인접건축물의 진동제어를 위한 MR감쇠기의 위치 선정에 관한 연구

Performance Evaluation of Vibration Control of Adjacent Buildings According to Installation Location of MR damper

김 기 철[1)] · 강 주 원[2)†]

Kim, Gee Cheol *Kang, Joo Won*

요 약 : 최근 인접 건축물의 진동제어와 관련된 연구가 몇몇 연구자에 의하여 수행되고 있으며 그리고 구조물의 지진동 제어를 위하여 준능동 감쇠기의 일종인 MR 감쇠기가 적용되고 있다. 본 논문에서는 MR 감쇠기의 위치에 따른 인접 건축물의 지진동 제어성능을 분석하여 MR 감쇠기의 설치에 대한 최적의 위치를 선정하고자 한다. 본 연구를 위하여 인접한 20층과 15층 건축물을 예제 구조물로 사용하였으며 이 예제 구조물은 서로 다른 고유진동수를 갖게 하였으며 예제 구조물의 지진동 제어를 위하여 Groundhook 제어기법을 적용하였다. 예제 구조물의 수치해석에 의한 지진응답 분석결과, 변위응답 제어를 위하여 인접 건축물의 최상층에 MR 감쇠기를 설치하는 것이 제어성능에 있어서 우수하며 가속도응답을 제어하기 위해서는 인접 건축물의 중간층에 MR 감쇠기를 설치하는 것이 우수한 제어성능을 보이고 있다. MR 감쇠기를 중간층에 설치할 경우에, 변위응답과 가속도응답을 동시에 제어가 가능하다. 따라서 건축물의 제어 목표에 따라서 MR 감쇠기 설치위치를 적절하게 선정해야 할 것이다.

ABSTRACT : In recently, the vibration control of adjacent buildings have been studied and magneto-rheological(MR) fluid dampers have been applied to seismic response control. MR dampers can be controlled with small power supplies and the dynamic range of this damping force is quite large. This MR damper is one of semi-active dampers as a new class of smart dampers. In this study, vibration control effect according to the installation location of the MR damper connected adjacent buildings has been investigated. Adjacent building structures with different natural frequencies were used as example structures. Groundhook control model is applied to determinate control force of MR damper. In this numerical analysis, it has been shown that displacement responses can be effectively controlled as adjacent buildings are connected at roof floors by MR damper. And acceleration responses can be effectively reduced when two buildings are connected at the mid-stories of adjacent buildings by MR damper. Therefore, the installation floor of the MR damper should be selected with seismic response control target.

핵 심 용 어 : 인접 건축물, MR 감쇠기, 지진동제어, 복합제어 모델

KEYWORDS : adjacent buildings, MR damper, seismic response control, groundhook control model

1. 서 론

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. 그리고 인동간격이 좁은 도심지 초고층 건축물에 있어서 지진하중이나 풍하중에 의한 초고층 건축물의 과도한

1) 서일대학교 건축과 부교수, 공학박사(beat67@seoil.ac.kr)

2) 교신저자. 영남대학교 건축학부 교수. 공학박사

(Tel: 053-810-2429, Fax: 053-810-4625, E-mail: kangj@ynu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

움직임은 인접한 초고층 건축물간의 충돌(pounding)로 인하여 구조적 손상을 일으킬 수도 있다(Shinya Soma 등, 2004).

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.

인접건물의 진동제어에 대한 연구는 최근에 많은 연구자들에 의하여 수행되고 있다. Shinya 등(2004)은 나란히 있는 두 건축물의 지진응답 저감을 위한 MR 감쇠기의 적용성을 수치해석 및 실험적으로 을 연구하였으며 GA알고리즘의 효과를 입증하였다. 옥승용 등(2006)은 인접한 두 건물의 진동제어를 위한 선형점성감쇠기의 최적 용량 및 분포를 결정하기 위하여 유전자알고리즘을 이용하였다. 김현수 등(2008; 2009)은 인접한 건축물의 진동응답이 저감을 위하여 스카이브리짓을 이용하였다. 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(김기철 등, 2011). 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 충돌이 일어날 가능성이 매우 크다. 본 논문에서는 MR 감쇠기 설치 위치에 따른 인접한 건축물의 진동제어 성능을 알아보기 위한 것으로 예제 인접건축물은 그림 1과 같이 각층별 집중질량, 강성을 갖는 20층과 15층 건축물로 선정하였다.

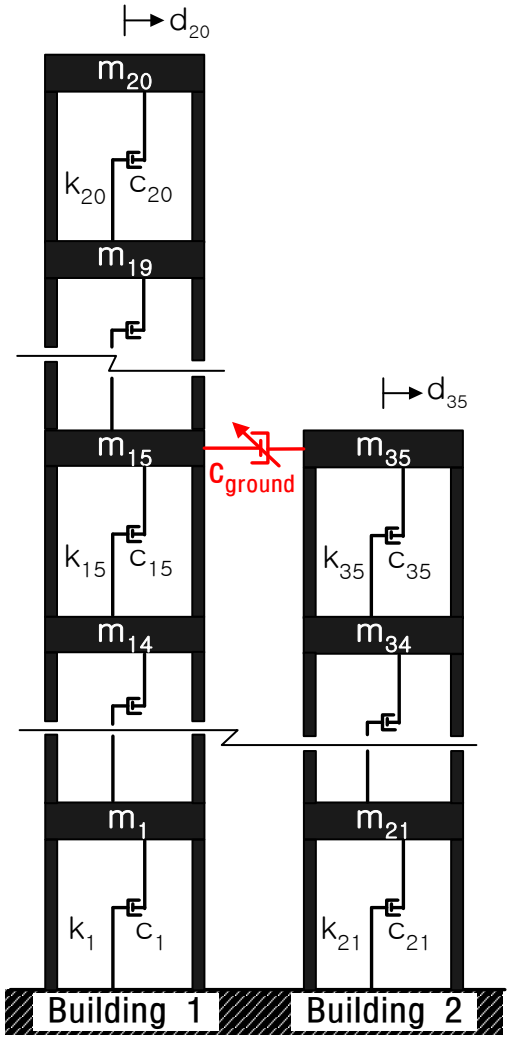


그림 1. 예제 구조물

표 1. 예제 인접 건축물의 질량과 강성

구 분	Building 1	Building 2
Mass (kg)	m_1~m_20 = 9.6×105	m_21~m_35 = 8.4×105
Stiffness (×109N/m)	k_1~k_20 = 1.5	k_21~k_35 = 1.4

예제 인접건축물의 집중질량과 강성은 표 1과 같다. MR 감쇠기의 특성을 반영한 다양한 모델들이 수치해석에 적용되고 있으나 본 논문에서는 단순 Bouc-Wen 모델을 사용하였다. 식 1은 단순 Bouc-Wen 모델에 대한 것으로 MR감쇠기의 이력특성을 모델링할 수 있다.

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

여기서 k는 축압기의 강성이고, c는 점성, f_0는 초기마찰력이다. z는 이력특성을 모사하기 위한 무차원 변수이고 , α

는 MR의 대한 영향의 크기를 조정하는 상수이다(이상현 등, 2004). 그리고 식 2와 식 3과 같이 groundhook 제어기법을 적용하여 MR감쇠기의 감쇠력 제어하였다.

$$d_{B1}(d_{B2}-d_{B1}) > 0 \quad \rightarrow \quad C_{con} = C_{\max} \tag{2}$$

$$d_{B1}(d_{B2}-d_{B1}) =< 0 \quad \rightarrow \quad C_{con} = C_{\min} \tag{3}$$

오른쪽 건축물(Building 2)의 층별 질량은 왼쪽 건축물(Building 1)의 층별 질량보다 약간 작게 하였으며 인접한 두 건축물의 강성은 같게 하였다. 감쇠는 2%의 모드별 감쇠를 고려하였다. 인접한 두 건축물의 질량과 층 수 차이로 인하여 두 인접 건축물의 고유진동모드와 고유진동수가 다르게 나타날 것이다.

고유치해석에 의한 예제 인접 건축물의 고유진동수는 다음 표 2와 같다. 인접한 두 건축물의 질량과 강성이 차이로 인하여 고유진동수가 차이가 나는 것을 확인할 수 있으며 Building 1의 고유진동수가 Building 2의 고유진동수보다 작게 나타나고 있다.

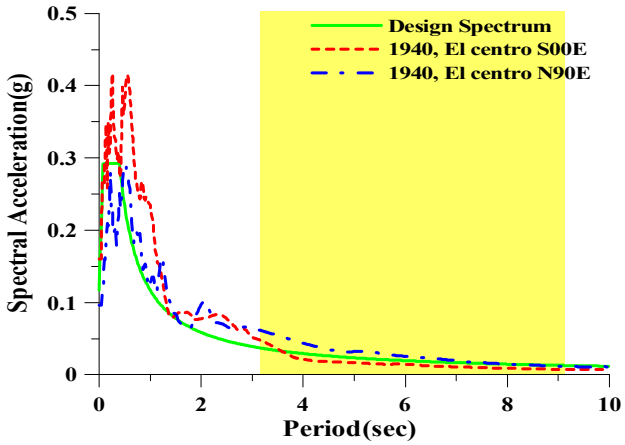
표 2. 예제 인접 건축물의 고유진동수

모드차수	Building 1	Building 2
1차모드(Hz)	0.4819	0.6582
2차모드(Hz)	1.4430	1.9678
3차모드(Hz)	2.3956	3.2572
4차모드(Hz)	3.3341	4.5132

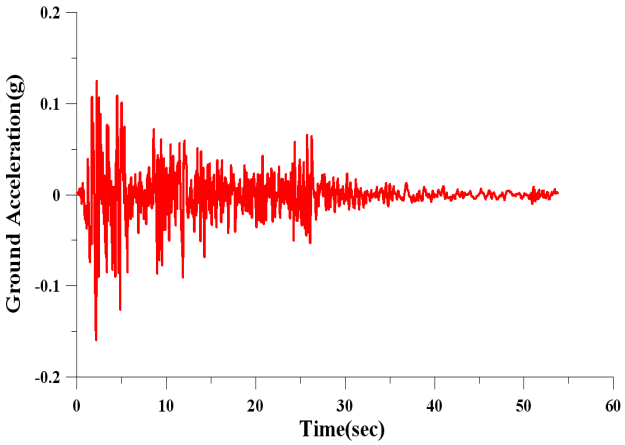
인접한 두 건축물은 고유진동주기 등과 같은 동적특성이 다르기 때문에 지진응답과 같은 진동응답에 차이가 나게 된다. 따라서 인접한 두 건축물의 진동응답을 제어하기 위하여 두 건축물 사이에 감쇠기를 연결하며 경우에 따라서는 스카이브릿지 연결시스템을 적용하기도 한다(김기철 등, 2011; 김현수 등, 2009; 이상현 등, 2004).

2.2 지진하중

MR감쇠기로 연결된 인접한 건축물의 진동제어 성능을 평가하기 위하여 지진하중에 의한 동적해석을 수행하였다. 입력지진하중은 El Centro지진(1940)을 사용하였고 두 개의 지진하중을 KBC2009의 설계응답스펙트럼에 맞추어 조정하였다. 설계응답스펙트럼은 지역계수는 0.22, 지반종류는 SA로 가정하여 작성되었다. El Centro 지진하중의 응답스펙트럼 및 가속도 시간이력을 그림 2에 나타내었다.



(a) 응답스펙트럼



(b) 가속도 시간이력

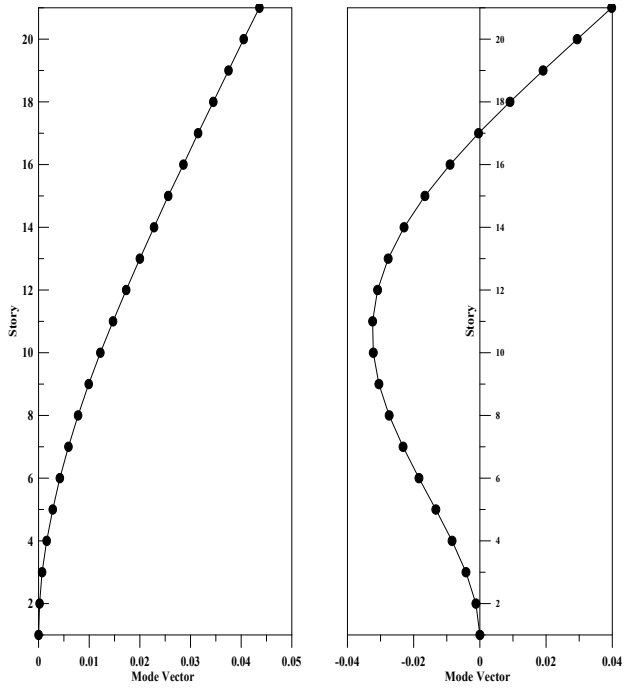
그림 2. El Centro 지진하중(1940)

3. MR 감쇠기 설치위치 분석

3.1 진동모드 벡터 분석

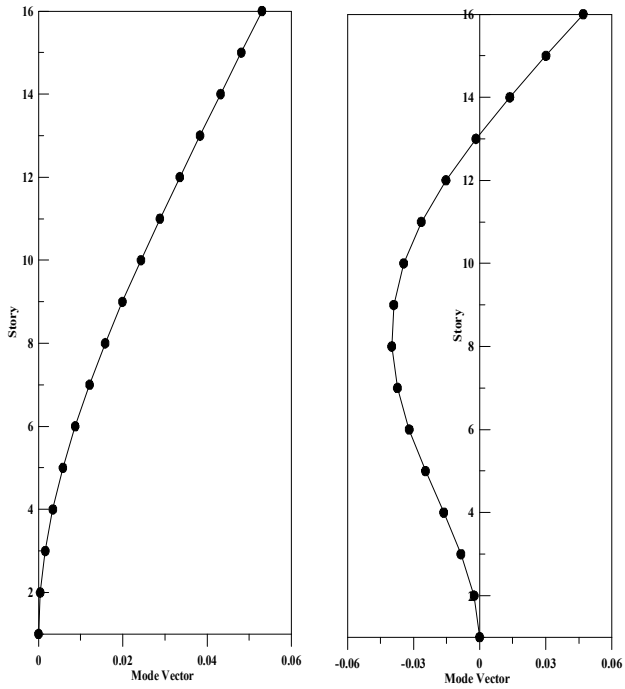
인접한 두 건축물의 진동제어 효과는 두 건축물의 고유진동주기와 진동모드형상에 의하여 영향을 받을 것이다. 인접한 두 건축물의 진동모드 벡터가 가장 크게 나타나는 위치에 MR감쇠기를 설치한다면 전체 구조물의 진동을 저감시키는데 있어서 효과적일 것으로 예상된다.

그림 3과 그림 4에서 Y축은 층수를 의미하며 X축은 예제 인접 건축물의 진동모드 벡터를 나타낸 것이다. 예제 인접한 건축물의 진동모드는 캔틸레버 구조물의 전형적인 진동모드를 나타내고 있으며 Building 1과 Building 2의 진동모드가 순차적으로 나타나고 있다.



(a) 1차모드 (b) 2차모드

그림 3. Building 1의 진동모드 벡터



(a) 1차모드 (b) 2차모드

그림 4. Building 2의 진동모드 벡터

건축물의 고유모드 벡터가 가장 크게 나타나는 Building 2의 최상층(m_35)과 같은 층인 Building 1의 16층(m_15)을 MR 감쇠기로 연결한다. 또한 고유모드의 벡터 방향이 변하는 Building 1의 11층(m_10)과 Building 2의 11층(m_30)을 MR 감쇠기로 연결하며 Building 1의 8층(m_7)과 Building 2의 8층(m_27)이 연결되도록 MR 감쇠기를 설치한다.

3.2 지진응답 분석

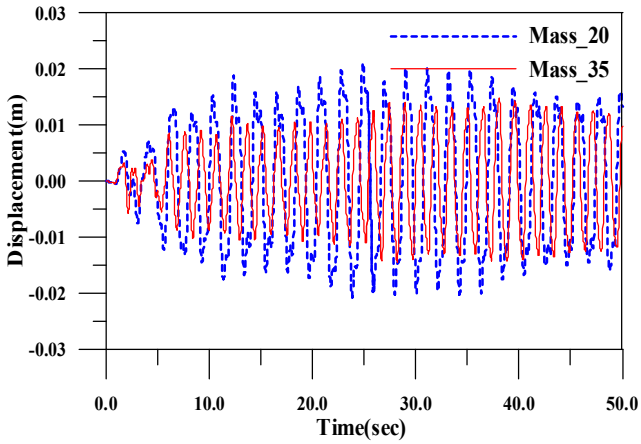
인접한 두 건축물의 지진응답을 줄이기 위하여 변위응답 및 지진응답의 분석을 통하여 MR감쇠기의 설치위치를 결정할 수 있을 것이다.

표 3은 MR 감쇠기를 설치하지 않은 경우의 El Centro 지진하중에 의한 예제 인접 건축물의 지진응답으로 Building 2의 최상층은 층수 16으로 표기하였다. 변위응답의 경우에 최대값이 중요한 변수가 되며 가속도응답의 경우에 최대값 및 rms값이 중요한 변수가 되므로 표 3에서 층별 변위응답는 최대값으로 층별 가속도응답은 rms로 나타내었다. 변위응답의 경우에 최상층에서 가장 크게 나타나고 있으며 가속도응답의 경우에 최상층과 건축물의 중간층에서 크게 나타나고 있다.

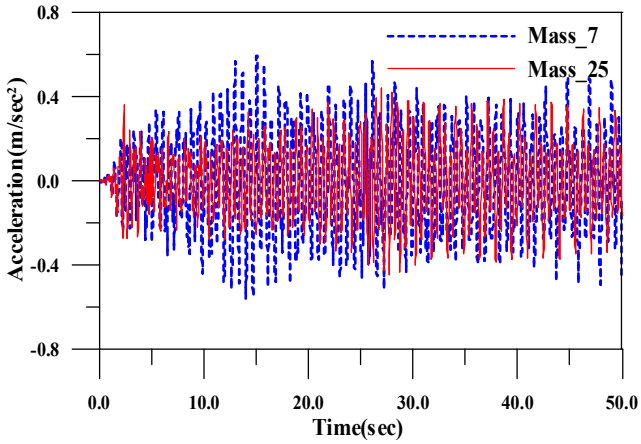
표 3. 변위응답 및 가속도응답

층수	peak 변위(m)		rms 가속도(m/sec2)	
	Building 1	Building 2	Building 1	Building 2
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0024	0.002	0.0905	0.0595
3	0.0047	0.0039	7.7046	5.3903
4	0.0068	0.0056	9.4749	7.1475
5	0.0087	0.0072	10.5150	8.2450
6	0.0105	0.0086	11.1553	8.7336
7	0.0125	0.0098	11.4615	8.7027
8	0.0142	0.0108	11.5792	8.2247
9	0.0157	0.0116	11.4842	7.4655
10	0.0169	0.0123	11.0059	6.7208
11	0.0176	0.0128	10.1323	6.3781
12	0.0181	0.0133	9.0548	6.6876
13	0.0183	0.0137	8.1111	7.6118
14	0.0185	0.0141	7.6603	8.8533
15	0.0185	0.0145	7.6677	10.0246
16	0.0186	0.0147	7.9216	10.7919
17	0.0191		8.5122	
18	0.0196		9.4335	
19	0.0202		10.6015	
20	0.0208		12.1261	
roof	0.0211		13.4438	

예제 인접 건축물의 지진하중에 의한 최상층과 중간층에서의 변위응답과 가속도응답에 대한 시간이력 그래프를 그림 5에 나타내었다. 변위응답의 경우에 최상층에서 가장 크게 나타나기 때문에 Building 1의 최상층(roof)과 Building 2의 최상층에서의 변위응답을 분석하였다. 그리고 가속도 응답의 경우에 최상층과 중간층에서 크게 나타나기 때문에 Building 1의 8층과 Building 2의 6층에서의 가속도 응답을 분석하였다.



(a) m_20과 m_35에서의 변위응답



(b) m_7과 m_25에서의 가속도응답

그림 5. 예제 인접 건축물의 지진응답-시간이력

변위응답 분석에 의한 MR 감쇠기의 설치위치는 Building 1의 16층(m_15)과 Building 2의 지붕층(m_35)이 연결되도록 MR 감쇠기를 설치한다. 그리고 가속도응답이 비교적 크게 나타나는 Building 1의 8층(m_7)과 Building 2의 8층(m_27) 그리고 Building 1의 6층(m_5)과 Building 2의 6층(m_25)이 연결되도록 MR 감쇠기를 설치한다. 한다.

표 4는 예제 인접 건축물에 대한 MR 감쇠기의 설치 위치를 나타낸 것으로 예제 인접 건축물의 진동모드와 지진응답 분석을 통하여 MR 감쇠기의 설치에 따른 예제 인접 건축물의 지진응답 제어효과가 우수할 것으로 예상되는 위치를 선정한 것이다. case 1과 case 2는 진동모드 분석을 통하여 MR 감쇠기의 설치위치를 선정한 것으로 case 1은 모드 벡터가 가장 크게 나타나는 층수에 MR 감쇠기를 설치하는 경우이고 case 2는 Building 1의 모드 벡터의 방향이 바뀌는 층수에 MR 감쇠기를 설치한 것이다. 그리고 case 3과 case 4는 지진응답의 분석을 통하여 MR 감쇠기의 설치위치를 선정한 것으로 case 3은 Building 1의 가속도응답이 비교적 크게 나타나는 층수에 MR 감쇠기를 설치한 경우이고 case 4는 Building 2의 가속도응답이 비교적 크게 나타나는 층수에 설치한 것이다.

표 4. MR 감쇠기 설치 위치

Case	MR감쇠기 설치 위치		비고
	Building 1	Building 2	
case 1	m_15	m_35	모드분석
case 2	m_10	m_30	모드분석
case 3	m_7	m_27	응답분석
case 4	m_5	m_25	응답분석

4. MR 감쇠기 설치위치에 따른 지진응답 제어

4.1 MR 감쇠기 제어 방법

수치해석적으로 접근하기 위하여 인접한 두 건축물 사이의 제어가 가능한 이상적인 모델의 MR 감쇠기를 설치하였으며 지진응답을 제어하기 위해서 식(4a)와 식(4b)와 같은 변위기반의 Groundhook 제어 알고리즘을 적용하여 MR 감쇠기의 제어력을 결정하였다.

$$d_{B1}(d_{B2}-d_{B1})>0 \;\rightarrow c_{con}=c_{\max} \tag{4a}$$

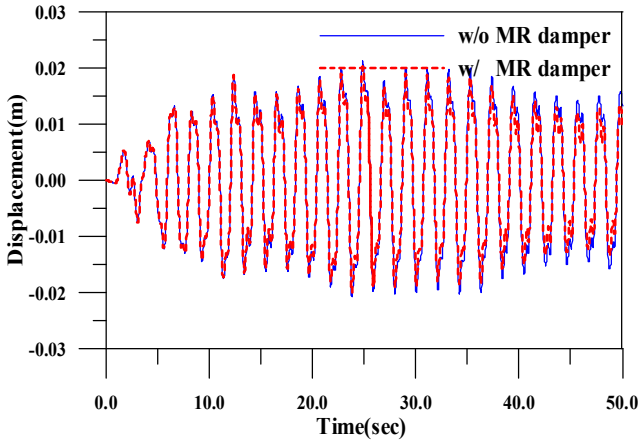
$$d_{B1}(d_{B2}-d_{B1})\le 0 \;\rightarrow c_{con}=c_{\min} \tag{4b}$$

여기서 d_{B1}과 d_{B2}은 각각 Building 1과 Building 2에서 제어하고자 하는 층의 변위응답을 의미한다. 그리고 c_{con}은 MR 감쇠기의 제어력에 대한 감쇠를 의미한다.

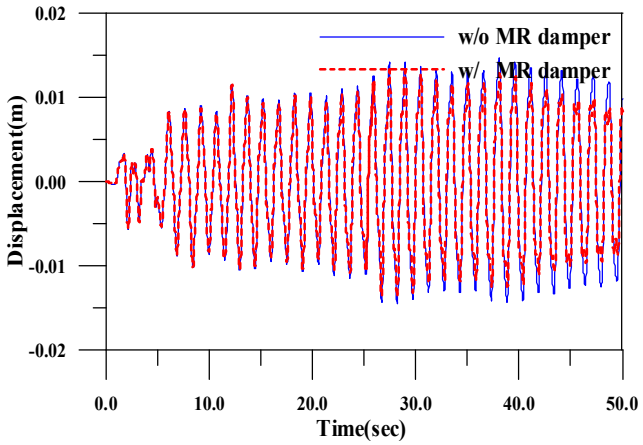
4.2 진동모드 분석에 의한 MR 감쇠기 설치

본 절에서는 인접한 두 건축물의 진동모드 분석을 통하여 MR 감쇠기의 설치위치를 선정하고 이에 따른 진동응답을 비

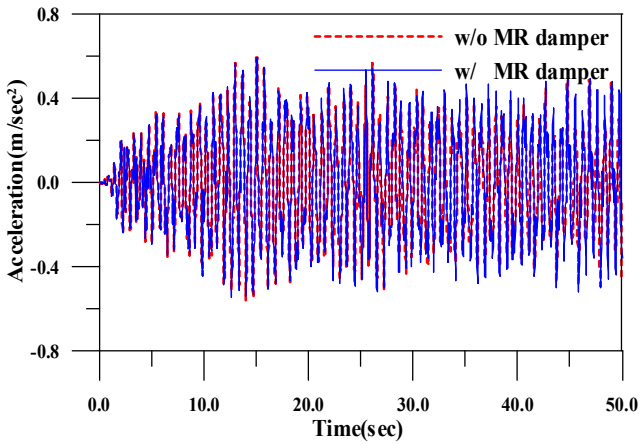
교 분석하였다. 모드 벡터가 가장 크게 나타나는 층수에 MR 감쇠기를 설치하는 경우(case 1)와 Building 1의 모드 벡터의 방향이 바뀌는 층에 MR 감쇠기를 설치한 경우(case 2)에 의한 진동제어 성능을 분석하였다.



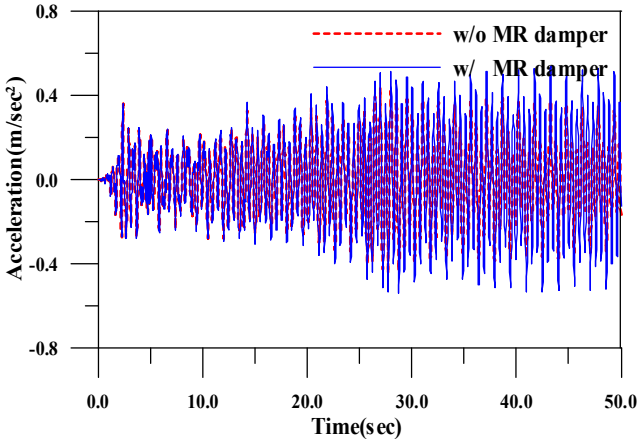
(a) m_20 변위응답 시간이력



(b) m_35 변위응답 시간이력



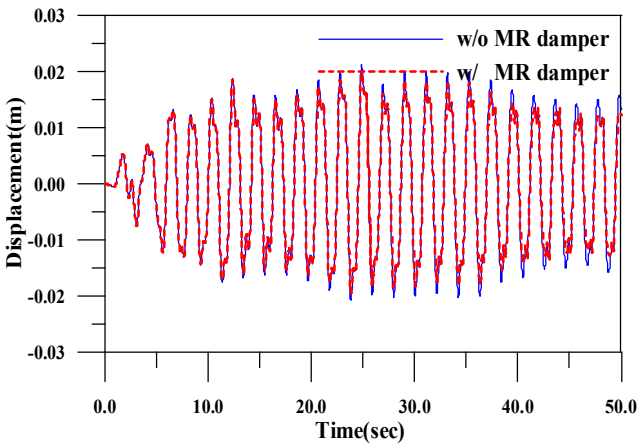
(c) m_7 가속도응답 시간이력



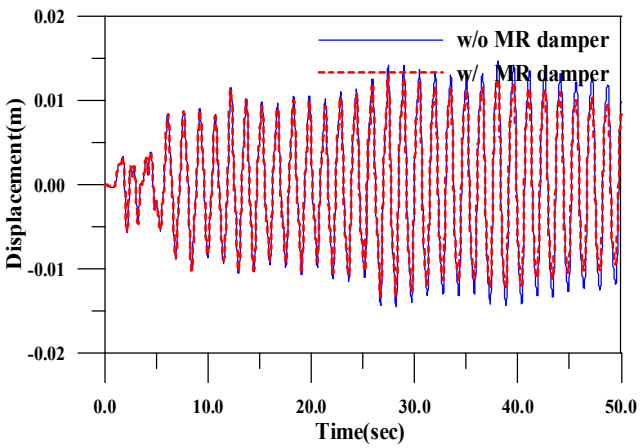
(d) m_25 가속도응답 시간이력

그림 6. MR 감쇠기 설치(case 1)에 따른 지진응답

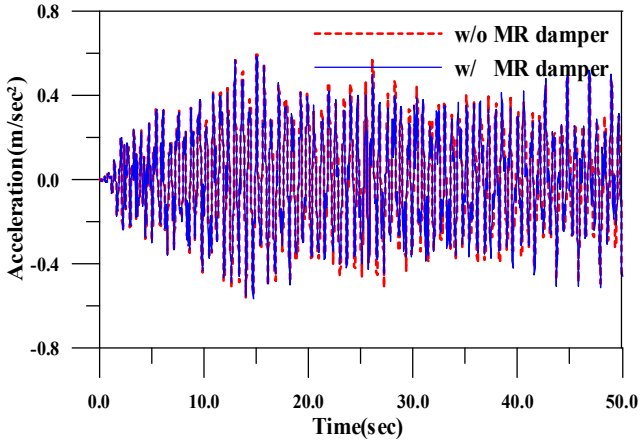
그림 6과 그림 7은 진동모드 분석에 의한 MR 감쇠기의 설치위치를 선정하고 MR 감쇠기 설치 유무에 따른 진동응답을 비교한 것이다.



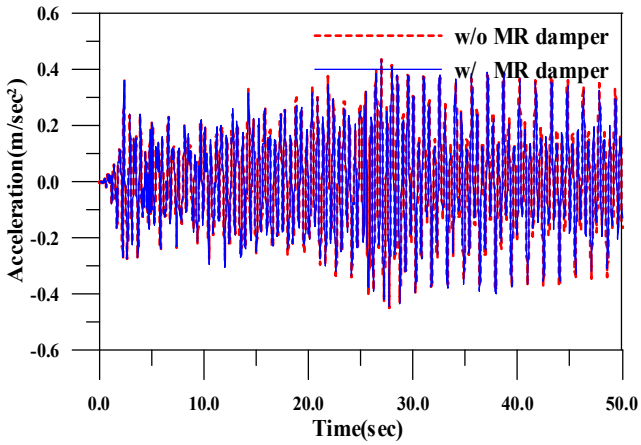
(a) m_20 변위응답 시간이력



(b) m_35 변위응답 시간이력



(c) m_7 가속도응답 시간이력



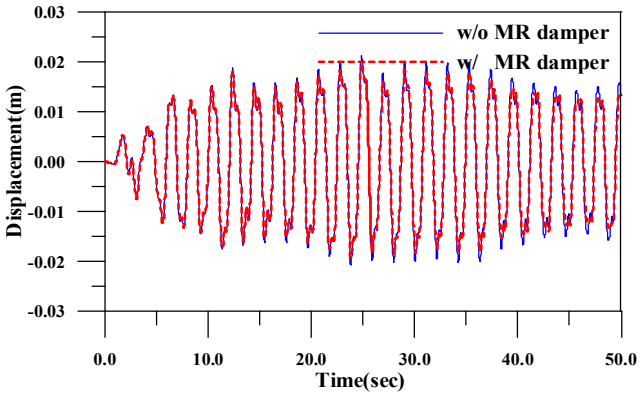
(d) m_25 가속도응답 시간이력

그림 7. MR 감쇠기 설치(case 2)에 따른 지진응답

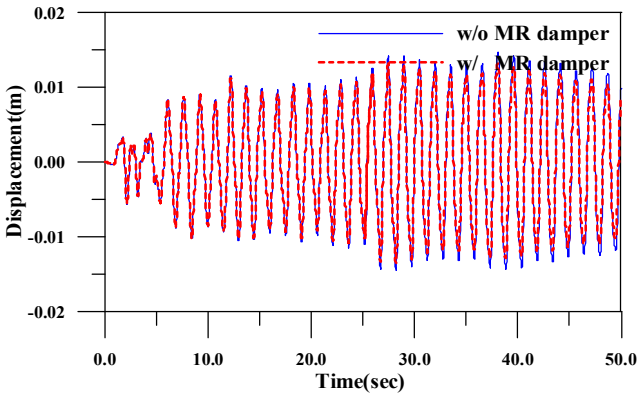
비교결과 case 1의 경우에 인접한 두 건축물의 지붕층 변위응답이 감소하는 것을 볼 수 있으나 중간층에서의 가속도응답은 오히려 증가하고 있다. case 2의 경우에 인접한 두 건축물의 지붕층 변위응답이 감소하는 것을 볼 수 있으며 중간층에서의 가속도응답은 약간 줄어들거나 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 인접한 두 건축물의 상층부를 감쇠기로 연결할 경우에, 인접한 두 건축물이 같이 거동하게 되며 이로 인하여 강성이 전체적으로 증가하는 효과가 나타난다. 따라서 변위응답은 감소하나 가속도응답은 증가하게 된다.

4.3 지진응답 분석에 의한 MR 감쇠기 설치

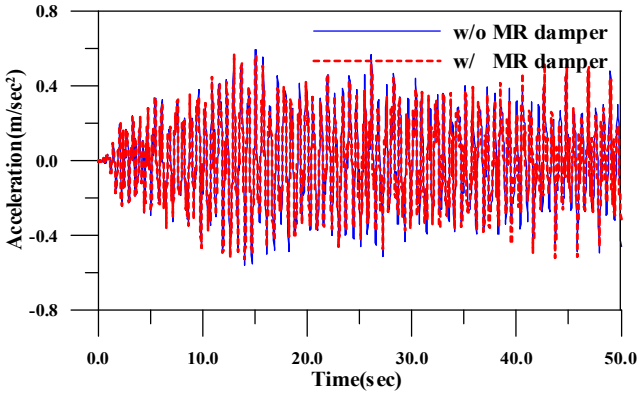
본 절에서는 인접한 두 건축물의 지진응답 분석을 통하여 MR 감쇠기의 설치위치를 선정하고 이에 따른 진동응답을 비교 분석하였다. Building 1의 가속도응답이 가장 크게 나타는 층에 MR 감쇠기를 설치한 경우(case 3)와 Building 2의 가속도응답이 가장 크게 나타는 층에 MR 감쇠기를 설치한 경우(case 4)의 지진응답 제어성능을 분석하였다.



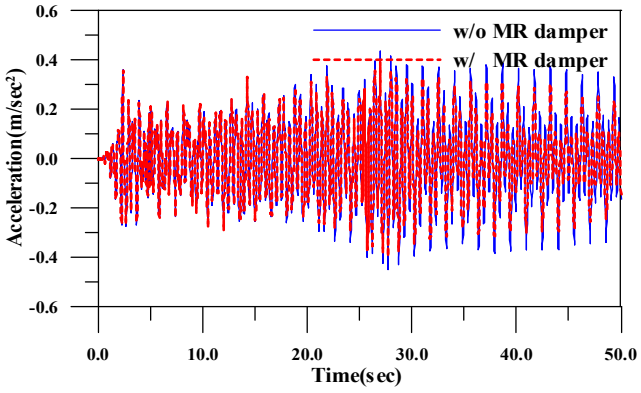
(a) m_20 변위응답 시간이력



(b) m_35 변위응답 시간이력



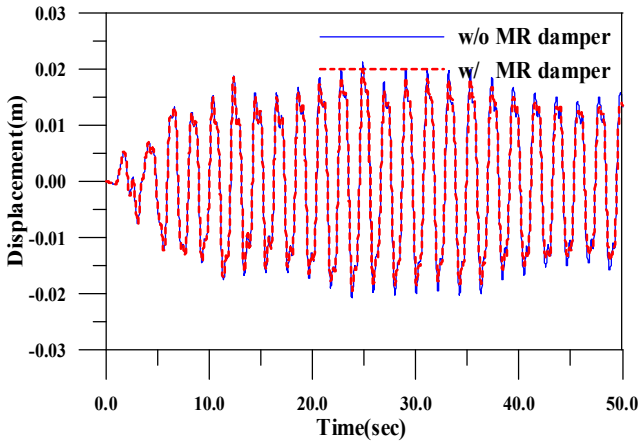
(c) m_7 가속도응답 시간이력



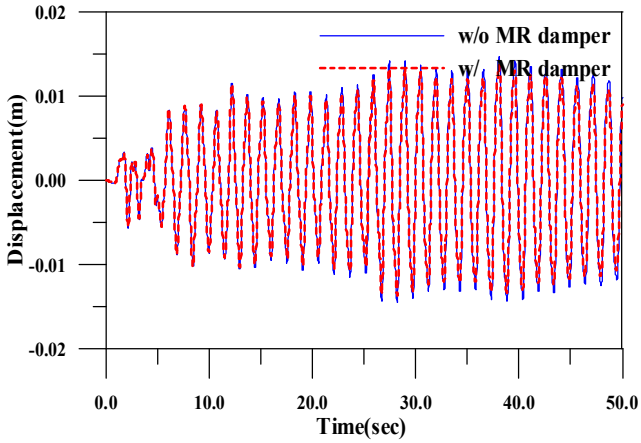
(d) m_25 가속도응답 시간이력

그림 8. MR 감쇠기 설치(case 3)에 따른 지진응답

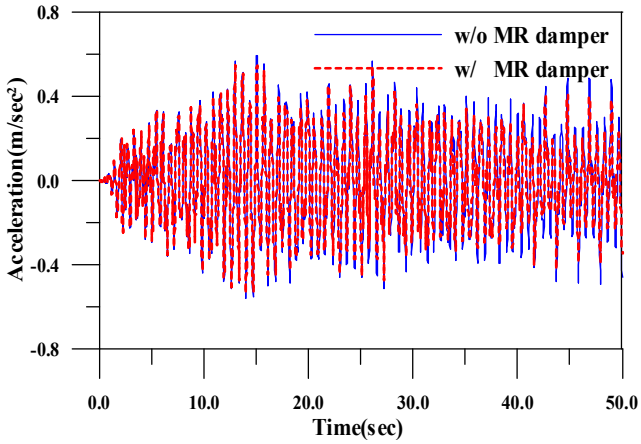
그림 8과 그림 9는 지진응답 분석에 의한 MR 감쇠기의 설치위치를 선정하고 MR 감쇠기 설치 유무에 따른 진동응답을 비교한 것이다.



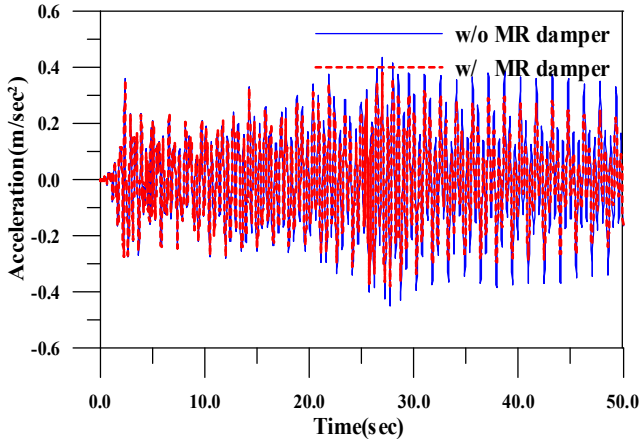
(a) m_20 변위응답 시간이력



(b) m_35 변위응답 시간이력



(c) m_7 가속도응답 시간이력

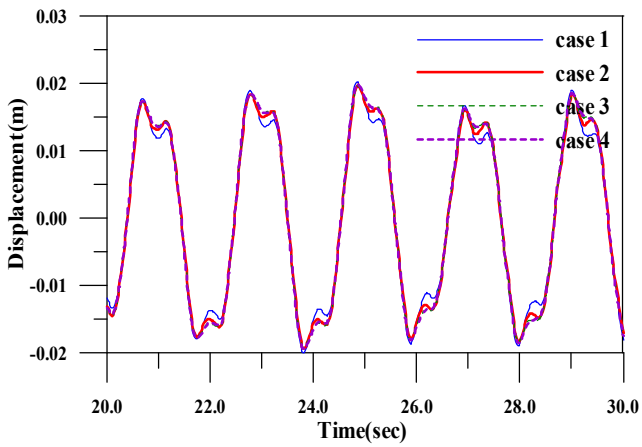


(d) m_25 가속도응답 시간이력

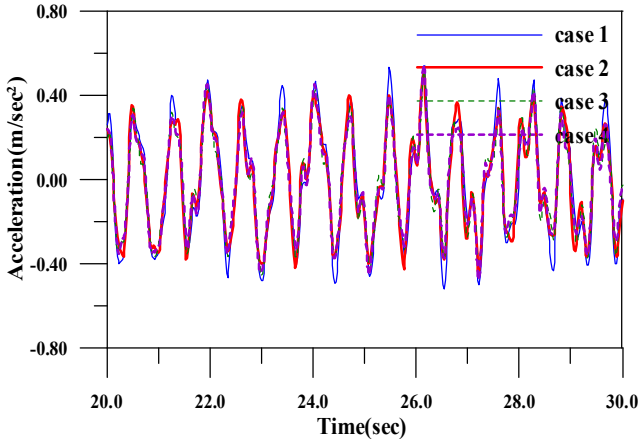
그림 9. MR 감쇠기 설치(case 4)에 따른 지진응답

비교결과 case 3의 경우에 인접한 두 건축물의 지붕층 변위응답이 감소하고 있으며 중간층 가속도응답도 크게 감소한 것을 볼 수 있다. case 4의 경우에도 인접한 두 건축물의 지붕층 변위응답과 중간층 가속도응답이 줄어든 것을 볼 수 있다. 감쇠기를 가속도응답이 크게 나타나는 중간층에 설치함으로서 가속도응답을 크게 감소시킬 수 있으며 감쇠기 연결로 인하여 변위응답도 줄여주게 된다.

그림 10은 MR 감쇠기의 설치위치에 따른 Building 1의 지붕층 변위응답과 Building 1의 중간층 가속도응답을 나타낸 것이다. MR 감쇠기 설치위치가 다르더라도 변위응답에 대한 제어성능에 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 이는 인접한 두 건축물의 변위응답의 제어에 있어서 인접한 두 건축물의 어느 위치에 감쇠기를 설치해도 변위응답 제어효과가 유사한 것을 의미한다. 인접한 두 건축물의 가속도응답의 제어에 있어서 감쇠기 설치 위치에 따라서 제어효과가 다르게 나타나고 있다.



(a) MR 감쇠기 설치위치에 따른 m_20 변위응답



(b) MR 감쇠기 설치위치에 따른 m_7 가속도응답

그림 10. MR 감쇠기 설치 위치에 따른 지진응답

표 5는 변위응답 및 가속도응답에 대한 rms값을 나타낸 것이다. 비율은 최대값에 대한 비율을 나타낸 것이다. 변위응답 제어에 있어서 case 1이 가장 효과적이며 가속도응답 제어에 있어서 case 4가 가장 효과적인 것을 볼 수 있다.

표 5. rms 변위 및 가속도 응답

층수	m_20의 변위 (m)		m_7의 가속도 (m/sec2)	
	rms	비율	rms	비율
case 1	0.53524	93.9	12.180	100.0
case 2	0.55267	96.9	10.990	90.2
case 3	0.56646	99.4	10.624	87.2
case 4	0.57016	100.0	10.164	83.4

5. 결론 및 추후연구 과제

본 논문에서는 MR 감쇠기의 설치 위치에 따른 인접한 두 건축물의 지진응답 제어성능을 알아보고자 20층과 15층을 예제 구조물로 사용하여 수치해석을 수행하였다. MR 감쇠기 설치 위치에 따른 인접한 두 건축물의 지진응답 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 인접한 두 건축물의 변위응답 제어에 있어서 최상층에 MR 감쇠기를 설치하는 것이 가장 효과적이나 MR 감쇠기 설치위치에 따라서 변위응답 제어성능의 차이는 매우 미비한 것을 알 수 있었다.

둘째, 인접한 두 건축물의 가속도응답 제어에 있어서 MR 감쇠기를 건축물의 중간층에 설치할 경우에 가장 효과적인 것을 확인할 수 있었다. 그러나 MR 감쇠기를 상층부에 설치할 경우에 가속도응답이 오히려 증가하는 것을 볼 수 있다.

셋째, MR 감쇠기를 중간층에 설치할 경우에 변위응답이 제어되고 동시에 가속도응답도 제어되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 인접한 두 건축물의 지진응답 제어에 있어서 일반적으로 MR 감쇠기를 중간층에 설`치하는 것이 효과적이다.

본 연구에서는 MR 감쇠기의 위치만을 변수로 하여 수치해석을 수행하였다. 그러나 인접한 두 건축물의 최적의 진동제어를 위해서는 MR 감쇠기의 용량, MR 감쇠기의 제어알고리즘 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

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0012407).

참 고 문 헌

김기철, 강주원, 채승훈(2011) 인접건축물의 지진응답 제어를 위한 MR 감쇠기의 복합제어 모델, **한국공간구조학회 논문집**, 한국공간구조학회, 제11권, 제2호, pp. 101-110.

김현수, 양아람, 이동근, 안상경, 오정근(2008) 스카이브릿지로 연결된 고층건물의 진동제어성능평가, **한국공간구조학회 논문집**, 한국공간구조학회, 제8권, 제4호, pp. 91-100.

김현수, 박용구, 고현, 이의현, 이동근(2009) 스카이브릿지 설치위치에 따른 고층건물의 진동제어 성능평가, **한국전산구조공학회 논문집**, 한국전산구조공학회, 제22권, 제3호, pp. 231-242.

옥승용, 박관순, 고현무(2006) 인접구조물의 진동제어를 위한 선형감쇠시스템의 최적설계, **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, 제10권, 제3호, pp. 85-100.

이상현, 민경원, 이루지, 김중구(2004) 건축구조물의 지진응답 제어를 위한 MR감쇠기 예비설계절차, **한국지진공학회 논문집**, 한국지진공학회, Vol. 8, No. 5, pp. 55-64.

Shinya, S., Takashi, T., Toru, W., and Kazuto, S. (2004) Seismic response control for parallel building structures using MR damper, *Nihon Kikai Gakkai Kanto Shibu Sokai Koen Ronbunshu*, Vol. 10, pp. 225-232.

(접수일자 : 2011. 9. 14 / 심사일 2011. 9. 16 / 심사완료일 2012. 2. 3)