한국지진공학회 논문집 | 제13권 제3호 (통권 제67호) | 2009년 6월, pp. 39~50

MR 감쇠기의 준능동 퍼지제어기법을 이용한 인접구조물의 지진응답제어

Seismic Response Control of Adjacent Structures by Semi-Active Fuzzy Control of Magneto-Rheological Damper

김민섭[1] · 옥승용[2] · 박관순[3]

Kim, Min-Seob · Ok, Seung-Yong · Park, Kwan-Soon

국문 요약 >> 인접건물 사이에 감쇠기 형태의 에너지 소산장치를 설치하고 연결함으로써, 지진 응답을 줄이고 내진 성능을 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 서로 인접한 건물 간의 진동제어를 위하여 준능동 MR 감쇠기를 이용하는 퍼지 제어기법을 제시하고, MR 감쇠기의 감쇠력 조절을 시간에 따라 제어할 수 있도록 제시한 방법으로 제어기를 설계하였다. 제시한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 수치모사를 수행하였으며, 다양한 역사지진의 지진응답 해석을 통해서 비제어시, 수동제어 및 준능동 퍼지제어 등에 대한 최대응답을 비교·분석하였다. 수치모사 결과 제시한 방법은, 다양한 주파수 성분을 가진 여러 가지 지진에 대해 매우 효과적인 제진 성능을 보이는 것으로 나타났다.

주요어 인접건물, 준능동 MR 감쇠기, 퍼지제어기, 지진응답

ABSTRACT >> In this paper, a method for reducing seismic responses of adjacent buildings is studied that involves connecting two buildings with energy-dissipating devices, such as MR dampers. For the vibration control of the adjacent buildings, a fuzzy control technique with semi-active MR dampers is proposed. A fuzzy controller, which can appropriately modulate the damping forces by controlling the input voltage in real time, is designed according to the proposed method. To verify the validity of the proposed method, numerical simulations are performed. In the numerical simulations, historical earthquake records with diverse frequency contents and different peak values are used. For the purpose of comparison, an uncontrolled system, a passive control system and a semi-active fuzzy control system are considered. The comparative results prove the effectiveness of the proposed control technique, i.e. the numerical results show that the fuzzy controlled semi-active MR dampers can effectively reduce the earthquake responses of the adjacent structures.

Key words Adjacent buildings, Semi-active MR damper, Fuzzy controller, Seismic response

1. 서 론

현대 대형구조물은 해석 및 설계기술 향상, 고강도/고품질 건설재료의 개발 및 사회적인 요구 등으로 인하여 고층화, 대형화되어 가고 있다. 이러한 구조물은 감쇠 능력이 낮고 매우 유연하기 때문에 지진 및 강풍과 같은 자연재해에 대해 구조부재의 심각한 손상과 붕괴 등 구조적 안전성에 심각한 문제를 야기할 수 있다. 이런 진동 문제와 더불어 사회가 발달하고 인구가 증가하면서 제한된 토지로 인해 도시의 건물들은 상대적으로 건물 사이의 간격도 더욱 줄어들고 있다. 따라서 인접한 고층 건물은 지진이 발생할 때 충돌로 인한 파괴가 발생할 가능성이 높아지게 되므로, 지진과 같은 동적하중에 의해 구조물에 발생하는 과도한 진동을 줄이는 것이 건축 구조공학 분야에서 매우 중요한 과제 중 하나이다. 최근 환태평양 및 유럽의 지진발생 지역을 중심으로 빈번하게 발생하는 강진에 의한 피해는 구조물의 성능개선 및 설계 기술의 개발과 병행하여 첨단소재 적용에 의한 구조성능 개선에 더욱 큰 관심을 불러일으키고 있다. 도시의

[1] 정회원·동국대학교 건축공학과, 공학석사
[2] 서울대학교 교량설계핵심기술연구단, 공학박사
[3] 정회원·동국대학교 건축공학과, 조교수
(교신저자: kpark@dongguk.edu)

본 논문에 대한 토의를 2009년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 1. 14 / 수정일 1차 : 2009. 5. 8, 2차 : 2009. 5. 25 / 게재확정일 : 2009. 5. 25)

제한된 토지에 증가하는 고층건물과 지속적으로 유입되는 인구의 수용이 불가피하여 도시의 과밀현상은 점차 심화되고 있는 상황이다. 이런 과밀 지역에 위치하는 인접건물의 충돌을 방지하기 위하여 법적으로 규정하고 있는 최소간격으로는 실질적인 해결방안이 되지 못하고 있다. 이처럼 건물의 고층화와 밀집화로 인해 건물의 규모가 증가함과 동시에 건물의 동적응답에 대한 위험성도 역시 점차 증가하고 있다.

인접한 두 건물의 경우, 두 건물 간을 서로 연결시켜 이동통로로 사용할 뿐 아니라 구조적인 거동을 조절하는 방법이 제시되어 왔다. 특히, 연결부에 감쇠기 등을 설치하여 동적하중에 대한 진동 감소효과를 얻고자 하는 연구가 많이 진행되어 왔다.[1-7] 이들 대부분의 연구는 수동형 감쇠기를 사용하는 것으로서, 다양한 진동수 성분을 포함한 지진이 발생하는 경우, 제어장치의 설치에도 불구하고 원하는 진동감소효과를 얻지 못할 수 있다. 따라서 이 연구에서는, 구조물의 응답에 따라 동특성을 실시간으로 조절하여 진동제어 효과를 높이면서도 능동형 제진장치에 비하여 가격이 저렴하고 적용성이 뛰어난 준능동 제어방법에 관하여 연구하였다.

이 연구에서 사용한 준능동 제어장치는 MR감쇠기(Magneto-Rheological Damper)로서 빠른 응답속도와 대용량 제작이 가능하여, 교량의 응답제어에도 널리 알려진 장치이다.[8-9] 이 연구에서는 MR 감쇠기로 두 건물을 연결하고 지진 발생 시 실시간으로 MR 감쇠기의 감쇠력을 조절함으로써 진동제어효과를 얻는 방법을 제시하고자 하였다. 특히, MR 감쇠기가 제공하는 감쇠력은 두 건물 간의 상대속도 차이와 입력전압에 의존하므로 입력전압의 결정은 제진성능을 결정하는 중요한 요소이다. 이 연구에서는 퍼지제어기를 이용하여 MR 감쇠기의 입력전압을 실시간으로 조절하고자 하였다. 퍼지제어기는 건물 간의 상대변위와 속도차이 등에 관한 정보를 이용하여 두 건물에 적절한 감쇠력을 실시간으로 제공하게 된다. 이를 위해, 준능동 MR감쇠기를 위한 퍼지제어기를 설계하고 다양한 역사지진을 이용하여 수치모사를 수행함으로써 제시한 방법의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 인접건물의 구조시스템

2.1 인접건물의 모델링

이 연구에서는 n_1층과 n_2층($n_1 > n_2$)을 가지는 인접한 두 건물을 고려하였으며, 이는 각 층별 집중 질량(m_i)과 기둥강성(k_i)으로 표현되는 전단건물모델로서 각각 n_1개의 자유도와 n_2개의 자유도를 갖는 운동방정식으로 표현된다. 지진하중을 받는 두 구조물의 운동방정식은 각각 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

$$M_1\ddot{x}_1 + C_1\dot{x}_1 + K_1x_1 = -M_1E_1\ddot{x}_g \tag{1}$$

$$M_2\ddot{x}_2 + C_2\dot{x}_2 + K_2x_2 = -M_2E_2\ddot{x}_g \tag{2}$$

여기서, E_1, E_2는 지진하중에 대한 위치벡터로서 각각 $[n_1 \times 1]$과 $[n_2 \times 1]$크기의 $\{1\}$벡터이다. x_1, $\dot{x}_1$, $\ddot{x}_1$ 및 x_2, $\dot{x}_2$, $\ddot{x}_2$ 는 각각 n_1층 및 n_2층 구조물의 변위, 속도, 가속도 벡터이며, $\ddot{x}_g$는 입력지반가속도이다.

M_1과 M_2는 각각 n_1층과 n_2층 건물의 질량행렬로서 식 (3)과 식 (4)의 대각행렬로 표현되며, K_1과 K_2는 두 구조물의 강성행렬로서 식 (5)와 식 (6)으로 정의된다.

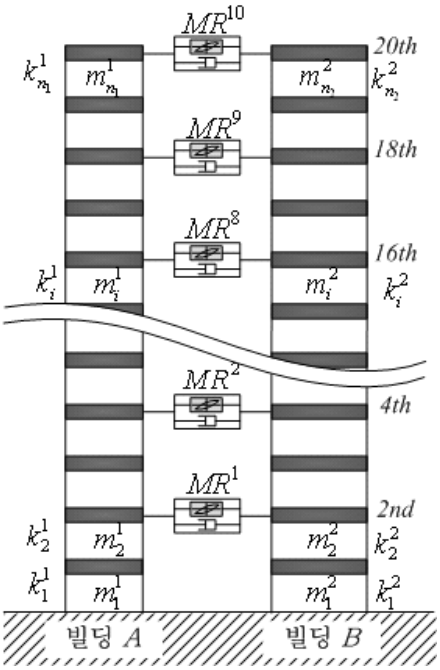
$$M_1 = \begin{bmatrix} m_1^1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & m_2^1 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & m_{n_1-1}^1 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & m_{n_1}^1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} m_1^2 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & m_2^2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & m_{n_2-1}^2 & 0 \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & m_{n_2}^2 \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} k_1^1+k_2^1 & -k_2^1 & \cdots & \cdots & 0 \\ -k_2^1 & k_2^1+k_3^1 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k_{n_1-1}^1+k_{n_1}^1 & -k_{n_1}^1 \\ 0 & \cdots & \cdots & -k_{n_1}^1 & k_{n_1}^1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} k_1^2+k_2^2 & -k_2^2 & \cdots & \cdots & 0 \\ -k_2^2 & k_2^2+k_3^2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & k_{n_2-1}^2+k_{n_2}^2 & -k_{n_2}^2 \\ 0 & \cdots & \cdots & -k_{n_2}^2 & k_{n_2}^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

여기서, m_i^1 , k_i^1 $(i=1,2,3\cdots,n_1)$는 n_1층 빌딩의 i번째 층의 질량과 강성 값을 나타내며, m_j^2 , k_j^2 $(j=1,2,3\cdots,n_2)$는 n_2층 빌딩의 j번째 층의 질량과 강성 값을 나타낸다. 구조물의 감쇠는 각 모드별 감쇠비로서 정의되는 비례감쇠를 가정하였으며, 두 건물 구조물의 감쇠행렬 C_1, C_2는 고유치해석을 통해서 모드감쇠행렬의 중첩으로 구할 수 있다.[10]



〈그림 1〉 감쇠장치로 연결된 인접 건물 시스템

그림 1과 같이, 두 인접 건물 간에 부가적으로 준능동 MR 감쇠장치를 설치하여 두 건물을 연결한 구조시스템의 운동방정식은 식 (7)과 식 (8)로서 다시 나타낼 수 있다.

$$M_1\ddot{x}_1+C_1\dot{x}_1+K_1x_1=-M_1E_1\ddot{x}_g+E_1^FF_d \tag{7}$$

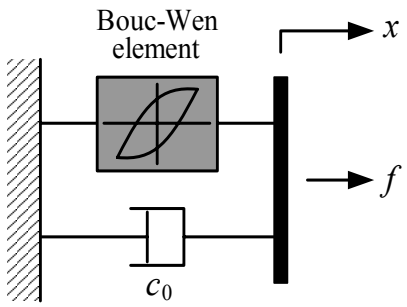
$$M_2\ddot{x}_2+C_2\dot{x}_2+K_2x_2=-M_2E_2\ddot{x}_g-E_2^FF_d \tag{8}$$

여기서, F_d는 인접 건물을 연결하는 감쇠장치로부터 발휘되는 감쇠력 벡터이며, E_1^F, E_2^F는 각각 감쇠장치가 설치된 층에 대한 위치행렬로서 감쇠장치가 설치된 층은 1의 값을 가지고 그렇지 않은 층은 0의 값을 갖게 된다.

2.2 MR 감쇠기 모델

수동제어시스템은 신뢰성은 뛰어나지만 외부하중에 대한 적응성은 떨어지고, 능동제어시스템은 외부하중에 대한 적응성은 뛰어나지만 구조물에 역효과를 주는 제어력을 발생할 가능성이 있으며 강한 지진이 발생할 경우 전력이 끊길 위험도 있다. 이에 반해 준능동 제어 시스템은 수동제어시스템이 가지고 있는 신뢰성과 능동제어 시스템의 장점인 적응성을 동시에 확보할 수 있기 때문에 최근 가장 각광을 받고 있는 제어 방법이다.

MR 감쇠기는 대표적인 준능동 제어장치 중의 하나로 최근에 많은 연구가 진행되어왔다. 감쇠기 내부는 전자기장에 반응하는 자기유변유체(Magneto-Rheological Fluid)로 채워지며, 자기장이 없을 때 감쇠장치 내의 유체는 자유롭게 유동하고 감쇠기에 자기장이 가해지면 선형 점성유체가 수백분의 일초 사이에 항복강도를 갖는 반고체 상태로 변환됨으로써 에너지를 소산시킨다. 이러한 자기유변유체의 특성을 이용한 MR 감쇠기는 기계적으로 단순하면서도 높은 동적 변위를 가지며 적은 전력으로도 감쇠 능력이 뛰어나고 강인성을 확보할 수 있기 때문에, 기존 준능동 제어장치들이 가진 기술적인 어려움의 많은 부분을 해결할 수 있다.



〈그림 2〉 MR 감쇠기를 모사한 Bouc-Wen 모델

제어시스템의 거동을 정확하게 예측하기 위해서는 제어장치를 얼마나 정확하게 모델링하느냐가 매우 중요하다. 최근 많은 연구자들에 의해 MR 감쇠기의 여러 역학적 모델들이 제안되었는데, 그 중 그림 2와 같이 점성 감쇠와 Bouc-Wen 요소가 병렬로 연결된 이력모델이 전단형태의 MR 감쇠기의 거동을 잘 모사하며 실제 규모의 MR 감쇠기 모델링에도 효과적으로 적용될 수 있다고 평가되었다.[11),(12)]

따라서 이 연구에서는 그림 2와 같은 역학적 모델을 갖는 전단형태의 MR감쇠기를 사용하였다. MR 감쇠기에서 발생하는 감쇠력은 아래의 식 (9)로서 정의된다.

$$f=c_0\dot{x}_d+\alpha z \tag{9}$$

식 (9)의 내부변수는 아래 식 (10)의 미분방정식으로부터 구해진다.

$$\dot{z}=-\gamma|\dot{x}_d||z|z|^{n-1}-\beta\dot{x}_d|z|^n+A_m\dot{x}_d \tag{10}$$

여기서 x_d는 감쇠장치의 운동거리(Stroke)이고, z는 이력거동에 관계되는 내부 변수이다. 식 (10)의 매개변수 γ, A_m, β, n는 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 쓰이는 계수들이다. 식 (9)에서 계수 α와 c_0는 감쇠기의 입력 전압에 따라 식 (11)과 식 (12)로서

결정된다.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \tag{11}$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \tag{12}$$

여기서 수동 감쇠기의 경우 이 계수들은 고정된 상수 값을 가지며, 고정된 이력거동을 보인다. 이에 반해 준능동 감쇠기는 식과 같이 입력 전압의 함수로서 표현되며, 입력 전압 값에 따라 매 순간 변화하는 감쇠력이 결정된다.

한편, 입력전압의 변화에 MR 감쇠기가 반응하는데 걸리는 시간 지연(Time Lag)을 고려하기 위하여 다음 식 (13)의 1차 필터 방정식(First-Order Filter Dynamics)을 시스템에 도입하였다.

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \tag{13}$$

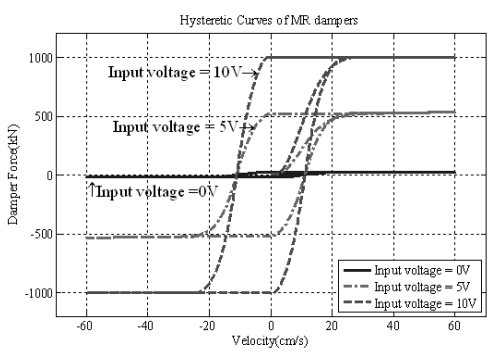
여기서, v는 제어기로부터 결정되는 전압 값이며 u는 시간 지연효과에 따라 MR 감쇠기가 뒤늦게 반응하는 입력 전압으로서 실질적인 감쇠력을 결정하는 전압 값이다. η는 필터방정식의 시간상수이다.

이 연구에서 사용한 MR 감쇠기는 입력 전압 10V에서 최대 용량 1000kN을 가지도록 설계된 모델이며, 이의 계수 값들은 표 1에 제시되어 있다.[13]

그림 3은 MR 감쇠기의 속도 $\dot{x}$를 sine 함수로 가정하고

〈표 1〉 MR 감쇠기 모델의 계수 값

계수	Value	계수	Value
α_a	1.087×105 N/cm	A_m	1.2
α_b	4.962×105 N/(cm·V)	n	1
c_{0a}	4.40 N·s/cm	β	3 cm^{-1}
c_{0b}	44.0 N·s/(cm·V)	γ	3 cm^{-1}
		η	50 s^{-1}



〈그림 3〉 입력 전압 값에 따른 MR 감쇠기의 이력거동 변화

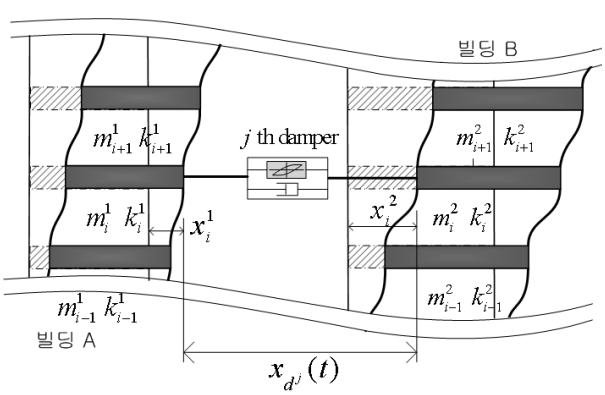
v는 0V, 5V, 10V 의 세 경우로 나누어 입력시켰을 때 속도와 감쇠력의 변화를 나타낸 이력곡선이다. 그림 3에서 MR 감쇠력은 입력전압의 크기에 따라 큰 폭으로 조절되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 준능동 제어시스템의 제어성능은 매 순간 구조물에 적당한 감쇠력을 발휘할 수 있도록 입력 전압을 얼마나 잘 조절하느냐에 따라 결정됨을 알 수 있다. 또한 그림에서 알 수 있듯이 감쇠기의 감쇠력은 강한 비선형성을 띄므로 이를 효율적으로 고려할 수 있는 제어 알고리즘이 요구되며, 이 연구에서는 감쇠기가 설치된 층의 변위 및 속도 응답만을 입력정보로 하여 MR 감쇠기의 전압을 실시간으로 제어하는 퍼지 제어기법을 제시하고자 한다.

3. 준능동 퍼지제어

그림 4와 같이 두 건물 간 j 번째 감쇠기가 부착되는 양 지점의 거리 차는 결국 감쇠기의 운동거리 $x_{d^j}(t)$가 되며, 상대 속도는 $\dot{x}_{d^j}(t)$가 된다. 따라서 이 연구에서 설계하고자 하는 퍼지 제어기는 감쇠기 양단의 변위 및 속도를 입력으로, 감쇠력을 결정하는 입력전압 $V^j(t)$를 출력으로 하는 Two Inputs - Single Output 시스템으로 구성할 수 있다.

퍼지제어기는 퍼지화(Fuzzification) 과정에서 입력 정보를 입력 소속함수를 사용하여 입력 퍼지변수(Fuzzy Variable)로 변환을 하게 된다. 입력 퍼지변수는 퍼지 규칙(Fuzzy Rule)에 따른 퍼지 추론(Fuzzy Inference) 과정을 통하여 출력 퍼지변수로 사상(Mapping)되고 비퍼지화(Defuzzification) 과정을 통해서 물리적 의미를 가지는 값, 즉 입력전압으로 출력된다.[14]

입력 퍼지변수를 정량화시켜주는 입력 소속함수(Input Membership Function)는 입력 값의 크기에 따라 5가지 퍼지변수를 사용하여 정의하였으며, 이에 상응하는 출력 퍼지변수도 역시 5개를 사용하였다. 입·출력 퍼지변수 사이의 상관관계를 구성하는 퍼지 규칙은 아래와 같이 각 변수들의



〈그림 4〉 감쇠기 연결 상세

조합을 *if-then* 조건식으로 표현할 수 있으며, 표 1의 퍼지 규칙표(Fuzzy Rule Table)로서 정리될 수 있다. 각 입력 퍼지변수를 5개로서 정의하므로 전체 퍼지규칙은 각 변수 조합에 따른 총 25개의 조건명제로서 구성된다.

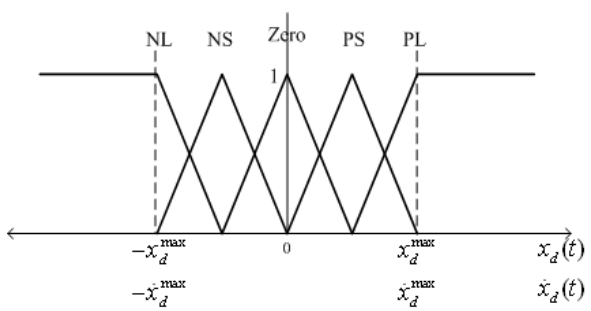
규칙 1 : If $x_{d^j}(t)$ is NL and $\dot{x}_{d^j}(t)$ is NL, then $V^j(t)$ is PVL
규칙 2 : If $x_{d^j}(t)$ is NL and $\dot{x}_{d^j}(t)$ is NS, then $V^j(t)$ is PL
⋮
규칙 24 : If $x_{d^j}(t)$ is PL and $\dot{x}_{d^j}(t)$ is PS, then $V^j(t)$ is PL
규칙 25 : If $x_{d^j}(t)$ is PL and $\dot{x}_{d^j}(t)$ is PL, then $V^j(t)$ is PVL

퍼지 변수의 언어적 표현에서 "N"과 "P"는 'Negative'와 'Positive'를 의미하며, "S"와 "L"은 크기를 나타내는 'Small'과 'Large'를 의미한다. 이들은 퍼지화 과정에서 기준 값에 대한 크기에 따라 분류되어 해당 퍼지 변수로 할당된다.

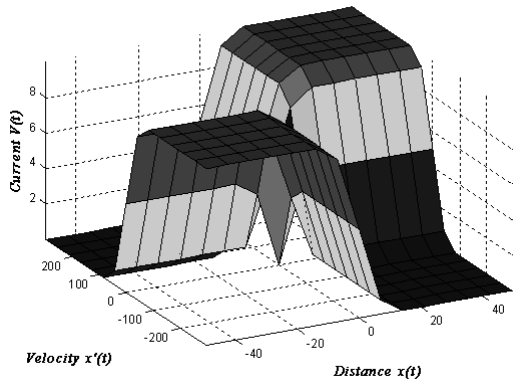
퍼지제어기의 입·출력 소속함수는 다양하게 표현될 수 있으며, 이 연구에서는 그림 5의 삼각형 형태의 소속함수를 채택한다. 여기서, NL, PL에 해당하는 최외각 소속함수는 제어 시 예상한 최대값을 초과하는 응답을 보일 경우 수치적 에러를 유발할 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 사다리꼴 함수로서 정의한다. 여기서 입력 소속함수를 정의하는 최대범위 $x_d^{\max}$에 따라 제어성능은 크게 달라지므로 이 연구에서 결정하게 되는 설계변수에 해당한다. 한편, 출력 소속함수의

〈표 2〉 퍼지 규칙표

입력 전압 $V^j(t)$		상대 변위, $x_{d^j}(t)$				
		NL	NS	ZERO	PS	PL
상대속도 $\dot{x}_{d^j}(t)$	NL	PVL	PL	PM	PS	ZERO
	NS	PL	PM	PS	ZERO	PS
	ZERO	PM	PS	ZERO	PS	PM
	PS	PS	ZERO	PS	PM	PL
	PL	ZERO	PS	PM	PL	PVL



〈그림 5〉 퍼지변수와 소속함수



〈그림 6〉 퍼지규칙의 가시화(Visualization)

범위는 MR 감쇠기의 입력 전압에 해당하므로 MR 감쇠기를 운용하는 전압 범위 0～10V를 5개의 출력 퍼지 변수로 균등 분할하여 출력 소속함수를 정의한다.

이렇게 설계된 퍼지시스템의 입·출력 관계(Input-Output Relationship)는 그림 6의 형태를 띤다. 그림에서 두 입력 퍼지변수인 변위 및 속도의 범위가 서로 동일한 영역에서는 감쇠기가 소산성(Dissipativeness)을 띠므로 입력 전압, 즉 출력 퍼지변수를 응답의 크기에 따라 비례적으로 증가시키며, 감쇠기가 소산성을 가지지 못하는, 즉 변위 및 속도의 범위가 서로 다른 영역에서는 입력 전압을 0으로 출력시키는 관계를 보인다. 일반적으로 능동제어시스템은 에너지의 소산성에 관계없이 원하는 제어력을 발휘할 수 있으므로, 응답의 크기에 따라 제어력을 증가시키고 그에 상응하는 방향으로 제어력의 부호를 결정할 수 있다. 이에 반해, 준능동 감쇠시스템은 에너지의 소산성에 따라 감쇠효과를 극대화하는 방향으로 감쇠력을 결정하여야 하므로 그림 6의 형태로 구성되는 퍼지 제어시스템이 준능동 제어시스템의 특성을 반영하는 퍼지제어시스템이라 할 수 있다.[15),(16)]

결국 준능동 퍼지제어시스템의 설계는 입·출력 소속함수 및 퍼지 규칙을 결정함으로써 이루어진다. 입·출력 소속함수의 설계는 입·출력 퍼지변수의 개수 및 범위를 결정하는 과정이며, 퍼지 규칙의 결정은 정의되는 입·출력 퍼지변수 간 관계를 규정하는 과정이다. 이 연구에서는 입·출력 퍼지변수로서 5개를 정의하였으며 이들은 정의되는 입·출력 소속함수의 범위에 따라 균등 분포되도록 정하였다. 또한, 전술한 바와 같이, MR 감쇠기의 준능동 퍼지제어는 준능동 제어장치가 가지는 에너지 소산성을 고려하여 표 2의 형태로 퍼지 규칙표를 미리 결정할 수 있으며, 퍼지 출력소속함수도 역시 MR 감쇠기의 역학적 모델에 기반하여 0~10V의 범위 내에서 5개의 균등분포되는 퍼지변수로서 기 설정될 수 있다. 최종적으로 퍼지 제어기의 설계는 입력 소속함수의 범위, 즉 $x_{\max}$의 결정으로 이루어진다. 이 연구에서 고려한 빌

〈표 3〉 입력 소속함수의 최대 범위 값

변위 최대범위 ($x_{\max}$)	속도 최대범위 ($\dot{x}_{\max}$)
7.93cm	49.26cm/s

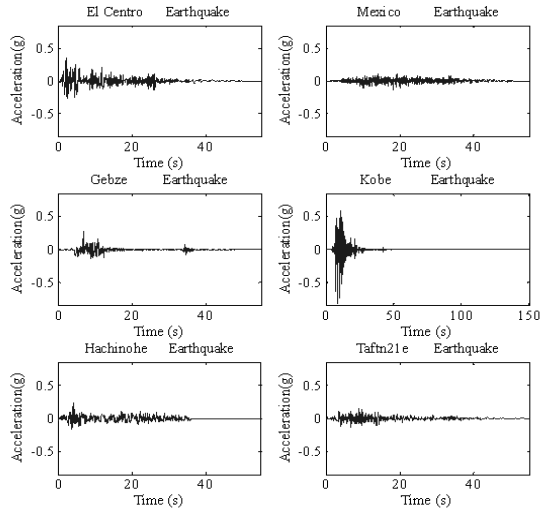
딩 구조물은 동일한 20층 구조물이며, 준능동 제어장치로 사용한 MR 감쇠기는 감쇠 용량을 고려하여 짝수 층에만 총 10개의 감쇠기를 설치하였다. 10개의 MR 감쇠기를 운용하는 퍼지제어기는 단일한 제어기로 설계하였으며, 제시하는 대상 구조물에 대하여 $x_{\max}$를 매개변수로 변화시켜가면서 반복 해석을 수행함으로써 최적의 제어성능을 발휘하는 범위를 표 3과 같이 결정하였다. 비록 제어기는 단일한 제어기를 사용하고 있으나 각 층별 상대변위 및 상대속도 값이 서로 다르므로, 감쇠력을 결정하는 입력전압도 이에 상응하여 달라진다. 여기서, 퍼지제어기는 각 층별 입력정보로부터 최적의 입력전압을 층별로 결정하며, 최종적으로 최적의 감쇠력을 발휘할 수 있도록 층별 MR 감쇠기를 조절하게 된다.

4. 수치 예제

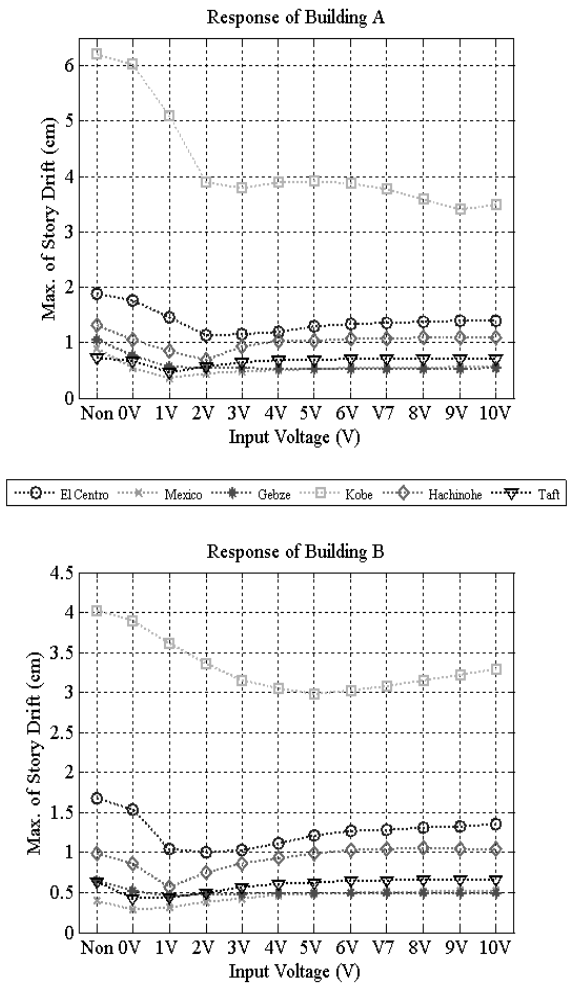
두 건물의 층 수와 층 질량은 각각 20층, 1.5×10^5kg으로 동일하게 고려하였다. 한편, 서로 다른 주파수 특성을 가지도록 건물 A의 각 층별 기둥강성은 3.7×10^8N/m, 건물 B는 1.15×10^8N/m를 적용하고 감쇠비는 두 건물 모두 2%로 가정하였다. 인접 건물의 고유치 해석을 통해 얻은 두 개의 구조물 중 건물 A의 초기 5개 모드 주파수는 0.61, 1.81, 3.01, 4.19, 5.34Hz이고, 건물 B의 초기 5개 모드 주파수는 1.07, 3.20, 5.31, 7.39, 9.42Hz이다.

이 연구에서 고려한 지진 하중으로는 1940년 El Centro 지진, 1985년 Mexico 지진, 1999년 Gebze 지진, 1995년 Kobe 지진, 1968년 Hachinohe 지진 및 1952년 Taft 지진 등 주파수 특성 및 지진 세기가 서로 상이한 6개의 실제 지진 가속도기록을 사용하였으며, 그림 7에 가속도 시간이력을 도시하였다. 각 지진 가속도의 크기 측면에서 볼 때, Mexico 지진 및 Taft 지진은 상대적으로 약진이고, Gebze 지진, Hachinohe 지진 및 El Centro 지진은 중진이며, Kobe 지진은 강진에 해당한다. 또한 주파수 특성에서 볼 때 Mexico 지진은 장주기 성분이 많이 내포된 특성을 띠므로 약진이라 할지라도 구조물에 미치는 영향은 심각할 수 있다.

이처럼 다양한 지진에 대해서 준능동 제어시스템의 제어성능을 수동 제어시스템과 비교함으로써 제시하는 준능동 퍼지제어기법의 효율성을 검증하고자 한다. 먼저 비교대상



〈그림 7〉 실제 역사지진의 가속도 시간이력곡선



〈그림 8〉 수동제어시스템의 입력전압에 따른 두 건물의 최대값 비교

이 되는 수동 제어시스템을 선택하기 위하여 MR 감쇠기의 고정 입력전압을 0~10V까지 변화시켜 지진응답해석을 수행하였다. 그림 8은 입력전압에 따른 층간 상대변위의 최대값을 두 빌딩에 대하여 각각 지진별로 도시한 결과이다. 그

림에서 “Non”으로 표기된 응답은 감쇠기를 장착하지 않은 빌딩구조물의 응답을 나타낸다. 그림 8로부터 최적 제어성능을 발휘하는 입력전압 값이 각 지진에 따라 조금씩 차이를 보임을 알 수 있으나, Kobe 지진을 제외하고는 대체적으로 1~3V 사이에서 최적 제어성능을 보이고 있다. Kobe 지진의 경우에는 빌딩 A에서는 9V에서, 빌딩 B에서는 5V에서 다소 개선된 제어성능을 발휘하고 있으나, 2V에서의 제어성능과 비교할 때 응답저감 폭이 상대적으로 크지 않으므로, 최적 수동감쇠시스템은 2V의 입력전압을 가지는 시스템으로 최종 선택하였다.

4.1 지진별 변위 응답 비교

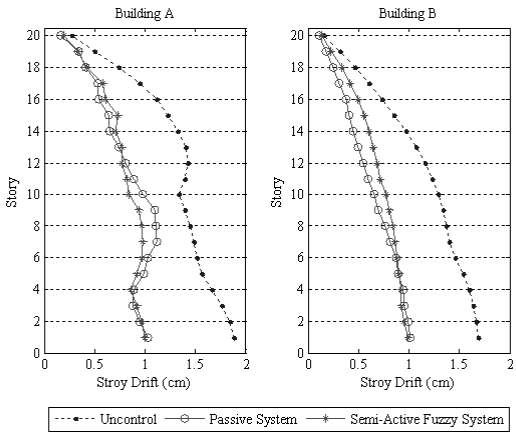
4.1.1 El Centro 지진

6개의 역사지진의 수치모사에 대한 결과 중 El Centro 지진에 대한 항목별 응답이다. El Centro 지진은 최대 절대가속도가 0.34g로 6개 역사지진에서 중간 정도의 크기이다.

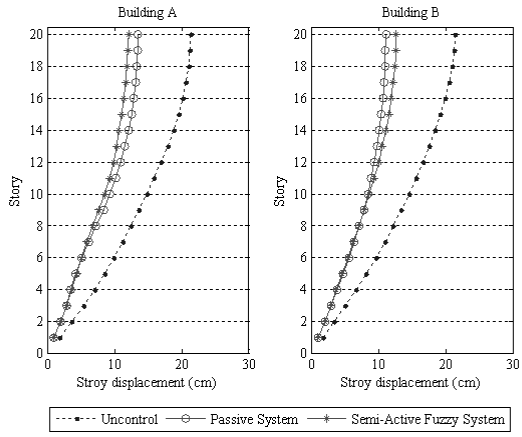
그림 9는 El Centro 지진에 대한 두 건물의 최대 층간변위를 층별로 도시한 결과를 보여준다. 각 층의 값을 비교하면, 감쇠장치를 장착하지 않은 시스템보다는 수동제어시스템과 퍼지제어시스템이 모두 상당히 개선된 제어성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다. 한편, 두 제어시스템을 상호 비교하면, 두 건물에서 서로 유사한 수준 내에서 상충하는 제어성능 또는 응답저감효과를 발휘하고 있음을 확인할 수 있다. 건물 A의 6~11층 응답에서 퍼지 준능동 제어시스템이 다소 개선된 성능을 보이는 반면, 건물 B에서는 8~18층에서 수동제어시스템이 약간 개선된 응답저감효과를 보이고 있다.

특히, 지반에 대한 층별 상대변위를 도시한 그림 10에서 이러한 경향은 더욱 뚜렷하다. 두 제어시스템 모두 하위층(1~8층)에서는 매우 비슷한 응답을 보이지만, 고층부로 갈수록 제어시스템의 성능 차는 일정한 수준을 유지하면서, 빌딩 A에서는 퍼지제어시스템이, 빌딩 B에서는 수동제어시스템이 보다 개선된 응답저감효과를 보이고 있다. 층간 변위가 가장 크게 발생하는 최하층의 응답 값을 살펴보면, 건물 A에서는 비제어시스템, 수동제어시스템 및 퍼지제어시스템이 각각 1.89cm, 1.12cm, 0.99cm를 나타내었고, 건물 B에서는 각각 1.69cm, 1.01cm, 0.99cm를 기록하였다. 따라서 감쇠기를 장착하지 않은 시스템에 대한 응답 감소율은 수동제어시스템이 각각 40.6%, 40.2%를 보이는 반면, 퍼지제어시스템은 47.2%, 41.4%를 나타내었다.

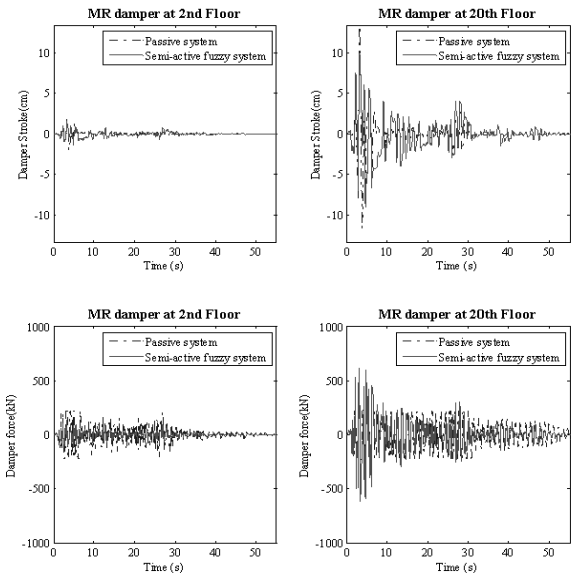
그림 11은 2층 및 20층에 설치된 MR 감쇠장치를 2V의 고정된 입력전압으로 운용하는 수동 제어시스템과 퍼지제어기에 따라 입력전압을 매 순간 변화시키는 준능동 제어시스템으로 운용하는 경우의 MR 감쇠장치의 운동거리 및 감



〈그림 9〉 El Centro 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 층간변위〉



〈그림 10〉 El Centro 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 변위



〈그림 11〉 2층 및 20층에 설치된 MR 감쇠기의 운동거리 및 감쇠력의 시간이력

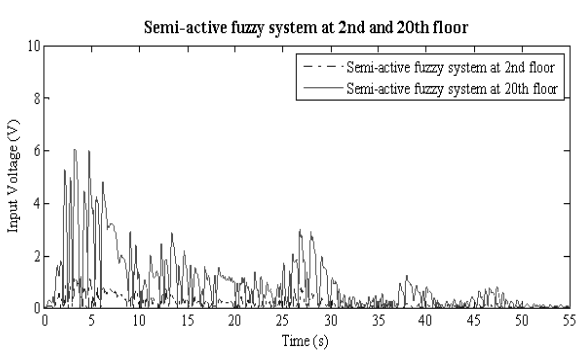
쇠력의 시간이력곡선을 도시한 결과이다.

그림 11을 보면, 저층부에서는 감쇠기의 운동거리가 고층부보다 매우 작은 범위에서 이루어지고 있으며, 이에 따른 감쇠력도 작게 발휘되고 있음을 할 수 있다. 감쇠기 운동거리의 시간이력곡선을 살펴보면, 전반적으로 퍼지제어시스템에 의한 감쇠기의 운동거리가 수동제어시스템보다 활발하게 이루어지고 있지만 최대값은 수동제어시스템이 2층에서 1.74cm와 20층에서 13.34cm, 준능동제어시스템이 2층에서 1.53cm와 20층에서 9.91cm를 필요로 한다. 따라서 준능동 퍼지제어시스템이 두 빌딩구조물 사이의 거리를 보다 효과적으로 제어하고 있음을 알 수 있다.

또한, 그에 따른 감쇠력은 저층부에서 수동제어시스템이 최대 221.2kN, 준능동제어시스템이 최대 137.7kN의 값을 보이고 있는 반면, 고층부에서는 수동제어시스템이 최대 225.5kN, 퍼지제어시스템에서 최대 618.7kN의 값을 보이고 있다.

이는 입력전압을 조절해주는 퍼지제어시스템으로 인해 MR 감쇠기의 감쇠력을 적절히 발휘하도록 제어해주고 있음을 의미한다.

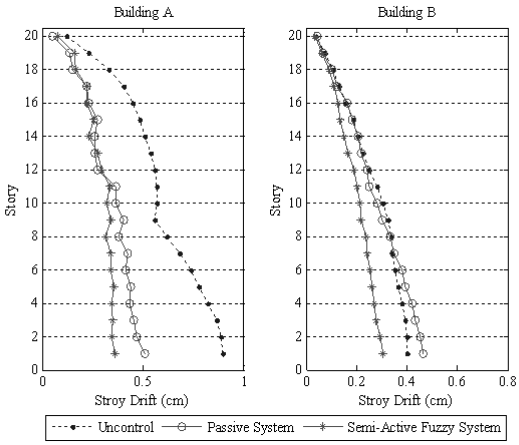
한편, 준능동 퍼지제어시스템에서 그림 11에 상응하는 입력전압의 시간이력을 그림 12에 도시하였다. 그림 11과 12를 살펴볼 때, 대략 3~5초 및 26~28초 부근에서 지진에 의한 구조물간 변위응답 또는 MR 감쇠기의 운동거리가 커짐에 따라 입력 전압의 세기도 비례하여 증가하는 결과를 관측할 수 있다. 2V를 전 시간동안 고정적으로 입력해준 수동제어 시스템에서는 전체 전력량이 121,020kW, 순간 최대 전력량이 20,631W이였으며, 준능동제어시스템에서는 전체 전력량이 126,830kW, 순간 최대 전력량이 25,356W으로서 수동 제어시스템보다는 다소 높은 전력 소모량을 보였다. 이는 퍼지제어시스템이 실시간으로 입력전압을 조절하는 과정에서 지진입력가속도가 증가하는 시간대역 부근(그림 12 참조)에서 제어성능을 순간적으로 증가시키기 위하여 수동제어시스템보다는 훨씬 높은 입력전압을 발생시키기 때문이다. 하지만, 그림 12에서 알 수 있듯이, 2층에 설치된 감쇠기의 경우에는 수동제어시스템이 고정적으로 2V의 입력전압을 지속적으로 공급하는데 반해, 준능동 제어시스템은 2V보다 훨씬 작은 입력전압만으로 MR 감쇠기를 조절하고 있음을 관측할 수 있다. 그림 9와 10에서의 두 제어시스템의 성능결과를 고려할 때, 저층부에서는 수동제어시스템이 불필요하게 과도한 입력전압을 사용하고 있는데 반해, 준능동 시스템은 보다 효율적으로 전압을 사용한다는 사실을 알 수 있다.



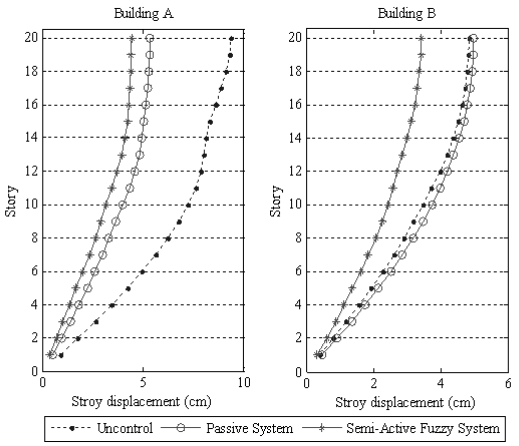
〈그림 12〉 2층 및 20층에 설치된 MR 감쇠기의 입력전압 시간이력

4.1.2 Mexico 지진

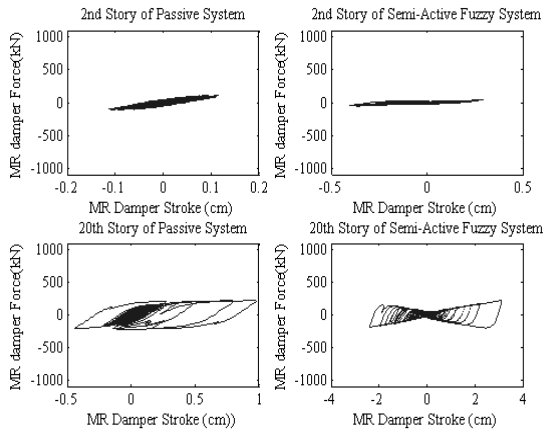
그림 13과 그림 14는 최대 지진가속도는 크지 않은 약진이면서 장주기 성분을 많이 내포한 Mexico 지진에서의 층별 층간변위와 층별 변위 응답을 도시한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 인접한 두 건물의 응답이 수동제어에서는 이득과 손해가 뚜렷하다. 건물 A에서 수동제어시스템에 의하여 변위응답이 제어장치를 장착하지 않은 원 시스템에 비해 큰 폭으로 줄어든 반면, 건물 B에서는 오히려 원 시스템



〈그림 13〉 Mexico 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 층간변위



〈그림 14〉 Mexico 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 변위



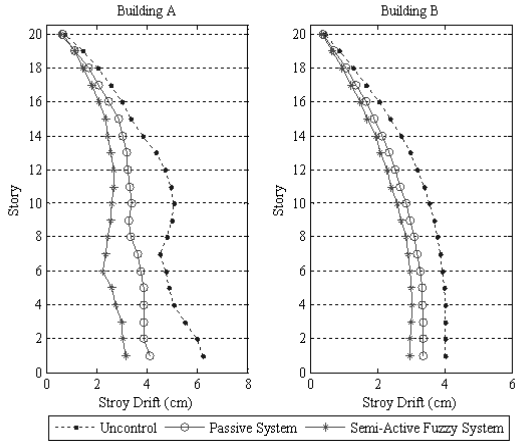
〈그림 15〉 2층 및 20층에 설치된 MR 감쇠기의 이력거동

에서 발생하는 최대 층간변위 및 변위보다 미소하게나마 증폭된 결과를 보인다. 이에 반해, 제시하는 준능동 퍼지제어시스템은 두 건물에서 모두 우수한 응답저감효과를 보임으로써 그 효율성을 확인할 수 있다. MR 감쇠기를 장착하지 않은 원 구조물의 응답에 비해, 수동 MR 감쇠시스템은 건물 A에서 층간변위를 최대 43.3%, 층 변위를 최대 42.9% 줄인 반면, 건물 B에서는 층간변위를 최대 16.5%, 층 변위를 최대 2.4% 증가시키는 결과를 보인다. 이에 반해, 준능동 퍼지제어시스템은 건물 A의 층간변위를 최대 60%, 층 변위를 최대 53% 줄이면서도 건물 B의 층간 변위를 최대 23%, 층 변위를 최대 30% 감소시키는 결과를 보인다.

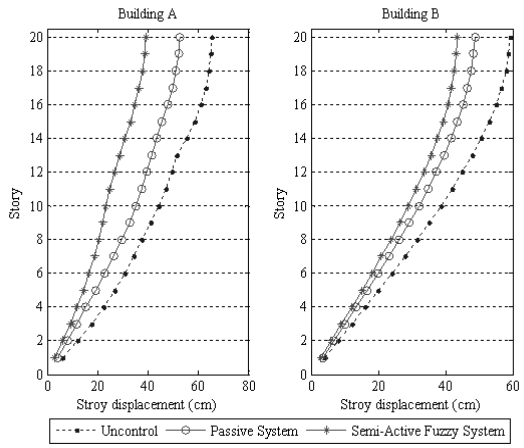
그림 15는 2층 및 20층에 설치된 MR 감쇠기의 이력곡선(Hysteresis Loop)을 수동제어시스템과 준능동 퍼지제어시스템에 대하여 각각 도시한 결과이다. 2층과 20층 모두에서 수동제어시스템의 감쇠력이 퍼지 제어시스템보다 다소 크게 작용하고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 큰 감쇠력을 발휘하고도 그림 13, 14에서의 응답에의 제진성능은 퍼지제어시스템보다 좋지 않은 결과를 보이며, 이로부터 퍼지제어시스템이 MR 감쇠기의 전압을 효율적으로 조절함으로써 해당 층의 변위를 감소시킬 수 있는 최적의 감쇠력을 발휘하도록 제어하고 있음을 확인할 수 있다.

4.1.3 Kobe 지진

이 연구에서 사용한 입력 지반운동 중에서 가장 강한 지진으로 분류되는 Kobe 지진(PGA=8.2)의 해석결과이다. 그림 16은 Kobe 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 층간 변위응답이며, 그림 17은 층별 최대 변위응답을 보여준다. 두 그림들에서 알 수 있듯이, 건물 A와 B 모두에서 퍼지제어시스템이 수동형 제어시스템보다 매우 뛰어난 제어성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 준능동 퍼지제어시스



〈그림 16〉 Kobe 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 층간변위

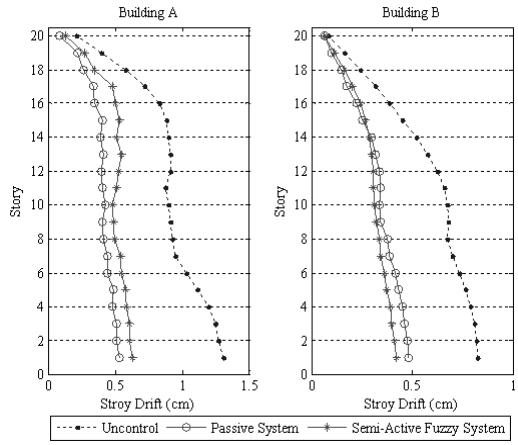


〈그림 17〉 Kobe 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 변위

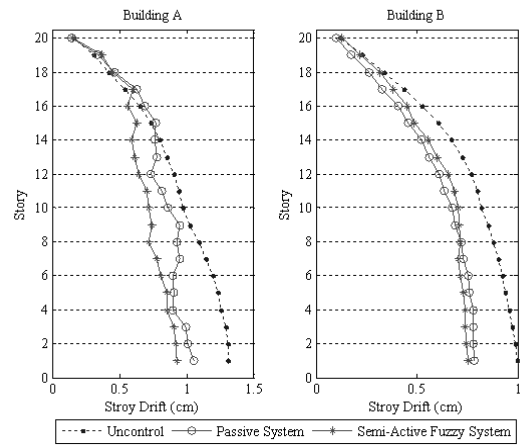
템은 빌딩 A의 최대 층간 변위응답에서 1~10층에서 수동제어시스템보다 뚜렷이 개선된 제어성능을 보임으로써, 그림 17의 층별 최대변위응답에서도 10층 이상의 고층부에서 수동제어시스템과 비교하더라도 상당히 개선된 변위제어성능을 보인다. 앞서의 El Centro 지진 및 Mexico 지진과 Kobe 지진에 대한 결과를 종합하여 판단할 때, 제시하는 준능동 퍼지제어시스템이 다양한 주파수 및 지진세기에 대하여 고정된 입력전압에 의하여 감쇠력을 발휘하는 수동형 제어시스템보다는 매우 높은 적응성을 보장할 수 있다는 점을 확인할 수 있다.

4.1.4 Gebze, Hachinohe, Taft 지진

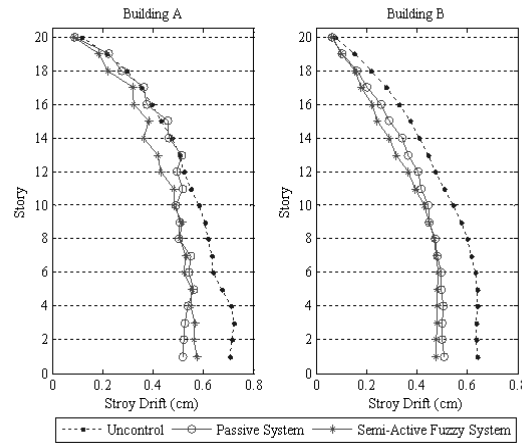
지금까지 지진세기 및 주파수 특성에 있어서 크게 차이를 보이는 3개의 역사지진에 대한 제어성능 결과를 통하여 제시하는 준능동 퍼지제어시스템의 효율성을 살펴보았다. 이들 외에도 Gebze 지진, Hachinohe 지진 및 Taft 지진 등 3개의 다른 특성을 가지는 역사지진에 대해서도 응답저감효



〈그림 18〉 Gebze 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 층간변위



〈그림 19〉 Hachinohe 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 층간변위



〈그림 20〉 Taft 지진에 대한 두 건물의 층별 최대 층간변위

과를 그림 18~20에 도시하였다.

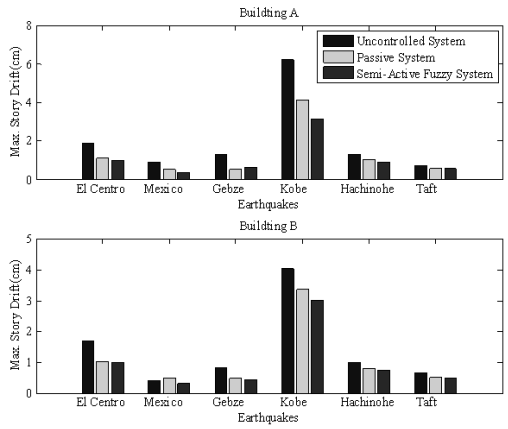
그림 18에서 Gebze 지진에 대한 응답결과를 보면, 빌딩 B에서는 준능동 제어시스템이 수동 제어시스템보다 개선된 제어성능을 보이는 반면, 빌딩 A에서는 수동제어시스템이 준능동 제어시스템보다 개선된 제어성능을 보임으로써 서로 상충하는 제어성능을 발휘하고 있다.

한편, Hachinohe 지진 및 Taft 지진에 대한 결과인 그림 19와 20을 살펴보면, 수동제어시스템이 제어장치를 장착하지 않은 원 구조물의 응답을 기준으로 빌딩 B에서는 저감된 효과를 보이는 반면, 빌딩 A에서는 몇몇 층들에서는 다소 응답들이 증폭되는 결과를 보임으로써 다양한 지진에 대한 적응성을 전혀 보이지 못하고 있음을 다시 한 번 확인할 수 있다. 한편, 준능동 제어시스템은 이들 모든 지진들에 대하여 일정 수준의 제어성능을 두 빌딩 모두에서 보임으로써 매우 우수한 적응성을 보인다.

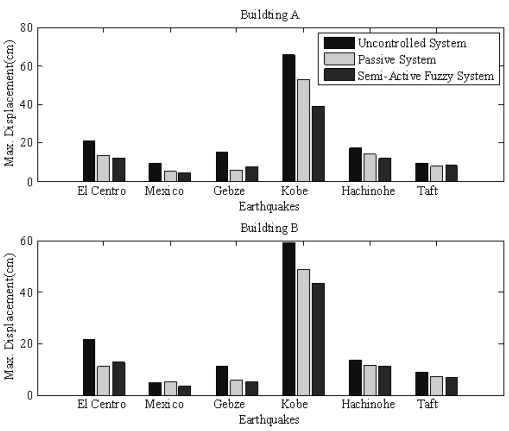
4.2 최대 변위 및 바닥전단력과 전도모멘트 응답 비교

4.2.1 지진별 최대 변위

6개 역사지진에 대한 최대 층간변위 및 최대 변위 응답 결과를 그림 21 및 그림 22에 나타내었다. 각 응답 결과들은 제어장치를 장착하지 않은 원 구조시스템, 수동 MR 감쇠시스템 및 준능동 퍼지제어기에 의하여 운용되는 준능동 MR 감쇠기시스템 순이다. 최대 응답이 발생하는 Kobe 강진에 의한 결과에서 수동 감쇠시스템이 비제어시스템에 비



〈그림 21〉 지진별 최대 층간변위



〈그림 22〉 지진별 최대 변위

해 일정 수준의 응답감소효과를 성공적으로 발휘하고 있으나, 제시하는 준능동 퍼지제어시스템이 실시간으로 감쇠력을 조절함으로써 제어성능을 더욱 개선시키고 있다. 한편, Mexico 지진에서 수동형 제어시스템이 빌딩 B의 응답을 비제어시스템보다 다소 증가시킴으로써 적응성을 확보하지 못하는 결과를 보이는 반면, 제시하는 퍼지제어시스템은 몇몇 응답들에서는 수동 제어시스템보다는 미소하게나마 큰 값을 보이지만 전반적으로 비제어시스템보다는 뚜렷한 응답저감효과를 보임으로써 불확실한 지진하중에 대해서 뛰어난 적응성을 보장해주고 있음을 입증하고 있다.

표 4는 각 지진별 두 빌딩 사이의 최대 인접거리, 즉 감쇠기의 최대 스트로크 결과를 나타낸다. Mexico, Gebze 및 Taft 지진에 대해서는 준능동 제어시스템이 보다 높은 값을 보이고 있으나, 나머지 지진들에서는 수동 제어시스템이 보다 높은 스트로크 결과를 보임으로써 지진별 두 제어시스템의 제어특성이 상이함을 확인할 수 있다. 특히, 최대 응답값을 보이는 Kobe 지진에 대해서는 준능동 제어시스템이 수동시스템의 최대 빌딩간 인접거리를 약 50% 수준의 저감율을 보임으로써 인접빌딩의 충돌에 대하여 훨씬 높은 안전율을 확보하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2.2 지진별 최대바닥전단력과 최대전도모멘트

지반운동이 가해졌을 경우 구조물은 전단파괴로 인하여 붕괴되거나 전도될 수 있는 위험이 있다. 따라서 발생하는 최대바닥전단력(Maximum Base Shear Force)과 최대전도모멘트(Maximum Overturning Moment) 응답에 대한 준능동 MR제어시스템의 성능을 살펴볼 필요가 있으며, 앞서의 6가지 역사지진에 대한 수치해석 결과를 표 5에 정리하였다. 표 5에서의 각 값들은 MR 감쇠기를 장착하지 않은 두 빌딩의 바닥 전단력과 전도모멘트에 대한 감소율을 의미한다. 따라서 감소율이 클수록 보다 높은 응답감소율, 즉 뛰어난 제어성능을 나타낸다.

Gebze 지진 시 빌딩 A에 대해서는 수동 제어시스템이 준능동 퍼지 제어시스템보다 개선된 제진성능을 보이지만, 그 외의 대부분의 경우에서 있어서는 전반적으로 준능동 MR제어 시스템이 수동 제어시스템보다 향상된 제진성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 특히, 수동제어의 경우에는 Mexico지진에 대해서 오히려 응답이 비제어시보다 증가하여 더 위험해지는 것으로 나타났다.

〈표 4〉 지진별 두 빌딩간 최대 인접거리

지진가속도	수동 MR 시스템 적용시	준능동 퍼지 MR 시스템 적용시
El Centro	13.34cm	9.96cm
Mexico	0.98cm	3.11cm
Gebze	2.03cm	4.88cm
Kobe	78.18cm	40.27cm
Hachinohe	9.73cm	7.81cm
Taft	2.64cm	4.72cm

〈표 5〉 지진별 최대 바닥전단력 및 전도모멘트의 감소율

제어시스템		수동 MR 시스템 적용시		준능동 퍼지 MR 시스템 적용시	
감소율(%) / 지진		바닥 전단력	전도 모멘트	바닥 전단력	전도 모멘트
El Centro	빌딩 A	45.4	37.0	47.1	43.3
	빌딩 B	39.7	48.3	40.9	47.5
Mexico	빌딩 A	53.2	43.0	59.8	52.8
	빌딩 B	1.9	-0.3	23.4	32.0
Gebze	빌딩 A	48.6	41.8	39.6	29.0
	빌딩 B	26.0	31.0	35.5	39.1
Kobe	빌딩 A	37.8	19.4	49.2	40.1
	빌딩 B	16.7	15.8	26.4	24.7
Hachinohe	빌딩 A	54.5	35.6	49.7	50.3
	빌딩 B	24.7	30.1	28.5	30.4
Taft	빌딩 A	27.4	11.2	57.8	40.3
	빌딩 B	20.5	20.3	23.5	24.3

5. 결 론

도시의 밀집지역에서 지진이 일어나게 되면, 독립된 두 건물이 서로 가깝거나 하나의 건물이 여러 목적을 위해 두 개의 건물로 분리된 경우 충돌 가능성이 높아진다. 따라서 인접건물 사이에 감쇠기 형태의 에너지 소산장치를 설치하여 연결함으로써 지진 응답을 줄이고 내진 성능을 향상시킬 수 있는 방법에 관한 연구를 수행하였다.

인접건물의 진동 제어방법으로는 준능동 제어장치인 MR 감쇠기를 고려하였으며, 감쇠기의 입력전압을 실시간으로 제어할 수 있는 기법으로 준능동 퍼지제어 방법을 제시하였

다. 제시한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 다양한 주파수 성분 및 지진세기를 갖는 여러 가지 역사적인 지진들에 대하여 수치모사를 수행하고 그 결과를 수동 MR 감쇠기시스템과 비교 분석하였다.

수치모사 결과, 준능동 퍼지제어 방법은 구조물의 응답에 따라 실시간으로 MR 감쇠기가 제공하는 제어력을 효과적으로 조절하고 있음을 알 수 있었다. 감쇠기에 2V를 고정으로 입력한 수동제어방법과 비교 분석한 결과, 6개 역사지진과 같이 다양한 주파수 특성을 가지고 있는 입력 지반운동에 대하여, 대부분의 경우 제시한 준능동 퍼지제어 방법이 인접건물의 진동제어에 뛰어난 지진응답 감소효과와 적응성을 보였다. 따라서 인접한 구조물 간의 진동제어를 위하여 MR 감쇠기를 연결하는 경우에 있어서 퍼지제어 방법은 다양한 입력 지진에 대하여 우수한 제진성능을 확보할 수 있는 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Christenson, R.E., Spencer, Jr. B.F. and Johnson, E.A., "Coupled building control using active and smart damping strategies," *Proceedings of the 5th International Conference on Application of Artificial Intelligence to Civil and Structural Engineering,* Oxford, England, September 1999.
2. Ni, Y.Q., Ko, J.M. and Ying, Z.G., "Random seismic response analysis of adjacent buildings coupled with non-linear hysteretic dampers," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 246, No. 3, 403-417, 2001.
3. Bhaskararao, A.V. and Jangid, R.S., "Harmonic response of adjacent structures connected with a friction damper," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 292, 710-725, 2006.
4. 옥승용, 박관순, 고현무, "인접구조물의 진동제어를 위한 선형 감쇠시스템의 최적설계," 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제 3호, 85-100, 2006.
5. 옥승용, 김동석, 박관순, 고현무, "선형 점성 감쇠기가 장착된 인접구조물의 진동제어를 위한 유전자 알고리즘 기반 최적설계," 한국지진공학회 논문집, 제 11권, 제 1호, 11-21, 2007.
6. Basili, M. and De Angelis, M., "A reduced order model for optimal design of 2-mdof adjacent structures connected by hysteretic dampers," *Journal of Sound and Vibration 306*, 297–317, 2007.
7. 성은희, "인접 구조물간의 진동제어를 위한 복합제어시스템의 최적설계," 석사학위, 동국대학교, 2008.
8. Spencer, Jr. B.F., Carlson, J.D., Sain, M.K., and Yang, G., "On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures," *Proceedings of 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM, 458-462, 1997.
9. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "MR Damper가 장착된 교량 구조물의 준능동 퍼지제어," 대한토목학회 논문집, 제22권, 제 4-A호, 847-857, 2002.
10. Chopra, A.K., *Dynamics of structures - theory and applications to earthquake engineering,* 2nd ed, Prentice-Hall, New Jersey, 876, 2001.
11. Jansen, L.M. and Dyke, S.J., "Semiactive control strategies for MR dampers: comparative study," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 8, 795-803, 2000.
12. Dyke, S.J., Yi, F. and Carlson, J.D., "Application of magnetorheological dampers to seismically excited structures," *Proc. International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, Fla., 1999.
13. Yoshida, O. and Dyke, S.J., "Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 130, No. 4, 386-392, 2004.
14. Passino KM, Yurkovich S., *Fuzzy control*, Reading/New York: Addison-29, Wesley / Longman, 475, 1998.
15. 옥승용, "가변오리피스 감쇠기를 사용한 교량의 반능동적 진동제어에 관한 연구," 석사학위논문, 서울대학교, 11, 1999.
16. Symans, M.D., and Kelly, S.W., "Fuzzy logic control of bridge structures using intelligent semi-active seismic isolation systems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, No. 1, 37-60, 1999.