

수동, 능동, 반능동 및 복합 시스템을 이용한 사장교의 지진응답 제어

Seismic Response Control of a Cable-Stayed Bridge Using Passive, Active, Semiactive and Hybrid Systems

박 규 식*
Park, Kyu Sik

정 형 조**
Jung, Hyung Jo

Spencer, B. F., Jr.***
Spencer, B. F., Jr.

이 인 원****
Lee, In Won

국문요약

본 연구에서는 수동, 능동, 반능동 및 복합 시스템과 같은 다양한 제어시스템의 효율성을 미국토목학회에서 제시한 지진하중을 받는 첫번째 벤치마크 사장교를 이용해 조사하였다. 이 벤치마크 문제는 2003년 완공 예정으로 미국 Missouri주에 건설중인 Bill Emerson Memorial 교를 대상 구조물로 고려하였다. Bill Emerson Memorial 교는 New Madrid 지진구역에 위치하고 Mississippi 강을 횡단하는 주요 교량이라는 점 때문에 설계 단계에서부터 내진설계가 고려되었다. 사장교의 상세한 설계도면에 기초해 교량의 복잡한 거동을 나타낼 수 있는 3차원 선형모델과 각 제어시스템의 성능을 평가하기 위한 18개의 평가기준이 개발되었다. 본 연구에서는 네 종류의 수동 제어 시스템, 한 종류의 능동제어 시스템, 두 종류의 반능동제어 시스템 및 세 종류의 복합제어 시스템이 고려되었다. 수치해석 결과 모든 제어시스템은 지진하중을 받는 벤치마크 사장교의 응답을 감소시켰다. 그러나, 수동제어 시스템의 경우에는 뛰어난 제어성능을 얻기 위해서 다른 제어시스템에 비해 커다란 제어력을 필요로 했다. 강인성에 관한 수치해석 결과에 따르면, 수동, 반능동 및 복합제어 시스템이 구조물 강성의 불확실성에 대해 강인함을 보였다. 따라서, 반능동 및 복합제어 시스템이 토목구조물과 같은 대형구조물의 실제 적용에 보다 적절하다.

주요어 : 성능평가, 수동제어 시스템, 능동제어 시스템, 반능동제어 시스템, 복합제어 시스템, 벤치마크 사장교, 지진응답 제어

ABSTRACT

This paper preliminarily investigates the effectiveness of various control systems, such as passive, active, semiactive and hybrid control, for seismic protection of cable-stayed bridges by examining the ASCE first generation benchmark problem for a cable-stayed bridge. This benchmark problem considers the cable-stayed bridge that is scheduled for completion in Missouri, USA in 2003. Seismic considerations were strongly considered in the design of this bridge due to location of the bridge and its critical role as a principal crossing of the Mississippi River. Based on detailed drawings of this cable-stayed bridge, a three-dimensional linearized evaluation model has been developed to represent the complex behavior of the bridge. A set of eighteen evaluation criteria has been developed to evaluate the capability of each control system. In this study, four passive control systems, one active control system, two semiactive control systems and three hybrid control systems are considered. Numerical simulation results show that all the control systems are effective in reducing the responses of the benchmark cable-stayed bridge under the historical earthquakes. To get good performance, however, the passive control systems need quite large control forces compared to other control systems. The simulation results also demonstrate that the passive, semiactive and hybrid control systems are robust to the stiffness uncertainty of the structure. Therefore, the semiactive and hybrid control systems are more appropriate in real applications for full-scale civil infrastructures.

Key words : performance evaluation, passive control system, active control system, semiactive control system, hybrid control system, benchmark cable-stayed bridge, seismic response control

1. 서 론

사장교는 구조적인 효율성과 경제성 등으로 인해 세계적으로 건설이 증가하고 있다. 하지만 이러한 사장교는 낮은 구조감쇠를 갖는 매우 유연한 구조물이기 때문에 지진과 같은 동적하중에 취약하다. 수동, 능동, 반능동 및 이들을 조합한 복합제어 시스템은 지진하중을 받는 사장교의 응답을 제어하는데 효율적으로 사용될 수 있다.

사장교를 지진으로부터 보호하기 위해 과거에는 주로 상판을 케이블(cable)로만 지지하여 상부구조를 지진과 격리시

켰다.⁽¹⁾ 이러한 방법은 구조물에 전달되는 지진하중을 최소화 할 수 있지만 사하중이나 활하중 같은 사용하중하에서는 과도한 상판변위가 발생할 수 있다. 따라서, 많은 연구자들이 건설되었거나 건설중인 사장교의 상판과 주탑의 연결부에 elastic cable restrainer⁽²⁾, spring shoe⁽³⁾, short pendulum type link⁽⁴⁾, vane damper⁽⁵⁾ 등 많은 연결장치에 관해 연구하였다.

Ali와 Abdel-Ghaffar⁽¹⁾은 고무받침과 납면진받침을 이용한 수동제어 시스템의 효과에 대해 연구하였다. 수치해석 결과, 수동제어 장치의 적절한 물성치와 설치위치에 따라 사장교에 전달되는 지진하중이 현저히 감소하였다. Iemura 등⁽⁶⁾은 일본에 건설된 사장교의 보수를 위해 고무받침과 점성감쇠기를 혼합하여 사용하였다. 수치해석 결과, 고무받침과 점성감쇠기를 혼합한 제어시스템은 많은 양의 지진에너지 흡수하여 구조물의 응답을 줄일 수 있었다.

최근에는 상세한 교량 모델에 대한 능동, 반능동 및 복합

* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 박사과정(대표저자 : kyusik@kaist.ac.kr)
** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 연구교수
*** Nathan M. Newmark Professor, Dept. of Civil and Envir. Engng., University of Illinois at Urbana-Champaign
**** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, 교수
본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 11. 9 / 심사종료일 : 2002. 12. 17)

제어 시스템에 관한 연구가 진행되고 있다. 예를 들어, 능동 동조질량 감쇠기(active tuned mass damper)⁽⁷⁾, 전상태 최적 선형 제어(full-state optimal linear control)⁽⁸⁾, 선형 이차 Gaussian 제어(linear quadratic Gaussian(LQG) control)^{(9),(10)}, 능동제어(active control)⁽¹¹⁾, 반능동제어(semiactive control)⁽¹²⁾⁻⁽¹⁵⁾, 복합제어(hybrid control)^{(16),(17)} 등이 있다.

사장교의 진동제어를 위한 많은 연구가 진행되어 왔지만 기준이 되는 구조물에 대해서 수행되지 않았기 때문에 다양한 제어시스템에 대한 직접적인 비교가 어렵다. 따라서 벤치마크(benchmark) 문제를 개발하여 수동, 능동, 반능동 및 복합제어 시스템 등 다양한 제어시스템에 대한 공정한 비교를 통해 사장교에 적절한 진동제어 시스템을 찾고자 하는 노력이 진행중이다. 이러한 이유로 미국 토목학회 구조제어 분과 주관하에 Dyke 등⁽¹⁸⁾은 다양한 제어시스템의 성능을 연구하기 위한 지진하중을 받는 첫번째 벤치마크 사장교 문제를 개발하였다. 이 벤치마크 제어 문제는 2003년 완공예정인 미국 Missouri 주에 건설되고 있는 Bill Emerson Memorial 교를 대상 구조물로 하였다. Bill Emerson Memorial 교는 New Madrid 지진구역에 위치하고 Mississippi 강을 횡단하는 주요 교량이라는 점 때문에 설계 단계에서부터 내진설계가 고려되었다. 사장교의 상세한 설계도면에 기초에 교량의 복잡한 거동을 나타낼 수 있는 3차원 선형모델이 개발되고 각 제어시스템의 성능을 평가하기 위한 18개의 평가기준이 제시되었다.

본 연구의 목적은 이러한 벤치마크 문제를 이용해 수동, 능동, 반능동 및 복합제어 시스템의 성능을 비교하는 것이다. 수동제어 장치로는 점성감쇠기(viscous damper : VD), 선형스프링(linear spring : LS) 그리고 납면진받침(lead-rubber bearing : LRB)을, 능동제어 장치로는 LQG 제어 알고리즘 사용한 hydraulic actuator(HA)를, 그리고 반능동제어 장치로는 clipped 최적제어 알고리즘을 사용한 자기유변유체 감쇠기(magnetorheological damper : MRD)를 사용하였다. 복합제어 시스템은 수동과 능동제어 장치 그리고 수동과 반능동제어 장치를 결합한 시스템을 고려하였다. 각 제어시스템의 성능을 공정하게 비교하기 위해 각 제어시스템의 적절한 변수(점성감쇠기의 감쇠계수, 능동제어 시스템의 가중행렬 등)를 민감도 해석을 통해 구하였다. 수치해석을 통해 다양한 제어시스템의 성능을 평가하고 구조물의 불확실성에 대한 강인성을 조사하였다.

2. 벤치마크 문제

2.1 벤치마크 교량모델

벤치마크 문제는 그림 1과 같은 2003년 미국 Missouri 주에 완공 예정인 Bill Emerson Memorial 교를 고려하였다.

교량의 상세한 도면에 기초에 Dyke 등⁽¹⁸⁾은 교량의 복잡한 거동을 잘 나타낼 수 있는 3차원 선형모델을 개발하였다. 선형

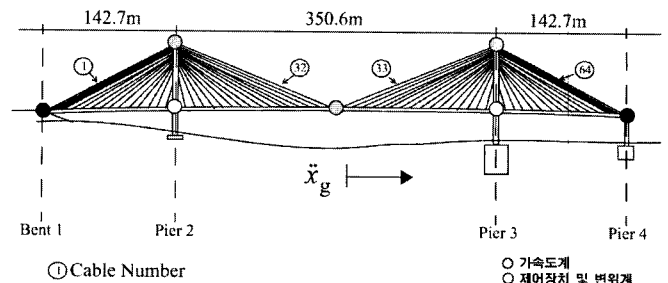


그림 1 Bill Emerson Memorial 교의 개략도 및 제어장치와 센서위치

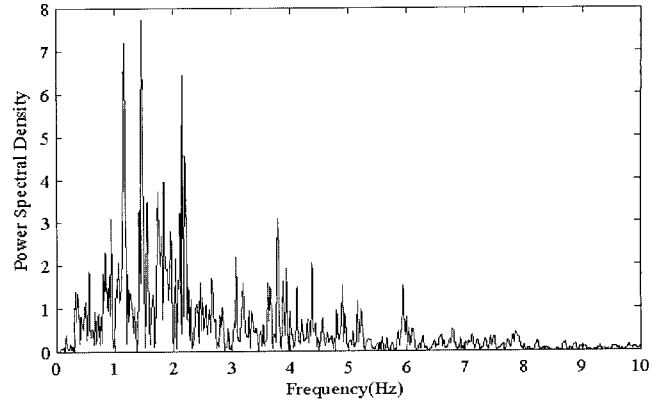
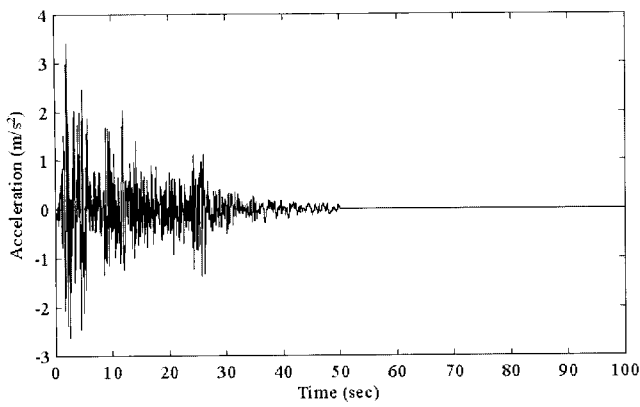
모델에 사용된 강성행렬은 교량의 사하중하에서 ABAQUS⁽¹⁹⁾로 비선형 정적해석을 통해 구성된 것이다. 교량이 기반암에 건설되었기 때문에 지반-구조물 상호작용은 무시하였다. 지진하중은 교축방향으로 모든 교각에서 동시에 가해진다고 가정하였다.

보요소, 케이블 요소, 그리고 강결요소를 사용한 유한요소 모델은 많은 자유도를 포함하고 있다. 따라서 정적응축(static condensation)을 수행해 419개의 자유도를 가지는 평가모델을 구성하였다. 구조물의 감쇠는 교량 설계시와 같은 가정사항인 각 모드(mode)에 3%의 감쇠비를 적용하였다. 제어장치가 설치되지 않은 교량의 처음 10개의 고유주파수는 0.2899, 0.3699, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203Hz 이다. 이 모델에서 상판-주탑의 연결부는 16개의 충격전달 장치(shock transmission unit)가 설치되어 지진과 같은 동적하중에는 고정된다. 이와 반대로 교축방향으로 거동하는 제어장치를 설치하기 위해 상판-주탑 연결부의 충격전달 장치를 제거한 또 다른 평가모델을 구성하였다. 이 모델의 처음 10개의 고유주파수는 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7094Hz 이다.

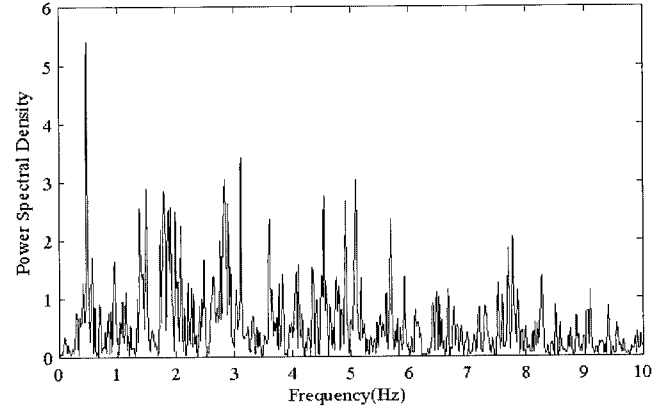
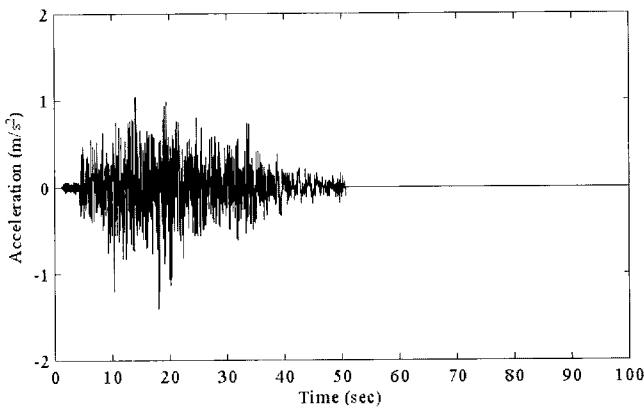
2.2 지진하중

El Centro 지진(1940), Mexico City 지진(1985), 그리고 Turkey Gebze 지진(1999)에서 제어시스템의 성능을 평가하기 위해 MATLAB⁽²⁰⁾을 이용하여 수치해석을 수행하였다. Mexico City 지진은 교량이 건설된 지역이 Mexico City 지역과 유사하기 때문에 고려하였고, 나머지 2개의 지진은 다른 특성을 가진 지진에서 제어시스템의 성능을 평가하기 위해 고려하였다. 3개 지진 모두 설계 지반가속도 0.36g 이하의 최대 지반가속도를 가진다. 그림 2는 입력지진의 시간이력곡선과 power spectral density를 나타낸 것이다.

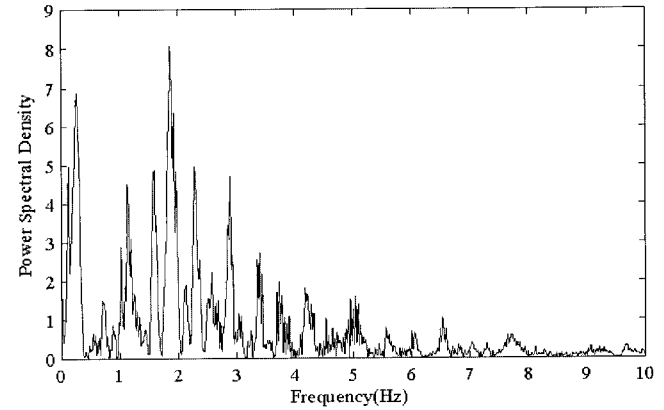
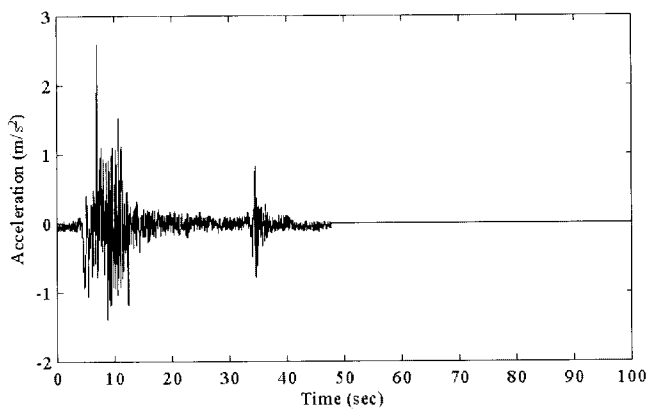
지진하중을 받는 사장교의 경우 중요한 응답은 사용성 보다는 구조물의 파괴에 관련된 것들이다. 이러한 응답 중 가장 중요한 것은 상판높이의 주탑의 전단력과 모멘트, 주탑 지지부의 전도모멘트이다. 일반적으로 수직방향의 변위는 중요하지 않지만 교축방향으로는 교량의 낙교를 방지하기 위해 벤치마크 사장교의 교대 1과 교각 4에서 변위가 30cm 이상 발생하면 안된다.⁽²⁷⁾ 이와 같은 응답을 포함하여 각 연구자들이 제안한 제어시스템의 성능을 평가하기 위한 18개의



(a) El Centro(1940) 지진



(b) Mexico City(1985) 지진



(c) Gebze(1990) 지진

그림 2 입력지진의 시간이력곡선 및 power spectral density

평가기준이 벤치마크 문제에 제시되었다. 처음 6개의 평가 기준, 즉 최대 밀면전단력(J_1), 최대 상판높이의 전단력(J_2), 최대 전도모멘트(J_3), 최대 상판높이의 모멘트(J_4), 최대 케이블 인장력 변화(J_5), 교대 1과 교각 4의 최대 상판변위(J_6)는 제어시스템이 교량의 최대응답을 감소시키는 성능에 관련된 것이다. 최대 상판높이의 전단력(J_2)은 주탑의 단면감소와 관련된 것이다. 최대 케이블 인장력 변화(J_6)는 케이블의 파괴와 인장력이 0이 되는가를 조사하기 위해 선택되었다. 두번째 5개, 즉 평균 밀면전단력(J_7), 평균 상판높이의 전단력(J_8), 평균 전도모멘트(J_9), 평균 상판높이의 모멘트(J_{10}), 평균 케이블 인장력 변화(J_{11})는 전체 해석시간동안의 교량의 평균응답에 관련된 것이다. 구조물의 응답에 관련된 평가기준은 제어

하지 않은 경우, 즉 충격전달장치가 설치된 경우의 결과로 정규화 하였다. 마지막 7개, 즉 최대 제어력(J_{12}), 최대 장치 변형량(J_{13}), 최대 전력(J_{14}), 총 전력(J_{15}), 장치개수(J_{16}), 센서개수(J_{17}), 제어 알고리즘에 사용된 상태(state) 개수(J_{18})는 제어 시스템에 관련된 것이다. 평가기준에 대한 자세한 내용은 Park 등⁽¹⁷⁾이나 Dyke 등⁽¹⁸⁾의 논문에 제시되어 있다.

3. 다양한 제어시스템

3.1 수동제어 시스템

수동제어 시스템은 에너지 소산장치와 기초격리장치로

분류된다. 본 연구에서는 에너지 소산장치인 점성감쇠기를 수동제어 시스템으로 사용하였다. 점성감쇠기의 모델은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{x}}, \quad (1)$$

여기서 \mathbf{C}_0 는 감쇠계수, 그리고 $\dot{\mathbf{x}}$ 은 점성감쇠기가 설치된 곳의 상대속도이다. 점성감쇠기는 그림 1과 같이 상판과 교각/교대의 연결부에 설치되었다. 점성감쇠기의 적절한 감쇠계수를 결정하기 위해 본 연구에서는 Lyapunov 방정식을 이용하여 구조물의 평균응답을 가장 작게 하는 감쇠계수를 구하였다. 구조물의 상태공간 방정식(state-space equation)은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{f} + \mathbf{E}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (2)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{f} + \mathbf{F}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (3)$$

여기서 \mathbf{x} 는 구조물의 상태벡터, $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 는 지반가속도, \mathbf{f} 는 수동제어력, \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{E} 는 시스템 행렬, \mathbf{z} 평가 출력(주탑의 전단력과 모멘트, 상판변위, 케이블 인장력 등)을 포함한 제어된 출력벡터, 그리고 \mathbf{C} , \mathbf{D} , \mathbf{F} 는 \mathbf{z} 를 얻기 위한 사상(mapping) 행렬이다.

식 (2)와 (3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{x} + \mathbf{E}\ddot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{A}_c\mathbf{x} + \mathbf{E}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (4)$$

$$\mathbf{z} = (\mathbf{C} - \mathbf{D}\mathbf{K})\mathbf{x} + \mathbf{F}\ddot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{C}_c\mathbf{x} + \mathbf{F}\ddot{\mathbf{x}}_g \quad (5)$$

여기서 \mathbf{K} 는 수동제어력 이득(gain) 행렬이다. \mathbf{x} 가 stationary process 라고 가정하면 Lyapunov 방정식은 다음식과 같다.

$$\mathbf{A}_c\mathbf{G}_{xx} + \mathbf{G}_{xx}\mathbf{A}_c^T + 2\pi S_0\mathbf{E}\mathbf{E}^T = 0 \quad (6)$$

여기서 $E[\ddot{\mathbf{x}}_g(t_2)\ddot{\mathbf{x}}_g(t_1)] \equiv 2\pi S_0\delta(t_2 - t_1)$ 이다. 출력의 공분산, \mathbf{G}_{zz} 는 다음 식과 같이 상태벡터의 공분산, \mathbf{G}_{xx} 로부터 구할 수 있다.

$$\mathbf{G}_{zz} = E[\mathbf{z}\mathbf{z}^T] = E[\mathbf{C}_c\mathbf{x}\mathbf{x}^T\mathbf{C}_c^T] = \mathbf{C}_c E[\mathbf{x}\mathbf{x}^T] \mathbf{C}_c^T = \mathbf{C}_c\mathbf{G}_{xx}\mathbf{C}_c^T \quad (7)$$

최종적으로 구조물의 평균응답은 다음과 같다.

$$\mathbf{z}^{rms} = \sqrt{\text{diag}(\mathbf{G}_{zz})} \quad (8)$$

본 연구에서 수동제어 장치의 적절한 변수를 결정하기 위해 고려한 구조물의 응답은 표 1⁽¹⁷⁾과 같다.

이때 감쇠 계수는 10^3 에서 $10^8\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ 까지 변화시켰으며 그림 3과 같이 $10^7\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}$ 가 점성감쇠기의 감쇠계수로 결정되었다.

표 1 수동제어 장치의 적절한 변수와 비수동제어 장치의 가중변수를 결정하기 위한 구조물의 응답⁽¹⁷⁾

Responses	Corresponding parameters
base shears at piers 2 and 3	q_{bs}
shears at deck level at piers 2 and 3	q_{sd}
overturning moments at base of piers 2 and 3	q_{om}
moments at deck level at piers 2 and 3	q_{md}
deck displacements at bent 1 and pier 4	q_{dd}
top displacements at towers 1 and 2	q_{td}

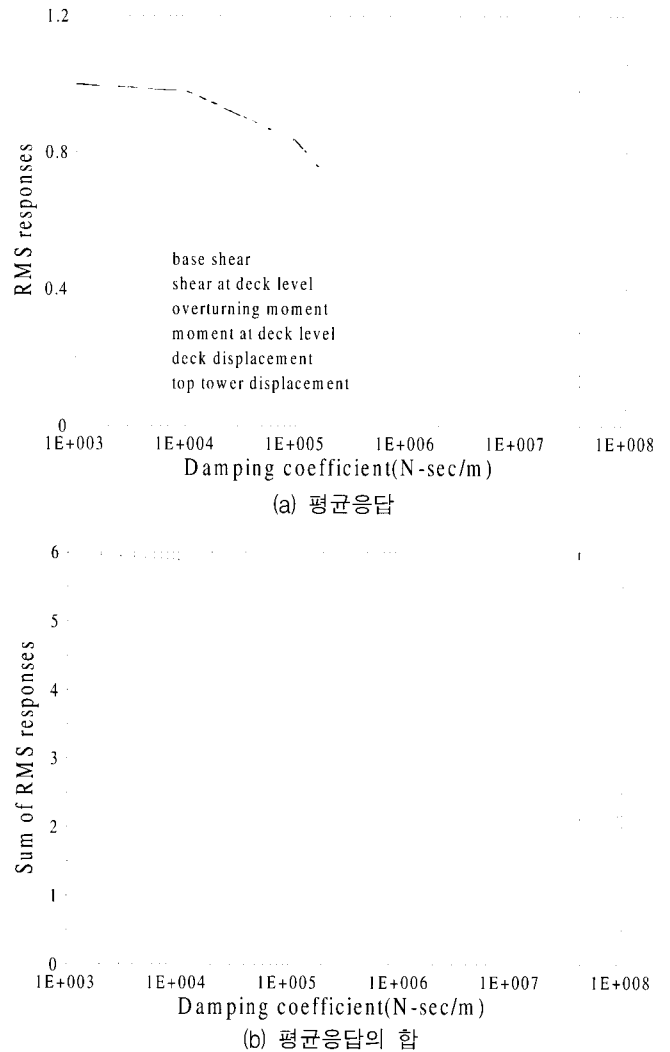


그림 3 감쇠계수에 따른 점성감쇠기가 설치된 구조물의 평균응답

수동제어 시스템의 두번째로서 점성감쇠기와 선형스프링을 조합한 시스템(점성감쇠기+선형스프링)을 고려하였다. 이 시스템의 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_0\mathbf{x}_r + \mathbf{C}_0\dot{\mathbf{x}}, \quad (9)$$

여기서 \mathbf{K}_0 는 선형스프링 상수, 그리고 \mathbf{x}_r 은 장치가 설치된 곳의 상대변위이다. 점성감쇠기와 마찬가지로 Lyapunov 방정식을 이용하여 적절한 선형스프링 상수를 결정하였다. 이

때 선형스프링 상수는 10^3 에서 10^9 N/m 까지 변화시켰고, 감쇠계수는 $10^6, 10^7, 10^8$ N·sec/m의 값을 사용하였다. 민감도 해석 결과 그림 4와 같이 점성감쇠기+선형스프링의 적절한 스프링상수와 감쇠계수는 각각 10^8 N/m와 10^7 N·sec/m가 결정되었다.

지진하중을 받는 일반 교량에 많이 사용되는 기초격리장치인 납면진받침을 세번째 수동제어 장치로 고려하였다. 본 연구에서는 Park 등⁽¹⁷⁾에서 설계된 납면진받침을 사용

하였다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_{\text{eff}} \mathbf{x}_r + \mathbf{C}_{\text{eq}} \dot{\mathbf{x}}_r \tag{10}$$

여기서 \mathbf{K}_{eff} 와 \mathbf{C}_{eq} 는 유효 스프링상수와 등가 감쇠계수이다. 납면진받침의 물성치는 납면진받침의 bilinear 특성곡선을 이용하여 구하였다. 유효강성은 전단력과 변위의 이력곡선을 통해 구하였다. 일반적으로 유효강성을 사용할 경우 납

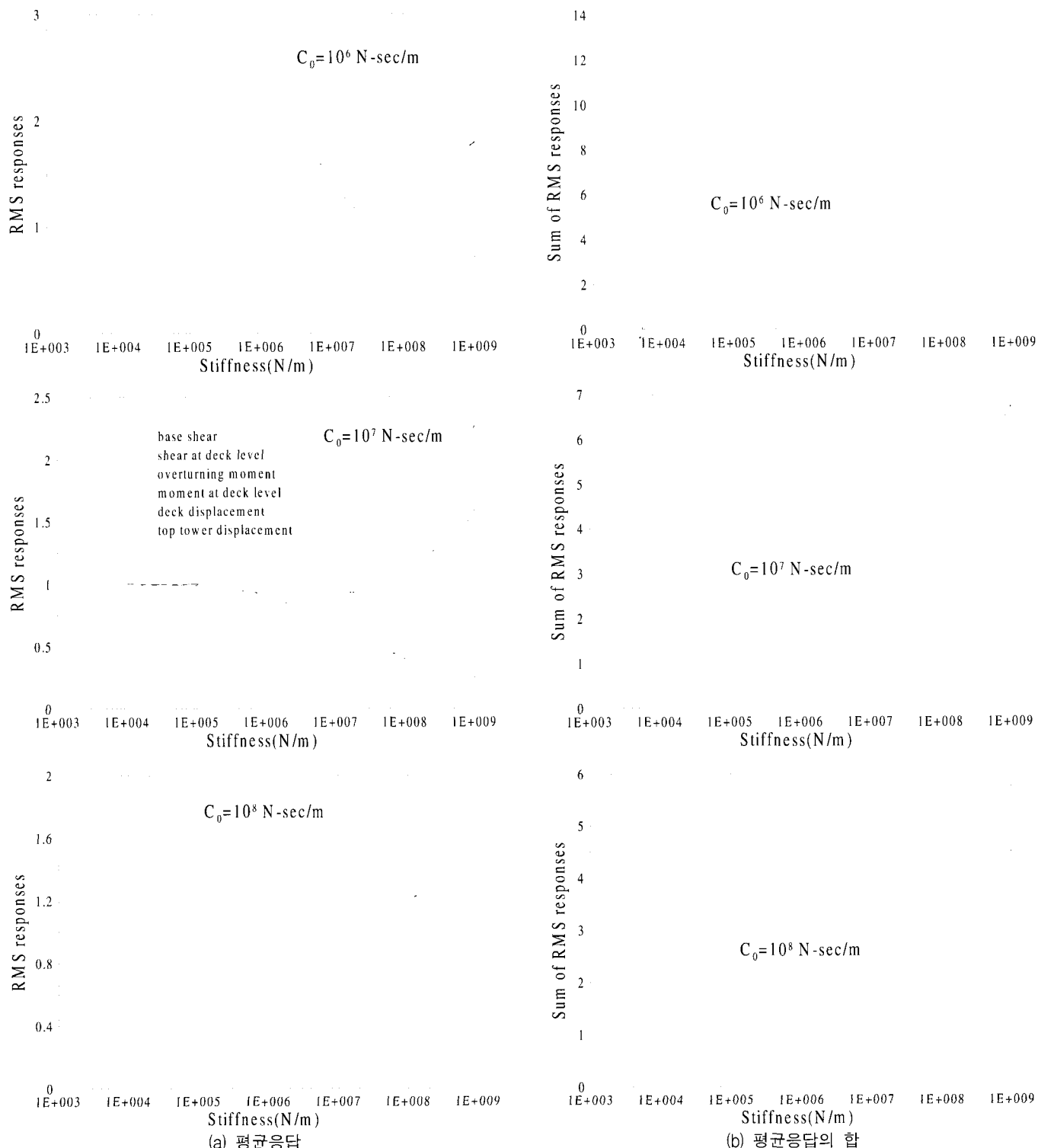


그림 4 스프링상수에 따른 점성감쇠기+선형스프링이 설치된 구조물의 평균응답

면진받침의 성능을 과도하게 평가할 수 있지만 비교적 좋은 결과를 준다.⁽²¹⁾ 또한 고무를 이용하는 받침의 경우 제조와 유지관리에 경제적이다. 이러한 납면진받침을 각 상판과 교각/교대에 6개씩 총 24개를 설치하였다. 표 2는 Park 등⁽¹⁷⁾에 의해 결정된 납면진받침의 물성치를 나타낸 것이다. 납고무받침의 물성치를 결정하는 자세한 과정은 Park 등⁽¹⁷⁾에 나타나 있다.

표 2 납고무받침의 물성치⁽¹⁷⁾

Property	Value
Elastic stiffness, k_e (N/m)	3.571×10^7
Plastic stiffness, k_p (N/m)	3.139×10^6
Effective stiffness, k_{eff} (N/m)	3.970×10^6
Yield displacement of lead plugs, D_y (cm)	0.765
Equivalent damping ratio, ξ_{eq} (%)	24.7
Design shear force level for the yielding of lead plugs, Q_d (kg)	2.540×10^4

납고무받침을 설치한 경우보다 추가적으로 응답을 감소시키기 위해 점성감쇠기를 납고무받침과 함께 사용하였다. 납고무받침+점성감쇠기의 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_{LRB} + \mathbf{f}_{VD} = \mathbf{K}_{eff} \mathbf{x}_r + \mathbf{C}_{eq} \dot{\mathbf{x}}_r + \mathbf{C}_0 \dot{\mathbf{x}}, \quad (11)$$

Lyapunov 방정식을 이용해 점성감쇠기의 적절한 감쇠계수를 결정하였다. 이때 감쇠계수는 10^3 에서 $10^8 \text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}$ 까지 변화시켰으며 그림 5와 같이 $10^7 \text{N} \cdot \text{sec}/\text{m}$ 가 적절한 감쇠계수로 결정되었다.

3.2 능동제어 시스템

본 연구에서는 능동제어 장치로서 벤치마크 문제에서 건본(sample) 제어시스템으로 제시한 24개의 HA를 사용하였다. 8개는 상판과 교각 2, 8개는 상판과 교각 3, 4개는 상판과 교대 1, 그리고 4개는 상판과 교각 4에 설치되었다. 제어장치

하나의 용량은 1000kN 이며, 동역학은 무시하여 이상적인 경우로 가정하였다. 각 제어장치에서 발생하는 제어력은 다음과 같다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{K}_f \mathbf{u} = \mathbf{G}_{dev} \mathbf{D}_d \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 2\mathbf{I}_{2 \times 2} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 4\mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & 2\mathbf{I}_{2 \times 2} \end{bmatrix} \mathbf{D}_d \mathbf{u} \quad (12)$$

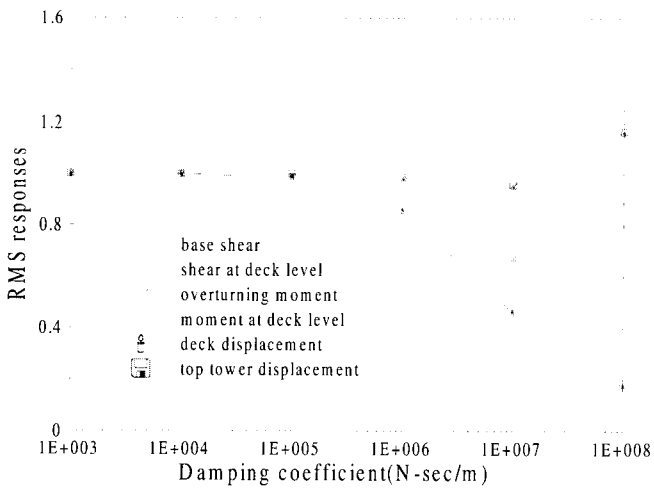
$$\mathbf{y}_f = \mathbf{D}_d \mathbf{u} = \mathbf{D}_d \mathbf{I}_{8 \times 8} \mathbf{u} \quad (13)$$

여기서 \mathbf{f} 는 제어력, \mathbf{K}_f 는 입력전압과 제어력사이의 관계를 나타내는 이득행렬, \mathbf{G}_{dev} 는 제어장치 개수에 따른 이득행렬, \mathbf{D}_d 는 제어장치의 이득행렬, \mathbf{u} 는 제어입력 신호, $\mathbf{I}_{n \times n}$ 은 n 차의 단위행렬, 그리고 \mathbf{y}_f 는 제어 알고리즘의 되먹임(feedback)을 위해 사용되는 제어출력이다. 디지털 아날로그 변환기(D/A converter)는 $\pm 10\text{Volts}$ 의 범위를 가지고 있기 때문에 D_d 는 $100\text{kN}/\text{V}$ ($10\text{Volts}=1000\text{kN}$) 이다.

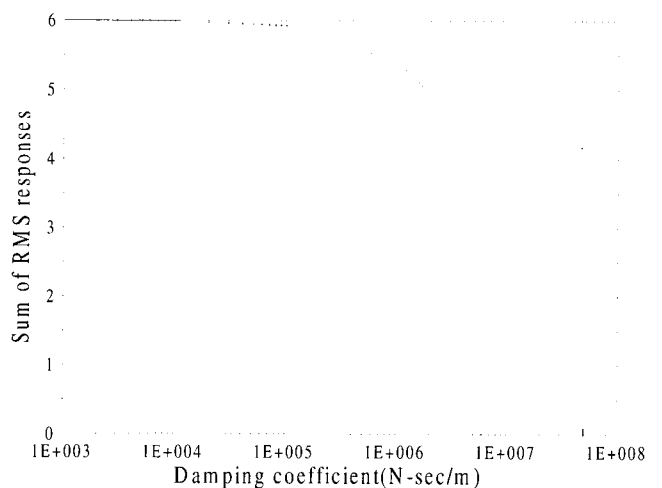
센서로는 그림 1과 같이 5개의 가속도계와 4개의 변위계가 사용되었다. 4개의 가속도계는 주탑 꼭대기에 설치되었고 1개는 상판 중앙에 설치되었다. 2개의 변위계는 상판과 교각 2에 그리고 2개는 상판과 교각 3에 설치되었다. 모든 센서는 교축방향의 응답을 측정하고 센서의 고유주파수는 교량모델의 고유주파수에 비해 적어도 10배 이상이라고 가정하였기 때문에 센서의 동역학은 무시할 수 있다. 센서모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_s = \mathbf{D}_s \mathbf{y}_m + \mathbf{v} \quad (14)$$

여기서 \mathbf{y}_s 는 Volts 단위의 측정된 가속도와 변위이며, \mathbf{y}_m 는 물리적인 단위의 측정된 가속도와 변위, 그리고 \mathbf{v} 는 측정잡음이다. 측정잡음은 평균값으로 0.003Volts 를 가지고 이는 아날로그 디지털 변환기(A/D converter) 측정범위의 약 0.03%에 해당하는 값이다. 센서이득 행렬, \mathbf{D}_s 는 다음과 같다.



(a) 평균응답



(b) 평균응답의 합

그림 5 감쇠계수에 따른 납고무받침+점성감쇠기가 설치된 구조물의 평균응답

$$D_s = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{5 \times 5} G_a & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{4 \times 4} G_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서 $G_a = 0.714 \text{ V}/(\text{m}/\text{sec}^2)$ 는 가속도 센서이득이고 $G_d = 30\text{V}/\text{m}$ 는 변위 센서이득이다. 가속도와 변위가 아날로그 디지털 변환기의 측정범위안에 있도록 가속도계의 경우 $7\text{V}/\text{g}$ ($7\text{Volts}=9.81\text{m}/\text{s}^2$), 변위계의 경우 $30\text{V}/\text{m}$ ($10\text{Volts}=0.33\text{m}$)의 민감도를 갖도록 하였다.

HA의 제어력을 계산하기 위해 LQG 제어 알고리즘을 사용하였다. LQG와 같은 최적제어 알고리즘은 효과적인 제어를 위해서는 적절한 가중행렬의 선택이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 Park 등⁽¹⁷⁾에서 사용된 최대응답방법을 사용하여 가중행렬을 결정하였다. 최대응답방법의 개략적인 과정은 다음과 같다. (1) 표 1과 같이 구조물의 응답을 효과적일 나타낼 수 있는 대표적인 응답을 선택한다. (2) 각 가중변수를 변화시켜가면서 구조물의 최대응답을 구해 가장 좋은 결과를 주는 2개의 가중변수를 선택한다. (3) 선택된 2개의 가중변수를 동시에 변화시켜 가면서 3차원 해석을 통해 원하는 가중변수의 값을 결정한다.

결과적으로 그림 6과 같이 능동제어 시스템의 경우 다음의 응답가중행렬이 결정되었다.

• 능동제어 시스템:

$$Q_{om_dd} = \begin{bmatrix} q_{om} \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & q_{dd} \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}, q_{om}=4 \times 10^9, q_{dd}=1 \times 10^{17}$$

3.3 반능동제어 시스템

현재의 능동제어 시스템은 강진에 대해서 실제 적용하기에는 많은 문제점이 있다.⁽²²⁾ 강진에 대해 구조물을 보호하

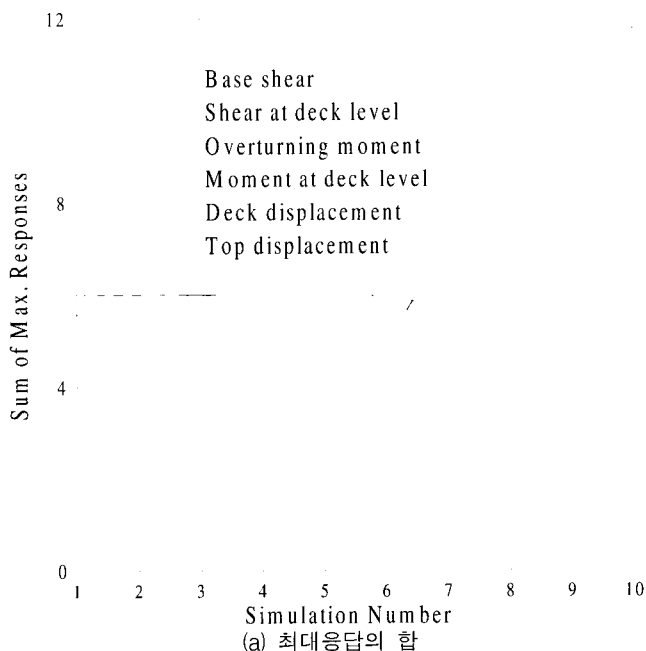
기 위해서는 적은 에너지를 가지고 좋은 성능을 낼 수 있는 능동제어 기법이 개발되어야 한다. 이와 반대로 반능동 제어 장치(가변 오리피스 감쇠기, 가변 마찰 감쇠기, 가제어 유체 감쇠기 등)는 적은 전력만을 필요로 하며 한정 입출력적인 의미(bounded input and bounded output sense)로 구조물을 불안정하게 만들지 않는다. 반능동제어 장치는 수동제어 시스템의 신뢰성뿐만 아니라 능동제어 시스템의 다양성과 적응성을 제공한다. 따라서, 반능동제어 시스템은 구조물의 제어를 위해 효과적인 장치중에 하나이다.

본 연구에서는 반능동제어 장치로 자기유변유체 감쇠기를 고려하였다. 자기유변유체 감쇠기의 용량은 1000kN 이며 이상적으로 고려하였다. 제어 알고리즘은 기존 연구자들^{(23),(24)}에 의해 성능이 입증된 clipped 최적제어 알고리즘을 사용하였다. Clipped 최적제어 알고리즘은 LQG 방법을 기본 제어 알고리즘을 사용하기 때문에 능동제어 시스템의 경우와 같은 가중행렬을 사용하였다.

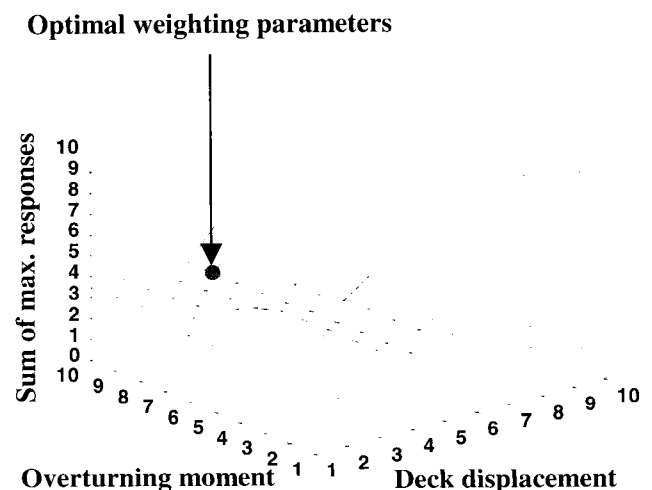
He 등⁽²⁵⁾에 의해 제안된 가변 강성 감쇠기의 일종인 RSASD (resetting semiactive stiffness damper)의 결과를 비교를 위해 인용하였다. RSASD 에 관한 자세한 내용은 He 등⁽²⁵⁾ 이나 Agrawal 등⁽²⁶⁾의 논문에 제시되어 있다.

3.4 복합제어 시스템

복합제어 시스템의 성능은 수동제어 장치에 많은 영향을 받는다. 본 연구에서는 수동제어 장치에서 사용된 납면진받침을 복합제어 시스템의 수동제어 장치로 사용하였다. 복합제어 시스템은 능동제어 부분이 작동하지 않더라도 수동제어 부분이 작동하기 때문에 수동이나 능동제어 장치만을 설치하는 경우보다 신뢰성 뿐만 아니라 효율성도 뛰어나다. 본 연구에서는 복합제어 시스템으로 다음의 세가지를 고려하였다.

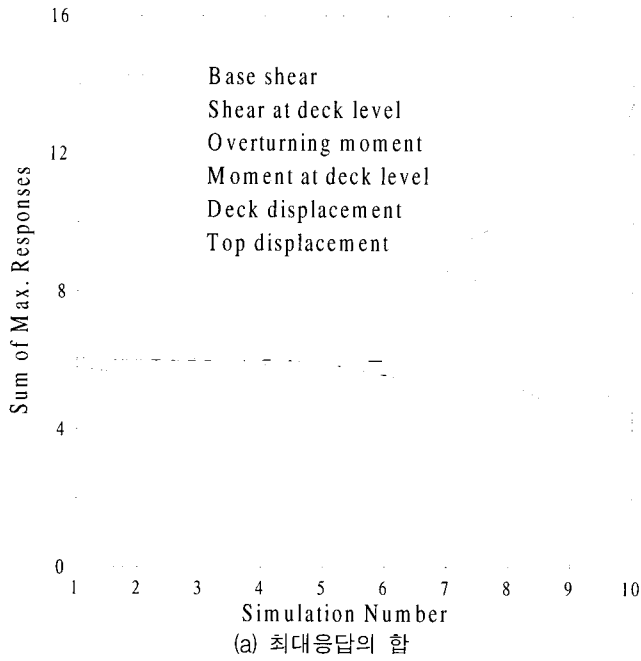


(a) 최대응답의 합



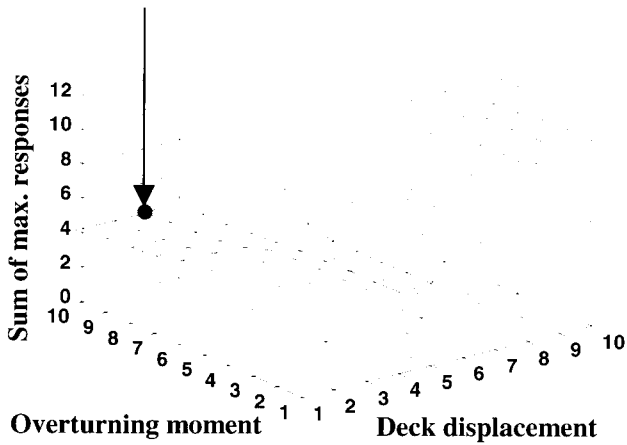
(b) 선택된 2개의 가중변수에 대한 3차원 해석

그림 6 능동제어 시스템의 최적가중변수 선택⁽¹⁷⁾



(a) 최대응답의 합

Optimal weighting parameters



(b) 선택된 2개의 가중변수에 대한 3차원 해석
그림 7 복합제어 시스템의 최적가중변수 선택⁽¹⁷⁾

(1) 납면진받침+HA⁽¹⁷⁾

(2) 납면진받침+자기유변유체 감쇠기

(3) 점성감쇠기+RSASD⁽²⁶⁾

능동제어 시스템과 마찬가지로 최적가중행렬은 최대응답방범을 사용하여 그림 7과 같이 결정되었으며 그 값은 다음과 같다.

• 복합제어 시스템:

$$Q_{om_dd} = \begin{bmatrix} q_{om} \mathbf{I}_{4 \times 4} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & q_{dd} \mathbf{I}_{4 \times 4} \end{bmatrix}, q_{om} = 5 \times 10^9, q_{dd} = 1 \times 10^{3(17)}$$

4. 수치해석결과

수치해석에서 비교된 제어시스템은 다음과 같다. (1) 4개의 수동제어 시스템(점성감쇠기, 점성감쇠기+선형스프링, 납면진받침, 납면진받침+점성감쇠기), (2) 1개의 능동제어 시스템(HA), (3) 2개의 반능동제어 시스템(자기유변유체 감쇠

기, RSASD), (4) 3개의 복합제어 시스템(납면진받침+HA, 납면진받침+자기유변유체 감쇠기, 점성감쇠기+RSASD). 제어 성능의 효율성과 구조물의 불확실성에 대한 제어시스템의 강인성(robustness)을 조사하였다.

4.1 다양한 제어시스템의 성능

그림 8~10과 표 3~5는 3개의 지진에 대한 다양한 제어시스템의 평가기준을 나타낸 것이다.

그림 8과 표 3은 수동제어 시스템의 각 지진에 대한 평가기준을 나타낸 것이다. 그림과 표에서 보듯이 모든 수동제어

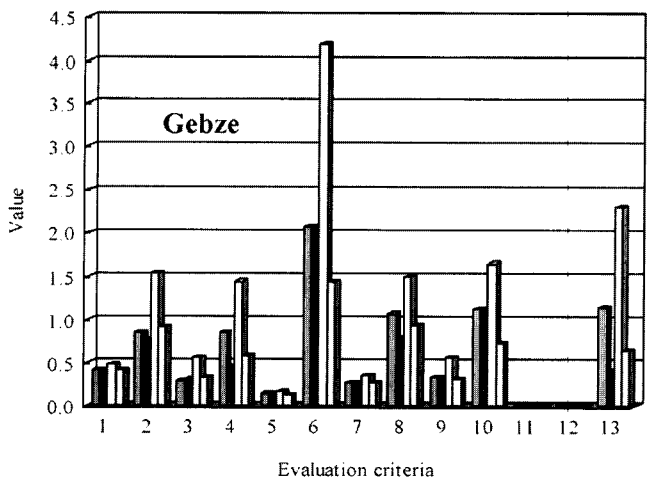
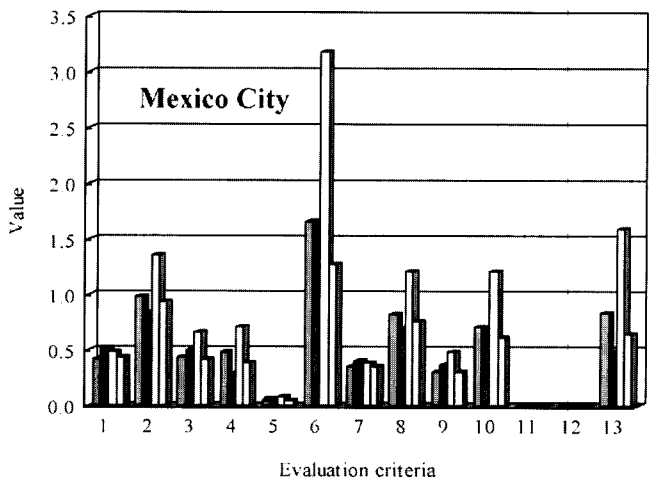
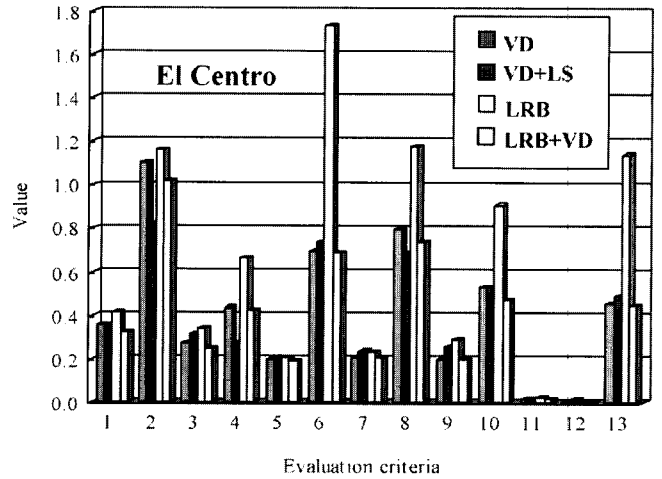


그림 8 수동제어 시스템의 평가기준

표 3 수동제어 시스템의 최대 평가기준

Evaluation criteria	VD	VD+LS	LRB	LRB+VD
J ₁ - 최대 밀면전단력	0.423	0.522	0.489	0.433
J ₂ - 최대 상판높이의 전단력	1.103	0.845	1.529	1.023
J ₃ - 최대 전도모멘트	0.432	0.506	0.659	0.427
J ₄ - 최대 상판높이의 모멘트	0.860	0.451	1.442	0.578
J ₅ - 최대 케이블 인장력 변화	0.203	0.147	0.208	0.192
J ₆ - 최대 상판변위	2.080	0.950	4.195	1.427
J ₇ - 평균 밀면전단력	0.358	0.398	0.392	0.357
J ₈ - 평균 상판높이의 전단력	1.069	0.785	1.449	0.933
J ₉ - 평균 전도모멘트	0.326	0.371	0.570	0.319
J ₁₀ - 평균 상판높이의 모멘트	1.118	0.389	1.650	0.723
J ₁₁ - 평균 케이블 인장력 변화	1.76e-2	1.45e-2	2.91e-2	1.62e-2
J ₁₂ - 최대 제어력	8.17e-3	VD : 9.47e-3 LS : 1.42e-2 VD+LS : 1.61e-2	2.47e-3	LRB : 8.76e-4 VD : 7.73e-3 LRB+VD : 8.24e-3
J ₁₃ - 최대 장치 변형량	1.141	0.487	2.300	0.643

시스템의 성능은 제어하지 않은 경우에 비해 효과적이다. 하지만 몇 가지 응답(최대 상판높이의 전단력(J₂), 최대 상판변위(J₆))은 제어하지 않은 경우에 비해 점성감쇠기+선형스프링의 경우를 제외하고 나머지 수동제어 시스템에서는 증가하였다. 납면진받침이 설치한 경우 다른 수동제어 시스템에 비해 특히 상판변위가 크다. 이와 반대로 점성감쇠기+선형스프링이 설치한 경우 최대/평균 밀면전단력(J₁/J₃)과 최대/평균 전도모멘트(J₇/J₉)를 제외한 모든 응답에서 다른 수동제어 시스템에 비해 가장 작다. 하지만 이러한 제어성능을 얻기 위해서는 다른 수동제어 시스템에 비해 큰 제어력이 필요하다(표 3의 J₁₂).

그림 9와 표 4는 능동/반능동 제어시스템을 설치한 경우 평가기준과 최대 평가기준을 나타낸 것이다. 그림과 표에서 보듯이 능동/반능동 제어시스템의 성능이 효과적임을 알 수 있다. 수동제어 시스템과 유사하게 최대 상판높이의 전단력(J₂)과 최대 상판변위(J₆)를 제외한 다른 응답이 상당히 감소하였다. 또한 HA나 자기유변유체 감쇠기를 설치한 경우가 RSASD를 설치한 경우보다 좋은 제어성능을 나타내었다. 자기유변유체 감쇠기의 제어성능은 능동제어 장치인 HA 와 유사하다. 따라서 능동제어 장치보다 적은 전력만을 필요로 하는 자기유변유체 감쇠기가 보다 효과적이라고 할 수 있다.

그림 10은 복합제어 시스템에 대한 평가기준을 나타낸 것이다. 표 5는 3개의 지진에 대한 최대 평가기준을 나타낸 것이다. 수치해석 결과 복합제어 시스템은 구조물의 응답을 줄이는데 매우 효과적이며 특히 납고무받침을 기반으로 하는 복합제어 시스템 (납고무받침+HA, 납고무받침+자기유변유체 감쇠기)이 점성감쇠기+RSASD 보다 뛰어난 제어성능을 나타내었다.

앞의 수치해석결과, 7개의 제어시스템, 즉 3개의 수동제어 시스템(점성감쇠기, 점성감쇠기+선형스프링, 납면진받침+점

성감쇠기), 1개의 능동제어 시스템(HA), 1개의 반능동제어 시스템(자기유변유체 감쇠기), 2개의 복합제어 시스템(납면진받침+HA, 납면진받침+자기유변유체 감쇠기)이 본 연구에서 고려된 10개의 제어시스템 중 좋은 결과를 나타내었다. 하지만 수동제어 시스템의 경우 최대제어력(J₁₂)이 다른 제어시스템에 비해 상당히 크게 나타났다(점성감쇠기 : 8.17e-3, 점성감쇠기+선형스프링 : 1.61e2, 납고무받침+점성감쇠기 : 8.24e-3, HA/자기유변유체 감쇠기 : 1.96e-3, 납고무받침+HA : 2.80e-3, 납고무받침+자기유변유체 감쇠기 : 2.82e-3). 즉 같은 제어성능을 얻기 위해서는 능동이나 반능동제어 장치보다 많은 수의 수동제어 장치가 필요한 것을 의미한다. 또한 일반적으로 수동제어 시스템은 사용환경이나 다양한 하중조건(지진하중의 주된 주파수나 강도)에 적응성이 없다.

따라서 제어 성능면에서 볼 때 HA, 자기유변유체 감쇠기, 납고무받침+HA, 그리고 납고무받침+자기유변유체 감쇠기가 지진하중을 받는 벤치마크 사장교의 제어에 효과적이다.

4.2 강성행렬의 불확실성에 대한 제어기의 강인성

실제 교량이 건설되었을 경우 Dyke 등⁽¹⁸⁾에 의해 제시된 평가모델과 다른 동적특성을 갖게 된다. 따라서 수치해석에서 좋은 제어성능을 보였을지라도 실제 교량에 적용되었을 때 제어성능이 보장되지 않을 수도 있다. 따라서 제어시스템의 실제 적용 가능성을 조사하기 위해 각 제어시스템의 강인성을 반드시 조사하여야 한다. 본 연구에서는 구조물의 강성행렬에 일정한 불확실성을 준 상태에서 수치해석을 수행해 각 제어시스템의 강인성을 조사하였다.

강성행렬을 식 (16)과 같이 교란(perturbation)시킨 후 원래 모델에서 구성된 제어기를 가지고 수치해석을 수행하였다.

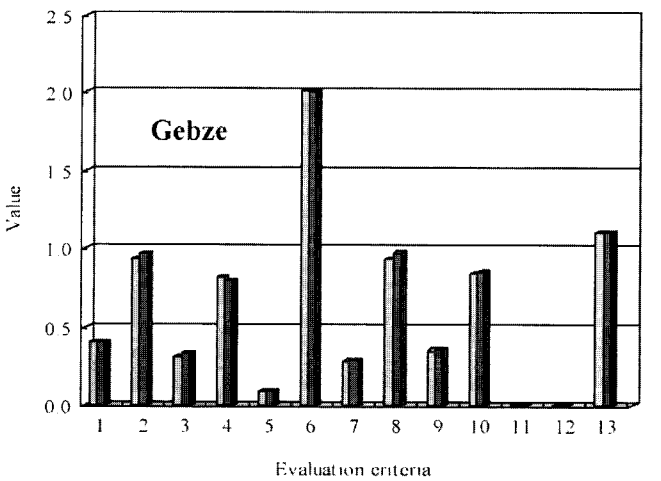
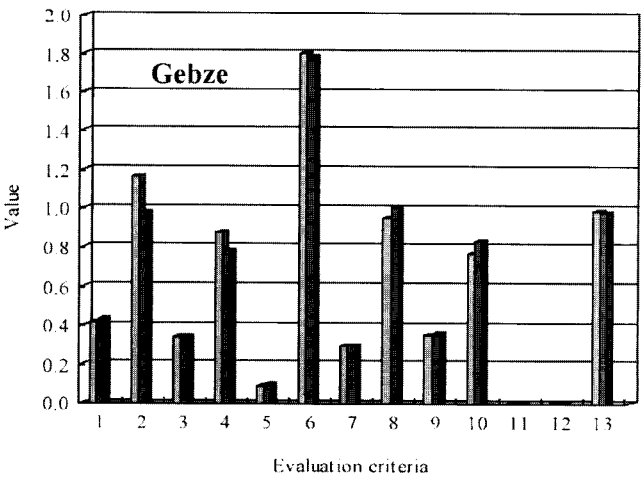
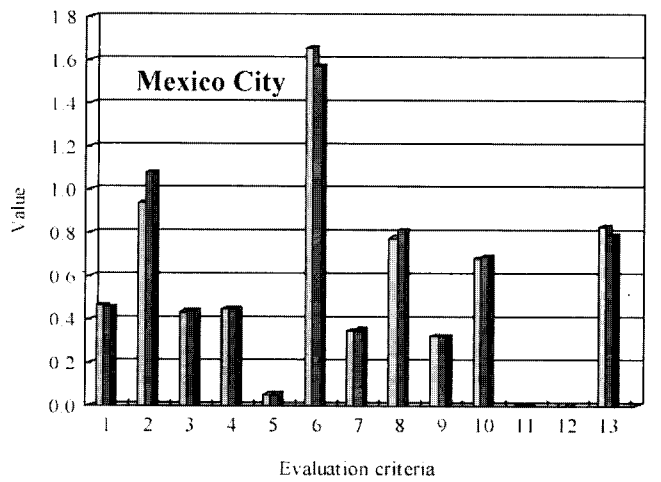
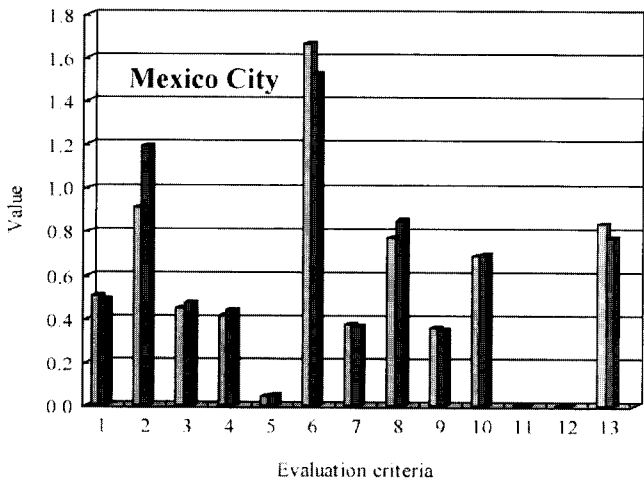
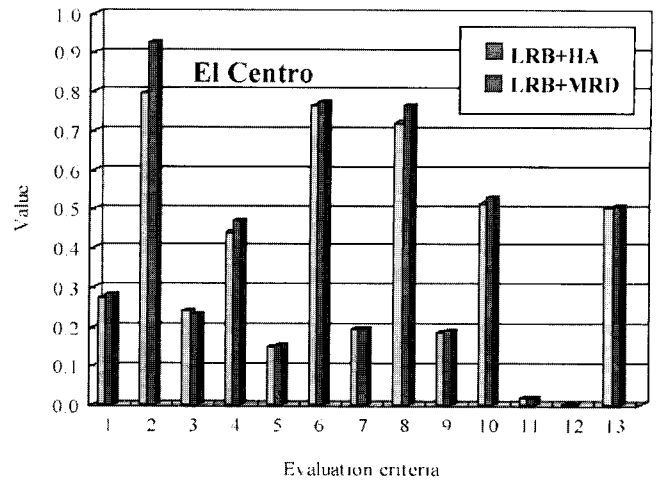
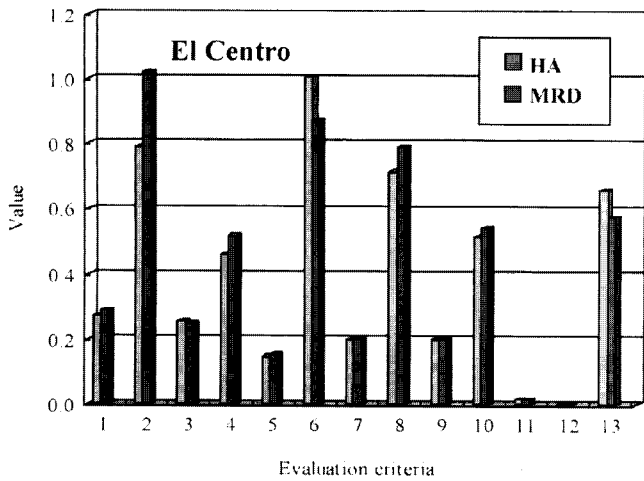


그림 9 능동/반능동 제어시스템의 평가기준

그림 10 복합제어 시스템의 평가기준

$$K_{\text{pert}} = K(1 + \delta) \quad (16)$$

여기서 K 는 제어를 구성하는 평가 모델의 강성행렬, 그리고 K_{pert} 는 교란된 강성행렬이다. 본 연구에서는 강성행렬에 7%^{(15),(27)}의 교란을 주었다. El Centro 지진에 대해 평가기준의 최대변화율이 표 6에 나타나 있다. 공정한 비교를 위해 제어하지 않은 결과와 μ -synthesis 방법을 사용한 능동제어 시스템⁽²⁷⁾의 결과를 함께 비교하였다.

표 6 El Centro 지진에 대한 각 제어시스템의 평가기준의

최대변화율표에서 보듯이 LQG 제어알고리즘을 사용한 HA를 제외한 나머지 시스템에서는 불안정성이 나타나지 않았다. 또한 수동, 반능동 및 복합제어 시스템의 평가기준의 최대변화율이 μ -synthesis 방법을 사용한 능동제어 시스템보다 작았다. 납뮴진반침과 같이 수동제어 시스템의 경우 제어력은 구조물의 응답에만 의존(식 (1), (9)~(11))하기 때문에 기본적으로 강인성을 가지고 있다.

HA/LQG 능동제어 시스템은 교란된 구조물에 대해 제어 성능을 발휘하지 못한다. 특히 구조물의 평균응답에 큰 변화

표 4 능동/반능동 제어시스템의 최대 평가기준

Evaluation criteria	HA	MRD	RSASD
J ₁ - 최대 밀면전단력	0.507	0.486	0.496
J ₂ - 최대 상판높이의 전단력	1.158	1.191	1.425
J ₃ - 최대 전도모멘트	0.448	0.473	0.565
J ₄ - 최대 상판높이의 모멘트	0.879	0.786	1.269
J ₅ - 최대 케이블 인장력 변화	0.147	0.157	0.225
J ₆ - 최대 상판변위	1.803	1.779	2.951
J ₇ - 평균 밀면전단력	0.376	0.365	0.416
J ₈ - 평균 상판높이의 전단력	0.951	1.008	1.504
J ₉ - 평균 전도모멘트	0.356	0.353	0.473
J ₁₀ - 평균 상판높이의 모멘트	0.762	0.831	1.573
J ₁₁ - 평균 케이블 인장력 변화	1.62e-2	1.77e-2	0.0217
J ₁₂ - 최대 제어력	1.96e-3	1.96e-3	0.01314
J ₁₃ - 최대 장치 변형량	0.989	0.975	-

표 5 복합제어 시스템의 최대평가기준

Evaluation criteria	LRB+HA	LRB+MRD	VD+RSASD
J ₁ - 최대 밀면전단력	0.463	0.455	0.4856
J ₂ - 최대 상판높이의 전단력	0.934	1.079	1.3536
J ₃ - 최대 전도모멘트	0.434	0.439	0.5539
J ₄ - 최대 상판높이의 모멘트	0.823	0.791	1.2199
J ₅ - 최대 케이블 인장력 변화	0.149	0.154	0.2176
J ₆ - 최대 상판변위	2.019	2.007	2.8227
J ₇ - 평균 밀면전단력	0.349	0.351	0.4083
J ₈ - 평균 상판높이의 전단력	0.930	0.974	1.4231
J ₉ - 평균 전도모멘트	0.352	0.355	0.4588
J ₁₀ - 평균 상판높이의 모멘트	0.842	0.849	1.5085
J ₁₁ - 평균 케이블 인장력 변화	1.92e-2	1.89e-2	0.0262
J ₁₂ - 최대 제어력	LRB: 1.24e-3 HA: 1.96e-3 LRB+HA: 2.80e-3	LRB: 1.22e-3 HA: 1.96e-3 LRB+MRD: 2.82e-3	0.0125
J ₁₃ - 최대 장치 변형량	1.107	1.101	-

율이 발생한다. 이러한 문제는 LQG 제어 알고리즘의 가중 행렬이나 μ -synthesis 방법과 같은 강인제어 알고리즘을 사용하여 어느 정도 해결 할 수 있다. 하지만 가중행렬을 조절할 경우 제어성능이 떨어지게 되고 표 6에서와 같이 μ -synthesis 방법과 같은 강인제어 알고리즘을 사용하여도 최대응답의 변화율에는 많은 개선이 이루어지지 않았다. 하지만 clipped 최적제어 알고리즘을 사용한 자기유변유체 감쇠기의 경우 강성행렬의 불확실성에 대해 뛰어난 강인성을 가지고 있다.

복합제어 시스템의 강인성은 납고무받침과 비슷하다. LQG 제어 알고리즘을 사용한 복합제어 시스템의 경우 평균응답에서 능동제어 시스템과 달리 납고무받침의 영향으로 큰 변화가 일어나지 않는다. 자기유변유체 감쇠기를 이용한 복합제어 시스템의 경우 자기유변유체 감쇠기의 추가적인 영향으로 가장 좋은 강인성을 나타내었다. 따라서 수동, 반능동 및 복합제어 시스템이 구조물의 강성행렬에 불확실성에 뛰어난 강인성을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 수동(점성감쇠기, 선형스프링, 납고무받침), 능동(LQG 제어 알고리즘을 사용한 HA), 반능동(clipped 최적제어 알고리즘을 사용한 자기유변유체 감쇠기), 그리고 복합제어(수동과 능동 그리고 수동과 반능동제어 장치의 조합) 시스템 등 다양한 제어시스템의 성능을 미국토목학회에서 제시한 지진하중을 받는 벤치마크 사장교에 대해서 비교 평가하였다. 수치해석 결과 본 연구에서 고려된 제어시스템은 지진하중을 받는 벤치마크 사장교의 응답을 감소시켰다. 하지만 수동제어 시스템의 경우 다른 제어시스템과 비교하여 커다란 제어력을 필요로 하였다. 또한 강인성 측면에서는 수동, 반능동 및 복합제어 시스템이 좋은 결과를 나타내었다. 따라서 반능동이나 복합제어 시스템이 토목구조물과 같은 대형구조물의 실제 적용에 있어서 보다 적절하다.

표 6 El Centro 지진에 대한 각 제어시스템의 평가기준 최대변화율

Evaluation criteria	Uncontrolled Case	Passive control	Active control		Semiactive control	Hybrid control	
		LRB	HA with μ -synthesis*	HA with LQG	MRD	LRB+HA	LRB+MRD
J ₁ - 최대 밀면전단력	13.80	8.69	36.94	36.03	16.48	8.13	7.40
J ₂ - 최대 상판높이의 전단력	3.95	15.83	51.97	67.34	14.31	14.37	14.33
J ₃ - 최대 전도모멘트	12.33	9.25	22.50	49.93	3.58	7.11	3.30
J ₄ - 최대 상판높이의 모멘트	2.62	9.82	31.01	28.66	5.38	2.55	1.75
J ₅ - 최대 케이블 인장력 변화	9.71	4.22	9.19	8.10	9.40	6.71	7.25
J ₆ - 최대 상판변위	2.86	1.91	19.02	16.78	3.94	7.93	2.44
J ₇ - 평균 밀면전단력	15.65	5.00	47.41	196.92	14.35	5.97	6.34
J ₈ - 평균 상판높이의 전단력	1.66	8.36	35.34	336.28	11.74	5.39	6.24
J ₉ - 평균 전도모멘트	14.61	13.70	28.86	138.44	5.91	7.33	6.32
J ₁₀ - 평균 상판높이의 모멘트	11.03	17.54	25.88	84.91	5.61	13.79	11.23
J ₁₁ - 평균 케이블 인장력 변화	19.23	13.97	31.25	71.39	9.43	18.75	15.50

* μ -synthesis 방법을 사용한 능동제어(32개의 HA 사용)⁽²⁷⁾

참고 문헌

1. Ali, H. M. and Abdel-Ghaffar, A. M., "Seismic passive control of cable-stayed bridges," *Shock and Vibration*, Vol. 2, No. 4, 1995, pp. 259-272.
2. Takahashi, "Earthquake resistance design of the Meiko Nishi Bridge," *Proceedings of the First U.S-Japan Bridge Engineering Workshop*, Tsukuba, Japan, 1984.
3. Public Works Research Institute(PWRI), "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, 1986.
4. Sakai, T., Nishikawa, K., and Kawashima, K., "New design considerations for reducing seismic lateral force of highway bridges in Japan," *Proceedings of the Eleventh IRF World Meeting*, Seoul, Korea, 1989, pp. 1-4.
5. Kitazawa, M., Noguchi, J., Nishimori, K., and Izeki, J., "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*, Fukuoka, Japan, 1991, pp. 123-141.
6. Iemura, H., Adachi, Y., and Pradono, M. H., "Seismic retrofit of a cable-stayed bridge with dynamic response control devices," *Proceedings of the 14th KKNN Symposium on Civil Engineering*, 2001, pp. 95-100.
7. Miyata, T., Yamada, H., and Paulet-Grainiceanu, F., "Active structural control for cable bridges under earthquake loads," *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, Vol. 2, 1996, pp. 53-58.
8. Paulet-Crainiceanu, F., "Seismic response control of cable-stayed bridges," *Proceedings of the Second World Conference on Structural Control*, Vol. 2, 1998, pp. 959-964.
9. Schemmann, A. G. and Smith, H. A., "Vibration control of cable-stayed bridge-Part 1: modeling issues," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 811-824.
10. Schemmann, A. G. and Smith, H. A., "Vibration control of cable-stayed bridge-Part 2: control analyses," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 825-843.
11. Ni, Y. Q., Spencer, Jr. B. F., and Ko, J. M., "Feasibility of active control of cable-stayed bridge: An insight into Ting Kau Bridge," *Smart Structures and Materials 2001: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways*, *Proceedings of SPIE*, 2001.
12. Jung, H. J., Spencer, Jr. B. F., and Lee, I. W., "Seismic protection of cable-stayed bridges using smart damping strategy," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, 2001, submitted.
13. Jung, H. J., Spencer, Jr. B. F., and Lee, I. W., "Benchmark control problem for seismically excited cable-stayed bridges using smart damping strategies," *IABSE Conference*, Seoul, Korea, 2001.
14. Moon, S. J., Bergman, L. A., and Voulgaris, P. G., "Application of magnetorheological dampers to control of a cable-stayed bridge subjected to seismic excitation," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2001, submitted.
15. Moon, S. J., Bergman, L. A., and Voulgaris, P. G., "Sliding mode control of a cable-stayed bridge subjected

- to seismic excitation," *Proceedings of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*(CD-ROM), Boston, USA, 2001.
16. Park, K. S., Jung, H. J., and Lee, I. W., "Hybrid control strategies for seismic protection of benchmark cable-stayed bridges," *Proceedings of the 7th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*(CD-ROM), Boston, USA, 2002.
 17. Park, K. S., Jung, H. J., and Lee, I. W., "Hybrid control strategy for seismic protection of a benchmark cable-stayed bridge," *Engineering Structures*, 2002, accepted for publication.
 18. Dyke, S. J., Turan, G., Caicedo, J. M., Bergman, L. A., and Hague, S., "Benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges," 2000, <http://wussel.cive.wustl.edu/quake/>
 19. ABAQUS[®], Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Pawtucket, RI, 1996.
 20. MATLAB[®], The Math Works, Inc., Natick, Massachusetts, 1997.
 21. Skinner, R. I., Robinson, W. H., and Mcverry, G. H., *An Introduction to Seismic Isolation*, New York, Wiley, 1993.
 22. Nishitani, A. and Inoue, Y., "Overview of the application of active/semiactive control to building structures in Japan," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, 2001, pp. 1565-1574.
 23. Dyke, S. J. and Spencer, Jr. B. F., "A comparison of semi-active control strategies for the MR damper," *Proceedings of the IASTED International Conference on Intelligent Information Systems*, Bahamas, 1997.
 24. Dyke, S. J., Spencer, Jr. B. F., Sain, M. K., and Carlson, J. D., "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
 25. He, W. L., Agrawal, A. K., and Mahmoud, K., "Control of seismically excited cable-stayed bridge using resetting semiactive stiffness dampers," *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol. 6, No. 6, 2001, pp. 376-384.
 26. Agrawal, A. K., Yang, J. N., and He, W. L., "Performance evaluation of some semiactive control system for a benchmark cable-stayed bridge," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2002, submitted.
 27. Turan, G., "Active Control of a Cable-Stayed Bridge Against Earthquake Excitations," Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.