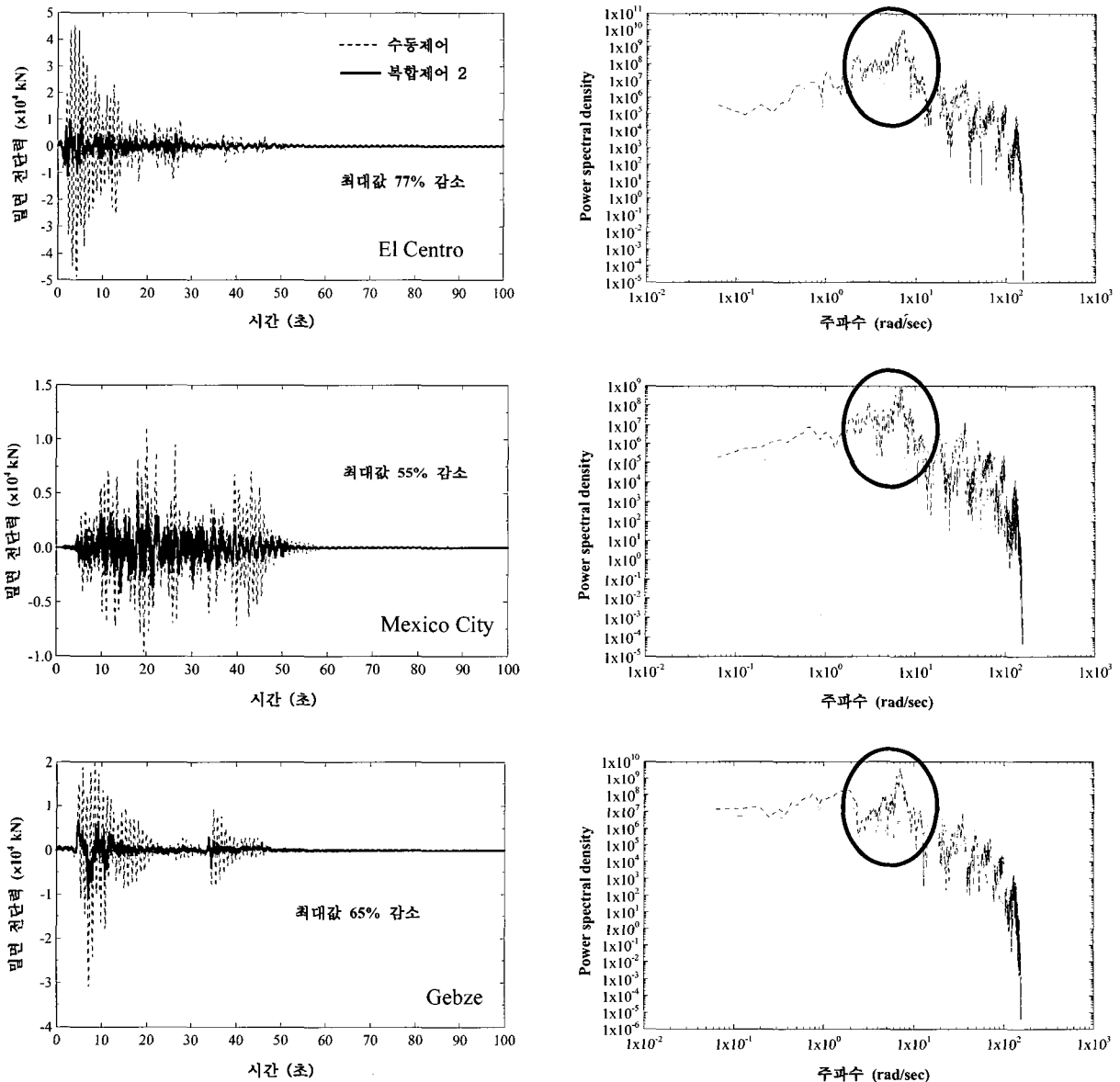


그림 8 교각 2에서의 제어하지 않은 경우와 복합제어된 경우의 벌면 전단력

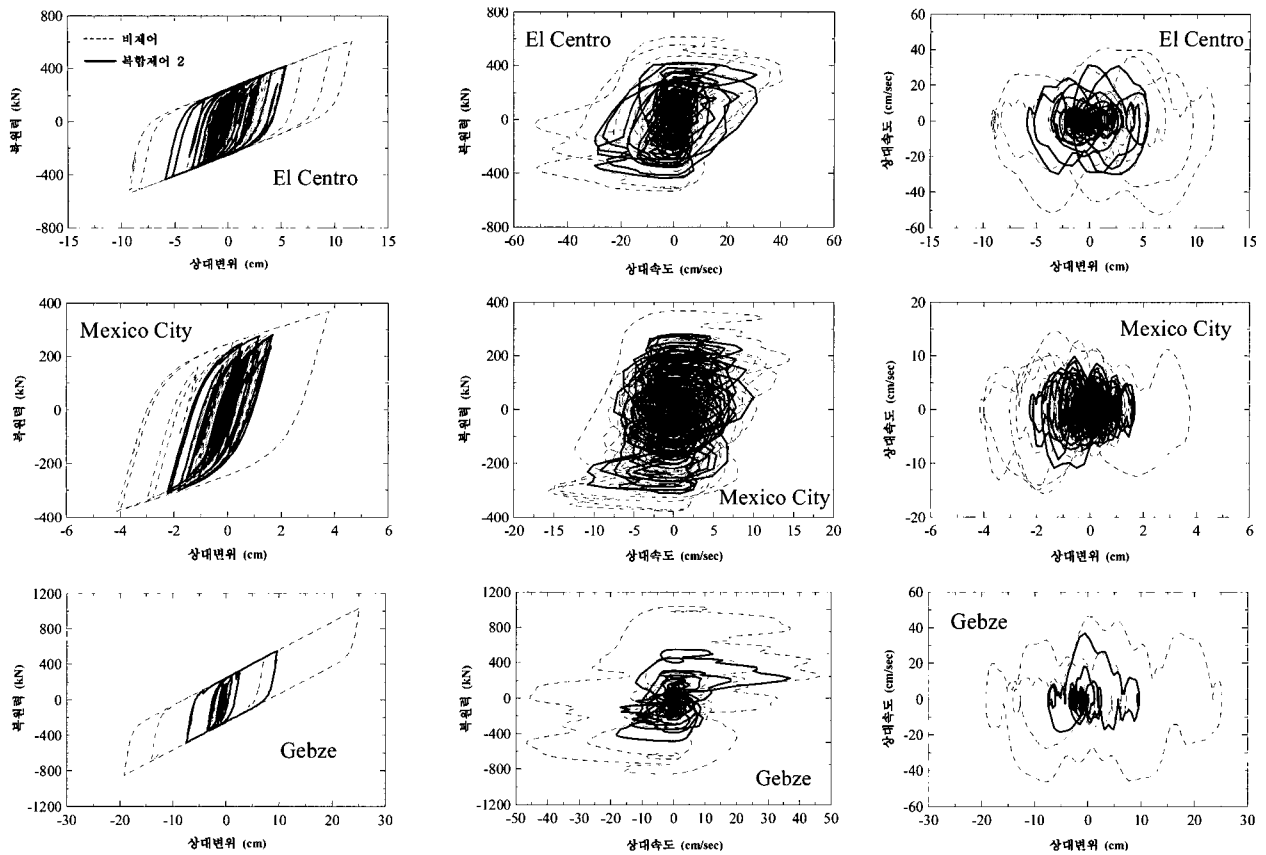


그림 9 교각 2에서의 납고무받침의 이력곡선

의 평가기준과 최대제어력 및 평균제어력(RMS of control force)을 나타낸 것이다. 표에서 수동제어는 24개의 납고무받침을 사용한 경우, 능동제어는 LQG 알고리즘으로 제어되는 24개의 유압식 가력기를 사용한 경우, 복합제어 1은 24개의 납고무받침과 LQG 알고리즘으로 제어되는 24개의 유압식 가력기를 사용한 경우, 그리고 복합제어 2는 24개의 납고무받침과 on-off 형태의 LQG 알고리즘으로 제어되는 24개의 유압식 가력기를 사용한 경우이다. 각 제어시스템은 제어용량이나 제어장치 개수가 다르기 때문에 제어성능을 직접적으로 비교하기는 어렵지만 각 제어시스템에서 발생하는 최대제어력과 평균제어력을 바탕으로 각 제어시스템의 제어성능을 비교해 보면 다음과 같다.

El Centro지진의 경우 표 4에서 보듯이 복합제어 1과 2가 가장 큰 최대제어력을 사용하는 것을 알 수 있다. 최대 제어력 비교 시 복합제어 2는 수동제어에 비해 약 95%, 능동제어에 비해 약 34%의 더 많은 제어력을 사용하고 있다. 하지만 평균제어력을 비교해 보면 복합제어 2는 수동제어에 비해 약 8% 더 많은 제어력을 사용했으나, 능동제어에 비

해서는 오히려 26%의 제어력을 덜 사용했고, 복합제어 1에 비해서도 6%의 제어력을 덜 사용했다. 이러한 제어력 사용량에 비해 평가기준은 최대응답($J_1 \sim J_8$)에서 수동제어에 비해 최대 49%(J_6), 능동제어에 비해 최대 25%(J_6)감소하였다. 또한 평균응답($J_7 \sim J_{11}$)에서는 수동제어에 비해 최대 37%(J_8) 감소하였고, 능동제어에 비해 최대 7%(J_{10})감소하였고, 2%(J_{11})증가하였다. 제어성능에 초점을 둔 복합제어 1과는 유사한 제어성능을 나타냈다. 최대지반가속도가 0.14g로서 다른 두 지진에 비해 약진인 Mexico City지진의 경우 수동제어를 제외한 나머지 시스템들은 비슷한 최대 제어력을 사용했으며, 평균제어력에서는 모든 제어 시스템이 비슷한 양을 사용했다. 하지만 복합제어 2의 평가기준은 최대응답에서 수동제어에 비해 최대 46%(J_6), 능동제어에 비해 최대 34%(J_6)감소하였고, 평균응답에서 수동제어에 비해 최대 24%(J_{10})감소하였고, 8%(J_{11})증가하였다. 능동제어에 비해서는 평균응답이 최대 28%(J_{10})감소하였다. 복합제어 1에 비해서는 최대응답에서 10%(J_5), 평균응답에서 7%(J_{11})가 감소한 반면 최대응답에서 2%(J_6)가 증가했을 뿐이다. 마지막으로 Gebze 지진에서 복합제어 2는 최대

표 7 3개의 지진에 대한 평가기준의 최대값

평가기준	수동제어	능동제어	RSASD**	복합제어 1	복합제어 2
J ₁	0.5459	0.4900	0.4856	0.4854	0.4607
J ₂	1.4616	1.1468	1.3536	0.9214	0.9250
J ₃	0.6188	0.4528	0.5539	0.4427	0.4395
J ₄	1.2656	0.8801	1.2199	0.6558	0.6546
J ₅	0.2077	0.1477	0.2176	0.1433	0.1428
J ₆	3.8289	1.8356	2.8227	1.5532	1.5598
J ₇	0.4211	0.3758*	0.4083	0.3770	0.3762
J ₈	1.5502	0.9657	1.4231	0.8986	0.9035
J ₉	0.4815	0.3509	0.4588	0.3375	0.3378
J ₁₀	1.4429	0.7809	1.5085	0.7277	0.7503
J ₁₁	2.2327e-2	1.6365e-2	0.0262	1.7067e-2	1.6776e-2
J ₁₂	2.1611e-3	1.9608e-3	0.0125	LRB: 1.1755e-3 HA: 1.9608e-3 LRB+HA: 2.6232e-3	LRB: 1.1785e-3 HA: 1.9608e-3 LRB+HA: 2.6228e-3
J ₁₃	2.0993	1.0064		0.8516	0.9204
J ₁₄		9.5725e-3		9.3492e-3	9.3063e-3
J ₁₅		9.0273e-4		1.1903e-3	1.1848e-3
J ₁₆	24	24		LRB+HA: 24+24	LRB+HA: 24+24
J ₁₇		9		9	9
J ₁₈		30		30	30

* J₁ ~ J₁₁의 굵은 글씨는 각 제어시스템 중 제어성능이 가장 뛰어난 것을 나타냄

** He 등, 2001

제어력에서는 수동제어와 능동제어에 비해 많은 제어력을 사용하고 있지만 평균제어력은 다른 제어 시스템에 비해 적은 제어력을 사용하고 있다. 이에 비해 평가기준은 최대 응답에서 수동제어에 비해 최대 59%(J₆)감소하였고, 능동제어에 비해 최대 26%(J₄)감소하였고, 1%(J₅)증가하였다. 평균응답에서는 수동제어에 비해 최대 48%(J₁₀), 능동제어에 비해 최대 6%(J₈)가 감소하였다. 그리고 복합제어 1과는 유사한 제어성능을 나타냈다.

이상에서 살펴본 바와 같이 주어진 3개의 지진하중을 받는 벤치마크 사장교에 대해 복합제어 2가 수동제어나 능동제어 시스템에 비해 좀더 큰 최대제어력을 사용했지만 그에 비해 최대응답의 감소가 현격하게 나타났으며, 전체 제어 시간 동안 사용되는 제어력인 평균제어력을 비교해 볼 때 적은 평균제어력으로 수동제어나 능동제어 시스템에 비해 더 많은 평균응답의 감소를 보였다. 또한 복합제어 1과는 비슷한 제어력을 사용하면서 유사한 제어성능을 나타냈다.

납고무받침만을 설치한 수동제어 시스템의 상관변위는 다른 제어 시스템에 비해 크게 나타났지만 허용범위(30cm, Turan, 2001)를 만족하고 있다. 또한 모든 제어 시스템에서 케이블의 인장력은 허용범위(Dyke 등, 2003)를 만족하

고 있다. 수동제어 시스템에서 증가된 상관변위(납고무받침의 변형량)는 복합제어 2에서 그림 9와 같이 추가적인 능동제어 장치로 인하여 상당히 감소하였다. 그림 9는 교각 2에서의 납고무받침의 이력곡선을 나타낸 것이다.

표 7은 3개 지진에 대해 18개의 평가기준의 최대값을 나타낸 것이다. 표에서 RSASD는 He 등(2001)에 의해 제안된 가변강성감쇠기(variable stiffness damper)로서 복합제어 시스템의 성능을 비교하기 위해 나타내었다. RSASD에 관한 자세한 사항은 He 등(2001)의 논문에서 나타나 있다.

3.2.2 제어기의 강인성

실제 교량이 건설되면 Dyke 등(2003)에 의해 제시된 수치모델과 다른 동적특성을 갖게 된다. 따라서 수치해석에서 좋은 제어성능을 보였을지라도 실제 교량에 적용되었을 때 제어성능이 보장되지 않을 수도 있다. 따라서 제어시스템의 실제 적용가능성을 살펴보기 위해 제어기의 강인성을 조사하였다. 본 연구에서는 구조물의 강성행렬에 일정한 불확실성을 준 상태에서 수치해석을 수행해 각 제어시스템의 강인성을 조사하였다.

강성행렬을 식 (14)와 같이 교란(perturbation)시킨 후 원래 모델에서 구성된 제어기를 가지고 수치해석을 수행하였다. 강성행렬이 식 (14)와 같이 교란되면 구조물의 모달 감쇠(modal damping) 역시 식 (15)와 같이 변한다.

$$K_{pert} = K(1 + \delta) \tag{14}$$

$$C = M\Phi_{pert} \begin{bmatrix} 2\xi_1\omega_{1,pert} & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2\xi_n\omega_{n,pert} \end{bmatrix} \Phi_{pert}^{-1} \tag{15}$$

여기서, K 는 제어기를 구성할 때 사용된 평가모델의 강성행렬, K_{pert} 는 교란된 강성행렬, δ 는 교란된 양으로 본 연구에서는 다른 연구자들(Turan, 2001 ; Moon 등, 2002)의 결과와 비교하기 위해 $\pm 7\%$ 를 고려하였다. Φ_{pert} 는 교란된 시스템의 모달행렬, ξ_i 는 i 번째 감쇠비(3%), 그리고 $w_{i,pert}$ 는 강성행렬이 교란된 시스템의 i 번째 고유주파수(rad/sec)이다. 강성행렬의 교란으로 인해 발생하는 구조물의 비감쇠 주파수의 최대 변화는 3.72%이다. 표 8은 El Centro 지진에서 강성행렬에 $\pm 7\%$ 의 교란이 있을 때 평가기준의 최대변화율을 나타낸 것이다. 표에서 능동제어 1은 LQG 알고리즘을 이용해 24개의 유압식 가력기를 사용한 시스템, 능동제어 2(Turan, 2001)는 강인제어 알고리즘의 일종인 μ -합성법을 이용해 32개의 유압식 가력기를 사용한 시스템, 반능동제어는(Moon 등, 2002) 강인제어 알고리즘인 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control) 방법을 이용해 24개의 자기유변유체감쇠기(magnetorheological fluid damper)를 사용한 시스템이다. 기존연구인 능동제어 2와 반능동제어는 강인성 해석의 편의성을 위해 강성행렬의

교란시 모달감쇠의 변화를 고려하지 않았다. 표 8의 괄호안의 값은 모달감쇠의 변화를 고려한 경우 강인성 해석 결과를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 평가기준의 변화율이 100% 이상이거나 추가적인 제약조건(허용상관변위, 허용 케이블 인장력)이 만족하지 못할 경우 제어기는 강인성을 확보하지 못한다고 가정했다.

표 8에서 보듯이 능동제어 1과 복합제어 1을 제외한 나머지 제어시스템의 경우 제어기의 불안정성을 보이지 않는다. 복합제어 2의 경우 모든 평가기준의 변화율이 강인제어 알고리즘인 μ -합성법을 사용한 능동제어 2보다 작으며, 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control)방법을 사용한 반능동제어와 유사한 강인성을 나타냈다. 복합제어 1의 경우 최대응답과 관련된 평가기준의 변화율은 작지만 평균응답과 관련된 평가기준의 변화율은 크다. 이에 비해 복합제어 2는 모든 응답에 관련된 평가기준의 변화율이 작다. 이러한 결과는 복합제어 2가 강성행렬의 불확실성에 대해서 능동제어 신호의 오차로 인해 발생하는 유압식 가력기의 과도한 제어력을 on-off 알고리즘을 통해 유압식 가력기를 정지시킴으로써 강인성이 향상 되었다는 것을 의미한다. 평균응답의 변화율이 매우 크다는 것은 강성행렬의 불확실성에 대해 강인성을 확보하지 못하는 것, 즉 실제교량에서 제어 성능을 보장되지 못할 수 있다는 것을 의미한다.

표 9는 두 가지 복합제어 시스템에 대해 3개의 지진에 대해서 평가기준의 최대변화율의 최대값을 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 복합제어 1의 경우 복합제어 2와 달리 평균응답에서 강인성에 문제가 발생한다. 이러한 이유는 그림 10을 보면 명확해진다. 그림 10은 강성행렬에 7%의 교란이 있을 때 El Centro지진에서의 밀면 전단력을 나타낸 것이다.

표 8 El Centro 지진에서 강성행렬에 $\pm 7\%$ 의 교란이 있을 때 평가기준의 최대변화율(%). 50초 해석결과

평가기준	능동제어 1	능동제어 2*	반능동제어**	복합제어 1	복합제어 2
J ₁	27.9(36.0)	36.9	10.4	11.1(10.2)	10.8(10.0)
J ₂	68.3(69.9)	52.0	17.1	25.0(24.1)	24.5(23.6)
J ₃	25.7(39.5)	22.5	13.5	6.2(7.2)	6.4(7.4)
J ₄	7.7(14.5)	31.0	5.9	7.8(6.8)	7.6(6.7)
J ₅	7.5(8.2)	9.2	7.5	5.5(5.1)	5.5(5.1)
J ₆	3.5(7.1)	19.0	8.9	1.9(1.8)	2.2(1.5)
J ₇	183.0(186.2)	47.4	7.8	62.3(74.7)	8.7(8.1)
J ₈	301.3(311.4)	35.3	1.6	127.0(146.4)	8.2(6.6)
J ₉	124.5(130.5)	28.5	4.8	39.8(48.7)	8.1(7.5)
J ₁₀	76.2(80.3)	18.7	6.5	21.0(27.3)	13.9(11.7)
J ₁₁	61.5(65.0)	31.3	6.3	17.5(14.7)	17.3(15.4)

* Turan, 2001

** Moon 등, 2002

표 9 3개의 지진에서 강성행렬에 ±7%의 교란이 있을 때 평가기준의 최대변화율의 최대값 (% , 20초 해석결과)

평가기준	복합제어 1	복합제어 2
J ₁	26.9	26.2
J ₂	94.6	24.5
J ₃	33.5	23.0
J ₄	32.8	7.6
J ₅	29.0	25.5
J ₆	38.5	11.1
J ₇	585.6	10.7
J ₈	1105.2	22.4
J ₉	491.8	10.2
J ₁₀	488.6	14.6
J ₁₁	462.7	25.4

시간응답 그림에서 보듯이 복합제어 1과 2의 최대 전단력은 유사한 값을 가진다. 하지만 복합제어 1의 경우 약 20초 이후 진동하면서 고주파 모드로 계속 진폭이 증가한다. 이 주파수는 주파수응답 그림으로부터 약 22rad/sec임을

알 수 있다. 이 주파수 대역의 활성화된 모드가 전체적인 제어시스템의 강인성을 감소시키는 것이다. 하지만 복합제어 2의 경우 on-off 제어기로 인하여 강성행렬의 불확실성에 대해서 능동제어 신호의 오차로 발생하는 유압식 가력기를 정지시켜 그림 10에서 보듯이 강인성에 문제가 발생하지 않는다. 따라서 on-off 형태의 LQG 알고리즘으로 제어되는 복합제어 2가 주어진 3개의 지진하중을 받는 벤치마크 사장교에 대해 제어성능의 감소없이 강인성이 향상되었음을 알 수 있다.

두 번째 강인성 해석으로 설계지진 이외의 입력지진에 대한 각 제어시스템의 강인성을 아래와 같이 조사하였다. 이때 사용된 지진은 그림 11과 같은 Hachinohe지진(1968)과 Chi-Chi지진(1999)이다. Hachinohe지진은 최대지반가속도가 0.23g로서 Bill Emerson Memorial교의 설계지반가속도보다 작고 Chi-Chi지진은 최대지반가속도가 0.42g로서 설계지반가속도보다 크다.

표 10과 11은 Hachinohe지진과 Chi-Chi지진에 대해

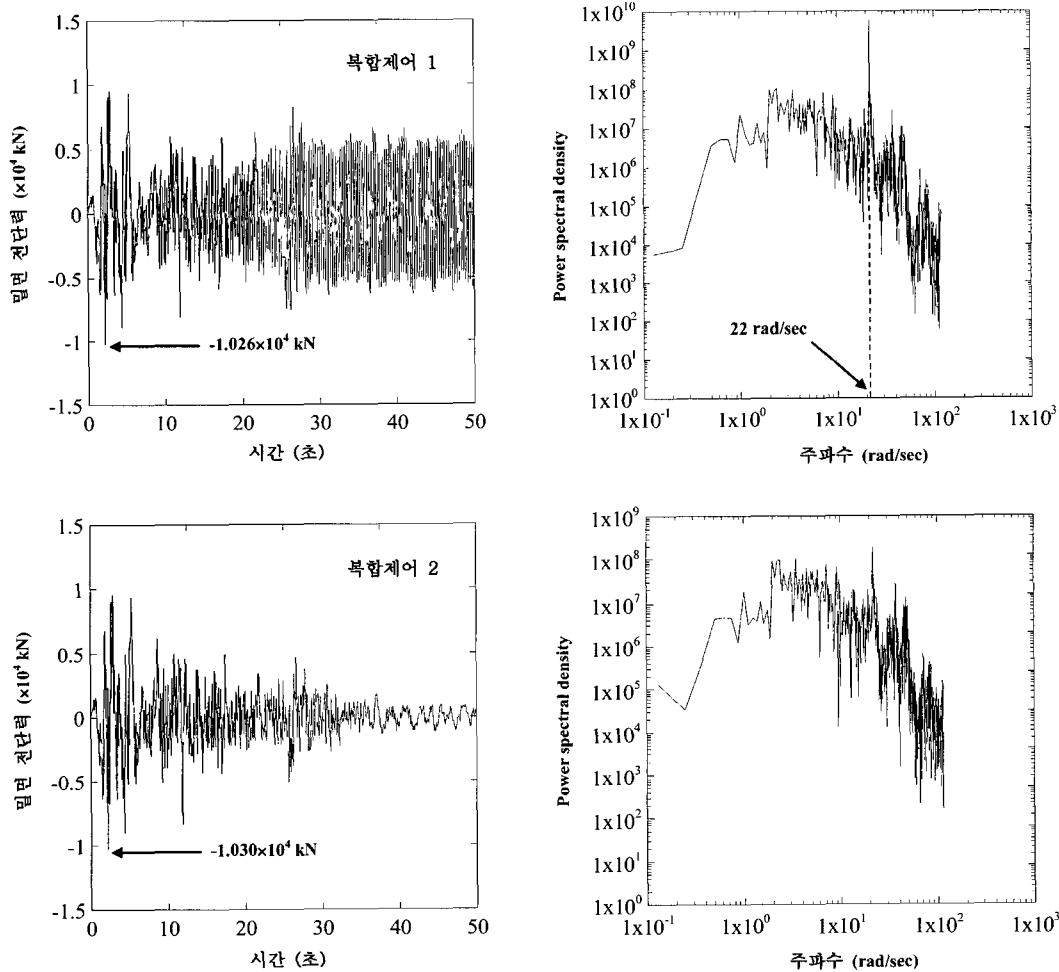


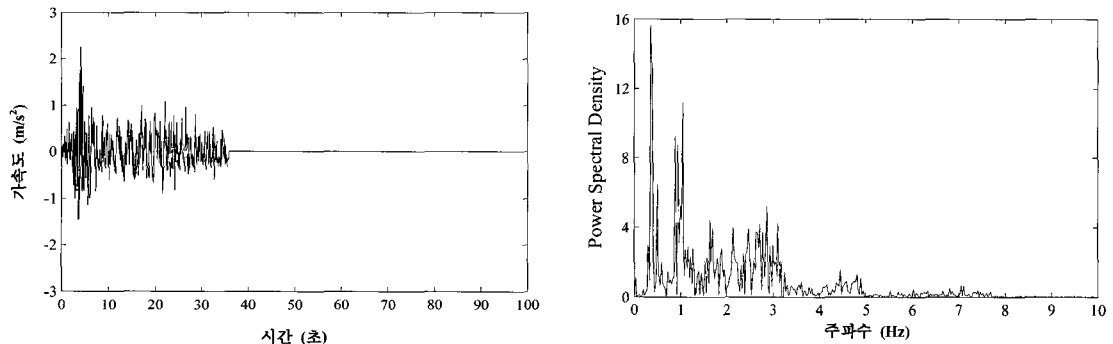
그림 10 El Centro 지진에서 강성행렬에 7%의 교란이 있을 때 교각 2에서의 밀면 전단력

표 10 Hachinohe 지진에서의 평가기준 및 제어력

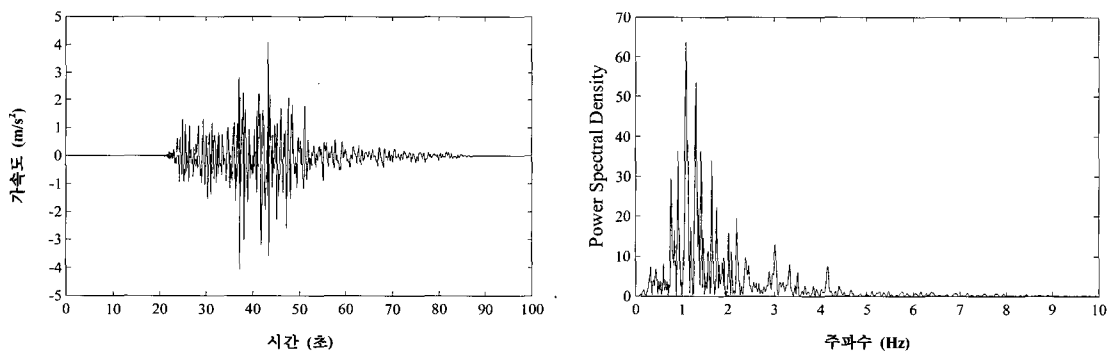
평가기준	수동제어	능동제어	복합제어 1	복합제어 2
J ₁ : 최대밀면전단력	0.3103	0.3238	0.3350	0.3341
J ₂ : 최대상관높이의전단력	0.7865	0.5508	0.4929	0.4951
J ₃ : 최대전도모멘트	0.3614	0.2816	0.2481	0.2476
J ₄ : 최대상관높이의모멘트	0.9077	0.5221	0.4319	0.4319
J ₅ : 최대케이블인장력변화	0.2228	0.1473	0.1514	0.1496
J ₆ : 최대상관변위	1.7521	0.8044	0.7572	0.7605
J ₇ : 평균밀면전단력	0.2698	0.2382	0.2291	0.2314
J ₈ : 평균상관높이의전단력	1.2764	0.8226	0.7719	0.7863
J ₉ : 평균전도모멘트	0.4926	0.3252	0.2759	0.2783
J ₁₀ : 평균상관높이의모멘트	1.2116	0.7462	0.6893	0.6910
J ₁₁ : 평균케이블인장력변화	3.933e-2	2.739e-2	2.847e-2	2.781e-2
최대제어력 (kN)	746	1000	LRB: 463 HA: 1000 LRB+HA: 1259	LRB: 464 HA: 1000 LRB+HA: 1256
평균제어력 (kN)	127	138	LRB: 110 HA: 106 LRB+HA: 156	LRB: 101 HA: 100 LRB+HA: 129

표 11 Chi-Chi 지진에서의 평가기준 및 제어력

평가기준	수동제어	능동제어	복합제어 1	복합제어 2
J ₁ : 최대밀면전단력	0.1684	0.1723	0.1664	0.1601
J ₂ : 최대상관높이의전단력	0.8698	0.8780	0.7799	0.7803
J ₃ : 최대전도모멘트	0.1598	0.1688	0.1451	0.1453
J ₄ : 최대상관높이의모멘트	0.4098	0.3575	0.2951	0.2953
J ₅ : 최대케이블인장력변화	0.2906	0.2219	0.2147	0.2148
J ₆ : 최대상관변위	1.0401	0.8263	0.7177	0.7169
J ₇ : 평균밀면전단력	0.1361	0.1279	0.1313	0.1316
J ₈ : 평균상관높이의전단력	0.7903	0.6012	0.4945	0.4967
J ₉ : 평균전도모멘트	0.1394	0.1290	0.1277	0.1280
J ₁₀ : 평균상관높이의모멘트	0.4385	0.3122	0.2623	0.2608
J ₁₁ : 평균케이블인장력변화	2.901e-2	2.289e-2	2.518e-2	2.506e-2
최대제어력 (kN)	932	1000	LRB: 720 HA: 1000 LRB+HA: 1700	LRB: 720 HA: 1000 LRB+HA: 1700
평균제어력 (kN)	153	233	LRB: 128 HA: 182 LRB+HA: 164	LRB: 127 HA: 180 LRB+HA: 153



(a) Hachinohe 지진



(b) Chi-Chi 지진

그림 11 입력지진에 따른 강인성에 사용된 지진의 가속도 시간이력곡선과 Power spectral density

구조물의 응답과 관련된 11개의 평가기준과 최대제어력 및 평균제어력을 나타낸 것이다. 표에서 모든 제어시스템은 설계지진(EI Centro, Mexico City, Gebze지진)에서의 제어성능과 유사한 결과를 나타냈다. 특히 설계지반가속도 보다 큰 최대지반가속도를 가진 Chi-Chi지진에서도 복합제어 시스템을 포함한 모든 제어시스템은 케이블의 허용인장력이나 허용 상판변위 등을 모두 만족하고 있다. 복합제어 1과 복합제어 2의 평가기준을 비교해 보면 유사한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 설계지진에서의 제어성능과 마찬가지로 복합제어 2의 2차 제어기로 사용된 on-off 알고리즘이 제어성능보다는 구조물의 물성치가 제어기를 설계할 때와 달라졌을 때 발생할 수 있는 능동제어 신호의 오차에 대해 강인성을 향상시키는 것에 그 목적이 있기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 구조물의 전달되는 지진하중을 줄이기 위해 납고무반침과 유압식 가력기를 결합한 복합제어 시스템의 성능과 강인성을 벤치마크 사장교를 이용해 조사하였다. 제어 알고리즘은 기존의 복합제어 시스템에 사용되어 강인성에 문제를 보인 LQG 알고리즘에 납고무반침의 응답에 따른 on-off 형태의 알고리즘을 결합하였다. 주어진 3개의 지진하중을 받는 벤치마크 사장교에 대해 on-off 형태의 LQG 알고리즘으로 제어되는 복합제어 시스템은 수동이나 능동제어 시스템과 유사한 최대제어력과 평균제어력을 사용하면서 제어성능이 향상되었다. 또한 기존의 성능에 초점을 둔 LQG 알고리즘만을 사용한 복합제어 시스템과 유사한 제어성능을 나타냈다. On-off 형태의 LQG 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템은 구조물의 강성행렬의 불확실성에 대해서 능동제어 신호의 오차로 인해 발생하는 유압식 가력기의 과도한 제어력을 on-off 알고리즘을 통해 유압식 가력기를 정지시킴으로써 강인성이 향상되었으며 교란된 시스템에 대해 불안정성을 보이지 않았다. 제안된 제어시스템은 설계지진뿐만 아니라 다른 입력지진에 대해서도 제어성능을 유지하였다. 따라서 on-off 형태의 LQG 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템은 불확실성이 많은 지진하중을 받는 사장교에 개선된 제어기법으로 제안될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호: 2000-N-NL-01-C-251)과 2003년도 한

국학술진흥재단의 신진연구인력 지원(과제번호: KRF-2003-908-D00050)으로 수행되었기에 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 박규식, 정형조, B. F. Spencer, Jr., 이인원 (2003) 수동, 능동, 반능동 및 복합시스템을 이용한 사장교의 지진응답 제어, 한국지진공학회 논문집, 7(1), pp.17~29
- 정형조, 박규식, B. F. Spencer, Jr., 이인원(2004) 사장교를 위한 LRB 기반 복합 기초격리 시스템, 한국지진공학회 논문집, 8(3), pp.63~75
- ABAQUS®(1996) Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket RI
- Ali, H. M., Abdel Ghaffar, A. M.(1995) Seismic passive control of cable stayed bridges, *Shock and Vibration*, 2(4), pp.259~272
- Bouc, R.(1967) Force vibration of mechanical system with hysteresis, Abstract, Proceedings of the Fourth Conference on Nonlinear Oscillation, Prague, Czechoslovakia
- Dyke, S. J., Turan, G., Caicedo, J. M., Bergman, L. A., Hague, S.(2003) Phase I benchmark control problem for seismic response of cable stayed bridges, *Journal of Structural Engineering: Special issue on structural control*, ASCE, 129(7), pp.857~872
- He, W. L., Agrawal, A. K., Mahmoud, K. (2001) Control of seismically excited cable stayed bridge using resetting semiactive stiffness dampers, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 6(6), pp. 376~384
- Kelly, J. M.(1982) Aseismic base isolation, *Shock and Vibration Digest*, 14, pp.17~25
- Kelly, J. M.(1986) Aseismic base isolation: Review and bibliography, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 5, pp.202~216
- Kitazawa, M., Noguchi, J., Nishimori, K., Izeki, J.(1991) Earthquake resistant design of a long period structure and development of girder displacement stopper: Higashi Kobe Bridge, Proceedings of the Initial Symposium on Kyushu University, pp.123~141, Fukuoka, Japan.
- Laud, A. J., Heakth, M. T., Paige, C. C., Ward, R. C.(1987) Computation of system balancing transformations and other applications of simultaneous diagonalization algorithm, *IEEE Transaction on Automatic Control*, AC 32, pp.17~32
- MATLAB®(1997) The Math Works, Inc., Natick,

Massachusetts

- Moon, S. J., Bergman, L. A., Voulgaris, P. G.** (2002) Sliding mode control of cable stayed bridge subjected to seismic excitation, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 129(1), pp.71~78.
- Park, K. S., Jung, H. J., Lee, I. W.**(2002) Hybrid control strategies for seismic protection of benchmark cable stayed bridges, Proceedings of the Seventh US National Conference on Earthquake Engineering, Boston, USA
- Park, K. S., Jung, H. J., Lee, I. W.**(2002) Hybrid control strategy for seismic protection of a benchmark cable stayed bridge, *Engineering Structures*, 25(4), pp.405~417
- Public Works Research Institute(PWRI, 1986)** Seismic design procedure of cable stayed bridge: Part I dynamic characteristics of cable stayed bridges based on field vibration test results, Technical Report, Tsukuba, Japan (In Japanese)
- Sakai, T. Nishikawa, K., Kawashima, K.** (1989) New design considerations for reducing seismic lateral force of highway bridges in Japan, Proceedings of the 11th IRF World Meeting, pp.1~4, Seoul, Korea
- Spencer, Jr., B. F., Nagarajaiah, S.**(2003) State of the art of structural control, *Journal of Structural Engineering: Special issue on structural control, ASCE*, 129(7), pp.845~855
- Takahashi, M.**(1984) Earthquake resistance design of the Meiko Nishi Bridge, Proceedings of the First US Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japan.
- Turan, G.**(2001) Active control of a cable stayed bridge against earthquake excitations, Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana Champaign
- Wen, Y. K.**(1976) Method for random vibration of hysteretic systems, *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, 102(2), pp.249~263
- Wilson, J., Gravelle, W.**(1991) Modeling of a cable stayed bridge for dynamic analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 20, pp.707~721