

구조물 진동제어를 위한 전자석구동 HMD의 응용에 관한 연구

A study on the Application of Electromagnetic Type HMD for Vibration Control of Structure

°최 현*, 정 정교*, 김 두훈*, 이 상조**

Hyun Choi*, Jeung-Kyo Jeung*, Doo-Hoon Kim*, Sang-Jo Lee

ABSTRACT

With recent development of technology of high stiffness material and the structural design, the construction of high rise structures such as tall building, tower has increased. The more flexible and slender structure is vulnerable to the internal and external dynamic loads induced by earthquake, wind and traffic load. There have been great effort and many researches to minimize the influence of dynamic loads on the structure. The traditional and stable method, the application of the passive damper, is not able to comply with various dynamic loads, while the mass damper which active control technology is integrated can effectively comply with load types. Therefore, the application of active control of huge structures with AMD(Active mass damper) or HMD (Hybrid Mass damper) is increasing.

Up to now, most of actuators are servomotor and hydraulic actuator.^[2] But it is known that the electromagnetic actuator applies non contacting control force, which makes the control system easier with no characteristic change depending on time.

In this paper, Hybrid mass damper with electromagnetic actuator was designed and applied to building scaled structure. The performance of designed HMD tested by shake table test is included.

1. 서 론

최근에 이르러 고강도 재료의 사용, 구조설계 분야의 기술발전 등으로 현대식 고층건물이 출현하게 됨으로써, 동적인 하중에 의한 응답효과가 커져 진동이 문제가 되고 있다. 특히 고층건물의 경우 구조적으로는 강도상으로는 안전하더라도 상층의 거주자들이 느낄 수 있는 진동에 의한 불안감과 같은 사용성상의 문제는 풍하중에 의한 가속도 응답이 지배적이라는 사실이 알려지면서, 이와 같은 동적인 응답을 감소시키기 위한 연구가 내풍공학분야에서 이루어지고 있으며, 최근에는 이와 같은 동적응답을 감소시키기 위한 목적으로 여러 종류의 수동댐퍼와 HMD, AMD 등 능동제어이론에 기초를 둔 많은 연구가 선진 외국에서 활발히

이루어지고 있다^[1].

기초격리장치 및 수동댐퍼들은 건물의 구조댐핑 능력을 향상시킴으로써, 건물의 공진모드에서의 과도한 응답을 저감시키는 댐핑제어방식이다.

고층빌딩의 진동저감을 위하여 TMD 또는 점탄성댐퍼를 적용하며, Citicorp 센터(뉴욕), John Hancock 빌딩(보스톤) 등에는 TMD 가 설치되어 있고, World Trade Center의 쌍둥이 빌딩에는 1만 개 이상이 점탄성댐퍼가 설치되어 있다. 이러한 노력에도 불구하고 수동 댐퍼의 성능, 경제성 등의 이유로 최근에 고층타워 및 빌딩등을 대상으로 TMD, AMD, HMD 등이 최근 일본, 미국을 중심으로 많이 설치되고 있는 추세이다.

서로 다른 주파수 특성을 갖는 강풍이나 중약진에 의해 발생하는 초고층 건물의 진동응답을 거주성, 사용성에 이상이 없을 정도로 낮추기 위해서 다양한 형태의 질량댐퍼가 제안되었는데, 별도의 에너지가 필요 없는 TMD는 그러한 목적에 적합

* 유니슨산업(주) 기술연구소

** 연세대학교 기계공학과

한 것으로 알려져 있다. 그 후, Chang, Soong이나 Kanerko 등은 건물의 응답을 좀 더 적극적으로 저감하기 위하여 TMD에 별도의 작동기를 달았을 경우, 작은 구동력으로도 AMD와 유사한 제어효과를 얻을 수 있다는 것을 보여주었다.

B.F. Spencer, Jr.와 K. Sain^[2]은 고층 빌딩 및 타워 구조물에 적용된 제어시스템을 대상으로 HMD의 실패를 분류하였으며, 이에 따르면 24개의 HMD, AMD설치 사례에서 17종이 서보모터를 이용하였고 나머지 7종은 유압실린더를 이용한 방식으로 나타났다. 그러나 이러한 작동기는 HMD 특성상 TMD로 동작되는 수동모드에서 이동질량과 작동기 간의 기계적 체결에 의하여 이동질량의 원활한 움직임에 영향을 주게 되는 단점이 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 결과로부터 구조물의 응답을 파악하기 위해 구조물의 파라미터를 추정하였다. 또한 전자석 장치를 작동기로 한 능동 질량 감쇠기와 동조 질량 감쇠기를 이용하여 복합 질량 감쇠기(Hybrid mass damper)를 설계하였으며, 이를 이용하여 축소 모형의 적용하여 시험을 행하였다. 먼저 축소모형 및 전자석 복합 질량댐퍼의 사양을 설명하였으며, 진동대 실험을 통하여 제어시와 비제어시 성능을 비교, 평가 하였다.

2. 본 론

2.1 운동 방정식

전자석 HMD의 형상은 fig 4.에 나타내었고 이를 적용하기 위한 구조물은 fig 2에 나타내었다. 이 축소모형을 제어하기 위한 시스템은 fig. 1과 같이 표현된다. 유압 가진기에 의해 축소구조물의 기초부가 주어진 지진 파형으로 가진되고 (입력) 각 층간의 가속도가 출력이다. 최상부 질량체에서 측정된 가속도 신호를 PID 제어기의 입력으로 사용하기 위해 피이드백(feedback) 하였다.

Fig. 2 와 같은 시스템을 수학적으로 모델링하면 식 (5)의 관계에서 볼 수 있듯이 매트릭스로 표현 가능하다.

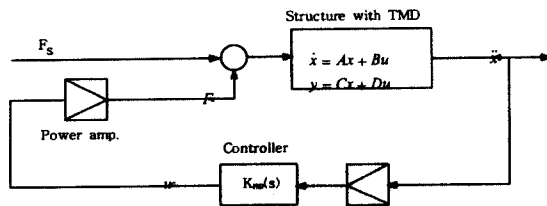


Fig 1. Control system

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 - c_2 \dot{x}_2 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = f_s \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - c_2 \dot{x}_1 - (c_2 + c_3) \dot{x}_2 - c_3 \dot{x}_3 - k_2 x_1 + (k_2 + k_3)x_3 - k_3 x_3 = 0 \quad (2)$$

$$m_3 \ddot{x}_3 - c_3 \dot{x}_2 + (c_3 + c_4) \dot{x}_3 - c_4 \dot{x}_4 - k_3 x_2 + (k_3 + k_4)x_3 - k_4 x_4 = -f_c \quad (3)$$

$$m_4 \ddot{x}_4 - c_4 \dot{x}_3 + c_4 \dot{x}_4 - k_4 x_3 + k_4 x_4 = f_c \quad (4)$$

위 식을 이용하여 전체 시스템의 운동방정식을 행렬 및 벡터 형태로 변환하면 식(5)와 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \ddot{x}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} f_s + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} f_c \quad (5)$$

식(5)에서 x_i 는 각 질량의 절대변위를 나타내며, m_i , c_i , k_i 는 각 층의 질량, 강성 및 댐핑을 나타낸다. 식 (5)에서 f_s 는 지반운동을 묘사해 주는 큰 질량(Large mass)에 작용하는 지진하중, f_c 는 HMD가 동작될 때 발생하는 제어력을 각각 나타낸다.^[3]

변위 및 속도로 이루어진 상태벡터, z 를 식(6)과 같이 정의하면 상태 벡터 z 를 한 번 미분한 항은 식 (7)과 같이 나타나고 운동방정식은 식(8)와 같은 상태 방정식으로 변환되어진다.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{x} = \dot{y}_2 \\ \dot{z}_2 &= \ddot{x} = -M^{-1}Kx - M^{-1}C\dot{x} + M^{-1}f \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} u = Az + Bu \quad (8)$$

여기서

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix}$$

2.2 축소모형 제작 및 파라미터 추정

제작된 HMD의 효과를 검증하기 위해 fig 2와 같은 축소 모형을 제작하였다. 축소구조물의 설계 사양은 다음과 같다. 고유진동수는 약 3.2 Hz이며 각 층의 질량은 180 kg, 이며 각 층간 강성은 228340 N/m 이다. 여기서, m_2 는 HMD와 plate의 질량의 합이다. 시스템 설계 파라미터는 table 1과 같고 2층에서 충격망치로 가진하고 2층에서 가속도 신호를 받은 주파수 응답 함수를 fig 3에 표현하였다. 실선은 HMD의 질량을 고정된 후 측정된 주파수 응답 함수이고 점선은 제어시, 일점 쇄선은 비제어시 주파수 응답 함수(frequency response function)를 나타낸다.

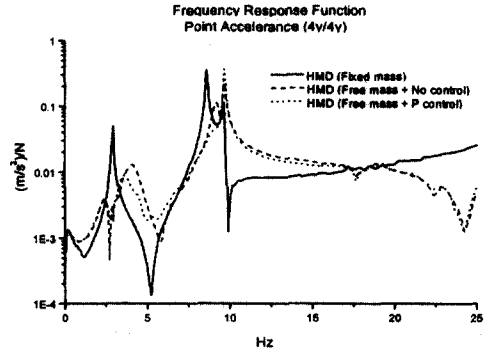


Fig 3. Accelerance form of frequency response function of scaled structure (1st story excited and measured)

Table 1 system design parameters

	1 st	2 nd	3rd
Mass (kg)	180	180	80
Stiff. (kN/m)	228.34	228.34	26.561
Damp (N · s/m)	150	150	120

2.3 전자석구동 HMD의 설계

Fig 6은 고층빌딩 및 타워 구조물에 적용된 제어 시스템 중 작동기들의 개략도를 나타내고 있다. 서론에서도 언급된 바와 같이 서보 모터나 유압실린더를 이용하여 HMD를 구성하였을 경우 수동모드의 동작이 원활하지 못하게 되는 어려움이 있다. 전자석 HMD를 fig 4에 표현하였다. HMD에 전류가 인가되지 않을 경우 fig 5에 나타난 바와 같이 질량과 스프링으로 이루어진다.

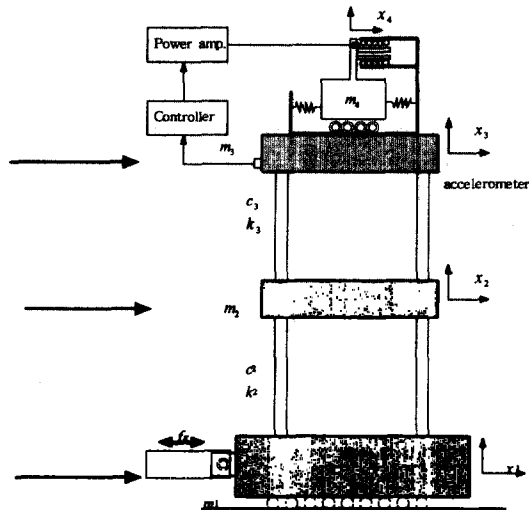


fig 2. Structure model and scheme

이런 수동 모드에서 효과적으로 작동하기 위해서는 부가 질량을 더하거나 스프링의 강성을 조절하여 구조물의 1차 모드의 고유진동수와 일치하도록 동조시켰다. HMD에 전류를 인가할 경우 전자기력에 의해 질량이 발생하는 능동 질량댐퍼로 작동된다. 제작된 HMD의 사양은 다음과 같다. 코일의 저항(resistance)은 21.7Ω , 인덕턴스(inductance)는 120.2 mH 이며 자속밀도는 상부와 하부 평균 0.113 Tesla 로 측정되었다. 이를 정리하여 table 2 에 나타내었다.

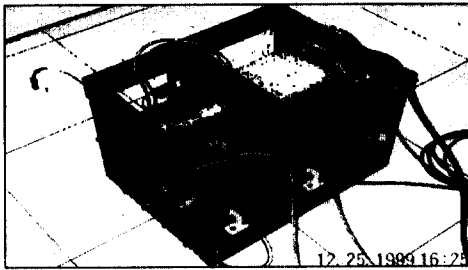


fig 4. Photo of Hybrid Mass Damper Using Electromagnetic Actuator

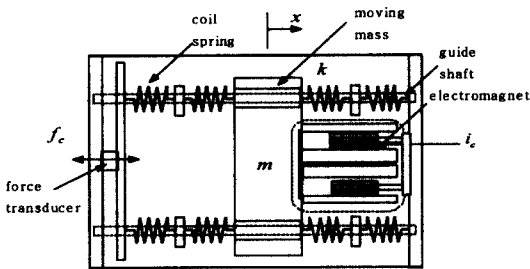


fig. 5 Concept drawing of HMD

Table 2. Specification of HMD using electromagnetic actuator

Specification		Measured value	
Moving mass	mass block	$2 \times 30 = 60 \text{ kg}$	
	permanent magnet	17 kg	
Electromagnet	Coil	R (resistance)	21.7Ω
		L (inductance)	120.2 mH
	Magnetic flux	Upper	+0.120 Tesla
		Lower	-0.105 Tesla
Back emf constant		7.20 V/(%/s)	

2.4 실험 결과

축소 구조물을 진동대 위에 설치하고 지진파를 묘사하는 변위 신호로 가진한 후 각 층에서 가속도 신호를 측정하였으며 최상층에서의 가속도를 피드백하여 HMD를 구동하였다. HMD에 제어 알고리즘은 단순한 비제어를 사용하였다.

수동으로 사용하였을 때 각 층간 가속도와 층간 변위신호로 제어시와 비제어시 효과를 나타내었다. fig 7. ~ fig. 10까지는 각 층간의 가속도를 나타내며, fig. 11는 HMD의 앞단에 설치된 힘 센서로부터 측정된 값이며 fig. 12는 HMD에 인가된 전압을 표시하였다. 먼저 가속도 신호를 볼 때 질량 1에서 측정된 가속도는 지반 가속도를 뜻하며 제어시나 비제어시 최대값이 각각 209.21 gal, 211.13 gal로 0.9%(증가)의 오차를 나타내고 있다. 테이블에서의 가속도 응답이 증가된 원인은 구조물의 진동제어에 의하여 증가된 반력이 테이블에 작용하기 때문이다.

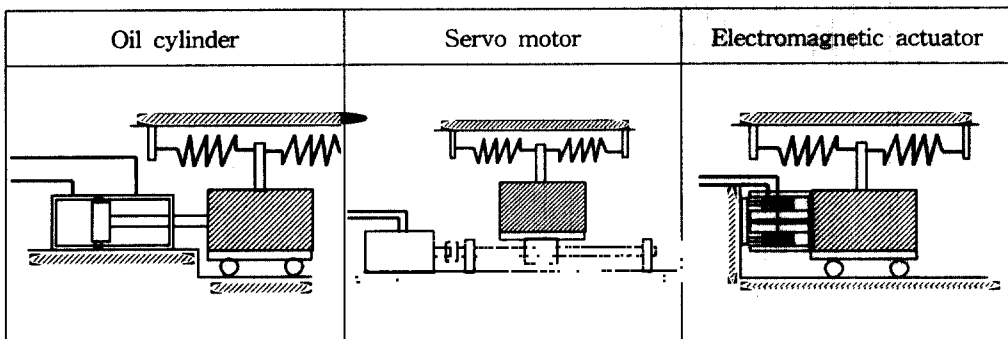


fig. 6 Type of actuator for AMD, HMD

가. 층별 측정 가속도 신호

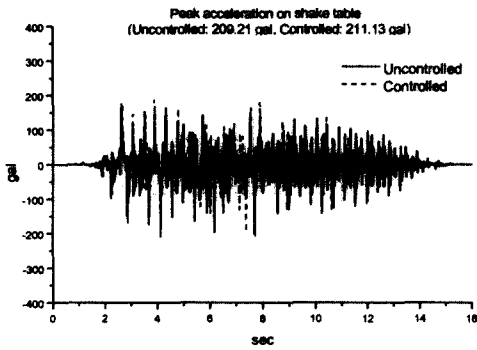


Fig.7 Peak acceleration on shake table
(Uncontrolled: 209.21 gal, Controlled: 211.13 gal)

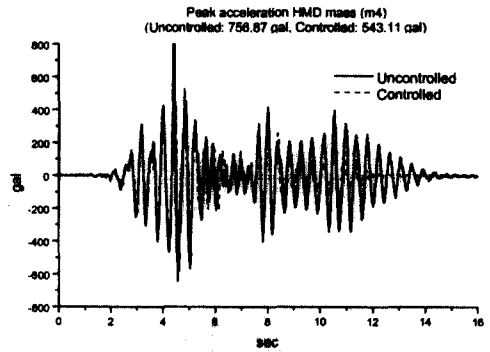


Fig. 10 Peak acceleration HMD mass (m4)
(Uncontrolled: 756.87 gal, Controlled: 543.11 gal)

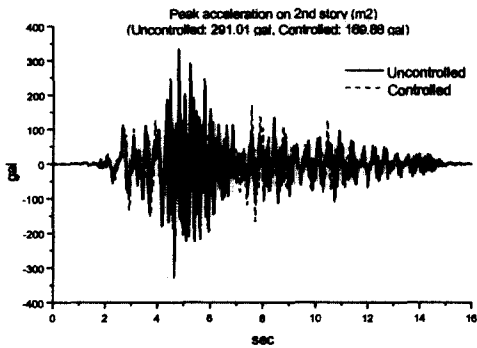


Fig. 8 Peak acceleration on 2nd story (m2)
(Uncontrolled: 291.01 gal, Controlled: 169.88 gal)

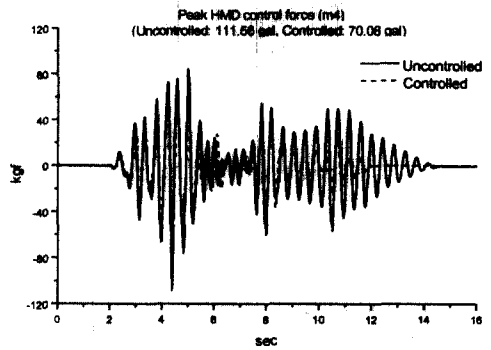


Fig. 11 Peak HMD control force (m4)
(Uncontrolled: 111.56 gal, Controlled: 70.08 gal)

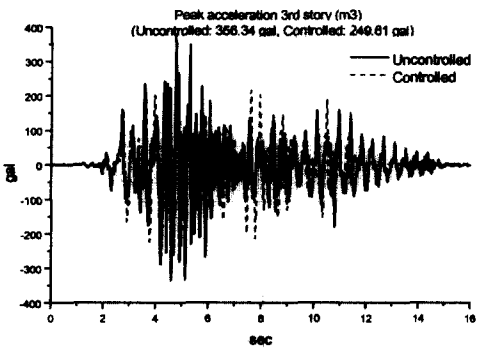


Fig. 9 Peak acceleration 3rd story (m3)
(Uncontrolled: 356.34 gal, Controlled: 249.61 gal)

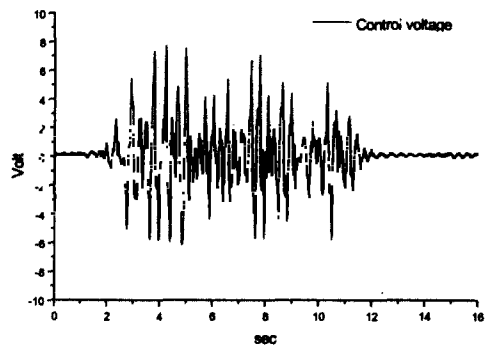


Fig. 12 Input voltage to HMD

2층(질량2)에서의 가속도신호는 제어시에 비제어시 보다 41.6 % 감소되었으며 3층(질량3)에서 발생하는 가속도 신호는 29.9 % 감소되었다. 각 질량에서 측정된 최대 가속도 신호를 비교 정리 하여 table 3에 나타내었다.

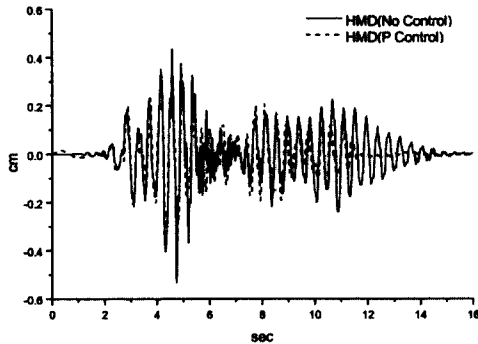


Fig 13 Drift between 1st floor and 2nd floor

Table 3 HMD Control effect

Peak response.		HMD mode		Control effect
		No control	Control	
Peak accel. [gal]	m ₁	209.21	211.13	0.9 % Increased
	m ₂	291.01	169.88	41.6 % Reduced
	m ₃	356.34	249.61	29.9 % Reduced
	m ₄	756.86	543.11	28.2 % Reduced
control force [kgf]	f _{tmd}	111.56	70.08	37.1 % Reduced

3. 결 론

2층 축소모델에 HMD를 설치하고 건물기초의 인공지진하중에 대한 진동대 실험을 수행하였다. HMD의 제어는 제어대상층인 2층 가속도계의 응답을 HMD의 제어신호로 사용하였으며 제어와 비제어시의 성능확인 결과 다음과 같다.

1. Taft지진파형에 의한 진동대 실험결과 복합질량댐퍼의 P-제어와 비제어시 1층 가속도는 2층 가속도는 HMD의에 의한 진동가속도 저감효과를 확인하였다.

2. 제어시와 비제어시 진동대의 최대 가속도가 유사하다고 가정하였으나. 시간의 가속도 신호를 보면 구조물의 가진 여부에 따라 서로 연성되어 있음을 알 수 있다.

3. 향후 최적제어기법을 이용하여 구조물의 진동을 제어하는 연구와 PC를 이용한 제어 전용 제어 장치의 개발이 요구된다.

감사의 글

진동대 시험장치 사용을 배려해 주신 경상대학교 건축공학과 윤 정배 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

1. S.J. Dyke,1 B.F. Spencer Jr.,1 P. Quast,2 D.C. Kaspari, Jr.,1 and M.K. Sain, "Implementation of an AMD Using Acceleration Feedback Control," , *Microcomputers in Civil Engineering:Special Issue on Active and Hybrid Structural Control*
2. B.F. Spencer, Jr. and Michael K. Sain , "Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback", *Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology1. ,Vol. 17, No. 6, pp. 19-35, December 1997.*
3. Hyun Choi, Doo-Hoon Kim, Kyung-won Min, Sang-Jo Lee, "Nonlinear Seismic Response analysis on the building structure considering the nonlinear property of viscoelastic damper Using the large mass describing the ground movement", *A-PVC, Vol 1,pp 111-116, 1999*