

복합제어 기법을 이용한 지진하중을 받는 벤치마크 사장교의 제어

Seismic Protection of Benchmark Cable-Stayed Bridge using Hybrid Control Strategy

박규식¹⁾ 정형조²⁾ 이종헌³⁾ 이인원⁴⁾

Park, Kyu-Sik Jung, Hyung-Jo Lee, Jong-Heon Lee, In-Won

요약: 본 연구에서는 사장교의 제어기법 개발을 위한 구조물로 제공되는 벤치마크 사장교에 대해 복합제어 기법을 적용하였다. 본 연구에서 사용된 복합제어 기법이란 수동제어 기법과 능동제어 기법이 결합된 제어방법이다. 수동제어 장치로는 현재 일반적으로 많이 사용되고 있는 납고무받침을 사용하였다. 능동제어 방법에는 H_2/LQG 제어 알고리즘을 사용하였다. 수치해석 결과 제안방법의 성능은 수동제어 기법에 비해 매우 효과적이며, 능동제어 기법에 비해 좀더 좋은 제어성능을 나타내었다. 또한 제한된 복합제어 기법은 수동제어 부분에 능동제어 기법에 비해 좀더 신뢰할 수 있는 제어 방법이다. 따라서 제안된 제어기법은 지진하중을 받는 사장교의 제어를 위해 효과적으로 사용될 수 있다.

ABSTRACT: This paper presents a hybrid control strategy for seismic protection of a benchmark cable-stayed bridge, which is provided as a *testbed* structure for the development of strategies for the control of cable-stayed bridges. In this study, a hybrid control system is composed of a passive control system and an active control system. Conventional base isolation devices such as lead rubber bearings are used for the passive control design. For the active control design, an H_2/LQG control algorithm is adopted. Numerical simulation results show that the performance of the proposed hybrid control strategy is quite effective compared to that of the passive control strategy and slightly better than that of the active control strategy. The hybrid control method is also more reliable than the active control method due to the passive control part. Therefore, the proposed control strategy can effectively be used to seismically excited cable-stayed bridges.

핵심용어: 복합제어 기법, 면진장치, H_2/LQG 제어 알고리즘, 벤치마크 문제, 지진응답 제어
KEYWORDS: Hybrid control strategy, Base isolation device, H_2/LQG control algorithm, Benchmark problem, seismic response control

-
- 1) 한국과학기술원 건설환경공학과, 박사과정
 - 2) 한국과학기술원 건설환경공학과, 연구조교수
 - 3) 경일대학교 토목공학과, 교수
 - 4) 한국과학기술원 건설환경공학과, 교수

1. 서론

지난 몇 십년 동안 지진이나 바람과 같은 자연재해로부터 구조물을 보호하기 위한 많은 제어 방법과 제어장치가 개발되고 연구되어 왔다. 최근 들어 다양한 제어기법을 비교하기 위한 시험구조물로서 벤치마크(benchmark) 제어 문제가 개발되었다(Caughey, 1998). 이러한 벤치마크 제어 문제를 이용하면 연구자들은 다양한 제어 알고리즘, 제어장치, 센서(sensor)등을 특정한 문제에 적용할 수 있고 제어 결과들을 명시된 평가기준(evaluation criteria)을 이용하여 상호간에 직접비교 할 수 있다.

최근 들어 우리나라 뿐만 아니라 세계적으로 사장교의 건설이 증가하고 있는 추세기 때문에 사장교제어에 관한 연구가 필요하게 되었다. 사장교와 같은 유연하고 큰 구조물의 제어는 특이하고 도전적인 문제이다. 이러한 이유 때문에 지진하중을 받는 사장교의 첫 번째 벤치마크 문제가 개발되었다(Dyke *et al.*, 2000). 이 벤치마크 문제는 미국 Missouri, Cape Girardeau에 건설되고 있는 사장교를 기반으로 개발되었다. Cape Girardeau 교량의 상세도면을 기초로 하여 전체규모의 벤치마크 교량의 복잡한 거동을 나타내기 위해 3차원 평가모델(evaluation model)이 개발되었다. 또한 제안된 제어방법의 성능을 평가하기 위해 사장교에 적절한 평가기준과 제어기 설계에 필요한 제약조건이 벤치마크 문제에 포함되어 있다. 본 연구에서는 Dyke 등에 의해서 제공된 벤치마크 교량 모델을 이용하여 지진하중을 받는 사장교에 대한 복합제어 기법의 효용성을 조사하였다. 복합제어 기법이란 지진하중으로 인해 구조물에 발생하는 하중을 줄이기 위한 수동제어 기법과 상판변위와 같은 구조물의 응답을 추가적으로 제어하기 위한 능동제어 기법이 결합된 제어 방법이다.

2. 벤치마크 문제

본 연구에서 고려된 사장교는 2개의 주탑, 128개의 케이블(cable) 그리고 Illinois 진입로

방향의 12개의 추가적인 교각으로 구성되어 있다. Illinois 진입로 부분은 사장교의 동적거동에 미치는 영향이 미비하기 때문에 이 벤치마크 문제에는 포함되어 있지 않다. Cape Girardeau 교량의 상세도면에 기초하여 MATLAB®(MATLAB®, 1997)을 이용해 3차원 유한요소 모델이 개발되었다. 이 모델은 그림 1과 같이 579개의 절점, 420개의 강결 요소, 162개의 보 요소, 134개의 절점질량, 그리고 128개의 케이블 요소로 구성되었다. 주탑은 50개의 절점, 43개의 보 요소, 그리고 74개의 강결 요소로 모델링 되었다.

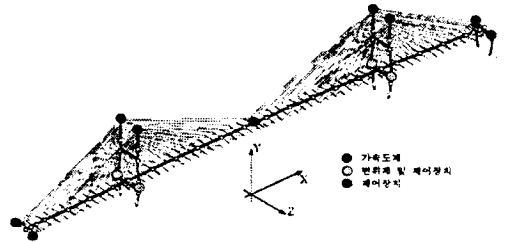


그림 1. Cape Girardeau교의 유한요소모델 및 센서와 제어장치의 위치(Dyke *et al.*, 2000)

벤치마크 문제는 선형 모델을 사용하였으나 모델에 사용된 강성행렬은 사항중에 의한 교량의 변형 상태에서의 비선형 정적해석을 통해 결정되었다(Wilson *et al.*, 1991). 교량이 기반암에 건설되었다고 가정했기 때문에 지반-구조물 상호작용은 무시하였다. ABAQUS®(ABAQUS®, 1996)를 이용해 비선형 정적해석을 수행하고 질량, 강성행렬은 MATLAB®을 이용하여 조합하였다. 그 다음 구속조건이 적용되고 정적 응축(static condensation)을 수행해 419개의 자유도를 가지는 축소차수(reduced-order) 모델을 구성하였다. 감쇠행렬은 교량을 설계할 때와 같은 가정사항인 3%의 모달감쇠(modal damping)를 각 모드(mode)에 적용하여 구성하였다. 원 설계에서는 상판과 주탑의 연결부분에 6.67 MN의 용량을 가지는 16개의 충격전달장치(shock

transmission device)가 설치되었다. 이렇게 구성된 평가모델의 처음 10개의 고유주파수는 0.2899, 0.3699, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203 Hz 이다.

벤치마크 문제에서는 위와 같은 평가모델뿐만 아니라 각 제어방법의 성능을 평가하기 위한 18개의 평가기준이 제시되어 있다.(Dyke *et al.*, 2000). 처음 6개의 평가기준은 제어기법의 성능을 고려하기 위한 교량의 최대응답에 관한 것이며, 두 번째 5개의 평가기준은 전체해석 시간에 대한 평균응답(normed response)에 관한 것이다. 마지막 7개의 평가기준은 제어기 자체에 대한 제약조건에 관한 것이다. 평가기준에 대한 자세한 내용은 Dyke *et al.*(2000)의 논문에 제시되어 있다.

3. 복합제어 기법

본 연구에서는 복합제어 기법의 성능을 조사하기 위해 간단한 수동제어 기법과 능동제어 기법을 사용하였다. 센서로는 가속도계와 변위계가 사용되었다. 수동제어 장치로는 현재 많이 사용되고 있는 납고무받침(lead rubber bearing)을 사용하였다. 복합제어 기법의 능동제어 부분에는 벤치마크 문제에서 전본 제어 알고리즘으로 사용하고 있는 H_2/LQG 제어 알고리즘(Specer *et al.*, 1994; Zhou *et al.*, 1996)을 적용하였다.

3. 센서

그림 1과 같이 센서로는 5개의 가속도계와 4개의 변위계가 사용되었다. 4개의 가속도계는 주탑 꼭대기 부분에 설치되었고, 1개는 상판 가운데에 설치되었다. 2개의 변위계는 두 번째 교각과 상판 사이에 설치 되었으며, 2개는 세 번째 교각과 상판 사이에 설치되었다. 모든 센서는 교축방향의 응답을 측정하고 동적거동은 무시하여 이상적인 센서로 가정하였다(Dyke *et al.*, 2000). 센서들은 다음 식과 같이 모델링 된다.

$$y_s = D_s y_m + v \quad (1)$$

여기서 y_s 는 볼트(volt) 단위로 측정된 절대 가속도와 제어장치의 변위에 해당하는 벡터(vector). y_m 은 물리적인 단위로 측정된 연속적인 절대 가속도와 제어장치의 변위에 해당하는 벡터, 그리고 v 는 rms(root mean square)값으로 0.003 볼트를 가지는 측정 잡음(noise)이다. 센서의 이득(gain) 행렬 D_s 는 다음 식과 같다.

$$D_s = \begin{bmatrix} I_{5 \times 5} G_a & 0 \\ 0 & I_{4 \times 4} G_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $G_a = 0.174 V/(m/sec^2)$ 는 가속도에 대한 센서 이득, $G_d = 30 V/m$ 는 변위에 대한 센서 이득이다.

3.2. 제어장치

3.2.1. 수동제어 장치

여러 가지 하중에 대해 사장교의 응답은 상판과 주탑의 연결형태에 따라 매우 큰 영향을 받는다. 만약 상판이 주탑으로부터 자유롭게 흔들릴 수 있다면 발생하는 지진력은 최소로 되지만 사용하중(사하중, 활하중)하에서는 매우 유연한 상태가 된다. 반대로 상판이 주탑과 강결로 연결되어 있을 경우에는 사용하중하에서는 상판의 거동이 줄어들지만 지진이 발생할 경우 더 큰 지진하중이 구조물에 전달되게 된다. 따라서 상판과 주탑 사이에 적절한 받침을 사용하여 구조물에 전달되는 지진력을 줄이고 구조물의 응답을 줄이기 위해 지진에너지를 흡수하는 것은 매우 중요하다(Iemura *et al.*, 2001). 이를 위해 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용되고 있는 납고무받침을 사용하였다. 고무나 납을 이용한 받침은 간단하면서도 비교적 쉬운 수동제어 장치로 사용되어진다. 납고무받침의 물성치는 일반적으로 많이 사

용되고 있는 추천되는 설계방법을 통해 결정하였다(Ali *et al.*, 1995). 설계과정에서 교대와 교각에 설치된 납고무받침의 소성강성비는 1.0으로 가정하였고 납의 설계 항복 전단력은 0.10M으로 가정하였다. 여기서 M은 받침에 의해서 지지되는 상판의 무게이다. 위와 같은 과정을 통해 본 연구에서는 교대(교각)와 상판사이에 6개의 납고무받침들이 설치되어 총 24개의 납고무받침을 사용하였다. 납고무받침의 물성치는 표 1과 같다. 이 납고무받침들은 기존에 네 번째 교각에 설치된 보 요소의 수평강성을 제거한 후 설치되었으며 등가선형 모델을 사용하였다.

표 1. 납고무받침의 물성치

물성치	물성치값
탄성강성, $k_e(N/m)$	3.571×10^4
소성강성, $k_p(N/m)$	3.139×10^6
유효강성, $k_{eff}(N/m)$	3.970×10^6
납의 항복 변위, $D_p(cm)$	0.765
등가 감쇠비, $\xi_{eq}(\%)$	24.7
납의 설계 항복 전단력, $Q_d(kg)$	2.540×10^4

3.2.2. 능동제어 장치

본 연구에서는 능동제어장치를 설치하기 위해 평가모델에서 충격 전달 장치를 제거하는 대신 벤치마크 문제에서 사용한 총 24개의 가진기(hydraulic actuator)를 사용하였다(Dyke *et al.*, 2000). 평가모델에서 충격 전달 장치가 제거된 구조물의 처음 10개의 고유주파수는 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7094 Hz 이다. 충격 전달 장치가 제거된 평가모델은 상판과 주탑의 연결부분이 자유롭게 거동할 수 있기 때문에 유연한 구조물로 변화하게 된다. 총 24개의 가진기 중, 8개는 두 번째 교각과 상판사이에, 8개는 세 번째 교각과 상판사이에, 4개는 첫 번째 교대와 상판사이에, 4개는 네 번째 교각과 상판사이에 각각 설치하였다. 가진기 하나는 1000 kN의 용량을 가지고 있다. 능동제어 기법에서는 능동제어 장치만을 설치하고 복합제어 기

법에서는 납고무받침이 설치된 교량에 능동제어 기법에서 사용된 가진기를 추가적으로 설치하였다. 가진기의 동적거동은 무시하였으며 이상적인 거동을 한다고 가정하였다. 가진기에서 발생하는 제어력은 다음 식들로부터 구할 수 있다.

$$f = K_f u = G_{dev} D_d u$$

$$= \begin{bmatrix} 2I_{2 \times 2} & 0 & 0 \\ 0 & 4I_{4 \times 4} & 0 \\ 0 & 0 & 2I_{2 \times 2} \end{bmatrix} D_d u \quad (3)$$

$$y_f = D_d u = D_d I_{8 \times 8} u \quad (4)$$

여기서 f 는 구조물에 작용하는 제어력, y_f 는 제어장치 모델의 연속적인 제어력 벡터, $D_d = 100 kN/V$ 는 제어장치 이득, 그리고 K_f 는 원하는 제어력과 볼트사이의 이득 행렬이다.

3.3. 제어설계모델

제어기 설계를 위해서 평가모델에 기초하여 30개의 상태(state)를 가지는 축소차수 모델을 구성하였다. 이 모델은 balanced realization과 상대적으로 중요도가 작은 controllability grammian과 observability grammian을 가진 상태를 응축하여 구성하였다(Laub *et al.*, 1987). 결과적인 구조물의 상태공간 방정식은 다음 식들과 같다.

$$\dot{x}_d = A_d x_d + B_d u + E_d \ddot{x}_g \quad (5)$$

$$z = C_d^z x_d + D_d^z u + F_d^z \ddot{x}_g \quad (6)$$

$$y_s = D_s (C_d^y x_d + D_d^y u + F_d^y \ddot{x}_g) + v \quad (7)$$

여기서 x_d 는 설계 상태 벡터, A_d, B_d, E_d 는 설계 시스템 행렬, \ddot{x}_g 는 지반 가속도, u 는 입력 제어신호, 그리고 z 는 평가출력값(주탑에

서의 전단력과 모멘트, 상판변위, 케이블 장력 등)을 포함한 제어된 출력, C^z_d, D^z_d, F^z_d 는 설계 모델에서 제어된 출력 시스템 행렬, C^y_d, D^y_d, F^z_d 는 설계 모델에서 측정된 출력 시스템 행렬이다.

3.4. 제어 알고리즘

본 연구에서는 복합제어 기법의 능동제어 부분을 위해 H_2/LQG 제어 알고리즘을 사용하였다. 지반가속도는 stationary white noise로 생각하여 다음과 같은 가격함수(cost function)을 선택하였다.

$$J = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} E \left[\int_0^{\tau} (z^T Q z + u^T R u) dt \right] \quad (8)$$

여기서 R 은 8차의 단위행렬의 제어력가중 행렬, 그리고 Q 는 응답가중 행렬이다. 측정 잡음은 일정하게 분포되어 있다고 가정하고 통계적으로 독립인 Gaussian white noise process로 가정하였다. 그리고 입력지진과 측정잡음의 autospectral density 함수비는 25로 가정하였다.

H_2/LQG 제어 알고리즘을 사용할 경우 제어 성능은 응답가중 행렬에 많은 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 최대응답 접근방법을 사용하여 최적 응답가중 행렬 Q 를 결정하였다. 최적 응답가중 행렬을 구하기 위해 표 2와 같은 응답을 선택하였다.

표 2. 최적 응답가중 행렬 산정을 위해 선택된 응답

응답	가중변수
교각 2, 3의 밀면 전단력	Q_{bs}
교각 2, 3의 상판 높이의 전단력	Q_{sd}
교각 2, 3의 전도모멘트	Q_{om}
교각 2, 3의 상판 높이의 전단력	Q_{md}
교대 1과 교각 4의 상판 변위	Q_{dd}
주탑 1, 2의 꼭대기 변위	Q_{td}

각 가중변수들의 최적값을 구하기 위해 가중변수

들을 증가시켜가면서 최대응답을 구하였다. 그림 2는 능동제어 기법에서 각 가중변수에 따른 구조물의 최대응답을 나타낸 것이다. 이 그림의 결과는 제어하지 않은 경우의 결과로 정규화(normalize)하였다.

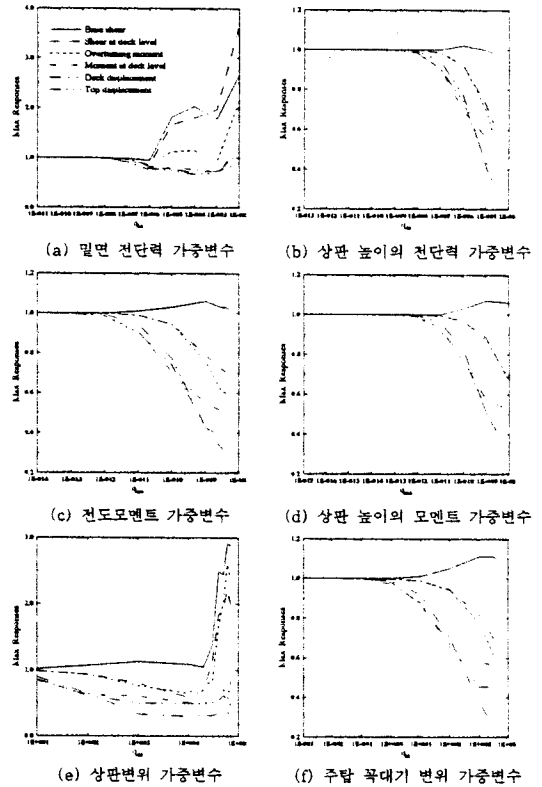
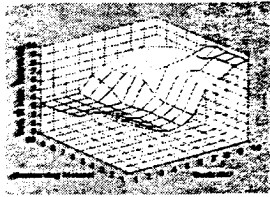
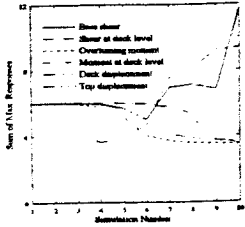


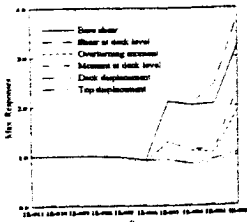
그림 2. 가중변수에 따른 구조물의 최대응답 변화-능동제어 기법

그림 3(a)에서와 같이 능동제어 시스템의 경우 상판 높이의 전단력 가중변수, 전도모멘트 가중변수, 상판변위 가중변수가 다른 가중변수보다 최대응답이 더 많이 줄어드는 것을 알 수 있다. 위의 세 개의 가중변수 중 구조물의 부재력과 변위에 해당하는 가중변수의 조합이 타당하기 때문에 전도모멘트 가중변수와 상판변위 가중변수를 동시에 변화시켜 가면서 그림 3(b)와 같이 3차원 해석을 통해 최적 응답가중 변수의 값을 결정하였다. 복합제어 기법에서 각 가중변수에 따른 구조

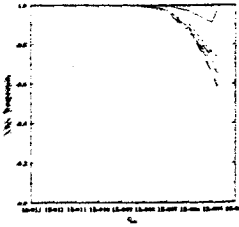
물의 최대응답은 그림 4와 같고 결과는 수동제어 된 결과로 정규화하였다. 능동제어 기법의 경우와 마찬가지로 전도모멘트 가중변수와 상판변위 가중변수를 동시에 변화시켜 가면서 그림 5(b)와 같은 3차원 해석을 통해 최적 응답가중 변수의 값을 결정하였다.



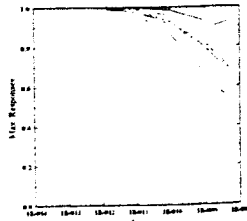
(a) 가중변수에 따른 최대응답의 합
(b) 선택된 두 개의 가중변수에 대한 3차원 해석
그림 3. 최적 가중변수의 선택-능동제어 기법



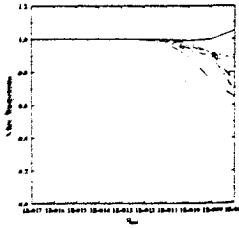
(a) 밀면 전단력 가중변수



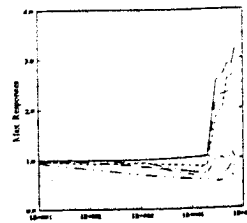
(b) 상판 높이의 전단력 가중변수



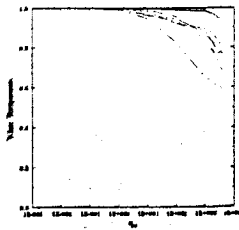
(c) 전도모멘트 가중변수



(d) 상판 높이의 모멘트 가중변수

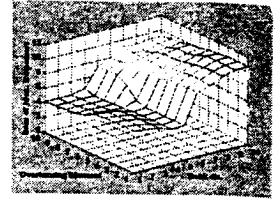
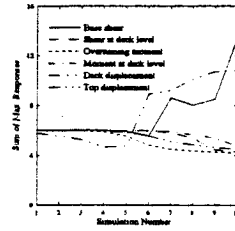


(e) 상판변위 가중변수



(f) 주탑 꼭대기 변위 가중변수

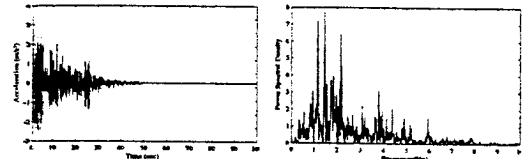
그림 4. 가중변수에 따른 구조물의 최대응답 변화-복합제어 기법



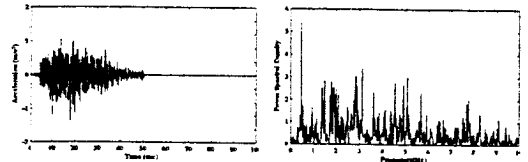
(a) 가중변수에 따른 최대응답의 합
(b) 선택된 두 개의 가중변수에 대한 3차원 해석
그림 5. 최적 가중변수의 선택-복합제어 기법

4. 수치해석 결과

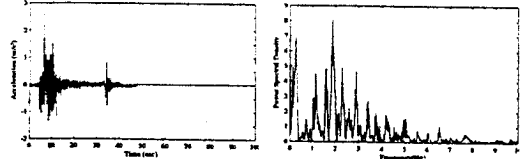
복합제어 기법의 효과를 검증하기 위해 El Centro, Mexico City, Gebze 3개의 역사적인 지진을 이용해 수치해석을 수행하였다. 이 3개의 지진은 다양한 특성을 가진 지진으로서 각 제어 기법의 효과를 검증하기에 적절한 지진들이다. 각 지진들의 시간이력곡선과 Power spectral density는 그림 6과 같다.



(a) El Centro(1940) 지진



(b) Mexico City(1985) 지진



(c) Gebze(1990) 지진

그림 6. 수치해석에 사용된 지진의 시간이력곡선과 Power spectral density

복합제어된 결과는 수동제어와 능동제어된 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용된 최적 응답가중 행렬은 다음과 같다.

능동제어 기법

$$Q_{om, dd} = \begin{bmatrix} q_{om} I_{4 \times 4} & 0 \\ 0 & q_{dd} I_{4 \times 4} \end{bmatrix}$$

$$q_{om} = 4 \times 10^{-9}, q_{dd} = 1 \times 10^4$$

복합제어 기법

$$Q_{om, dd} = \begin{bmatrix} q_{om} I_{4 \times 4} & 0 \\ 0 & q_{dd} I_{4 \times 4} \end{bmatrix}$$

$$q_{om} = 5 \times 10^{-9}, q_{dd} = 1 \times 10^3$$

표 3에서 5까지는 18개의 평가기준을 나타낸 것이다. 수동제어 기법의 경우 전체적으로 제어하지 않은 경우보다 응답이 감소하는 반면 상판변위가 상대적으로 증가하였다. 하지만 고려된 세 개의 지진에 대해 상판변위는 허용범위(30 cm, Turan, 2001)내에 있다. 수동제어 기법에서 증가된 상판변위는 복합제어 기법에서 추가적인 능동제어 장치 때문에 최대 56%, 최소 48%가 감소하였다. 상판변위 뿐만 아니라 최대응답($J_1 \sim J_6$)의 경우 최대 56%(El Centro, J_6), 최소 5%(Mexico City, J_1)가 감소하였고, 평균응답($J_7 \sim J_{11}$)의 경우 최대 49%(Gebze, J_{10}), 최소 11%(Mexico City, J_7)가 감소하였다. 능동제어 기법에 비해서는 최대응답의 경우 최대 22%(Gebze, J_2) 감소하였고 최대 12%(Mexico City, J_5)가 증가하였다. 평균응답의 경우 최대 10%(Mexico City, J_9)가 감소하였고 최대 17%(Gebze, J_{11})가 증가하였다. 최대응답과 평균응답 중 복합제어 기법을 사용할 경우 능동제어 기법에 비해 최대 10개의 응답이 감소, 최대 4개의 응답이 증가하였고 증가량에 비해 감소량이 더 크다.

각 제어기법이 능동제어 장치의 제약조건을 만족하는가를 알아보기 위해 각 지진에 대해 제어장치의 최대힘, 최대 stroke, 최대속도를 표 7에 나타냈다. Dyke 등에 의해 제공된 제어장치의 최대힘, 최대 stroke, 최대속도는 각각 1000 kN, 0.2 m, 1 m/sec 이다(Dyke et al.,

2000). 표 7에서와 같이 능동제어 기법과 복합제어 기법 모두 능동제어 장치의 제약조건을 만족하며 복합제어 기법의 경우가 더 작은 값을 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물에 전달되는 지진하중을 줄이기 위한 수동제어 시스템과 상판변위와 같은 교량의 응답을 추가적으로 감소시키기 위한 능동제어 시스템으로 구성된 복합제어 기법을 사장교의 벤치마크 문제에 적용하여 그 효용성을 알아 보았다. 제안된 제어기법은 수동제어 부분을 위해 일반적으로 사용되는 납고무받침을 사용하였으며, 능동제어 부분을 위해서는 H_2/LQG 제어 알고리즘을 사용하였다. 수치해석 결과 제안된 복합제어 기법은 수동제어 기법에 비해 추가적인 능동제어 장치 때문에 최대응답의 경우 최대 56%가 감소하였고, 평균응답의 경우 최대 49%가 감소하였다. 능동제어 기법에 비해서는 최대응답의 경우 최대 22%가 감소하였고, 평균응답의 경우 최대 10%가 감소하였다. 또한 복합제어 기법은 수동제어 부분 때문에 능동제어 기법에 비해 좀더 신뢰성이 높다. 따라서 제안된 제어기법은 지진하중을 받는 사장교의 제어에 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 한국과학기술부의 국가 지정연구실 지원 (과제번호: 2000-N-NL-01-CL-251)으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.