

준능동 MR 감쇠기를 이용한 인접빌딩의 지진응답 퍼지제어

Seismic Response Fuzzy Control of Adjacent Building using Semi-active MR Dampers

옥승용*

김동석**

박관순***

고현무****

Ok, Seung-Yong Kim, Dong-Seok Park, Kwan-Soon Koh, Hyun-Moo

ABSTRACT

Seismic performance of semi-active fuzzy control algorithm to operate MR dampers for coupling adjacent building is investigated in this paper. In the proposed semi-active control technique, the fuzzy logic is used as a method to adjust input voltage to MR damper. In order to validate control performance of proposed technique, the seismic performance of the semi-active fuzzy control system is compared with that of passive control system where the input voltage to MR damper is set to display maximum damping force. The simulated results show that the semi-active fuzzy control technique effectively regulates the trade-off existing between seismic responses of two buildings subject to various earthquake excitations.

1. 서론

사회가 발달하고 인구가 증가하면서 제한된 토지로 인해 도시의 건물들은 점점 고층화되며 상대적으로 건물 사이의 간격도 더욱 줄어들고 있다. 그런데 일반적으로 건물이 점점 높아지면 구조물은 더욱 유연해지며 낮은 감쇠비로 인하여 지진과 같은 외부하중에 의한 동적 응답이 커지게 된다. 따라서 인접한 고층 빌딩은 지진이 발생할 때 충돌로 인한 파괴가 발생할 가능성이 높아지게 된다. 한편, 최근 많이 건설되는 고층 주상복합건물은 상층부에 비해 하층부가 넓은 구조로 건설되는 경우가 많은데, 이처럼 고층부와 저층부로 나뉘는 주상복합건물에서는 아예 신축이음을 두어 여러 개의 독립된 건물로 분리하기도 한다. 그리고 'ㄱ'이나 'L' 형태의 비대칭 구조물은 지진시 비틀림 등이 발생하기 쉬우므로 역시 신축이음을 두어 독립된 구조물로 분리함으로써 이러한

* 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 연구원, 공학박사

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

*** 정희원, 동국대학교 건축공학부 조교수, 공학박사

**** 정희원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부 교수, 공학박사

문제를 해결하기도 한다. 이처럼 독립된 두 건물이 서로 가깝거나 하나의 건물이 여러 목적을 위해 두 개의 건물로 분리 설계되었을 경우 각 건물의 서로 다른 주기 특성으로 인해 지진 시 두 건물사이에 충돌이 일어날 가능성이 높아진다. 이런 경우 건물 내부의 각 층 사이를 가새 형태로 에너지 소산장치를 이용하여 연결함으로써 지진 응답을 줄이는 방법을 생각할 수 있지만 이는 건물 내부의 공간 활용과 미관 면에서 제약을 받는다. 따라서 이런 문제를 해결하고자 인접건물 사이에 신축이음 대신 감쇠기 형태의 에너지 소산장치를 설치하여 연결함으로써 지진 응답을 줄이고 내진 성능을 향상시킬 수 있는 개념이 도입되었다.

여러 연구자들에 의해 이와 관련한 연구가 수행되었는데 주로 점성 감쇠기나 점탄성 감쇠기 등의 수동형 제어 시스템을 사용한 연구가 이루어졌다^{(1),(2)}. 이 연구에서는 최근 수동형 제어시스템과 능동형 제어시스템의 장점을 모두 발휘할 수 있는 장점으로 인하여 각광을 받고 있는 준능동 MR 감쇠기를 고려하였으며, 준능동 제어방법으로 퍼지제어기법을 적용함으로써 두 건물의 지진 응답 감소와 내진성을 평가하고자 하였다. 제시하는 방법의 효율성을 평가하기 위하여 최대 용량으로 운용되는 수동형 MR 감쇠기를 동일한 용량으로 적용하여 다양한 지진하중에 대해 그 응답을 비교하였다.

2. 빌딩 구조물 및 MR 감쇠기 모델

2.1 빌딩 구조물 모델

해석 예제로서는 그림 1과 같이 20층과 12층의 인접한 빌딩 구조물을 사용하였다. 각 빌딩 구조물은 전단 빌딩으로 모델링하였으며, 두 건물 사이에는 2층부터 12층까지 짝수 층에 6개의 MR 감쇠기를 설치하였다. 두 구조물의 질량 및 강성은 실 구조물 규모를 고려하여 1.6×10^6 kg의 동일한 질량을 전 층에 사용하였으며 층간 강성은 20층 구조물에서는 4.0×10^9 N/m, 12층 구조물에서는 2.5×10^9 N/m 값을 사용하였다. 그리고 감쇠는 모드별 감쇠를 고려하였으며 각 모드별로 2%를 가정하였다. 고유치 해석을 통한 20층 빌딩 구조물의 초기 5개 모드의 고유주파수는 0.68, 2.03, 3.37, 4.70, 5.99이고, 12층 빌딩구조물의 초기 5개 모드의 고유주파수는 0.88, 2.63, 4.33, 5.97, 7.51이다.

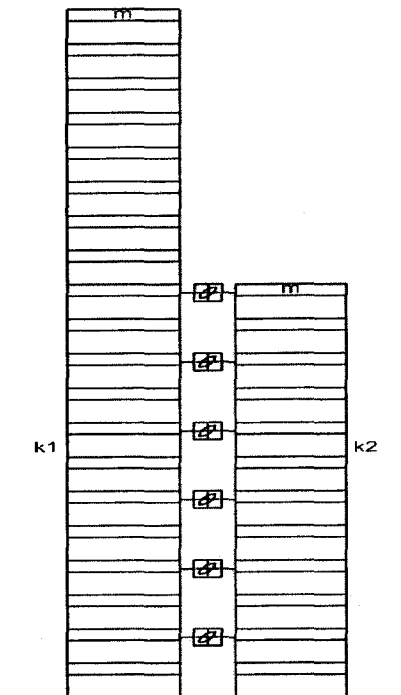


그림 1. 빌딩 구조물의 역학적 모델

2.2 MR 감쇠기 모델

제어시스템의 기동을 정확하게 예측하기 위해서는 제어장치를 얼마나 정확하게 모델링하느냐가 매우 중요하다. 최근 많은 연구자들에 의해 MR 감쇠기 시스템의 여러 역학적 모델들이 제안되었는데, 그 중 그림 2와 같이 점성 감쇠와 Bouc-Wen 요소가 병렬로 연결된 이력모델이 전단형태

의 MR 감쇠기의 거동을 잘 묘사하는 것으로 증명되었다⁽³⁾. 또한 실제 규모의 MR 감쇠기의 모델링에도 적당할 것으로 예측되고 있다⁽⁴⁾. 따라서 이 연구에서는 그림 2와 같은 역학적 모델을 갖는 전단형태의 MR 감쇠기를 사용하였다. 이 감쇠기에서 발생하는 감쇠력은 아래의 식 (1)과 (2)로서 정의된다.

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |\dot{z}|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A_m \dot{x} \quad (2)$$

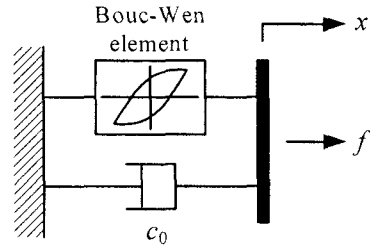


그림 2. MR 감쇠기의 역학적 모델

여기서 x 는 제어장치의 운동거리(stroke)이고, z 는 이력거동에 관계되는 내부변수이다. 식 (2)의 매개변수 γ , β , n , A_m 은 항복 전후의 기울기와 같이 감쇠기의 이력거동의 형상을 결정하는데 쓰이는 변수들이다. 그리고 α 와 c_0 는 감쇠기의 입력전압에 따라 식 (3), (4)로 결정된다.

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \quad (3)$$

$$c_0 = c_0(u) = c_{0a} + c_{0b} u \quad (4)$$

따라서 MR 감쇠기의 입력전압은 식 (3), (4)에 따라 매 순간 변화하는 감쇠력을 결정하게 된다. 또한 입력 전압의 변화에 MR 감쇠기가 반응하는데 걸리는 시간차이(timelag)를 고려하기 위하여 식 (5)의 1차 필터방정식(filter dynamics)을 시스템에 도입하였다.

$$\dot{u} = -\eta(u - \nu) \quad (5)$$

여기서, ν 는 제어기로부터 결정되는 입력전압이고, η 는 필터방정식의 시간상수이다.

Yi 등⁽³⁾은 Washington 대학에서 실험한 실험 결과로부터 비선형 SI(system identification) 기법을 적용하여 1000kN 용량 MR 감쇠기의 모델상수들을 제시하였다(표 1). 여기서, MR 감쇠기는 최대 입력전압이 10V일 때 최대 용량 1000kN을 발휘하도록 스케일링되었다.

표 1. MR 감쇠기 모델의 변수들

Parameter	Value	Parameter	Value
α_a	$1.087 \cdot 10^5 \text{ N/cm}$	A_m	1.2
α_b	$4.962 \cdot 10^5 \text{ N/(cm}\cdot\text{V)}$	n	1
c_{0a}	$4.40 \text{ N}\cdot\text{s/cm}$	β	3 cm^{-1}
c_{0b}	$4.40 \cdot 10^1 \text{ N}\cdot\text{s/(cm}\cdot\text{V)}$	γ	3 cm^{-1}
		η	50 s^{-1}

3. MR 감쇠기의 준능동 퍼지제어

퍼지 이론은 수학적인 식보다는 명제를 사용하는 인간의 추론방법을 이용하여 입력과 출력의 관계를 표현하는 것이다. 따라서 사용자에게 친숙한 언어로서 입·출력 관계를 구성할 수 있으며, MR 감쇠기와 같이 강한 비선형 이력거동을 보이는 시스템에도 적용될 수 있는 효과적인 방법으로 널리 인식되고 있다⁽⁵⁾.

퍼지이론에서 입력정보는 물리적 의미를 갖는 값으로서, 이 연구에서는 MR 감쇠기의 입력전압을 크게 할 것인지 작게 할 것인지를 판단하기 위하여 MR 감쇠기의 속도를 입력정보로 사용하였다. 퍼지화 과정에서 MR 감쇠기의 속도 등의 입력정보는 이해하고 다루기 쉬운 언어(입력퍼지변수)로서 변환되며, 전문가의 결정이 포함될 수 있는 추론과정을 통해 역시 동일한 형태의 언어(출력퍼지변수)로서 출력된다. 추론과정으로부터 얻어진 출력퍼지변수는 비퍼지화 과정을 통하여 물리적 의미를 갖는 값, 여기서는 MR 감쇠기의 입력전압 값으로 최종 변환된다.

퍼지화 또는 비퍼지화 과정에서는 물리적 의미를 가지는 입·출력정보를 몇 개의 언어(퍼지변수)로 상응시키는 연결 고리가 필요하게 되는데, 이것을 소속함수(membership function)를 통해 구현할 수 있다. 입력 소속함수는 주어진 정보의 크기에 따라 몇 개의 퍼지변수로 정의된다. 이 연구에서는 MR 감쇠기의 상대속도에 대해 삼각형 형태의 소속함수를 11개 사용하였다. 출력정보에 대해서는 6개의 삼각형 소속함수를 사용하여 MR 감쇠기의 입력전압을 표현하도록 하였다. 이 연구에서 사용한 퍼지변수와 입력 및 출력 소속함수를 그림 3과 그림 4에 도시하였다. 그림에서 \dot{x} 은 MR 감쇠기의 상대속도이며 \dot{x}_{max} 는 상대속도의 최대값이다. 그리고 v_i 는 MR 감쇠기의 입력전압이다.

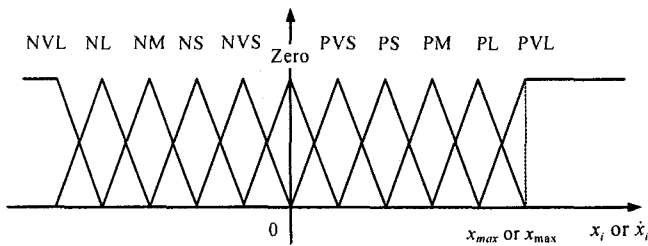


그림 3. 입력 소속함수

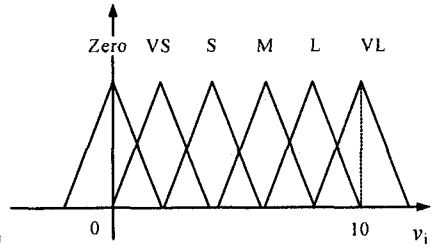


그림 4. 출력 소속함수

입·출력 퍼지변수 사이의 상관관계를 구성하는 추론과정은 각 변수들의 조합을 식 (6)과 같은 *if-then* 조건식으로 표현하는 것이 일반적이다.

$$\text{퍼지규칙 : } \textit{If } \dot{x}_i \textit{ is PS, then } v_i \textit{ is S.} \quad (6)$$

위와 같은 *if-then* 조건식으로 표현되는 입·출력 관계(input-output relationship)는 퍼지 규칙표(fuzzy rule table)로서 정리될 수 있다. 이 연구에서는 MR 감쇠기의 상대속도만을 입력정보로 하는 단일 입·출력 퍼지제어기를 사용하였으며 퍼지제어기의 퍼지 규칙표는 입력의 절대값 크기

가 클수록 큰 출력을 내는 비례관계를 사용하여 표 2와 같이 구성하였다.

표 2. 퍼지규칙 표

Rule	\dot{u} (Relative velocity across MR damper)										
	NVL	NL	NM	NS	NVS	Zero	PVS	PS	PM	PL	PVL
Output	VL	L	M	S	VS	Zero	VS	S	M	L	VL

박관순 등⁽⁶⁾에서 알 수 있듯이, 퍼지시스템의 설계는 입·출력 소속함수 및 퍼지 규칙표의 결정을 의미한다. 따라서 정의된 퍼지 규칙표에 대하여 입·출력 소속함수를 결정함으로써 퍼지 제어 시스템을 설계할 수 있다. 출력 소속함수는 MR 감쇠기의 입력전압을 결정하게 되므로, 0~10V를 균등 분할하는 6개의 삼각형 소속함수로서 모든 감쇠기에 동일하게 정의하였다. 입력 소속함수는 역시 각 입력정보에 대하여 균등 분할하는 11개의 소속함수로 정의하였으며 두 건물 꼭대기 층의 가속도와 변위를 가능하면 동시에 줄이도록 설계하였다. 이 때 설계된 MR 감쇠기에 대한 각 위치별 입력 소속함수의 최대값은 표 3과 같다.

표 3. 퍼지 제어시스템의 입력 소속함수의 최대값

MR 감쇠기의 설치위치	입력 소속함수의 최대값 상대속도(x_{max}) (m/s)
2층	0.1294
4층	0.0824
6층	0.4114
8층	0.1294
10층	0.1920
12층	0.1607

4. 해석 결과 및 토의

12층과 20층의 빌딩 구조물을 연결하는 6개의 준능동 MR 감쇠기의 내진성능 평가를 위하여 다양한 특성을 띄는 7개의 역사지진에 대한 지진응답해석을 수행하였다. 지진입력으로는 El Centro (1940), Mexico (1985), Gebze (1999), Kobe (1995), Northridge (1994), Hachinohe (1968), Taft (1952) 지진을 사용하였으며 입력전압을 10V로 고정한 수동 제어시스템과 퍼지 준능동 제어시스템에 대한 응답을 비교 평가하였다.

그림 5는 Kobe 지진에 대한 각 층의 변위 응답의 최대값을 나타낸 것이다. 양쪽 건물 모두 비제어시 보다 MR 감쇠기를 사용하여 각 층의 응답을 줄일 수 있었다. 그러나 수동제어와 비교했을 때 준능동 제어방법에 있어서의 응답 개선효과는 거의 없었다. 이러한 경향은 El Centro 지진에서도 유사하게 나타났다. 그림 6은 Northridge 지진에 대한 변위 응답의 최대값을 그린 것이

다. 여기서는 Kobe 지진과 달리 12층 건물에서는 변위 응답을 거의 줄이지 못한 반면 20층 건물의 변위는 잘 감소시키고 있는 것을 볼 수 있다. 수동제어와 비교했을 때는 역시 큰 이득이 없는 것으로 나타났다. 다음으로, Gebze 지진에 대한 변위응답을 나타낸 그림 7에서는 20층 건물의 변위를 감소시킨 반면 12층 건물의 변위는 오히려 증가하였다. 즉, 한쪽 건물의 응답을 줄이면서 다른 쪽 건물의 응답이 증가하는 trade off가 발생했다. Hachinohe 지진에서는 이와는 반대로 12층 건물의 변위를 감소시키면서 20층 건물의 변위 응답이 증가하는 경향을 보였다. 그림 7에서 20층 건물의 변위 감소 효과는 수동 및 준능동 제어시스템에서 유사한 수준을 보였으나 12층 건물에서의 변위 증가는 수동제어보다 준능동 제어시스템이 다소 작게 나타남으로써 이러한 양 건물간 trade-off를 준능동 퍼지 제어기법이 상대적으로 효과적으로 조절하고 있음을 확인할 수 있었다. 그림 8에서는 Mexico 지진에 대한 변위 응답의 최대값을 나타내었는데 20층 건물의 저층부에서는 비제어시보다 응답을 감소시켰으나 고층부로 갈수록 비제어시보다 응답이 다소 증가하는 경향을 보였다. 그러나 이러한 증가량은 준능동 퍼지 제어시스템에서 상대적으로 작게 발생하였다. 또한, 12층 건물에서는 수동제어시스템에 의하여 응답이 크게 감소하고 있으나 준능동 제어시스템에서는 이러한 응답의 감소효과는 더욱 크게 발생하였다. 따라서 두 빌딩의 응답제어간 trade-off를 준능동 제어시스템이 더욱 효과적으로 조절하고 있음을 알 수 있다. Taft 지진에서도 이와 유사한 결과를 보였다.

이상의 결과를 정리하면, 수동 또는 준능동 MR 감쇠기를 사용함으로써 두 빌딩에서 모두 변위 응답을 저감시킬 수도 있으나 입력지반운동의 특성에 따라 특정 지진에서는 하나의 빌딩에서만 응답감소효과를 보이는 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 Gebze, Hachinohe 그리고 Mexico 지진 등에서는 하나의 빌딩에서는 응답이 감소한 반면 다른 빌딩에서는 비제어시보다 오히려 응답이 증가하는 경향을 보였다. 이는 두 건물을 연결함으로써 하나의 시스템으로 구성됨에 따라 발생하는 제어성능의 trade-off라 할 수 있다. 특히 동적 특성이 고정되는 수동형 시스템에서는 이러한 trade-off는 당연한 결과라 할 수 있는데, 준능동 제어시스템의 효율성을 극대화하기 위해서는 이러한 trade-off를 보다 잘 조절함으로써 응답의 증가폭을 최대한으로 줄여주는 알고리즘 개발이 필요할 것으로 판단된다.

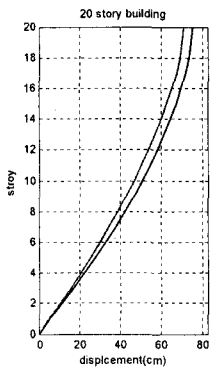


그림 5. Kobe 지진에 대한 변위응답

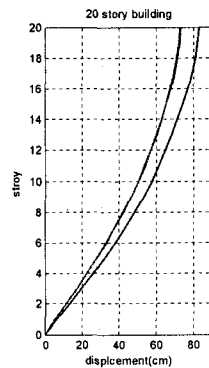
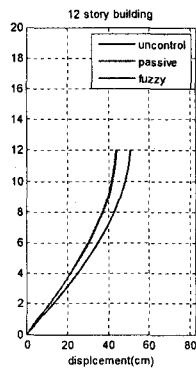


그림 6. Northridge 지진에 대한 변위응답

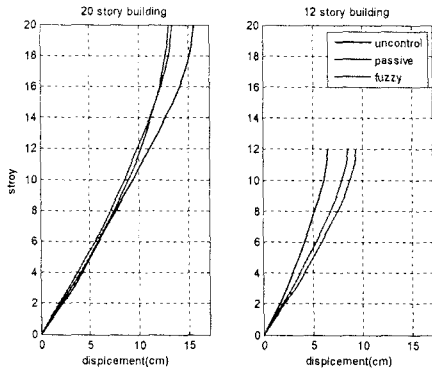


그림 7. Gebze 지진에 대한 변위응답

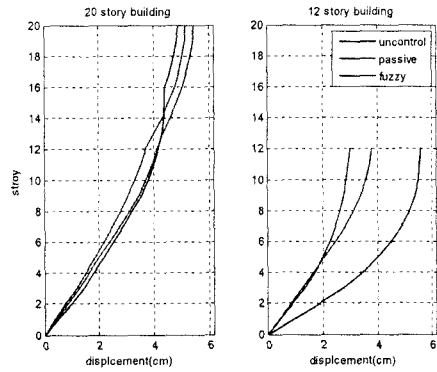


그림 8. Mexico 지진에 대한 변위응답

5. 결론

독립된 두 건물이 서로 가깝거나 하나의 건물이 여러 목적을 위해 두 개의 건물로 분리 설계되었을 경우 각 건물의 서로 다른 주기 특성으로 인해 지진 시 두 건물 사이에 충돌이 일어날 가능성이 높아진다. 따라서 인접건물 사이에 감쇠기 형태의 에너지 소산장치를 설치하여 연결함으로써 지진 응답을 줄이고 내진 성능을 향상시킬 수 있는 연구가 수행되었다.

이 연구에서는 최근 수동형 제어시스템과 능동형 제어시스템의 장점을 모두 발휘할 수 있는 장점으로 인하여 각광을 받고 있는 준능동 MR 감쇠기를 고려하였으며, 준능동 제어방법으로 퍼지 제어기법을 적용함으로써 두 건물의 지진 응답 감소와 내진성능을 평가하고자 하였다. 제시하는 방법의 효율성을 평가하기 위하여 최대 용량으로 운용되는 수동형 MR 감쇠기를 적용하여 다양한 지진하중에 대해 그 응답을 비교하였다.

해석 결과 준능동 MR 감쇠기를 사용하여 양쪽 건물 모두의 변위 응답을 저감시킬 수는 있었으나, 입력지반운동의 특성에 따라 한쪽에서만 이득을 보는 경우뿐만 아니라 다른 한쪽에서는 손해를 보는 trade-off가 발생하기도 한다는 것을 알 수 있었다. 이처럼 제어시스템을 장착함으로써 특정 지진에서 발생하는 응답의 증가에 있어서 수동제어시스템보다는 준능동 퍼지 제어시스템에서의 증가량이 상대적으로 작음으로써 두 건물간 응답 조절의 trade-off를 퍼지 제어방법이 효과적으로 대처하고 있음을 확인하였다. 하지만 제어시스템의 효율성 측면에서 다양한 입력지반운동에 대한 보다 효율적인 준능동 제어 알고리즘 개발이 필요할 것으로 판단되며 이에 대한 후속 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 2005년 정부의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2005-003-D00422) 및 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Zhang, W. S. and Xu, Y. L., "Dynamic Characteristics and Seismic Response of Adjacent Building Linked by Discrete Dampers," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, 1999, pp. 1163-1185.
2. 김진구, 류진국, "신축이음부에 설치된 점탄성감쇠기를 이용한 구조물의 진동제어," 한국지진공학회 논문집 8권 4호, 2004, pp. 33-42.
3. Yi, F., Dyke, S. J., Caicedo, J. M. and Carlson, J. D., "Experimental Verification of Multiinput Seismic Control Strategies for Smart Dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 127, No. 11, 2001, pp. 1152-1164.
4. Yoshida, O. and Dyke, S. J., "Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, No. 4, 2004, pp. 386-392.
5. Passino, K. M. and Yurkovich, S., *Fuzzy Control*, Addison Wesley Longman, Inc., 2725 Sand Hill Road, Menlo Park, California, 1998, pp. 475.
6. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "MR Damper가 장착된 교량구조물의 준능동 퍼지제어", 대한토목학회 논문집, 22권 4-A호, 2002, pp. 847-857.