

다중 MR 감쇠기의 효과적인 동시제어를 위한 제어알고리즘 개발

Development of Control Algorithm for Effective Simultaneous Control of Multiple MR Dampers

김 현 수*
Kim, Hyun-Su

강 주 원**
Kang, Joo-Won

Abstract

A multi-input single-output (MISO) semi-active control systems were studied by many researchers. For more improved vibration control performance, a structure requires more than one control device. In this paper, multi-input multi-output (MIMO) semi-active fuzzy controller has been proposed for vibration control of seismically excited small-scale buildings. The MIMO fuzzy controller was optimized by multi-objective genetic algorithm. For numerical simulation, five-story example building structure is used and two MR dampers are employed. For comparison purpose, a clipped-optimal control strategy based on acceleration feedback is employed for controlling MR dampers to reduce structural responses due to seismic loads. Numerical simulation results show that the MIMO fuzzy control algorithm can provide superior control performance to the clipped-optimal control algorithm.

Keywords : Multi-input multi-output fuzzy controller, Multi-objective optimization, Genetic algorithm, Fuzzy logic control, MR damper

1. 서 론

지금까지 지진하중을 받는 구조물의 응답을 저감시키기 위하여 다양한 진동제어시스템이 개발되어 왔다¹⁾. 근래에 와서는 제어성능의 향상을 위하여 수동감쇠장치를 도입하기 보다는 능동 및 준능동 제어장치를 활용하는 사례가 늘어나고 있다²⁻⁴⁾. 그러나 능동제어장치는 제어성능이 매우 우수함에도 불구하고 안정성(stability)과 견실성(robustness) 등에 관한 우려와 더불어 실제 지진하중이 왔을 때 공급되지 못 할 수도 있는 큰 전력의 필요성 때문에 실제 구조물 제어에 널리 적용되지 못하고 있는 실정이다. 그래서 최근에는 여러 연구자들에 의하여 MR

감쇠기와 같은 준능동 스마트감쇠기를 사용한 진동 제어에 대한 연구가 수행되었고 좋은 결과를 보여 주고 있다^{5,6)}. 준능동 감쇠장치를 사용하여 효과적인 제어성능을 나타내기 위해서는 제어알고리즘을 적절하게 설계하는 것이 매우 중요하다⁷⁾. 지금까지 MR 감쇠기를 사용하여 수행된 지진응답 저감성능 평가에 대한 연구는 대부분 하나의 MR 감쇠기를 사용하여 구성된 스마트 면진시스템이나 스마트 TMD, 혹은 임의의 층에 감쇠기로 설치된 시스템에 대한 것이었다^{5,6,8)}. 즉, 다중입력 단일출력 (Multi-Input Single-Output; MISO)의 형태를 띠는 제어알고리즘을 활용하여 다수의 구조물 응답을 입력신호로 하고 하나의 MR 감쇠장치로 전달되는 제어명령을 단일 출력 변수로 하는 연구가 주로 수행되었다. 또한 하나 이상의 MR 감쇠기를 제어하기 위한 제어알고리즘에 대한 연구가 수행되었다고 할지라도 대부분 능동제어이론에 기반을 두고 준능동의 특성에 맞도록 약간의 수정을 가한 on-off 방식의 제어

* 정회원, 선문대학교 건축학부 조교수
Division of Architecture, Sunmoon University
** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부 교수
School of Architecture, Yeungnam University
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail : kangj@ynu.ac.kr

알고리즘이 주를 이루고 있다⁷⁾.

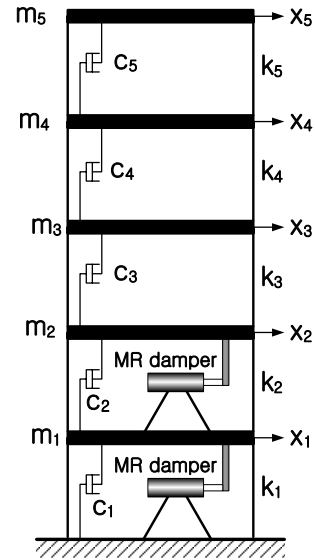
따라서 본 연구에서는 다중입력 다중출력 (Multi-Input Multi-Output; MIMO)의 형태를 띠는 제어알고리즘을 개발하여 다 수의 구조물 응답을 입력신호로 하고 두개의 MR 감쇠장치로 전달되는 제어명령을 출력 변수로 하는 제어시스템의 지진응답제어 성능을 검토하였다. 이때 MR 감쇠기의 비선형성을 고려하여 복잡하고 불확실하며 애매한 조건 아래서 매우 우수한 제어성능을 나타내는 퍼지논리제어기 (Fuzzy Logic Controller)⁹⁾를 사용하였다. 퍼지논리 제어기는 고유의 견실성(robustness)과 비선형(nonlinearity) 및 불확실성(uncertainty)을 쉽게 다룰 수 있는 능력이 있기 때문에 본 연구에서 사용하는 MR 감쇠기를 효과적으로 제어할 수 있을 것으로 기대된다. 퍼지논리제어기를 개발하기 위해서는 입출력 변수에 대한 소속함수를 결정해야 하고 이들 간의 관계를 퍼지제어규칙으로 연결시켜주어야 한다. 이러한 작업은 구조시스템의 동적특성과 제어시스템의 특성 및 제어알고리즘 간의 상호관계를 정확히 이해해야 할 수 있는 쉽지 않은 작업이고 반복적인 재설계로 인하여 많은 소요시간과 노력이 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 여러 개의 목적을 동시에 최적화할 수 있는 다목적 유전자알고리즘을 사용하여 지진응답제어를 위한 퍼지논리제어기를 최적화 하였다. 본 연구에서 개발한 MIMO 준능동 퍼지논리제어기의 제어성능을 검토해보기 위해서 현재 준능동 제어알고리즘으로 가장 널리 사용되고 있는 clipped-optimal 제어알고리즘의 제어성능과 비교·검토하였다.

2. 예제구조물 및 지진하중

2.1 예제구조물의 모형화

본 논문에서는 다중 MR 감쇠기의 효과적인 동시 제어를 위한 MIMO 준능동 퍼지논리제어기를 개발하기 위해서 <Fig. 1>에 나타난 5층 예제구조물을 선택하여 수치해석을 수행하였다. 이 예제구조물은 Dyke 등의 연구¹⁰⁾에서 사용한 3층 축소모델 예제구조물을 변형하여 생성하였다. 예제구조물은 그림에 나타난 바와 같이 각 층별 집중질량(m_i)과 기둥강성

(k_i)으로 표현되는 전단빌딩모델을 사용하여 모형화하였다. 따라서 층별 하나의 자유도로 모형화되어 예제구조물은 5개의 자유도를 가지는 운동방정식으로 표현된다.



<Fig. 1> 5-story example building structure

전단빌딩 예제구조물의 각층의 질량은 98.3kg이고 강성 및 감쇠 행렬은 아래의 식에 나타난 값을 갖는다. 이러한 특성치를 가지는 5층 예제구조물에 대하여 고유치해석을 수행한 결과 1-5차 모드의 고유진동수는 3.62, 10.57, 16.94, 22.07, 25.41 Hz로 계산되었다.

$$M = \begin{bmatrix} 98.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 98.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 98.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 98.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 98.3 \end{bmatrix} \text{ kg} \quad (1)$$

$$C = \begin{bmatrix} 175 & -50 & 0 & 0 & 0 \\ -50 & 100 & -50 & 0 & 0 \\ 0 & -50 & 100 & -50 & 0 \\ 0 & 0 & -50 & 100 & -50 \\ 0 & 0 & 0 & -50 & 50 \end{bmatrix} \text{ Nsec/m} \quad (2)$$

$$K = 10^5 \begin{bmatrix} 12.0 & -6.84 & 0 & 0 & 0 \\ -6.84 & 13.7 & -6.84 & 0 & 0 \\ 0 & -6.84 & 13.7 & -6.84 & 0 \\ 0 & 0 & -6.84 & 13.7 & -6.84 \\ 0 & 0 & 0 & -6.84 & 6.84 \end{bmatrix} \text{ N/m} \quad (3)$$

1층과 2층에 설치된 MR 감쇠기를 포함하고 지진하중을 받는 5층 예제구조물의 운동방정식은 아래의 식 (4)로 표현할 수 있다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -ME\ddot{x}_g + E^F F_c \quad (4)$$

여기서, E 는 지진하중에 대한 위치벡터로서 $[5 \times 1]$ 의 크기를 가진 단위벡터이다. x, \dot{x}, \ddot{x} 은 5층 예제 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터를 나타내고 \ddot{x}_g 는 입력되는 지반가속도를 나타낸다. F_c 는 1층과 2층의 MR 감쇠기 제어력을 나타내며 실시간으로 변화게 된다. E^F 는 MR 감쇠기가 설치된 위치를 나타내는 위치행렬로서 감쇠기가 설치된 1층과 2층을 나타내는 첫 번째 및 두 번째 자유도 위치에서만 1의 값을 가지고 나머지 자유도에서는 0의 값을 가진다.

본 연구에서 사용한 MR 감쇠기의 동적 거동을 모사하기 위한 수치해석 모델로서는 많은 연구자들에 의해서 널리 사용되고 있는 modified Bouc-Wen 모델¹⁰⁾을 사용하였다. 이 모델에서 MR 감쇠기의 감쇠력은 아래의 식 (5)와 같이 표현된다.

$$f = \alpha z + c_0(\dot{x} - \dot{y}) + k_0(x - y) + k_1(x - x_0) \quad (5)$$

또한, 변수 z 는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x} - \dot{y}|z|z|^{n-1} - \beta(\dot{x} - \dot{y})|z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (6)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{(c_0 + c_1)}\alpha z + c_0\dot{x} + k_0(x - y) \quad (7)$$

여기서 변수 c_0, c_1, α 는 다음 식을 통해서 각각 얻을 수 있다.

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b}u \quad (8)$$

$$c_1 = c_1(u) = c_{1a} + c_{1b}u \quad (9)$$

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (10)$$

여기서 변수 u 는 아래의 1차필터의 출력으로 결정된다.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \quad (11)$$

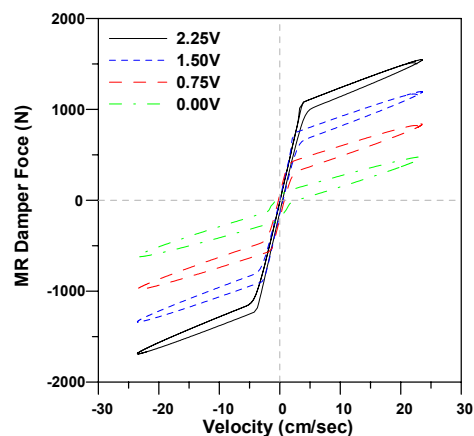
식 (8)과 (9)는 감쇠상수, 식 (10)은 MR 감쇠기의 변화하는 거동 특성을 모사하기 위한 변수로서 수

동 감쇠기의 경우에는 이 변수들이 고정된 상수값을 가지며 고정된 이력거동을 보이게 되지만 MR 감쇠기에서는 식에 나타난 바와 같이 입력전압(u)의 함수로서 표현되며 입력전압의 값에 따라서 감쇠력이 매 순간 변화할 수 있다. 식 (5)의 변수 z 는 MR 감쇠기의 이력거동을 모사하기 위한 가상의 변수이고 매개변수 γ, n, β, A 등은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 사용되는 계수들이다. 본 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 Dyke 등의 연구¹⁰⁾에서 사용된 최대용량이 약 1500N을 가지도록 설계된 모델로서 입력전압이 0V 일 때 passive-off 상태를, 2.25V일 때 passive-on 상태를 나타낸다. 이러한 MR 감쇠기를 모사하는데 사용한 계수들의 값을 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> Parameters for MR damper

Param.	Value	Param.	Value
c_{0a}	21.0 N·s/cm	α_a	140 N/cm
c_{0b}	3.5 N·s/cm·V	α_b	695 N/cm·V
k_0	46.9 N/cm	γ	363 cm ⁻²
c_{1a}	283 N·s/cm	β	363 cm ⁻²
c_{1b}	2.95 N·s/cm·V	A	301
k_1	5.00 N/cm	n	2
x_0	14.3 cm	η	190 sec ⁻¹

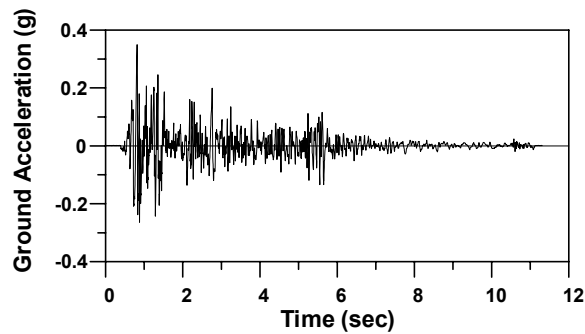
이러한 계수 값을 사용하여 모형화한 MR 감쇠기 모델의 입력전압에 따른 이력거동 변화 그래프를 <Fig. 2>에 나타내었다.



<Fig. 2> Force-velocity relationship of MR damper

2.2 지진하중의 생성

본 연구에서는 El Centro (1940, NS) 지진하중을 사용하여 예제구조물의 지진응답 제어성능을 검토하였다. 본 연구에서 사용하는 예제구조물은 앞에서 설명한 바와 같이 축소모델이기 때문에 사용하고자는 El Centro 지진하중도 계측된 지반운동데이터를 스케일링해서 사용해야 한다. 본 연구에서는 Dyke 등의 연구¹⁰⁾에서 사용된 지진하중을 사용하였으며 이 지진하중은 축소된 예제구조물에 적합하도록 상사법칙을 적용하여 생성하였다. 이때 지진지속 시간 및 지반운동 데이터의 시간간격은 1/5배로 조정되었다. 이렇게 생성한 지진하중을 <Fig. 3>에 나타내었다.



<Fig. 3> Time scaled El Centro Earthquake

3. 제어알고리즘의 설계

3.1 퍼지논리제어기의 최적화

지진하중을 받는 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 지진응답을 효과적으로 제어하기 위해서는 MR 감쇠기를 적절하게 제어할 수 있는 제어알고리즘을 개발하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 전술한 바와 같이 MIMO 퍼지논리제어기를 사용하여 MR 감쇠기를 제어한다. MR 감쇠기를 효과적으로 제어할 수 있는 퍼지제어기를 개발하는 것은 많은 경험을 가진 전문 엔지니어들에게도 많은 시간과 노력을 필요로 하는 일이다. 따라서 본 연구에서는 다목적 유전자알고리즘을 이용해서 MIMO 퍼지논리제어기를 최적화한다. MIMO 퍼지논리제어기의 입출력관계를 <Fig. 4>에 나타내었다.



<Fig. 4> Inputs and outputs of FLC

구조물이 지진하중을 받을 때 일반적으로 변위 응답과 함께 가속도응답을 줄이는 것이 중요하다. 예제구조물의 1층과 2층에 설치되어 있는 MR 감쇠기는 전달되는 제어명령전압에 의해서 제어력이 조절이 되는데 퍼지논리제어기에 의해서 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압이 클 때에는 MR 감쇠기의 감쇠력이 커져서 층간변위와 함께 구조물의 전체적인 변위가 줄어들게 된다. 이때 MR 감쇠기 제어력의 증가에 의하여 구조물의 가속도응답은 증가하게 된다. 반대로 명령전압을 작게 해서 MR 감쇠기의 제어력을 감소시킨다면 구조물의 가속도응답은 줄일 수 있지만 변위응답은 증가할 것이다. 따라서 이 문제는 하나의 목적을 만족시키는 것이 아니라 여러 개의 성능지표에 대하여 동시에 좋은 성능을 발휘할 수 있는 최적해를 찾는 다목적 최적화로 생각할 수 있다. 다목적 최적화의 기본적인 문제점은 목적들이 서로 상충한다는 것이다. 이러한 경우에는 각각의 목적들 사이에 상치관계(trade-off)가 존재하게 되는데 여기서 어떤 한 목적에 대한 성능 향상은 다른 목적에 대한 손실 없이는 이루어질 수 없다. 다목적 최적화 문제에서 하나의 최적해를 찾는 것은 거의 불가능하고 일련의 서로 우열을 가릴 수 없는 해의 집합(파레토 최적해)이 존재하게 된다. 구조공학과 관련된 다목적 최적화문제를 해결하는데 있어서는 구조엔지니어가 한 개의 최적해보다는 구조설계의 대안으로서 파레토 최적해 집합에 더 큰 관심을 가질 것이다. 유전자알고리즘은 많은 수의 개체(해)들을 이용하여 최적화 문제를 해결하기 때문에 여러 개의 최적해를 동시에 찾는데 유전자알고리즘을 이용하는 것이 매우 자연스러운 일이다. 본 연구에서는 NSGA-II(a fast elitist Non-dominated Sorting Genetic Algorithm)¹¹⁾를 이용하여 파레토 최적해 집합을 찾는다.

본 논문에서는 전술한 바와 같이 상충하는 두 개의 동적 응답 즉, 5층 최대변위와 5층 최대가속도

를 다목적 최적화의 목적함수로 선택하였고 사용된 두 목적함수를 <Table 2>에 나타내었다. 본 연구에서 개발된 MIMO 준능동 퍼지논리제어기의 제어성능을 비교·평가하기 위해서 clipped-optimal 제어알고리즘을 이용하였다. <Table 2>에 나타낸 바와 같이 MIMO 퍼지논리제어기로 제어된 구조물의 응답을 clipped-optimal 제어알고리즘으로 제어된 구조물의 응답으로 나누어 정규화된 값으로 표현하였다. 즉, 목적함수의 값이 1보다 작으면 퍼지논리제어기가 더 우수한 성능을 나타내는 것이고 1보다 크면 clipped-optimal 제어알고리즘이 더 우수한 제어성능을 나타내는 것이다.

<Table 2> Multi-objective functions

Objective function	Displacement ratio
J1	$\frac{\text{Peak displacement of 5}^{\text{th}} \text{ story controlled by FLC}}{\text{Peak displacement of 5}^{\text{th}} \text{ story controlled by clipped-optimal}}$
J2	$\frac{\text{Peak acceleration of 5}^{\text{th}} \text{ story controlled by FLC}}{\text{Peak acceleration of 5}^{\text{th}} \text{ story controlled by clipped-optimal}}$

3.2 Clipped-optimal 제어알고리즘

본 연구에서 개발한 MIMO 준능동 퍼지논리제어기의 제어성능을 비교평가하기 위해서 MR 감쇠기와 같은 준능동 제어장치를 제어하기 위해서 가장 널리 사용되고 있는 가속도 피드백 기반의 clipped-optimal 제어알고리즘을 적용하였다. Clipped-optimal 제어알고리즘에서는 우선 목표로 하는 최적의 제어력을 결정하고 MR 감쇠기로 하여금 최대한 그 목표제어력(f_c)과 비슷한 성능을 발휘하도록 조절하게 된다. 목표제어력(f_c)은 선형최적제어기($K_c(s)$)에 의해서 다음과 같이 결정이 된다¹⁰⁾.

$$f_c = \mathcal{L}^{-1} \left\{ -K_c(s) \mathcal{L} \left(\begin{bmatrix} y \\ f \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (10)$$

여기서 y 는 예측된 응답을 의미하고, f 는 예측된

제어력, $\mathcal{L}\{.\}$ 는 라플라스변환을 의미한다. 본 연구에서는 선형최적제어기, $K_c(s)$,를 결정하기 위해서 H_2/LQG 제어알고리즘을 이용하였다¹⁰⁾. MR 감쇠기에 의해서 생성되는 제어력은 직접 조절할 수 없고 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압만을 조절할 수 있다. MR 감쇠기의 제어력을 목표제어력(f_c)에 가깝게 조절하기 위해서 명령전압을 제어하는 방법은 다음과 같다. 만약 MR 감쇠기의 제어력과 목표제어력이 거의 같을 경우, 즉 $f = f_c$ 인 경우에는 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 현재의 상태로 계속 유지한다. MR 감쇠기의 감쇠력이 목표제어력보다 작고 두 힘의 부호가 같다면 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압을 최대값으로 하여 목표제어력에 도달할 수 있도록 한다. 반대의 경우에는 명령전압을 '0'으로 한다. 이러한 방법으로 명령전압을 결정하는 것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

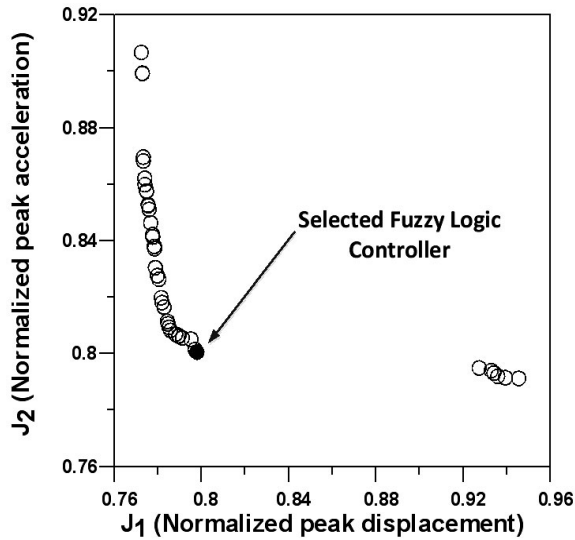
$$v = V_{\max} H(f_c - f) f \quad (11)$$

여기서, V_{\max} 는 2.25V의 최대 명령전압을 의미하고 $H\{.\}$ 는 헤비사이드 계단 함수(Heaviside Step Function)를 나타낸다.

4. MIMO 제어알고리즘의 성능평가

MIMO 준능동 퍼지논리제어기를 개발하기 위하여 사용한 NSGA-II에서 한 세대를 이루는 개체군은 100개의 개체로 이루어지며 최적화는 1000세대까지 수행하였다. 최적화작업 및 수치해석은 MATLAB 버전 2011a를 사용하였고 SIMULINK를 사용하여 모델링하였다. 앞에서 밝힌 2개의 목적함수를 이용하여 최적화를 수행하였고 5층 예제구조물을 위한 퍼지논리제어기의 최적화 수행결과를 <Fig. 5>에 나타내었다.

<Fig. 5>를 보면 모든 개체의 J1과 J2의 값이 1보다 작으므로 clipped-optimal 제어알고리즘보다 본 연구에서 개발한 MIMO 준능동 퍼지논리제어기가 변위응답 및 가속도응답 제어에 있어서 더 우수한 성능을 나타낸다는 것을 확인할 수 있다. 다목적 유전자알고리즘을 이용한 최적화작업이 끝난 후에는



<Fig. 5> NSGA-II optimization results

<Fig. 5>와 같이 다수의 개체를 포함하고 있는 파레토 최적해 집합을 얻게 되는데 엔지니어는 이 중에서 가장 적절하다고 판단되는 개체를 선택하게 된다. 그림에 나타난 파레토 최적해 집합을 보면 J1에 대해서는 모든 개체가 0.76에서 0.96 사이에 있고 J2에 대해서는 0.78에서 0.92 사이에 있으므로 두 목적함수에 대해서 동시에 적절한 제어성능을 발휘하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 변위응답과 가속도응답을 동시에 적절히 제어할 수 있는 제어알고리즘을 선택하였고 이것을 <Fig. 6>에 검정색 원으로 나타내었다. 선택한 개체의 J1과 J2에 대한 목적함수 값은 두 개 모두 0.8로써 이것은 clipped-optimal 제어알고리즘에 비하여 본 연구에서 개발한 MIMO 준능동 퍼지논리제어기가 최대변위응답과 최대가속도응답에 대해서 모두 20%의 응답을 더 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

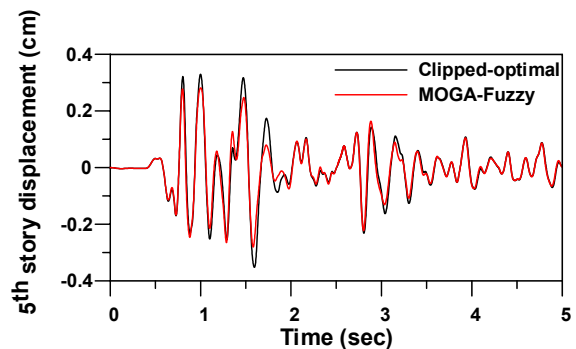
선택된 개체를 사용하여 퍼지논리제어기를 작성한 후 수치해석을 수행하였고 개발된 제어알고리즘과 clipped-optimal 제어알고리즘, 그리고 제어하지 않았을 때의 최대치 응답을 정리하여 <Table 3>에 나타내었다.

표에서 볼 수 있듯이 다목적 유전자알고리즘의 최적화 목적함수로 선택한 5층 변위 및 5층 가속도 응답은 퍼지논리제어기가 clipped-optimal 제어기에 비해서 20%의 응답을 더 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 예제구조물에 MR 감쇠기를 설치하지 않은

<Table 3> Peak responses comparison

Response (story)		Uncontrolled	Clipped optimal	Fuzzy
Story disp. (cm)	1	0.355	0.099	0.116
	2	0.574	0.187	0.179
	3	0.723	0.266	0.240
	4	0.847	0.329	0.269
	5	0.930	0.352	0.281
Story drift (cm)	1	0.355	0.099	0.116
	2	0.219	0.099	0.064
	3	0.203	0.092	0.084
	4	0.192	0.074	0.073
	5	0.123	0.053	0.042
Story Acceleration (cm/sec ²)	1	592.2	559.4	293.2
	2	693.8	378.7	336.3
	3	485.3	387.7	248.7
	4	543.3	313.5	268.3
	5	858.7	368.1	294.7

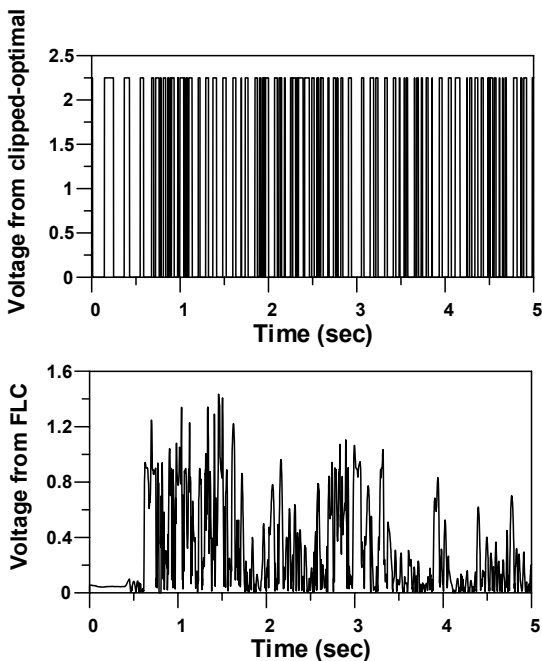
경우에는 0.930cm의 응답이 5층에서 발생하는데 비하여 퍼지논리제어기로 제어된 MR 감쇠기가 설치된 경우에는 0.281cm의 응답이 발생하였다. 이 경우에 제어된 구조물의 응답은 제어되지 않은 경우에 비하여 30% 정도밖에 되지 않을 정도로 매우 우수한 제어성능을 발휘하는 것을 알 수 있다. 5층의 최대 가속도 응답 역시 퍼지논리제어기로 제어된 MR 감쇠기가 설치된 구조물의 경우에 제어하지 않은 구조물에 비하여 34%의 응답밖에 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 층간변위 또한 전 층에 걸쳐서 clipped-optimal 제어알고리즘에 비해서 퍼지논리제어기가 20% 안팎의 더 우수한 제어성능을 나타내는 것을 알 수 있다. 퍼지논리제어기와 clipped-optimal 제어기로 제어된 구조물의 5층 변위응답의 시간이력을 비교하여 <Fig. 6>에 나타내었다. 두 응답의 차이를 보다 명확하게 확인하기 위하여 1-5초



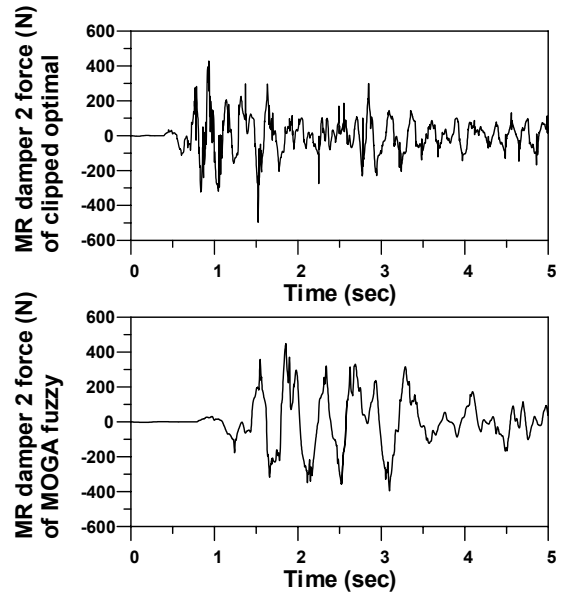
<Fig. 6> Displacement time histories

간의 응답만을 비교하였다. 그림을 보면 전체적인 응답의 형상은 비슷하지만 구조물에 피해를 줄 수 있는 최대응답에 대해서 퍼지논리제어기기 더 우수한 제어효과를 나타내는 것을 알 수 있다.

MR 감쇠기의 제어력은 감쇠기로 전달되는 명령 전압에 의해서 결정되므로 clipped-optimal 제어알고리즘과 퍼지논리제어기에 의해서 2층의 MR 감쇠기로 전달되는 명령전압과 제어력을 <Fig. 7>과 <Fig. 8>에 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 clipped-optimal 제어기에서 생성되는 명령전압은 0V와 2.25V사이를 오가는 일종의 bang bang 제어기와 같은 형태를 나타낸다. 이에 비해서 퍼지논리 제어기에 의해서 생성되는 명령전압은 0V-1.4V 사이에서 매우 불규칙하게 변하는 것을 알 수 있다. 퍼지논리제어기는 MR 감쇠기의 비선형성을 고려하여 실시간으로 구조물의 응답을 줄이는데 필요한 최적의 명령전압을 생성시킨다. <Fig 8>에 나타난 생성된 MR 감쇠기의 제어력을 보면 clipped-optimal 제어기에 의해서 생성되는 제어력은 bang ban 제어알고리즘의 특성상 매우 급격하게 변하지만 퍼지논리제어기에 의해서 생성되는 제어력은 비교적 변화가 작은 것을 볼 수 있다.



<Fig. 7> Comparison of command voltage



<Fig. 8> Comparison of MR damper force

5. 결 론

본 논문에서는 지진하중을 받는 구조물에 설치된 다중 MR 감쇠기를 동시에 효과적으로 제어하기 위한 MIMO 제어알고리즘을 개발하였다. 이를 위하여 1층 및 2층에 MR 감쇠기가 설치된 5층 전단빌딩 예제구조물을 사용하였고 스케일링한 El Centro 지진하중을 가하여 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서는 MR 감쇠기와 같은 비선형성이 큰 제어장치에 대해서 효과적이라고 알려진 퍼지논리제어기를 적용하였고 이를 최적화하기 위해서 다목적 유전자 알고리즘을 사용하였다. 또한 MR 감쇠기를 제어하는데 널리 사용되고 있는 clipped-optimal 제어기를 사용하여 제어성능을 비교하였다. 수치해석결과 본 연구에서 개발한 MIMO 준능동 퍼지논리제어기가 clipped-optimal 제어알고리즘에 비하여 변위응답과 가속도응답모두 20%정도의 제어성능을 향상시킬 수 있는 것을 확인하였다. 본 논문에서 사용한 다목적 유전자알고리즘을 사용하면 한 번의 최적화 작업으로 다양한 성능을 발휘하는 MIMO 준능동 퍼지논리제어기의 파레토 최적해집합을 얻을 수 있으므로 엔지니어의 판단에 의하여 변위응답이나 가속도응답의 제어에 더 가중치를 두고 다른 제어알고리즘을 쉽게 선택할 수 있는 장점이 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2011-0015166).

참고문헌

1. Constantinou, M.C. and Soong, T.T., Passive and active structural vibration control in civil engineering, Springer-Verlag, New York, 1994.
2. Kim, H.S. and Kang, J.W., "Investigation of adaptability of smart base isolation system for spacial structures in regions of low-to-moderate seismicity", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 11, No. 4, 2011, pp.109-119.
3. Bani-Hani, K.A. and Sheban, M.A., "Semi-active neuro-control for base-isolation system using magnetorheological (MR) dampers", Earthquake Engng Struct. Dyn., Vol. 35, 2006, pp.1119-1144.
4. Spencer, B.F., Jr. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control", Journal of Structural Engineerin, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 845-856.
5. B.F. Spencer Jr., E.A. Johnson and J.C. Ramallo, "Smart isolation for seismic control", JSME Int. J. Ser. C., Vol. 43, No. 4, 2000, pp. 704-711.
6. Kang, J.W., Kim, H.S. and Lim, J.H., "Multi-objective fuzzy control of a spacial structure using smart base isolation system", Journal of the Korean Association for Spacial Structures, Vol. 11, No. 2, 2011, pp.89-99.
7. Jansen, L.M. and Dyke, S.J., " Semi-active control strategies for MR dampers: a comparative study", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 126, No. 8, 2000, pp. 795-803.
8. Kim, H.S. and Roschke, P.N., "Design of fuzzy logic controller for smart base isolation system using genetic algorithm", Engineering Structures, Vol. 28, No. 1, 2006, pp. 84-96.
9. Mamdani, E.H. and Assilian, S., "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", International Journal of Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1., 1975, pp.1-13.
10. 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, No. 5, 1996, pp.565-575.
11. Deb, K., Pratap, A., Agrawal, S. and Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II", Technical Report No. 200001, Kanpur: Indian Institute of Technology Kanpur, India, 2000.

(접 수 일 자 : 2013년 08월 16일)
(심사완료일자 : 2013년 08월 30일)
(게재확정일자 : 2013년 09월 04일)