

## 점탄성 댐퍼의 비선형특성을 고려한 건물의 지진응답해석

최 현\*, 김 두훈\*, 민 경원\*\*, 이 상조\*\*\*

### Seismic Response Analysis of Building Structures considering the Nonlinear Property of Viscoelastic Dampers

Hyun Choi\*, Doo-Hun Kim\*, Kyung-Won Min\*\*, Sang-Jo Lee\*\*\*

#### ABSTRACT

As a seismic damper, the viscoelastic damper is known the effective method to control the drift of the flexible building. As the viscoelastic damper has the characteristics of both damping and stiffness, specially when the rubber material used, hysteretic damping. The behavior of the hysteretic damping is quite different from that of the viscous damping.

For the evaluation of the viscoelastic damper for the seismic purpose, the nonlinear response spectrum was generated based on the dynamic test of the viscoelastic damper, and the result is compared to that of the typical linear response spectrum.

#### 1. 서론

고층건물의 건축이 최근들어 증가추세에 있으며, 건축비 절감과 사용성 증대를 위한 많은 노력이 시도되고 있다. 건물의 고층화는 건축구조물이 보다 유연해져 상시 작용하는 풍하중 또는 지진과 같은 극심한 지반운동에 대하여 구조적으로 더욱 취약해짐을 의미한다. 또한, 콘크리트 재료에 비하여 적은 댐핑특성을 갖는 강재료를 사용함으로써, 구조물에 발생된 진동이 오래 지속되거나, 지속적으로 건물의 고유진동수에 근접한 주파수의 풍하중 또는 지진하중 등의 동하중에 대하여 건물의 공진에 의한 과도한 진동응답이 발생할 가능성이 커지고 있으며, 최근에 강재료의 고층 주상복합건물 내에 설치된 냉각타워 구동모터들의 회전차에 의하여 발생된 저주파수의 비틀진동에 대하여 건물 전체에 과도한 진동이 확산되는 경우도 연구되었다<sup>[1]</sup>.

건물의 유연성 증대에 따른 구조적 대책으로서, 층간에 가쇠형태로 설치되는 점탄성댐퍼가 효과적인 것으로 알려져 있다. 그러나, 점탄성댐퍼는 강성과 댐핑을 동시에 갖는 재료로서, 댐퍼의 강성이 건물의 고유주기에 변화를 줄 수 있으며, 해석적 측면에서, 고무와 같은 대표적인 점탄성재료는 등가점성으로 치환하기 어려운 히스테레틱 댐핑특성을 갖는다.

현재까지 내진설계에서 활용되고 있는 응답스펙트럼은 구조물의 강성 및 댐핑을 등가의 선형특성

\*유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

\*\*인천대학교 건축공학과

\*\*\*연세대학교 기계공학과

으로 표현함으로써 특정지진파의 지반운동에 대한 구조물의 최대응답을 구하는 방법으로서, 기초격리장치를 포함하여 구조물에 적용되는 고무등의 점탄성재료를 사용한 내진댐퍼의 히스테레틱 비선형 특성을 실제적으로 고려할 수 없다는 문제점이 있다.

Table 1. Common values of damping ratio  $\zeta$  for machine-supporting floors of industrial buildings<sup>[2]</sup>

Construction type	Damping ratio $\zeta$		
	min.	mean	max
Reinforced concrete	0.010	0.017	0.025
Prestressed concrete	0.007	0.013	0.020
Composite structures	0.004	0.007	0.012
Steel	0.003	0.005	0.008

본 연구에서는 지반운동을 받는 고유주기가 약 2초에 해당하는 비교적 유연한 4층의 구조물에 대하여, 지반운동에 대한 동력학적 의미전달과 해법이 용이한 운동방정식 표현방법을 제시하고, 가쇠형태로 설치되는 점탄성댐퍼의 히스테레틱 비선형성을 고려한 지진응답을 수치적으로 구함으로써, 지진응답스펙트럼에서 제시된 값과 비교, 분석함으로써 점탄성댐퍼의 적용성을 평가한다.

## 2. 본 론

### 2.1 지반운동을 받는 건물모델의 가속도 전달을

지금까지 지반운동을 받는 구조물의 동력학적 표현은 지반이 고정된 상대좌표계를 이용하여 지반가속도와 층질량의 곱인 관성력이 각 층에 작용하는 것으로 유도되어 있으나, 이러한 방법은 지반운동을 받는 구조물에 대하여 기초를 통하여 전달되는 지진하중의 전달경로를 직접적으로 표현하지 못하는 점과 작용하중으로서 입력가속도 외에 각층에 작용하는 관성력을 계산하여 층별로 작용시켜야 하는 번거로움이 있다. 따라서, Fig.1에서와 같이 큰 질량으로 표현되는 지반의 질량,  $m_g$  를 사용함으로써 각층의 지진응답을 계산하는 데 절대좌표계의 사용이 가능해지며, 지반질량에 지반가속도를 발생시키는 지진력을 작용시킴으로써, 지진에 의한 지반가속도운동을 표현할 수 있다. 이 경우 운동방정식에서 지반질량을 표현하는 1자유도계만을 추가함으로써, 용이하게 지진운동을 받는 구조물의 운동방정식을 얻을 수 있다. 또한, 축소모델의 가진실험 등(shake table test)의 물리적 의미를 직접적으로 표현한다는 장점이 있다.

Fig.1과 같이 지진에 의한 지반가속도운동을 받는 건축모델의 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -Mr\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서,  $x = (x_g \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T$ , 즉 각 층의 절대변위를 나타내는 변위벡터이며,  $r = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T$  으로서, 지반가속도가 입력되는 지반질량에 지진하중을 작용시키는 입력벡터이다. 시스템행렬, 즉 질량, 감쇠 및 강성행렬 등은 식(2)와 같이 표현된다.

$$M = \begin{bmatrix} m_g & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & . & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} c_g + c_1 & -c_1 & 0 & 0 & 0 \\ -c_1 & c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & -c_2 & . & -c_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & -c_{n-1} & c_{n-1} + c_n & -c_n \\ 0 & 0 & 0 & -c_n & c_n \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_g + k_1 & -k_1 & 0 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 \\ 0 & -k_2 & . & -k_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n & -k_n \\ 0 & 0 & 0 & -k_n & k_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

지진하중에 의한 건물모델의 주파수응답특성은 지진하중에 대한 건물모델의 임피던스(impedance)를 구함으로써 얻을 수 있다. 건물모델의 각층에서 발생하는 변위응답 벡터와 지반에 작용하는

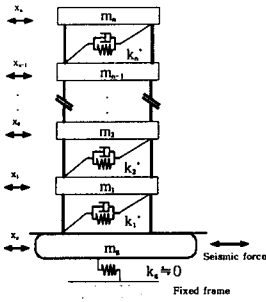


Fig.1 4 story building model to verify the effectiveness of the viscoelastic damper

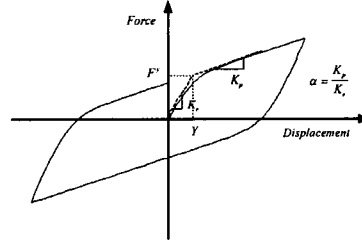


Fig.2 Bilinear hysteretic behavior of the viscoelastic damper

지진하중간의 관계는 식(3)의 건물모델의 임피던스 행렬로서 표현된다.

$$Z(\omega) = [K - \omega^2 M] + j\omega C \quad (3)$$

여기서, 구조물의 임피던스행렬은 외부하중인 지진하중에 대한 변위응답의 저항성분을 의미한다. 따라서, 지진하중과 건물의 각 층에서 발생하는 지진 변위응답 벡터는 다음 식과 같이 표현된다.

$$[Z(\omega)]X(\omega) = F_g(\omega) \quad (4)$$

식(4)를 변위응답 벡터에 대하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$X(\omega) = [Z(\omega)]^{-1} F_g(\omega) \quad (5)$$

건물모델에 발생하는 변위응답은 지진하중이 큰 경우와 구조물의 임피던스가 작은 경우에 크게 될 수 있다.

지반의 질량이 건물의 질량을 무시할 만큼 큰 값을 선정하면 ( $m_s \ll m_g$ ), 지진하중은 지반질량에 작용하는 관성력만으로 표현할 수 있다.

$$\ddot{x}_g(\omega) = \frac{F_g(\omega)}{m_g} \quad \because F_g(\omega) = (m_g + m_s)\ddot{x}_g(\omega) \approx m_g\ddot{x}_g(\omega) \quad (6)$$

지진시, 지반가속도의 증폭효과를 나타낼 수 있도록 가속도 전달율을 지반의 가속도와 구조물에서 발생하는 가속도의 비로서 정의하면, 식(7)과 같이 표현될 수 있다.

$$Tr(\omega) = \frac{\ddot{X}(\omega)}{\ddot{x}_g(\omega)} = \frac{\omega^2 X(\omega)}{\ddot{x}_g(\omega)} = \frac{\omega^2 m_g X(\omega)}{F_g(\omega)} = \omega^2 m_g H(\omega) \quad (7)$$

여기서,  $H(\omega)$ 는 지진하중과 건물모델의 각 층에서 발생하는 변위응답간의 비를 나타내는 전달함수(transfer function)로서, 콤프라인언스(compliance)형태의 주파수응답함수(frequency response function)이다. 따라서, 가속도 전달율은 액셀러런스(accelerance)형태의 주파수응답함수로부터 얻을 수 있다.

## 2.2 점탄성댐퍼의 비선형 해석모델

점탄성 댐퍼에 사용되는 고무의 비선형성을 표현하기 위하여 Park, Wen and Ang (1986)에 의하여 제시된 모델을 적용하였다<sup>[3][4][5]</sup>. 점탄성댐퍼의 복원력(damping force)은 다음 식과 같다.

$$F_x = \alpha \frac{F_y}{Y} U_x + (1 - \alpha) F_y Z_x \quad (8)$$

여기서, Fig.2에서와 같이  $\alpha$ 는 댐퍼의 탄성영역과 소성영역간의 강성비,  $F_y$ 는 항복하중,  $Y$ 는 항복 변위이며,  $Z_x$ 는 히스테리시스를 나타내는 무차원량으로서 식(9)로부터 구할 수 있다.

$$\dot{Z}_x Y = A \dot{U}_x - Z_x^2 (\gamma \text{Sign}(\dot{U}_x Z_x) + \beta) \dot{U}_x \quad (9)$$

위 식에서 A,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 댐퍼의 히스테리시스 형상에 변화를 줄 수 있는 무차원값으로  $A/(\beta+\gamma)=1$  을 만족하는 값이다.

### 2.3 점탄성댐퍼의 동하중 실험

동하중 실험에 사용된 댐퍼의 50% 변형율에 해당하는 6mm 변위에서의 작용하중은 약 8Tonf 이다.  $\alpha=0.5$ ,  $Y=1\text{mm}$ ,  $F_y=2.5e4\text{N}$ ,  $A=1.0$ ,  $\beta=0.9$ ,  $\gamma=0.1$ 의 파라미터를 이용하여 식(8)-(9)으로 표현되는 댐퍼모델과 실험값과 비교한 결과는 Fig.3과 같다. 적은 변형율에서 댐퍼의 댐핑이 과소평가되는 것을 제외하고는 변위별로 댐퍼의 히스테리시스 특성을 잘 표현함을 알 수 있다.

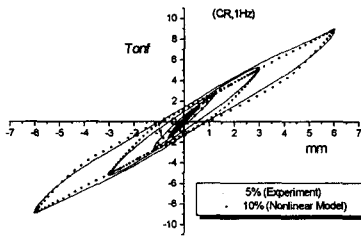


Fig.3 Hysteresis cycles of the viscoelastic damper obtained from the dynamic loading test and the nonlinear model

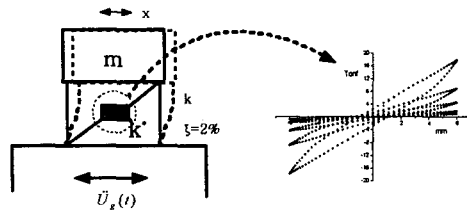


Fig.4 Concept of the generation of the nonlinear response spectrum for the viscoelastic damper

### 2.4 점탄성 댐퍼가 설치된 모델의 지진응답스펙트럼

점탄성댐퍼가 설치된 구조물을 표현하는 질량 및 강성과 점탄성댐퍼의 등가강성 및 감쇠비로 표현되는 Fig. 4의 비선형 1자유도계 오실레이터를 이용하여, Taft 입력지진파에 대한 최대응답을 구하였다. 질량과 지반의 상대변위 및 상대속도에 따라서 점탄성댐퍼에는 식 (8) -(9)로 표현되는 복원력이 작용한다.

Fig.3에서 점탄성댐퍼 모델을 이용한 히스테리시스의 등가 댐핑은 8% 이며, 항복하중,  $F_y$ 의 증가에 의하여 Fig. 4에서와 같이 동일한 등가댐핑에서 댐퍼의 용량이 증가하는 특성을 갖는다. 따라서, 구조물에 적용하는 댐퍼의 수량증가에 따른 응답경향을 파악하기 위하여 기준 항복하중의 10%, 20%, 50%, 100% 및 200%에 대한 비선형 응답스펙트럼을 계산하였다.

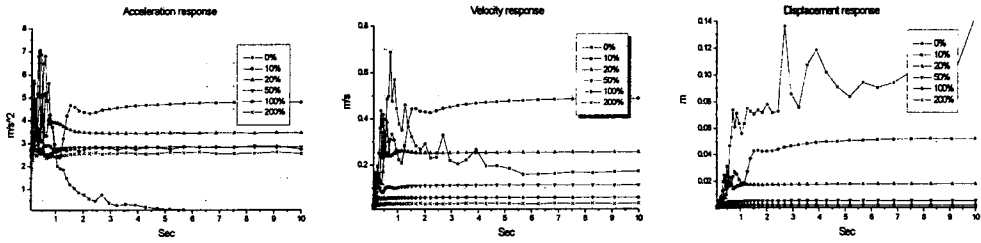
댐퍼의 항복하중,  $F_y = 0$ 은 댐퍼의 복원력이 작용하지 않는 경우로서, 댐퍼가 설치되지 않은 경우에 해당하는 Taft 지진파에 대한 구조물의 선형댐핑 2% 에서의 선형응답스펙트럼을 의미한다.

Fig.5 의 (a)에서 점탄성댐퍼를 설치함에 따라서 고유주기 1초 이하의 비교적 견고한 구조물에서는 점탄성댐퍼의 설치에도 불구하고 가속도응답을 줄이는 효과가 있음을 알 수 있다. 이는 댐퍼에 의한 구조물의 연성(ductility)증가 효과로 판단된다. 또한, 1초 이상의 고유주기를 갖는 구조물에서는 일반적으로 알려진 바와 같이 점탄성댐퍼 설치에 따라서 가속도 응답이 증가하는 데, 이는 지반운동이 댐퍼를 통하여 더 많이 구조물에 전달되기 때문이다.

댐퍼의 수량이 증가함에 따라 오히려 가속도 응답이 감소하는 원인은 댐퍼수량이 증가함에 따라서 댐퍼의 에너지 소산능력이 증가하여 지진에너지의 흡수에 따른 것으로 판단된다.

Fig.5의 (b), (c)는 각각 응답속도 및 응답변위 응답스펙트럼을 나타낸 것으로서, 점탄성댐퍼의 해석 모델이 식(8)-(9)로 표현되는 히스테레틱 댐핑모델로서 주파수의 함수가 아니므로 응답가속도를 이용한 유사속도 및 유사변위 응답스펙트럼으로 표현할 수 없다.

Fig.5에서 구조물의 고유주기와 상관없이 점탄성댐퍼는 유연한 구조물의 응답변위를 효과적으로 줄일 수 있음을 보여준다.



(a) Acceleration Response (b) Velocity Response (c) Displacement Response  
 Fig.5 Nonlinear response spectrum depending on the yielding force of the viscoelastic damper

### 3. 비선형 지진응답해석

#### 3.1 건물모델의 동특성

Fig.6은 고유진동수가 0.51 Hz 및 2.10 Hz인 두 가지 건물모델에 대하여 식(7)을 이용하여 구한 가속도 전달율을 나타낸다. 지반질량에서의 가속도 전달율은 1이며, 건물모델의 굽힘진동모드에 해당하는 고유진동수에서 공진에 의한 가속도 증폭현상이 나타난다. 2%, 10% 및 20%의 증가 구조댐핑이 증가함에 따라서 공진에서의 응답크기를 감소시키는 효과를 보여준다. 이는 Table 1에서 낮은 구조댐핑을 갖는 강재료의 구조물에서 공진시 더 큰 응답이 발생됨을 보여준다.

지진이 포함하는 가진주파수내에 건물의 고유진동수가 있는 경우, 공진에 의한 과도한 응답을 제어하기 위하여 건물에 구조댐핑을 가하는 방법으로서 내진댐퍼를 적용한다.

#### 3.2 점탄성댐퍼가 설치된 유연한 건물의 비선형 지진응답

입력지진파는 최대 가속도가 152.4 gal의 Taft 지진파이다. Taft 지진파의 후미에는 크기는 작으나, 주기성을 갖는 장주기 가진특성이 있음을 알 수 있다.

Fig.7은 20 msec 간격으로 실제 계측된 입력지진파와 건물모델의 비선형해석에 의하여 계산된 지반질량의 가속도를 서로 비교한 결과로서, 지반질량을 모사한 비선형 해석과정에서 입력하고자 하는 지진운동이 정확히 모사되고 있음을 알 수 있다.

비선형 지진응답해석은 댐퍼가 설치되지 않은 선형구조물에 대하여 각 층에서의 절대가속도, 각층의 절대 및 상대속도 및 각층의 절대 및 상대변위를 지진파입력 후 30초 동안의 응답을 계산하였다. 또한, 각층에 점탄성 댐퍼가 설치한 비선형 모델에 대하여 4,5차의 Ruge Kutta 직접적분법을 사용하여 각 층의 비선형응답을 계산했다.

Fig. 7은 비선형 계산결과에 따른 지반질량에서의 절대가속도이다. Fig.8-Fig.9는 층간에 균등한 댐퍼의 복원력이 작용하는 해석모델을 계산한 결과이며, 층간 상대변위(interstory drift) 및 층간 상대속도에 대하여 층간에 설치된 댐퍼에 작용하는 복원력을 히스테레시스 형태로 나타낸 결과이다. Fig.3과 같이 점탄성댐퍼의 동하중 실험에서 얻은 히스테레시스 특성과 유사한 히스테레시스 특성을 나타냄을 알 수 있다. 낮은 층에 설치된 댐퍼에 가장 큰 하중이 작용하며, 층고가 높아질수록 점탄성댐퍼에 작용하는 하중이 적어짐을 알 수 있다. 이는 낮은 층에 큰 지진하중이 작용하기 때문이며, 이때 변위를 제한하기 위해서는 큰 용량 또는 수량의 댐퍼가 필요함을 의미한다.

Fig.10은 점탄성댐퍼가 설치된 해석모델에 대하여 층별 계산된 절대가속도를 댐퍼가 설치되지 않은 모델의 응답과 비교한 결과로서, 댐퍼가 설치되면서 더 큰 가속도가 발생되며, 층고가 높을수록 큰 가속도가 발생하는 것을 보여준다. 이는 건물모델의 최저차 고유진동수에 해당하는 건물의 횡방향 굽힘모드가 가장 우세한 진동이기 때문이다.

Fig.11은 층별 상대변위를 비교한 결과로서, 점탄성댐퍼가 설치된 모델에서의 변위응답이 크게 줄어드는 것과 층간변형은 낮은 층에서 크게 발생한다는 것을 알 수 있다. 이는 지진운동에 의하여 낮은 층의 부재 및 점탄성댐퍼에 상대적으로 큰 지진하중이 작용하게 됨을 의미한다.

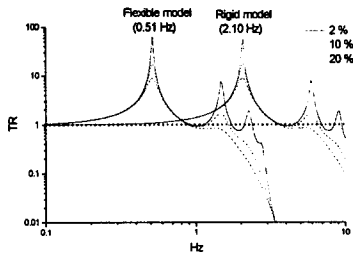


Fig.6 Acceleration transmissibility curve

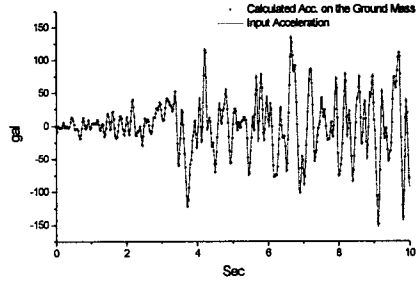


Fig.7 Taft seismic input wave

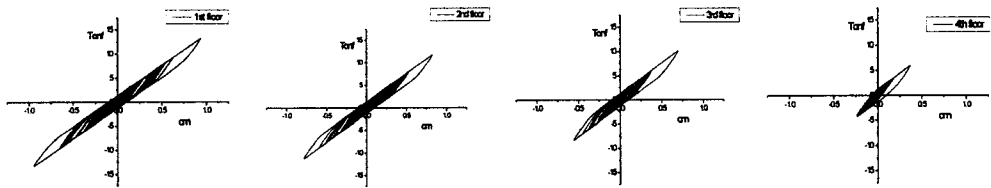


Fig.8 Calculated force and relative displacement hysteresis cycles of the damper

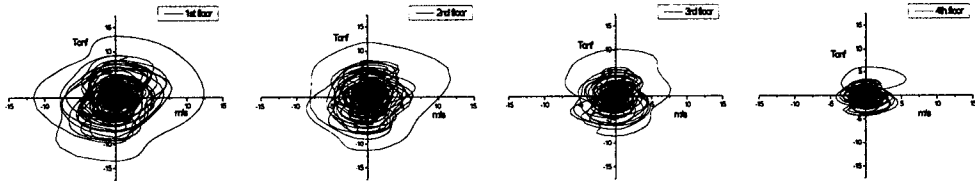


Fig.9 Calculated force and relative velocity hysteresis cycles of the damper

건물의 지진응답 제어를 위한 목적으로 점탄성댐퍼를 건물에 설치하는 경우, 건물의 층고에 따른 영향을 파악하기 위하여, 점탄성댐퍼가 건물의 높이에 따라서 균등하게 설치된 건물모델에 대한 해석 (Case 1)결과와, 밀면전단력이 크게 작용하는 하부층부터 40%, 30%, 20%, 10%의 비율로 댐퍼가 설치된 건물모델에 대한 해석(Case 2)결과를 상호 비교하였다.

Fig.12에서와 같이 case 1과 case 2의 두 방법 모두 대상 건물의 층고를 3m로 가정하는 경우, 층고의 0.5%에 해당하는 1.5cm의 드리프트 제한이 적용되므로 드리프트 제한값 이내로 건물의 응답변위를 제한시키는 효과를 나타내나<sup>[6]</sup>, case 1의 경우가 case 2보다 보다 효과적임을 알 수 있다. 이는 건물의 밀면전단력이 큰 낮은 층에 보다 많은 댐퍼를 설치하는 것이 바람직한 댐퍼 설치방법임을 의미한다.

건고한 구조물에서의 최대 가속도응답이 상대적으로 유연한 구조물에 비하여 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 구조물을 형성하는 부재의 강한 구조강성으로 지진에 의한 지반운동이 구조물로 더 많이 전달되기 때문이며, 전달된 지진력은 구조물에 관성력으로 작용하기 때문이다.

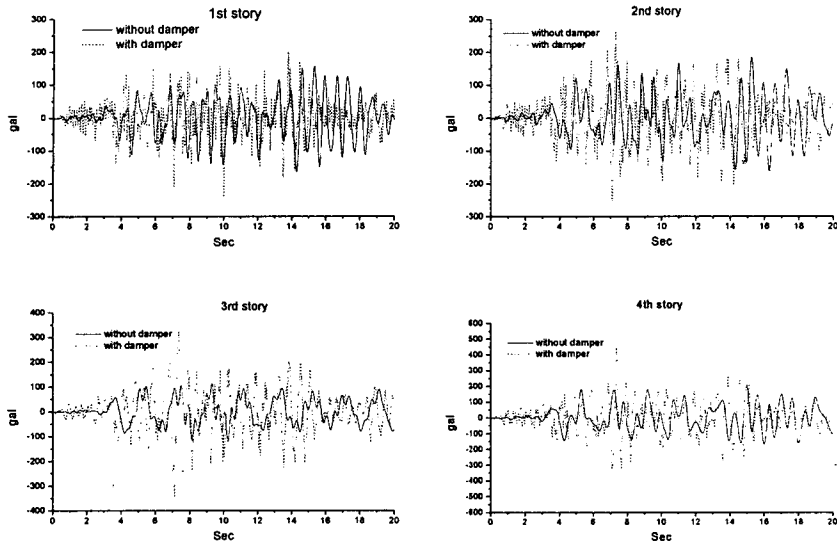


Fig.10 Calculated acceleration responses

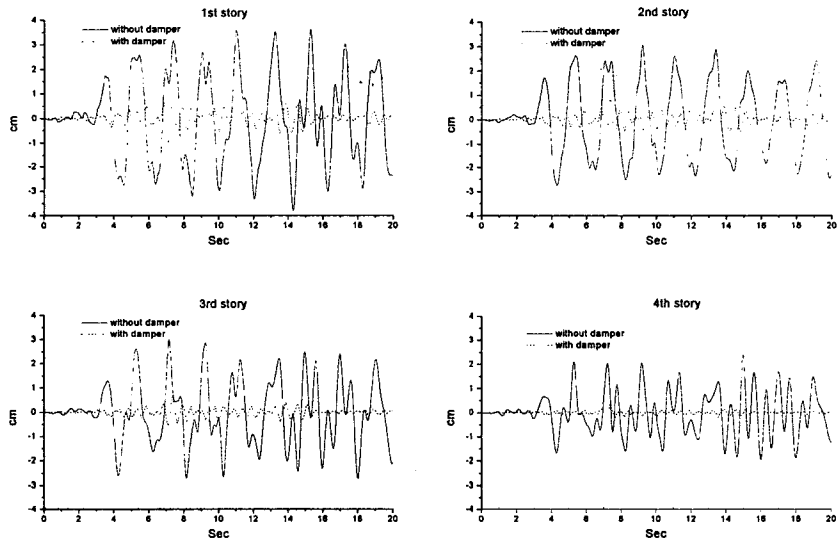
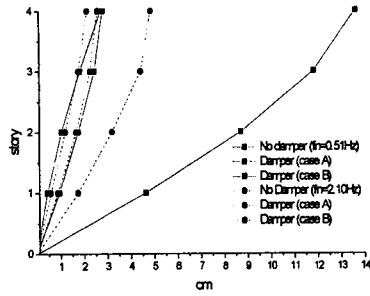
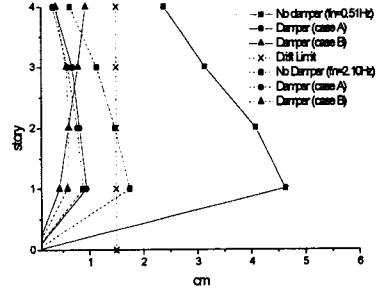


Fig.11 Calculated displacement responses



(a) Maximum displacement response



(b) Maximum drift

Fig.12 Maximum response of the building against Taft seismic ground motion

#### 4. 결론

본 연구는 유연한 건축구조물의 지진응답을 개선시키기 위하여 사용되는 점탄성댐퍼의 효용성을 파악하기 위하여, 점탄성댐퍼가 가시형태로 설치된 해석모델을 이용하여 비선형 지진응답해석을 수행한 결과로서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 지진과 같은 지반운동을 모사하기 위한 지반질량을 이용한 방법은 가진실험등의 운동역학을 직접적으로 모사하며, 비선형 해석결과에서 입력 지진파와 계산된 지반가속도를 상호비교함으로써 해석과정의 신뢰도를 높일 수 있는 장점이 있다.
2. 본 연구에 사용된 비선형모델은 대표적 점탄성재료인 고무를 이용하여 제작된 점탄성댐퍼의 히스테레시스특성을 작은 변형을 제외하고는 비교적 잘 표현한다.
3. 건물에 설치된 점탄성 댐퍼는 건물이 유연한 경우, 지진시 댐퍼를 통하여 더 많은 지진력이 전달되어 구조물에 더 큰 가속도응답이 발생하나, 절대 및 상대 변위응답을 효과적으로 감소시킬 수 있다.
4. 점탄성댐퍼는 건물에 작용하는 밀면전단력을 고려하여 설치하는 것이 효과적이다.

#### 참고문헌

1. Hyun Choi, Hae-Dong Park, Hong-Ki, Lee, Doo-Hun Kim, "Trouble Shooting for the Resonance Problem caused by the Propagation of the low frequency Beating Excitation Source in the Building", Korean sound and vibration engineering society, Vol.8-4, pp. 596- 602, 1998.
2. International Conference of Building Officials, "Uniform Building Code <sup>TM</sup> ",1994, Structural Engineering Design Provisions
3. Park, Y. J., Wen, Y. K. and Ang, A. H. S. "Random Vibration of Hysteretic Systems under Bidirectional Ground Motions.", Earthquake Eng. Struct. Dyn., 14(4), pp. 543-557, 1986.
4. S. Nagarajaiah, A. M. Reinhorn, M. C. Constantinou, "3D-BASIS Nonlinear Dynamic Analysis of Three-Dimensional Base Isolated Structures : Part II", Technical Report NCEER-91-0005, U.S. Department of Commerce, 1991.
5. Rosenbrock, H. H. "Some General Implicit Processes for the Numerical Solution of Differential Equations." Computer J., 18, pp. 50-64. 1964.
6. Farzad Naeim, "The seismic design handbook", Structural Engineering Series, Van Nostrand Reinhold, 1989.