

인접건축물의 진동제어를 위한 MR감쇠기의 적용

Application of MR damper for Vibration Control of Adjacent Buildings

김기철*
Kim, Gee-Cheol

강주원**
Kang, Joo-Won

Abstract

In recently, sky-bridge are often applied to high-rised adjacent buildings for pedestrian bridge. the seismic response control of adjacent buildings have been studied and magneto-rheological(MR) fluid dampers have been applied to seismic response control. In this study, vibration control effect of the MR damper connected adjacent buildings has been investigated. Adjacent building structures with different natural frequencies were used as example structures. Two typed of control methods, displacement based or velocity based, are applied to determinate control force of MR damper. In this numerical analysis, it has been shown that displacement-based control algorithm is more effective than velocity-based control algorithm for seismic response control of adjacent buildings. And, when displacement-based control method is applied to control of adjacent buildings, the control of building occurred large displacement is more efficient in reducing the seismic response.

Keywords : Sky bridge, Adjacent buildings, MR damper, Seismic response control, Natural frequency

1. 서론

초고층 건축물은 도심의 랜드마크적인 요구와 제한된 토지의 이용의 극대화를 위하여 많이 요구되고 있으며 이러한 사회적 및 경제적 욕구를 충족시키기 위하여 초고층 건축물의 건설이 증가되고 있는 추세이다. 초고층 건축물의 건설은 구조물의 설계기술과 건설기술의 발전 그리고 성능이 뛰어난 건설자재의 개발로 인하여 가능해졌다. 그러나 이러한 초고층 건축물은 강성이 유연하고 감쇠가 작아서 지진과 바람에 의하여 진동응답이 비교적 크게 발생하여 사용자에게 불안감을 조성하는 한편 건축물의 사용성에 많은 문제를 유발시키기도 한다. 그

리고 인동간격이 좁은 도심지 초고층 건축물에 있어서 지진하중이나 풍하중에 의한 초고층 건축물의 과도한 움직임은 인접한 초고층 건축물간의 충돌(pounding)로 인하여 구조적 손상을 일으킬 수도 있다.⁽¹⁾

서로 다른 동적특성을 가지고 있는 인접한 초고층 건축물들은 상반작용(out of phase)으로 인하여 충돌 가능성이 매우 높다. 따라서 이러한 충돌 피해를 미연에 방지하기 위하여 건축물간의 인동간격을 넓히고 있으나 이는 한계가 있으며 인접한 초고층 건축물의 진동제어를 위하여 부가적인 진동제어 장치를 도입하기도 한다. 특히, 두 건축물 사이에 피난통로 및 연결통로로 활용하고 있는 연결교를 설치할 경우에 연결교를 감쇠장치로 활용하기도 한다.

인접건축물의 진동제어에 대한 연구는 최근에 많은 연구자들에 의하여 수행되고 있다. Shinya 등은 나란히 있는 두 건축물의 지진응답 저감을 위한 MR 감쇠기의 적용성을 수치해석 및 실험적으로 을 연

* 정희원, 서일대학교, 건축과 부교수, 공학박사
Seoil University, Dept. of Architecture Eng. Associate Professor

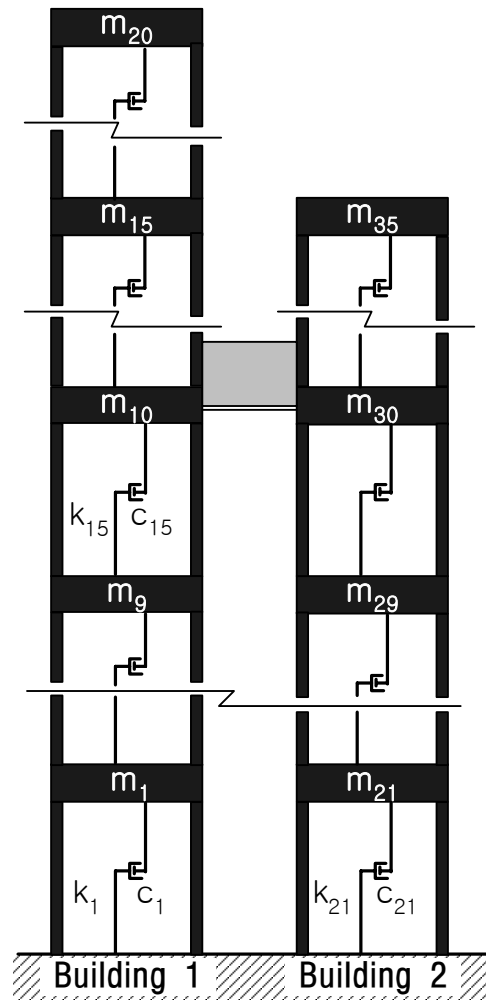
** 교신저자. 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
Yengnam University, School of Architecture Professor
Tel: 053-810-2429 Fax: 053-810-4625
E-mail : kangj@ynu.ac.kr

구하였으며 GA알고리즘의 효과를 입증하였다.⁽¹⁾ 옥승용 등은 인접한 두 건물의 진동제어를 위한 선형 점성감쇠기의 최적 용량 및 분포를 결정하기 위하여 유전자알고리즘을 이용하였다.⁽²⁾ 김현수 등은 인접한 건축물의 진동응답이 저감을 위하여 스카이브리짓을 이용하였다.⁽³⁾⁽⁴⁾ 이처럼 많은 연구자에 의하여 인접 건축물의 진동제어에 대한 연구가 수행되고 있으나 진동제어 장치의 설치 위치 선정에 대한 연구는 미비한 실정이며, 특히 MR 감쇠기와 같은 준능동 감쇠기의 최적 위치 선정에 대한 연구는 전무한 실정이다.⁽⁵⁾ 본 논문에서는 인접 건축물의 진동제어를 위한 준능동 제어장치로 MR 감쇠기를 적용하고 MR 감쇠기의 설치위치에 따른 인접 건축물들의 진동응답을 비교분석하여 진동제어 효과를 알아보고자 한다. 이를 위하여 다른 강성과 질량을 갖는 인접한 건축 구조물을 예제구조물로 사용하였고 시간이력해석을 통하여 얻은 각 구조물의 변위 및 가속도 응답을 분석하였다.

2. 예제 구조물 및 지진하중

2.1 예제 구조물

초고층 건축물이 인접하여 있는 경우에 지진하중 또는 풍하중과 같은 동적하중에 의한 층돌이 일어날 가능성이 매우 크다. 본 논문에서는 MR 감쇠기의 제어방법에 따른 인접한 건축물의 진동제어 성능을 알아보기 위한 것으로 예제 인접 건축물은 <Fig. 1>과 같이 높이 20층 건축물과 15층 건축물로 선정하였다. 연결교는 두 건축물의 15층에 설치하는 것으로 하였다.



<Fig. 1> Example structure

예제 인접건축물의 집중질량과 강성은 <Table 1>과 같이 층별로 다소 차이가 나도록 하였다. 오른쪽 건축물(Building 2)의 층별 질량과 강성은 왼쪽 건축물(Building 1)의 층별 질량과 강성보다 약간 작게 하였으며 인접한 두 건축물의 강성은 같게 하였다. 감쇠는 2%의 모드별 감쇠를 고려하였다. 인접한 두 건축물의 질량 및 강성 그리고 층 수 차이로 인하여 두 인접 건축물의 고유진동모드와 고유진동수가 다르게 나타날 것이다.

<Table 1> Mass and stiffness of example structure

	Building 1	Building 2
Mass ($\times 10^5$ kg)	m_1~m_20 ≒ 9.89	m_21~m_35 ≒ 9.46
Stiffness ($\times 10^9$ N/m)	k_1~k_20 ≒ 6.61	k_21~k_35 ≒ 3.43

MR 감쇠기의 특성을 반영한 다양한 모델들이 수치해석에 적용되고 있으나 본 논문에서는 단순 Bouc-Wen 모델을 사용하였다. 식 (1)은 단순 Bouc-Wen 모델에 대한 것으로 MR감쇠기의 이력 특성을 모델링할 수 있다.

$$F_{MR} = \alpha z + c\dot{x} + kx + f_0 \quad (1)$$

여기서 k 는 축압기의 강성이고, c 는 점성, f_0 는 초기마찰력이다. z 는 이력특성을 모사하기 위한 무차원 변수이고, α 는 MR의 대한 영향의 크기를 조정하는 상수이다.⁽⁶⁾

MR감쇠기의 제어력을 조절하는 제어기법은 식 (2)와 같이 변위기반의 제어기법 그리고 식 (3)과 같은 속도기반의 제어기법을 적용하여 제어하도록 하였다.

$$d_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) \leq 0 \rightarrow V_{con} = V_{max} \quad (2-1)$$

$$d_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) > 0 \rightarrow V_{con} = V_{min} \quad (2-2)$$

$$v_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) \leq 0 \rightarrow V_{con} = V_{max} \quad (3-1)$$

$$v_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) > 0 \rightarrow V_{con} = V_{min} \quad (3-2)$$

예제 구조물과 같이 연결교의 위치에 따라서 MR 감쇠기가 위치하게 된다. 본 예제 구조물에서는 연결교가 10층에 위치하도록 하였다. 따라서 식 (2)와 식 (3)의 C_{con} 은 10층에서의 변위와 속도를 이용하여 감쇠력을 제어하게 된다.

고유치해석에 의한 예제 인접 건축물의 고유진동

수는 다음 <Table 2>와 같다. 인접한 두 건축물의 질량과 강성이 차이로 인하여 고유진동수가 차이나는 것을 확인할 수 있으며 B1의 고유진동수가 B2의 고유진동수보다 약간 크게 나타나고 있다.

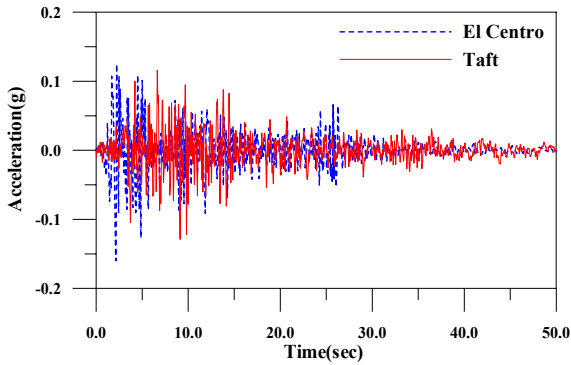
<Table 2> Natural frequencies of example structure

Modes	B1(Building 1)	B2(Building 2)
1차모드(Hz)	0.99	0.97
2차모드(Hz)	2.97	2.89
3차모드(Hz)	4.93	4.80
4차모드(Hz)	6.88	6.62

인접한 두 건축물은 고유진동주기 및 진동모드와 같은 동적특성이 다르기 때문에 지진응답과 같은 진동응답에 차이가 나게 된다. 따라서 인접한 두 건축물의 진동응답을 제어하기 위하여 두 건축물 사이를 연결하는 연결교를 감쇠장치로 사용하기도 한다.^{(4),(5),(6)}

2.2 지진하중

MR감쇠기로 연결된 인접한 건축물의 진동제어 성능을 평가하기 위하여 지진하중에 의한 동적해석을 수행하였다. 입력 지진하중은 El Centro지진과 Taft지진을 사용하였고 두 개의 지진하중을 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 맞추어 조정하였다. 설계응답스펙트럼은 지역계수는 0.12, 지반종류는 S_A 로 가정하여 작성되었다. 지진하중의 가속도 시간이력을 <Fig. 2>에 나타내었다.



<Fig. 2> Artificial earthquake

3. 예제 구조물의 지진응답

인접한 두 건축물의 지진응답을 제어를 위하여 MR감쇠기의 설치 이전 두 건축물의 지진응답 분석이 선행되어야 할 것이다.

<Table 3> Peak displacement and peak acceleration(w/o MR damper)

Floor	peak Disp.(m)		paek Acc.(m/sec ²)	
	Building 1	Building 2	Building 1	Building 2
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0093	0.0109	1.9098	1.6066
3	0.0182	0.0214	2.9879	2.1181
4	0.0271	0.0319	3.7256	2.4167
5	0.0360	0.0425	4.2166	2.6738
6	0.0449	0.0528	4.3026	3.0011
7	0.0535	0.0629	4.7478	3.5131
8	0.0613	0.0721	4.4742	3.9346
9	0.0686	0.0809	4.3886	4.1226
10	0.0753	0.0890	4.4108	4.1187
11	0.0815	0.0962	4.5847	4.3921
12	0.0872	0.1023	5.3947	4.8357
13	0.0926	0.1074	6.3247	5.2134
14	0.0977	0.1114	6.7347	5.6098
15	0.1025	0.1141	7.2304	5.9188
16	0.1070	0.1155	7.3185	6.1002
17	0.1110		6.7931	
18	0.1148		5.8488	
19	0.1176		5.8411	
20	0.1196		6.5250	
roof	0.1206		6.8546	

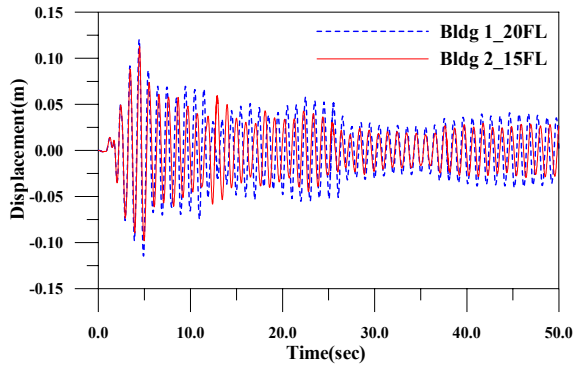
<Table 4> RMS response of displacement and acceleration(w/o MR damper)

Floor	rms Disp.(m)		rms Acc.(m/sec ²)	
	Building 1	Building 2	Building 1	Building 2
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0027	0.0033	0.4147	0.1913
3	0.0053	0.0065	0.7477	0.3520
4	0.0078	0.0096	0.9733	0.4833
5	0.0104	0.0127	1.0854	0.5905
6	0.0129	0.0156	1.0992	0.6819
7	0.0153	0.0184	1.0500	0.7671
8	0.0175	0.0209	0.9945	0.8465
9	0.0197	0.0233	0.9885	0.9227
10	0.0219	0.0255	1.0698	0.9937
11	0.0239	0.0273	1.2090	1.0568
12	0.0257	0.0289	1.3446	1.1113
13	0.0273	0.0302	1.4347	1.1607
14	0.0289	0.0312	1.4611	1.2064
15	0.0302	0.0318	1.4339	1.2466
16	0.0313	0.0322	1.3854	1.2728
17	0.0323		1.3588	
18	0.0332		1.3990	
19	0.0338		1.5059	
20	0.0342		1.6391	
roof	0.0344		1.7312	

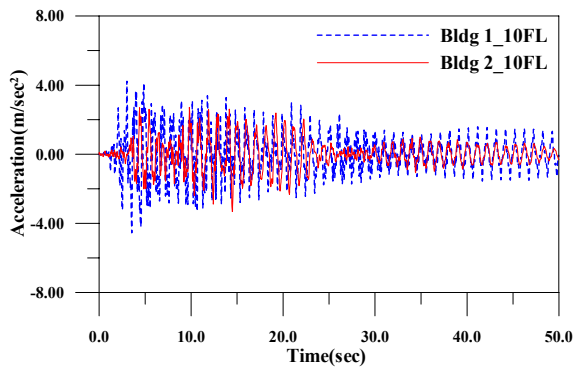
<Table 3>과 <Table 4>는 MR 감쇠기를 설치하지 않은 경우의 El-Centro 지진하중에 의한 예제 인접 건축물의 최대 지진응답과 rms 지진응답이다.

변위응답의 경우에 최상층에서 가장 크게 나타나고 있다. 그리고 가속도응답의 경우에 변위응답이 크게 나타나는 최상층에서 크게 나타나고 있지만 B1의 경우에 중간층(16층)에서 가장 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

같은 층에서 B1의 변위응답보다 B2의 변위응답이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 반대로 가속도응답의 경우에 같은 층에서 B2의 가속도응답보다 B1의 가속도응답이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 고유치해석에서 알 수 있듯이 B1의 강성이 B2의 강성보다 더 크기 때문이다.



(a) Displacement at top floor



(a) Acceleration at middle floor

<Fig. 3> Seismic response

El Centro지진하중에 의한 예제 인접 건축물의 최상층 변위응답과 중간층 가속도응답에 대한 시간 이력 그래프를 <Fig. 3>에 나타내었다. 변위응답의 경우에 최상층에서 가장 크게 나타나기 때문에 B1의 최상층(roof)과 B2의 최상층에서의 변위응답을 분석하였다. 그리고 가속도 응답의 경우에 최상층과 중간층에서 크게 나타나기 때문에 B1의 10층과 B2의 10층에서의 가속도 응답을 분석하였다.

B1과 B2의 변위응답 형상은 유사하게 나타나고 있으나 B1의 층수가 B2의 층수보다 더 높기 때문에 변위응답의 경우에 층수가 더 높은 B1이 B2보다 크게 나타나고 있다. 가속도응답의 경우에 전체적으로 B1의 가속도응답이 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

4. MR 감쇠기 제어 기법에 따른 지진 응답 제어

4.1 MR감쇠기 설치 위치

MR 감쇠기의 설치 위치는 예제 인접 건축물의 진동모드와 지진응답 분석을 통하여 선정하는 것이 바람직하다. 그러나 본 연구에서는 연결교가 위치한 10층에 MR 감쇠기가 설치되는 것으로 하며 이에 따른 지진응답 제어효과를 분석하고자 한다.

4.2 변위기반 제어

수치해석적으로 접근하기 위하여 인접한 두 건축물 사이의 제어가 가능한 이상적인 모델의 MR 감쇠기를 설치하였다. 인접한 두 건축물의 지진응답을 제어하기 위해서 식 (4)와 같이 변위기반의 제어 알고리즘을 적용하여 MR 감쇠기의 제어력을 결정하였다.

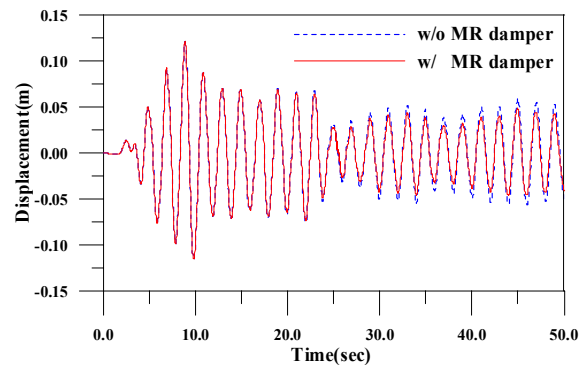
$$d_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) \leq 0 \rightarrow V_{con} = V_{max} \quad (4-1)$$

$$d_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) > 0 \rightarrow V_{con} = V_{min} \quad (4-2)$$

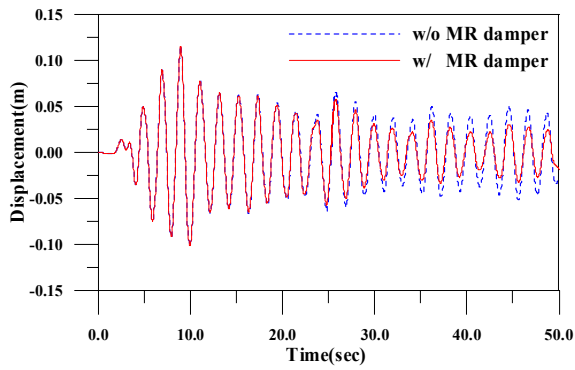
$$d_{B2}(v_{B2} - v_{B1}) \geq 0 \rightarrow V_{con} = V_{max} \quad (5-1)$$

$$d_{B2}(v_{B2} - v_{B1}) < 0 \rightarrow V_{con} = V_{min} \quad (5-2)$$

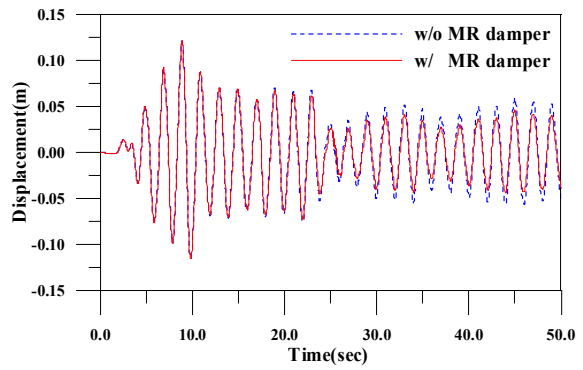
여기서 d_{B1} 과 d_{B2} 은 각각 연결교가 위치한 B1과 B2의 10층 변위응답을 의미하며 v_{B1} 과 v_{B2} 는 각각 B1과 B2의 10층 속도응답을 의미한다. 그리고 c_{con} 은 MR 감쇠기의 제어력에 대한 감쇠를 의미한다.



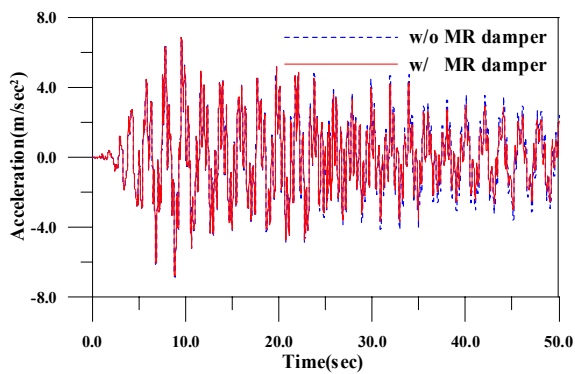
(a) Displacement at 20th floor of B1
(B1 based control)



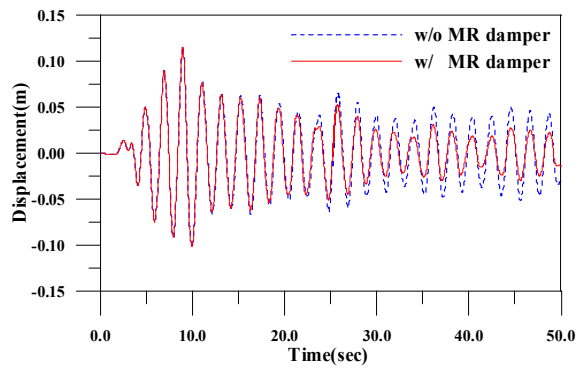
(b) Displacement at 15th floor of B2
(B1 based control)



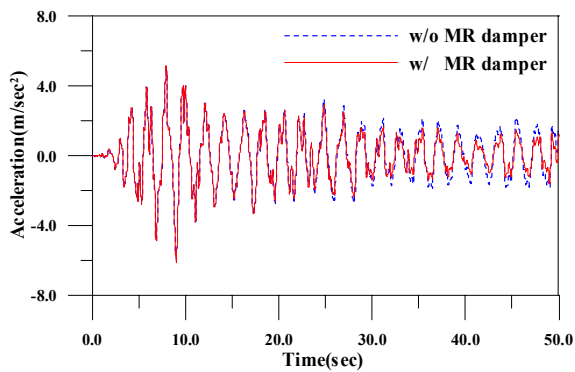
(a) Displacement at 20th floor of B1
(B2 based control)



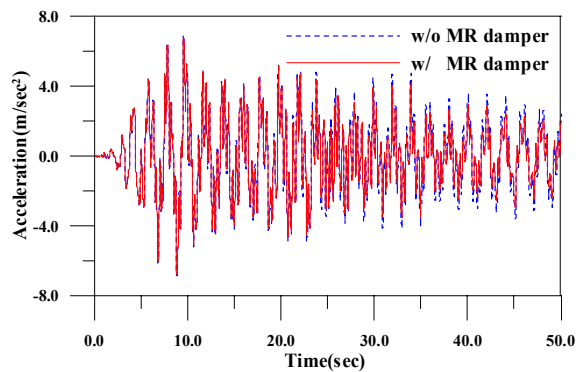
(c) Acceleration 10th floor of B1
(B1 based control)



(b) Displacement at 15th floor of B2
(B2 based control)

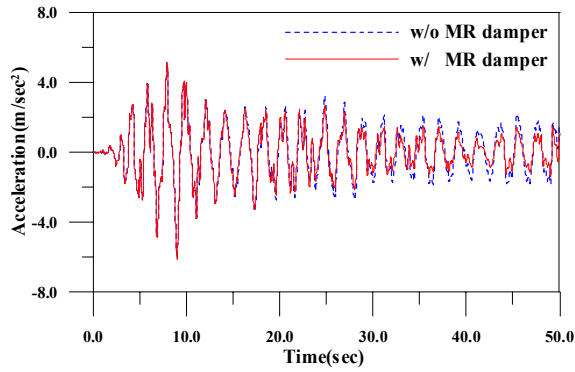


(d) Acceleration 10th floor of B2
(B1 based control)



(c) Acceleration 10th floor of B1
(B2 based control)

<Fig. 4> Displacement based control
(B1 based control)



(d) Acceleration 10th floor of B2

(B2 based control)

<Fig. 5> Displacement based control

(B1 based control)

식 (4-1)과 식(4-1)는 B1 변위응답을 기반으로 제어력을 결정하는 것이며 식 (5-1)과 식(5-2)는 B2 변위응답을 기반으로 제어력을 조절하는 것이다.

변위기반으로 감쇠력을 제어하는 제어방법의 경우에 MR 감쇠기가 위치하는 층의 변위 응답이 제어 전에 약간 다르나 B1 기반의 제어방법과 B2 기반의 제어방법에 의한 제어 성능이 유사하게 나타나고 있다. 인접한 두 건축물의 변위응답이 차이가 많은 경우에는 B1 기반의 제어성능과 B2 기반의 제어성능이 다르게 나타날 것으로 사료된다.

4.3 속도기반 제어

지진응답을 제어하기 위해서 식 (6)과 식 (7) 같이 속도기반의 제어 알고리즘을 적용하여 MR 감쇠기의 제어력을 결정하였다.

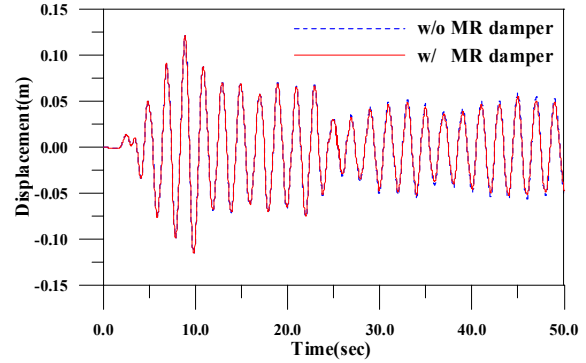
$$v_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) \leq 0 \rightarrow C_{con} = C_{max} \quad (6-1)$$

$$v_{B1}(v_{B2} - v_{B1}) > 0 \rightarrow C_{con} = C_{min} \quad (6-2)$$

$$v_{B2}(v_{B2} - v_{B1}) \geq 0 \rightarrow C_{con} = C_{max} \quad (7-1)$$

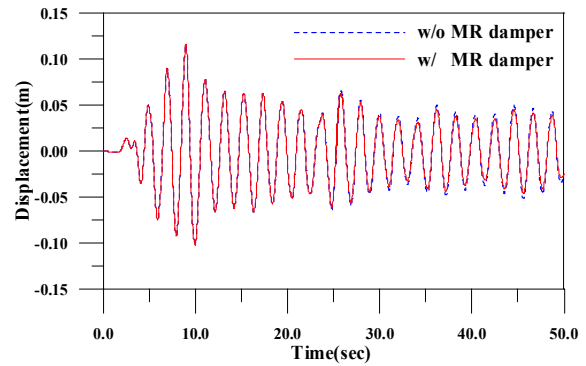
$$v_{B2}(v_{B2} - v_{B1}) < 0 \rightarrow C_{con} = C_{min} \quad (7-2)$$

식 (6-1)과 식(6-2)는 B1 속도응답을 기반으로 제어력을 조절하는 것이며 식 (7-1)과 식 (7-2)는 B2 속도응답을 기반으로 제어력을 결정하는 것이다.



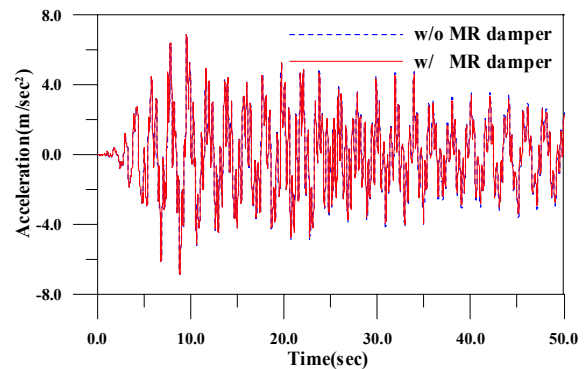
(a) Displacement at 20th floor of B1

(B1 based control)



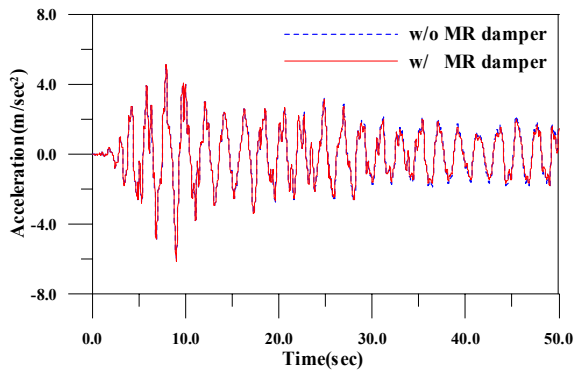
(b) Displacement at 15th floor of B2

(B1 based control)



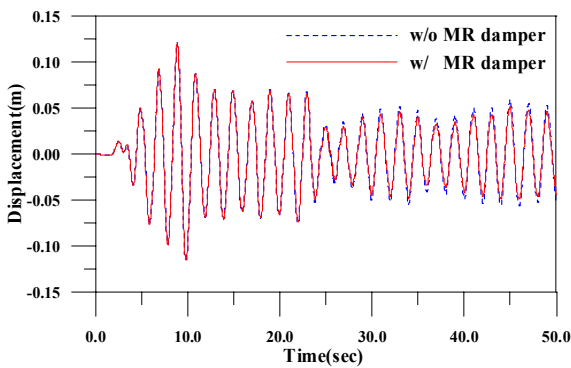
(c) Acceleration 10th floor of B1

(B1 based control)

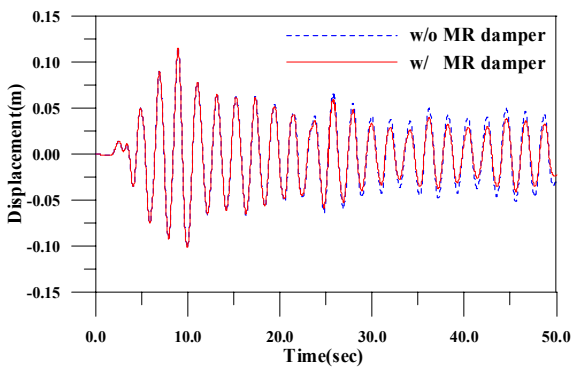


(d) Acceleration 10th floor of B2
(B1 based control)

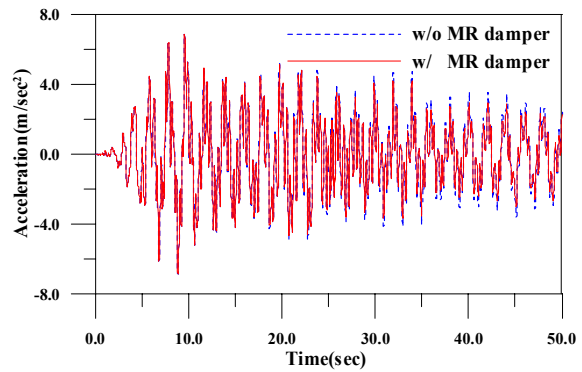
<Fig. 6> Velocity based control
(B1 based control)



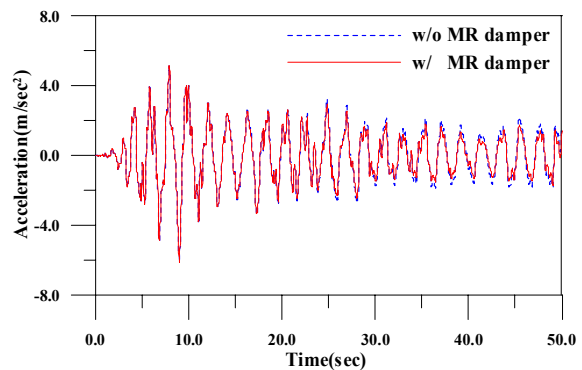
(a) Displacement at 20th floor of B1
(B2 based control)



(b) Displacement at 15th floor of B2
(B2 based control)



(c) Acceleration 10th floor of B1
(B2 based control)



(d) Acceleration 10th floor of B2
(B2 based control)

<Fig. 7> Velocity based control
(B2 based control)

속도기반으로 감쇠력을 제어하는 제어방법의 경우에 MR 감쇠기가 위치하는 층의 속도 응답이 제어 전에 매우 차이가 있다. B1 기반의 제어성능보다 B2 기반의 제어성능이 우수한 것을 볼 수 있다.

식 (4)는 제어 1, 식 (5)는 제어 2, 식 (6)은 제어 3 그리고 식 (7)은 제어 4로 하여 각각의 제어성능을 비교 분석하고자 한다.

<Table 5>는 변위응답 및 가속도응답에 대한 rms값을 나타낸 것이다. 그리고 비율은 최대값에 대한 비율을 나타낸 것이다.

<Table 5> RMS response of displacement and acceleration

Control Method	Disp. at Top Floor (m)		Acc. at Middle Floor (m/sec ²)	
	B1	B2	B1	B2
Method 1	0.0305 (93.3%)	0.0269 (88.2%)	1.5757 (94.2%)	1.0968 (90.3%)
Method 2	0.0297 (90.8%)	0.0262 (85.9%)	1.5329 (91.7%)	1.0774 (88.7%)
Method 3	0.0327 (100%)	0.0305 (100%)	1.6724 (100%)	1.2145 (100%)
Method 4	0.0316 (96.6%)	0.0286 (93.8%)	1.6189 (96.8%)	1.1516 (94.8%)

제어방법에 따른 rms 지진응답의 제어성능을 살펴보면 제어 2가 가장 우수한 제어성능을 보이고 있다. 이는 제어 2가 B2의 변위를 기반으로 제어하는 것으로 B2의 변위응답이 크게 나타나기 때문이다. 따라서 인접한 두 건축물의 제어를 위해서는 변위응답이 크게 나타나는 건축물을 기반으로 제어하는 것이 보다 효과적이다.

5. 결론 및 추후연구 과제

본 논문에서는 MR 감쇠기 적용 그리고 제어력 결정을 위한 변위기반 및 속도기반의 제어방법에 대한 인접한 두 건축물의 지진응답 제어성능을 알아보하고자 20층과 15층을 예제 구조물로 사용하여 수치해석을 수행하였다. MR 감쇠기의 제어방법에 따른 인접한 두 건축물의 지진응답 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 변위기반으로 감쇠력을 제어하는 제어방법의 경우에 B1 기반의 제어방법과 B2 기반의 제어방법에 의한 제어성능이 유사하게 나타나고 있다. 속도기반으로 감쇠력을 제어하는 제어방법의 경우에 B1 기반의 제어방법보다 B2 기반의 제어방법이 우수한 것을 볼

수 있다.

둘째, 속도기반으로 MR 감쇠기의 감쇠력을 제어하는 방법보다 변위기반으로 MR 감쇠기의 감쇠력을 제어하는 방법이 지진동 제어에 있어서 효과적이다.

셋째, MR 감쇠기 설치를 통한 인접한 두 건축물의 지진동 제어효과를 높이기 위해서는 변위응답이 크게 나타나는 건축물을 기반으로 제어하는 것이 보다 효과적이다.

본 연구에서는 MR 감쇠기의 변위기반 및 속도기반 제어기법에 의한 지진응답 제어성능을 알아보았다. 그러나 인접한 두 건축물의 최적의 진동제어를 위해서는 MR 감쇠기의 용량, MR 감쇠기의 다양한 제어알고리즘 적용 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 건축물의 지진응답 제어에 있어서 다양한 장치가 적용되므로 감쇠장치에 따른 진동응답 비교 분석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 서일대학 학술연구비에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

1. Shinya Soma, Takashi Tanaka, Toru Watanabe and Kazuto Seto, 'Seismic response control for parallel building structures using MR damper', Nihon Kikai Gakkai Kanto Shibu Sokai Koen Ronbunshu, Vol. 10, 2004, pp. 225-232
2. Seung-Yong Ok, Kwan-Soon Park and Hyun-Moo Koh, Optimal Design of Linear Viscous Damping System for Vibration Control of Adjacent Building Structures, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 10, No. 3, pp.85-100.
3. Hyun-Su Kim, Ah-Ram Yang, Dong-Guen

Lee, Sang-Kyung Ahn and Jung-Keun Oh, Performance Evaluation of Vibration Control of High-rise Buildings Connected by Sky-bridge, Korea Association for Spatial Structures, Vol. 8, No. 4, pp. 91-100

4. Hyun-Su Kim, Young-Koo Park, Hyun Ko, Ui-Hyun Lee and Dong-Guen Lee, Performance Evaluation of Vibration Control According to Installation Location of Sky-bridge, Korea Association for Spatial Structures, Vol. 10, No. 3, pp.65-74.

5. Gee-Cheol Kim, Joo-Won Kang and Seung-Hoon Chae, Hybrid Control Model of MR Damper for Seismic Response Control of Adjacent Buildings, Korea Association for Spatial Structures, Vol. 11, No. 2, pp. 101-110.

6. Sang-Hyun Lee, Kyung-Won Min, Roo-Jee Lee and Joong-Koo Kim, Preliminary Design Procedure of MR Dampers for Controlling Seismic Response of Building Structures, Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 8, No. 5, pp. 55-64.

(접 수 일 자 : 2012년 10월 16일)

(심사완료일자 : 2012년 11월 29일)

(게재확정일자 : 2012년 11월 30일)