

퍼지관리제어기법을 이용한 사장교의 지진응답제어

Seismic Response Control of Cable-Stayed Bridge using Fuzzy Supervisory Control Technique

박관순* 고현무** 옥승용*** 서충원****
Park, Kwan-Soon Koh, Hyun-Moo Ok, Seung-Yong Seo, Chung-Won

국문요약

사장교의 지진응답 제어를 위한 퍼지관리제어기법에 대하여 연구하였다. 제시하는 방법은 복합제어방법의 하나로서, 여러 개의 최적제어기로 이루어진 하부제어기와 퍼지관리자로 구성되는 계층적인 구조를 가진다. 하위제어기들은 사장교의 주요 지진응답들을 저감시키도록 각각 독립적으로 설계되며, 퍼지관리자는 설계된 하위 제어기들의 참여율을 조절함으로써 향상된 제진성능을 확보한다. 이는 하위제어기의 정적 제어이득을 퍼지추론과정에 기반하여 실시간으로 변화하는 동적 제어이득으로 변환함으로써 이루어진다. 제안하는 방법의 적용성을 평가하기 위하여 Dyke 등이 제안한 사장교의 벤치마크 제어문제를 설계 예로 고려하였으며, 사장교 지진응답 제어를 위한 제어변수로는 주탑하부의 전단력과 휨모멘트, 주탑상부의 수평변위 및 데크 주탑간 상대변위, 그리고 케이블의 장력을 선정하였다. 벤치마크 사장교에 대하여 제안한 퍼지관리제어기 및 최적제어이론에 기반한 LQG 제어기의 제어성능 비교로부터 제시하는 기법의 효율성을 검증하였다.

주요어 : 퍼지관리제어, 지진응답제어, 사장교, 벤치마크 제어문제, 복합제어기법

ABSTRACT

Fuzzy supervisory control technique for the seismic response control of cable-stayed bridges subject to earthquakes is studied. The proposed technique is a hybrid control method, which adopts a hierarchical structure consisting of several sub-controllers and a fuzzy supervisor. Sub-controllers are independently designed to reduce the responses to be controlled of a cable-stayed bridge, and a fuzzy supervisor achieves improved seismic control performance by tuning the pre-designed sub-controllers. It is realized by converting static gains of the sub-controllers into time-varying dynamic gains through the fuzzy inference mechanism. To evaluate the feasibility of the proposed technique, the benchmark control problem of cable-stayed bridge proposed by Dyke et al. is adopted. The control variables for the seismic response control of the cable-stayed bridge are determined to be the shear forces and bending moments at the base of the towers, the longitudinal displacements at the top of the towers, the relative displacements between the deck and the tower, and the tensions in the stay cables. Comparative results between the fuzzy supervisory controller and LQG controller demonstrate the effectiveness of the proposed control technique.

Key words : fuzzy supervisory control, seismic response control, cable-stayed bridge, benchmark control problem, hybrid control technique

1. 서 론

최근 들어 산업화에 따른 급속한 경제발전과 구조물해석 및 설계기술의 진보는 초고층빌딩 또는 초장대교량 등 대형 구조물의 건설을 가능케 하였으며, 특히, 교량건설분야에서는 축적된 기술을 바탕으로 사장교와 현수교 등 장대교량건설이 매우 활발해지고 있다.⁽¹⁾⁽³⁾ 세계의 여러 교량선진국들은 더 날렵하고 아름다운 모습의 장대교량건설에 주력하고 있으며, 장기간을 갖는 교량의 건설능력은 그 나라의 교량 기술을 판단하는 척도가 되고 있다. 사장교와 현수교는 일반형식의 교량과는 달리, 주탑과 케이블, 그리고 긴 경간을 특징으로 매우 복잡한 거동을 보이며, 기존 교량에 비하여 상대적으로 유연하면서 감쇠비가 낮은 것이 일반적이다.⁽⁴⁾ 따라서 바람이나 지진 등 불확실한 동적하중에 의한 과도한 진동발생 가능성이 커지게 되므로, 추가적인 진동제어시스템

의 필요성이 적지 않다고 할 수 있다.⁽⁵⁾⁽⁸⁾

1994년 일본 Rainbow교 주탑의 시공중 풍하중에 대한 진동저감을 목적으로 아치형태의 복합형 질량감쇠기(hybrid mass damper, HMD)를 사용하였고⁽⁹⁾, 1998년 완공된 현재 최장의 현수교인 일본의 Akashi교 주탑에는 동조 질량감쇠기(tuned mass damper, TMD)가 설치되어 가동 중에 있으며 시공중 가설타워의 바람에 의한 진동문제로 HMD가 사용된 바 있다.⁽¹⁰⁾ 그러나 대부분의 경우는 진동 제어장치가 시공중에 한시적으로 사용되었으므로, 진동제어 시스템이 활발하게 채택되어 상시 운영되고 있는 빌딩구조물의 경우와 비교하면 아직 시작단계라고 할 수 있다.⁽¹¹⁾ 특히 케이블 부재의 비선형성 및 하중전달 메커니즘의 복잡성과 모드의 인접성 등은 시스템의 해석과 더불어 제어시스템의 설계 및 적용을 더욱 어렵게 하는 요인이 되기도 한다. 이러한 문제점들을 인식하고 Dyke 등⁽¹²⁾은 사장교의 지진응답에 대한 제어시스템의 효과적인 개발과 체계적인 적용을 목적으로 미국에서 시공된 Bill Emerson Memorial 교량에 대한 벤치마크 제어문제(benchmark control problem)를 제시하였다. 이 문제를 통하여, 정형조 등⁽¹³⁾은 MR유체댐퍼의 적용성을 연구하였으며, Agrawal 등⁽¹⁴⁾은

* 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 BK조교수 · 공학박사
(대표저자 : kspark@sel.snu.ac.kr)

** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

**** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2004년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2004. 5. 20 / 심사종료일 : 2004. 7. 22)

수동형 점성감쇠기, 가변강성 및 가변마찰감쇠 방법을 이용한 제어시스템의 성능을 서로 비교하고 적용성을 검토한 바 있다.

지진발생시에도 사장교의 안정성을 확보하기 위해서는, 주탑 및 데크(deck)의 횡방향변위와 주탑하부에 작용하는 전단력 및 휨모멘트 등이 일정 범위를 넘지 않아야 한다. 뿐만 아니라 케이블의 장력도 초기에 도입된 장력을 일정하게 유지시켜 주는 것이 중요하다. 한편, 토목구조물의 능동 제어알고리즘으로 잘 알려진 최적제어이론에서는 이러한 주요 응답들을 선택하고 가중합방법(weighted sum approach)을 통하여 실수값을 갖는 목적함수를 구성한 뒤, 이를 최적화하는 고정 또는 정적 제어이득(fixed or static control gain)을 구하게 된다. 얻어진 제어이득은 제어장치를 운영하는 부분으로, 제어시스템 내에서 소프트웨어적으로 구현되며, 제어성능을 결정하는 중요한 역할을 한다. 그런데 여러 응답을 동시에 제어해야 하는 사장교의 경우, 선택한 여러 제어변수 간의 바람직한 가중값들을 찾아내는 것이 쉽지 않다. 또한 불확실성을 가진 지진하중에 대한 사장교의 지진 응답은 다양하게 나타날 수 있으므로, 하나의 고정된 제어이득만으로는 충분한 제어효과를 얻기가 힘들 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 하나의 방안으로 외부 하중이나 구조물의 거동에 따라 제어이득을 조절하는 방법을 고려할 수 있다.

박관순 등은 연구를 통하여 기존의 최적제어기를 바탕으로 퍼지이론을 접목하여 하중과 구조물의 거동특성에 따라, 변화하는 동적제어이득을 구현함으로써 향상된 제어효과를 얻는 퍼지관리기법(fuzzy supervisory technique)⁽¹⁵⁾과 독립모달퍼지제어기법(independent modal space fuzzy control technique)⁽¹⁶⁾을 제시한 바 있다. 그러나 이들은 모두 빌딩구조물을 대상으로 한 연구이며, 특히 사장교의 경우 유사한 여러 개의 모드들이 근접해 있는 경우가 대부분으로 모달제어기법을 근간으로 하는 독립모달퍼지제어의 경우에는 효과적인 구성이 어려울 것으로 판단된다. 따라서, 이 연구는 퍼지관리제어기법의 후속연구로서 빌딩과는 상이한 구조적 특성을 보이는 사장교에 대하여, 제시된 퍼지관리제어기법의 적용성을 확장하고자 하며, 사장교의 벤치마크 제어문제를 통하여 그 효율성을 검증하고자 한다.

퍼지관리제어는 공학의 여러 분야에서 응용되고 있는 퍼

지이론과 널리 알려진 최적제어이론을 결합한 복합제어기법으로서, 여러 개의 제어기들을 독립적으로 구성한 뒤 퍼지이론을 이용하여 제어기들의 참여율을 조정하게 된다. 이때, 각 제어기의 참여율은 선택된 제어변수의 상태에 따라 퍼지추론과정을 거쳐 실시간으로 변화하게 된다. 즉, 퍼지판리자는 많은 제어력이 요구되는 제어기들은 증폭시키고 작은 제어력이 필요한 제어기들은 감소시킴으로써 다양한 지진응답에 보다 효과적으로 대처할 수 있을 것으로 기대된다. 퍼지관리제어기법의 제어성능을 검증하기 위하여 Bill Emerson Memorial 교량에 대하여 제어시스템의 설계를 수행하고, LQG 제어방법과의 비교를 통하여 퍼지관리제어기법의 효율성을 보이고자 하였다.

2. 사장교의 벤치마크 제어 모델

2.1 대상교량

이 연구에서 지진응답제어의 대상이 되는 교량은 Missouri 주의 Cape Girardeau 부근에 최근 건설된 Bill Emerson Memorial 교량이다. 이 교량은 350.6m의 중앙경간장 및 142.7m의 양 측경간장으로 구성된 사장교 부분과 Illinois 방향에 위치한 11개의 교각 및 교대로 구성된 570m의 접속교량 부분으로 나뉜다(그림 1). 사전 동해석 결과, 접속교량이 사장교 자체의 동적 거동에 미치는 영향이 미비한 것으로 평가되었기에 해석모델에서는 사장교 모델만 고려되었다. 사장교의 주탑은 RC 콘크리트로, 상판은 강재 빔과 프리스트레스트 콘크리트 슬래브로 일체화되었으며, 128개의 케이블로 지지된다.

사장교 기초는 기반암(bedrock) 위에 놓여있다는 가정하에 지반과 구조물간의 상호작용은 고려되지 않으며, 지진응답해석을 위한 하중으로는 교축방향의 지반운동만을 고려한다. 사장교 모델은 총 579개의 절점을 갖는 3차원 유한요소 모델로서, 162개의 보 요소, 128개의 케이블 요소, 420개의 강결 요소 및 134개의 절점에 집중질량을 사용하고, 구조해석프로그램인 ABAQUS[®]를 이용하여 교량의 시공단계별 사하중을 고려한 비선형정적해석을 통하여 모델링되었다. 이로부터 구성된 질량행렬 및 강성행렬은 효율적인 해석을 위해 정적응축(static condensation)방법을 적용하여 419개

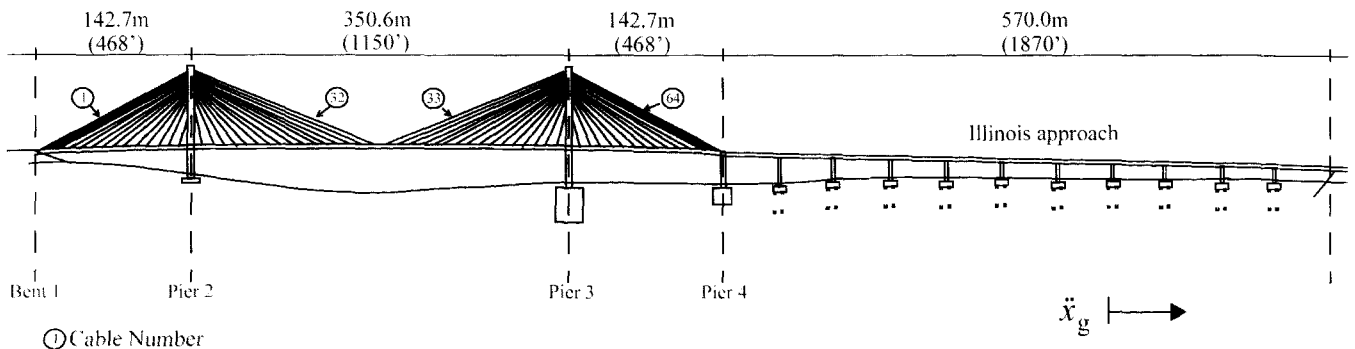


그림 1 Bill Emerson Memorial 교량

자유도를 갖도록 재구성되었다. 이 교량은 주탑과 데크간 연결을 STU(shock transmission unit)를 사용함으로써 교축방향의 변위를 일정수준으로 제한하고 있으며, 이 때의 저차 10개 모드에 대한 주파수는 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7094(Hz)이고 감쇠행렬은 모든 모드에 3%의 감쇠비를 가정하여 구성하였다. 최종적인 선형평가모델의 운동방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서, \hat{M} , \hat{C} , \hat{K} 는 각각 $[419 \times 419]$ 크기의 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타내고, \hat{r} 은 지반가속도 \ddot{x}_g 에 대한 위치벡터로서 $[419 \times 1]$ 크기의 1벡터이며, $\hat{\Lambda}$ 은 제어력벡터 u 에 대한 위치벡터로서 $[419 \times m]$ 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.

상태벡터(state vector)를 식 (2)와 같이 정의함으로써 식 (1)은 식 (3)의 상태공간방정식(state-space equation)으로 변환된다.

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

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

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

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

그리고 응답의 평가를 위한 출력벡터 y_c 와 센서로부터 측정되는 측정벡터 y_m 은 사상행렬(mapping matrix) C_c , D_c , C_m , D_m 을 도입하여 식 (5)와 (6)으로 정의하였다. 벤치마크 제어문제⁽¹²⁾에서는 출력벡터 및 측정벡터를 구성하는 응답에 따라 사상행렬 C_c , D_c , C_m , D_m 을 적절히 결정할 수 있다.

$$y_c = C_c \mathbf{x} + D_c \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ u \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$y_m = C_m \mathbf{x} + D_m \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ u \end{bmatrix} \quad (6)$$

지진응답제어를 위해서는 주탑과 데크간에 설치된 STU를 제어시스템이 대체하게 된다. 따라서, 제어시스템의 설계는 STU가 설치되지 않은 교량모델에 대하여 수행되며, 이 때의 교량모델에 대한 저차 10개 모드의 고유주파수는 0.2899, 0.6399, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203(Hz)이다.

2.2 모델 저차화(Model Reduction)

앞 절에서 기술한 838개의 상태변수, 즉 419개의 자유도를 갖는 선형평가모델은 지진응답해석을 수행하기에는 적합한 시뮬레이션 모델이지만, 제어기 설계 시에는 보다 저차화된 모델이 필요하다. Dyke 등⁽¹²⁾은 balanced realization 방법을 통하여, 상대적으로 낮은 가제어성(controllability) 및 가관측성(observability)을 갖는 상태변수들을 제거하고 30개의 상태변수만을 이용하여 저차화된 모델을 구성하였다.

이를 위하여 식 (3)과 (5)로 표현되는 원 시스템은 변환행렬 T_{cf} 를 도입하여 시스템의 고유값들이 대각선 위치에 나타나는 모달표준형(modal canonical form)으로 변환된다. 이의 구체적인 과정은 다음과 같다.

식 (3)의 시스템행렬 \mathbf{A}_c 에 대한 고유치 해석은 식 (7)을 통하여 수행된다. 이로부터 얻어지는 고유치들(eigenvalues)과 고유벡터들(eigenvectors)를 각각 λ_i 와 ν_i 라 할 때 고유치행렬 및 고유벡터 행렬은 식 (8)로 정의된다.

$$\mathbf{A}_c \nu_i = \lambda_i \nu_i, (i = 1, 2, \dots, 419) \Rightarrow \det(\mathbf{A}_c - \lambda \mathbf{I}) = 0 \quad (7)$$

$$\lambda \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_j & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \mathbf{V}_c = [\nu_1 \nu_2 \dots \nu_i \dots] \quad (8)$$

언어진 고유치가 복소수인 경우는 항상 공액복소(complex conjugate)의 쌍으로 존재하며, 이 때의 고유벡터도 역시 쌍으로서 존재한다. 예를 들어, 식 (8)에서 고유치 λ_1 이 실수값 ρ_1 이고, λ_2 와 λ_3 이 복소수로서 각각 $\rho_2 + i\sigma_2$ 와 $\rho_2 - i\sigma_2$ 의 값을 가질 때, 고유치 및 고유벡터 행렬은 식 (9)와 같이 실수(ρ_j)와 허수($i\sigma_j$)가 복합된 행렬 및 공액복소수로서 존재하게 된다. 여기서, ρ_j 와 σ_j 는 모두 실수이다.

$$\lambda \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \rho_2 + i\sigma_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \rho_2 - i\sigma_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \mathbf{V}_c = [\nu_1 \nu_2 \text{conj}(\nu_2) \dots] \quad (9)$$

따라서 모달표준형 변환행렬 T_{cf} 는 고유벡터 행렬(\mathbf{V}_c)을 이용함으로써 식 (10)으로 재정의된다.

$$\mathbf{T}_{cf} = [\nu_1 \text{real}(\nu_2) \text{imag}(\nu_2) \dots] \quad (10)$$

식 (10)으로 정의되는 변환행렬 T_{cf} 를 관계식 $\mathbf{x} = \mathbf{T}_{cf} \mathbf{x}_{cf}$ 을 이용할 때, 시스템의 모달표준형 행렬 $\mathbf{A}_{c,cf}$ 는 식 (11)의 형태로 표현된다.

$$\mathbf{A}_{c,cf} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \rho_2 & -\sigma_2 & \dots \\ 0 & \sigma_2 & \rho_2 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (11)$$

변환되는 모달표준형 상태공간방정식과 출력 및 측정벡터는 관계식 $\mathbf{x} = \mathbf{T}_{cf} \mathbf{x}_{cf}$ 을 식 (3), (5), (6)에 적용함으로써 식 (12)~(14)으로 얻어진다.

$$\dot{\mathbf{x}}_{cf} = \mathbf{A}_{cf} \mathbf{x}_{cf} + \mathbf{B}_{cf} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{C}_{cf} \mathbf{x}_{cf} + \mathbf{D}_{cf} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{y}_m = \mathbf{C}_{mcf} \mathbf{x}_{cf} + \mathbf{D}_{mcf} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서, $\mathbf{A}_{cf} = \mathbf{T}_{cf}^{-1} \mathbf{A}_c \mathbf{T}_{cf}$, $\mathbf{B}_{cf} = \mathbf{T}_{cf}^{-1} \mathbf{B}_c$, $\mathbf{C}_{cf} = \mathbf{C}_c \mathbf{T}_{cf}$, $\mathbf{D}_{cf} = \mathbf{D}_c$, $\mathbf{C}_{mcf} = \mathbf{C}_m \mathbf{T}_{cf}$, $\mathbf{D}_{mcf} = \mathbf{D}_m$ 이다.

Balanced realization은 모달표준형으로 변환된 상태방정식에 대하여 동일한 가제어 그램미언(controllability grammian)과 가관측 그램미언(observability grammian)을 가지도록 하는 상태변환행렬 (\mathbf{T}_b , $\det(\mathbf{T}_b) \neq 0$)을 이용한 변환 $\mathbf{x}_b = \mathbf{T}_b \mathbf{x}_{cf}$ 에 의하여 얻어지며, 이는 식 (15)와 (16)으로 표현된다⁽¹⁷⁾.

$$\dot{\mathbf{x}}_b = \mathbf{A}_b \mathbf{x}_b + \mathbf{B}_b \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{y}_b = \mathbf{C}_b \mathbf{x}_b + \mathbf{D}_b \begin{bmatrix} \ddot{x}_g \\ \mathbf{u} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, $\mathbf{A}_b = \mathbf{T}_b \mathbf{A}_{cf} \mathbf{T}_b^{-1}$, $\mathbf{B}_b = \mathbf{T}_b \mathbf{B}_{cf}$, $\mathbf{C}_b = \mathbf{C}_{cf} \mathbf{T}_b^{-1}$, $\mathbf{D}_b = \mathbf{D}_{cf}$, $\mathbf{C}_{mb} = \mathbf{C}_{mcf} \mathbf{T}_b^{-1}$, $\mathbf{D}_{mb} = \mathbf{D}_{mcf}$ 이다.

Moore⁽¹⁷⁾는 가제어성과 가관측성의 정도를 구분하기 위해 그램미언의 특이값분해(singular value decomposition)를 사용하였고, 이를 통해 가제어성과 가관측성이 상대적으로 작은 상태변수들을 제거함으로써 모델을 저차화시키는 방법을 제안하였다. 이 연구에서는 아래의 식 (17-a)~(17-f)와 같이 가제어 그램미언과 가관측 그램미언이 상대적으로 큰 30개의 상태변수만을 남겨두고 나머지 상태변수들을 제외함으로써 식 (18)~(20)으로 표현되는 저차화된 모델을 구성하였다.

$$\mathbf{A}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_r & \mathbf{A}_{b12} \\ \mathbf{A}_{b21} & \mathbf{A}_{b22} \end{bmatrix} \quad (17-a)$$

$$\mathbf{B}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_r & \mathbf{E}_r \\ \mathbf{B}_{b2} \end{bmatrix} \quad (17-b)$$

$$\mathbf{C}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_r^z & \mathbf{C}_{b2} \end{bmatrix} \quad (17-c)$$

$$\mathbf{D}_b = \mathbf{D}_{cf} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_r^z & \mathbf{F}_r^z \end{bmatrix} \quad (17-d)$$

$$\mathbf{C}_{mb} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_r^m & \mathbf{C}_{mb2} \end{bmatrix} \quad (17-e)$$

$$\mathbf{D}_{mb} = \mathbf{D}_{mcf} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_r^m & \mathbf{F}_r^m \end{bmatrix} \quad (17-f)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_r = \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r + \mathbf{B}_r \ddot{x}_g + \mathbf{E}_r \mathbf{u} \quad (18)$$

$$\mathbf{y}_r^z = \mathbf{C}_r^z \mathbf{x}_r + \mathbf{D}_r^z \ddot{x}_g + \mathbf{F}_r^z \mathbf{u} \quad (19)$$

$$\mathbf{y}_r^m = \mathbf{C}_r^m \mathbf{x}_r + \mathbf{D}_r^m \ddot{x}_g + \mathbf{F}_r^m \mathbf{u} \quad (20)$$

여기서, \mathbf{A}_{b12} , \mathbf{A}_{b21} , \mathbf{A}_{b22} , \mathbf{B}_{b2} , \mathbf{C}_{b2} , \mathbf{C}_{mb2} 는 balanced realization을 통해 얻어지는 행렬의 부분행렬로서 가제어 혹은 가관측 그램미언이 상대적으로 작아 모델을 저차화할 때 삭제되는 상태변수들에 해당하는 행렬들이고, \mathbf{y}_r^z 및 \mathbf{y}_r^m 은 식 (5)와 (6)에서 정의된 정규화된 출력 벡터(regulated output vector)로서 축소모델에 대한 사상행렬 \mathbf{C}_r^z , \mathbf{D}_r^z , \mathbf{F}_r^z , \mathbf{C}_r^m , \mathbf{D}_r^m , \mathbf{F}_r^m 로부터 얻을 수 있다.

2.3 LQG 제어방법

LQG제어방법은 분리원칙(separation principle)^{(18),(19)}에 따라 추정기(estimator)와 제어기(controller)를 독립적으로 분리시켜 설계한다.

추정기 설계를 위해서는 측정된 출력의 추정값 $\hat{\mathbf{y}}_m$ 을 사상행렬 \mathbf{C}_r^y , \mathbf{F}_r^y 를 이용하여 식 (21)로 정의하고, 이에 따른 최적추정 상태벡터 $\hat{\mathbf{x}}_r$ 은 Kalman 필터를 적용하여 식 (22) 및 (23)으로 얻을 수 있다.

$$\hat{\mathbf{y}}_m = \mathbf{C}_r^y \hat{\mathbf{x}}_r + \mathbf{F}_r^y \mathbf{u} \quad (21)$$

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}_r = \mathbf{A}_r \hat{\mathbf{x}}_r + \mathbf{B}_r \mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y}_m - \mathbf{C}_r^y \hat{\mathbf{x}}_r - \mathbf{F}_r^y \mathbf{u}) \quad (22)$$

$$\mathbf{y}_r = \mathbf{C}_r^x \hat{\mathbf{x}}_r + \mathbf{F}_r^x \mathbf{u} \quad (23)$$

여기서, \mathbf{y}_r 은 추정기의 출력벡터로서 $\hat{\mathbf{x}}_r$ 를 추정하므로 사상행렬 \mathbf{C}_r^x , \mathbf{F}_r^x 은 각각 단위 행렬과 영행렬이 되고, \mathbf{L} 은 Kalman 필터 이득행렬로서 Stengel⁽¹⁸⁾이 제시한 방법에 따라 구할 수 있다. 지반가속도(\ddot{x}_g)는 정상백색잡음(stationary white noise)으로, 측정 오차는 통계학적으로 상호 독립적인 Gaussian 백색잡음으로 가정하였다.

제어기 설계를 위한 성능지수는 식 (24)와 같이 정의하였다.

$$J = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} E \left[\int_0^\tau \left\{ (\mathbf{C}_r^x \mathbf{x}' + \mathbf{F}_r^x \mathbf{u})^T \mathbf{Q} (\mathbf{C}_r^x \mathbf{x}' + \mathbf{F}_r^x \mathbf{u}) + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} \right\} dt \right] \quad (24)$$

여기서, \mathbf{Q} 와 \mathbf{R} 은 각각 정규화된 출력과 제어력에 대한 가중행렬로서 제어기의 설계 변수가 된다.

식 (24)의 성능지수를 최소화하는 제어기는 상태피드백 (state feedback)을 고려하여 식 (25)와 같이 표현될 수 있다.

$$J_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T \mathbf{y}_r^{z_i T} \mathbf{Q}_i \mathbf{y}_r^{z_i} + \mathbf{u}^T \mathbf{R}_i \mathbf{u} dt \right], \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (25)$$

여기서, \mathbf{K}_u 는 식 (26)으로 주어지는 제어이득행렬이며, 행렬 \mathbf{P} 는 식 (27)로 표현되는 대수 Riccati 방정식의 해이다. 대수 Riccati 방정식을 구성하는 각 행렬들은 아래의 식 (28)~(31)로 정의된다.

$$\mathbf{K}_u = \tilde{\mathbf{R}}^{-1} (\tilde{\mathbf{N}} + \mathbf{B}_r^T \mathbf{P}) \quad (26)$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{P} \tilde{\mathbf{A}} + \tilde{\mathbf{A}}^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B}_r \mathbf{R}_i^{-1} \mathbf{B}_r^T \mathbf{P} + \tilde{\mathbf{Q}} \quad (27)$$

$$\tilde{\mathbf{Q}} = \mathbf{C}_r^{z_i T} \mathbf{Q} \mathbf{C}_r^{z_i} - \tilde{\mathbf{N}} \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{N}}^T \quad (28)$$

$$\tilde{\mathbf{N}} = \mathbf{C}_r^{z_i T} \mathbf{Q} \mathbf{F}_r^{z_i} \quad (29)$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{R} + \mathbf{F}_r^{z_i T} \mathbf{Q} \mathbf{F}_r^{z_i} \quad (30)$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{A}_r - \mathbf{B}_r \tilde{\mathbf{R}}^{-1} \tilde{\mathbf{N}}^T \quad (31)$$

3. 퍼지관리제어(Fuzzy Supervisory Control)

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 하위제어기들의 참여율을 구조물의 응답정보에 따라 실시간으로 조정하는 역할을 담당한다. 여기서는 LQG 방법을 이용한 하위제어기의 설계과정과 퍼지관리자의 결정방법에 대하여 기술한다.

3.1 하위제어기 설계

사장교는 크게 주탑, 데크 및 케이블에 의하여 지지되므로, 지진하중에 의한 횡방향 거동도 이러한 부재들의 동적 특성에 의하여 지배된다. 따라서, 주탑하부의 전단력과 휨모멘트, 주탑상부의 수평변위 및 데크의 수평변위, 그리고 케이블 장력의 5가지 응답들을 제어변수로 고려하였다. 제어장치의 설치는 그림 2와 같이 데크교대, 데크교각 및 데크주탑 사이에 각각 16개와 8개의 유압 가진기(hydraulic actuator)를 장착하였으며, 주탑상부에 8개의 능동형 질량감쇠기(active mass damper, AMD)를 장착하는 것으로 하였다. 이들의 최대 용량은 실제 가능한 용량을 고려하여 1000kN으로 가정하였으며, 각 가진기의 역학적 모델은 고려하지 않는다. 또한, 구조물의 응답계측을 위한 센서로는

주탑상부 및 데크 중앙에 5개의 가속도계를, 데크교대 및 데크교각간 상대변위를 측정하기 위한 4개의 변위계를 사용하는 것으로 하였다.

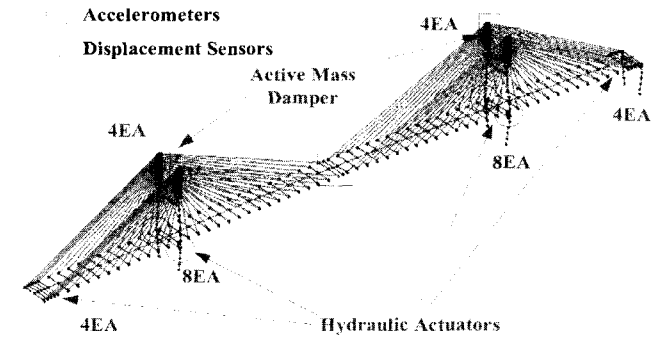


그림 2 능동제어시스템 및 센서의 설치 개략도

하위제어기는 해당하는 제어변수만을 최소화하도록 독립된 제어기들로 구성된다. 이 연구에서는 주탑하부의 전단력과 휨모멘트는 하나의 제어기설계에 동시에 반영되어 총 4개의 하위제어기를 설계한다. 각 하위제어기 설계를 위한 성능지수는 식 (24)로부터 각 하위제어기별로 식 (32)와 같이 정의되며, 정규화된 출력벡터($\mathbf{y}_r^{z_i}$, $i = 1, 2, \dots, 4$)는 각각 주탑하부의 전단력 및 휨모멘트, 주탑상부의 수평변위, 주탑과 데크간 상대변위, 그리고 케이블 장력을 의미한다. 정규화된 출력벡터는 식 (19)의 사상행렬($\mathbf{C}_r^{z_i}$, $\mathbf{F}_r^{z_i}$)을 이용하여 식 (33)으로 표현될 수 있다.

$$J_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} E \left[\int_0^T \{ \mathbf{y}_r^{z_i T} \mathbf{Q}_i \mathbf{y}_r^{z_i} + \mathbf{u}^T \mathbf{R}_i \mathbf{u} \} dt \right], \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (32)$$

$$\mathbf{y}_r^{z_i} = \mathbf{C}_r^{z_i} \mathbf{x}_r + \mathbf{F}_r^{z_i} \mathbf{u} \quad (33)$$

식 (32)에서 제어력 및 제어변수에 대한 가중행렬 \mathbf{R}_i , \mathbf{Q}_i 는 가중행렬의 정규화(normalization) 방법을 따라 \mathbf{R}_i 는 단위행렬을, \mathbf{Q}_i 는 식 (34)로 정의하여 각 제어변수에 대하여 하나의 q_i 만으로 설계가 이루어지도록 구성하였다. 여기서, $\max_t |\mathbf{y}_{i,uncontrolled}^j(t)|$ 는 설계지진에 대하여 제어시스템을 장착하지 않은 사장교의 최대 지진응답으로서, 각각 주탑하부의 최대 전단력 및 모멘트, 주탑상부의 최대 수평변위, 주탑-데크간 최대 상대변위, 그리고 케이블 장력의 최대값을 나타낸다.

$$\mathbf{Q}_i = q_i \left\{ \text{diag} \left(\frac{1}{\left(\max_t |\mathbf{y}_{i,uncontrolled}^j(t)| \right)^2} \right) \right\} \quad (34)$$

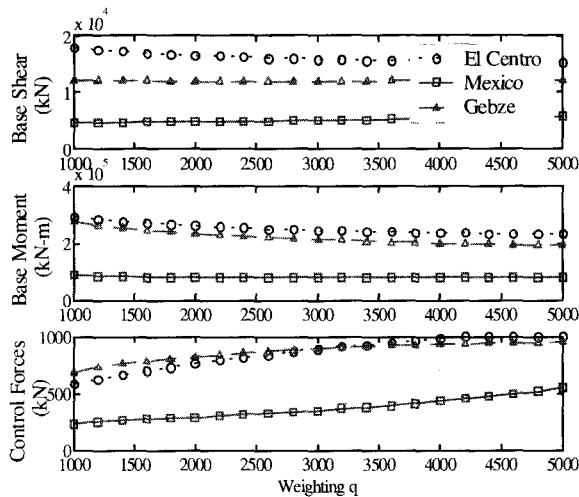
따라서, 식 (34)에서의 q_i 값을 정하면, 식 (28)~(31)에 의하여 식 (27)로 표현되는 대수 Riccati 방정식의 해(\mathbf{P})를 구하고 이로부터 식 (26)에 의하여 각 설계변수에 대한

제어이득(K_i)을 얻음으로써 하위제어기 설계가 이루어진다. 각 가중치들에 의하여 설계되는 하위제어기를 장착한 사장교 시스템에 대하여 벤치마크 문제에서 고려하는 지진입력들(El Centro(1940), Gebze(1999), Mexico(1985))을 대상으로 응답해석을 수행하였으며, 그 결과를 그림 3에 도시하였다. 그림 3의 (a)는 첫번째 하위제어기의 제어성능을 도시한 결과로서, q_1 의 변화에 따른 주탑하부의 전단력과 휨모멘트 및 제어력의 최대값의 변화양상을 나타내고 있다. 가중치 값이 증가함에 따라 요구되는 능동제어력은 증가하고 전단력과 휨모멘트의 최대값은 감소함으로써 제어성능이 증가하는 결과를 나타내고 있다. 최대 제어력을 1000kN으로 가정하므로, $q_1 \geq 4200$ 에서는 능동제어력이 포화(saturation)되고 있음을 알 수 있다. 나머지 그림들(그림 3(b)~3(d))도 각 제어이득들에 대하여 가중치별 제어성능을 도시하고 있으며, 제어력과 제어성능의 반비례하는 경향을 공통적으로 보이고 있음을 알 수 있다. 제어기의 설계는 설계제한조건 등을 고려하여 제어력과 제어성능간 적절한 타협점으로부터 결정하는

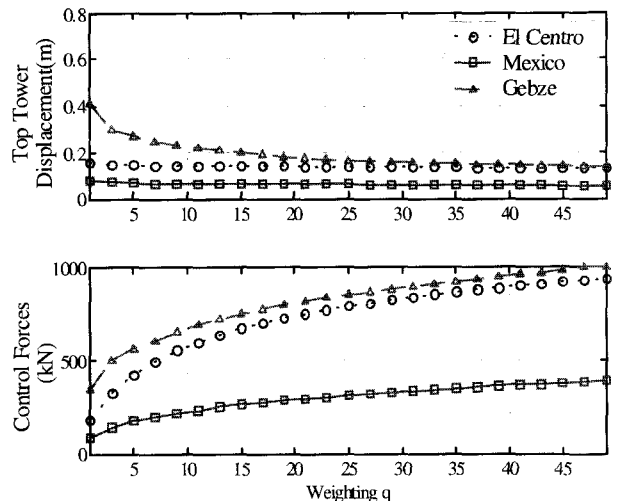
것이 일반적이다. 이 연구에서는 가진기의 최대 용량을 1000kN으로 가정하였으므로 $q_1 = 3000$, $q_2 = 31$, $q_3 = 46$, $q_4 = 1400$ 의 값으로부터 얻어지는 제어이득들로서 각 하위제어기들을 결정하였다.

3.2 퍼지관리자 설계

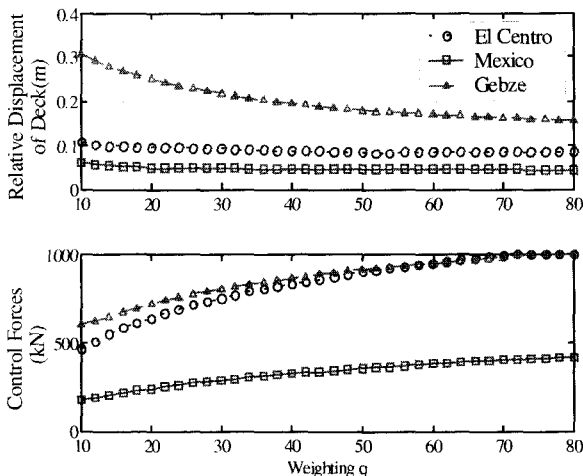
퍼지관리자는 앞서 결정된 4개의 하위제어기에 대하여 제어변수들의 크기 정보를 입력받아 제어력의 참여율을 조절하는 4개의 퍼지 튜너(fuzzy tuner)로 표현된다. 각 하위제어기별 퍼지 튜너는 퍼지화(fuzzification) 과정, 퍼지규칙에 근거한 추론엔진(inference engine) 및 비퍼지화(defuzzification) 과정의 3부분으로 구성되고, 각각 입력소속함수(input membership function), 퍼지규칙표(fuzzy rule table), 그리고 출력소속함수(output membership function)를 구성요소로서 갖는다.⁽²⁰⁾⁽²²⁾ 그러므로, 퍼지관리자의 설계는 4개의 하위제어기들에 대한 입·출력 소속함수 및 퍼지규칙표를 결정하는 것을 의미한다.



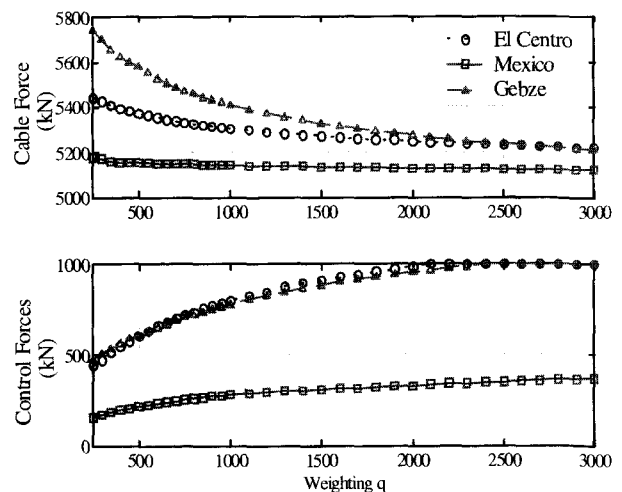
(a) K_1 하위제어기(제어변수: 주탑하부 전단력 및 휨모멘트)



(b) K_2 하위제어기(제어변수: 주탑상부 수평변위)



(c) K_3 하위제어기(제어변수: 주탑 데크간 상대변위)



(d) K_4 하위제어기(제어변수: 케이블 장력)

그림 3 제어변수별 하위제어기들의 가중치에 따른 제어성능

이 연구에서는 입력소속함수로서 그림 4와 같이 4개의 하위제어기에 대하여 각각 11개의 퍼지변수(I, II, ..., XI)를 이용하여 정의하였다. 퍼지변수는 각 입력값에 대한 퍼지정도(fuzziness)를 표현하기 위한 퍼지연산자의 내부변수로서, 그림에서 보듯이 입력소속함수의 수평축 범위를 등분하여 삼각형의 입력소속함수로서 정의하며, 최대 입력값 이상의 입력에 대한 논리적 오류를 방지하기 위하여 최외측 소속함수로는 사다리꼴 함수를 사용하였다. K_1 하위제어기는 주탑 하부의 전단력과 휨모멘트를 제어변수로 가지므로, 2개의 입력에 대하여 각각 소속함수를 정의하였다. 입력소속함수들의 입력정보인 수평축은 제어변수로서 각각 주탑하부의 전단력 및 휨모멘트, 주탑상부의 수평변위, 주탑과 거더의 상대변위, 그리고 케이블 장력의 크기값을 의미한다. 따라서, 퍼지화과정은 입력소속함수를 통하여 물리적 의미를 갖는 제어변수(입력정보)를 각 퍼지변수별 확실성의 정도를 나타내는 퍼지값으로 변환한다. 4개의 하위제어기에 대한 입력소속함수의 최대 범위값은 표 1에 제시되어 있다.

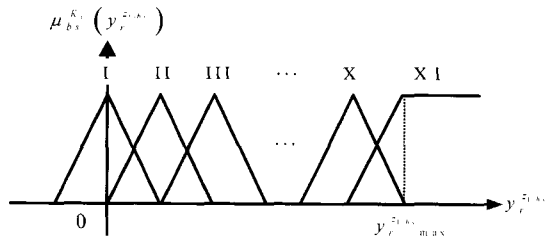
변환된 퍼지값은 추론엔진에서 정의되는 퍼지 규칙표에 따라 출력 퍼지변수에 대한 퍼지값으로 변환된다. 퍼지규칙표는 입력 퍼지변수와 출력 퍼지변수간의 사상관계를 나타내는 것으로, 표 2로 정의하였다.

표 1 입력소속함수의 최대 범위값

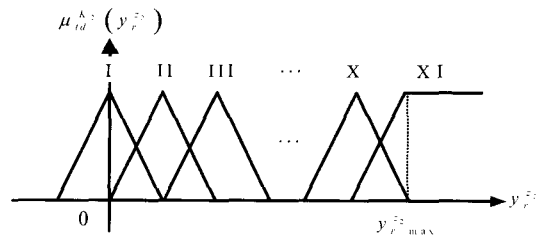
입력소속함수	(a)	(b)	(c)	(d)	
최대 범위값	$y_r^{z1,b} \text{ mrx}$ 1.34×10^4 (kN)	$y_r^{z1,b} \text{ mrx}$ 1.58×10^6 (kN m)	$y_r^{z2} \text{ mrx}$ 1.13 (m)	$y_r^{z3} \text{ mrx}$ 2.42×10^{-1} (m)	$y_r^{z4} \text{ mrx}$ 5.57×10^3 (kN)

표 2 각 하위제어기에 대한 퍼지연산자의 퍼지규칙표

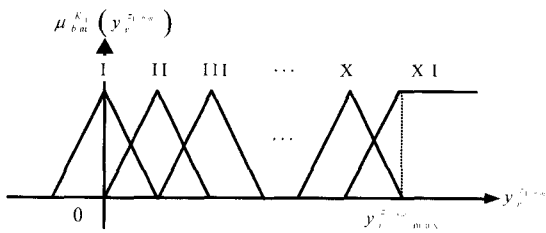
K_1	$\tilde{\alpha}^k$	$\tilde{y}_r^{z1,b}$																					
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI											
$\tilde{y}_r^{z1,b}$	I	I	I	II	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI
	II	I	II	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	
	III	II	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	
	IV	II	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	
	V	III	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI
	VI	III	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI
	VII	IV	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI
	VIII	IV	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI
	IX	V	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI
	X	V	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI
	XI	VI	VI	VII	VII	VIII	VIII	IX	IX	X	X	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI	XI



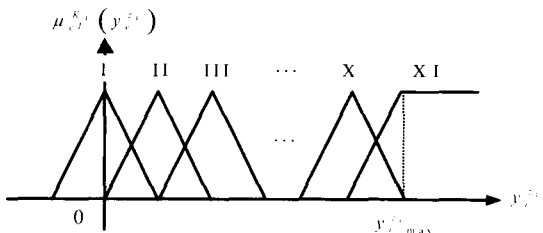
(a) K_1 하위제어기



(b) K_2 하위제어기



(c) K_3 하위제어기



(d) K_4 하위제어기

그림 4 하위제어기별 입력소속함수

K ₂	$\tilde{y}_r^{z_2}$										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
$\tilde{\alpha}^{K_2}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
K ₃	$\tilde{y}_r^{z_3}$										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
$\tilde{\alpha}^{K_3}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
K ₄	$\tilde{y}_r^{z_4}$										
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
$\tilde{\alpha}^{K_4}$	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI

마지막 단계인 비퍼지화 과정은 추론과정에서 전제들간의 논리적 연산에 의해 결정된 출력 값을 물리적인 의미를 갖는 출력정보로 역환산하는 과정이다. 각 하위제어기들에 대한 출력소속함수는 하위제어기들의 참여율을 출력값으로 변환하므로, [0~1]의 범위를 갖는 동일한 출력소속함수로 정의하였으며, 그림 5와 같이 11개의 퍼지변수를 사용하였다.

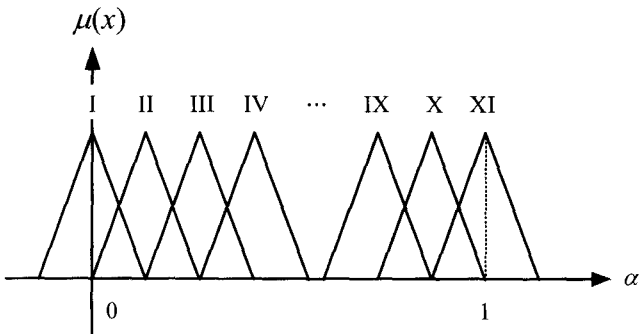


그림 5 출력소속함수

퍼지규칙표에 기반한 퍼지추론과정을 통하여 얻어지는 출력퍼지값은 식 (35)로 표현되는 무게중심법(center of gravity method)에 따라 각 하위제어기들의 참여율 값이 된다. 여기서, N_R 은 주어진 입력에 대하여 적용되는 퍼지규칙의 개수, μ_i^j 는 i 번째 입력정보에 대하여 j 번째 규칙에 따른 출력 소속함수의 퍼지값, b_i^j 는 해당하는 출력 소속함수의 수평축 무게중심을 의미한다.

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_R} b_i^j \int \mu_i^j}{\sum_{j=1}^{N_R} \int \mu_i^j} \quad (35)$$

최종적인 퍼지관리제어시스템은 그림 6에 제시되는 블록 선도로 표현될 수 있다. 선형평가모델의 응답(y_e)은 행렬 A, B, C, D 로 표현되는 식 (3)과 (5)로부터 얻을 수 있으며, 얻어진 응답 중에서 센서로부터 측정되는 변위 및 가속도 응답(y_m)은 관측기로 입력되어 식 (22)와 (23)에 의하

여 축소모델의 추정된 상태변수(\hat{x}_e)로 출력되며, 하위제어기의 제어이득에 의해 제어력을 결정하게 된다. 또한, 추정된 상태변수는 식 (33)에 의하여 제어변수(y_r^z)로 변환되어 퍼지연산자의 입력정보로서 입력되며, 각 하위제어기별 참여율과 제어력의 곱으로서 최종적인 제어력을 결정한다.

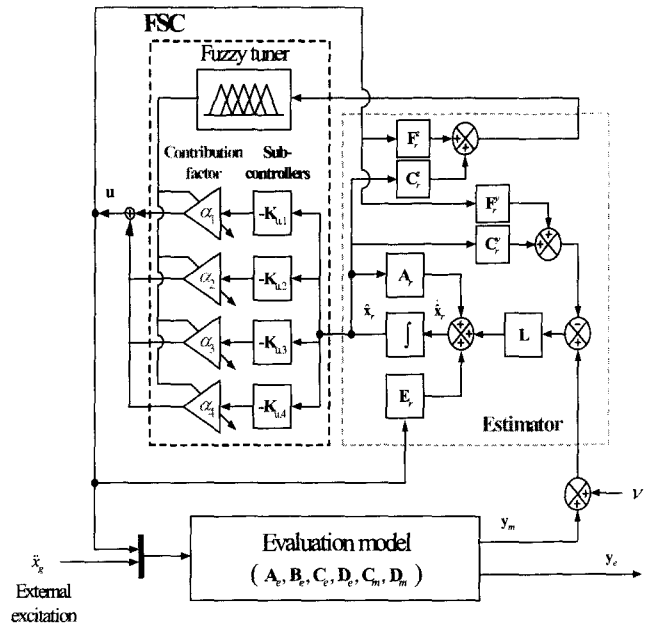


그림 6 퍼지관리제어 개념도

4. 수치모사

4.1 제어성능 비교를 위한 LQG 제어기 설계

이 연구에서는 퍼지관리제어방법과의 제어성능비교를 위하여 널리 쓰이는 제어방법인 LQG를 선정하였다. LQG제어기의 설계는 3.1절의 하위제어기 설계방법과 동일하나, 5개의 제어변수에 대한 제어성능을 모두 포함할 수 있도록 정규화된 출력($y_r^z = C_r^z x_r + F_r^z u$)을 식 (36)으로 정의한다. 여기서, y_r^z 는 $[8 \times 1]$ 크기의 벡터로서 주탑하부 4지점의 전단력 및 휨모멘트를 나타내고, $y_r^{z_1}$ 는 주탑상부의 수평변위로서 $[4 \times 1]$ 크기의 벡터이며, $y_r^{z_2}$ 는 주탑-데크간 상대변위벡터로서 $[4 \times 1]$ 크기를 가지며, $y_r^{z_3}$ 는 $[128 \times 1]$ 크기의 벡터로서 케이블 장력을 나타낸다.

$$y_r^z = \begin{bmatrix} y_r^{z_1} \\ y_r^{z_2} \\ y_r^{z_3} \\ y_r^{z_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_r^{z_1} \\ C_r^{z_2} \\ C_r^{z_3} \\ C_r^{z_4} \end{bmatrix} x_r + \begin{bmatrix} F_r^{z_1} \\ F_r^{z_2} \\ F_r^{z_3} \\ F_r^{z_4} \end{bmatrix} u \quad (36)$$

또한, 서로 다른 의미를 갖는 물리량들인 제어변수들간 상대가중치를 효과적으로 반영하기 위해서 각 제어변수들의 최대 응답값, 즉 제어시스템을 장착하지 않은 사장교시스템

의 지진응답값에 대한 비로서 정규화하여 식 (37), (38)과 같이 하나의 가중치(q)로 표현되는 가중행렬(Q)을 적용하였으며, 제어력에 대한 가중행렬은 $R=I_{12 \times 12}$ 로 정의하였다.

$$Q=q \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_4 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$Q_i = \left\{ \text{diag} \left(\frac{1}{\left(\max_j |y_j^i|_{\text{uncontrolled}}(t) \right)^2} \right) \right\}, \quad i=1,2,3,4 \quad (38)$$

여기서, $\max_j |y_j^i|_{\text{uncontrolled}}(t)$ 는 앞서와 동일하게 제어시스템을 장착하지 않은 사장교의 최대응답으로서, 각각 주탑하부의 전단력 및 모멘트, 주탑상부의 수평변위, 주탑데크간 상대변위, 그리고 케이블 장력의 최대값을 나타낸다.

벤치마크 제어문제에서 세 가지 지진(El Centro(1940), Gebze(1999), Mexico(1985))에 대하여 가중치(q)를 변화

시켜 가면서 응답의 최대값을 그림 7에 도시하였다. 이 결과로부터 제어기 용량 1,000kN을 고려하여 가중치 $q=27$ 로 LQG제어기를 선정하였다.

4.2 결과 비교

제시하는 퍼지관리제어방법(FSC)과 LQG제어방법(LQG)에 따라 설계된 제어시스템을 장착한 사장교 및 제어시스템을 장착하지 않은 사장교에 대하여 지진응답해석을 수행하였으며, 해석결과를 표 3에 수록하였다.

표에서 비제어 응답은 주탑과 데크를 STU로 연결함으로써 지진하중에 대한 교축방향의 변위를 일정수준으로 제한하고 있는 시스템의 응답이다. 따라서, 주탑과 데크사이의 상대변위는 거의 발생하지 않고 있으며, 교대 및 교각부에서 데크와 주탑상부의 수평변위도 제어시스템을 장착한 경우보다 작게 발생하고 있다. 그러나, 거더의 변위를 제한함으로써 교각 및 주탑하부에 과도한 전단력과 휨모멘트를 발생시키고 있으며, 제어시스템을 장착함으로써 이러한 문제를 해결하고 있다. 제어방법에 따른 결과를 비제어 응답과 비

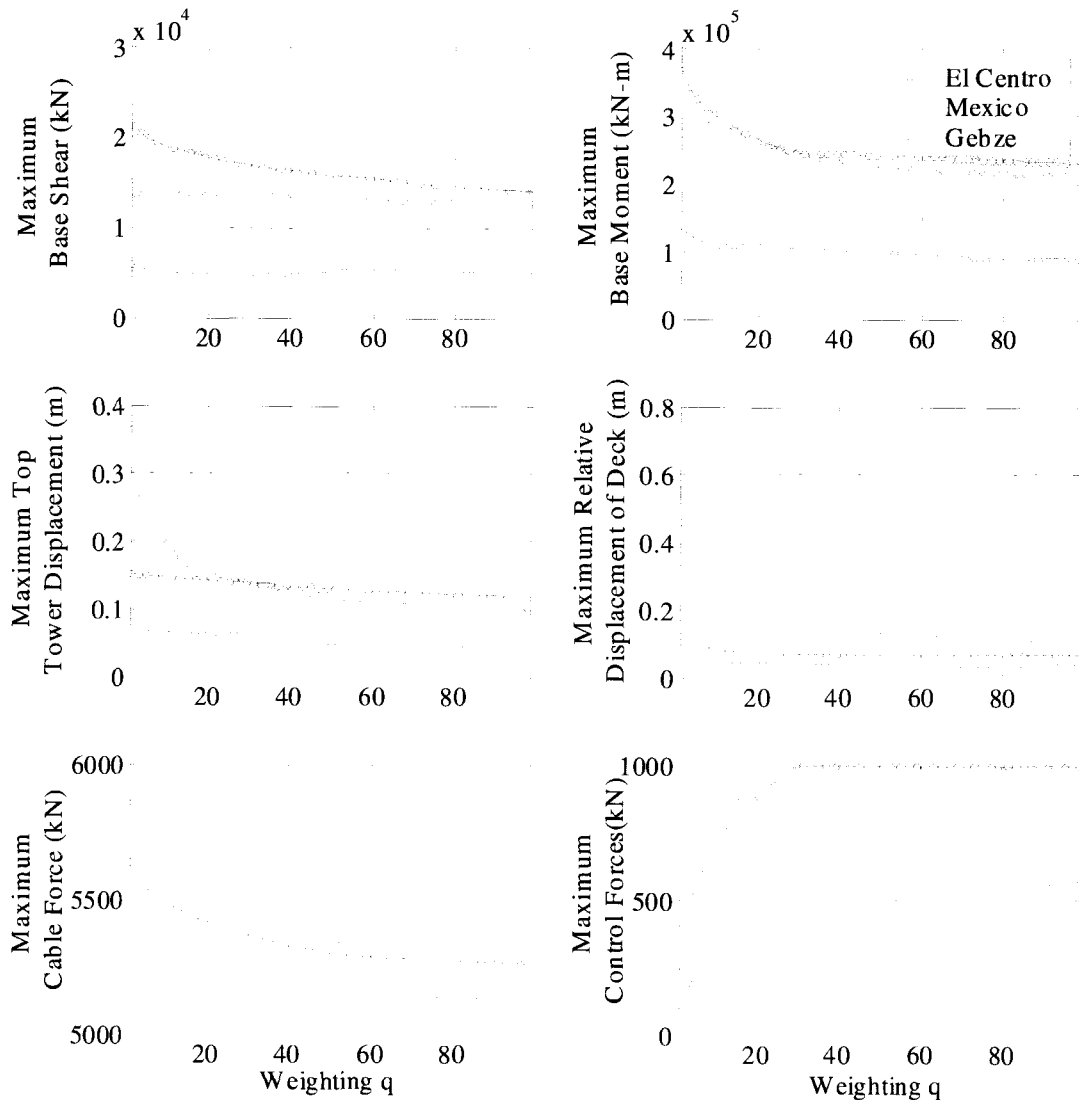


그림 7 가중치에 따른 제어성능

교하면, LQG는 최대 응답이 발생하는 El Centro 지진에 대하여 각각 64.8, 75.7%만큼, FSC는 64.1, 74.3%만큼 응답감소효과가 있다.

한편, LQG는 FSC와 유사한 수준의 최대제어력을 사용하면서 El Centro 지진에 대하여 주탑하부 전단력과 휨모멘트 및 데크의 상대변위 응답에 있어서 FSC보다 개선된 효과를 보이고 있으나, 양 끝 경간(pier 1, 4)에서의 데크와 주탑상부의 수평변위 및 케이블 장력에 있어서는 FSC가 보다 큰 응답저감효과를 보이고 있다. 또한, Mexico 및 Gebze 지진에 대해서는 FSC가 주탑하부의 전단력 및 휨모멘트와 케이블의 장력을 보다 효율적으로 줄이고 있으며, 데크의 수평변위응답에 있어서는 LQG가 개선된 제어성을 보이고 있다. 따라서, LQG와 FSC가 비슷한 응답감소효과를 보이고 있으나, 사용전력량과 가진기에 의하여 소모되는 에너지는 LQG가 최대 9%정도 많이 사용하고 있으며, Gebze 지진의 경우에 LQG의 최대 제어력이 제어기 최대용량인 1,000kN으로 포화되고 있다.

FSC의 제어효과는 각 위치별 제어력의 최대값(max. control force)과 전체 제어력의 합에 대한 최대값(max. sum of control force)으로 설명될 수 있다. 즉, 각 위치에 설치된 가진기별 최대 제어력은 FSC가 LQG보다 다소 크게 발휘되고 있으나, 전체 제어력의 이력을 시간영역에서 합한 최대값은 오히려 FSC가 작음을 알 수 있다. 이러한 결과는 FSC가 시간영역에서 매 순간 하위제어기의 제어력에 대한 참여율의 조절과정을 통하여 응답제어의 우선순위를 달리함으로써 사용 전력량을 최소로 유지하면서 효과적인 제어를 수행하고 있음을 의미한다.

그림 8에서는 각 지진가속도의 시간이력과 퍼지관리제어 방법에서 실시간으로 결정되는 하위제어기의 참여율을 도시하였다. 그림을 살펴보면, 입력가속도의 크기에 따라 하위제어기의 참여율이 비례하여 커지는 경향을 확인할 수 있다. 이는 퍼지연산자가 입력정보로부터 논리 연산에 따라 참여

율의 크기를 비례적으로 결정하기 때문이다. 따라서, 제안하는 방법은 입출력소속함수의 범위와 퍼지규칙표를 논리적으로 설정함으로써 매 순간 효과적인 제어력을 결정할 수 있으며, 이러한 과정은 설계자의 입장에서 매우 간단히 이루어질 수 있는 것이다.

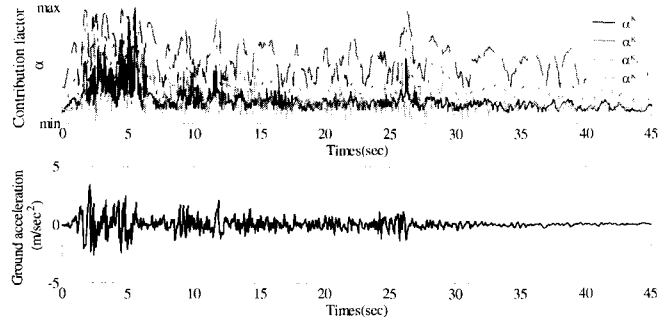


그림 8 El Centro 지진 및 FSC제어기에 의해 결정되는 참여율의 시간이력

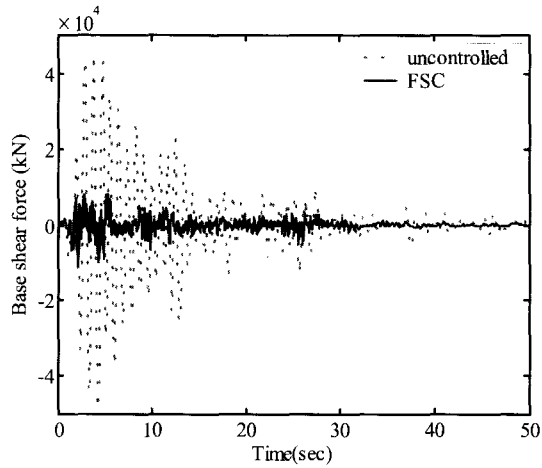
그림 9의 (a), (b)에서는 El Centro 지진하중에 대하여 제어시스템을 장착하지 않은 경우와 퍼지관리제어시스템에 대하여 주탑하부의 전단력 및 휨모멘트의 시간이력을 비교하였으며, (c), (d)에서는 케이블 장력의 변화량을 나타내었다. 그림 (c), (d)에서 x축은 128개의 케이블을 나타내고, y축은 초기에 도입되는 프리텐션(pretension)에 대하여 El Centro 지진하중으로 인한 케이블 장력의 변화폭을 나타내고 있다. 그림으로부터 사장교의 주탑하부의 전단력과 휨모멘트 및 케이블 장력에 대한 퍼지관리제어시스템의 저감효과를 알 수 있다.

5. 결 론

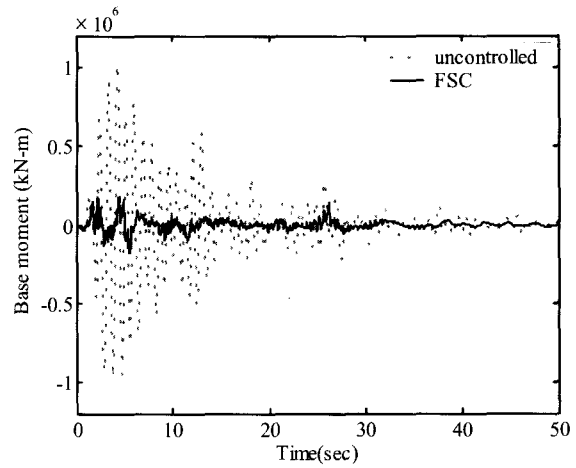
사장교의 지진응답제어를 위한 퍼지관리제어기법에 관하여 연구하였다. 제시하는 퍼지관리제어기법은 최적제어방법

표 3 지진별 제어성능

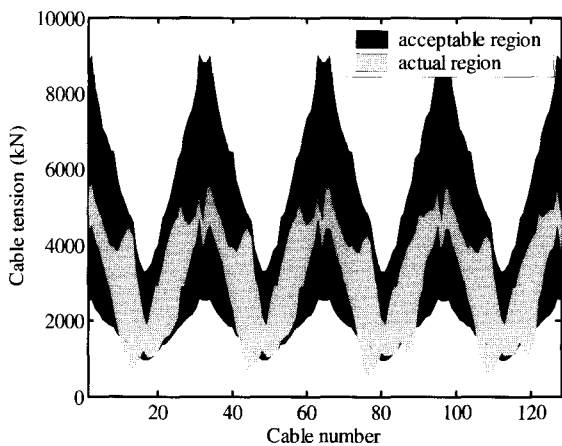
	El Centro Earthquake			Mexico Earthquake			Gebze Earthquake		
	Uncontrolled	LQG	FSC	Uncontrolled	LQG	FSC	Uncontrolled	LQG	FSC
Max. deck displacement at pier I and IV (cm)	9.76	8.65	8.60	2.43	4.73	4.80	7.19	17.10	18.17
Max. base shear (MN)	48.78	17.16	17.50	11.18	4.96	4.68	30.85	13.49	12.28
Max. base moment (MN m)	1,030.0	249.8	265.0	198.0	107.2	92.0	698.0	248.6	248.0
Max. top tower displacement (cm)	14.86	13.93	10.63	4.83	5.87	5.44	13.12	14.23	16.11
Max. rel. displacement of deck and tower (cm)	0.73	7.18	7.30	0.14	4.09	4.41	0.51	16.09	16.77
Max. tension in stay cable (MN)	5.60	5.38	5.26	5.24	5.17	5.14	5.49	5.43	5.23
Max. instantaneous control force (kN)	-	963.0	966.0	-	399.9	325.1	-	1000.0	992.9
Max. sum of control force (MN)	-	23.91	20.83	-	10.01	8.47	-	24.32	21.23
Max. instantaneous power (MW)	-	2.66	2.42	-	0.46	0.44	-	3.24	2.94
Total work done by actuators (J□103)	-	53.10	48.37	-	9.12	8.87	-	64.77	58.88
Max. control force (pier 2)	-	963.0	872.8	-	399.9	324.9	-	1000.0	971.5
Max. control force (pier 3)	-	914.1	966.0	-	380.8	325.1	-	969.7	992.9
Max. control force (bent 1)	-	519.4	485.5	-	215.3	161.1	-	532.1	496.4
Max. control force (pier 4)	-	508.9	491.6	-	213.5	164.3	-	526.4	494.3
Max. control force (top of tower 1)	-	653.8	752.9	-	248.2	265.2	-	513.8	361.4
Max. control force (top of tower 2)	-	634.0	640.5	-	271.7	305.0	-	572.2	548.5



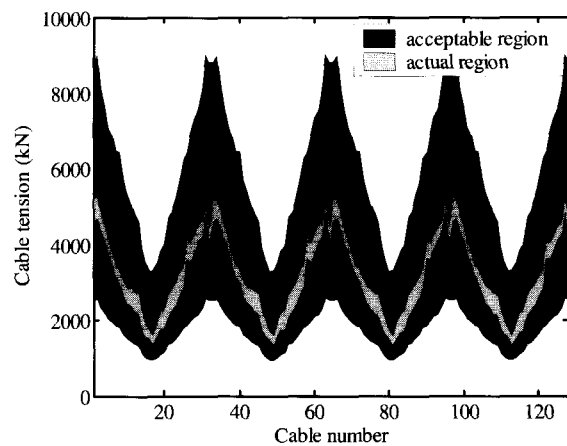
(a) Pier 2 하부의 전단력



(b) Pier 2 하부의 휨모멘트



(c) 비제어시스템의 케이블 장력



(d) 퍼지관리제어시스템의 케이블 장력

그림 9. El Centro 지진에 대한 비제어시스템 및 퍼지관리제어시스템의 지진응답 비교

과 퍼지이론을 결합한 복합제어방법의 하나로써, 여러 개의 최적제어기로 이루어진 하부제어기들과 제어기들간의 참여율을 실시간으로 조절하는 상위관리자로 구성된 계층적인 구조를 가진다. 사장교의 지진응답제어에 있어서, 주요 제어변수로는 주탑하부의 전단력과 휨모멘트, 주탑상부의 수평변위 및 데크주탑간 상대변위, 그리고 케이블의 장력을 고려하였으며, LQG 최적제어기법을 이용하여 각 제어변수별 제어성능을 극대화하도록 4개의 하위제어기를 설계하였다. 상위관리자로는 제어변수의 크기값을 입력정보로 받아서 각 하위제어기의 참여율을 출력하는 퍼지관리자를 설계하였다. 상위관리자는 제어변수의 크기정보로부터 매 순간 제어변수의 중요도를 판단하고, 퍼지연산과정을 통하여 제어기의 참여율을 실시간으로 결정한다. Dyke 등이 제안한 벤치마크 사장교에 대한 수치예제를 통하여 제시한 퍼지관리제어방법의 설계과정을 기술하였으며, 제어효과를 LQG 제어방법과 비교한 결과, 제시하는 제어기법은 제어이득의 실시간 조절을 통하여 제어성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통해 지원된 건설교

통부 건설핵심기술 연구개발사업에 의하여 수행되었음을 밝히며, 연구 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Ito, M., Fujino, Y., Narita, N., and Miyata, T., *Cable-Stayed Bridges—Their Recent Developments and Their Future*, Elsevier, Amsterdam, 1991.
2. Gimsing N., (Ed.), "Cable-Stayed Bridges—Past, Present, and Future," *IABSE Conference*, Molmoe, Sweden, 1999.
3. Chang, S. P. (Ed.), "Cable-Supported Bridges—Challenging Technical Limits," *IABSE Conference*, Seoul, Korea, 2001.
4. Yamaguchi H., and Ito M., "Full-scale Measurements and Structural Damping of Cable-Supported Bridges," *Proceedings of International Bridge Conference—Bridges into 21st Century*, Hong Kong, 1995, pp. 557-564.
5. Fujino, Y., Soong, T. T., and Spencer Jr., B. F., "Structural Control: Basic Concepts and Appli-

- cations," *Proceedings of the ASCE Structures Congress XIV*, Chicago, Illinois, 1996, pp. 1277-1287.
6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. Tanida, K., "Active Control of Bridge Towers During Erection," *Proceedings of 3rd Colloquium on Vibration Control of Structures*, JSCE, Part A, Japan, 1995, pp. 173-184.
 10. Tatsumi, M., and Hata, K., "Vibration Control of the Main Towers of the Akashi Kaikyo Bridge," *IABSE Reports—Long-Span and High Rise Structures*, Vol. 79, Kobe, 1998, pp. 57-62.
 11. Kareem, A., Kijewski, T., and Tamura, Y., "Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications," *Wind and Structures*, Vol. 2, No. 3, 1999, pp. 132-184.
 12. Dyke, S. J., Caicedo, J. M., Turan, G., Bergman, L. A., and Hague, S., "Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 857-872.
 13. Jung, H. J., Spencer Jr., B. F., and Lee, I. W., "Control of Seismically Excited Cable-Stayed Bridge Employing Magnetorheological Fluid Dampers," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 873-883.
 14. Agrawal, A. K., Yang J. N., and He W. L., "Applications of Some Semiactive Control Systems to Benchmark Cable-Stayed Bridge," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 884-894.
 15. Kwan-Soon Park, Hyun-Moo Koh, and Seung-Yong Ok, "Active control of earthquake excited structures using fuzzy supervisory technique," *Advances in Engineering Software*, Vol. 33, No. 11-12, 2002, pp. 761-768.
 16. Kwan-Soon Park, Hyun-Moo Koh, and Chung-Won Seo, "Independent modal space fuzzy control of earthquake-excited structures," *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 2, 2004, pp. 279-289.
 17. Moore, B., "Principal Component Analysis in Linear Systems: Controllability, Observability, and Model Reduction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-26, 1981, pp. 17-31.
 18. Stengel, R. F., *Stochastic optimal control: Theory and application*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
 19. Skelton, R. E., *Dynamic Systems Control: Linear Systems Analysis and Synthesis*, John Wiley & Sons, New York, 1988.
 20. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "MR Damper가 장착된 교량구조물의 준능동 퍼지제어", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제4-A호, 2002, pp. 847-857.
 21. Park, K.-S., Koh, H.-M., and Ok, S.-Y., "Active Control of Earthquake Excited Structures using Fuzzy Supervisory Technique," *Advances in Engineering Software*, Vol. 33, No. 11-12, 2002, pp. 761-768.
 22. Park, K.-S., Koh, H.-M., and Seo, C.-W., "Independent Modal Space Fuzzy Control of Earthquake-Excited Structures," *Engineering Structures*, Vol. 26, Issue 2, 2004, pp. 279-289.