

## 건축 구조물의 지진응답 제어를 위해 제안된 MR감쇠기 설계 절차의 수치적 검증

### Numerical Verification of the Proposed Design Procedure of MR Damper for Seismic Response Control of Building Structure

이 상 현 \*                      민 경 원 \*\*                      이 루 지 \*\*\*  
Lee, Sang-Hyun,              Min, Kyung-Won,              Lee, Roo-Jee,

---

#### ABSTRACT

In our previous study, we have developed a preliminary design procedure of MR dampers for controlling seismic response of building structures. In this paper, the effectiveness the proposed method is verified through the numerical analysis of the structures with various period and story number, and twenty earthquake loads are used for statistical assessment. The comparison between the proposed method and simplified sequential search algorithm indicates that the capacity, number and the placement of the MR damper which can achieve the given performance objective are reasonably determined using the proposed design procedure.

Keywords : MR damper, Design Procedure, Capacity, Number, Placement

---

#### 1. 서 론

최근 지진하중과 풍하중을 받는 건축 구조물의 진동 제어를 위해 많이 사용되고 있는 감쇠장치의 최적설계에 대하여 많은 연구가 진행되었다 [1]. 최적설계는 주어진 구조물의 설치상의 제한조건과 목표응답수준을 만족시키기 위하여 감쇠장치의 수와 용량을 최소화하고, 이를 달성할 수 있는 설치 위치를 찾는 것이다 [2].

선형감쇠장치의 경우 감쇠장치의 최적형상을 구하기 위한 몇 가지 방법들이 제안되었으나, 비교적 복잡한 알고리즘의 사용을 요구하거나 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있다 [3]. Garcia와 Soong은 선형 점성감쇠기를 사용하여 순차적으로 가장 큰 층간변위가 발생하는 층에 감쇠기를 하나 씩 설치해 가는 단순 순차적 탐색 알고리즘 (simplified sequential search algorithm, SSSA)을 사용하였으며, 이 방법이 전 층에 고루 감쇠기를 설치한 경우와 비교하여 작은 수의 감쇠기로도 동등한 성능을 확보하고 복잡한 방법과 유사한 유효성을 가짐을 보였다 [4]. 그러나 이 방법은 지진하중에 따라 감쇠기의 설치형상이 바뀌고 감쇠기를 설치할 때 마다 시간이력해석을 반복수행해야 하는 단점을 가지고 있다.

저자들은 선행 연구에서, 지진연구를 받는 건축구조물의 진동제어를 위해 많이 사용되는 자기유변

---

\* 서울대학교 공학연구소 객원연구원(lshyun00@msn.com)

\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수

\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 석사과정

(magnetorheological, 이하 MR) 감쇠기 예비설계절차를 제시하였다. MR 감쇠기는 자기신호에 따라 MR유체의 특성을 쉽게 바꿀 수 있으며 대용량의 감쇠력도 감쇠장치 외에 특별한 기계장치 없이 쉽게 구현할 수 있어서 최근 들어 진동제어분야에서 많이 사용되는 준능동 감쇠장치의 하나이다. 기존 연구에서는 MR 감쇠기의 이력특성을 고려하여 감쇠기의 용량, 설치위치, 그리고 설치 개수 등을 체계적으로 제시하는 예비설계절차를 제시하였으며, 이 방법의 유효성을 SSSA방법과 비교하여 검토하였다 [5]. 그러나 선행연구에서는 제안된 방법의 유효성을 단순히 주기 3.5초인 20층 구조물에 대하여만 검토하였고, 사용한 하중도 El Centro 지진하중에만 국한된 한계점을 가지고 있다. 특히 선행연구에서 제안된 최대 제어력을 결정하는 변수였던 밀면전단력에 대한 제어력의 비율을 0.1로 고정시키고 해석하였다.

본 연구의 목적은 선행연구에서 제시되었던 MR감쇠기 예비설계절차의 유효성을 다양한 주기와 층수를 가지는 구조물, 다양한 지진하중, 그리고 다양한 최대제어력에 대하여 수치적으로 검증하는 것이다. 특히, 지진응답은 주기와 주어진 하중에 따라 크게 달라진다는 점을 고려할 때, 이러한 검토는 반드시 수행되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 Garcia와 Soong이 점성감쇠기의 SSSA설계방법의 유효성을 검토하기 위해 사용했던 해석모델인 0.4초, 0.8초, 1.2초, 1.6, 2.0초의 주기를 가지고 층수는 4층, 8층, 12층, 그리고 16층인, 즉 주기별로 4개의 다른 층수를 가지는 모두 20개의 구조물과 20개의 지진을 사용한 평균응답을 구하여 제안된 방법의 유효성을 검토하였다. 감쇠기를 전 층에 고루 분포시키는 방법 (uniformly distributed damping system, UDDS), SSSA, 그리고 제안된 방법의 유효성을 비교하였다. 처음으로 기준 목표응답수준을 결정하는 UDDS방법에 의한 변위성능지수의 최대제어력의 변화에 따른 변화를 구하였으며, 목표응답수준을 달성하기 위해 요구되는 감쇠기의 수, 설치위치, 그리고 분포형상을 구하였다.

## 2. 해석모델 및 하중

### 2.1 MR감쇠기 모델

MR 감쇠기의 힘 속도 관계는 일반적으로 이력특성을 가지고 있지만 Bingham 모델과 이점성모델은 이러한 이력특성을 고려하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 Wereley가 제안한 다음과 같은 이력 이점성 모델을 사용하였다 [6].

$$F_{MR} = \begin{cases} C_1\dot{x} - f_y & \dot{x} < -\dot{x}_1 & \ddot{x} > 0 \\ C_0(\dot{x} - v_o) & -\dot{x}_1 \leq \dot{x} < \dot{x}_2 & \ddot{x} > 0 \\ C_1\dot{x} + f_y & \dot{x}_2 \leq \dot{x} & \ddot{x} > 0 \\ C_1\dot{x} + f_y & \dot{x}_1 \leq \dot{x} & \ddot{x} < 0 \\ C_0(\dot{x} + v_o) & -\dot{x}_2 \leq \dot{x} < \dot{x}_1 & \ddot{x} < 0 \\ C_1\dot{x} - f_y & \dot{x} < -\dot{x}_2 & \ddot{x} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

$$\dot{x}_1 = \frac{f_y - C_o\dot{x}_o}{C_o - C_1}, \quad \dot{x}_2 = \frac{f_y + C_o\dot{x}_o}{C_o - C_1}$$

이고,  $f_y$ 는 최대마찰력,  $C_1$ 는 점성계수,  $\nu_0$ 는 저속도 영역의 이력곡선의 폭을 결정하는 변수,  $C_0$ ,  $C_1$ 는 각각 저속도와 고속도 영역의 점성계수를 나타낸다.

## 2.2 예제 구조물

Garcia와 Soong이 점성 감쇠기의 SSSA설계방법의 유효성을 검토하기 위해 사용했던 해석모델인 0.4초, 0.8초, 1.2초, 1.6, 2.0초의 주기를 가지고 층수는 4층, 8층, 12층, 그리고 16층인, 즉 주기별로 4개의 다른 층수를 가지는 모두 20개의 구조물을 사용하여 제안된 방법의 유효성을 검토하도록 한다. 표 1과 2는 각각 사용한 예제구조물의 주기와 층수에 따른 층 강성과 층 질량을 보여준다.

표 1 예제 구조물의 강성

Story stiffness(kN/cm)				
Story	Building model			
	4-Story	8-Story	12-Story	16-Story
1-4	1000	1000	1000	1000
5-8		850	850	850
9-12			725	725
13-16				820

표 2 예제 구조물의 질량

Story mass(kg)				
Fundamental period(s)	Building model			
	4-Story	8-Story	12-Story	16-Story
0.40	48880	13300	5870	3210
0.80	195530	53200	23490	12820
1.20	439950	119700	52860	28850
1.60	782140	212800	93970	51290
2.00	1222090	332500	146830	80150

## 2.3 성능지수

제어알고리즘 및 감쇠장치의 유효성을 평가하기 위해서는 다양한 성능지수가 사용되며, 실제로 Benchmark문제에서는 주어진 성능지수를 기준으로 다양한 제어기법의 성능을 비교한다 [7]. 이러한 성능지수는 구조물의 응답에 관련된 항과 감쇠기에 관련된 항으로 구분된다. 그러나 본 연구에서는 구조물의 지진응답을 나타내는 지표 중 가장 중요한 최대 층간변위에 대한 성능지수만을 비교함으로써 비교를 단순화 하도록 한다. 본 연구에서는 각 성능지수 산정 시 가속도 성능지수를 고려하지 않았다. 감쇠기의 수가 전 층에 다 설치된 경우를 제외하고는 비제어시보다 절대가속도 응답을 증가시키는 경향이 있다. 이것은 MR 감쇠기의 수가 작은 경우에는 층간변위가 크게 발생하는 곳에 큰 용량을 가지는 감쇠기를 집중시키고, 층전단력에 비해 과도하게 큰 제어력이 가해지는 층의 급격한

응답의 변화를 가져와 최대절대가속도 응답을 증가시켰기 때문이다.

$$J_1 = \max_{i=1, \dots, n} \left\{ \frac{\max_t |d_i(t)|}{d_n^{\max}} \right\} \quad (2)$$

### 3. MR 감쇠기 층별 분포

감쇠기의 최적위치와 개수에 대한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔다. 감쇠기의 배치와 설계방법에 따라서 제어효과가 달라질 수 있으므로 주어진 설계제한 조건 내에서 최대의 제어효과를 갖는 방법이 필요하기 때문이다. 그 중에서 주어진 용량을 가지는 하나의 감쇠기를 설치할 때마다 수치해석을 반복 수행하여, 최대층간변위나 혹은 최대층간속도를 가지는 층에 순차적으로 설치해 가는 SSSA가 이용되고 있으며, Shulka와 Datta는 점탄성감쇠기에, Garcia와 Soong은 점성감쇠기에 적용하여 그 유효성을 검증하였다. 그러나, 이러한 SSSA는 감쇠기의 제어력이 바뀌지 않는 수동형 감쇠기의 경우에만 적합하며, MR감쇠기와 같이 자기장의 신호에 따라 감쇠기의 최대제어력의 크기가 바뀌는 준능동 감쇠기에는 적용하기 어렵다. 특히, 하중의 특성에 따라 최적위치가 바뀌는 특성을 가지고 있다. 만일, SSSA를 MR감쇠기에 적용하기 위해서는 감쇠기의 상태를 일정한 양의 전류를 고정시켜 가하는 passive-on 상태로 가정한 후 특정한 하중에 대한 설계를 수행해야 하며, MR감쇠기의 특성이나 하중이 바뀌는 경우에는 passive-on 상태로 특정하중에 대하여 구한 위치가 최적위치가 아닐 수 있다.

우선 모든 사용한 방법들의 총 용량은 다음 식에 의해 주어진다.

$$\sum_{j=1}^{n_d} f_{yj} = \rho \sum_{i=1}^n K_i S_{di} \quad (3)$$

여기서,  $f_{yj}$ 는  $j$ 층에 설치된 MR감쇠기의 최대마찰력,  $n_d$ 는 감쇠기의 수,  $n$ 은 층수,  $K_i$ 는  $i$ 층의 횡방향 층강성, 그리고  $S_{di}$ 는 20개의 지진에 대하여 평균을 취해 구한 최대층간변위를 나타낸다.

UDDS는 우선 동일한 용량을 가지는 MR 감쇠기를 구조물의 층수와 동일하게 전 층에 분포시킨다. 따라서, 감쇠기 하나의 용량은 다음과 같다.

$$f_y = \frac{\rho \sum_{i=1}^n K_i S_{di}}{n} \quad (4)$$

SSSA는 감쇠기를 최대층간변위가 발생하는 곳에 순차적으로 배치시킨다. 이때의 최대층간변위는 감쇠기를 설치할 때마다 반복해석을 통하여 구한다. UDDS가 하나의 층에 하나의 감쇠기를 분포시키는 반면, SSSA는 하나의 층 개 두 개 이상의 감쇠기가 분포될 수도 있으며, 이는 SSSA에 의한 MR 감쇠기 분포는 층별로 다르다는 것을 의미한다. SSSA방법을 사용할 때, 수치해석시 추가되는 감쇠기의 용량은 다음과 같다.

$$f_y = \frac{\rho \sum_{i=1}^n K_i S_{di}}{n_d} \quad (5)$$

(5)식으로부터 알 수 있듯이, 만일 SSSA방법에서 감쇠기 수가 1개인 경우는 (3)식의 감쇠기 총 용량과 동일한 용량의 감쇠기 하나를 최대층간변위가 발생한 곳에 하나 분포시킨다는 것이며, 감쇠기의 수가 2개라면 총용량의 절반을 가진 감쇠기 하나를 최대층간변위가 발생한 위치에 설치하고, 다시 해석하여 다시 최대층간변위가 발생한 위치에 나머지 하나를 설치한다.

선행 연구에서 제안된 방법은 최대마찰력의 총합이 (3)식에 의하여 주어지는 전체 감쇠기 용량을 층별 분포시킬 때, 다음과 같이 각 MR감쇠기의 최대마찰력을 층전단력에 비례하도록 산정하였다.

$$f_{yk} = \rho K_k S_{dk} \left( \sum_{j=1}^{n_d} K_j S_{dj} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n K_i S_{di} \quad (6)$$

또한 설치시마다 수치해석을 수행한 SSSA와 달리 단순히 비제어시에 대한 수치해석을 통해서 구하여 얻어진 층간변위의 표준편차가 가장 큰 위치를 감쇠기의 수만큼 선택하여 그 위치에 분포시켰다.

## 4. 수치해석

### 4.1 최대제어력 산정식 유효성 검토

본 절에서는 20개 지진에 대한 해석결과의 평균을 취하여  $\rho$ 에 따른 UDDS의 성능지수의 변화를 구하였다. 이는 선행 연구의 단자유도 구조물의  $\rho$ 에 따른 성능지수의 효과를 보고 별도의 해석 없이 다자유도 구조물에 해석 시 요구되는 성능지수에 대한 감쇠기 최대용량을 산정할 수 있는지 검토하기 위함이다.

그림 1은  $\rho$ 를 0.01부터 0.2까지로 변하는 경우의 구조물의 층수와 주기에 따른 성능지수의 변화를 보여준다. 그림 1로부터 제안된 식을 사용하여 MR 감쇠기의 최대제어력을 산정하면 구조물의 주기와 층수에 관계없이  $\rho$ 의 값에 따라 일관된 성능목표를 달성할 수 있음을 알 수 있다. 저층 구조물과 고층 구조물이 거의 유사한 경향으로  $\rho$ 가 증가할수록 제어 성능이 좋아지는 것을 알 수 있으며 주기가 단주기에서 장주기로 가도 이러한 경향이 바뀌지 않는다.

### 4.2 설치 개수 및 분포형상

본 절에서는 전 층에 감쇠기를 고루 분포시키는 UDDS의 성능지수를 본 연구에서는 목표성능지수로 설정하고, 이를 달성하기 위해 SSSA와 제안된 방법에 요구되는 감쇠기의 수를 구하였으며, 표 3은  $\rho=0.05$ 인 경우의 결과를 보여준다. 표 3으로부터, 항상 구조물의 층수와 동일한 수의 감쇠기를 사용하는 UDDS보다 작은 수의 감쇠기를 사용하고도, SSSA와 제안식이 UDDS의 기준 성능지수를 달성할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 제안된 방법이 대체적으로 SSSA 보다 작은 수의 감쇠기로도 목표성능지수를 달성함을 알 수 있다. 특히, SSSA는 주어진 용량을 가지는 하나의 감쇠기를 설치할 때마다 수치해석을 반복 수행하기 때문에 많은 시간노력을 요구하는 단점을 가진다. 감쇠기의 설치 개수 및 분포 형상은 건물 설계 시 매우 중요하다. 그림2는 표3에서 목표성능지수를 달성한 감쇠기의 개수만큼 구조물에 설치한다고 할 때 SSSA와 제안식의 분포형상을 살펴 본 것이며, 가로축은 감쇠기의 용량이며 세로축은 감쇠기 설치 층수이다. 앞에서 제안된 식으로 감쇠기의 용량을 계산하여

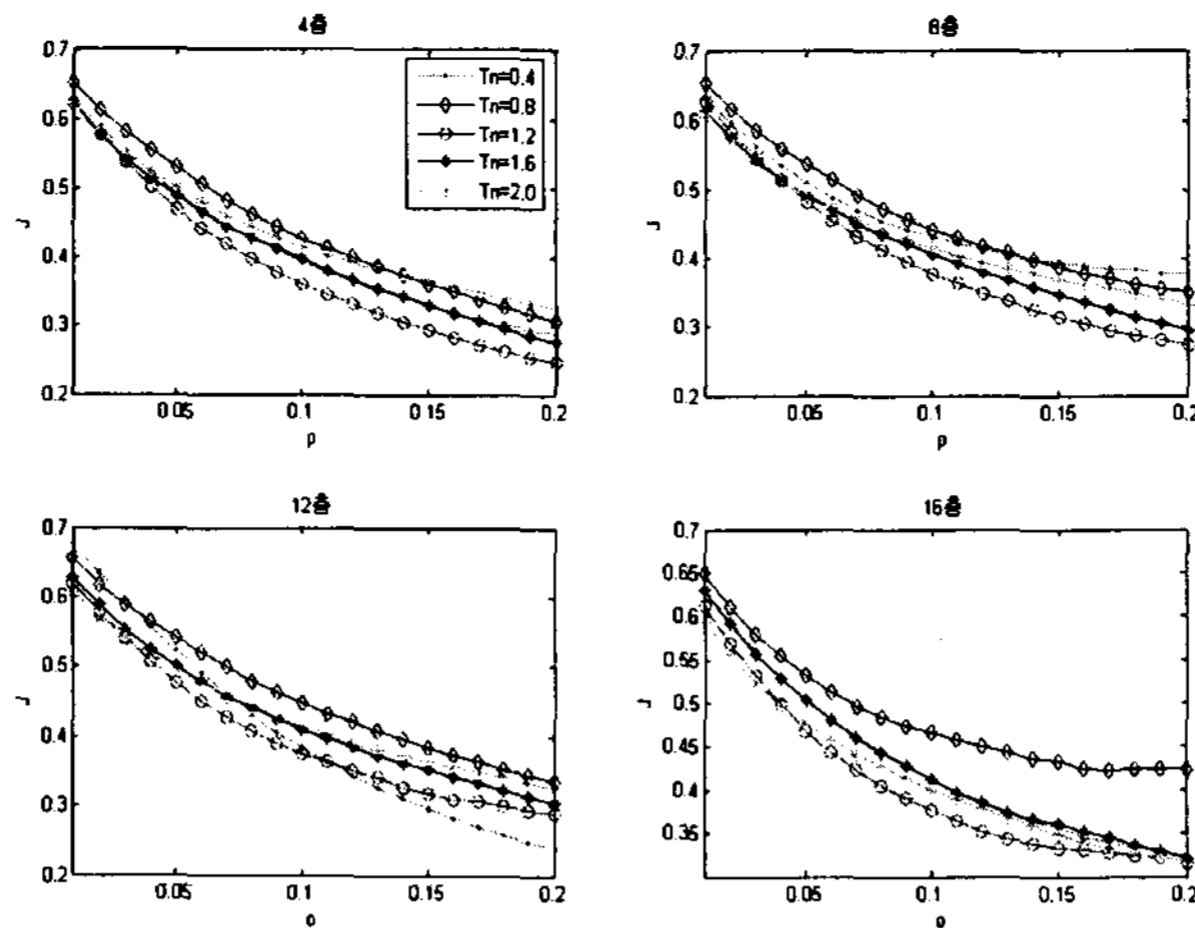


그림 1.  $\rho$ 에 따른 성능지수의 변화

SSSA와 제안식의 총 용량은 같게 하였으며, 요구 성능에 따라서 각 층에 설치되는 감쇠기의 용량은 달라진다.

그림 2에서 보면 분포형상이 정확히 일치하지는 않지만 유사한 경향보이는 것을 알 수 있다. SSSA나 제안식이 모두 층간변위 제어를 목표로 해서 주로 저층부에 감쇠기의 용량이 크게 설계되었으며 제안식의 감쇠기 분포는 골고루 분포되어 있는 반면, SSSA는 특정 층에 집중되게 설치되었음을 알 수 있었다.

표 3. 목표성능지수를 달성하기 위한 감쇠기 개수

층수	방법	주 기 (초)				
		0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
4층	SSSA	2	3	3	3	2
	제안식	2	2	2	2	2
8층	SSSA	4	4	4	5	5
	제안식	4	4	3	4	5
12층	SSSA	9	10	10	9	9
	제안식	10	10	9	6	6
16층	SSSA	16	10	16	10	13
	제안식	9	10	10	9	9

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존의 연구에서 제안되었던 건축구조물의 진동제어를 위한 MR감쇠기 예비설계절차의 유효성이 수치적으로 검증되었다. 이를 위해 다양한 주기와 층수를 가지는 구조물에 대한 해석이 수행되었으며, 통계적 평가를 위해 성능지수는 20개의 지진하중을 사용하여 구한 값을 평균하였다. 제안된 설계식에 의해 감쇠기의 설치위치, 용량, 그리고 설치 개수 등을 체계적으로 구할 수 있으며, 전 층에 고루 설치하는 UDSS 와 순차적으로 감쇠기를 설치해가는 SSSA방법과의 비교는 제안

된 방법이 작은 수의 감쇠기와 시간노력을 들이고도 주어진 목표성능을 달성할 수 있음을 보여준다.

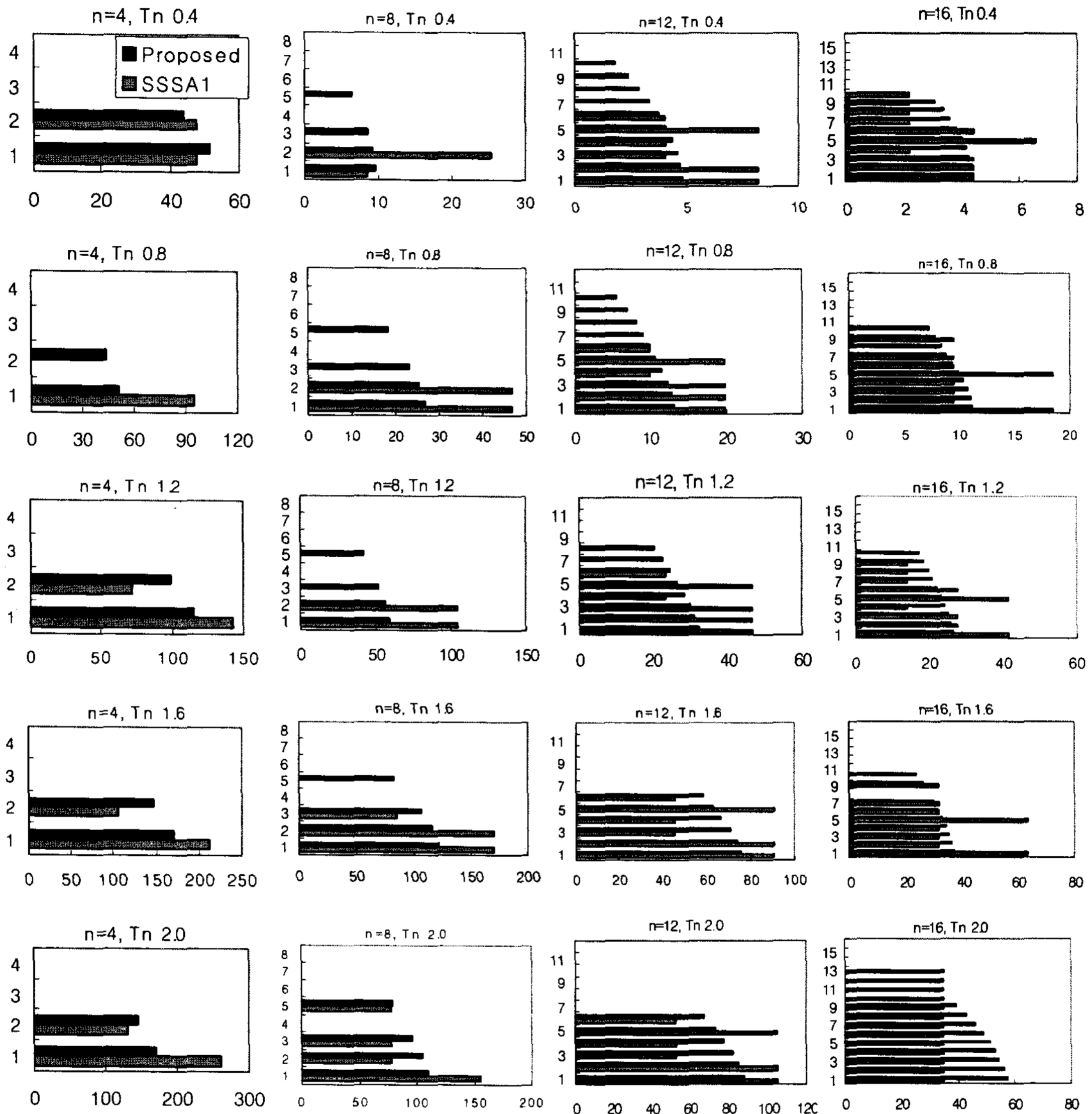


그림2 감쇠기 설치 분포형상

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2003-000-11584-0)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. Housner GW, Bergman LA, Caughey TK, Chassiakos AG, Claus RO, Masri SF, Skelton RE, Soong TT, Spencer BF Jr., Yao JTP. "Special issue structural control: past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.9, pp.897-971, 1997
2. Shukla AK, Datta TK. "Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 125, No.4, pp.401-409, 1999
3. Spencer Jr. BF, Dyke SJ, Sain MK. "Magnetorheological dampers: a new approach to seismic protection of structures", *Proceedings of Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, pp. 676-681, 1996
4. Garcia D. Lopez and T.T Soong, "Efficiency of a simple approach to damper allocation in MDOF structures", *Journal of Structures Control*, Vol.9, No.1, pp.19-30, 2002
5. 이상현, 민경원, 이루지, 민경원, "건축구조물의 지진응답제어를 위한 MR감쇠기 예비설계절차", *한국지진공학회 논문집*, Vol.8, No.5, pp. 55-64, 2004
6. Wereley NM, Pang L, Kamath GM. "Idealized hysteresis modeling of electrorheological and magnetorheological dampers", *Journal of Intelligent Material, Systems and Structures*, Vol. 9, No 8, pp. 642-649, 1998
7. Saang Bum Kim, Chung Bang Yun, "Sliding mode fuzzy control: Theory and verification on a benchmark structure", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 129, No. 11, pp. 1587-1608, 2000