

# 사장교의 지진응답제어를 위한 준능동 MR 감쇠기의 퍼지제어

## Fuzzy Control of Semi-Active Magneto-Rheological Dampers for Seismic Response Control of Cable-Stayed Bridge

옥 승 용\*  
Ok, Seung-Yong

김 동 석\*\*  
Kim, Dong-Seok

박 관 순\*\*\*  
Park, Kwan-Soon

고 현 무\*\*\*  
Koh, Hyun-Moo

### 국문요약

사장교의 효과적 지진응답제어를 위하여 MR 감쇠기를 이용한 준능동 퍼지 제어기법을 제시하였다. 제시하는 방법은 MR 감쇠기의 응답정보만을 이용한 퍼지추론 과정을 통하여 준능동 제어를 수행하는 방법으로서, 능동제어이론에 기반한 기존 준능동 제어기법과 달리, 별도의 능동제어기를 설계할 필요가 없는 간단한 구조로서 구성될 수 있다. 제시한 제어기법의 제어성능을 평가하기 위해 사장교 벤치마크 문제에 적용하였으며 기존 준능동 제어기법들과의 성능비교를 통하여 그 효율성을 평가하였다. 제어성능을 비교한 결과, 제시하는 준능동 퍼지 제어기법은 주탑의 전단력 및 휨모멘트, 데크의 수평변위, 그리고 케이블 장력 등의 상충하는 지진응답들을 동시에 효과적으로 제어함으로써 지진응답제어에 매우 효율적인 제어전략이 될 수 있음을 보였다.

주요어 : MR 감쇠기, 준능동 퍼지제어, 지진응답제어

### ABSTRACT

This paper proposes semi-active fuzzy control technique of magneto-rheological dampers for seismic response control of cable-stayed bridges. Through the fuzzy inference process, the proposed technique performs the semi-active control with the responses of MR dampers only. Moreover, differently from the conventional semi-active control technique, this technique does not require additional active controller for the primary controller, which provides a simple design process. In order to validate the control performance of the proposed technique, the semi-active fuzzy control technique is applied to the benchmark control problem of cable-stayed bridge and its control performance is compared with those of conventional semi-active control techniques. The comparative results show that the proposed fuzzy control technique can be an effective control strategy by efficiently and simultaneously reducing the mutual conflicting responses such as the shear forces and moments at the base of the towers, longitudinal displacement of the deck, and tensions in the stay cables.

Key words : MR damper, semi-active fuzzy control, seismic response control

## 1. 서 론

최근 빈번해지고 있는 지진으로 인해 구조물의 붕괴사고 및 그로 인한 경제적 손실이 증가함에 따라, 전 세계적으로 이러한 자연재해로부터 구조물의 안정성을 확보하기 위한 구조제어시스템에 대한 관심이 증폭되어왔다. 그 일환으로 1996년 홍콩에서 개최된 제 2차 국제 구조제어 workshop<sup>(1)</sup>에서는 다양한 토목 구조물에 대한 벤치마크 제어 문제를 개발하기 위한 모임이 결성되었으며, 여기서 논의된 여러 주제들 중 하나가 구조특성상 유연하면서 낮은 감쇠를 가지는 사장교의 내진 안정성을 확보하기 위한 효율적 제어시스템의 개발이었다. 따라서 사장교의 지진응답에 대한 제어시스템의 체계적인 개발과 적용을 목적으로 Dyke 등<sup>(2)</sup>은 사장교의 지진응답에 대한 벤치마크 문제를 제안하였고, 연이어 여러 연구자들에 의하여 사장교에 효율적으로 적용할 수 있는 많은 제어시스템에 대한 연구가 수행되었다.<sup>(3)-(6)</sup>

그 중 준능동 제어 시스템은 수동형 제어시스템의 신

뢰적인 안정성을 보장할 뿐만 아니라 능동 제어시스템과 비교하여 떨어지지 않는 제어성능을 발휘하기 때문에 지진에 대한 응답을 줄여줄 수 있는 시스템으로 최근 각광을 받고 있다.<sup>(7),(8)</sup> 그 중에서도 장치의 특징상 반응속도가 빠르고 온도변화에 민감하지 않으며, 불순물로 인한 성능저하가 거의 없는 MR 감쇠기(magneto-rheological damper)<sup>(9)</sup>가 가장 유망한 준능동 제어시스템으로 인식되고 있다. 특히, 최근 들어서 대용량의 감쇠기 개발에 관한 기술이 발전되면서 기술적인 실용화가 가능한 상태이다.<sup>(10)-(13)</sup> Spencer 등<sup>(9)</sup>은 Bouc-Wen 모델<sup>(14)</sup>에 기초한 MR 감쇠기의 역학적 모델을 제시하였으며, Dyke 등<sup>(15)</sup>은 3층 빌딩구조물에 대한 MR 감쇠기의 성능실험 연구를 수행하였다. 이 실험에서는 하나의 MR 감쇠기를 사용하였으며, 일련의 지진에 대한 최대 응답뿐만 아니라 넓은 주파수영역의 가진에 대한 r.m.s.(root-mean-squared) 응답을 효과적으로 감소시키는 것을 검증하였다. 또한 Dyke와 Spencer<sup>(16)</sup>은 두 개의 MR 감쇠기를 장착한 5층 구조물의 제어성능을 평가하는 수치해석을 수행하였으며, Yi 등<sup>(17)</sup>은 2개의 MR 감쇠기를 사용하여 6층 구조물에 대한 제어성능을 실험으로 검증하였다. 국내에서도 정형조 등<sup>(18)</sup>이 20톤 용량의 MR 감쇠기에 대한 실험적 연구를 수행한 바 있다.

일반적으로 MR 감쇠기의 준능동 제어기법은 능동제어

\* 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원, 공학박사

\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

\*\*\* 정희원 · 동국대학교 건축공학부 조교수, 공학박사(대표전자: kpark@dongguk.edu)

\*\*\*\* 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2005. 11. 8 / 심사종료일 : 2005. 12. 6)

시스템에 적용되는 선형최적제어기법에 기반하여 주제어기(primary controller)를 설계하고 이를 최대한 모사하도록 MR 감쇠기의 입력전압을 조절하는 방식이다. 그런데 MR 감쇠기는 시스템 자체가 소산성(dissipativeness)을 만족하는 조건하에서만 감쇠력을 발휘할 수 있는 준능동 제어시스템이며 그 이력거동에 있어서 강한 비선형성을 보이므로<sup>(7)</sup>, 주제어기로부터 산정되는 최적 제어력과 MR 감쇠기의 감쇠력은 항상 차이를 보이게 된다. 따라서 실무구조물의 적용에 있어서 무엇보다도 중요한 것은 MR 감쇠기의 이력특성을 최대한 반영하는 제어 알고리즘을 적용하는 것이다. 이에 따라 MR 감쇠기를 운용하기 위한 다양한 준능동 제어 알고리즘이 제시되었으며, 이를 이용한 수치해석을 통하여 MR 감쇠기 시스템의 제어성능은 제어 알고리즘에 크게 의존한다는 점이 밝혀졌다.<sup>(8),(19),(20)</sup> Dyke 등<sup>(7)</sup>은 하나의 MR 감쇠기 제어를 위해 가속도 되먹임에 기초한 clipped optimal control 기법을 제안하였고, Dyke와 Spencer<sup>(16)</sup>는 이 기법을 다수의 MR 감쇠기 제어에 확장하였다. clipped optimal control은 입력 전압을 0 또는 최대전압의 두 단계로 조절하는 방법으로서 여러 형태의 구조시스템에 성공적으로 적용되었지만 입력전압을 두 단계만으로 조절함으로써 생기는 감쇠력의 큰 변화로 인해 특정한 경우 국부적으로 높은 가속도 응답을 주는 문제점이 보고되기도 하였다.<sup>(21)</sup> 이를 해결하기 위하여 Yoshida와 Dyke<sup>(22)</sup>는 두 단계(bi-state)의 전압조절 방식을 0과 최대전압 사이에서 연속적으로 변화시킬 수 있는 modified clipped optimal control 기법을 새로이 제안하였다. 그러나 이 방법에서는 MR 감쇠기의 감쇠력과 입력전압의 관계를 선형으로 가정함으로써 주제어기로부터 산정되는 제어력을 선형관계로부터 간단히 산정하여 입력전압으로 결정하므로 최적의 제어효과를 낸다고 보기는 어렵다.

이 연구에서는 또 하나의 준능동 MR 감쇠기의 제어알고리즘으로서 퍼지이론을 이용한 준능동 제어기법을 소개하고, 다자유도의 복잡한 거동특성을 보이는 사장교의 지진응답제어 문제에 적용하여 제시하는 제어기법의 성능을 검증하고자 한다. 일반적으로 퍼지이론은 입력-출력간의 사상(mapping) 관계를 구성하는데 효과적인 방법으로서 MR 감쇠기와 같이 강한 비선형성을 띄는 시스템에도 적

용될 수 있는 방법이다<sup>(23)</sup>. 박관순 등<sup>(24)</sup>은 다경간 교량을 2자유도로 단순 모델링한 시스템에 MR 감쇠기를 장착하고 준능동 퍼지 제어기법을 적용함으로써 제어기법의 효율성을 연구한 바 있으며, Choi 등<sup>(25)</sup>이 3층 빌딩구조물에의 적용성을 연구하기도 하였다. 이 연구에서는 케이블-데크-주탑의 연결구조 및 모드의 인접성과 다중모드의 연계(couple)로 인하여 복잡한 거동특성을 띄는 사장교에 대하여 제시하는 MR 감쇠기의 준능동 퍼지 제어기법의 적용성을 살펴보았다. 사장교는 특히 주탑의 바닥 전단력 및 전도모멘트, 데크의 수평변위, 케이블 장력 등을 동시에 제어해야 하는 다목적 제어문제를 이루므로, 기존의 선형제어기법에 기반한 방법에 있어서는 제어성능에 큰 영향을 미치는 기준제어기를 설계하는 것이 쉽지 않은 문제이다. 따라서 이 연구에서는 Dyke 등<sup>(2)</sup>이 제안한 사장교 벤치마크 문제에 대하여 clipped optimal control 기법을 포함한 기존의 제어기법들과 퍼지이론에 기반한 제어기법의 제어성능을 비교함으로써 제시하는 준능동 퍼지 제어기법의 효율성을 살펴보았다.

## 2. 사장교 및 준능동 MR 감쇠기 모델

### 2.1 벤치마크 사장교

이 연구에서는 준능동 퍼지 제어기법의 제어성능을 평가하기 위해 Dyke 등<sup>(2)</sup>에 의하여 제안된 벤치마크 교량을 사용하였다. 이 교량은 미국 Missouri주의 Mississippi 강을 가로지르는 Cape Girardeau 부근에 건설된 Bill Emerson Memorial 교량으로 중앙경간장이 350.6m, 양측경간장이 142.7m인 사장교이다(그림 1). 교량의 상세설계를 기초로 하여 교량 전체의 복잡한 거동을 나타낼 수 있는 3차원 선형 유한요소 모델이 개발되었는데, 이는 총 579개 절점과 162개의 보 요소, 128개의 케이블 요소, 420개의 강결요소 및 134개의 집중질량으로 모델링되었다. 이 모델의 질량 및 강성행렬은 구조해석 프로그램인 ABAQUS<sup>®</sup>를 이용하여 사하중에 대한 비선형 정적해석을 통해 추출되었다. 이와 같이 구성된 909 자유도의 질량행렬 및 강성행렬은 효율적인 해석을 위해 정적응축(static condensation)방법을 적용하여 419개의 자유도를

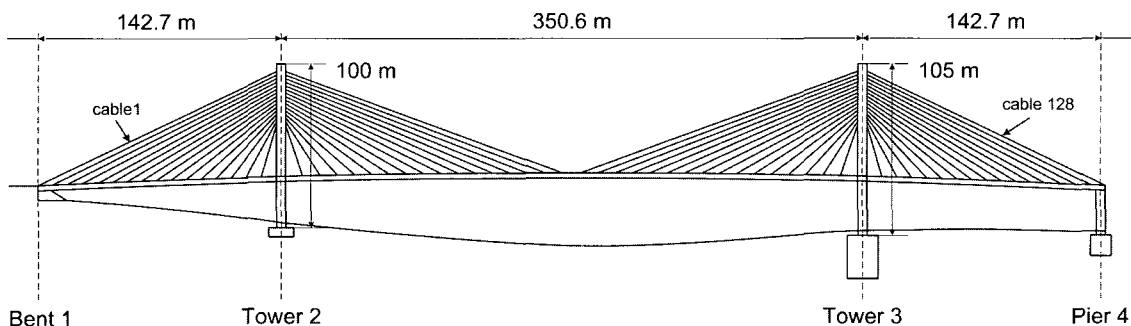


그림 1 벤치마크 사장교 측면도

갖도록 재구성되었다. 각 모드에 대한 감쇠비는 교량 설계 시의 가정에 따라 3%로 가정되었다. 구성된 교량모델에 대한 저차 10개 모드의 주파수는 각각 0.2899, 0.3699, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203(Hz)이다.

지진응답해석에서는 다양한 특성의 지진하중으로서, 대표적인 강진의 특성을 가진 El centro 지진(1940)과 장주기 성분이 많이 포함된 Mexico City 지진(1985), 그리고 단층 지진의 특성을 가진 Gebze 지진(1999)의 세 가지 역사지진을 사용하였다. 각 지진하중은 교축방향으로 모든 지점에 동시에 작용시킴으로써 지점사이의 거리에 따른 입력지진하중의 위상차는 무시하였다. 또한 교량이 암반에 건설되었다는 설계시 가정에 따라 지반과 구조물 사이의 상호작용도 고려하지 않았다.

사장교의 주탑과 데크 사이에는 온도변화에 의한 변위는 허용하나 지진과 같은 충격하중에는 강제로 작용하는 STU (shock transmission unit)가 사용되었다. 벤치마크 문제에서는 주탑과 데크간 연결장치인 STU 대신에 연구자가 제어장치를 장착할 수 있도록 STU가 없는 교량 모델을 제시하고 있으며, 이 모델을 제어기법을 평가하는데 사용하였다. 이때의 저차 10개 모드의 주파수는 각각 0.1618, 0.2666, 0.3723, 0.4545, 0.5015, 0.5650, 0.6187, 0.6486, 0.6965, 0.7094(Hz)이다. 제어시스템의 구성은 데크와 주탑 또는 교대 사이에 1000kN 용량의 MR 감쇠기를 그림 2와 같이 설치하는 것으로 하였다. 총 24개의 MR 감쇠기를 설치하였는데 주탑과 데크 사이에는 각각 8개씩, 교대와 데크 그리고 교각 4와 데크에는 각각 4개씩 설치하였다.

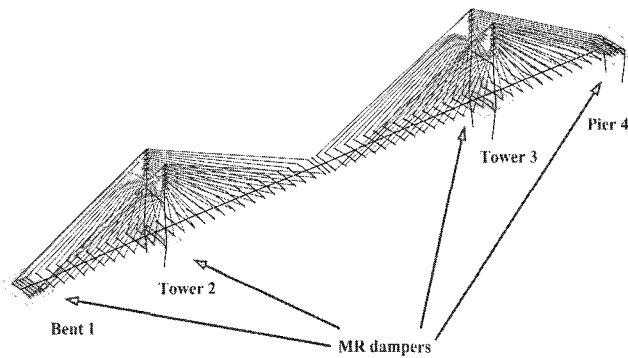


그림 2 MR 감쇠기의 장착위치

2.2 MR 감쇠기 모델

제어시스템의 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 제어장치를 얼마나 정확하게 모델링하느냐가 매우 중요하다. 최근 많은 연구자들에 의해 MR 감쇠기 시스템의 여러 역학적 모델들이 제안되었는데<sup>(9),(14),(26)</sup>, 그 중 그림 3과 같이 점성 감쇠와 Bouc-Wen 요소가 병렬로 연결된 이력모델이 전단형태의 MR 감쇠기의 거동을 잘 묘사하는 것으로 증명되었다.<sup>(8),(17),(27)</sup> 또한 실제 규모의 MR 감쇠기의 모델링에도 적당할 것으로 예측되고 있다.<sup>(22)</sup>

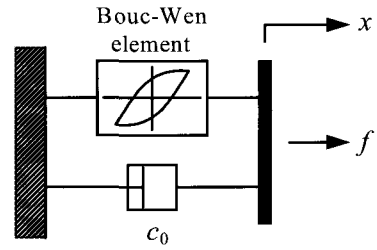


그림 3 전단형태 MR 감쇠기의 역학적 모델

발생하는 감쇠력은 아래의 식 (1)과 (2)로서 정의된다.

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \tag{1}$$

$$\dot{z} = -\gamma |x|z|z|^{n-1} - \beta \dot{x}|z|^n + A_m \dot{x} \tag{2}$$

여기서  $x$ 는 제어장치의 운동거리(stroke)이고,  $z$ 는 이력 거동에 관계되는 내부변수이다. 식 (2)의 매개변수  $\gamma, \beta, n, A_m$ 은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 쓰이는 변수들이다. 그리고  $\alpha$ 와  $c_0$ 는 감쇠기의 입력전압에 따라 식 (3), (4)로 결정된다.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \tag{3}$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \tag{4}$$

따라서 MR 감쇠기의 입력전압은 식 (3), (4)에 따라 매 순간 변화하는 감쇠력을 결정하게 된다. 또한 입력 전압의 변화에 MR 감쇠기가 반응하는데 걸리는 시간차이 (timelag)를 고려하기 위하여 식 (5)의 1차 필터방정식 (filter dynamics)을 시스템에 도입하였다.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \tag{5}$$

여기서,  $v$ 는 제어기로부터 결정되는 입력전압이고,  $\eta$ 는 필터방정식의 시간상수이다.

Yi 등<sup>(17)</sup>은 Washington 대학에서 실험한 실험 결과로부터 비선형 SI(system identification) 기법을 적용하여 1000kN 용량 MR 감쇠기의 모델상수들을 제시하였다(표 1). 여기서, MR 감쇠기는 최대 입력전압이 10V일 때 최대 용량 1000kN을 발휘하도록 스케일링되었다.

표 1 MR 감쇠기 모델의 변수들

Parameter	Value	Parameter	Value
$\alpha_a$	$1.087 \times 10^5$ N/cm	$A_m$	1.2
$\alpha_b$	$4.962 \times 10^5$ N/(cm·V)	$n$	1
$c_{0a}$	4.40 N·s/cm	$\beta$	$3 \text{ cm}^{-1}$
$c_{0b}$	$4.40 \times 10^1$ N·s/(cm·V)	$\gamma$	$3 \text{ cm}^{-1}$
		$\eta$	$50 \text{ s}^{-1}$

### 3. MR 감쇠기의 준능동 제어전략

#### 3.1 기존 준능동 제어

MR 감쇠기의 준능동 제어방법은 일반적으로 두 단계로 나누어진다. 첫 번째 단계에서는 이상적인 능동제어장치를 가정하고 능동제어이론에 따라 적절한 주제어기를 설계한다. 따라서 주제어기는 이상적인 최적 제어력을 결정한다. 두 번째 단계에서는 주제어기에서 결정된 최적 제어력을 모사하도록 MR 감쇠기의 입력전압을 결정하는 2차 제어기(secondary controller)를 설계하게 된다. 서론에서 언급하였듯이, 준능동 MR 감쇠기가 갖는 소산성과 강한 비선형 특성상 2차 제어기로부터 결정되는 입력전압은 주제어기에서 산정하는 최적 제어력에 근접하는 감쇠력만을 결정하며 이는 다시 제어력으로서 구조물에 되먹임된다. 여기서는 기존에 제시된 네 가지 유형의 준능동 제어(semi-active control, SAC)기법을 간략히 기술하고자 한다. 네 가지 준능동 제어기법은 각각 SAC1~SAC4로 명명하였다.

##### 3.1.1 SAC1: 소산성에 기초한 일반적인 제어

이 방법은 Ivers와 Miller<sup>(28)</sup>에 의하여 제시되어 자동차의 완충장치에 적용되었으며, Patten 등<sup>(29)</sup>에 의하여 교량구조물의 준능동 진동흡수장치(semi-active vibration absorber, SAVA)에도 적용되었던 방법이다. 이는 감쇠기 양단의 상대변위와 상대속도의 위상차로 정의되는 소산성을 극대화하도록 식 (6)으로 구현된다. 즉, 감쇠력이 소산적일 때는 최대 전압을 감쇠기에 가하고 감쇠력이 소산적이지 않을 때는 최소전압을 가하는 방식으로 운용된다.

$$\nu_i = \begin{cases} V_{\max}, & \text{for } x_i \cdot \dot{x}_i \geq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $\nu_i$ 는 MR 감쇠기의 입력전압,  $V_{\max}$ 는 최대 입력전압(10V),  $x_i$ 와  $\dot{x}_i$ 는 각각 감쇠기의 상대변위와 상대속도로서 두 물리량의 곱으로서 소산성을 정의할 수 있다. 이 방법에서는 최적 제어력을 결정하기 위한 선형제어이론을 필요로 하지 않으며, 제어장치 자체의 운동만으로 입력 명령을 결정하게 된다. 식 (6)의 입력전압 결정과정은 그림 4로 표현될 수 있다.

##### 3.1.2 SAC2: 감쇠력과 감쇠기의 속도에 따른 clipped optimal control

이 방법은 전형적인 준능동 제어방법으로서 clipped optimal control이라고 한다. 이는 먼저 선형제어이론을 이용하여 주제어기를 설계하고 주제어기에서 계산된 요구 제어력과 감쇠기의 상대속도의 위상차에 의해 감쇠기의 소산성을 정의함으로써 식 (7)과 같이 2차 제어기를 구성하는 방법이다.

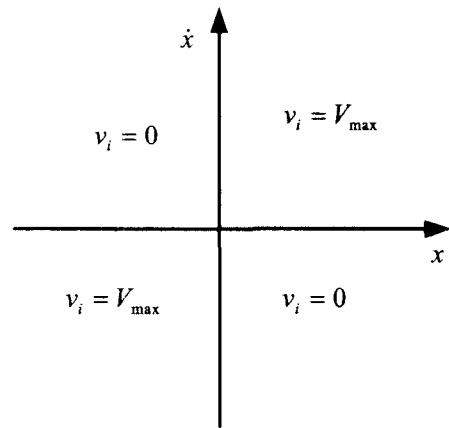


그림 4 SAC1의 입력전압 결정

$$\nu_i = \begin{cases} V_{\max}, & \text{for } f_{ci} \cdot \dot{x}_i \leq 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

여기서  $f_{ci}$ 는 주제어기에서 계산된 최적 제어력이다.

주제어기에서 산정한 제어력과 속도의 부호가 서로 반대일 때 에너지가 소산이 되고 이 때 소산 에너지가 크게 되도록 감쇠기의 입력전압을  $V_{\max}$ 가 되도록 한다. 그 반대의 경우는 입력전압이 0이 되도록 한다. 2차 제어기의 입력전압 결정은 속도 및 요구 제어력 평면에서 그림 5와 같이 표현될 수 있다.

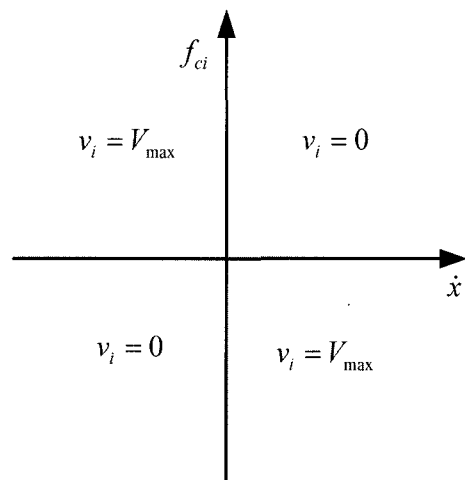


그림 5 SAC2의 입력전압 결정

##### 3.1.3 SAC3: 요구 제어력과 감쇠력에 기초한 clipped optimal control

이 방법은 Dyke 등<sup>(7)</sup>에 의하여 제시된 또 하나의 clipped optimal control 기법으로서 역시 주제어기에 의하여 결정되는 제어력을 추종하도록 감쇠력과 요구 제어력간 위상차 및 크기로부터 입력전압을 조절한다. 입력전압을 결정하는 2차 제어기의 제어규칙은 식 (8)에 의하여 0과 최대전압을 선택하게 된다.

$$\nu_i = V_{\max} H\{(f_{ci} - f_i)f_i\} \quad (8)$$

여기서  $f_i$ 는 MR 감쇠기의 감쇠력,  $H(\cdot)$ 는 0 또는 1의 값을 갖는 Heaviside step 함수이다.<sup>(7)</sup> 입력전압의 결정 과정을 제어력과 감쇠력 평면상의 영역으로 표현하면 그림 6과 같다.

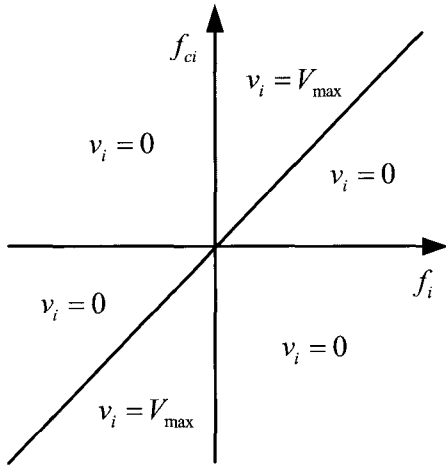


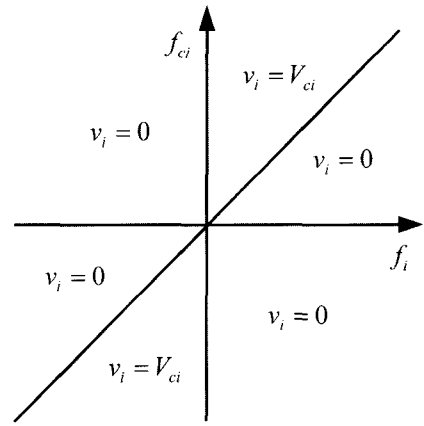
그림 6 SAC3의 입력전압 결정

이는 주제어기에 의한 요구 최적제어력( $f_{ci}$ )보다 감쇠기에 의해 발휘되는 감쇠력( $f_i$ )이 작을 때는 입력전압( $v_i$ )을 최대전압( $V_{max}$ )으로 증가시킴으로써 최적제어력( $f_{ci}$ )에 근접하도록 한다.

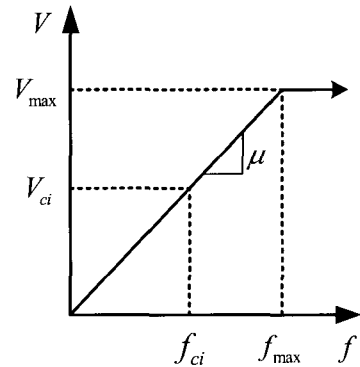
3.1.4 SAC4: modified clipped optimal control

MR 감쇠기의 제어방법으로 앞에서 소개한 clipped optimal control 기법(SAC3)이 널리 적용되어 왔다. 그러나 Ramallo 등<sup>(21)</sup>에 따르면 기존 방법에서의 2단계 입력전압 조절방식은 감쇠력의 갑작스런 변화를 초래하게 되며, 이러한 변화는 구조물에 일시적인 step response를 초래함으로써 특정 경우에 국부적으로 큰 가속도 응답을 유발시킬 수 있다고 보고되었다. 이러한 현상을 줄이기 위해 Yoshida 와 Dyke<sup>(22)</sup>는 입력전압과 감쇠력간에 선형관계를 가정함으로써 입력 전압을 연속적으로 조절할 수 있는 modified clipped optimal control 기법을 개발하였다.

전술한 SAC3 방법에서는, 실제 감쇠력의 절대값이 1차 제어기에 의해 계산된 요구 제어력의 절대값보다 크거나 부호가 서로 반대이면 감쇠기에 작용하는 입력 전압  $v_i$ 는 0이 되며, 그 외의 경우는 입력전압  $v_i$ 가 항상 최대 전압  $V_{max}$ 로 결정된다(식 (8) 참조). 하지만 SAC4방법에서는 식 (9)와 같이 입력 전압  $v_i$ 는 감쇠력과 입력전압 사이의 관계를 선형으로 가정함으로써 식 (10)으로서 결정된다. 식 (10)에서 요구되는 제어력이 감쇠기의 최대용량보다 클 경우에는  $v_i$ 는 최대 입력전압( $V_{max}$ )이 되도록 정하였다. 따라서 SAC4 방법에서는 감쇠력의 용량 한계 내에서 입력전압을 연속적으로 변화시킬 수 있는 2차



(a) Control voltage selection



(b) Determination of control voltage

그림 7 SAC4의 입력전압 결정

제어기를 설계할 수 있으며, 제어력과 감쇠력 평면상의 영역에서 그림 7로서 표현된다.

$$v_i = V_{ci}H\{(f_{ci} - f_i)f_i\} \tag{9}$$

$$V_{ci} = \begin{cases} \mu_i f_{ci}, & \text{for } f_{ci} \leq f_{max} \\ V_{max}, & \text{for } f_{ci} > f_{max} \end{cases} \tag{10}$$

여기서  $f_{max}$ 는 감쇠기의 최대 감쇠력,  $\mu$ 는 감쇠력과 전압 사이의 선형 관계계수로서  $\frac{V_{max}}{f_{max}}$ 이다.

3.2 준능동 퍼지 제어

퍼지 이론은 수학적인 식보다는 명제를 사용하는 인간의 추론방법을 이용하여 입력과 출력의 관계를 표현하는 것이다. 따라서 사용자에게 친숙한 언어로서 입·출력 관계를 구성할 수 있으며, MR 감쇠기와 같이 강한 비선형 이력거동을 보이는 시스템에도 적용될 수 있는 효과적인 방법으로 널리 인식되고 있다.<sup>(23)</sup>

퍼지이론에서 입력정보는 물리적 의미를 갖는 값으로서, 이 연구에서는 MR 감쇠기의 입력전압을 크게 할 것인지 작게 할 것인지를 판단하기 위하여 MR 감쇠기의 변위 또는 속도를 입력정보로 사용하였다. 퍼지화 과정에

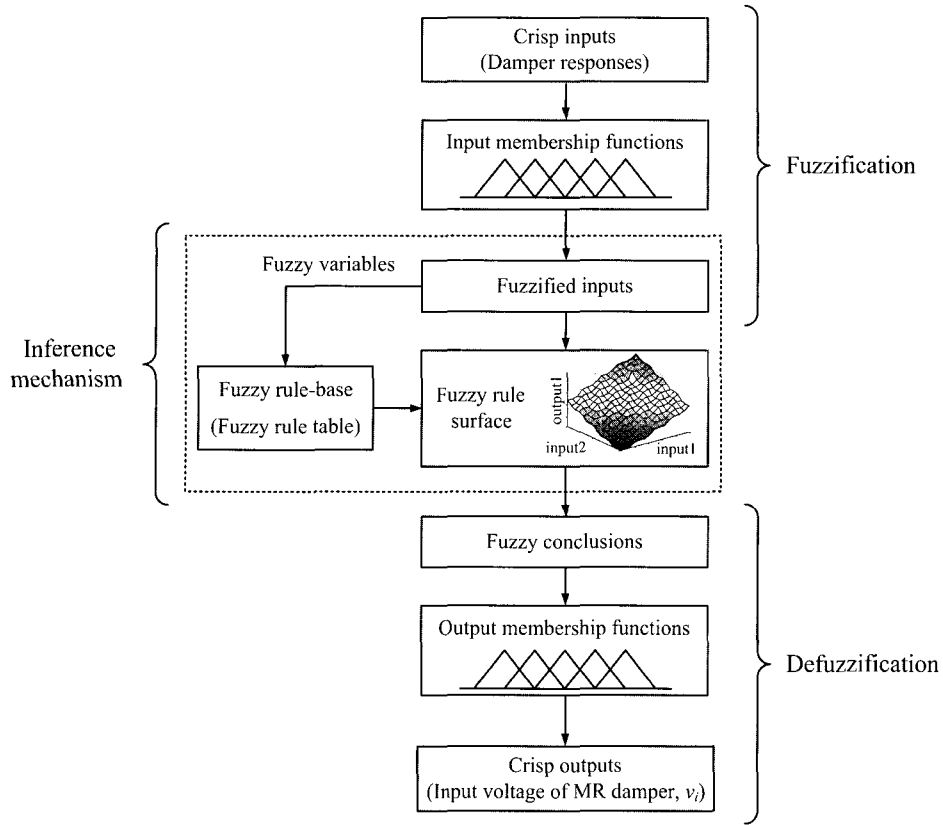


그림 8 퍼지제어의 순차도

서 MR 감쇠기의 변위 및 속도 등의 입력정보는 이해하고 다루기 쉬운 언어(입력퍼지변수)로서 변환되며, 전문가의 결정이 포함될 수 있는 추론과정을 통해 역시 동일한 형태의 언어(출력퍼지변수)로서 출력된다. 추론과정으로부터 얻어진 출력퍼지변수는 비퍼지화 과정을 통하여 물리적 의미를 갖는 값, 여기서는 MR 감쇠기의 입력전압 값으로 최종 변환된다. 그러므로 MR 감쇠기의 준능동 퍼지제어는 명제를 사용하는 인간의 추론과정을 통해 시스템의 응답정보로부터 현재의 상태를 파악하고 MR 감쇠기의 입력전압을 결정하게 된다. 그림 8은 퍼지제어의 순차도를 나타낸다.

퍼지화 또는 비퍼지화 과정에서는 물리적 의미를 가지는 입·출력정보를 몇 개의 언어(퍼지변수)로 상응시키는 연결 고리가 필요하게 되는데, 이것을 소속함수(membership function)를 통해 구현할 수 있다. 입력 소속함수는 주어진 정보의 크기에 따라 몇 개의 퍼지변수로 정의된다. 입력 소속함수의 개수가 많으면 입력정보는 작은 범위를 가지는 여러 개의 변수로 나누어지게 된다. 따라서 주어진 입력정보에 민감하게 반응할 수 있으나 계산시간이 오래 걸리게 된다. 그러므로 적절한 소속함수의 개수를 정의할 필요가 있다. 이 연구에서는 MR 감쇠기의 상대속도 또는 변위에 대해 삼각형 형태의 소속함수를 11개 사용하였다. 출력정보에 대해서는 6개의 삼각형 소속함수를 사용하여 MR 감쇠기의 입력전압을 표현하도록 하였다. 이 연구에서 사용한 입력 및 출력 소속함수를 그림 9와 그림 10에 도시하였다. 그림에서  $x$ 와  $\dot{x}$ 은 MR

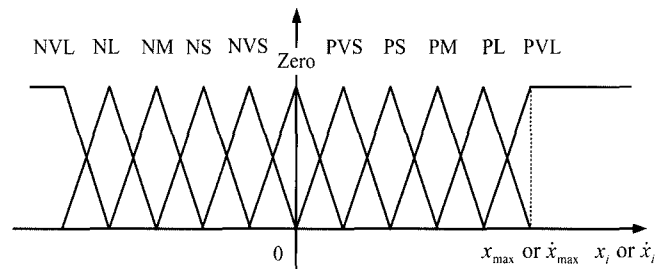


그림 9 입력 소속함수

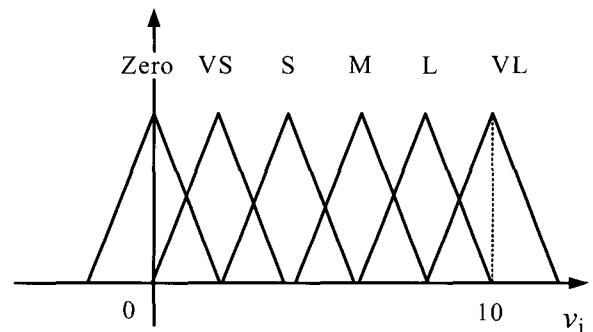


그림 10 출력 소속함수

감쇠기의 상대변위 및 상대속도이며  $x_{max}$ 와  $\dot{x}_{max}$ 는 상대변위 및 상대속도의 최대값이다. 그리고  $v_i$ 는 MR 감쇠기의 입력전압이다.

각 입·출력 소속함수를 정의하는 퍼지변수는 아래와 같으며, 각각 N(negative), P(positive), S(small), M(medium), L(large), V(very)와 Zero의 물리적 의미를 나타

표 2 FUZ1의 퍼지규칙 표

Rule 1	$u$ (Relative displacement across MR damper)										
	NVL	NL	NM	NS	NVS	Zero	PVS	PS	PM	PL	PVL
$v_i$ (Input Voltage of MR damper)	VL	L	M	S	VS	Zero	VS	S	M	L	VL

표 3. FUZ2의 퍼지규칙 표

Rule 2	$\dot{u}$ (Relative velocity across MR damper)										
	NVL	NL	NM	NS	NVS	Zero	PVS	PS	PM	PL	PVL
$v_i$ (Input Voltage of MR damper)	VL	L	M	S	VS	Zero	VS	S	M	L	VL

내는 약자로서 정의하였다.

입력 퍼지변수: {NVL, NL, NM, NS, NVS, Zero, PVS, PS, PM, PL, PVL}

출력 퍼지변수: {Zero, VS, S, M, L, VL}

입·출력 퍼지변수 사이의 상관관계를 구성하는 추론 과정은 각 변수들의 조합을 식 (11)과 같은 *if-then* 조건식으로 표현하는 것이 일반적이다.

퍼지규칙: *If  $x_i$  (또는  $\dot{x}_i$ ) is PS, then  $v_i$  is S.* (11)

위와 같은 *if-then* 조건식으로 표현되는 입·출력 관계 (input-output relationship)는 퍼지 규칙 표(fuzzy rule table)로서 정리될 수 있다. 이 연구에서는 입력정보에 따라 2개의 퍼지 규칙표를 정의하였으며, 각각 FUZ1, FUZ2라고 명명하였다. FUZ1은 MR 감쇠기의 상대변위만을 입력정보로 하는 단일 입·출력 퍼지제어기이며, FUZ2는 MR 감쇠기의 상대속도만을 입력정보로 하는 단일 입·출력 퍼지제어기이다. 각 퍼지 제어기의 퍼지 규칙표는 입력의 절대값 크기가 클수록 큰 출력을 내는 비례관계를 사용하여 표 2와 표 3과 같이 구성하였다.

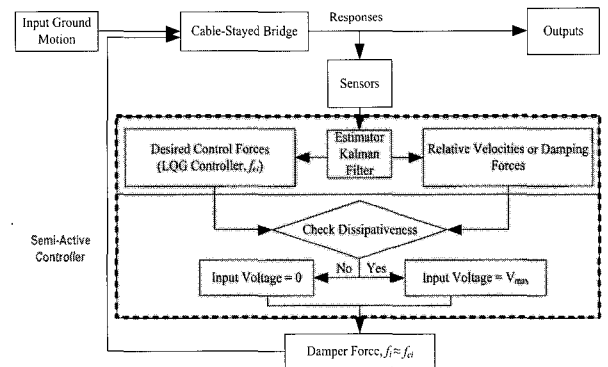
박관순 등<sup>(30)</sup>에서 알 수 있듯이, 퍼지시스템의 설계는 입·출력 소속함수 및 퍼지 규칙표의 결정을 의미한다. 따라서 정의된 2가지 유형의 퍼지 규칙 표에 대하여 입·출력 소속함수를 결정함으로써 FUZ1과 FUZ2 제어 시스템을 설계할 수 있다. 출력 소속함수는 MR 감쇠기의 입력전압을 결정하게 되므로, 0~10V를 균등 분할하는 6개의 삼각형 소속함수로서 모두 동일하게 정의하였다. 입력 소속함수도 역시 각 입력정보에 대하여 균등 분할하는 11개의 소속함수로 정의하였으며, 이 때 MR 감쇠기에 대한 각 위치별 입력 소속함수의 최대범위는 표 4와 같다.

표 4 퍼지 제어시스템의 입력 소속함수의 최대값

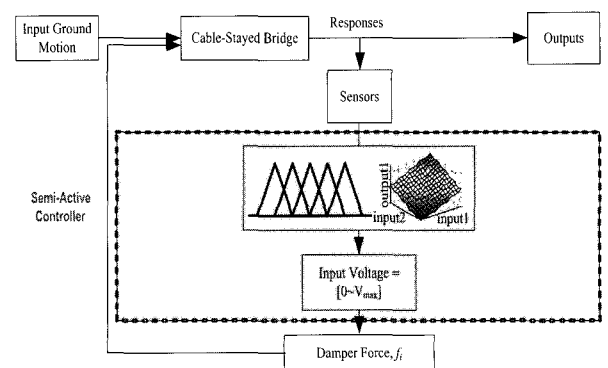
MR 감쇠기의 설치위치	FUZ1	FUZ2
	상대변위( $x_{max}$ ) (cm)	상대속도( $\dot{x}_{max}$ ) (m/s)
교대	0.0489	0.0353
주탑 2	8.6594	0.3301
주탑 3	1.0619	0.2489
교각 4	1.0619	0.0011

4. 해석결과 및 토의

여기서는 기존 준능동 제어기법을 적용한 사장교 시스템과 준능동 퍼지제어기법을 적용한 사장교 시스템의 지진응답해석을 수행하고 그 제어성능을 비교하였다. 기존 준능동 제어시스템은 그림 11(a)의 블록선도로 표현될 수 있다. 지진하중으로 인한 사장교의 동적응답을 센서로 측정하고, 이로부터 Kalman filter를 이용하여 사장교의 동적 응답을 예측하게 된다.<sup>(2),(30),(31)</sup> 예측된 응답으로부터 주제어기의 요구 제어력을 산정하고 동시에 MR 감쇠기의 상대속도(SAC2) 또는 감쇠력(SAC3, SAC4)을 얻게 된다. 주제어기로부터 산정된 요구 제어력과 MR 감쇠기의 상대속도(상대변위) 또는 감쇠력으로부터 소산성을 각 제어기법별 조건식, 식 (6)~(10)을 이용하여 판별할 수 있다. 따라서 최종적인 MR 감쇠기의 입력전압을 결정함으



(a) Semi-active clipped optimal control



(b) Semi-active fuzzy control

그림 11 두 제어시스템의 개념도

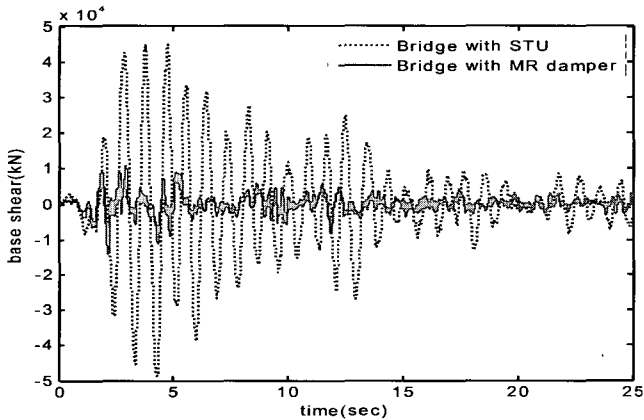
로써 식 (1)~(5)의 MR 감쇠기의 역학적 모델로부터 감쇠력을 결정하고, 이를 사장교 모델에 되먹임(feedback)함으로써 지진응답해석을 수행하게 된다. 다음으로, 그림 11(b)의 블록선도로 표현되는 준능동 퍼지제어기법은 Kalman filter로부터 예측된 MR 감쇠기의 상대변위 또는 상대속도를 퍼지제어기의 입력정보로 사용한다. 따라서 앞서 3.2절에서 제시한 입출력소속함수 및 퍼지규칙표를 통하여 MR 감쇠기의 입력전압을 출력으로 얻고 이로부터 동일한 방식으로 감쇠력을 되먹임함으로써 사장교의 지진응답 제어를 수행하게 된다.

4.1 준능동 MR 감쇠시스템의 제진성능

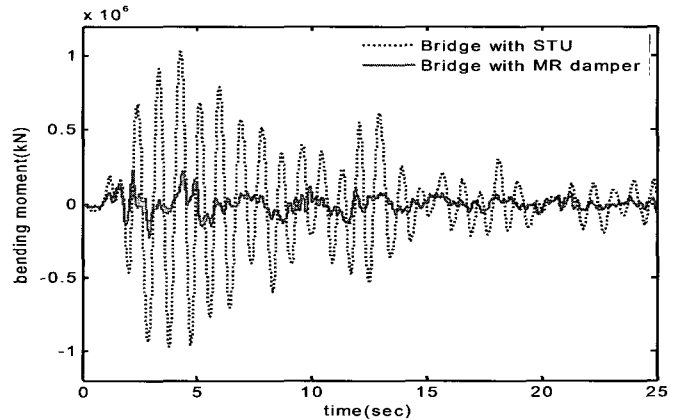
준능동 MR 감쇠시스템의 제진성능을 평가하기 위해 주탑과 데크 사이에 MR 감쇠기를 장착한 사장교와 주탑과 데크간 연결장치로 STU를 장착한 사장교의 응답을 비교하였다. 그림 12는 El Centro 지진에 대한 주탑 하단부의 전단력과 휨모멘트를 비교·도시한 그림이다. 그림에서의 준능동 제어시스템은 MR 감쇠기를 운용하는 퍼지제어기법으로 속도만을 입력정보로 사용한 FUZZ 제어시스템의 지진응답 해석결과이다. STU를 장착한 비제어 시스템과 비교한 결과 FUZZ 기법에 의한 준능동 MR 감

쇠기를 통하여 각각 70.7%, 76.0%의 전단력과 휨모멘트의 감소율을 얻을 수 있었다. 이러한 감소효과는 Mexico City 지진과 Gebze 지진에서도 유사한 경향을 보이는데, 전단력은 Mexico City 지진과 Gebze 지진에서 각각 51.2%, 60.7%만큼 감소하였으며 모멘트는 각각 60.4%, 72.5%만큼 감소하였다.

사장교에서는 데크와 주탑에 압축력을 유지시키기 위하여 각 케이블에 초기장력(pretension)을 도입하게 된다. 따라서 사장교의 안정성을 위해서는 지진하중으로 인한 장력의 변동이 초기장력을 중심으로 일정 수준의 범위 내에서 유지되어야 한다. 이는 장력의 큰 변동이 케이블의 파손이나 unseating을 유발할 수 있기 때문이다. 벤치마크 문제에서는 장력의 변동범위를  $[0.2T_{fi}, 0.7T_{fi}]$ 로 제안하고 있다. 여기서  $T_{fi}$ 는  $i$ -번째 케이블의 극한장력이다. 하한 기준은 케이블의 unseating이 발생하지 않도록 하기 위한 값이고 상한 기준은 케이블이 끊어지는 것을 막는 안전율을 제공한다. 따라서 케이블의 장력은 상한기준을 초과해서도 안 되고 하한기준보다 내려가서도 안 된다. 그림 13은 El Centro 지진 하에서 STU를 장착한 비제어 사장교와 MR 감쇠기를 장착한 FUZZ 제어시스템의 케이블 장력의 변동량을 나타낸 것이다. 그림에서 수평축

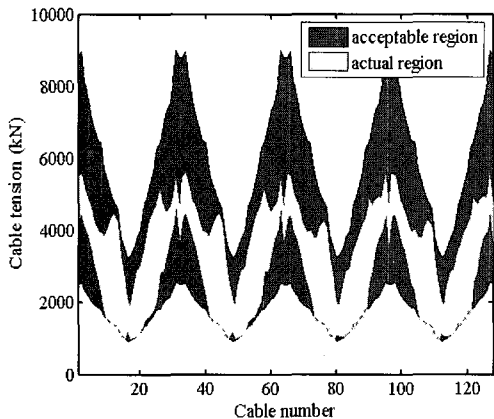


(a) 전단력 시간이력

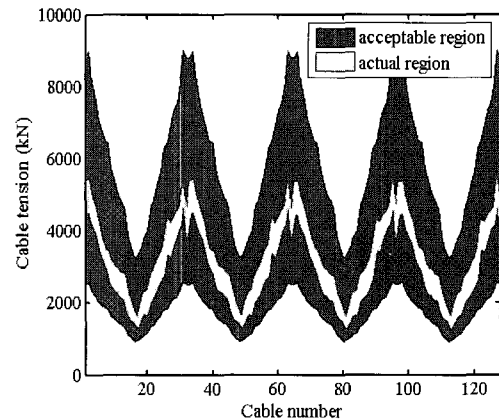


(b) 모멘트 시간이력

그림 12 El-Centro 지진에 대한 주탑 하단부의 전단력과 모멘트 시간이력



(a) 비제어시스템



(b) 준능동 퍼지 제어시스템

그림 13 El-Centro 지진에 대한 케이블 장력의 변동량



은 128개 케이블을 나타내며, 수직축은 지진하중으로 인한 각 케이블의 장력의 변동범위를 의미한다. 그림에서 STU를 장착한 비제어 사장교에서 주탑에 가까운 위치에 거치된 케이블의 장력이 하한기준보다 작은 값을 보이는 반면, FUZ2 제어시스템을 적용한 사장교의 케이블 장력은 모두 허용범위 내에서 소폭으로 변동하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 12와 그림 13에서의 주탑하부의 전단력과 휨모멘트 및 케이블 장력의 해석결과로부터 제안하는 준능동 MR 감쇠기 시스템이 사장교의 지진응답을 효과적으로 제어하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 준능동 제어기법간 제어성능 비교

이 연구에서 제안하는 준능동 퍼지 제어기법의 효율성을 검증하기 위해 MR 감쇠기의 입력전압을 항상 최대값으로 설정한 수동 제어시스템 및 4가지 유형의 기존 준능동 제어기법과의 지진응답해석 결과를 비교하였다.

기존의 준능동 제어기법 중 SAC2~SAC4 제어시스템은 MR 감쇠기의 입력전압을 결정하는 과정에서 선형제어이론에 기반하여 설계되는 주제어기를 필요로 한다. 이 연구에서는 일반적으로 널리 사용되고 있는 대표적 선형 제어기법인 LQG 제어기법을 이용하였으며, 사장교 벤치마크 문제에서 제시된 예제 LQG 제어기를 주제어기로서

동일하게 적용하였다.

벤치마크 제어문제에서는 총 18개의 성능지수를 제시하고 있는데, 각 성능지수는 지진별로 STU를 장착한 사장교의 응답을 이용하여 정규화함으로써 정의되며 표 5와 같다. 각 성능지수는 3가지 역사지진인 El centro 지진(1940), Mexico City 지진(1985), 그리고 Gebze 지진(1999)에 대하여 각각 산정되며, 각 지진에 대하여 제어기법별 성능지수를 비교 평가한다. 세 지진에 대한 해석결과를 벤치마크에서 제시하는 성능지수로서 각각 표 6~9에 도시하였다.

$J_1 \sim J_6$ 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. 표 5에서  $F_{bi}(t)$ 는 제어시스템을 장착한 사장교의  $i$ -번째 주탑하부에서 발생하는 바닥전단력의 시간이력이며,  $F_{0b}^{max}$ 는 STU를 장착한 사장교의 주탑하부에서 발생할 수 있는 바닥전단력의 최대값으로서  $\max_{i,t} |F_{bi}(t)|$ 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  $i$ -번

표 5 성능지수

	성능지수		성능지수
$J_1$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t}  F_{bi}^*(t) }{F_{0b}^{max}} \right\}$	$J_{10}$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t} \ M_{di}(t)\ }{\ M_{0d}^{max}\ } \right\}$
$J_2$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t}  F_{di}(t) }{F_{0d}^{max}} \right\}$	$J_{11}$	$\max_{eq} \left\{ \max_{i,t} \frac{\ T_{ai}(t) - T_{0i}\ }{T_{0i}} \right\}$
$J_3$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t}  M_{bi}(t) }{M_{0b}^{max}} \right\}$	$J_{12}$	$\max_{eq} \left\{ \max_{i,t} \left( \frac{f_i(t)}{W} \right) \right\}$
$J_4$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t}  M_{di}(t) }{M_{0d}^{max}} \right\}$	$J_{13}$	$\max_{eq} \left\{ \max_{i,t} \left( \frac{y_i^d(t)}{x_0^{max}} \right) \right\}$
$J_5$	$\max_{eq} \left\{ \max_{i,t} \left  \frac{T_{ai}(t) - T_{0i}}{T_{0i}} \right  \right\}$	$J_{14}$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_x \left[ \sum_i P_i(t) \right]}{x_0^{max} W} \right\}$
$J_6$	$\max_{eq} \left\{ \max_{i,t} \left  \frac{x_{bi}}{x_{0b}} \right  \right\}$	$J_{15}$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\sum_i \left( \int_0^{T_i} P_i(t) dt \right)}{x_0^{max} W} \right\}$
$J_7$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t} \ F_{bi}^*(t)\ }{\ F_{0b}^{max}\ } \right\}$	$J_{16}$	number of control devices
$J_8$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t} \ F_{di}^*(t)\ }{\ F_{0d}^{max}\ } \right\}$	$J_{17}$	number of sensors
$J_9$	$\max_{eq} \left\{ \frac{\max_{i,t} \ M_{bi}^*(t)\ }{\ M_{0b}^{max}\ } \right\}$	$J_{18}$	dimension of control algorithm

제 케이블장력의 시간이력이고,  $T_{0i}$ 는 STU를 장착한 사장교의  $i$ -번째 케이블장력의 최대값이다.

$J_7 \sim J_{11}$ 은 평균응답으로서 역시 주탑하부의 전단력, 휨모멘트, 데크위치에서의 주탑에 작용하는 전단력, 휨모멘트, 케이블 장력 변동량의 r.m.s 값을 STU를 장착한 비제어시스템 응답들의 r.m.s 값으로서 정규화한 무차원양이다.

그리고,  $J_{12} \sim J_{15}$ 는 제어시스템의 용량에 관한 항목으로서,  $J_{12}$ 는 제어력( $f_i(t)$ )의 최대값을 사장교의 사하중( $W$ )으로 정규화한 양이며,  $J_{13}$ 은 제어장치의 최대 운동거리인 stroke( $y_i^d(t)$ )를 STU를 장착한 사장교의 주탑 상단에서 발생하는 최대 수평변위( $w_0^{\max}$ )로 정규화한 양이다.  $J_{14}$  및  $J_{15}$ 는 각각 제어장치를 운용하기 위하여 요구되는 순간 전력량( $P_i(t)$ )의 최대값과 전체 총 소모 전력량을 의미한다.  $J_{16} \sim J_{18}$ 은 제어장치 및 센서의 개수와 제어기 설계모델 차수로서 모든 제어시스템이 동일하다. 따라서 표 6~9에서 제어시스템에 의하여 소모되는 전력량을 나타내는 성능지수  $J_{14}$ 와  $J_{15}$ 는 준능동 MR 감쇠기시스템에서 의미가 없으므로 생략하였다. 또한, 성능지수  $J_{16} \sim J_{18}$ 은 모든 제어기법에서 동일하므로 역시 생략하였다.

El Centro 지진에 대한 각 제어시스템의 성능을 비교한 표 6으로부터, SAC1~SAC4 기법들의 제어성능이 각 응답별로 서로 상충하고 있음을 알 수 있다. 즉, 주탑 하단부의 전단력( $J_1$ )에서는 SAC1과 SAC2가 SAC3과 SAC4 보다는 나은 제어성능을 보이고 있으나 주탑 하단부의 휨모멘트( $J_3$ )에 있어서는 SAC3과 SAC4가 SAC1과 SAC2 보다는 향상된 제어성능을 보이고 있다. 동시에 케이블장력의 변동량( $J_5$ )은 SAC1과 SAC3이 유사한 수준으로 좋은 성능을 보이는 반면, 데크의 수평변위( $J_6$ )는 SAC1과 SAC2가 개선된 성능을 발휘하고 있다. 감쇠기의 운동거리( $J_{13}$ )에 있어서는 SAC1과 SAC2의 성능지수 값이 다른 두 제어시스템에 비해 낮게 평가되고 있다. 하지만, 평균응답의 성능지수들에 있어서는 비교적 SAC1 제어시스템이 성능지수  $J_8, J_{10}, J_{11}$ 에서 큰 폭의 저감효과를 보임으로써 가장 높은 수준의 응답저감효과를 보이고 있다. 따라서 전체적 제어성능에 있어서 4가지 준능동 제어시스템의 성능이 상호 비슷한 수준을 보이고 있으나 전반적으로는 SAC1이 가장 좋은 성능을 보이고 있다고 평가된다. 한편, FUZ1 제어시스템은 SAC1~SAC4 시스템과 비교할 때 비교적 낮은 성능지수 값을 보임으로써 El Centro 지진에 대하여 좋은 제진성능을 보이고 있다고 평가된다. 그러나, 데크 수준의 주탑에서의 최대 모멘트( $J_4$ )와 평균 모멘트( $J_{10}$ ) 및 평균 케이블장력의 변동량( $J_{11}$ )에 있어서는 SAC1보다는 다소 저하된 성능을 보이고 있다. 이에 반해 FUZ2는 모든 성능지수들에 있어서 기존 준능동 제어기법(SAC1~SAC4)에 비해 낮은 값을 보임으로써 뛰어난 성능을 보이고 있으며, 특히 일반적으로 상충하는 응답인

주탑 하단부의 전단력 및 휨모멘트( $J_1, J_3$ )와 데크의 수평변위( $J_6$ )를 동시에 효과적으로 제어함으로써 여타 시스템보다 상당히 개선된 성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다. 4가지 준능동 시스템 및 FUZ1 시스템과 전체 응답에 대한 제어성능을 비교할 때, FUZ2 제어시스템이  $J_{10}$ 을 제외한 모든 성능지수들에 있어서 가장 좋은 성능을 발휘함으로써 가장 효과적인 시스템이라고 평가된다.

한편, 여기서 주목할 점은 입력전압을 최대로 설정한 수동 제어시스템의 경우, 상당히 낮은 성능지수 값을 보이고 있다는 점이다. 수동 제어시스템의 성능지수를 각 기법과 비교를 해도 매우 낮은 값을 보이고 있으며, FUZ2 시스템과 비교해도 성능지수  $J_1, J_6, J_{10}, J_{13}$  들에 있어서 보다 낮게 평가됨으로써 매우 우수한 제어성능을 보이고 있음을 주목할 만하다. 그러나 이러한 수동 제어시스템은 Mexico City 지진에 대한 제진 성능지수를 도시한 표 7에서 상당히 저하된 성능을 보인다. 특히, 성능지수  $J_3, J_5, J_7, J_9, J_{11}$ 에 있어서는 여타 제어시스템과 비교해서 가장 높은 값을 보임으로써 해당 응답에 대하여 제진성능이 충분하지 못함을 알 수 있다. 이처럼 수동 제어시스템은 하나의 지진에 대해서는 뛰어난 성능을 보일 수 있으나 주파수 성분이 다른 특성을 지니는 지진에 대하여는 급격한 성능저하를 유발할 수 있으며, 해당 예제로서 그러한 수동제어시스템이 갖는 적응성에 대한 문제점을 확인할 수 있다.

표 7에 나타난 Mexico City 지진에 대한 각 제어기법별 성능지수들에 있어서도 기존 준능동 제어기법간 제어성능은 각 응답별로 상충하고 있음을 알 수 있다. 단, SAC3과 SAC4 시스템이 주탑 하부의 최대 바닥 전단력( $J_1$ )과 데크 위치에서 주탑의 최대 전단력( $J_2$ ) 응답을 보다 효율적으로 줄여주는데 반해, SAC1과 SAC2는 데크 위치의 최대 주탑 휨모멘트( $J_4$ )와 데크의 최대 변위( $J_6$ )에 더욱 효과적인 성능을 발휘함으로써 그 경향의 차이를 보이고 있다. 한편, FUZ1 및 FUZ2 준능동 제어시스템의 뛰어난 제어성능은 기존 준능동 방법과의 비교결과에 있어서 표 6에서와 유사한 결과를 보이고 있으며, 이는 표 8의 Gebze 지진에서도 유사하게 나타나고 있다. 따라서 제안하는 퍼지 제어시스템이 퍼지추론과정을 통하여 실시간으로 MR 감쇠기의 입력전압을 연속적으로 변화시킴으로써 효과적인 제어성능을 발휘할 수 있다고 평가된다.

소산성 여부로서 MR 감쇠기의 입력전압을 결정하는 SAC1과 SAC2는 지진의 종류에 관계없이 일정 수준의 변위 제어성능( $J_6$ )을 보인 반면, 주제어기의 요구 제어력을 근사하도록 입력전압을 결정하는 SAC3과 SAC4는 지진의 종류에 따라 이러한 변위 제어성능에 있어서 급격한 변화를 보였다. 또한, SAC3과 SAC4는 SAC1과 SAC2와 비교할 때 변위에 대한 제어성능이 저감되는 동시에 여타 응답에 있어서 개선된 제어성능을 보임으로써 응답간 상충 작용을 명확히 보여주고 있다. 이에 반해 퍼지이론을

표 6 El Centro 지진에 대한 기존 준능동 제어기법과 준능동 퍼지제어기법의 성능지수 비교

	Passive on	SAC1	SAC2	SAC3	SAC4	FUZ1	FUZ2
J <sub>1</sub>	0.2914	0.3569	0.3511	0.3836	0.3863	0.3231	0.2927
J <sub>2</sub>	0.9472	1.1540	1.1918	1.1750	1.1470	0.9816	0.9103
J <sub>3</sub>	0.2835	0.3471	0.3053	0.2929	0.2985	0.2860	0.2396
J <sub>4</sub>	0.4850	0.4170	0.5170	0.5772	0.5694	0.5576	0.4065
J <sub>5</sub>	0.2006	0.1853	0.2019	0.1852	0.1929	0.1873	0.1826
J <sub>6</sub>	0.6121	0.9228	0.9294	1.0780	1.1570	0.8588	0.6486
J <sub>7</sub>	0.2495	0.2342	0.2401	0.2075	0.2084	0.2412	0.2029
J <sub>8</sub>	0.7613	0.8451	0.9819	0.9568	0.9975	0.8135	0.7222
J <sub>9</sub>	0.2545	0.2328	0.2347	0.2264	0.2307	0.2442	0.1892
J <sub>10</sub>	0.4337	0.3583	0.5120	0.7247	0.7461	0.5578	0.4348
J <sub>11</sub>	0.0606	0.0485	0.0491	0.0634	0.0659	0.0533	0.0443
J <sub>12</sub>	1.961e-3	1.961e-3	1.961e-3	1.891e-3	1.775e-3	1.961e-3	1.961e-3
J <sub>13</sub>	0.4019	0.6059	0.6102	0.7076	0.7595	0.5639	0.4259

표 7 Mexico City 지진에 대한 기존 준능동 제어기법과 준능동 퍼지제어기법의 성능지수 비교

	Passive on	SAC1	SAC2	SAC3	SAC4	FUZ1	FUZ2
J <sub>1</sub>	0.5118	0.5610	0.5857	0.4871	0.4617	0.5219	0.4876
J <sub>2</sub>	1.1420	1.3440	1.4366	1.2070	1.2600	1.1020	0.9787
J <sub>3</sub>	0.6310	0.5559	0.5126	0.5540	0.5746	0.4671	0.3958
J <sub>4</sub>	0.5180	0.4838	0.4108	0.5626	0.5865	0.3826	0.3179
J <sub>5</sub>	0.1039	0.0792	0.0746	0.0637	0.0709	0.0595	0.0522
J <sub>6</sub>	0.5178	0.5123	0.6040	2.1750	2.2370	0.8151	0.8093
J <sub>7</sub>	0.6003	0.5444	0.5438	0.4255	0.4279	0.4920	0.4082
J <sub>8</sub>	1.1570	0.9842	1.2054	1.0430	1.1120	1.0080	0.7958
J <sub>9</sub>	0.5983	0.5394	0.4582	0.4692	0.4907	0.4584	0.3371
J <sub>10</sub>	0.7761	0.5953	0.5988	1.0920	1.1640	0.5156	0.4438
J <sub>11</sub>	0.0318	0.0247	0.0187	0.0202	0.0214	0.0176	0.0147
J <sub>12</sub>	1.961e-3	1.961e-3	1.961e-3	6.417e-4	6.045e-4	1.961e-3	1.961e-3
J <sub>13</sub>	0.2608	0.2580	0.3041	1.0950	1.1270	0.4105	0.4076

표 8 Gebze 지진에 대한 기존 준능동 제어기법과 준능동 퍼지제어기법의 성능지수 비교

	Passive on	SAC1	SAC2	SAC3	SAC4	FUZ1	FUZ2
J <sub>1</sub>	0.4520	0.4614	0.4628	0.4104	0.4053	0.4669	0.3925
J <sub>2</sub>	1.0650	1.1750	1.1936	1.2120	1.2230	1.1270	0.8656
J <sub>3</sub>	0.3368	0.3840	0.3664	0.4245	0.4301	0.3512	0.2746
J <sub>4</sub>	0.6064	0.7372	0.6274	1.1550	1.2190	0.7425	0.5663
J <sub>5</sub>	0.1558	0.1415	0.1496	0.1376	0.1413	0.1513	0.1232
J <sub>6</sub>	0.7259	1.2540	0.8866	3.3640	3.4930	1.0210	1.2720
J <sub>7</sub>	0.3521	0.3472	0.3322	0.3191	0.3179	0.3460	0.2683
J <sub>8</sub>	0.9369	1.0660	1.0752	1.3550	1.3760	1.0240	0.9129
J <sub>9</sub>	0.3700	0.3783	0.3350	0.4370	0.4460	0.3781	0.2853
J <sub>10</sub>	0.6794	0.6405	0.6268	1.4460	1.5050	0.9766	0.7277
J <sub>11</sub>	0.0342	0.0302	0.0264	0.0404	0.0416	0.0305	0.0239
J <sub>12</sub>	1.961e-3	1.961e-3	1.961e-3	1.695e-3	1.724e-3	1.961e-3	1.961e-3
J <sub>13</sub>	0.3980	0.6874	0.4861	1.8440	1.9150	0.5597	0.6977

사용한 제어기법들은 기존의 제어기법들이 가지고 있던 성능지수들 사이에 서로 상충되던 것이 상당히 완화된 것을 표 6~9의 결과로부터 확인할 수 있다. 특히, 속도만을 입력정보로 사용한 퍼지 제어기법(FUZ2)의 경우 거의 모든 성능지수에서 좋은 성능을 보여주고 있다. 수치해석 결과를 통해 제안한 준능동 퍼지 제어기법이 뛰어난 내진

성능을 발휘할 뿐만 아니라 기존의 다른 제어기법보다 여러 성능지수에 대해 고른 제어성능을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

이 연구에서 도입한 SAC2~SAC4 시스템의 주제어기는 벤치마크 문제에서 제시하고 있는 예제 LQG 제어기를 차용하고 있다. 또한 벤치마크 문제에서 언급하고 있

표 9 세 가지 지진에 대한 기존 준능동 제어기법과 준능동 퍼지제어기법의 최대성능지수 비교

	Passive on	SAC1	SAC2	SAC3	SAC4	FUZ1	FUZ2
J <sub>1</sub>	0.5118	0.5610	0.5857	0.4871	0.4617	0.5219	0.4876
J <sub>2</sub>	1.1420	1.3440	1.4366	1.2120	1.2600	1.1270	0.9787
J <sub>3</sub>	0.6310	0.5559	0.5126	0.5540	0.5746	0.4671	0.3958
J <sub>4</sub>	0.6064	0.7372	0.6274	1.1550	1.2190	0.7425	0.5663
J <sub>5</sub>	0.2006	0.1853	0.2019	0.1852	0.1929	0.1873	0.1826
J <sub>6</sub>	0.7259	1.2540	0.9294	3.3640	3.4930	1.0210	1.2720
J <sub>7</sub>	0.6003	0.5444	0.5438	0.4255	0.4279	0.4920	0.4082
J <sub>8</sub>	1.1570	1.0660	1.2054	1.3550	1.3760	1.0240	0.9129
J <sub>9</sub>	0.5983	0.5394	0.4582	0.4692	0.4907	0.4584	0.3371
J <sub>10</sub>	0.7761	0.6405	0.6268	1.4460	1.5050	0.9766	0.7277
J <sub>11</sub>	0.0606	0.0485	0.0491	0.0634	0.0659	0.0533	0.0443
J <sub>12</sub>	1.961e-3	1.961e-3	1.961e-3	1.891e-3	1.775e-3	1.961e-3	1.961e-3
J <sub>13</sub>	0.4019	0.6874	0.6102	1.8440	1.9150	0.5639	0.6977

표 10 El Centro 지진에 대한 준능동 퍼지제어기법과 타연구결과의 성능지수 비교

	Ideal active (H2/LQG) (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Clipped optimal control with modified Bouc-wen model (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Semi-active friction damper in combination with linear springs (Agrawal 등 <sup>(4)</sup> )	Hybrid control (He 등 <sup>(33)</sup> )	FUZ2
J <sub>1</sub>	0.2816	0.3112	0.409	0.420	0.2927
J <sub>2</sub>	0.8446	1.0209	1.260	1.251	0.9103
J <sub>3</sub>	0.2605	0.2254	0.343	0.340	0.2396
J <sub>4</sub>	0.5898	0.5105	0.593	0.642	0.4065
J <sub>5</sub>	0.1571	0.1687	0.221	0.213	0.1826
J <sub>6</sub>	0.9793	0.7600	1.520	1.100	0.6486
J <sub>7</sub>	0.1999	0.1975	0.235	0.226	0.2029
J <sub>8</sub>	0.7755	0.8113	1.190	1.092	0.7222
J <sub>9</sub>	0.1850	0.1857	0.261	0.239	0.1892
J <sub>10</sub>	0.5056	0.5142	0.833	0.753	0.4348
J <sub>11</sub>	0.0155	0.0167	0.026	0.023	0.0443
J <sub>12</sub>	1.96e-3	1.96e-3	SA: 1.01e-3 SP: 5.81e-4	PA : 3.75e-3 SA : 1.96e-3	1.961e-3
J <sub>13</sub>	0.6430	0.4990	0.995	0.722	0.4259
J <sub>16</sub>	24	24	24	24	24
J <sub>17</sub>	9	33	16	5	4

듯이, 예제 LQG 제어기는 단순히 벤치마크 사장교에 대한 하나의 예로서 설계된 능동제어시스템이므로 보다 최적의 LQG 제어기를 설계할 수 있으며, 이에 따라 SAC2~SAC4 시스템의 제어성능은 달라질 수 있을 것으로 예상된다. 그러므로 제시하는 퍼지 제어시스템의 성능을 보다 객관적으로 평가하기 위하여 몇몇 연구자들에 의하여 제시된 준능동, 능동 및 복합형 제어시스템의 성능과 비교하여 표 10~13에 도시하였다. 비교 대상으로는 첫 번째로 Jung 등<sup>(31)</sup>에 의하여 제시된 이상적인 능동제어시스템 및 이에 적용된 LQG 제어기를 주제어기로 도입한 준능동 MR 감쇠기 시스템과 Agrawal 등<sup>(4)</sup>에 의하여 제시된 준능동 마찰감쇠기 및 선형 스프링의 복합시스템, 그리고 He 등<sup>(32)</sup>에 의하여 제시된 복합제어시스템을 고려하였다.

표 10의 El Centro 지진에 대한 성능지수 결과로부터 전반적인 제어성능에 있어서 이상적 능동제어시스템이 매

우 우수한 제어성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 제시하는 FUZ2 시스템도 그에 상응하는 제어성능을 보이고 있으며, 특히 휨모멘트( $J_3, J_4$ ), 데크의 수평변위( $J_6$ ) 및 데크 수준의 주탑에서의 평균 모멘트( $J_{10}$ )에서는 보다 뛰어난 저감효과를 보이고 있다. 또한 감쇠기의 운동거리인 stroke( $J_{13}$ )에 있어서도 매우 개선된 성능지수 값을 보이고 있다. 한편, FUZ2 시스템은 장력의 평균 변동량( $J_{11}$ )에 있어서 다른 시스템보다 다소 저하된 성능을 보이거나 케이블 장력의 최대 변동량( $J_5$ )에 있어서는 다른 제어시스템과 유사한 수준의 성능을 보임으로써 케이블 장력의 변동량에 대하여 일정 수준의 성능을 확보하고 있음을 알 수 있다.

표 11의 Mexico City 지진에 대한 결과로부터도 그 경향은 유사하게 나타나고 있다. 즉, 다른 제어시스템에 비해 이상적 능동제어시스템의 제어성능이 가장 뛰어난 것으로 평가되고 있으며, 다른 제어시스템들에 비해

표 11 Mexico City 지진에 대한 준능동 퍼지제어기법과 타연구결과의 성능지수 비교

	Ideal active (H2/LQG) (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Clipped optimal control with modified Bouc-wen model (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Semi-active friction damper in combination with linear springs (Agrawal 등 <sup>(4)</sup> )	Hybrid control (He 등 <sup>(33)</sup> )	FUZ2
J <sub>1</sub>	0.4992	0.4595	0.462	0.497	0.4876
J <sub>2</sub>	1.0568	1.0820	1.420	1.372	0.9787
J <sub>3</sub>	0.4461	0.4278	0.607	0.596	0.3958
J <sub>4</sub>	0.4505	0.4196	0.638	0.594	0.3179
J <sub>5</sub>	0.0538	0.0516	0.082	0.073	0.0522
J <sub>6</sub>	1.7978	1.3263	2.950	2.675	0.8093
J <sub>7</sub>	0.3519	0.3612	0.394	0.388	0.4082
J <sub>8</sub>	0.8481	0.8245	1.250	1.172	0.7958
J <sub>9</sub>	0.3158	0.3122	0.449	0.409	0.3371
J <sub>10</sub>	0.6958	0.6049	1.190	1.102	0.4438
J <sub>11</sub>	0.0059	0.0057	0.010	0.009	0.0147
J <sub>12</sub>	1.70e-3	1.35e-3	SA: 4.92e-4 SP: 2.82e-4	PA : 1.36e-3 SA : 0	1.961e-3
J <sub>13</sub>	0.9054	0.6679	1.490	1.347	0.4076
J <sub>16</sub>	24	24	24	24	24
J <sub>17</sub>	9	33	16	5	4

표 12 Gebze 지진에 대한 준능동 퍼지제어기법과 타연구결과의 성능지수 비교

	Ideal active (H2/LQG) (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Clipped optimal control with modified Bouc-wen model (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Semi-active friction damper in combination with linear springs (Agrawal 등 <sup>(4)</sup> )	Hybrid control (He 등 <sup>(33)</sup> )	FUZ2
J <sub>1</sub>	0.4277	0.4153	0.434	0.448	0.3925
J <sub>2</sub>	1.1988	1.2331	1.050	1.394	0.8656
J <sub>3</sub>	0.3341	0.3243	0.379	0.390	0.2746
J <sub>4</sub>	0.8692	0.7437	1.300	1.047	0.5663
J <sub>5</sub>	0.1001	0.1172	0.155	0.147	0.1232
J <sub>6</sub>	2.0181	1.8145	3.380	2.664	1.2720
J <sub>7</sub>	0.2834	0.2765	0.308	0.296	0.2683
J <sub>8</sub>	1.0118	1.0841	1.370	1.426	0.9129
J <sub>9</sub>	0.3304	0.3268	0.410	0.414	0.2853
J <sub>10</sub>	0.8598	0.9027	1.440	1.480	0.7277
J <sub>11</sub>	0.0104	0.0108	0.013	0.013	0.0239
J <sub>12</sub>	1.96e-3	1.96e-3	SA: 1.67e-3 SP: 9.55e-4	PA : 3.62e-3 SA : 1.96e-3	1.961e-3
J <sub>13</sub>	1.1065	0.9948	1.860	1.461	0.6977
J <sub>16</sub>	24	24	24	24	24
J <sub>17</sub>	9	33	16	5	4

FUZ2 시스템의 제어성능이 이상적인 능동제어시스템에 가장 근접하는 성능을 나타내고 있다. 전단력과 휨모멘트 응답에 있어서는 Jung 등<sup>(31)</sup>에 의하여 제시된 준능동 clipped optimal control 시스템이 뛰어난 제어성능을 보이고 있으나 데크의 수평변위 응답( $J_6$ )에 있어서는 다소 높은 값을 보이고 있다. 이에 반해 FUZ2 시스템은 매우 낮은 성능지수 값을 보임으로써 전단력과 휨모멘트 뿐만 아니라 상충하는 응답인 데크의 수평변위도 동시에 효과적으로 제어하고 있다. 한편, Gebze 지진에 대한 성능지수 결과를 표 12에서 살펴보면, FUZ2 시스템이 케이블 장력의 최대 변동량( $J_6$ )에 있어서는 이상적인 능동

제어시스템과 준능동 clipped optimal control 시스템에 비해 다소 높은 성능지수 값을 보이며, 케이블 장력의 평균 변동량( $J_{11}$ )에서도 좋지 않은 제어성능을 보이고 있다. 그러나 그 이외의 모든 응답들에서 가장 뛰어난 성능을 발휘함으로써 그 효율성을 확인할 수 있었다. 3가지 지진에 대한 각 성능지수의 최대값을 도시한 표 13에서도 FUZ2 시스템이 여타 시스템에 비해 케이블 장력의 평균 변동량( $J_{11}$ )에 있어서 다소 저하된 성능을 보이고 있으나 다른 응답들에 있어서는 보다 개선된 성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다. 이상의 결과로부터 제시하는 FUZ2 시스템은 케이블의 평균 장력에 대한 저감효과가 높지 않

표 13 세 가지 지진에 대한 준능동 퍼지제어기법과 타연구결과와의 최대성능지수 비교

	Ideal active (H2/LQG) (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Clipped optimal control with modified Bouc-wen model (Jung 등 <sup>(32)</sup> )	Semi-active friction damper in combination with linear springs (Agrawal 등 <sup>(4)</sup> )	Hybrid control (He 등 <sup>(33)</sup> )	FUZZ
J <sub>1</sub>	0.4992	0.4595	0.462	0.497	0.4876
J <sub>2</sub>	1.1988	1.2331	1.420	1.394	0.9787
J <sub>3</sub>	0.4461	0.4278	0.607	0.596	0.3958
J <sub>4</sub>	0.8692	0.7437	1.300	1.047	0.5663
J <sub>5</sub>	0.1571	0.1687	0.221	0.213	0.1826
J <sub>6</sub>	2.0181	1.8145	3.380	2.675	1.2720
J <sub>7</sub>	0.3519	0.3612	0.394	0.388	0.4082
J <sub>8</sub>	1.0118	1.0841	1.370	1.426	0.9129
J <sub>9</sub>	0.3304	0.3268	0.449	0.414	0.3371
J <sub>10</sub>	0.8598	0.9027	1.440	1.480	0.7277
J <sub>11</sub>	0.0155	0.0167	0.026	0.023	0.0443
J <sub>12</sub>	1.96e-3	1.96e-3	SA: 1.67e-3 SP: 9.55e-4	PA : 3.75e-3 SA : 1.96e-3	1.961e-3
J <sub>13</sub>	1.1065	0.9948	1.860	1.461	0.6977
J <sub>16</sub>	24	24	24	24	24
J <sub>17</sub>	9	33	16	5	4

은 반면, 그 대신 다른 응답들에 대한 제어성능에 있어서는 매우 효과적인 제어성능을 발휘하고 있다고 평가된다. 특히 상충하는 응답인 주탑 하단부의 바닥 전단력 및 휨 모멘트와 테크의 수평변위 응답을 동시에 효과적으로 제어함으로써 제시하는 기법의 효율성을 확인할 수 있다.

5. 결 론

사장교의 효과적 지진응답제어를 위하여 MR 감쇠기를 이용한 준능동 퍼지 제어기법을 제시하였다. 이는 퍼지추론과정을 이용함으로써 MR 감쇠기의 응답정보만으로 준능동 제어를 수행할 수 있는 방법으로, MR 감쇠기 응답의 크기에 따라 추론과정을 통하여 매 순간 입력전압을 결정함으로써 감쇠력을 변화시킬 수 있는 간단한 구조로서 구성될 수 있다. 또한, 기존에 제시된 대부분의 준능동 제어기법이 MR 감쇠기의 입력전압을 0과 최대값의 두 단계로만 조절하는 반면, 제시하는 방법은 MR 감쇠기 응답의 크기에 따라 입력전압을 연속적으로 조절함으로써 감쇠력의 불연속적인 변화로 인한 성능저하현상을 방지할 수 있다.

제시한 제어기법의 제어성능을 평가하기 위해 사장교 벤치마크 문제에 적용하였으며 기존 준능동 제어기법들과 비교함으로써 그 효율성을 평가하였다. 제시한 퍼지 제어기법은 주탑하부의 전단력과 모멘트뿐만 아니라 상부구조의 변위를 동시에 적절히 줄여주는 것으로 나타났다. 또한, 타 연구의 능동제어기법이나 복합형 제어기법과 비교하여도 상대속도만을 입력정보로 사용하는 FUZZ의 경우는 거의 모든 성능지수에서 좋은 성능을 보임으로써 그 제진성능을 검증하였다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. Chen, J. C., ed. *Proc., 2nd Int. Workshop on Structural Control: Next Generation of Intelligent Structures*, Hong Kong University of Science and Technology Research Center, Hong Kong, 1996, [http://cwis.usc.edu/dept/civil\\_eng/structural/welcome.html](http://cwis.usc.edu/dept/civil_eng/structural/welcome.html).
2. 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.
3. Yang, J. N., Lin, S. and Jabbari, F., "H<sub>2</sub>-based control strategies for civil engineering structures," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 205-230.
4. 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.
5. Bontempi, F., Casciati, F. and Giudici, M., "Seismic response of a cable-stayed bridge: ac-

- tive and passive control systems (benchmark problem)," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 169-185.
6. Iemura, H., and Pradono, M. H., "Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 187-203.
  7. Dyke, S. J., Spencer, B. F. Jr., Sain, M. K. and Carlson, J. D., "Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for Seismic Response Reduction," *Smart Materials and Structures*, Vol. 5, 1996, pp. 565-575.
  8. Jansen, L. M. and Dyke S. J., "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
  9. Spencer, B. F. Jr., Dyke, S. J., Sain, M. K. and Carlson, J. D., "Phenomenological model of magnetorheological damper," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997, pp. 230-238.
  10. Carson, J. D., Catanzarite, D. M. and St. Clair, K. A., "Commercial magneto-rheological fluid devices," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 10, No. 23/24, 1996, pp. 2857-2865.
  11. Sodeyama, H., Sunakoda, K., Suzuki, K., Carlson, J. D. and Spencer, B. F. Jr., "Development of large capacity semiactive vibration control device using magnetorheological fluid," *Seismic Engineering*, ASME, PVP, Vol. 428, No. 2, 2001, pp. 109 - 114.
  12. Fujitani, H., et al. "Development of 400kN magnetorheological damper for a real base-isolated building," *Proc., SPIE Conference Smart Structures and Materials*, Vol. 5057, SPIE—International Society for Optical Engineering, Bellingham, Wash, 2003.
  13. Spencer, B. F. Jr. and Nagarajaiah, S. "State of the art of structural control," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 845-56.
  14. Wen, Y. K., "Method of random vibration of hysteretic systems," *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 102, No. 2, 1976, pp. 249-263.
  15. Dyke, S. J., Spencer, B. F. Jr., Sain, M. K. and Carlson, J. D., "An Experimental Study of MR Dampers for Seismic Protection," *Smart Materials and Structures*, Special Issue on Large Civil Structures, 1997.
  16. Dyke, S. J. and Spencer, B. F. Jr., "Seismic response control using multiple MR dampers," *Proc., 2nd Int. Workshop on Structural Control*, Hong Kong University of Science and Technology Research Center, Hong Kong, 1996, pp. 163-173.
  17. Yi, F., Dyke, S. J., Caicedo, J. M. and Carlson, J. D., "Experimental Verification of Multiinput Seismic Control Strategies for Smart Dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 127, No. 11, 2001, pp. 1152-1164.
  18. 정형조, G. Yang, B. F. Spencer, Jr., 이인원, "실제 규모의 자기유변 유체감쇠기를 위한 동적 모델의 개발", 대한토목학회 논문집, 22권 4-A호, 2002, pp. 727-737.
  19. Dyke, S. J. and Spencer, B. F. Jr., "A comparison of semiactive control strategies for the magnetorheological damper," *Proc., IASTED International Conference on Intelligent Information Systems*, Bahamas, December 8-10, 1997, pp. 580-584.
  20. Jansen, L. M. and Dyke, S. J., "Investigation of nonlinear control strategies for the implementation of multiple magnetorheological dampers," *Proc., Engineering Mechanics Conference*, ASCE, Va. (CD-ROM), 1999.
  21. Ramallo, J. C., Johnson, E. A. and Spencer, B. F. Jr., "'SMART" base isolation systems," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 128, No. 10, 2002, pp. 1088-1099.
  22. Yoshida, O. and Dyke, S. J., "Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No. 4, 2004, pp. 386-392.
  23. Passino, K. M. and Yurkovich, S., *Fuzzy Control*, Addison Wesley Longman, Inc., 2725 Sand Hill Road, Menlo Park, California, 1998, pp. 475.
  24. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "MR Damper가 장착된 교량구조물의 준능동 퍼지제어", 대한토목학회 논문집, 22권 4-A호, 2002, pp. 847-857.
  25. Choi, K. M., Cho, S. W., Jung, H. J. and Lee, I. W., "Semi-active fuzzy control for seismic response reduction using magnetorheological dampers," *Journal of Earthquake Engineering and*

- Structural Dynamics*, Vol. 33, 2004, pp. 723-736.
26. Stanway, R., Spronston, J. L. and Stevens, N. G., "Non-linear identification of an electro-rheological vibration damper," *IFAC Identification and System Parameter Estimation*, 1985, pp. 195-200.
  27. Dyke, S. J., Yi, F. and Carlson, J. D., "Application of magnetorheological dampers to seismically excited structures," *Proc., International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, Fla., February 8-11, 1999.
  28. Ivers, D. E. and Miller, L. R., "Semi-active suspension technology: an evolutionary view," *Advanced automotive technologies*, DE-Vol. 40, Am. Society of Mechanics Engineering./Winter Annual Meeting, Atlanta, Ga., 1991, pp. 327-346.
  29. Patten, W. N., Mo, C., Kuehn, J. and Lee, J., "A primer on Design of Semiactive Vibration Absorbers (SAVA)," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 1, 1998, pp. 61-68.
  30. Park, K. S., Koh, H. M., Ok, S. Y. and Seo, C. W., "Fuzzy supervisory control of earthquake-excited cable-stayed bridges," *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 7, 2005, pp. 1086-1100.
  31. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "퍼지관리제어기법을 이용한 사장교의 지진응답제어", 한국지진공학회 논문집, 제 8권, 제 4호, 2004, pp. 51-62.
  32. Jung, H. J., Spencer, B. F. Jr. 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.
  33. He, W. L. and Agrawal, A. K., "Passive and hybrid systems for seismic protection of a benchmark cable-stayed bridge," *Structural Control and Health Monitoring*, Published online, 2005.