

# 20층 비선형 벤치마크 빌딩에 대한 MR 유체 감쇠기의 최적위치 결정

## Optimal placement of MR dampers for 20-story nonlinear benchmark building

장종우\*      조상원\*\*      윤우현\*\*\*      이인원\*\*\*\*  
Jang, Jong Woo    Cho, Sang Won    Yoon, Woo Hyun    Lee, In Won

---

### ABSTRACT

The objective of optimal placement of dampers for a structure is to maximize the effectiveness of the vibration control with the same number of dampers. While many optimal placement methods of linear viscous dampers have been proposed and used, there are only a few methods for MR dampers. Here some optimal location indices for MR dampers are proposed, which are similar to those for linear viscous dampers and show how large the structural responses on each floor are. Every time an additional MR damper is implemented, the optimal location index on each floor is measured, and then the next damper is installed on the floor with the maximum location index.

In these sequential procedures, the peak interstory drift, the peak interstory velocity and the absolute acceleration of each floor are selected as the optimal location indices. Four different earthquakes with various scales are loaded to the 20-story nonlinear benchmark building model (Otori et al. 2000, 2002). Passive On/Off algorithms are used in order to represent the control algorithm of MR dampers.

---

### 1. 서 론

빌딩이나 교량 구조물에 있어서 감쇠기의 최적 위치를 결정하는 목적은 같은 개수의 감쇠기를 사용할 때 구조물의 진동 제어 효과를 최대로 하고, 나아가 구조물에 설치하는 감쇠기의 개수를 줄이는 데 있다. 수동 제어의 방법으로 널리 쓰이는 선형 점성 감쇠기의 경우 구조물의 응답이 큰 위치에 감쇠기를 설치할수록 감쇠기가 발휘하는 성능이 더욱 커진다. 이러한 원리를 이용하여 지금까지 SSA(Sequential search algorithm)

---

\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정  
\*\* 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사  
\*\*\* 정회원 · 경원대학교 산업환경대학원 부교수 · 공학박사  
\*\*\*\* 정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사

나 SSSA(Simplified sequential search algorithm) 등 선형 점성 감쇠기의 최적 위치를 결정하는 순차적인 방법들이 많이 제안되었다. SSSA는 구조물의 응답을 측정하는 지수를 제안한 다음 감쇠기를 하나씩 설치할 때마다 모든 층에 대해 제안된 지수의 값을 구한다. 그리하여 지수의 값이 가장 큰 층에 다음 감쇠기를 하나씩 순차적으로 설치해가는 방법이다.

MR 유체 감쇠기의 경우 선형 점성 감쇠기보다 제어 알고리즘이 훨씬 복잡하며 아직까지 검증되고 널리 사용되어지고 있는 최적 위치를 결정하는 방법이 거의 없다. 여기서는 선형 점성 감쇠기와 같은 착상으로 구조물의 응답을 측정하는 지수를 제안하여 MR 유체 감쇠기의 최적 위치를 순차적으로 결정하고자 한다. 이러한 순차적인 방법은 간단한 원리를 이용하면서도 절차 또한 비교적 간단하고 쉽다.

## 2. MR 유체 감쇠기

MR 유체 감쇠기는 그림 1와 같이 Bouc-Wen 모델과 단순한 댐퍼 모델의 결합으로 표현한다. (Yi et al. 1999, 2001; Dyke et al. 1999; Jansen and Dyke 2000). 식 (1)은 Bouc-Wen 모델과 단순 댐퍼 모델이 발현하는 힘의 합으로 최종적으로 하나의 감쇠기가 일으키는 힘의 크기를 말한다. 감쇠기에 의해 발현되는 제어력은 식 (2)에서 (5)을 사용하여 계수와 상태 값들을 구한 다음, 식 (1)에 대입하여 구한다. 식 (2)부터 (5)에 사용되는 감쇠기의 물성치는 표 1과 같다. 자기유변유체 감쇠기의 제어 알고리즘은 여러 가지가 있지만 여기서는 Passive-On과 Passive-Off 모드만을 고려한다.

$$f = c_0 \dot{x} + \alpha z \tag{1}$$

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \tag{2}$$

$$\alpha = \alpha(u) = \alpha_a + \alpha_b u \tag{3}$$

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

$$\dot{u} = -\eta(u - v) \tag{5}$$

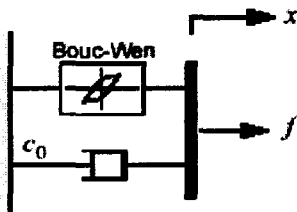


그림 1 MR 유체 감쇠기의  
거동 모델

기호	크기	기호	크기
$\alpha_a$	$1.0872 \times 10^5 N/cm$	$\alpha_b$	$4.9616 \times 10^5 N/(cm \cdot V)$
$c_{0a}$	$4.40 N \cdot sec/cm$	$c_{0b}$	$44.0 N \cdot sec/(cm \cdot V)$
$n$	1	$A$	1.2
$\gamma$	$3 cm^{-1}$	$\beta$	$3 cm^{-1}$
$\eta$	$50 sec^{-1}$		

표 1 MR 유체 감쇠기의 물성치

### 3. MR 유체 감쇠기 최적 위치 결정 방법의 제안

식 (6)은 선형 점성감쇠기의 최적 위치를 결정하기 위해 SSSA에서 사용하는 최적 위치 결정 지수이다. 각 층의 최대 층간 변위와 층간 상대속도에 일정한 가중치를 곱한 다음 더한 것이다 (T.T.Soong 2002). 여기서  $\delta_i$ 는 각 층의 최대 층간 변위를,  $\dot{\delta}_i$ 는 각 층의 최대 층간 상대속도를 말한다. 감쇠기의 개수가 증가할 때마다 모든 층에 대해 최적 위치 결정 지수의 값을 구한 다음 최대값을 갖는 층에 다음 감쇠기를 순차적으로 설치한다. 하지만 각 응답의 가중치는 SSSA에서도 아직까지 명확하게 정해져 있지 않다.

$$\gamma_i = \alpha_1 \delta_i + \alpha_2 \dot{\delta}_i \quad (6)$$

MR 유체 감쇠기의 최적 위치를 결정할 때에도 선형 점성 댐퍼와 같은 원리로 구조물의 응답을 측정하는 지수를 제안한 다음 MR 유체 감쇠기의 최적 위치를 순차적으로 결정하고자 한다. 또한 각 층의 절대 가속도에도 가중치를 부여하여 지수를 제안하고자 한다. MR 유체 감쇠기의 경우에도 각 응답에 대한 가중치가 정해져 있지 않기 때문에 가중치를 결정하기 전에 층간 변위, 층간 상대속도와 각 층의 절대가속도 중 하나만을 지수로 사용하여 최적 위치를 구한 다음 각 경우의 성능을 평가한다. 그런 다음 각각의 최적 위치 결정 지수의 성능에 따라 가중치를 결정하고 최종적인 최적 위치 결정 지수를 제안하고자 한다.

MR 유체 감쇠기의 최적 위치를 구하는 차례는 다음과 같다.

- (a) MR 유체 감쇠기의 최적 위치 결정 지수를 제안한다.
- (b) 감쇠기를 하나도 달지 않은 상태에서 모든 층에서의 최적 위치 결정 지수의 값을 구한다.
- (c) 최대 지수 값을 갖는 층에 첫 번째 감쇠기를 설치하고, 그 상태에서 다시 모든 층에서의 최적 위치 결정 지수의 값을 구한다.
- (d) 최대 지수 값을 갖는 층에 다음 감쇠기를 설치한다.
- (e) 감쇠기 설치를 마칠 때까지 다음 과정을 반복한다.

## 4. 수치 해석 결과

### 4. 1. 예제 구조물

여기에서 사용되는 빌딩 구조물은 3rd Generation Benchmark Problem에서 사용한 20층 비선형 벤치마크 빌딩이다 (Otori et al. 2000, 2002). 빌딩의 규모는 가로 30.48 m, 세로 36.58 m, 높이 80.77 m이며 지하 2층까지 포함한다. 남북 방향으로는 다섯 구획, 동서 방향으로는 여섯 구획으로 나누어진다. 각 절점마다 수직 방향과 수평 방향, 그리고 두 방향 축으로 이루어진 면에 대한 회전축 방향의 세 개의 자유도를 가지고 있다. 빌딩 전체가 138개의 절점으로 이루어졌으므로 자유도는 총 414개이다.

구조물의 감쇠 행렬은 Rayleigh 행렬로 가정하였으며 강한 지진 하중을 받는 동안에는 구조물은 비선형 거동을 한다. 이러한 비선형 거동은 그림 2과 같이 Bilinear 이력 현상 모델로 표현하였다 (Otori et al. 2000, 2002).

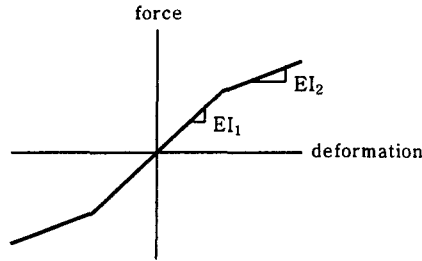


그림 2 Bilinear 이력현상 모델

	El Centro	Hachinohe	Northridge	Kobe
최대 지진 가속도	0.349g	0.230g	0.844g	0.834g

표 2 각 지진의 최대 가속도

#### 4. 2. 수치 해석 결과

구조물에 가하는 하중은 여러 가지 지진하중이다. 표 2에서 나타난 각 지진의 최대 가속도를 중력 가속도 단위로 나타낸 것이다. El Centro 지진과 Hachinohe 지진은 약한 지진이며, Northridge 지진과 Kobe 지진은 상대적으로 강진에 속하다.

MR 유체 감쇠기의 제어는 Passive-On 알고리즘을 사용하고 층간 변위와 층간 상대속도 중 하나를 지수로 사용할 경우 각 지진하중에 대한 감쇠기의 최적 위치는 그림 3과 그림 4와 같다. 모든 경우에 구조물에 설치한 감쇠기의 개수는 25개로 동일하다.

El Centro나 Hachinohe 지진의 경우는 최적위치 분포가 서로 비슷하지만 상대적으로 강도가 큰 지진인 Northridge나 Kobe 지진의 경우와는 다소 차이가 있다. 하지만 네 지진 모두 층간 변위를 지수로 사용할 경우 1층에 몇 개 설치하고 상부층들에 설치한 다음 전 층에 걸쳐 골고루 설치되는 순서를 보인다. 다만 Northridge나 Kobe 지진의 경우 강도가 크기 때문에 다음 설치 단계로 넘어가기 위해 필요한 감쇠기의 개수가 El Centro나 Hachinohe 지진보다 많으며 이와 같은 경향이 뚜렷하게 보이지 않을 뿐이다. 따라서 네 지진의 최대 가속도를 동일하게 표준화하거나 감쇠기의 사이즈를 더욱 크게 하면 감쇠기의 최적 위치 분포는 더욱 비슷해 질 것이다. 층간 상대속도를 지수로 사용할 때 역시 감쇠기가 설치되는 순서가 층간 변위 지수와 다를 뿐 마찬가지이다.

그림 5와 그림 6이 Northridge와 Kobe 지진의 최대 가속도를 El Centro 지진과 동일하게 표준화한 다음 감쇠기의 최적 위치를 나타낸 그래프이다. 층간 변위와 층간 상대속도를 최적 위치 결정 지수로 사용할 경우 모두 El Centro와 Hachinohe 지진에서의 결과와 비슷해진 것을 알 수 있다.

표 3는 층간 변위와 층간 상대속도를 최적 위치 결정 지수로 사용할 경우와 벤치마크 문제에서의 제어 성능을 비교한 표이다. 벤치마크 문제에서는 1층에 네 개, 2, 3층에 두 개, 나머지 층에는 한 개씩, 총 25개의 감쇠기를 설치하였다 (Yoshida and Dyke 2002). 지진의 강도가 작은 El Centro나 Hachinohe 지진의 경우에는 층간 변위를 지수로 사용한 경우가 가장 좋은 성능을 보인다. 지진의 강도가 큰 Northridge나 Kobe 지진

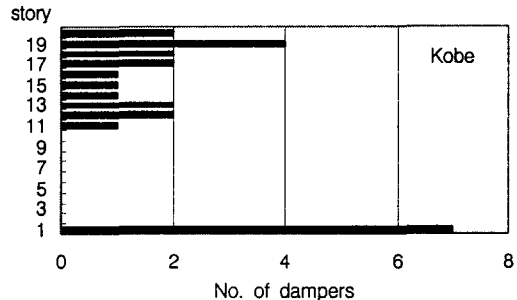
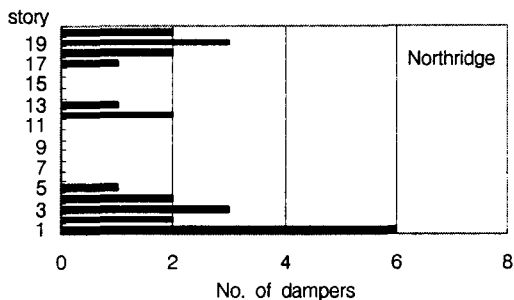
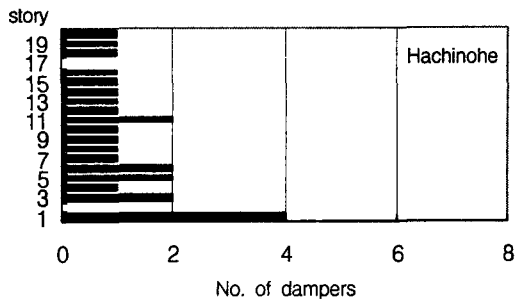
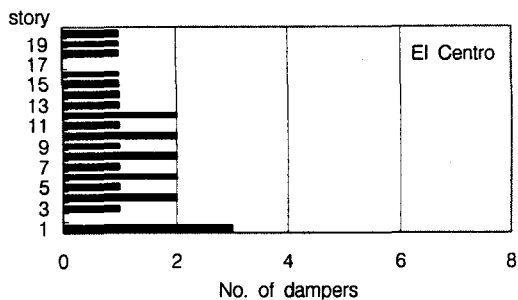


그림 3 층간 변위를 지수로 사용할 경우 25개 감쇠기의 최적 위치

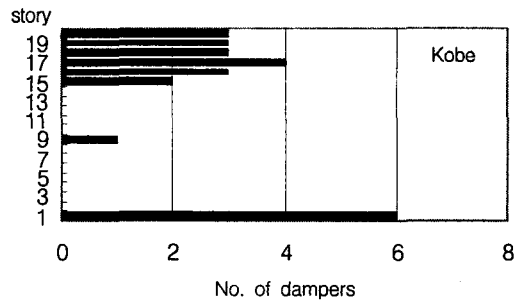
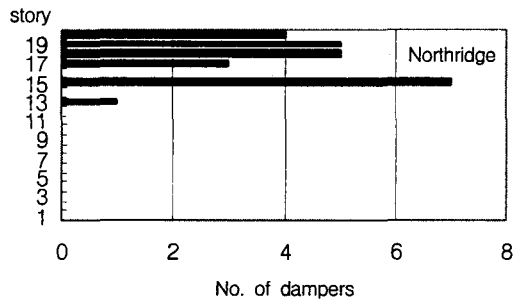
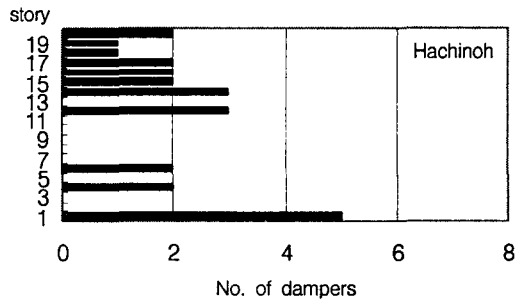
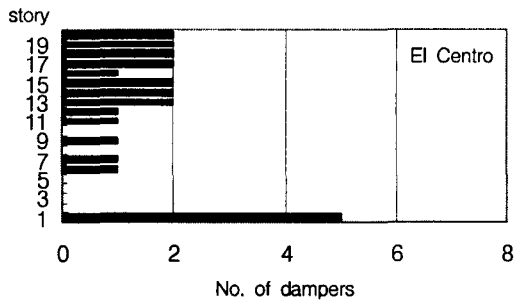


그림 4 층간 상대속도를 지수로 사용할 경우 25개 감쇠기의 최적 위치

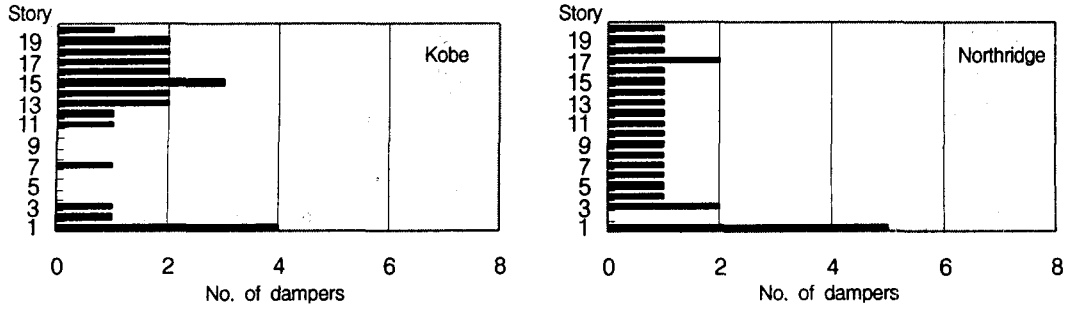


그림 5 Normalizing 이후 층간 변위를 지수로 사용할 경우 25개 감쇠기의 최적 위치

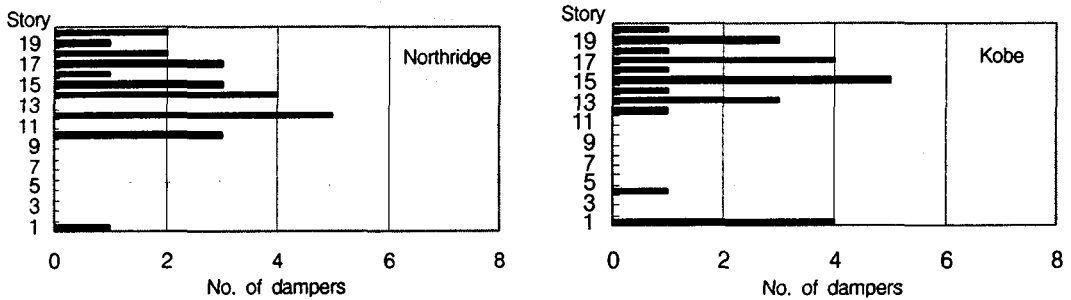


그림 6 Normalizing 이후 층간 상대 속도를 지수로 사용할 경우 25개 감쇠기의 최적 위치

표 3 서로 다른 감쇠기의 위치에 따른 평가지수의 비교

	층간 변위	층간 상대속도	벤치마크 문제
J1	0.569	0.739	0.612
J2	0.550	0.735	0.599
J3	0.824	0.903	0.976

(a) El Centro 지진

	층간 변위	층간 상대속도	벤치마크 문제
J1	0.635	0.870	0.683
J2	0.844	0.871	0.845
J3	1.012	1.223	0.995

(b) Hachinohe 지진

	층간 변위	층간 상대속도	벤치마크 문제
J1	0.677	0.899	0.766
J2	1.276	1.500	1.132
J3	1.134	0.985	1.133

(c) Northridge 지진

	층간 변위	층간 상대속도	벤치마크 문제
J1	0.519	0.563	0.700
J2	0.937	0.843	1.062
J3	1.230	1.063	1.213

(d) Kobe 지진

에서는 층간 변위와 층간 상대속도를 사용한 경우가 골고루 좋은 성능을 보인다. 여기서 J1은 최대 층간 변위, J2는 최대 절대가속도를, 그리고 J3는 최대 저면 전단력을 나타내는 평가 지수이다.

하지만 각 층의 절대 가속도를 최적위치 결정의 지수로 사용하면 특정한 층에만 계속 설치가 된다. 또한 평가 지수들도 감쇠기의 개수가 증가함에 따라 처음에는 줄어들다가도 계속 증가한다. 그림 7과 8은 El Centro와 Kobe 지진의 경우 감쇠기가 증가할수록 변하는 평가 지수의 그래프이다. 표 4와 표 5는 El Centro와 Kobe 지진의 경우 감쇠기를 차례대로 설치하는 층을 의미한다. 표에서 알 수 있듯이 몇 개의 감쇠기를

설치한 이후에는 특정한 층에만 계속 설치가 된다. 따라서 각 층의 절대 가속도를 최적위치 결정의 지수로 사용하는 것은 적절치 않다. 이는 다른 지진 하중들의 경우에도 마찬가지이다.

제어 알고리즘 중 Passive-Off 알고리즘을 사용하면 감쇠기 하나만의 제어 효과가 매우 미미하기 때문에 특정한 한 층에만 계속 설치된다. 층간 변위를 지수로 사용하면 El Centro 지진의 경우 1층에만, Kobe 지진의 경우 19층에만 감쇠기가 설치된다. 층간 상대속도를 지수로 사용하면 두 지진 모두 20층에만 설치가 된다. 평가지수를 비교해 보면 1층에만 설치하는 경우를 제외하고는 모두 벤치마크 문제에서보다 더 나은 성능을 보인다 (표 6). 하지만 특정한 한 층에만 감쇠기를 설치하는 결과를 실제로 적용하기는 어렵다.

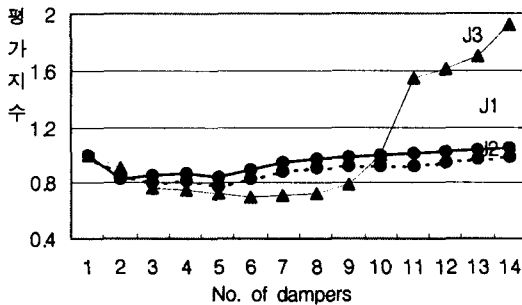


그림 7 각 층의 절대 가속도를 지수로 할 경우 평가 지수의 변화 (El Centro 지진)

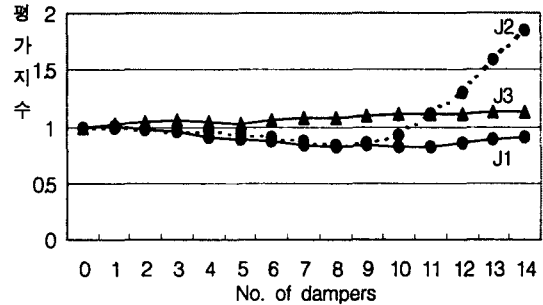


그림 8 각 층의 절대 가속도를 지수로 할 경우 감쇠기의 설치 순서 (Kobe 지진)

감쇠기의 설치 순서 (숫자는 설치된 층을 의미함)														
20	20	20	14	14	14	14	14	14	14	14	13	13	13	...

표 4 각 층의 절대 가속도를 지수로 할 경우 감쇠기의 설치 순서 (El Centro 지진)

감쇠기의 설치 순서 (숫자는 설치된 층을 의미함)														
12	12	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	.....

표 5 각 층의 절대 가속도를 지수로 할 경우 감쇠기의 설치 순서 (Kobe 지진)

	층간 변위	층간 상대속도	벤치마크 문제
J1	0.978	0.861	0.965
J2	0.993	0.953	0.975
J3	0.981	0.906	0.962

(a) El Centro 지진

	층간 변위	층간 상대속도	벤치마크 문제
J1	0.943	0.945	0.999
J2	1.005	0.990	1.026
J3	1.010	0.993	1.004

(b) Kobe 지진

표 6 Passive-Off 알고리즘을 사용할 경우 감쇠기 위치에 따른 평가 지수

## 5. 결론

Passive-on 알고리즘을 사용할 경우 강도가 작은 El Centro와 Hachinohe 지진에서는 층간 변위만을 평가 지수로 사용하는 경우가 성능이 가장 좋고, 강도가 큰 Northridge와 Kobe 지진에서는 층간 변위나 층간 상

대속도를 지수로 한 경우가 끌고루 성능이 좋았다. 해석 결과 지진에 따라 최적위치의 분포가 다소 차이가 있지만 이는 지진의 주파수 특성보다는 강도의 차이 때문이다. 한 지역에 발생하는 지진의 강도는 역사 지진의 자료나 지반의 특성 등 여러 가지 요인에 의해서 어느 정도 예상할 수 있다. 따라서 강도를 정한 인공 지진을 이용하여 그 지역에서의 대상 구조물에 설치하는 감쇠기의 최적위치를 결정할 수 있다.

하지만 각 층의 절대 가속도를 최적위치 결정 지수로 사용하면 특정한 한 층에만 감쇠기가 분포되고 평가 지수도 오히려 증가하므로 적절치 않다. Passive-Off 알고리즘을 사용할 경우에도 한 층에만 감쇠기가 설치되므로 비록 벤치마크 문제보다 성능이 좋을지라도 실제로 적용할 수 없다.

## 감사의 글

본 연구는 2000년도 과학기술부의 국가지정연구실 지원(과제번호:2000-N-NL-01-C-251)으로 이루어진 것으로, 이에 감사의 마음을 전합니다.

## 참고 문헌

1. Osamu Yoshida and Shirley J. Dyke (2002) Seismic control of a nonlinear benchmark building using smart dampers, *Journal of Engineering Mechanics: Special Issue on Structural Control Benchmark Problems*, April 2002.
2. Laura M. Jansen and Shirley J. Dyke (2000) Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study, *Journal of Engineering Structures*, August 2000, pp. 795-803
3. D. Lopez Garcia and T. T. Soong (2002) Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures, *Journal of Structural Control*, Vol. 9 No. 1, pp. 19-30.
4. Bo Wu, Jin-Ping Ou and T. T. Soong (1997) Optimal placement of energy dissipation devices for three-dimensional structures, *Engineering Structures*, Vol. 19 No. 2, pp. 113-125