

# 인접 구조물의 내진성능개선을 위한 준능동 MR감쇠기의 GA-최적퍼지제어

윤중원 · 박관순 · 옥승용<sup>\*\*</sup>

동국대학교 건축공학과 · <sup>\*</sup>한경대학교 안전공학과

(2011. 5. 3. 접수 / 2011. 8. 8. 채택)

## GA-based Optimal Fuzzy Control of Semi-Active Magneto-Rheological Dampers for Seismic Performance Improvement of Adjacent Structures

Jung-Won Yun · Kwan-Soon Park · Seung-Yong Ok<sup>\*\*</sup>

Department of Architectural Engineering, Dongguk University

<sup>\*</sup>Department of Safety Engineering, HanKyong National University

(Received May 3, 2011 / Accepted August 8, 2011)

**Abstract :** This paper proposes a GA-based optimal fuzzy control technique for the vibration control of earthquake-excited adjacent structures interconnected with semi-active magneto-rheological(MR) dampers. Rule-based fuzzy logic controllers are designed first by implementing heuristic knowledge and the genetic algorithm(GA) is then introduced to optimally tune the fuzzy controllers for enhancing the seismic performance of semi-active control system. For practical implementation, the fuzzy controller simply uses locally measured responses of the dampers involved and directly returns the input voltage to the magneto-rheological dampers in real time through the fuzzy inference mechanism. The local measurement based fuzzy controller provides optimal damping force in a decentralized manner so that it does not require a primary central controller unlike the conventional semi-active control techniques. As a result, it can avoid the unbridgeable discrepancy between the desired control force and the actual damper force that may occur in the conventional control approaches. The validity and effectiveness of the proposed control method are shown numerically on two 20-story earthquake-excited buildings interconnected with MR dampers.

**Key Words :** fuzzy control, adjacent structures, genetic algorithm, semi-active control, magneto-rheological damper

### 1. 서론

두 구조물을 수동<sup>1-3)</sup>, 능동<sup>4,5)</sup> 또는 준능동형<sup>6,7)</sup>의 제진 장치로 연결하여 지진이나 강풍 등에 의한 진동을 감소시키려는 연구가 진행되어 왔다. 일반적으로, 능동제어 방법은 구조물의 진동 특성에 따라 동특성을 변화시켜 가면서 진동을 제어하게 되므로 성능은 뛰어날 수 있으나, 높은 비용, 비상시 전원 공급문제, 유지관리문제 등으로 인하여 적극적인 활용이 이루어지지 못하는 실정이다. 반면, 수동제어 방법은 전원공급이 필요 없어 비용이 상대적으로 적게 들어 많은 활용이 이루어지고 있으나 구조물의 동특성에 따른 다양한 제진 효과를 나타내지는 못한다. 준능동형은 수동형과 능동형

을 결합한 형태로 각각의 장점을 살려 상대적으로 낮은 비용으로 안정적이고 효과적인 제진성능을 얻을 수 있다. 특히, 지난 10여 년간 magneto-rheological damper(MR 감쇠기)는 가장 활용가치가 높은 준능동 제어장치의 하나로 주목을 받아 왔으며 많은 연구가 이루어져 왔다<sup>8-13)</sup>. MR 감쇠기를 사용한 일반적인 제어방법은 두 단계로 이루어진다<sup>12-14)</sup>. 첫째, 주어진 구조시스템에 대한 이상적인 제어를 설계한다. 이때 제어기 설계에는 LQR, LQG 등과 같은 최적제어 방법<sup>15-18)</sup>이 주로 사용되며 이렇게 얻어진 제어기에서는 하중에 의하여 진동이 발생하는 매 순간마다 최적의 제어력을 산출하게 되며, 이는 MR감쇠기가 구조물에 전달하고자 하는 감쇠력이 된다. 두 번째 단계는 구조물에 전달하고자 하는 감쇠력을 발생시킬 수 있도록 MR 감쇠기에 적당한 전류나 전압을 주어서 원하는 감쇠력을 얻

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.  
syok@hknu.ac.kr

도록 하는 과정이다. 그러나, MR감쇠기와 같은 준 능동 시스템은 능동제어 시스템과는 달리 고유의 소산성을 가지고 있어 제어기가 산출한 최적감쇠력을 정확히 얻어내기가 어려우며, 이상적인 제어력과와의 차이가 발생하게 된다. 즉, 이상적인 제어를 설계한 뒤 그 제어를 근사하도록 MR 감쇠기의 입력전류를 조절하여 감쇠력을 결정하는 방법은 항상 오차가 발생하기 마련이며, 이러한 차이로 인하여 준능동제어 시스템의 성능이 떨어질 수 있다. 또한 MR감쇠기의 비선형 거동은 이상적인 제어력의 추적을 더욱 어렵게 할 뿐 아니라, 인접한 두 구조물을 제어장치로 연결한 경우에는 두 구조물의 진동을 동시에 감소시켜야 하므로 더욱 복잡한 문제가 된다.

이 연구에서는 앞서 설명한 일반적인 두 단계의 MR 감쇠기 조절법 대신 퍼지제어방식(fuzzy logic control method)을 적용한다. 이 연구에서 사용한 접근방식은, 제어기의 설계나 추종(tracking) 없이 구조물의 응답을 퍼지추론과정(fuzzy inference mechanism)을 거쳐 MR 감쇠기가 필요로 하는 감쇠력을 직접 결정하는 방법이다. 퍼지과정을 거쳐 감쇠기의 전압을 직접 결정하게 되므로 원하는 감쇠력과 MR 감쇠기에 의해 발생하는 감쇠력 간의 차이가 생기지 않아 기존 방식에 의한 문제점을 해결할 수 있게 된다. 한편, 퍼지제어방법의 적용에 있어서 제어성능은 주로 입력과 출력 소속함수(input/output membership function) 및 퍼지규칙(fuzzy rules)에 의하여 많은 영향을 받게 된다<sup>19)</sup>. 따라서, MR 감쇠기의 성능을 충분히 발휘하기 위해서는 입출력 소속함수와 퍼지규칙의 세밀한 튜닝이 요구되기도 한다. 그런데, 적용 문제에 따라서는 조정해야 하는 매개변수들(parameters)이 매우 많아, 동시에 적합한 값을 찾아내기가 쉽지 않다. 이 연구에서는 입출력 소속함수들의 범위와 크기, 적용되는 퍼지규칙 등 많은 요소들을 동시에 고려하여 최적화 할 수 있는 방법으로 유전자 알고리즘(genetic algorithm, GA)<sup>20,21)</sup>을 적용하였다. 즉, 유전자 알고리즘을 통하여 최적화된 퍼지제어기(GA-tuned fuzzy controller)가 매 순간 MR 감쇠기에 필요한 전압을 직접 결정함으로써 감쇠력을 조절하여 두 건물의 진동을 제어하게 된다.

설계 예로서, 서로 다른 고유 진동수를 가지는 20층 빌딩을 MR 감쇠기로 연결하고 역사 지진들에 대한 수치모사를 수행하였으며, 제시한 방법의 타당성을 보이기 위하여 수동제어, 일반적인 clipped-

optimal 준능동 제어방법, 퍼지방법 등과의 비교 결과를 제시하였다.

## 2. 감쇠기로 연결된 인접구조물의 운동방정식

Fig. 1은  $n$  층의 두 빌딩이 MR 감쇠기로 연결된 모습을 나타내며, MR 감쇠기는 수평 방향으로  $m$  개의 층에 설치되었다고 가정한다.

Fig. 1의 연결된 두 구조물이 지진하중을 받는 경우, 연계된 시스템의 운동방정식은 아래의 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -f_d \\ f_d \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & M_2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{1} \cdot \ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서,  $\ddot{x}_i, \dot{x}_i, x_i$ 는 각각  $i$ -빌딩( $i=1,2$ )에 대한 가속도, 속도, 변위벡터를 나타내며,  $M_i, C_i, K_i$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성행렬을 나타낸다.  $0$ 은 영행렬,  $f_d$ 는 MR댐퍼에 의한 감쇠력을 나타내는 벡터,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도,  $\mathbf{1}$ 은 모든 요소가 1인 벡터를 의미한다.

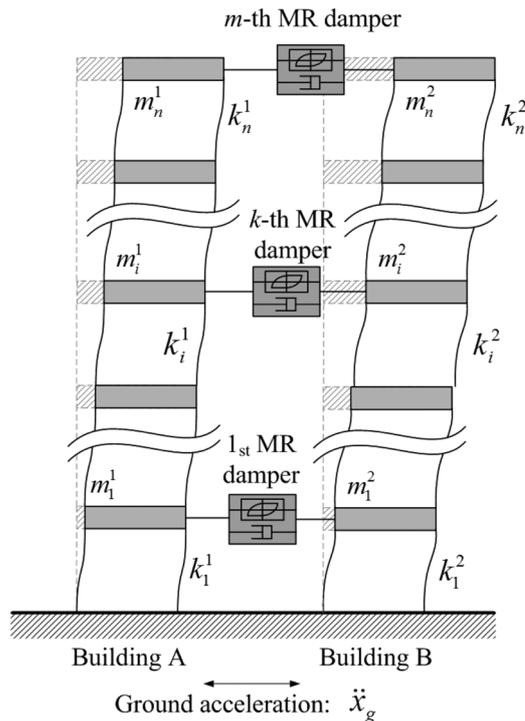


Fig. 1. Two adjacent buildings connected by MR dampers.

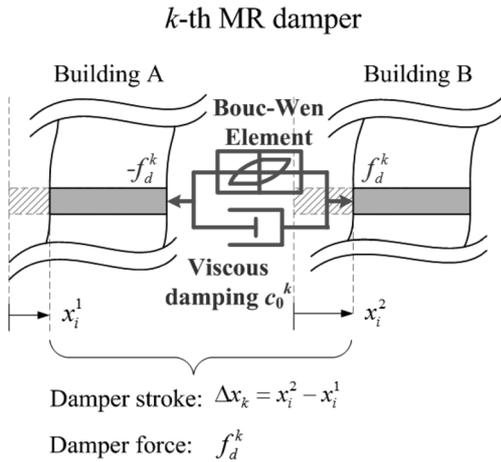


Fig. 2. Mechanical model of MR damper.

Fig. 2는 널리 쓰이고 있는 MR 감쇠기의 역학적 모델<sup>10)</sup>로서 Bouc-Wen 요소<sup>22)</sup>에 점성감쇠(viscous damping)가 추가된 형태로 구성된다.

Fig. 2에서  $k$ 번째 감쇠기의 감쇠력은 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$f_d^k = c_0^k \cdot \Delta \dot{x}_k + \alpha^k \cdot y_k \quad (2)$$

여기서,  $c_0^k$ 와  $\alpha^k$ 는 각각 점성감쇠와 비탄성력에 관계된 계수이며,  $\Delta \dot{x}_k$ 는 감쇠기의 속도이며,  $y_k$ 는 아래 식 (3)으로서 주어지는 비선형 미분 방정식의 해가 된다.

$$\dot{y} = -\gamma |\Delta \dot{x}_k| \cdot y_k \cdot |y_k|^{n-1} - \beta \cdot \Delta \dot{x}_k \cdot |y_k|^n + A_d \cdot \Delta \dot{x}_k \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $n$ ,  $A_d$ 는 이력곡선의 형상에 관계된 매개변수들이다.

식 (2)와 (3)에서 알 수 있듯이, MR 감쇠기는 속도와 전압에 의해 감쇠력을 발생하는 비선형거동을 보이며, Fig. 2에서 감쇠기의 속도는 두 건물사이에 위치해 있으므로 두 건물간의 상대속도에 의해 결정된다. 퍼지제어기에 의해 결정되는 전압에 의하여 MR 감쇠기는 기계적 특성을 바꾸어 가며 다른 감쇠력을 나타내게 된다. 전기적 신호의 변화에 따른 감쇠력의 변화는 식 (2)에서 주어지는 계수  $c_0^k$ 와  $\alpha^k$ 에 의해서 표현되는 데, 입력전압을  $u_k$ 라 할 때, 이 계수들은 아래의 식 (4), (5)와 같이 입력전압에 대한 일차함수의 형태로 나타난다.

$$\alpha_k = \alpha_k(u_k) = \alpha_a + \alpha_b \cdot u_k \quad (4)$$

$$c_0^k = c_0^k(u_k) = c_{0a} + c_{0b} \cdot u_k \quad (5)$$

여기서,  $\alpha_a, \alpha_b, c_{0a}, c_{0b}$ 들은 MR감쇠기의 특성을 나타내는 상수들이다. 즉, MR 감쇠기에 의한 감쇠력은 식 (2)-(5)에 의하여, 입력전압에 의한 비선형함수임을 알 수 있으며, 이 연구에서는 퍼지제어기를 통한 입력전압의 최적변화에 의하여 MR감쇠기로 연결된 두 건물의 지진응답을 효과적으로 제어하고자 한다.

### 3. MR감쇠기의 준능동 퍼지제어

MR 감쇠기의 입력전압을 결정하는 방법의 하나로 입력 전압을 두 단계로 나누어 조절하는 bi-state method<sup>13)</sup>가 있다. 이는 입력 전압을 0V와  $V_{max}$  두 개의 전압을 정해 놓고 미리 설계된 제어기가 명령하는 제어력에 가까운 값을 판단하여 둘 중 하나의 전압을 선택하여 발생시키는 방법이다. 그러나, 이러한 방법은 근본적으로 원하는 감쇠력과 생산 가능한 감쇠력 간의 차이가 발생할 수밖에 없다<sup>23)</sup>. 또한, 입력전류의 급격한 변화를 연속적으로 가하게 되면 가속도 응답이 증가되고 구조물에 국부적 손상이 발생할 수도 있다는 보고가 있다<sup>24)</sup>. 그러므로 이 연구에서는 기존 MR 감쇠기의 제어 방식과는 달리 퍼지제어기법을 통하여 국부적으로 측정된 구조물의 응답정보를 활용하여 MR 감쇠기의 제어력을 직접 연속적으로 조절하고자 한다. 즉, 입력전압을 0~ $V_{max}$  사이에서 퍼지추론과정을 통하여 적합한 감쇠력에 해당하는 입력 전압을 결정하게 되는 것으로써, 기존의 방법이 이상적인 제어력을 정해놓고 이를 근사하도록 입력전류를 선택하는 방법과는 큰 차이가 있다. 또한 퍼지로직(fuzzy logic)은 구조 시스템과 MR 감쇠기의 비선형성, 구조계의 불확실한 동특성 등을 다룰 수 있는 장점이 있다<sup>23,25)</sup>.

Fig. 3은 이 연구에서 제시하는 GA-최적퍼지제어 방법의 개념도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 각 MR감쇠기는 개별적 퍼지제어기로 감쇠력을 발휘하도록 분산형 구조(decentralized structure)로 운용된다. 각각의 퍼지제어기는 퍼지화(fuzzification), 퍼지추론과정(fuzzy inference mechanism), 비퍼지화(defuzzification) 등을 거쳐 MR 감쇠기에 필요한 최적의 전압을 전달하며, MR 감쇠기로부터 생산된

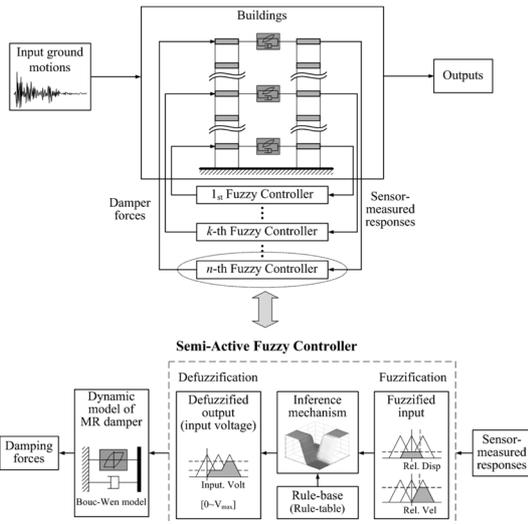


Fig. 3. GA-optimal fuzzy control system for damper-linked adjacent buildings subjected to seismic excitations.

감쇠력은 두 구조물에 전달되어 진동을 제어하게 된다. 퍼지제어기는 두 개의 입력과 하나의 출력 형태로 구성되어 있다. 입력에 필요한 정보로는 MR 감쇠기가 설치된 층의 변위와 속도응답이며 출력으로는 MR감쇠기의 입력전압을 내보내게 된다.

Fig. 4와 5는 이 연구에서 사용한 입력소속함수(input membership function)와 출력소속함수(output membership function)를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 삼각형의 소속함수를 사용하였으며 입력과 출력 모두 각각 5개의 소속함수를 사용하

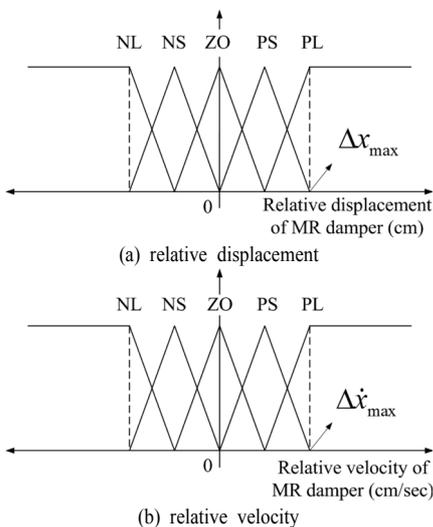


Fig. 4. Input membership functions: (a) relative displacement and (b) relative velocity.

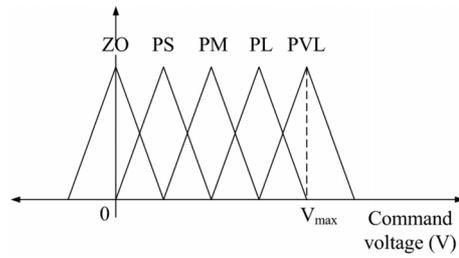


Fig. 5. Output membership function for command voltage of MR damper.

였다. Fig. 4와 5에서 사용한 퍼지변수 NL은 negative large를 의미하며, NS는 negative small, ZO는 zero, PS는 positive small, PM은 positive medium, PL은 positive large, PVL은 positive very large를 각각 의미한다.

변위와 속도를 입력받은 퍼지에어기는 퍼지규칙 및 퍼지추론을 통하여 전압값을 출력시키는 하나의 함수와 같은 역할을 하게 된다. 이때, 가능한 퍼지규칙은 다음과 같은 형태를 가지게 된다.

*If premise 1 and premise 2, then-consequent*

즉, 2개의 전제(premise)는 2개의 입력에 관한 정보(변위와 속도)를 포함하게 되며 결과(consequent)는 제어명령인 MR 감쇠기의 조절 전압과 관계를 가진다. 이러한 퍼지 규칙들은 Table 1과 같은 형식의 퍼지규칙표(fuzzy rule table)로 표현이 가능하다.

Table 1에서, 감쇠기가 영점으로부터 멀어지면(변위의 부호가 속도의 부호와 일치하게 되면) 출력전압은 증가한다. 반대로 변위가 영점에 가까워지면(변위의 부호가 속도의 부호와 다르게 되면) 전압으로 출력하는 값은 낮아지게 된다. 이것은 MR 감쇠기의 소산성을 반영한 것으로, 감쇠기는 운동과 반대되는 방향으로만 감쇠력을 발휘할 수 있는 점을 고려한 것이다. MR 감쇠기의 특성을 반영한 퍼지규칙이 적절히 반영되었음은 아래의 Fig. 6을 통하여 확인할 수 있다.

Table 1. Fuzzy rule table

Voltage, $\alpha$	Relative displacement of MR damper				
	NL	NS	ZO	PS	PL
NL	PVL	PL	PM	PS	ZO
NS	PL	PM	PS	ZO	PS
ZO	PM	PS	ZO	PS	PM
PS	PS	ZO	PS	PM	PL
PL	ZO	PS	PM	PL	PVL

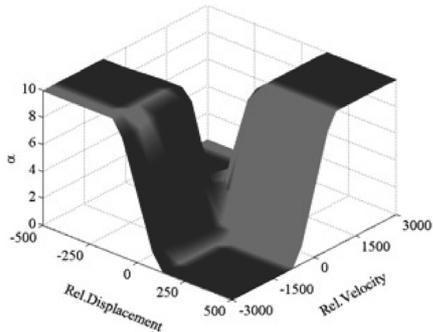


Fig. 6. Fuzzy rule surface.

#### 4. 유전자 알고리즘 기반 준능동 퍼지제어기의 최적화

이 절은, MR감쇠시스템이 보다 나은 제진성능을 발휘할 수 있도록, 운용시스템인 퍼지제어기의 최적화 방법을 다룬다. 퍼지제어기의 최적화 대상은 결국 입력 소속함수, 출력 소속함수 그리고 퍼지규칙이 되며, 각각은 여러 개의 변수들로서 표현되므로 이들을 동시에 결정하는 것은 수많은 변수들을 결정하여야 하는 매우 어려운 문제이다.

가장 쉬운 방법은 퍼지규칙표는 고정시키고, 입력 소속함수와 출력 소속함수도 기본적인 형태로 미리 정의한 다음에 각 소속함수들의 비례계수(scaling factor)만을 설계변수로서 두는 방법이다. 예를 들어 Fig. 7의 입력 소속함수에 대한 비례계수  $g_1$ 을 고려해보자. 비례계수  $g_1$ 은 입력 소속함수의 수평축을 확대( $g_1 > 1$ ) 및 축소( $g_1 < 1$ )함으로써 퍼지제어기의 입력정보와 입력 퍼지계수(ZO, PS, PM, PL, PVL)와의 관계를 변화시키게 된다. Fig. 7(a)에서 비례계수  $g_1 = 1$ 으로 정의된 입력 소속함수에 대해서, 만약 입력 값이 그림과 같이 주어진다면, 이는 입력 퍼지계수 PM(Positive Moderate)에 할당될 것이다. 하지만, 확대 또는 축소 비례계수가 적용된다면 이 퍼지제어기는 동일한 입력정보를 PS(Positive Small) 또는 PL(Positive Large)로 전혀 다른 정보로 인식하게 된다. 즉, 입력 소속함수에 대한 비례계수  $g_1$ 은  $g_1 > 1$ 인 경우에는 주어진 정보를 과소평가하는 경향이 있으며,  $g_1 < 1$ 인 경우에는 과대평가하는 경향이 있다.

한편, 출력 소속함수에 대한 비례계수는 입력 소속함수에 대한 비례계수와 정반대로 정보를 인식하게 된다. Fig. 8에서와 같이, 출력 소속함수에 대한 비례계수  $g_2$ 는  $g_2 > 1$ 인 경우에 퍼지제어기의 출력 값을 확대하며,  $g_2 < 1$ 인 경우에는 축소하게 된

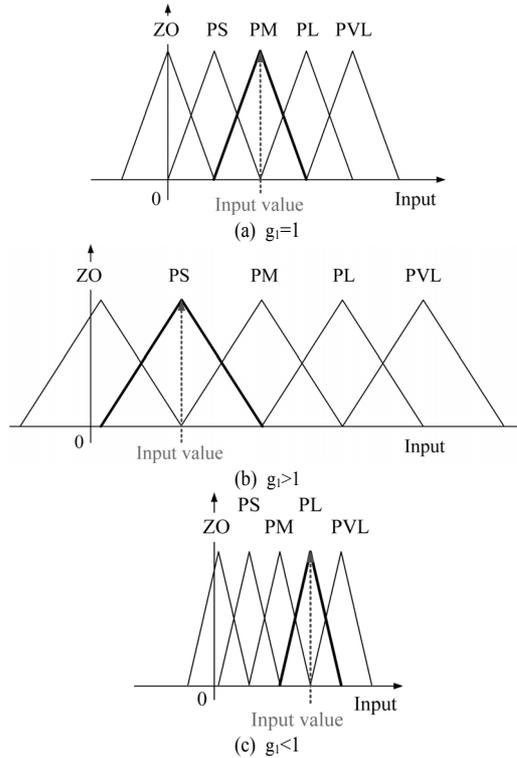


Fig. 7. Scaling effect on the input membership functions.

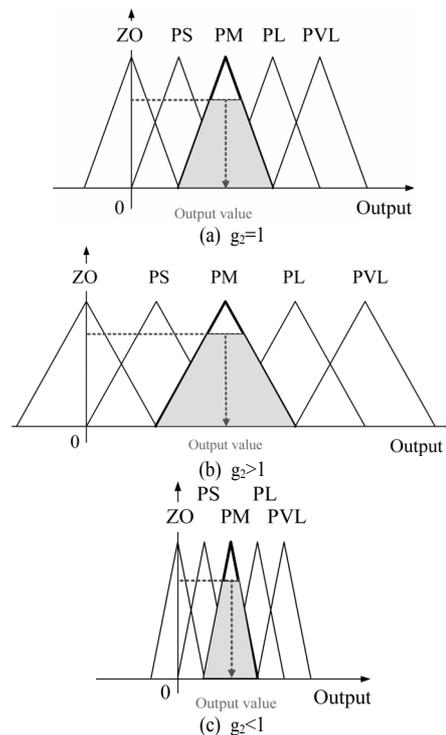


Fig. 8. Scaling effect on the output membership functions.

다. 따라서, 입력 소속함수의 비례계수가  $g_1 > 1$ 인 경우는 출력 소속함수의 비례계수가  $g_2 < 1$ 인 경우와 유사한 결과를 얻을 수 있으며, 반대의 경우도 역시 마찬가지이다.

입력 퍼지변수와 출력 퍼지변수와와의 관계를 규정하는 퍼지규칙도 비례계수와 유사한 영향을 가지도록 설정할 수 있다. 따라서 이러한 퍼지제어기의 설계는 기본적으로 입력 소속함수, 출력 소속함수 및 퍼지규칙의 결정으로 이루어진다. 하지만, 일반적으로 퍼지규칙의 수는 입력 소속함수의 개수에 지수승으로 비례(예:  $n$ 개의 입력에 대해서  $m$ 개의 소속함수인 경우,  $m^n$ 의 규칙 개수가 존재)하므로, 퍼지규칙을 하나 하나 설정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 퍼지규칙은 Table 1과 같이 입출력에 대해서 비례하는 방식으로 고정시키고, 입력 또는 출력 소속함수의 비례계수만으로 퍼지제어기를 설계하는 것이 일반적이다. 이는 입-출력 소속함수의 비례계수와 퍼지규칙을 입출력에 비례하도록 설정하는 방식이 서로 유사한 영향을 미치기 때문에 어느 하나를 고정시키고 다른 쪽만을 조절하더라도 만족할 만한 성능을 얻는 것이 가능하기 때문이다.

이 연구에서 다루는 퍼지제어시스템은, Fig. 3에서 기술한 바와 같이, 여러 개의 MR 감쇠기가 설치되는 경우 각 감쇠기별로 주어지는 퍼지제어 방식으로 구성되며, 각 퍼지제어기는 감쇠기가 설치된 국부 응답(변위, 속도)만을 입력정보로 하여, 해당 감쇠기의 입력전압 값을 출력하는 입력 2개, 출력 1개의 구조로서 구성된다. 이 연구에서 대상으로 하는 MR 감쇠기의 입력전압은 0-10 V의 범위를 가지므로, 출력 소속함수의 최대 범위를 10 V로 고정할 수 있다. 따라서, Fig. 5에서의  $V_{max}=10$ 으로서 고정되며, 출력 소속함수에 대한 비례계수  $g_2=1.0$ 이 된다. 또한, 입력 2개, 출력 1개에 대한 퍼지규칙도 Table 1에서와 같이 고정시킴으로써 최종적인 설계변수는 두 개의 입력 소속함수에 대한 비례계수 2개가 되며, 이를 통하여 전체 퍼지제어시스템의 제진성능을 조절하게 된다. 감쇠기의 개수가  $N_d$ 개인 경우 전체 설계변수는  $2N_d$ 개가 된다.

전술한 바와 같이, 이 연구에서는 유전자 알고리즘<sup>20,21)</sup>을 입력 소속함수의 비례계수를 결정하기 위한 방법으로 적용하였다. 최적화를 위한 목적함수는 지진에 의하여 발생하는 두 빌딩의 층간상대변위 값 중 최대값을 최소화하도록 정의되며, 이는 식 (6)으로 표현된다.

$$Min J = \sum_{k=1}^2 \left[ \sum_{j \in eqs} \frac{\max_{i=1, \dots, m} |\Delta d_{ij}^c|}{\max_{i=1, \dots, m} |\Delta d_{ij}^m|} \right]_k \quad (6)$$

여기서,  $\Delta d_{ij}^c$ 와  $\Delta d_{ij}^m$ 는 각각 제어시와 비제어시 빌딩의  $i$ -번째 층간 상대변위,  $j$ 는 설계지진을 나타내는 인덱스,  $k(=1,2)$ 는 두 빌딩을 나타낸다. 따라서 식 (6)의 목적함수는 비제어시 빌딩의 최대 층간변위에 대해서 제어시 빌딩의 최대 층간변위를 정규화함으로써 제어효과를 나타내게 되며, 목적함수 값이 작을수록 제어효과는 큰 것을 의미한다. 이 목적함수는 유전자 알고리즘에서 적합도 함수로 사용된다.

유전자 알고리즘을 이용한 최적화는 MATLAB<sup>26)</sup>의 Genetic Algorithm and Direct Search Toolbox를 사용하였다. 유전자 알고리즘을 이용한 진화과정은 일반적으로 선택(selection), 교배(crossover), 돌연변이(mutation)의 3단계를 통하여 새로운 개체로 재생산된다. 이 연구에서의 개체 선택은 적합도(fitness) 값에 비례하여 높은 확률로서 개체들이 선택될 수 있는 룰렛휠(roulette wheel) 방식을 사용하였으며, 교배는 2점 교배 방식(crossover fraction=0.6)을, 돌연변이 연산은 adaptive feasible 함수를 적용하였다. 또한, 다음 세대에 살아남는 엘리트 개체 수는 2로 설정하였다.

일반적인 최적화 과정에서의 설계변수는 유전자 알고리즘에서는 개체(individual)로서 정의되며, 이 연구에서 각 개체는 층간 상대변위 및 상대속도에 대한 입력 소속함수의 비례계수 벡터로서  $N_d$ 개의 MR 감쇠기에 대해서  $2N_d$ 개의 크기를 갖는다. 초기치는 모두 1로 설정하였다. 유전자 알고리즘에서는 각 개체별 적합도를 평가하여 보다 낮은 값을 갖는 개체가 선택, 교배, 돌연변이 과정을 통하여 점점 더 나은 개체로 진화해 가게 된다. 이러한 작업들을 통하여 산정된 적합도함수 값이 동일한 값으로 일정 횟수이상 반복될 때 진화과정은 끝나고 그 때 가장 높은 적합도 값을 갖는 개체가 최적해로 결정된다. 최종적으로 얻어진 최적해는 각 감쇠기별 퍼지제어기의 입력정보인 층간 상대변위 및 상대속도에 대한 소속함수의 두 비례계수이다.

### 5. 수치해석 예제

제시하는 퍼지제어기법의 효율성을 살펴보기 위하여 20층짜리 두 인접건물을 수치예제로 고려하였다. 두 빌딩의 각 층 질량은  $1.5 \times 10^5$  kg으로 동일하

며, 각 층 강성은 빌딩 A에 대해서  $3.7 \times 10^8$  kN/m, 빌딩 B에 대해서  $1.15 \times 10^9$  kN/m이다. 감쇠비는 모든 모드에 대해서 2.0%로 가정하였다. 이에 따른 고유진동수는 빌딩 A에 대해서 1차는 0.61, 2차는 1.81, 3차는 3.01, 4차는 4.19, 5차는 5.34 Hz, 빌딩 B에 대해서 1차는 1.07, 2차는 3.20, 3차는 5.31, 4차는 7.39, 5차는 9.42 Hz로 평가되었다. MR감쇠기는 총 10개를 사용하였으며 짝수층(2, 4, 6, ..., 20층)에서 두 빌딩을 연결하도록 설치하였다. MR감쇠기는 Yoshida와 Dyke<sup>27)</sup>에 의하여 제시된 모델을 사용하였으며, 이에 따른 모델 상수들은 각각  $\beta = \gamma = 3 \text{ cm}^{-1}$ ,  $A_d = 1.2$ ,  $n = 1$ ,  $c_{0a} = 4.40 \text{ N} \cdot \text{sec/cm}$ ,  $c_{0b} = 44.0 \text{ N} \cdot \text{sec/cm/V}$ ,  $\alpha_a = 1.0872 \times 10^5 \text{ N/cm}$ ,  $\alpha_b = 4.9616 \times 10^5 \text{ N/cm}$ 로 실험적으로 결정되었다. 이 모델은 최대 입력전압 10V일 때 최대 용량 1,000 kN의 감쇠력을 발휘한다. 설계지진으로는 El Centro 지진(1940), Mexico City 지진(1985), Hachinohe 지진(1968) 및 Taft 지진(1952)의 4가지 실제 지진을 고려하였으며, 최대 지반가속도(Peak Ground Acceleration; PGA)는  $1.41 \text{ m/s}^2 \sim 3.42 \text{ m/s}^2$ 의 범위를 가진다.

5.1. 최적화 결과

유전자 알고리즘에서의 한 세대(generation)당 개체수(individuals)는 50개를 사용하였으며, 최적화 과정은 최대 300회 반복하였으며, 목적함수로는 식 (6)에서 정의된 바와 같이 두 빌딩의 최대 층간 상대변위의 합으로 정의하였다.

$$\text{Min } J = \sum_{k=1}^2 \left[ \sum_{j=1}^4 \frac{\max_{i=1, \dots, 20} |\Delta d_{ij}^d|}{\max_{i=1, \dots, 20} |\Delta d_{ij}^u|} \right] \quad (7)$$

여기서, 4개의 설계지진을 고려하도록  $j=1 \sim 4$ 로 설정되었으며, 20층의 층간 상대변위 중 최대값이 최소화될 수 있도록 최대 층간 상대변위를 목적함수에 포함시켰다. 또한, 두 빌딩( $k=1, 2$ )의 응답을 동시에 동일한 중요도로서 저감시킬 수 있도록 두 빌딩의 비제어시에 대한 제어시의 응답비를 합산하였다.

이에 따른 최적화 결과를 Fig. 9에 도시하였다. 그림은 최적화 반복회수(수평축)가 증가함에 따라 최적해의 적합도(수직축)가 점점 수렴해가는 결과를 나타내고 있다. 최종적으로 얻어진 최적해를 Table 2에 정리하였다. 여기서 최적해는 각 층별 퍼지제어의 변위와 속도에 대한 입력 소속함수의 최대

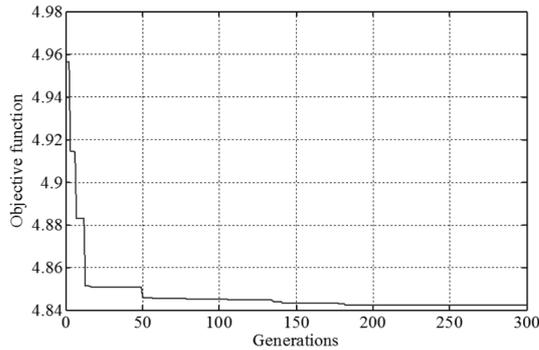


Fig. 9. Generation history of GA optimization process in terms of best fitness values.

Table 2. Finally determined design variables for semi-active fuzzy controller

Damper location	Relative displacement(cm)	Relative velocity(cm/s)
2nd floor	72.32	95.55
4th floor	90.41	28.09
6th floor	77.26	105.79
8th floor	184.90	99.35
10th floor	56.23	39.88
12th floor	171.57	94.28
14th floor	188.59	189.35
16th floor	175.12	196.42
18th floor	88.26	182.91
20th floor	107.74	102.09

범위값으로서 Fig. 4의  $\Delta x_{\max}$ 와  $\Delta \dot{x}_{\max}$ 이다.

이를 통하여 얻어진 최적해의 효율성을 평가하기 위하여 비제어시스템(uncontrolled system), 수동제어시스템(passive control system), 기존 준능동제어시스템(conventional semi-active control system) 및 중앙집중형 퍼지 준능동제어시스템(central fuzzy control system)과 제시하는 GA-최적 퍼지 준능동제어시스템(GA-based optimal fuzzy semi-active control system)의 제진성능을 비교·분석하였다. 여기서, 비제어시스템은 MR감쇠기를 설치하지 않은 시스템이고, 수동제어시스템은 MR감쇠기를 설치하여 감쇠력을 가하되 감쇠기의 입력전압을 고정시켜서 일정 성능을 가진 감쇠력만을 발휘하는 시스템으로서 여기서는 2 V로 고정된 입력전압을 적용하였다. 이는 입력전압에 대한 매개변수연구를 수행한 결과 2 V일 때 가장 최적성능을 보였기 때문이다. 기존 준능동제어시스템은 서론에서 언급한 2단계 제어기법의 하나인 clipped optimal control technique<sup>13,14)</sup>을 적용한 시스템이고, 중앙집중형 퍼지 준능동제어시스템은, Fig. 3과 달리, 하나의 퍼지제어기(single fuzzy controller)만으로 여러

MR감쇠기의 입력전압을 조절하는 준능동제어시스템으로서 김민섭 등<sup>28)</sup>에 의하여 제시된 시스템이다. 한편, 이 연구에서 제시하는 GA-퍼지 준능동제어시스템은 MR감쇠기별 독립된 준능동퍼지제거시스템으로 운용된다. 편의를 위하여 각 시스템을 UNC(uncontrolled), PAS(passive), COC(clipped optimal control), SFC(single fuzzy control), GFC(GA-tuned fuzzy control)로 표기한다.

5.2. 성능평가 결과

Fig. 10은 UNC와 제시하는 방법에 의하여 얻어진(Fig. 9에서 제시된) 최적해를 적용한 GFC의 두 빌딩 최상층 변위의 시간이력곡선을 비교한 결과이다. 이로부터, 제시하는 시스템이 두 빌딩의 최대 응답을 동시에 효과적으로 저감시키고 있음을 확인할 수 있다. 최대 저감율은 빌딩 A, B에 대하여 각각 55.89%, 45.49%로 평가되었다. 이러한 경향은 다른 지진들에 대하여도 유사하게 나타났으므로 따로 제시하지는 않는다.

Fig. 11과 12는 Mexico City지진에 대한 두 빌딩의 층간상대변위 및 층변위의 최대값을 각 층별로 도시한 결과이다. 먼저 고정된 입력전압으로 감쇠력을 발휘하는 PAS는 빌딩 A의 층간변위를 효과적으로 저감시키는 반면, 빌딩 B의 층간변위는 감쇠기를 장착하지 않는 UNC와 유사한 수준의 응답을 보임으로써 응답저감효과가 거의 없는 결과를 보인다. 이는 수동제어시스템이 고정된 입력전압을 사용함으로써 MR감쇠기의 감쇠특성이 고정되

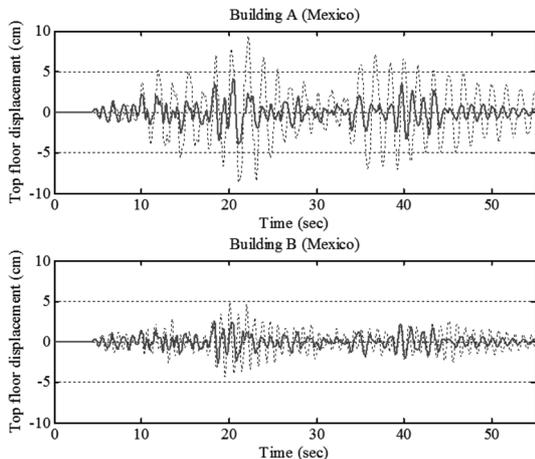


Fig. 10. Time histories of uncontrolled and fuzzy-controlled displacements at 20th floors of buildings A and B subject to Mexico city earthquake.

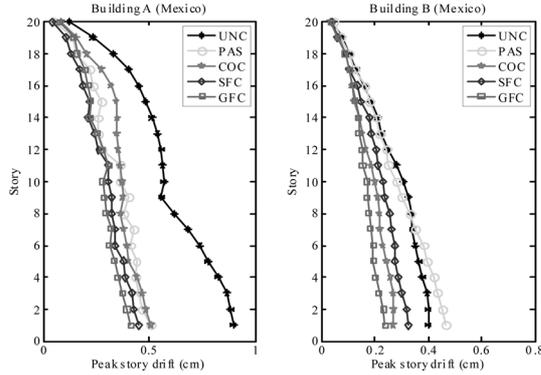


Fig. 11. Comparative peak inter-story drifts of two buildings between UNC, PAS, COC, SFC and GFC systems when subjected to Mexico city earthquake.

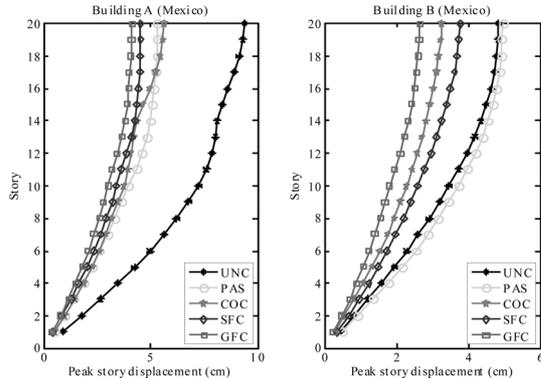


Fig. 12. Comparative maximum displacements of two buildings subject to Mexico city earthquake between UNC, PAS, COC, SFC and GFC systems.

기 때문이다. 즉, MR감쇠기의 고정된 감쇠능력이 주어진 Mexico 지진하중에 대해서 빌딩 A에의 응답저감효과는 클 수 있으나, 다른 주파수 특성을 가지는 빌딩 B에 대해서도 동시에 효과적이라는 보장은 없기 때문이다. 이는 각 지진별 최대 응답을 도시한 Table 3에서도 확인할 수 있다. Table 3에서 PAS는 El Centro 지진에 대해서는 COC와 SFC보다 개선된 응답저감효과를 보이는 반면, 다른 지진들에서는 COC와 SFC와 비교할 때 다소 큰 응답값을 보임으로써 제진성능이 지진에 따라 변동이 심하다는 것을 알 수 있다. 또한, Taft 지진에 대해서는 빌딩 A는 가장 큰 응답저감효과를 보이는 반면, 빌딩 B에 대해서는 반대로 가장 큰 응답을 보임으로써 감쇠성능을 전혀 발휘하지 못하는 결과를 확인할 수 있다. 따라서, 이러한 수동제어시스템은 특정 구조물과 특정 하중에 대해서만 감쇠성능을 효과적으로 발휘하는 한계를 가진다.

Table 3. Comparison of peak responses of coupled buildings subjected to four earthquakes

		Control strategy									
		UNC		PAS		COC		SFC		GFC	
		Building A	Building B	Building A	Building B	Building A	Building B	Building A	Building B	Building A	Building B
El Centro	Story drift (cm)	1.89	1.69	1.12	1.01	1.35	1.39	<b>1.07</b>	<b>0.90</b>	<b>1.08</b>	<b>0.91</b>
	Displacement (cm)	21.46	21.38	<b>13.53</b>	<b>11.07</b>	14.84	16.49	14.50	12.32	<b>12.42</b>	<b>9.99</b>
Mexico City	Story drift (cm)	0.90	3.40	0.51	0.46	0.51	<b>0.27</b>	<b>0.45</b>	0.33	<b>0.41</b>	<b>0.24</b>
	Displacement (cm)	9.40	4.86	5.36	4.98	5.66	<b>3.26</b>	<b>4.57</b>	3.78	<b>4.15</b>	<b>2.65</b>
Hachinohe	Story drift (cm)	1.31	1.00	1.05	0.79	<b>1.03</b>	0.83	<b>1.04</b>	<b>0.72</b>	1.07	<b>0.66</b>
	Displacement (cm)	17.41	13.74	14.33	11.42	<b>10.75</b>	11.92	13.23	<b>10.56</b>	<b>13.20</b>	<b>10.18</b>
Taft	Story drift (cm)	0.72	0.64	0.56	0.51	0.57	<b>0.41</b>	<b>0.53</b>	0.46	<b>0.55</b>	<b>0.39</b>
	Displacement (cm)	9.58	9.06	<b>8.03</b>	7.19	8.46	<b>5.79</b>	<b>7.51</b>	6.38	8.38	<b>5.34</b>

Fig. 11에서 준능동시스템들(COC, SFC, GFC)의 제진성능을 살펴보면, SFC가 COC보다는 빌딩 A의 층간상대변위를 다소 많이 저감시키는 반면, 빌딩 B에 대해서는 다소 큰 응답을 보임으로써 서로 상충하는 제진성능을 발휘하고 있다. 하지만 이 연구에서 제시하는 GFC는 두 빌딩 모두에서 층간상대변위가 가장 작게 발생함으로써 가장 우수한 제진성능을 발휘하는 결과를 보인다. 이러한 경향은 Fig. 12의 각 층변위에 대해서도 유사하게 관측

되고 있다. 또한, Table 3에서 여러 지진에 대한 최대 응답값들을 살펴봐도 유사한 결과를 얻을 수 있다. Table 3에서 볼드체로 표시한 결과가 응답저감효과가 우수한 경우에 해당한다. 전반적으로 COC와 SFC가 PAS보다는 다소 개선된 응답저감효과를 보이고 있으며, 두 시스템(COC와 SFC)은 서로 상충하는 유사한 제진성능을 발휘하고 있다. 한편, 이 연구에서 제시하는 GFC는 모든 제어시스템과 비교할 때 두 빌딩의 응답을 동시에 가장 효과적

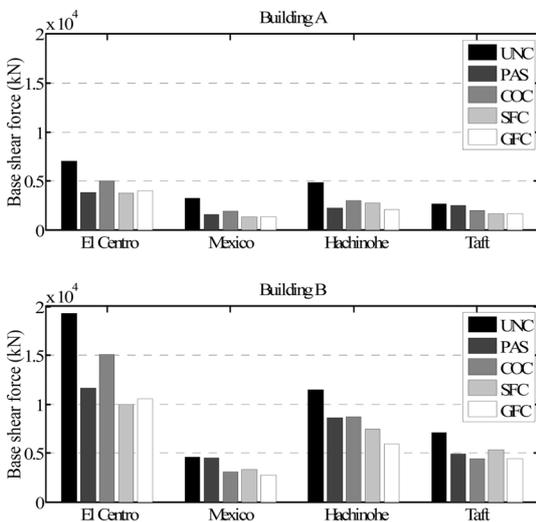


Fig. 13. Comparison of maximum base shears between UNC, PAS, COC, SFC and GFC systems.

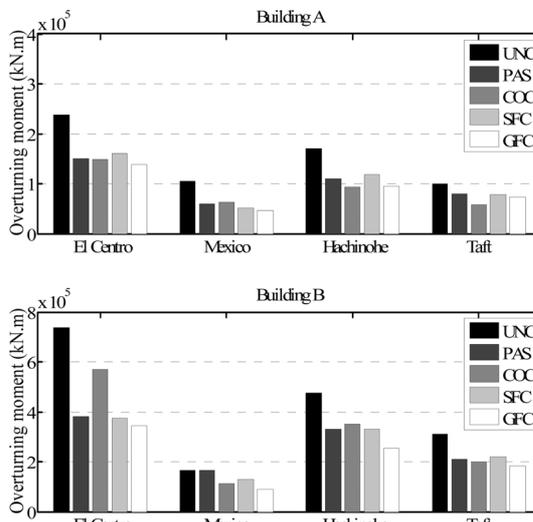


Fig. 14. Comparison of maximum bending moments between UNC, PAS, COC, SFC and GFC systems.

으로 저감시킴으로써 여러 지진에 대해서 전반적으로 가장 뛰어난 감쇠능력을 발휘하고 있음을 알 수 있다.

다음으로는 빌딩의 안전성과 직결되는 바닥전단력과 휨모멘트의 최대값을 각 지진별로 비교하는 결과를 Fig. 13과 14에 도시하였다. 앞서 살펴보았던 변위응답뿐만 아니라, 구조물의 부재들에 발생하는 최대 전단력과 휨모멘트를 살펴봐도, 유사한 경향을 관측할 수 있다. 즉, 제시하는 GFC가 몇몇 경우를 제외하고는 전반적으로 가장 개선된 제진성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다.

이 연구에서 다루고 있는 감쇠기로 연결된 인접빌딩의 지진응답은 감쇠기의 감쇠력에 따라 어느 하나의 빌딩응답을 저감시키는 것은 그리 어렵지 않다. 하지만 인접빌딩의 제어문제는 감쇠기의 연결에 의해서 동일한 힘이 다른 빌딩에도 동시에 전달되므로 하나의 빌딩응답을 제어할 때 다른 빌딩의 응답을 반대급부로 증폭시키는 결과를 유발할 수 있다. 이는 하층의 주파수 특성과 두 빌딩구조물의 주파수 특성에 따라서 달라지게 된다. 따라서 가장 효율적인 해결책은 두 빌딩의 응답의 상충하는 특성을 매 순간 판단하여 어느 한 빌딩의 응답이 너무 증폭되지 않도록 적절한 수준에서 타협하는 제어방식(compromising control approach)이 가장 효율적이라 할 수 있다. 하지만, 기존 제어방식들은 이상적인 제어를 미리 설계하고 이로부터 결정되는 최적 제어력을 따라가도록 감쇠력을 발휘하는데, 결국 기설계되는 제어가 이러한 매 순간에서의 trade-off를 얼마나 효율적으로 판단할 수 있도록 설계되느냐에 따라 제어성능이 달라지게 된다. 이에 반해, 이 연구에서 제시하고 있는 퍼지제어시스템은 매 순간 발생하는 응답을 감지하여 증폭되는 응답을 실시간으로 저감시킬 수 있는 퍼지추론을 통하여 가장 효과적인 절충안(compromising solution)을 실시간으로 제시할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 인접빌딩의 지진응답제어문제에 효과적인 제진대책이 될 것으로 판단된다.

## 6. 결론

이 연구에서는 인접빌딩의 내진성능개선을 위한 준능동 MR감쇠기의 유전자 알고리즘 기반 퍼지제어 최적설계기법을 제시하고자 하였다. 제시하는 방법은 실제 적용성을 높이기 위하여 입력정보로서 감쇠기가 설치되는 층응답만을 고려하였으며,

두 빌딩의 상충하는 응답특성을 효과적으로 판단하여 가장 효과적인 절충안을 결정할 수 있도록 퍼지제어기를 독립적으로 구성하였다. 유전자 알고리즘에서의 최적 설계과정에서 MR감쇠기의 물리적 특성을 반영하여 퍼지규칙 및 출력소속함수를 고정함으로써 많은 수의 설계변수를 줄일 수 있도록 최적화 문제를 구성하였다. 또한, 감쇠기가 설치된 국부적인 응답정보만으로 구조물의 상태를 판단하여 MR감쇠기의 입력전압을 결정하여 감쇠력을 조절함으로써 기존 준능동제어방법들에서 사용되었던 이상적인 제어기 설계를 필요로 하지 않도록 구성하였다. 20층 인접빌딩 예제를 통하여 제시하는 시스템이 수동시스템, 기존 준능동 제어시스템 및 기존 퍼지준능동제어시스템보다 인접빌딩의 상충하는 지진응답을 여러 지진하중에 대해서 가장 효율적으로 저감시킬 수 있음을 검증하였다. 따라서 이 연구에서 제시한 방법은 실제 구조물에의 적용성을 높이면서도 최적 제어기의 체계적 설계방법을 제시함으로써 인접구조물의 효과적인 내진대책이 될 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 1) B. Westermo, "The dynamics of interstructural connections to prevent pounding", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 687~699, 1989.
- 2) K. Gurley, A. Kareem, L.A. Bergman, E.A. Johnson, R.E. Klein, "Coupling tall buildings for control of response to wind", *Proceeding of 6th International Conference on Structural Safety and Reliability*, Schueller, Shinozuko & Yao, (eds.), Balkema Publishers, pp. 1553~1560, Rotherdam, Netherlands, 1994.
- 3) S.-Y. Ok, J. Song, K.-W. Park, "Optimal design of hysteretic dampers connecting adjacent structures using multi-objective genetic algorithm and stochastic linearization method", *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 1240~1248, 2008.
- 4) K. Seto, "Vibration control method for flexible structures arranged in parallel", *Proceeding of 1st World Conference on Structural Control*, Vol. 2, pp. 62~71, Pasadena, California, 1994.
- 5) Y. Yamada, N. Ikawa, H. Yokoyama, E. Tachibana, "Active control of structures using the joining member with negative stiffness", *Proceeding of 1st World Conference on Structural Control*, Vol. 2, pp. 41~49, Pasadena, California 1994.

- 6) R.E. Klein, M.D. Healy, "Semi-active control of wind induced oscillations in structures", Proceeding of 2nd International Conference on Structural Control, University of Waterloo, Ontario, Canada, 15-17 July, 1985, reprinted in Structural Control, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 354~369, 1987.
- 7) R.E. Christenson, B.F. Spencer Jr., "Coupled building control using 'smart' dampers", Proceeding of 13th Engineering Mechanics Division Conference, ASCE, Baltimore, Reston Va, CD-ROM, 1999.
- 8) B.F. Spencer Jr., S.J. Dyke, M.K. Sain, J.D. Carlson, "Phenomenological model of magnetorheological damper", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 123, No. 3, pp. 230~238, 1997.
- 9) F. Yi, S.J. Dyke, J.M. Caicedo, J.D. Carlson, "Experimental verification of multiinput seismic control strategies for smart dampers", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 127, No. 11, pp. 1152~1164, 2001.
- 10) J.D. Carson, D.M. Catanzarite, K.A. St. Clair, "Commercial magneto-rheological fluid devices", International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, No. 23~24, pp. 2857~2865, 1996.
- 11) H. Fujitani, S. Soda, N. Iwata, H. Sodeyama, K. Hata, K. Sunakoda, Y. Komatsu, "Dynamic performance evaluation of magnetorheological damper by experimental and analytical methods", Proceeding of U.S.-Japan Workshop on Smart Structures for Improved Seismic Performance in Urban Regions, Vol. 14, pp. 237~248, Seattle, 2001.
- 12) S.-Y. Ok, D.-S. Kim, K.-S. Park, H.-M. Koh, "Semi-active fuzzy control of cable-stayed bridges using magneto-rheological dampers", Engineering Structures, Vol. 29, No. 5, pp. 776~788, 2007.
- 13) L.M. Jansen, S.J. Dyke, "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, No. 8, pp. 795~803, 2000.
- 14) M.D. Symans, M.C. Constantinou, "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review", Engineering Structures, Vol. 21, No. 6, pp. 469~487, 1999.
- 15) B.F. Spencer Jr., S. Nagarajaiah, "State of the art of structural control", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 7, pp. 845~856, 2003.
- 16) L.T. Lu, W.L. Chiang, J.P. Tang, "LQG/LTR control methodology in active structural control", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 124, No. 4, pp. 446~454, 1998.
- 17) B.F. Spencer Jr., J. Suhardjo, M.K. Sain, "Frequency domain optimal control strategies for aseismic protection", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118, No. 12, pp. 2463~2481, 1992.
- 18) J.C. Doyle, K. Glover, P.P. Khargonekar, B.A. Francis, "State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems", IEEE Transaction on Automat Control, Vol. AC-34, No. 8, pp. 831~847, 1988.
- 19) K.M. Passino, S. Yurkovich, "Fuzzy control", Reading (NY), Addison-Wesley, Long-man, 1998.
- 20) J.H. Holland, "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, Ahn Arbor, MI, 1975.
- 21) D.E. Goldberg, "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning", Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- 22) Y.K. Wen, "Method of random vibration of hysteretic systems", Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 102, No. 2, pp. 249~263, 1976.
- 23) S.F. Ali, A. Ramaswamy, "Optimal fuzzy logic control for MDOF structural systems using evolutionary algorithms", Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 22, pp. 407~419, 2009.
- 24) S.F. Ali, A. Ramaswamy, "GA optimized FLC driven semi-active control phase II smart nonlinear base isolated benchmark building", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 15, No. 5, pp. 797~820, 2008.
- 25) H.J. Lee, J.B. Park, G. Chen, "Robust fuzzy control of nonlinear systems with parametric uncertainties", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 9, No. 2, pp. 369~379, 2001.
- 26) MATLAB, The Math Works, Inc., Natick, MA, 2006.
- 27) O. Yoshida, S.J. Dyke, "Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 130, No. 4, pp. 386~392, 2004.
- 28) 김민섭, 옥승용, 박관순, "MR감쇠기의 준능동 퍼지제어기법을 이용한 인접구조물의 지진응답제어", 한국지진공학회 논문집, 제13권, 제3호, pp. 39~50, 2009년 6월.