

# 점탄성 감쇠기가 설치된 철골조 건물의 비탄성 해석

## Inelastic Analysis of Steel Frame Structures with Viscoelastic Damper

김진구\*  
Kim, Jinkoo

최현훈\*\*  
Choi, Hyun-Hoon

### 요 지

본 연구에서는 철골조 건물의 내진 보강 방법으로 점탄성 감쇠기의 적용과 효과에 대하여 성능에 기초한 내진 설계의 관점에서 연구하였다. 먼저 단자유도계 구조물을 대상으로 입력된 지진에너지의 소산에 대한 감쇠기의 효과에 대하여 연구하였다. 설계하중으로 중력하중을 적용한 5층 건물과 중력하중과 풍하중을 적용한 10층과 20층 건물에 대하여 해석을 수행하였다. 비선형 시간이력해석을 수행하기 위하여 성능에 기초한 내진설계기준(안)에 제시된 표준 설계응답스펙트럼을 각 지반종류와 성능목표에 대하여 구성하고, 이를 바탕으로 인공지진을 생성하였다. 해석결과에 따르면 층간변위를 성능기준으로 적용하였을 때 모든 모델이 연약지반(기능수행 성능목표)을 제외한 대부분의 지반조건에서 기준안에 제시된 성능목표를 만족하였다. 또한 적당한 위치에 점탄성 감쇠기를 설치함으로써 내진성능을 향상시키고 구조물이 탄성적으로 거동하도록 유도함을 보였다.

**핵심용어** : 점탄성감쇠기, 성능에 기초한 내진설계, 비탄성 해석

### Abstract

In this study the effect and applicability of viscoelastic dampers on the seismic reinforcement of steel framed structures are investigated in the context of the performance based design approach. The effect of the damper on dissipating the input seismic energy was investigated with a single degree of freedom system. For analysis models a five-story steel frame subjected to gravity load, a ten-story and twenty-story structure subjected to gravity and wind load were designed. The code-specified design spectrums were constructed for each soil type and performance objective, and artificial ground excitation records to be used in the nonlinear time history analysis were generated based on the design spectrums. Inter-story drift was adopted as the primary performance criterion. According to the analysis results, all model structures turned out to satisfy the performance level for most of the soil conditions except for the soft soil(operational level). It was also found that the seismic performance could be greatly enhanced, and the structures were led to behave elastically by installing viscoelastic dampers on appropriate locations.

**Keywords** : viscoelastic damper, performance based seismic design, inelastic analysis

### 1. 서 론

우리나라는 지진의 발생빈도가 작고 지반운동의 세기도 강진지역에 비하여 낮은 중약진 지역으로 분류

된다. 최근에는 지진의 발생빈도가 증가하고, 지진에 대하여 적절하게 대처하지 못함으로써 많은 인명과 재산피해를 가져온 외국의 사례를 접하면서 내진설계의 중요성과 필요성에 대한 인식이 더욱 높아지고 있다.

\* 정회원 · 성균관대학교 건축공학과, 조교수  
\*\* 성균관대학교 건축공학과, 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2000년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2000년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

국내에서는 1988년 건축물의 내진설계 기준이 적용된 이후 지진에 대한 대비를 해왔지만 그 이전에 건축된 건축물이나 5층이하의 건축물은 내진설계가 적용되지 않았기 때문에 적절한 보강이 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 내진설계기준이 적용되기 이전에 건축된 건축물을 대상으로 하여 건축물의 내진등급을 정하고, 1997년 한국지진공학회에서 제시한 성능수준에 따른 지진하중의 산정방법<sup>1)</sup>에 따라 지진하중을 산정하여 시간이력해석을 수행하였다. 먼저 비탄성 해석을 통하여 지진하중에 대한 건축물의 거동을 파악한 후 실험적, 해석적 연구를 통하여 그 성능이 입증된 점탄성 감쇠기<sup>2)</sup>를 사용한 내진보강의 방법에 대하여 연구를 수행하였다. 점탄성 감쇠기는 간막이벽 내부 등과 같이 내부 용도를 침해하지 않는 곳에 가새 형태로 간단하게 설치할 수 있으므로 내진성능을 향상하기 위한 가장 효과적이고 경제적인 방법의 하나라고 할 수 있다. 본 논문에서는 점탄성 감쇠기가 설치된 구조물의 비탄성 해석을 통하여 성능수준에 따른 감쇠기의 능력을 결정함으로써 내진보강을 위한 효과적인 방법을 제시하고자 하였다.

## 2. 단자유도계 구조물의 비탄성 거동

지진에 의한 지반 운동을 받는 단자유도계 구조물의 운동방정식은 식(1)과 같으며 여기서  $f_s(u, \dot{u})$ 는 구조물의 강성에 의한 저항력을 나타낸다. 식(1)을 변위에 대하여 적분하면 단자유도계 시스템의 에너지 관계식인 식(2)를 얻을 수 있고, 식(2)에 따라

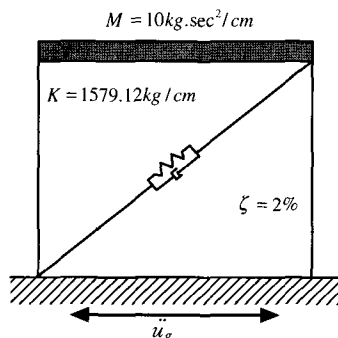


그림 1 단자유도계 시스템

단자유도계의 에너지 균형을 식(3)으로 표현할 수 있다.<sup>3)</sup>

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + f_s(u, \dot{u}) = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

$$\int_0^u m\ddot{u}(t)du + \int_0^u c\dot{u}(t)du + \int_0^u f_s(u, \dot{u})du = - \int_0^u m\ddot{u}_g(t)du \quad (2)$$

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_S(t) + E_Y(t) \quad (3)$$

여기서 각각  $E_I(t)$  = 구조물에 입력되는 에너지,  $E_K(t)$  = 구조물의 운동에너지,  $E_D(t)$  = 구조물의 감쇠에 의하여 소산되는 에너지,  $E_S(t)$  = 구조물의 변형 에너지,  $E_Y(t)$  = 구조물의 소성변형을 통하여 흡수되는 에너지이다. 점탄성 감쇠기가 설치되면 시스템의 에너지 균형은 식(4)와 같으며 구조물의 소성변형 에너지  $E_Y(t)$ 를 대부분 감쇠에너지  $E_{VED}(t)$ 로 소산시키게 되므로 구조물의 소성변형을 방지할 수 있다.

$$E_I(t) = E_K(t) + E_D(t) + E_{VED}(t) + E_S(t) + E_Y(t) \quad (4)$$

지진하중에 대한 감쇠기의 에너지 소산 능력을 파악하기 위하여 그림 1과 같이 감쇠기가 설치된 단자유도계 시스템의 해석을 수행하였다.

시스템의 주기는 0.5초이며 El Centro, 1940, S00E 지진하중을 가하였다. 그림 2는 탄성 시스템 및 항복내력이 탄성 시스템의 1/2인 ( $f_y = 0.5f_0$ ) 시

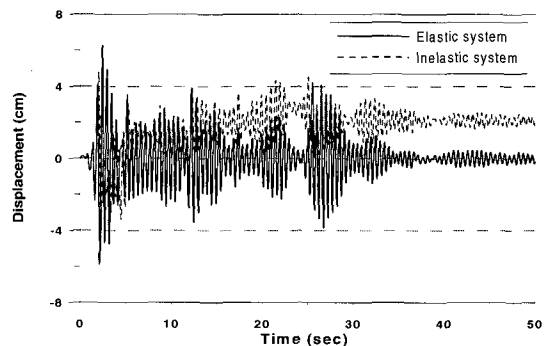


그림 2 단자유도계의 탄성 및 비탄성 거동

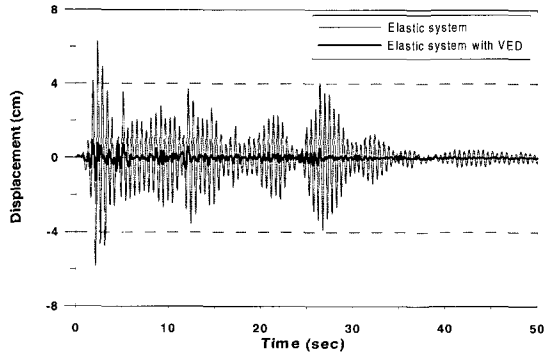


그림 3 감쇠기가 설치된 시스템의 거동

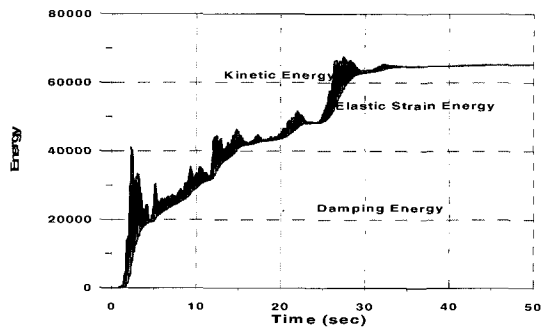


그림 4 탄성 시스템의 에너지 시간이력

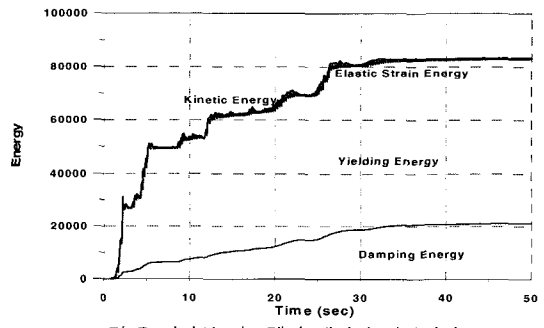


그림 5 비탄성 시스템의 에너지 시간이력

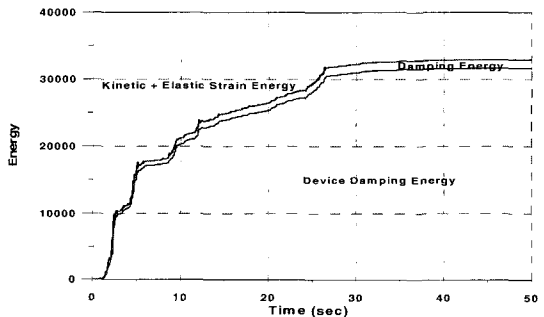


그림 6 감쇠기가 설치된 시스템

시스템의 응답의 시간이력을 나타내며 비탄성 거동을 할 경우 영구변형이 발생함을 알 수 있다.

수치해석결과 구조물이 탄성거동을 한다고 가정하면 그림 4와 같이 구조물의 감쇠에너지( $E_D$ )가 지진 에너지의 대부분을 소산시키는 것을 알 수 있다. 감쇠기가 장착되지 않은 경우 비탄성 시스템의 항복강도에 따른 차이는 있으나 그림 5에 나타난바와 같이 소성변형에너지( $E_Y$ )가 지진에너지의 상당부분을 차지하고 있다. 따라서 감쇠기가 설치된 시스템은 감쇠기의 크기 및 성능이 충분한 경우 그림 3과 같이 대부분의 지진에너지를 감쇠기의 감쇠에너지와 구조물의 감쇠에너지가 소산시키며 탄성거동을 하도록 유도할 수 있을 것으로 사료된다.

### 3. 해석모델 및 지진하중

#### 3.1 해석모델

해석모델은 5층과 10층, 20층의 2차원 철골 골조 건물로 건축학회의 강구조계산규준(허용응력설계법, 1983)에 따라 MIDAS GEN<sup>4)</sup>을 이용하여 설계하였다(그림 7). 층고는 1층은 5m, 기준층은 4m로 정하였다. 5층 골조는 보와 기둥에 항복강도 2400kgf/cm<sup>2</sup>인 압연형강을 사용하였고, 10층과 20층 건물의 보에는 항복강도 2400kgf/cm<sup>2</sup>, 기둥에는 3300kgf/cm<sup>2</sup>인 철골부재를 사용하였다.

10층과 20층 모델은 중력하중 및 풍하중에 대하여 저항하도록 설계하고 5층 모델의 설계하중은 중력하중만을 고려하였다.

#### 3.2 내진성능목표와 설계지반운동

1997년 지진공학회에서 수행한 「내진설계기준연구 II」는 성능에 기초한 내진설계(Performance Based Seismic Design)를 기본개념으로 하고 내진성능수준과 성능수준별로 설계응답스펙트럼을 규정하고 있다. 이 연구에서는 전국을 두 개의 지진구역으로 나누고, 지진의 재현주기에 따라 위험도계수를 정하였다. 지반은 5종류로 분류하였으며 각각의 지진구역과 지반에 적합한 표준 설계응답스펙트럼을 만들 수 있다. 이 규정된 재현주기별 내진성능 목표는 표 1과 같으며 지진구역과 지반종류에 따른 지진계수( $C_a$ )는 표 2와 같다.

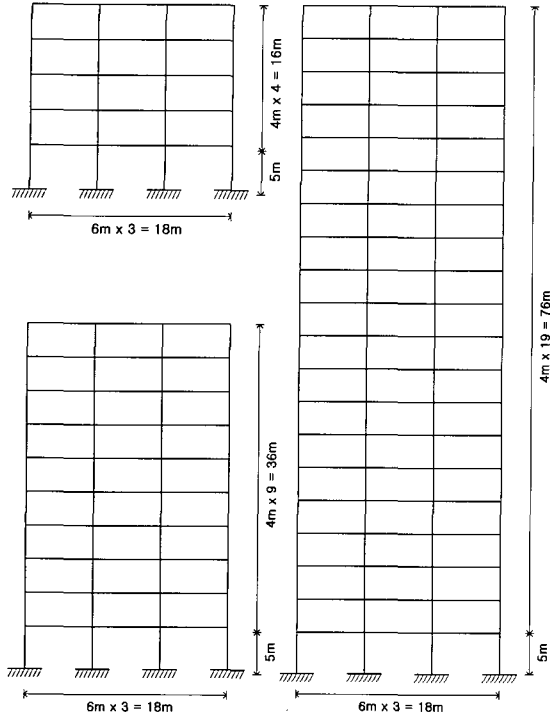


그림 7 해석모델

표 1 내진성능 목표

재현주기	성능수준	
	기능수행	내진등급
50년	II등급	붕괴방지
100년	I등급	
200년	특등급	
500년		II등급
1000년		I등급
2400년		특등급

표 2 지진계수 ( $C_a$ )

내진성능목표	지반종류			
	50년	100년	500년	1000년
재현주기	50년	100년	500년	1000년
내진등급	II등급	I등급	II등급	I등급
지반종류	II등급	I등급	II등급	I등급
SA	0.036	0.051	0.09	0.126
SB	0.044	0.063	0.11	0.154
SC	0.052	0.074	0.13	0.182
SD	0.064	0.091	0.16	0.224
SE	0.088	0.125	0.22	0.308

본 연구에서는 내진성능목표에 적합한 표준설계응답스펙트럼을 만든 다음 이를 바탕으로 비탄성 시간이력해석을 수행하기 위한 인공지진을 생성하였다. 인공지진은 Gasparini와 Vanmarcke<sup>5)</sup>가 제안한 정현파와 중첩을 이용한 프로그램인 SIMQKE를 이용하여 구하였다. 이와 같은 방법으로 지진계수 0.154g에 대하여 구한 인공지진의 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼을 비교하면 그림 8과 같고 인공지진의 가속도 시간이력은 그림 9와 같다.

일반적인 건축물은 강한 지진에 대해서 주요 부재의 소성변형을 허용하도록 설계된다. 이러한 경우 건축물에 입력된 지진에너지는 부재의 소성변형을 통하여 소산되며 따라서 각 부재들은 어느 정도의 손상을 피할 수 없게된다. 그러나 점탄성 감쇠기와 같은 진동저감장치 또는 에너지 소산장치가 설치된 건축물은 지진에너지의 대부분을 감쇠장치를 통하여 소산시킴으로써 구조부재의 소성변형을 방지할 수 있으며

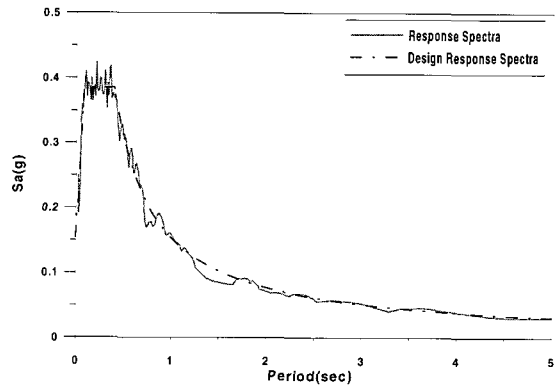


그림 8 인공지진 응답스펙트럼(0.154g)

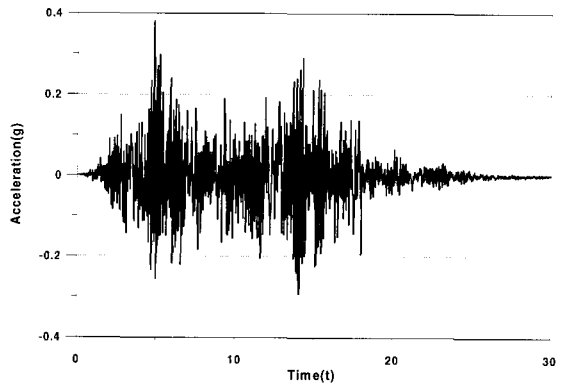


그림 9 인공지진 가속도 시간이력( $C_a=0.154g$ )

이러한 과정을 통하여 구조물에 더욱 높은 내진성능 수준을 보장할 수 있게 된다.

#### 4. 예제해석 및 결과

지진해석을 위한 설계지반가속도를 결정하기 위하여 본 연구에서는 「내진설계기준연구(II)」에서 제시하고 있는 지역구분 중에서 I 지역으로 선정하고 결정된 지역계수에 위험도계수를 곱하여 각 성능수준별 내진 등급별 설계응답스펙트럼을 결정하였다.

5층과 10층, 20층 모델에 성능수준에 해당하는 설계응답스펙트럼을 바탕으로 만들어진 인공지반가속도를 사용하여 시간이력해석을 수행하였다. 해석은 2차원 탄소성 해석 프로그램인 DRAIN-2DX를 이용하였다.<sup>6)</sup> 감쇠기의 물성치는 각각 전단저장계수 ( $G'$ ) =  $210.6t/m^2$ , 전단손실계수 ( $G''$ ) =  $237.7t/m^2$ 인 감쇠재료를 사용하였다.

성능수준별 허용 층간 변위는 「내진설계기준연구(II)」에서 제시하고 있는 내용에 따라 완전기능수행수준(Fully Operational Level)인 경우 층고의  $\pm 0.2\%$ , 기능수행수준(Operational Level)인 경우 층고의  $\pm 0.5\%$ , 인명안전수준(Life Safety Level)인 경우  $\pm 1.5\%$ , 붕괴방지수준(Collapse Prevention Level)인 경우는  $\pm 2.5\%$ 로 하였다. 시간이력 해석결과 얻어진 각 모델의 층간변위는 그림 10에서 12에 나타나 있다. 내진등급 I등급, 5층 건물은  $S_E$  지반(연약한 토사지반)인 경우에는 기능수행 성능목표를,  $S_D$  지반(단단한 토사지반)인 경우에는 즉시기능수행 성능목표를 만족하지 못하였다.

10층 건물은  $S_E$  지반에서는 기능수행 성능목표를,  $S_D$ 와  $S_C$  지반(연암지반)에서는 즉시기능수행 성능목표를 만족하지 못하였다. 20층 건물은 10층보다 작용하는 설계 풍하중이 더 크기 때문에 거의 모든 성능목표를 만족하였다. 그러나  $S_E$  지반에서는 상부층에서 기능수행 성능목표를 만족하지 못하였다. 따라서 과거 설계기준에 따라 설계된 철골조 건물인 경우 많은 부재에 소성힌지가 발생하였고 일부 지반 조건에서 성능목표를 만족하지 못하였지만 「내진설계기준연구(II)」에서 제시하는 기준에 따르면 대체로 충분한 내진성능을 보유하고 있는 것으로 나타났다.

그러나 많은 소성힌지의 발생으로 구조물은 심각한

구조적 손상을 입게 되므로 보수에 많은 비용 및 시일이 필요하게 된다. 이러한 경우 점탄성 감쇠기를 설치하여 진동에너지를 소산함으로써 구조물의 손상을 원천적으로 방지하는 방안이 효과적인 대안이 될 수 있다.

표 3 성능수준에 따른 허용층간변위 (cm)

성능목표	완전기능수행	기능수행	인명안전	붕괴방지
	$\pm 0.2\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 1.5\%$	$\pm 2.5\%$
층고				
500	1	2.5	7.5	12.5
400	0.8	2	6	10

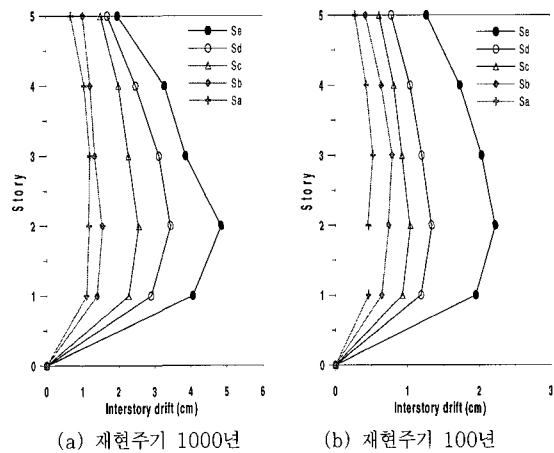


그림 10 재현주기 및 지반종류에 따른 5층 건물의 최대층간변위

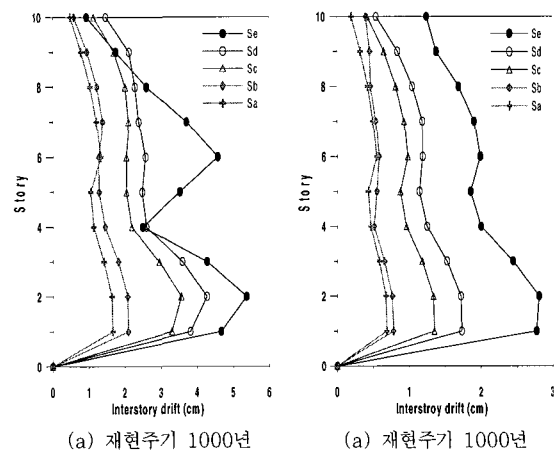
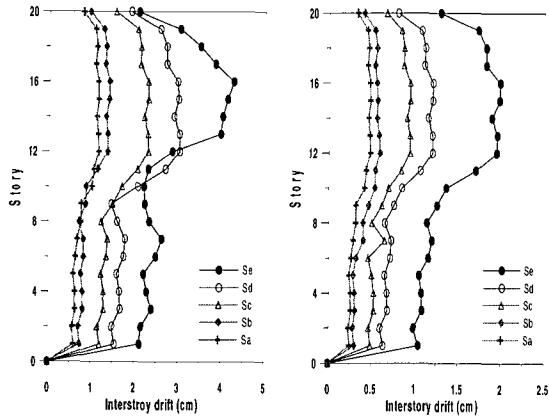


그림 11 10층 건물의 최대층간변위



(b) 재현주기 100년 (b) 재현주기 100년  
 그림 12 20층 건물의 최대층간변위

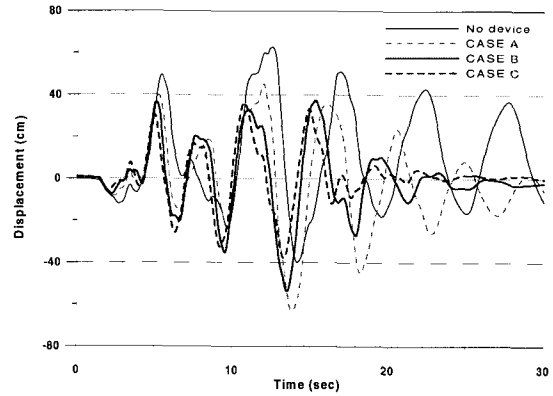
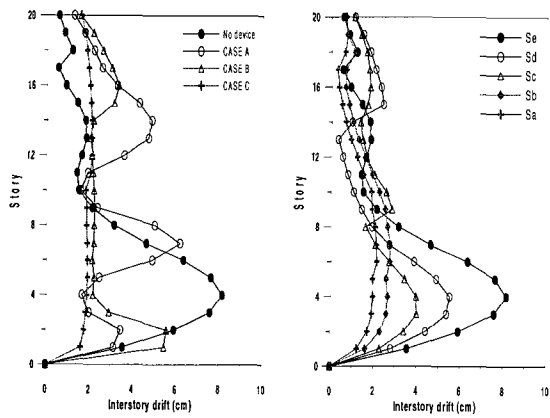


그림 14 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 최상층 변위의 시간이력



(b) 감쇠기 설치에 따른 거동변화 ( $S_E$  지반) (a) 지반조건별 거동변화  
 그림 13 1000년 주기 지진에 대한 최대층간변위

이를 위하여 그림 7에 나타난 20층 모델을 중력하중만 받도록 재설계하였다. 중력하중만 저항하도록 설계하였을 경우 풍하중까지 고려하여 설계하였을 때보다 전체 골조물량은 중량비로 약 30%정도 감소하였다. 설계한 20층 건물을 각 지반별로 재현주기 1000년인 지진하중에 대해서 해석한 건물의 응답은 그림 13(a)와 같다. 이 경우  $S_E$  지반인 경우 인명안전수행의 성능 목표에 크게 못 미치는 것으로 나타났다. 따라서 성능 수준을 향상시키기 위하여 점탄성 감쇠기를 최대 층간변위가 발생하는 곳에 순서대로 설치하였다. 첫 번째 단계로 층간변위가 가장 큰 곳인 저층부와 중간층 세 곳에 감쇠기를 설치하였을 때, 인명안전의 성능수

준은 만족하였지만 기능수행의 성능수준을 크게 초과한 층간변위가 발생하였다. 두 번째 단계로 열 두 곳에 감쇠기를 설치하였고, 역시 기능수행을 만족하지 못하여 전층에 점탄성 감쇠기를 설치한 결과  $S_E$  지반에서 기능수행의 성능수준을 만족하였다. 그림 14에 나타난 시간이력 해석결과에 따르면 감쇠기가 설치되지 않은 건축물의 경우 소성변형으로 인한 영구변형이 발생하였으며, 감쇠기를 여섯 곳에 설치하였을 때 (CASE-A) 역시 소성변형이 발생하였다. 감쇠기가 열 두 곳에 설치된 경우(CASE-B) 약간의 소성변형이 발생하였으며 전 층에 감쇠기를 설치하였을 때 (CASE-C)는 건물이 탄성거동 하였다. 각 CASE별로 각 층의 최대 층간변위는 그림 13(b)에 나타나 있으며 감쇠기의 설치에 따라 변위가 대폭 감소하는 것을 알 수 있다.

20층 모델에 있어서 감쇠기 설치 위치와 각 구조물의 소성변형 발생양상은 그림 18~21과 같다. 감쇠기가 설치되지 않은 구조물의 경우 저층과 중층의 보에서 많은 소성변형이 발생하였으며, 탄성 거동에 비하여 소성변형으로 인한 에너지 소산이 크게 나타났다.

감쇠에너지는 지진하중을 가한 직후 크게 나타나지 않았지만 점차 구조물의 속도가 증가함에 따라 지진에너지의 대부분이 열에너지로 소산되는 것을 알 수 있다. 설치된 감쇠기의 수가 증가할수록 소산된 에너지는 구조물의 변형이나 소성변에 의한 에너지는 줄어드는 반면 감쇠기의 감쇠력에 의한 에너지로 입력된 대부분의 에너지가 소산되는 것을 그림 15~17에서 알 수 있다.

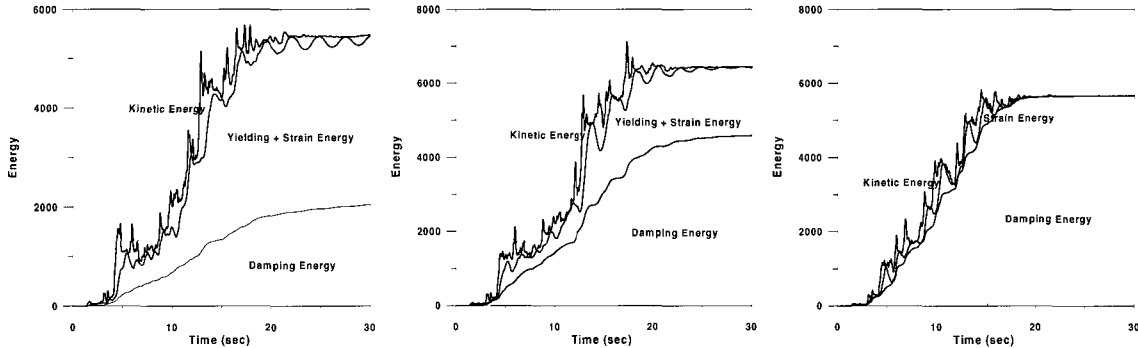


그림 15 감쇠기가 설치되지 않은 건물의 에너지 시간이력  
에너지 시간이력  
그림 16 CASE A의 에너지 시간이력  
에너지 시간이력  
그림 17 CASE C의 에너지 시간이력  
에너지 시간이력

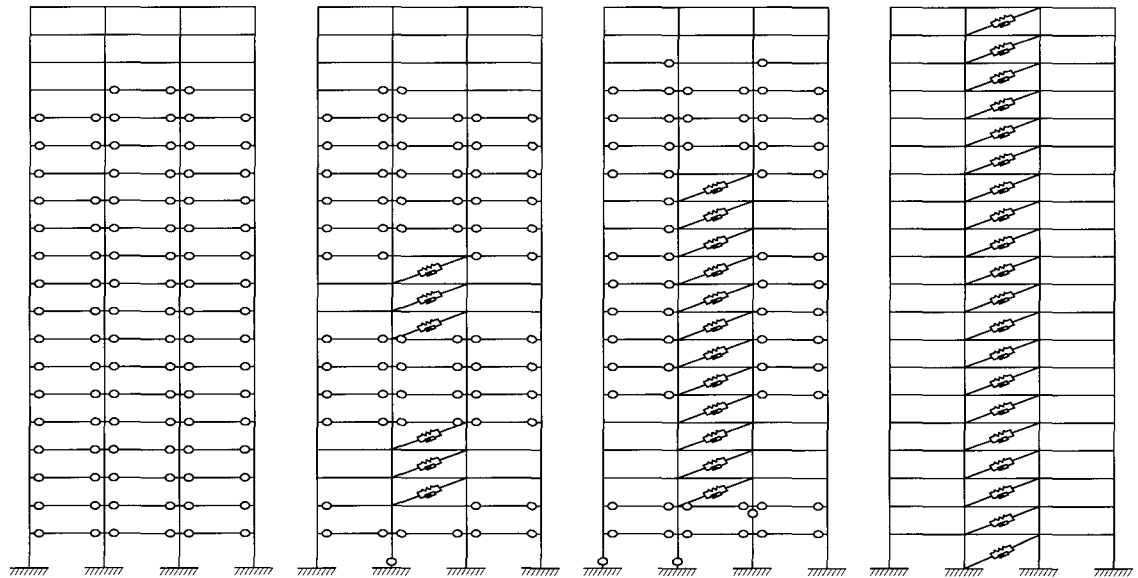


그림 18 1000년 주기 지진에 대한 소성지진 발생현황  
그림 19 CASE A  
그림 20 CASE B  
그림 21 CASE C

### 5. 결 론

본 연구에서는 지진하중이 고려되지 않은 2차원 철골프레임에 대하여 내진성능수준을 평가하고 원하는 성능수준에 도달하도록 점탄성 감쇠기를 설치하여 보강하는 방법에 관하여 연구하였다. 본 연구에서는 각 지반 별로 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction, SSI)을 고려하지 않았는데 기존의 연구 결과<sup>7)</sup>를 고려할 때 SSI를 고려할 경우 응답이 증가하여 본 연구의 해석결과에 나타난 성능수준에 다소 못 미칠 것으

로 예측되며 더 많은 보강이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 내진설계되지 않은 저층 철골조 구조물에 대하여 성능목표에 적합한 지진가속도를 가진하고 해석한 결과를 기준안에서 제시한 거동기준과 비교한 결과 대부분의 경우 상당한 수평저항력을 가지고 있는 것으로 나타났다.
2. 설계하중으로 풍하중을 고려한 철골조 고층건물인 경우 어느 정도의 강진에 대하여도 인명안전의 성능수준을 만족하였다. 다만 일부 연약토사지반

(SE) 및 단단한 토사지반(SD)에서 발생하는 중간 규모의 지진에 대해서는 기능수행수준에 도달하기 위하여 적절한 내진보강을 필요로 하였다.

3. 지진하중에 의하여 건물에 입력된 에너지는 구조부재의 변형에 의하여 변형에너지로 소산되었지만, 점탄성 감쇠기를 설치하였을 경우에는 대부분의 입력 에너지가 감쇠기의 감쇠에너지로 소산되어 구조부재의 손상을 줄이고 건물의 성능수준도 높일 수 있다. 이 때 추가되는 감쇠기의 비용은 줄어드는 구조부재의 물량으로 상쇄될 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '97 건설기술 연구개발 사업'의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 한국지진공학회, 내진설계기준연구(II), 1997
2. Chang, K. C., Soong, T. T., Oh, S. T. and Lai,

M. L., Seismic Behavior of Steel Frame with Added Viscoelastic Dampers, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 121, 1995, pp.1418~1426

3. Anil K. Chopra, *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995
4. POSCO Engineering & Construction CO., Ltd, MIDAS-GEN, Vol. I~Vol. IV, 1999
5. E.H. Vanmarcke, D.A. Gasparini, "A Program for Artificial Motion Generation", User's Manual and Documentation, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1976
6. Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S., DRAIN-2DX, Static and Dynamic Analysis of Plane Structure, NISEE, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA
7. ATC, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings", ATC-40 Report, Applied Technology Council, California, 1996

(접수일자 : 2000. 4. 27)