

# 퍼지관리제어기법의 강인성능평가

## Evaluation of Robust Performance of Fuzzy Supervisory Control Technique

옥 승 용\*  
Ok, Seung-Yong

박 관 순\*\*  
Park, Kwan-Soon

고 현 무\*\*\*  
Koh, Hyun-Moo

### 국문요약

지진응답제어를 위한 효율적 방법으로 제시된 퍼지관리제어기법은 퍼지에 기반한 의사결정과정을 통하여 가변 제어이득행렬을 구현함으로써 하나의 제어이득만으로 표현되는 선형제어기법보다 개선된 제어성능을 발휘할 수 있다. 이 논문에서는 퍼지관리제어기법의 효율성을 하중 및 교량모델의 불확실성에 대한 제어성능의 강인성 측면에서 평가하였다. 강인성 평가에 있어서는 Dyke 등이 제시한 벤치마크 교량에 대하여, 최적설계된 LQG기법과 제어성능을 비교하는 방법을 사용하였다. 불확실성을 주는 요인으로는 주파수 특성이 다른 여러 지진가속도의 규모 및 교량의 강성변화를 가정하였다. 최적설계된 LQG 제어기와 제어효과를 비교한 결과, FSC시스템이 지진의 종류와 규모에 따라 보다 작은 전력을 사용하면서도 개선된 제어성능을 발휘하였다. 특히, LQG 제어시스템이 강성변화에 대하여 불안정한 제어성능을 보인 반면, FSC 시스템은 매우 안정적인 응답제어효과를 보이면서도 제어시스템에 소요되는 전력량과 제어장치의 스트로크에 있어서도 큰 변화를 보이지 않음으로써 매우 탁월한 강인성을 보장할 수 있는 것으로 나타났다.

**주요어 :** 강인성능, 퍼지관리제어기법, 지진응답제어, 제어성능

### ABSTRACT

Using the variable control gain scheme on the basis of fuzzy-based decision-making process, Fuzzy supervisory control (FSC) technique exhibits better control performance than linear control technique with one static control gain. This paper demonstrates the effectiveness of the FSC technique by evaluating the robust performance of the FSC technique under the presence of uncertainties in the models and the excitations. Robust performance of the FSC system is compared with that of optimally designed LQG control system for the benchmark cable-stayed bridge presented by Dyke et al. Parameter studies on the robust performance evaluation are carried out by varying the stiffness of the bridge model as well as the magnitudes of several earthquakes with different frequency contents. From the comparative study of two control systems, FSC system shows the enhanced control performance against various magnitudes of several earthquakes while maintaining lower level of power required for controlling the bridge response. Especially, FSC system clearly guarantees the improved robust performance of the control system with stable reduction effects on the seismic responses and slight increases in total power and stroke for the control system, while LQG control system exhibits poor robust performance.

**Key words :** robust performance, fuzzy supervisory control technique, seismic response control, control performance

## 1. 서 론

사장교 및 현수교와 같은 케이블 지지형식의 교량은 데크-케이블-주탑의 연결구조로 인하여 하중전달 메카니즘이 다소 복잡하며, 기존 교량에 비하여 긴 경간장으로 인하여 상대적으로 유연하면서 감쇠비가 낮은 것이 일반적이다.<sup>(1)-(3)</sup> 따라서 이러한 교량은 바람이나 지진 등 동적하중으로 인한 진동문제에 대단히 취약한 구조적 특징을 가진다. 이러한 진동문제를 해결하기 위한 노력의 일환으로 진동제어시스템에 관한 많은 연구가 이루어졌으며, 다수의 연구자들에 의하여 효과적인 제어시스템 및 제어알고리즘이 제시된 바가 있다.<sup>(4)-(9)</sup> 이러한 제어시스템은 제어기의 설계과정에서 실제 구조물을 수학적으로 모델링하고 이를 대상으로 제어를 설계하게 된다. 그러나 물리법칙이나 공학적 이론에 의하여 구성된 수학적 모델은 어디까지나 실제 시스템에 대한 불완전한 묘사이므로 모델링오차를 고려하지 않은 제어기 설계는 때때로

제어시스템의 설치에도 불구하고 만족스러운 효과를 얻지 못할 뿐만 아니라 구조물 자체를 불안정하게 할 수도 있다. 또한 가지 간과할 수 없는 것은 비록 설계된 구조물의 해석을 위한 수학적 모델링이 비교적 정확하였다 하더라도 시공과정에서의 오차로 인하여 구조물의 동특성이 변경되어 설치된 제어시스템이 올바른 성능을 발휘하지 못할 가능성도 존재할 수 있다는 점이다. 따라서 제어시스템은 이러한 구조물의 모델링변화에 따른 불확실성에 대하여 일정 수준의 강인성능(robust performance)을 확보할 수 있어야 한다.<sup>(10),(11)</sup> 또한, 사장교와 같이 모드 특성이 인접하면서 연계(couple)되어 있는 경우에는 지진하중의 주파수 특성 및 지진규모에 따라 그 응답특성이 매우 상이할 수 있으므로, 개발한 제어이론에 대한 강인성 평가가 필요하다고 하겠다.

한편, Park 등<sup>(12)</sup>은 지진하중을 받는 사장교의 응답제어 기법으로서 기존의 선형제어이론과 퍼지이론을 접목한 퍼지관리제어(Fuzzy Supervisory Control, FSC) 기법을 제시하였다. 이 방법은 몇 개의 효과적인 제어이득으로부터 퍼지추론과정에 기반한 의사결정과정을 통하여 변화하는 제어이득을 구현함으로써 다양한 지진응답에 보다 효과적으로 대처할 수 있도록 고안되었다. 이처럼 변화하는 제

\* 서울대학교 교량설계해석기술연구단 선임연구원·공학박사

\*\* 정희원·동국대학교 건축공학과 조교수(대표저자, E-mail:kpark@dongguk.edu)

\*\*\* 정희원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시기 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 6. 30 / 심사종료일 : 2005. 9. 8)

어이득을 이용한 제어기법은 기존의 선형최적제이론과 같이, 하나의 정적 제어이득을 이용하는 경우에 확보하지 못할 수 있는 시스템의 모델링 오차 및 하중의 불확실성에 따른 제어시스템의 강인성능을 더욱 잘 보장해 줄 수 있을 것으로 판단되나, 이에 대한 정량적 연구는 이루어지지 않았다. 따라서, 이 연구에서는 시스템 모델링 오차 및 하중의 불확실성에 대한 매개변수연구를 통하여 FSC 기법의 강인성능을 검증하고자 하였다. 시스템의 모델링 오차로는 교량모델의 강성변화를, 하중의 불확실성으로는 추가적인 지진 및 지진규모를 매개변수로서 고려하였다.

## 2. 사장교 모델 및 퍼지관리제어기법

### 2.1 사장교 모델

이 연구에서 고려하는 대상 교량은 Missouri 주의 Cape Girardeau 부근에 건설된 Bill Emerson Memorial 교량으로서 Dyke 등<sup>(13)</sup>에 의하여 제시된 Benchmark 제어 문제의 예제교량이다. 이 교량은 636m의 총 경간장이 중앙 경간장 350.6m와 양측 경간장 142.7m로 구성된 콘크리트 사장교로서 각각 100m, 105m의 H형 주탑과 128개의 케이블에 의하여 지지된다. 이 교량이 위치한 지역은 미국 AASHTO Specification<sup>(14)</sup>에서 규정하고 있는 New Madrid Seismic Zone으로서 지반가속도는 약 0.3g 규모에 해당한다. 교량의 설계단계에서 검토한 바로는 지진하중을 포함한 하중조합이 지배하중으로 평가되었기에, 교축 종방향으로 작용하는 지진하중에 대한 교량의 동적 응답해석을 수행하였다.

사장교 모델은 총 579개의 절점을 갖는 3차원 유한요소모델로서, 162개의 보 요소, 128개의 케이블 요소, 420개의 강결 요소 및 134개의 절점에 집중질량을 사용하고, 구조해석프로그램인 ABAQUS<sup>®(15)</sup>를 이용하여 교량의 시공단계별 사하중을 고려한 비선형정적해석을 통하여 모델링되었다. 이로부터 구성된 질량행렬 및 강성행렬은 효

율적인 해석을 위해 정적응축(static condensation)방법을 적용하여 419개 자유도를 갖도록 구성되었다. 이에 대한 교량시스템의 운동방정식은 식 (1)로 표현된다.

$$\hat{M}\ddot{\hat{U}} + \hat{C}\dot{\hat{U}} + \hat{K}\hat{U} = -\hat{M}\hat{\Gamma}\ddot{x}_g + \hat{\Lambda}u \quad (1)$$

여기서,  $\hat{M}$ ,  $\hat{C}$ ,  $\hat{K}$ 는 각각 [419×419] 크기의 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타내고,  $\hat{\Gamma}$ 은 지반가속도  $\ddot{x}_g$ 에 대한 위치벡터로서 [419×1] 크기의 1벡터이며,  $\hat{\Lambda}$ 은 제어력벡터  $u$ 에 대한 위치벡터로서 [419× $m$ ] 크기의 행렬이다. 여기서  $m$ 은 제어장치의 개수와 설치위치에 따라 결정된다. 그리고,  $\hat{U}$ ,  $\dot{\hat{U}}$ ,  $\ddot{\hat{U}}$ 은 각각 변위, 속도 및 가속도벡터를 나타낸다.

원 교량시스템은 데크의 과도한 수평변위를 제한시키기 위하여 데크와 주탑간에 STU(shock transmission unit)를 사용하고 있으며, 이 때의 저차 10개 모드에 대한 주파수는 0.2899, 0.6399, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203(Hz)이고 감쇠는 모든 모드에 3%의 감쇠비를 가정하였다. 제어시스템의 성능평가를 위해서는 데크와 주탑간의 연결을 제어장치가 대체하므로 STU를 장착하지 않은 유연한 교량모델에 대하여 제어시스템을 설계하게 되며, 이 때의 교량모델에 대한 저차 10개 모드의 고유주파수는 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7094(Hz)이다.

### 2.2 제어시스템의 구성

일반적인 능동제어시스템은 크게 외부교란에 의한 구조물의 응답을 감지하거나 외부교란 특성을 감지하는 센서(sensor)와 매 순간 필요한 최적 제어력을 결정하는 제어 알고리즘 및 결정된 제어력을 구조물에 가해주는 제어장치로 구성된다. 그림 1은 이 연구에서 적용하고 있는

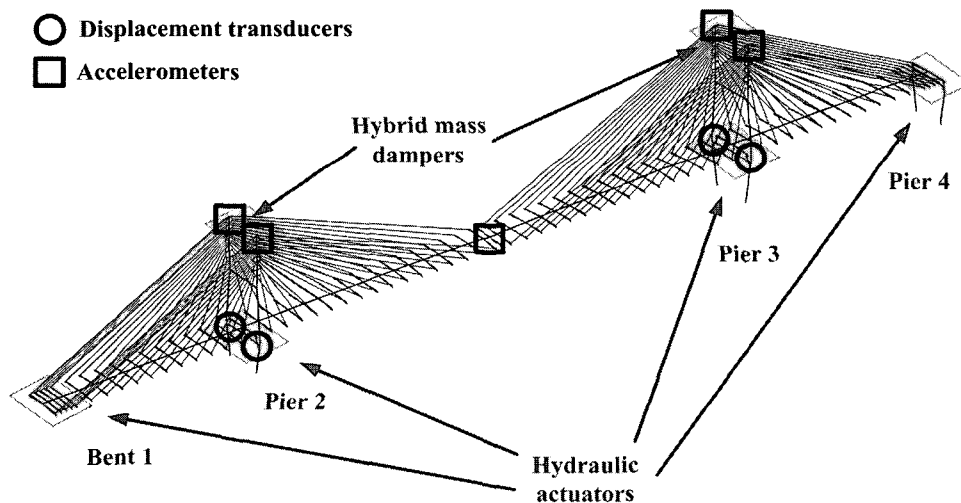


그림 1 제어시스템의 설치 개략도

제어시스템의 설치 개략도로써 제어장치 및 센서의 설치 상황을 나타내고 있다. 하중을 전달하는 제어장치는 총 24개의 유압식 하중재하기(hydraulic actuator)와 4개의 복합형 질량감쇠기(hybrid mass damper, HMD)를 각각 교각 및 주탑과 데크의 연결부와 주탑의 상단에 설치하였다. 이들의 최대 용량은 실제 가능한 용량을 고려하여 1000kN으로 가정하였으며, HMD의 역학적 모델을 고려하여 419 자유도의 교량모델은 423 자유도의 교량모델로 재구성하였다. 또한, 제어기에 되먹임(feedback)되는 센서의 측정정보는 주탑 상부 및 데크 중앙에 5개의 가속도계를, 데크-교대 및 데크-교각간 상대변위를 측정하기 위한 4개의 변위계를 사용하는 것으로 하였다.

제어시스템의 설계를 위해서는 상태공간방정식으로서의 변환이 요구되며, 먼저 상태벡터(state vector)를 식 (2)와 같이 정의함으로써 식 (3)의 상태공간방정식(state-space equation)을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \\ \hat{\dot{\mathbf{U}}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_e \mathbf{x} + \mathbf{B}_e \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서,  $\mathbf{A}_e$ 와  $\mathbf{B}_e$ 는 각각 시스템행렬(system matrix)과 입력행렬(input matrix)로서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{K}} & -\hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\mathbf{C}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\hat{\Gamma} & \hat{\mathbf{M}}^{-1}\hat{\Lambda} \end{bmatrix} \quad (4)$$

그리고 응답의 평가를 위한 출력벡터  $\mathbf{y}_e$ 와 센서로부터 측정되는 측정벡터  $\mathbf{y}_m$ 은 사상행렬(mapping matrix)  $\mathbf{C}_e, \mathbf{D}_e, \mathbf{C}_m, \mathbf{D}_m$ 을 도입하여 식 (5)와 (6)으로 정의하였다. 벤치마크 제어문제(13)에서는 출력벡터 및 측정벡터를 구성하는 응답에 따라 사상행렬  $\mathbf{C}_e, \mathbf{D}_e, \mathbf{C}_m, \mathbf{D}_m$ 을 적절히 결정할 수 있다.

$$\mathbf{y}_e = \mathbf{C}_e \mathbf{x} + \mathbf{D}_e \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{C}_m \mathbf{x} + \mathbf{D}_m \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{x}}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 2.3 퍼지관리제어기법(Fuzzy Supervisory Control Technique)

퍼지관리제어기법은 개별적 제어목적에 갖는 하위제어기들(sub-controllers)과 각 하위제어기들로부터 산출된 제어력을 매 순간 조절하는 상위관리자(supervisor)의 계층적 구조를 갖는다. 하위제어기들은 서로 독립적으로 구성되며, 상위관리자는 퍼지이론을 이용하여 각 하위제어

기들의 참여율을 구조물의 응답정보에 따라 실시간으로 조정하는 역할을 담당한다. 여기서는 하위제어기 및 퍼지관리자의 설계방법에 대하여 간략히 기술한다.

#### 2.3.1 하위제어기(Sub-Controller)

이 연구에서 적용한 하위제어기의 설계방법으로는 기존에 사용되는 대표적 선형 최적제어기법인 LQG(linear quadratic gaussian) 제어방법을 사용하였다. 이는 한정된 수의 센서로부터 구조물의 응답을 추정할 수 있는 추정기(estimator)와 제어이득행렬을 구성하는 제어기(controller)로 구성되며, 각각은 분리원칙(separation principle)<sup>(16),(17)</sup>에 따라 독립적으로 설계된다. 이 방법에 의하여 결정되는 제어력  $\mathbf{u}(t)$ 는 되먹임방법(feedback scheme)에 의하여 식 (7)로서 표현된다.

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}_u \hat{\mathbf{x}}_r(t) \quad (7)$$

여기서,  $\mathbf{K}_u$ 는 제어이득행렬이며,  $\hat{\mathbf{x}}_r(t)$ 는 추정기로부터 얻어지는 구조물의 응답  $\mathbf{x}(t)$ 의 추정이다.

제어이득행렬을 결정하는 제어기 및 구조물의 응답 추정벡터를 결정하는 추정기의 구체적 설계방법은 Park 등<sup>(12)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

하위제어기는 제어대상이 되는 목표응답(제어변수)만을 최소화하도록 독립된 제어기들로 구성된다. 사장교는 크게 주탑, 데크 및 케이블에 의하여 지지되므로, 하위제어기의 설계에 있어서의 제어변수로는 주탑하부의 전단력과 휨모멘트, 주탑 상부의 수평변위 및 데크의 수평변위, 그리고 케이블 장력의 5가지 응답들을 고려하였다. 주탑하부의 전단력과 휨모멘트는 주탑 하단부에서의 부재 저항력을 의미하므로, 이 연구에서는 하나의 제어기설계에 동시에 반영되어 총 4개의 하위제어기를 설계하였다. 이들은 각각 주탑하부의 전단력과 휨모멘트를 효과적으로 제어하는 하위제어기, 주탑 상부의 수평변위를 효과적으로 제어하는 하위제어기, 데크의 수평변위를 우선적으로 제어하는 하위제어기, 케이블 장력을 최소화하는 하위제어기가 되며, 해당하는 하위제어기별로 식 (7)의 제어이득행렬을 각각  $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \mathbf{K}_3, \mathbf{K}_4$ 로 표기한다. 이러한 하위제어기는 독립된 목적함수로서 구성되므로, 원칙적으로 각 제어변수에 가장 효과적이며 다른 제어변수에 대하여는 비교적 제어성능이 감소하게 된다.<sup>(18)</sup>

#### 2.3.2 퍼지관리자(Fuzzy Supervisor)

퍼지관리자는 추정기에 의하여 결정되는 구조물의 응답정보로부터 매 순간 구조물의 응답상태를 판별하여 앞서 결정된 4개의 하위제어기를 어떻게 조절할 것인지를 결정하게 된다. 이러한 퍼지관리자의 조절은 각 하위제어기의 참여율을 결정하는 과정이며, 매 순간 이루어지므로 연속적으로 변화하는 제어이득행렬을 구현하게 된다. 이

때, 최종적인 제어력  $\mathbf{u}^{tuned}(t)$ 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{u}^{tuned}(t) = \sum_{i=1}^4 \mathbf{u}_i^{tuned}(t) = \sum_{i=1}^4 \alpha_i(t) \mathbf{u}_i(t) = \sum_{i=1}^4 [-\alpha_i(t) \mathbf{K}_i \hat{\mathbf{x}}_r(t)] \quad (8)$$

여기서,  $\mathbf{K}_i$ 는  $i$ 번째 하위제어기의 제어이득행렬이며,  $\alpha_i(t)$ 는 퍼지관리자에 의하여 결정되는  $i$ 번째 하위제어기의 참여율로서 항상 0~1의 값이다.

따라서 첫 번째 하위제어기에 대해서 퍼지관리자는 주탑하부의 전단력과 휨모멘트가 증가할 때 이를 효율적으로 저감시키기 위하여  $\mathbf{K}_1$  제어이득을 크게 함으로써 그 참여율을 증가시키게 된다. 또한, 케이블 장력이 크게 발생하면, 케이블 장력을 효율적으로 저감시키도록 제어기를 구현하기 위하여 참여율  $\alpha_4$ 를 증가시킴으로써  $\mathbf{K}_4$  제어이득에 의한 제어효과를 증가시키게 된다. 그러므로 퍼지관리자는 하위제어기의 제어변수를 입력정보로, 해당하는 하위제어기의 참여율을 출력정보로 하는 퍼지연산자가 되며, 각 하위제어기별로 4개의 퍼지튜너(fuzzy tuner)로 구성된다. 첫 번째 퍼지튜너는 주탑하부의 전단력과 휨모멘트의 두 가지 응답을 입력정보로,  $\mathbf{K}_1$ 의 참여율  $\alpha_1$ 을 출력정보로 하며, 나머지 3개의 퍼지튜너는 각각 주탑 상부 수평변위, 데크의 수평변위, 케이블 장력을 입력정보로, 각 하위제어기( $\mathbf{K}_i$ )의 참여율  $\alpha_i$ 을 출력정보로 한다. 각 퍼지튜너는 퍼지이론에 따라 퍼지화(fuzzification) 과정, 추론엔진(inference engine) 및 비퍼지화(defuzzification) 과정으로 구성되며, 각 과정은 입력소속함수(input membership function), 퍼지규칙표(fuzzy rule table), 그리

고 출력소속함수(output membership function)를 구성 요소로서 갖는다<sup>(19)</sup>.

입력 소속함수는 입력정보에 대하여 물리적인 의미를 갖는 여러 개의 퍼지변수들에 따라 정의하는데, 이 연구에서는 그림 2와 같이 각 제어변수의 입력크기에 대하여 [I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI]의 11개 퍼지변수를 사용하여 소속함수의 범위를 결정하였다. 추론엔진은 미리 결정된 퍼지규칙에 따라 퍼지화 과정을 통하여 결정되는 입력 퍼지값들을 출력 퍼지값으로 변환시켜주는 역할을 한다. 여기서는  $i$ 번째 하위제어기의 참여율이 되므로 [0~1]의 범위내에서 11개의 퍼지변수를 사용하여 정의하였다. 또한, 퍼지규칙표로는 입력크기의 절대값이 클수록 제어이득의 참여율을 높일 수 있도록 구성하였으며, 4개의 하위제어기에 대하여 표 1과 표 2로서 정의하였다. 첫 번째 하위제어기는 2개의 입력정보를 가지므로 그림 3과 같은 fuzzy rule surface로서 표현될 수

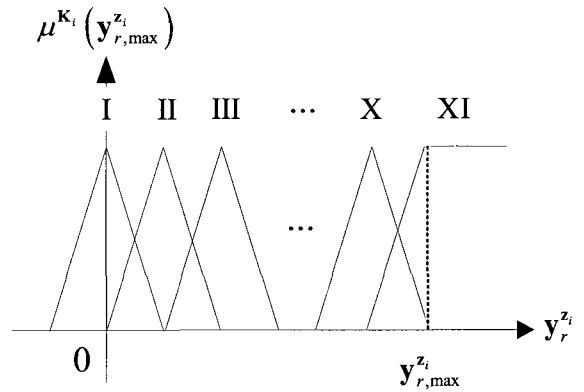


그림 2 입력소속함수

표 1  $K_1$  하위제어기의 퍼지규칙표

$\tilde{\alpha}^{K_1}$		$\tilde{y}_r^{z_{1,bs}}$											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	
$\tilde{y}_r^{z_{1,bs}}$	I	I	I	II	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI
	II	I	II	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VI
	III	II	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VI	VII
	IV	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VII
	V	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII
	VI	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII
	VII	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	VIII	IX
	VIII	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	IX
	IX	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	IX	X
	X	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	IX	X	X
	XI	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	IX	X	X	XI

표 2  $K_1, K_2, K_3$  하위제어기의 퍼지규칙표

$i = 2, 3, 4$	$\tilde{y}_r^{z_i}$										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
$\tilde{\alpha}^{K_i}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI

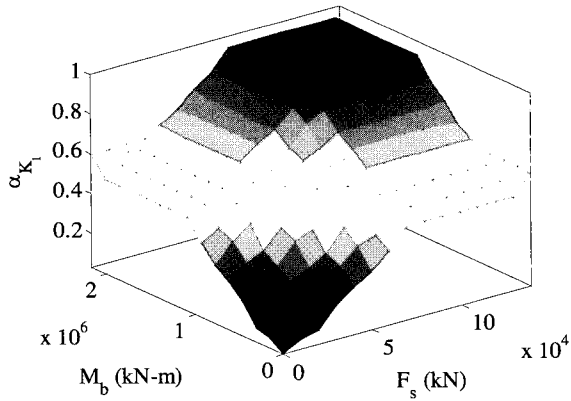


그림 3  $K_1$  하위제어기의 Fuzzy rule surface

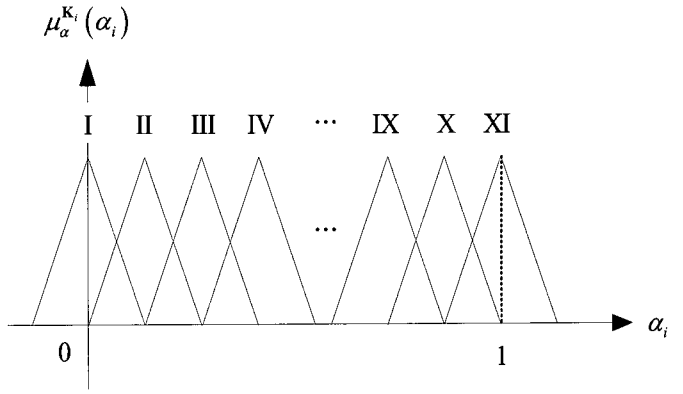


그림 4 출력소속함수

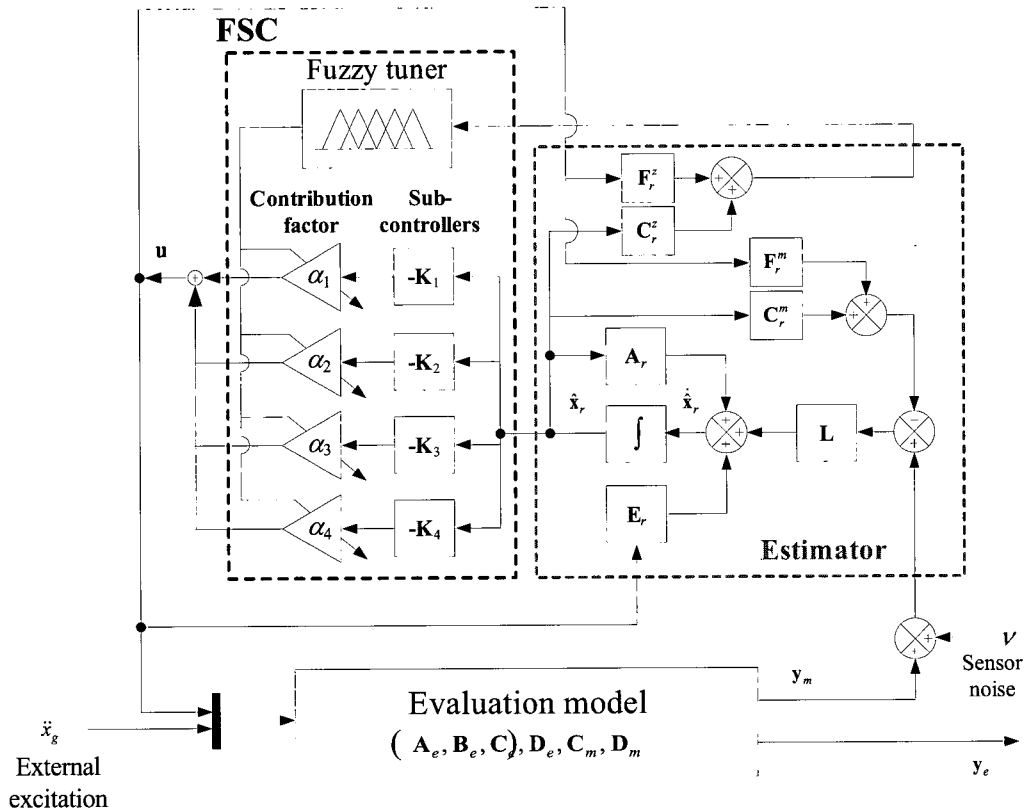


그림 5 퍼지연산과정

있다. 마지막 단계인 비퍼지화 과정은 추론과정에서 전제들 간의 논리적 연산에 의해 결정된 출력값을 물리적인 의미를 갖는 출력정보로 역환산하는 과정으로서, 그림 4와 같이 출력 소속함수를 정의하였다. 여기서 수직축은 추론과정에서 수행된 전제들 간의 논리적 연산을 통하여 결정되는 출력 퍼지값이며, 수평축은 출력 퍼지값으로부터 퍼지추론엔진 과정에서 구해지는 각 하위제어기의 참여율로서 양의 값을 가지게 된다. 따라서 최종적인 퍼지관리제어시스템은 그림 5에 제시되는 블록선도로 표현될 수 있다.

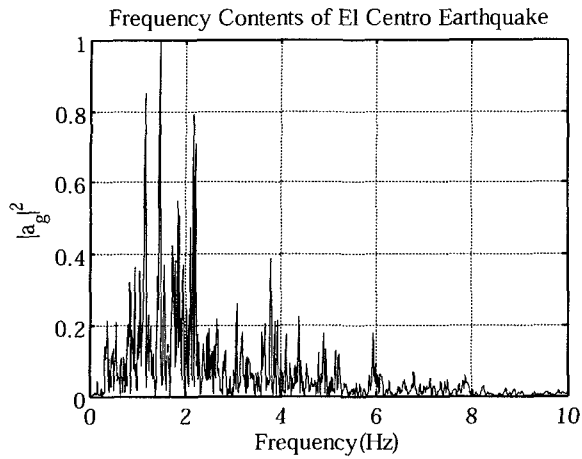
### 3. 퍼지관리제어시스템의 강인성능 평가

제시하는 퍼지관리제어시스템의 강인성능을 비교하기 위한 제어기로는 Park 등<sup>(12)</sup>에서 최적 설계되어 제시된

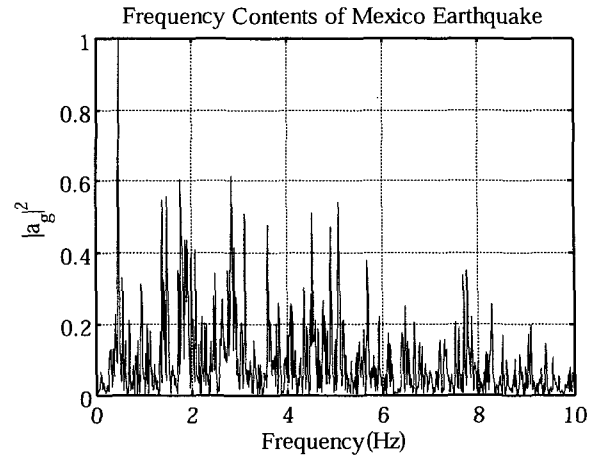
LQG 제어기를 고려하였다. 퍼지관리제어기와 LQG 제어기의 강인성능은 입력지진하중 및 교량모델의 불확실성에 따른 결과를 비교 평가하였다.

#### 3.1 하중의 불확실성에 따른 강인성능

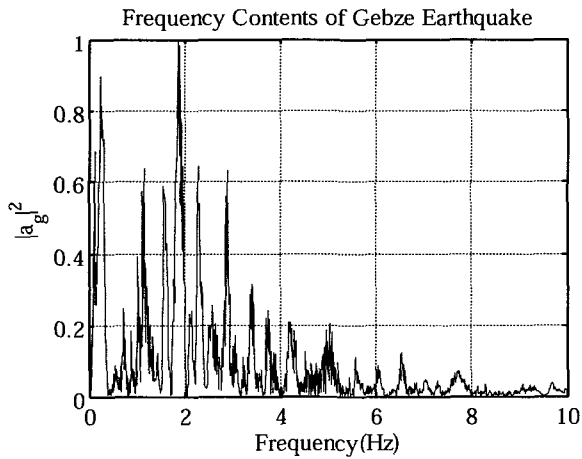
하중의 불확실성으로는 입력지진 하중의 주파수 특성과 지진규모의 변화를 고려할 수 있다. 지진하중의 주파수 특성은 벤치마크 제어문제에서 제시하고 있는 3가지 역사지진뿐만 아니라 Kobe 지진(1995), Hachinohe 지진(1968), Taft 지진(1952) 등을 추가함으로써 반영하였으며, 각 지진규모의 변화는 지진가속도를 0.5~1.5배로 스케일링함으로써 반영하였다. 각 지진별 주파수 특성을 그림 6에 나타내었으며, 표 3에는 최대 지반가속도 값을 지진별로 정리하여 도시하였다.



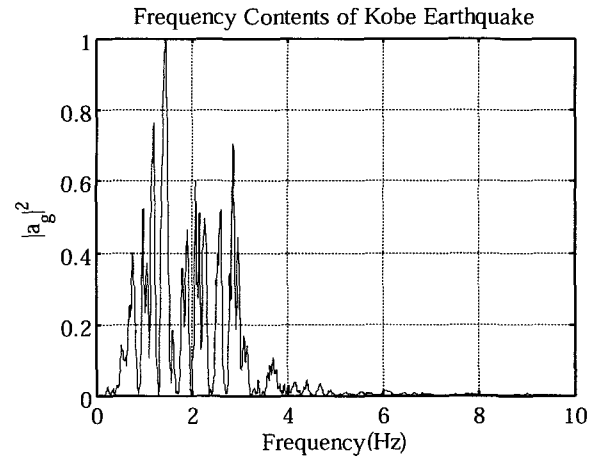
(a) El Centro 지진의 주파수 특성



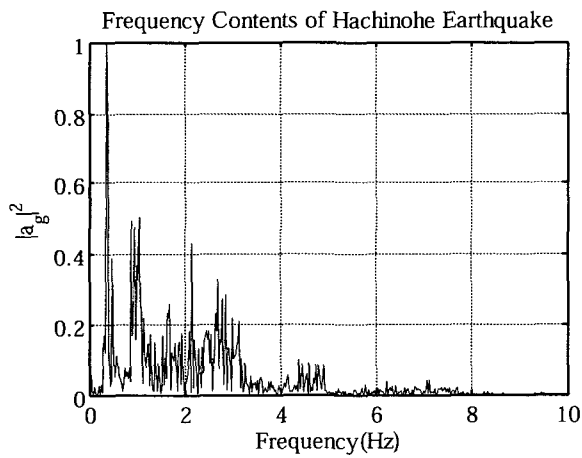
(b) Mexico 지진의 주파수 특성



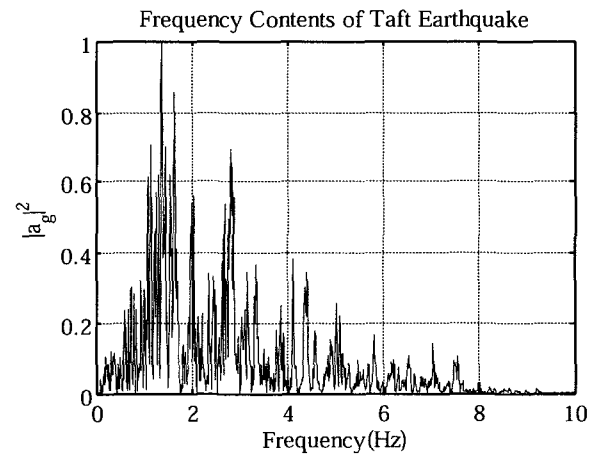
(c) Gebze 지진의 주파수 특성



(d) Kobe 지진의 주파수 특성



(e) Hachinohe 지진의 주파수 특성



(f) Taft 지진의 주파수 특성

그림 6 각 지진별 주파수 특성

벤치마크 제어문제에서는 총 18개의 성능지수를 제시하고 있는데, 각 성능지수는 지진별로 STU를 장착한 사장교(비제어시스템)의 응답을 이용하여 정규화함으로써 정의된다.  $J_1 \sim J_6$ 은 응답의 최대값에 대한 항목으로서 각각 주탑하부의 전단력, 휨모멘트, 데크위치에서의 주탑에 작용하는 전단력, 휨모멘트, 케이블 장력의 변동량 및 데크의 수평변위의 최대값들을 STU를 장착한 비제어시스템의 최대 응답값으로서 정규화한 양이다.  $J_7 \sim J_{11}$ 은 평균응답으로서 역시 주탑하부의 전단력, 휨모멘트, 데크위치에서

표 3 각 지진별 최대 지반가속도

지진	PGA (m/s <sup>2</sup> )
El Centro	3.417
Mexico	1.4068
Gebze	2.5978
Kobe	8.1782
Hachinohe	2.3404
Taft	1.5270

의 주탑에 작용하는 전단력, 휨모멘트, 케이블 장력의 변동량의 r.m.s(root mean squared) 값을 STU를 장착한 비제어시스템의 응답들의 r.m.s 값으로서 정규화한 무차원양이다. 그리고,  $J_{12} \sim J_{15}$ 는 제어시스템의 용량에 관한 항목으로서,  $J_{12}$ 는 제어력의 최대값을 사장교의 사하중으로 정규화한 양이며,  $J_{13}$ 은 제어장치의 최대 운동거리인 stroke를 STU를 장착한 사장교의 주탑 상단에서 발생하는 최대 수평변위로 정규화한 양이다. 그리고  $J_{14}$  및  $J_{15}$ 는 각각 제어장치를 운용하기 위하여 요구되는 전력량의 순간 최대값과 전체 총 소모전력량을 의미한다.  $J_{16} \sim J_{18}$ 은 제어장치 및 센서의 개수와 제어기 설계모델 차수로서 두 제어시스템(LQG, FSC)이 동일하다. 해석결과, 전체적인 제어성능은 최대응답과 평균응답에 있어서 유사한 경향을 보였으며, 여기서는 식 (9)~(12)와 같이 정의되는 4개의 주요 응답에 대하여 제어성능을 비교하여 그림 7에 도시하였다.

$$J_1 = \max_{\text{earthquakes}} \left\{ \frac{\max_{i,t} |F_{bi}(t)|}{F_{0b}^{\max}} \right\} \quad (9)$$

$$J_3 = \max_{\text{earthquakes}} \left\{ \frac{\max_{i,t} |M_{bi}(t)|}{M_{0b}^{\max}} \right\} \quad (10)$$

$$J_5 = \max_{\text{earthquakes}} \left\{ \max_{i,t} \left| \frac{T_{ai}(t) - T_{0i}}{T_{0i}} \right| \right\} \quad (11)$$

$$J_6 = \max_{\substack{\text{El Centro} \\ \text{Mexico City} \\ \text{Gebze}}} \left\{ \max_{i,t} \left| \frac{x_{bi}(t)}{x_{0b}} \right| \right\} \quad (12)$$

여기서,  $F_{bi}(t)$ 는 제어시스템을 장착한 사장교의  $i$ 번째 주탑하부에서 발생하는 바닥전단력의 시간이력이며,  $F_{0b}^{\max}$ 는 STU를 장착한 사장교의 주탑하부에서 발생할 수 있는 바닥전단력의 최대값으로서  $\max_{i,t} |F_{0bi}(t)|$ 이다.  $M_{bi}(t)$ 와  $M_{0b}^{\max}$ 는 각각 제어시스템과 STU를 장착한 사장교의  $i$ 번째 주탑하부에서 발생하는 전도모멘트의 시간이력 및 최대 전도모멘트 값을 의미한다. 또한,  $T_{ai}(t)$ 는 제어시스템을 장착한 사장교의  $i$ 번째 케이블장력의 시간이력이고,  $T_{0i}$ 는 STU를 장착한 사장교의  $i$ 번째 케이블장력의 최대값이다.

그림 7(a)는 주탑하부의 바닥전단력에 대한 성능지수( $J_1$ )를 지진하중의 규모에 따라 도시한 결과이다. Gebze 지진에서 지진규모가 증가함에 따라 FSC 시스템의 성능이 조금 개선된 결과를 보이고 있으나, 최대 응답이 나타나고 있는 Mexico 지진에서 두 시스템은 제어성능의 차이를 보이지 않고 있다. 그림 7(b)의 바닥전단력을 나타내는 결과에서도 Gebze 지진에 대하여는 FSC 시스템의

제어성능이 좋은 결과를 보이고 있으나, Mexico 지진에서는 LQG 시스템이 보다 높은 응답감소효과를 발휘하고 있다. 그림 7(c)에서는 Kobe 지진에서 케이블 장력의 변화량이 다른 지진에 비하여 큰 폭으로 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이에 대한 제어성능은 FSC 시스템이 좋을 수 있다. 또한, 다른 지진들에 대하여도 FSC 시스템이 LQG 제어시스템보다 케이블 장력의 변화를 조금씩 개선시키고 있다. 한편, 그림 7(d)의 데크의 수평변위 결과를 살펴보면, Mexico City 지진에서 FSC 시스템이 LQG 제어시스템보다 다소 떨어지는 제어효과를 발휘하고 있으나, LQG 제어시스템은 Gebze 지진에서 최대 응답이 발생함으로써 그 결과에 있어서는 FSC 시스템이 개선된 제어성능을 발휘하고 있다.

그림 8에는 두 제어시스템의 용량을 나타내는 스트로크, 순간 최대 전력량 및 전체 소모 전력량의 결과를 비교 도시하였다. 그림 8(a)의 제어장치의 최대 운동거리인 스트로크는 Mexico City 지진에서는 LQG 제어시스템, Gebze 지진에서는 FSC 제어시스템의 스트로크 성능지수가 작게 평가되고 있으나, 최대 크기를 고려할 때에는 유사한 결과를 보이고 있다. 한편, 그림 8(b)의 순간최대 전력량의 경우, 최대 전력량이 요구되는 Gebze 지진에서 FSC시스템은 매우 적은 전력량만을 사용하고 있으며, 그림 8(c)의 전체 총 전력량에 있어서도 지진별 trade-off는 존재하지만 FSC 시스템이 가장 높은 소모율을 보이는 El Centro 지진에서 사용하는 전력량보다 LQG 제어시스템이 Gebze 지진에서 소모하는 전력량이 지진의 규모가 증가함에 따라 다소 높게 평가되고 있다. 따라서 FSC시스템이 매 순간 제어이득의 변화를 통하여 효과적인 제진성능을 발휘함으로써 결과적으로는 매 순간 요구되는 제어력과 전력량까지도 하중의 변화에 따라 효율적으로 조절하는 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 FSC 시스템이 LQG 시스템보다 지진의 종류와 규모에 따라 개선된 제어성능을 발휘하면서도 제어시스템을 효율적으로 운용하는 것을 알 수 있다.

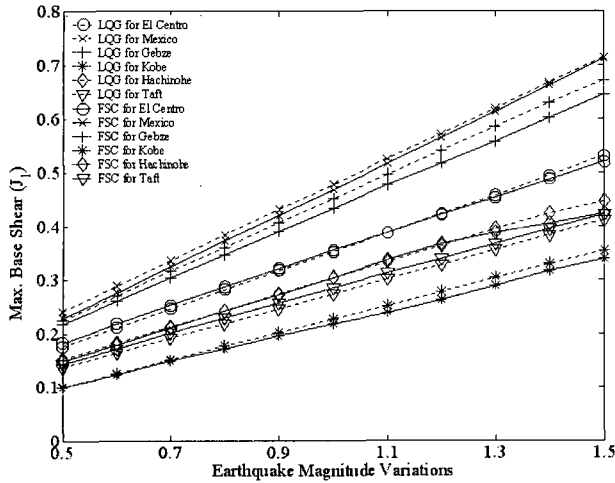
#### 4.2 모델링 불확실성에 따른 강인성

모델링 불확실성으로는 식 (13)과 같이 교량모델의 강성행렬을 변화시킴으로써 이에 따른 제어시스템의 강인성능을 평가하였다.

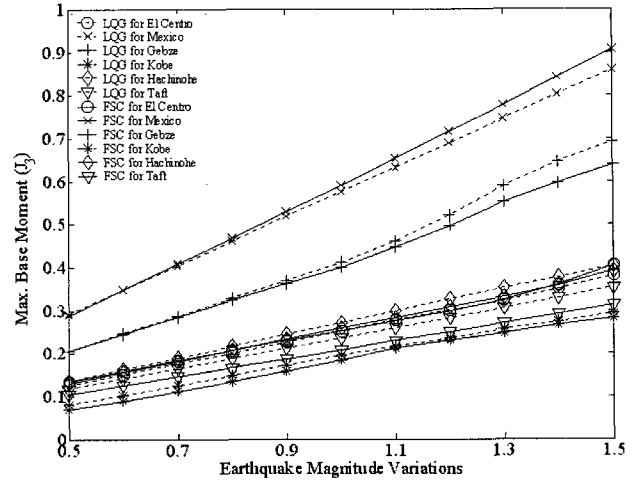
$$\mathbf{K}_\Delta = \hat{\mathbf{K}} + \Delta\mathbf{K} = (1 + \delta)\hat{\mathbf{K}} \quad (13)$$

여기서,  $\hat{\mathbf{K}}$ 는 419 자유도의 강성행렬이며,  $\Delta\mathbf{K}$ 는 강성행렬의 교란으로서 원 강성행렬의 비( $\delta$ )를 사용하여  $\delta \cdot \hat{\mathbf{K}}$ 로 정의하였다.  $\delta$ 는  $\pm 15\%$ 의 강성 변화를 고려하여 5%씩 변화시켰다.

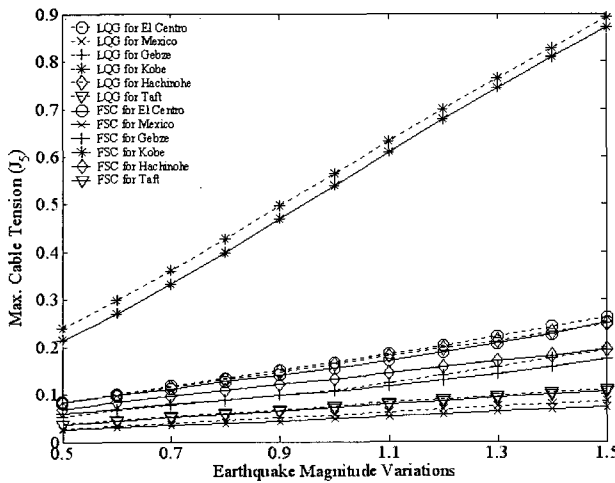
그림 9는 강성변화에 따른 제어시스템의 4가지 성능지수( $J_1, J_3, J_5, J_6$ )를 나타내는데, 대표적 예로서 El Centro



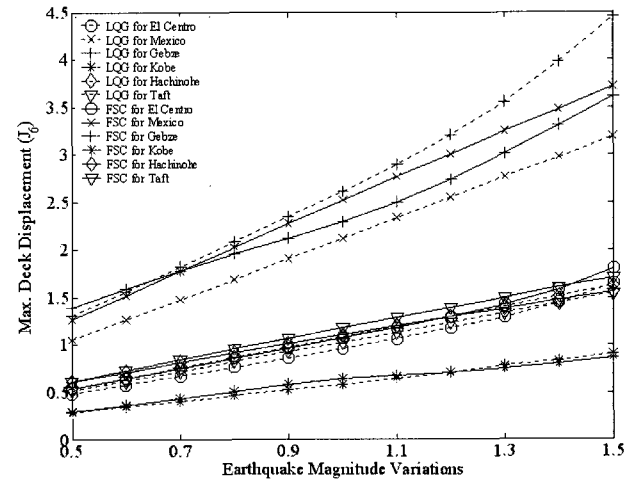
(a) 주탑하부 바닥전단력 ( $J_1$ )



(b) 주탑하부 전도모멘트 ( $J_2$ )

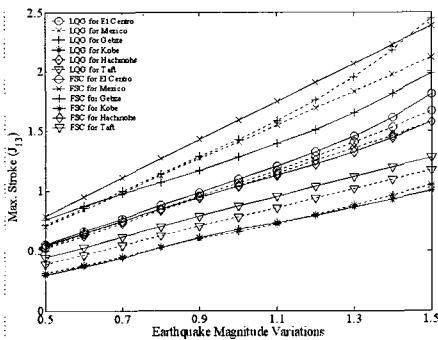


(c) 케이블 장력의 변화량 ( $J_5$ )

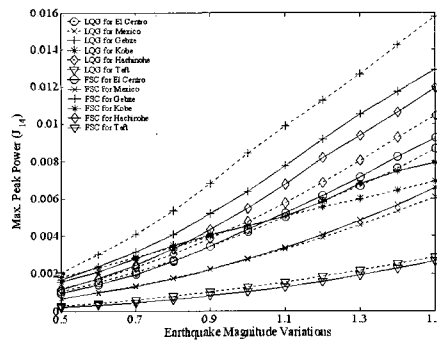


(d) 데크의 수평변위 ( $J_6$ )

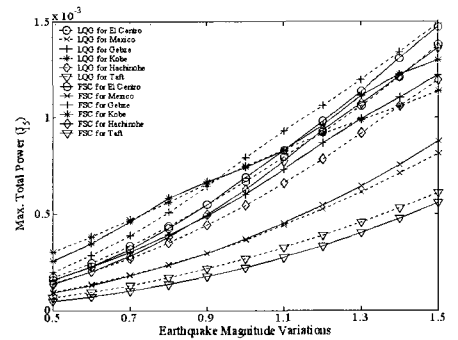
그림 7 지진의 종류 및 규모별 LQG 시스템과 FSC 시스템의 강인성능



(a) 제어장치의 최대 운동거리 ( $J_{13}$ )



(b) 제어장치에 발생하는 최대 순간 전력량 ( $J_{14}$ )



(c) 제어장치에 요구되는 총 전력량 ( $J_{15}$ )

그림 8 지진종류 및 규모에 따른 LQG 시스템과 FSC 시스템의 용량 비교

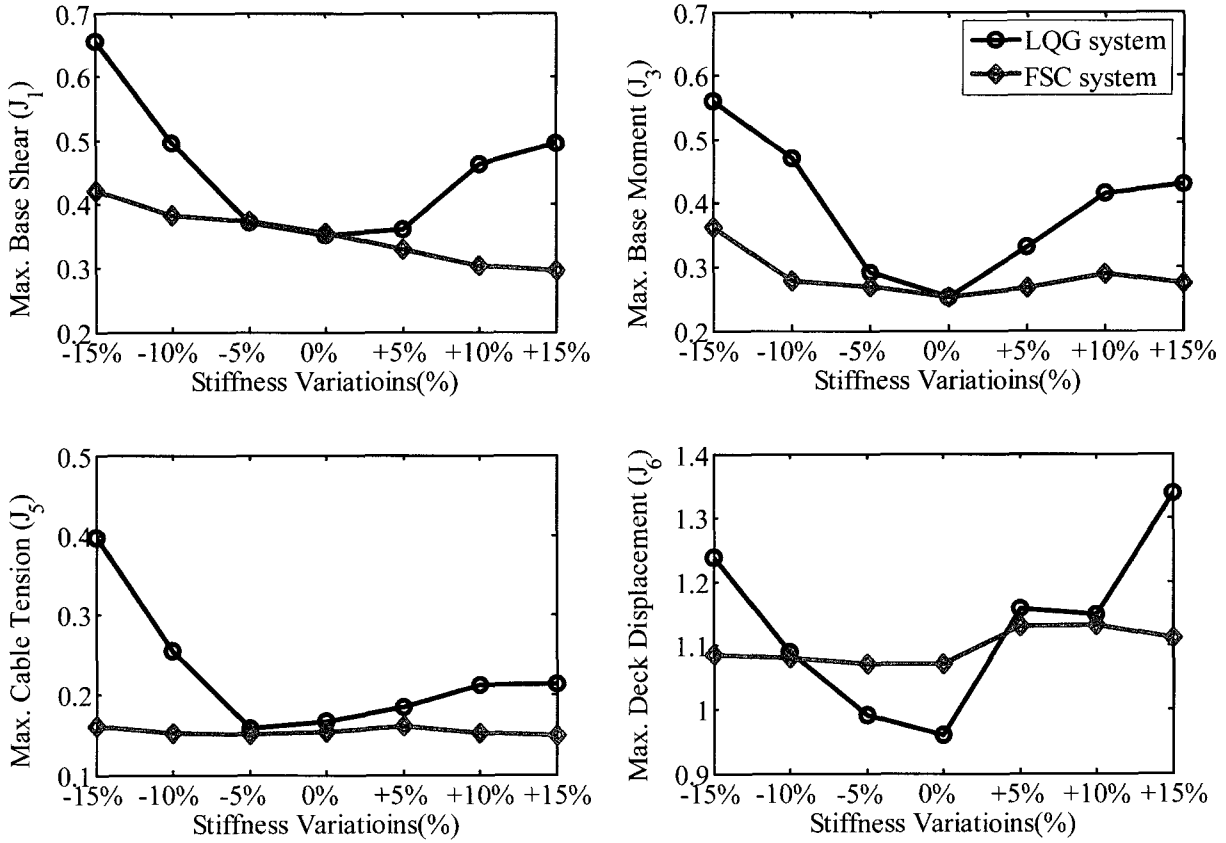
지진과 Mexico 지진에 대하여 LQG 제어시스템과 FSC 시스템의 성능결과를 비교하였다. 그림 9(a)에서 LQG 제어시스템은 강성변화로 인한 모델링 오차에 따른 제어 성능의 저하가 심각한 반면, FSC 제어시스템은 강성변화에 대하여 제어성능의 저하가 LQG 제어시스템보다는 훨씬 강인한 결과를 보여주고 있다. 특히, 데크의 최대 수평 변위에 있어서는 원 시스템( $\Delta K = 0\%$ )에서 보다 높은 응답저감효과를 보이던 LQG 제어시스템이 강성변화  $\pm 15\%$

에서는 FSC 시스템보다 훨씬 증폭된 응답을 보임으로써 제어성능이 큰 폭으로 저하되고 있음을 알 수 있다. 그에 반해 FSC 시스템은 강성변화에 대하여 매우 강인한 성능을 발휘하고 있음을 알 수 있으며, 이러한 결과는 다른 지진들에 대하여도 유사한 경향을 보이고 있다.

그림 10에서는 6개 지진에 대한 각 성능지수의 최대값을 LQG 제어시스템과 FSC 시스템에 대하여 비교하여 도시하였다. 바닥 전단력과 휨모멘트의 경우, 강성변화를

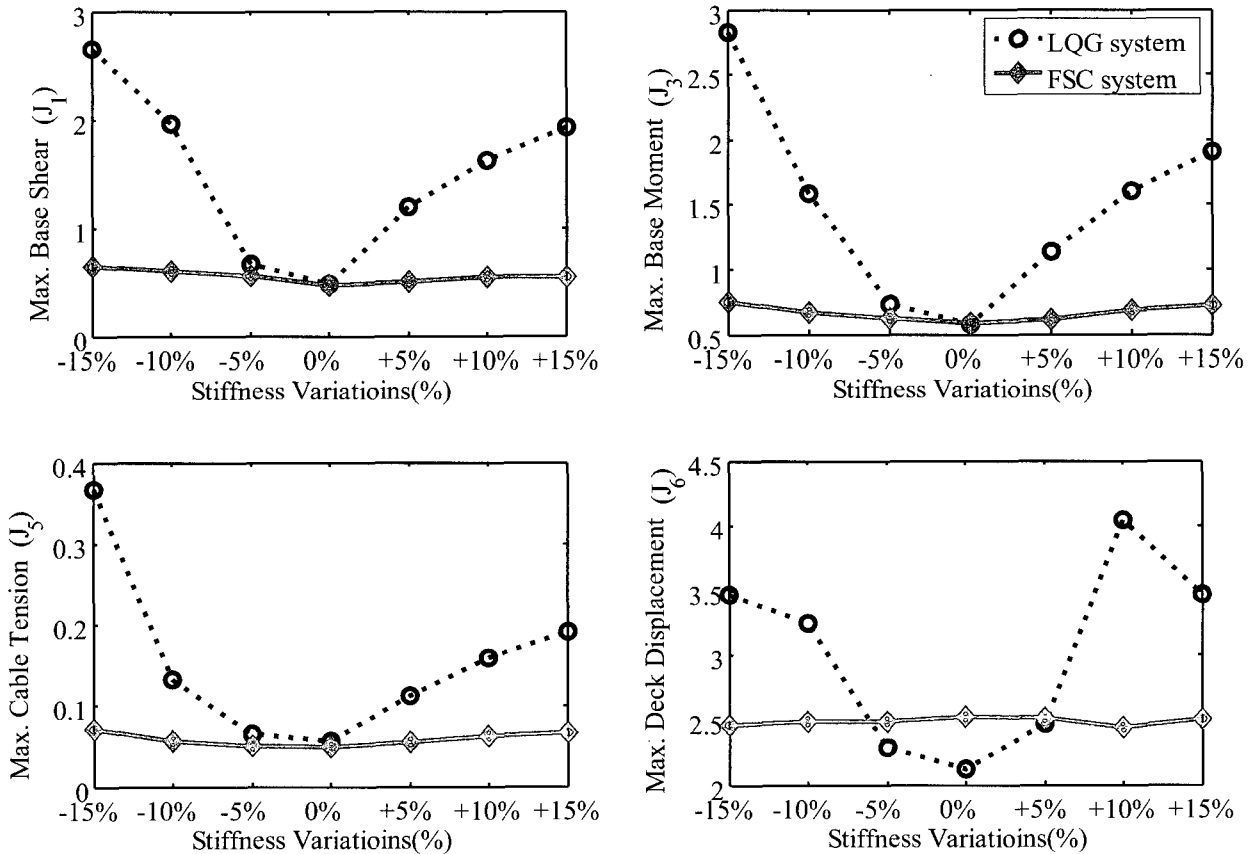


El Centro earthquake



(a) El Centro 지진에 대한 LQG 및 FSC 시스템의 강인성능

Mexico city earthquake



(b) Mexico City 지진에 대한 LQG 및 FSC 시스템의 강인성능

그림 9 지진별 강성변화에 따른 제어시스템의 강인성능 비교

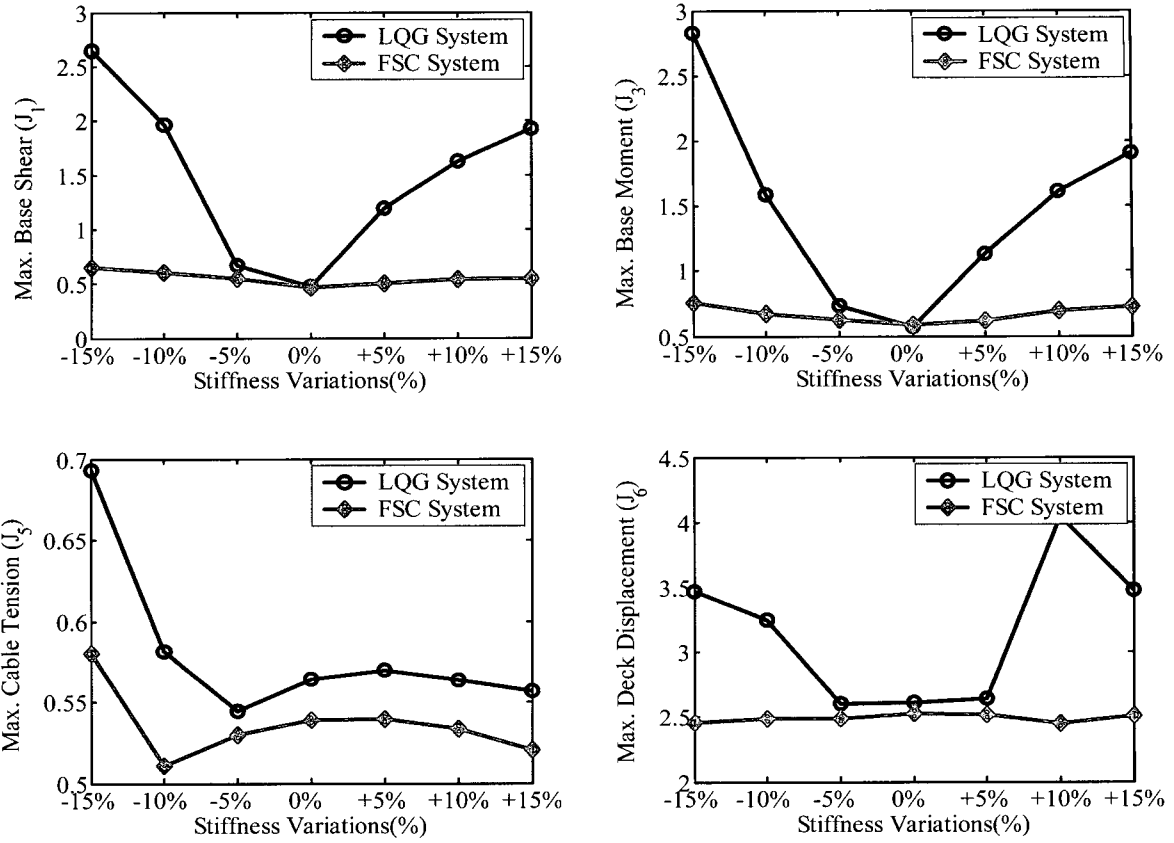
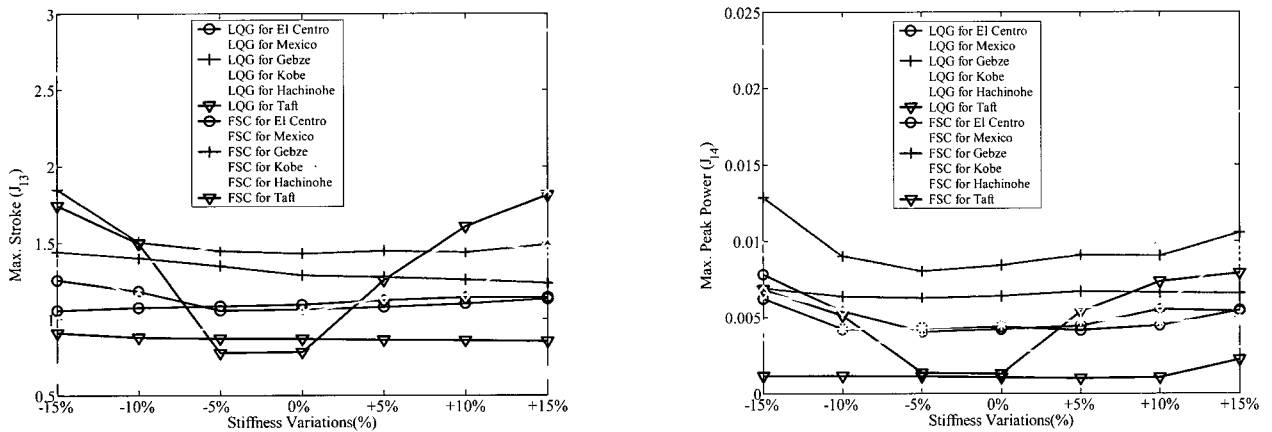
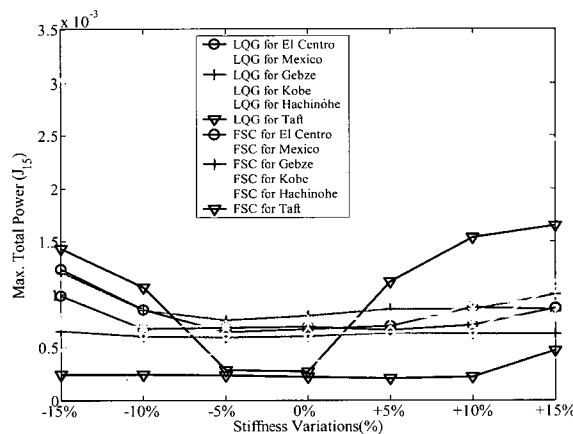


그림 10 6개 지진에 대한 최대 성능지수 비교



(a) 제어장치의 최대 운동거리( $J_{13}$ )

(b) 제어장치에 발생하는 최대 순간 전력량( $J_{14}$ )



(c) 제어장치에 요구되는 총 전력량( $J_{15}$ )

그림 11 강성변화에 따른 LQG 시스템과 FSC 시스템의 용량 비교

참고 문헌

고려하지 않은 원 교량시스템( $\Delta K = 0\%$ )의 성능지수 값에서 LQG 제어시스템과 FSC 시스템의 성능 차이는 크지 않다. 그러나 강성변화가 커짐에 따라 두 제어시스템의 성능지수 값은 큰 폭의 차이를 보이고 있다. 따라서 LQG 제어시스템에 비해 FSC 시스템은 강성변화에 대한 강인성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

그림 11은 제어시스템을 운용하기 위한 용량으로서 제어장치의 최대 운동거리, 제어장치에 발생하는 최대 순간 전력량 및 총 전력량을 두 제어시스템에 대하여 비교 도시한 결과이다. 그림 10(a)~(c)에 있어서 몇몇 지진에 대하여는 두 제어시스템의 최대 운동거리 및 소요 전력량이 상호 유사한 수준으로 사용되고 있으나, Mexico City 지진에 대한 결과에서 강성 변화  $\pm 5\%$ 이상의 모델 불확실성으로 인하여 LQG 제어시스템의 스트로크나 전력량이 현저히 증가하고 있다. 한편, FSC 제어시스템은 시스템의 강성변화가 있다 하더라도 최대 운동거리 및 소요 전력량에 있어서 큰 변화를 보이지 않고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

이 연구에서는 사장교의 지진응답제어를 위하여 개발된 퍼지관리제어기법(FSC)의 강인제어성능을 평가하였다. 성능평가에서는 Dyke 등이 제시한 벤치마크 교량에 대하여, 최적설계된 LQG방법과 제어성능을 비교하는 방법을 사용하였다. 제어방법의 강인성을 평가함에 있어서, 하중의 불확실성과 교량의 모델링오차를 가정하고 시간이력해석을 통하여 제어성능의 변화를 조사하였다. 지진하중의 불확실성에 대한 제어성능을 알아보기 위하여, 주파수 특성이 다른 여러 지진기록을 이용하여 입력지반가속도의 규모를 변화시켜 가면서 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 설계된 제어를 포함한 교량시스템에 대하여  $\pm 15\%$ 까지의 강성변화를 가정하고 시뮬레이션을 수행함으로써 교량의 모델링 오차에 대한 제어성능의 변화를 조사하였다.

지진하중의 불확실성에 따른 강인성 평가 결과, FSC 시스템이 LQG 시스템보다 지진의 종류와 규모에 따라 개선된 제어성능을 발휘하면서도 제어시스템을 효율적으로 운용하는 것으로 나타났다. 또한, 교량모델의 불확실성에 대한 두 제어시스템의 강인성을 비교한 결과, LQG 제어시스템이 강성변화에 대하여 큰 폭의 성능저하 현상을 보였으나, FSC시스템은 매우 안정적인 응답제어효과가 나타날 뿐 아니라, 제어시에 요구되는 전력량, 에너지, 제어장치의 스트로크에 있어서도 큰 변화를 보이지 않으므로써 탁월한 강인성을 나타내는 것으로 조사되었다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통해 지원된 건설교통부 건설핵심기술 연구개발사업에 의하여 수행되었음을 밝히며, 연구 지원에 감사드립니다.

1. Yamaguchi, H and Ito, M., "Full-scale Measurements and Structural Damping of Cable-Supported Bridges," *Proceedings of International Bridge Conference-Bridges into 21<sup>st</sup> Century*, Hong Kong, 1995, pp. 557-564.
2. Larsen, A., editor, *Aerodynamics of large bridges*, Rotterdam, Balkema, 1992.
3. Larsen, A. and Eisdahl, S., *Bridge aerodynamics*, Rotterdam, Balkema, 1998.
4. Fujino, Y., Soong, T. T. and Spencer Jr., B. F., "Structural Control: Basic Concepts and Applications," *Proceedings of the ASCE Structures Congress XIV*, Chicago, Illinois, 1996, pp. 1277-1287.
5. Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer Jr., B. F. and Yao, J. T. P., "Structural Control: Past, Present and Future," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897-971.
6. Symans, M.D. and Constantinou, M.C., "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineering Structures*, Vol. 21, No. 6, 1999, pp. 469-487.
7. Fujino, Y., "Vibration, Control and Monitoring of Long-Span Bridges-Recent Research, Developments and Practice in Japan," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, 2002, pp. 71-97.
8. Tanida, K., "Progress in the application of active vibration control technologies to long-span bridges in Japan," *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2002, pp. 363-371.
9. Spencer Jr, B. F. and Nagarajaiah, S., "State of the Art of Structural Control," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 845-856.
10. 박관순, "H<sub>∞</sub>강인제어이론을 적용한 장대구조물의 진동제어", 박사학위논문, 서울대학교, 1998.
11. 조익선, "구조물의 모델 불확실성을 고려한 지진응답의 강인제어", 석사학위논문, 서울대학교, 2000.
12. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "퍼지관리제어기법을 이용한 사장교의 지진응답제어", 한국지진공학회 논문집, 제 8권, 제 4호, 8, 2004, pp. 51-62.
13. Dyke, S. J., Caicedo, J. M and Turan, G., Bergman, L. A. and Hague, S., "Phase I Bench-

- mark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 857-872.
14. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges, 17<sup>th</sup> Ed.*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2002.
  15. ABAQUS, Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Pawtucket, R.I., 1998.
  16. Stengel, R. F., *Stochastic optimal control: Theory and application*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
  17. Skelton, R. E., *Dynamic Systems Control: Linear Systems Analysis and Synthesis*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
  18. Park, Kwan-Soon, Koh, Hyun-Moo and Ok, Seung-Yong, "Active control of earthquake excited structures using fuzzy supervisory technique," *Advances in Engineering Software*, Vol. 33, No. 11-12, 2002, pp. 761-768.
  19. Passino, K.M. and Yurkovich, S., *Fuzzy control*, Reading/New York, Addison-Wesley/Longman, 1998.