



등가프레임모델을 이용한 공동주택의 감쇠시스템 설계

김종호^{1)*} · 이명규¹⁾ · 천영수²⁾ · 이동철¹⁾

¹⁾(주)창민우구조건설탄트 ²⁾토지주택연구원

Damping System Design for Apartment Buildings Using Equivalent Frame Model

Jong-Ho Kim,^{1)*} Myoung-Kyu Lee,¹⁾ Young-Soo Chun,²⁾ and Dong-Chul Lee¹⁾

¹⁾Chang Minwoo Structural Consultants, Seoul 135-907, Korea

²⁾Land & Housing Institute, Daejeon 305-731, Korea

ABSTRACT The purpose of this research is to introduce the simplified equivalent frame model for the equivalent lateral force procedure, the response spectrum procedure and nonlinear procedure according to ASCE7-10 in order to reduce the time of performance and reasonably evaluate the effect of applying the damping system with the various conditions for the analysis and the variable. In this research, the seismic performance assessment and the design of the damping system were conducted through the nonlinear time history analysis based on the performance based seismic design in ASCE7-10 in regard to applying the damping system to apartment buildings which is lately issued. The optimal design based on the 75% of seismic base shear was performed for an apartment building. The seismic performance assessment were conducted to check the safety of the building, and the economic evaluation was performed by comparing the amount of resource for the optimal designed building with the amount of resource for the original building. In addition, hysteresis dampers was applied to the apartment building, and the suggested equivalent frame model was performed using the damping system design in ASCE7-10, then its control effects were proved in the full scale model of the apartment building which was used in this research.

Keywords : damping system, simplified equivalent frame model, nonlinear time history analysis, seismic performance evaluation, performance based seismic design

1. 서 론

경제성과 내진성능을 향상시킬 수 있다는 전제로 국내 공동주택에 감쇠시스템의 도입은 이미 수년전부터 이루어지고 있다. 그러나 내진성능향상을 위한 감쇠시스템 적용과 관련하여 아직까지 국내에 내진설계기준이 도입되지 않아 선형 강도기반 내진설계에 익숙한 엔지니어의 경우 실무적용에 어려움이 많다. 또한 현행 내진설계법으로 감쇠장치가 적용된 건축구조물의 내진성능을 구명하기에는 한계가 있으며 감쇠시스템 설계기준이 없기 때문에 설계자별로 이해를 달리하여 무분별하게 감쇠장치를 사용할 수도 있다. 따라서 엔지니어는 감쇠시스템 설계에 대한 올바른 이해와 검증과 관련한 주의가 필요하다.^{1,2)}

이에 건축학회(오상훈 등)에서는 건축구조기준에 따라 건축물 및 공작물의 안전성, 사용성 및 내구성을 확보하기 위하여 내진설계에 부가한 제진구조설계의 기술적 사항을 정리하는 것을 목적으로 에너지법에 의한 제진구조설계를 도입하여 제진구조설계지침 및 예제집을 발간하였다. 에너지설계법은 하중과 그에 의한 변형의 곱인 에너지를 비교하고 평가하는 내진설계법으로 지진과 같은 외력에 의해 입력된 에너지보다 골조의 에너지 흡수능력을 더 크게 설계하여 골조의 내진성을 확보할 수 있도록 하는 것이다.³⁾

반면, ASCE7-10의 감쇠시스템의 내진설계법은 변위의 성능기반 내진설계를 주골자로 한다. 건물의 내진성능은 IO, LS, CP로 간단하게 요약할 수 있으며 건축구조기준에서 명시하는 내진 특등급, 1등급, 2등급의 허용층간 변위율인 1/100, 1/67, 1/50 으로 구분할 수 있다. 즉, 건물의 안전도는 층간변위율에 있다고 할 수 있다. 층간변위율을 어느 정도로 제어할 것인가가 성능설계의 기본적인 철학이며 이를 보다 명확하게 구현하기 위해 감쇠시스템

*Corresponding author E-mail : jhkim@minwoo21.com

Received April 15, 2014, Revised June 17, 2014,

Accepted June 20, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

을 적용한다. 결국, ASCE7-10의 감쇠시스템이 적용된 구조물의 내진설계철학은 지진의 요구조건과 건물의 성능을 명확히 구분하여 요구지진 수준에서 건물의 응답이 목표하는 성능 이상으로 변위 응답을 제어하는 것이라고 할 수 있다.^{4,6)}

구조물의 성능기반설계 및 감쇠시스템을 설계 시 비선형응답이력해석을 반복 수행해야 하는데 Full Scale 3 Dimension Finite Element(이하: FSFE) 모델은 건물의 규모가 클 경우 해석에 필요한 자유도 요소수의 증가로 상당한 해석시간이 소요된다. 자유도가 적은 경우 자유도수에 비례하여 해석 시간을 줄일 수가 있으며 자유도를 줄인 등가모델은 FSFE 모델 해석에 비해 그 정확성은 떨어지나 줄어든 자유도 수만큼 1/10~1/1000 혹은 그 이상 해석 시간을 단축할 수 있어 다양한 설계변수 및 해석조건을 적용하여 많은 해석을 수행함으로써 합리적인 결과를 도출할 수 있는 장점이 있다. 김태완, 박용구 등은 질량계수와 변형 형상을 고려한 고층벽식 아파트의 지진해석을 위한 등가모델을 제안하였으며 박용구, 김현수, 이동근은 전단벽-골조 구조시스템의 효율적인 해석을 위한 WC-FM 모델을 제안하여 다른 등가모델의 시간과 유사하게 적은 시간을 소요하면서도 FSFE 모델과 흡사한 정확한 결과를 도출하였다.^{7,8)}

이 연구의 목적은 질량과 선형의 동적특성을 일치시킨 간략화 등가모델을 이용하여 FSFE 비선형 응답이력해석 수행 시 소요되는 시간을 단축함으로써 구조물에 다양한 조건의 비선형 해석을 수행하여 합리적인 감쇠시스템 설계안을 도출하는 것이다. 단, 간략화 모델에서는 기둥의 비선형 특성만을 고려하여 구조물의 안전성 및 감쇠장치 적용 시 그 효과를 검토하는 것이므로 실제 FSFE 모델의 비선형해석 결과와 유사한 응답경향을 도출하지만 차이가 다소 발생한다. 이 연구에서는 제안된 간략화 등가프레임 모델로 ASCE7-10의 구조설계기준에 따라서 감쇠시스템의 설계를 수행하고 도출된 설계안을 FSFE 모델에 적용하여 간략화 등가모델을 이용한 감쇠시스템 설계절차의 효용성을 검토하였다.

2. 대상건물 개요

2.1 건물개요

Fig. 1은 감쇠시스템을 적용하여 내진설계를 수행할 대상건물의 기준층 평면도이다. 5호 조합의 공동주택 건물로 기존의 벽식구조가 아닌 전단벽과 골조로 이루어진 보통전단벽 건물골조 시스템(2-o, R=5.5, $\Omega_0=2.5$, $C_d=4.5$: KBC2009)이다. 건물의 특성상 지진 시 대부분의 횡력을 계단실과 엘리베이터 코어 전단벽에서 부담하도록 설계되었다.

건물의 규모는 지하층(1층 5.4 m) 지상 1-18층(3.1 m: 55.8 m)으로 Fig. 2에서와 같이 구획이 나뉘어 콘크리트

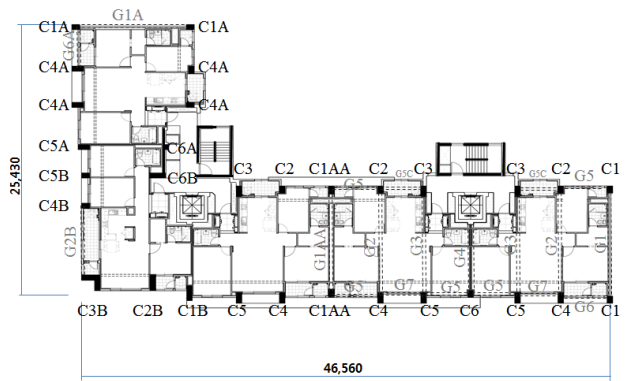


Fig. 1 Typical plan of the apartment building (unit: mm)

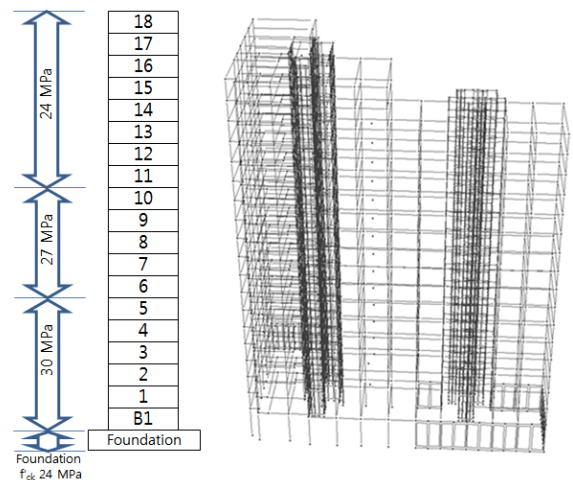


Fig. 2 Division of concrete material strength and Full Scale 3D FE Model for the apartment building

강도가 적용되어 있다. 건물의 총 중량은 약 203000 kN이며 고정하중이 154000 kN, 경량칸막이벽을 포함하여 활하중이 49000 kN이다. 고유치 해석 결과 건물의 고유주기는 1차모드(mY) 주기가 2.0365 sec, 2차모드(mX) 주기가 1.8732 sec, 3차모드(rZ) 주기는 1.7022 sec이다.

2.2 설계하중

2.2.1 고정하중 및 활하중

바닥 마감 및 조적, 골조 자중, 설비 하중 등 건축 마감을 고려하여 고정하중을 산정하였으며, 건축 실용도에 준하여 활하중을 산정하였다.

2.2.2 풍하중 및 지진 하중

건축구조기준에 준하여 산정한 풍하중 및 지진 하중은 Table 1, 2와 같다.

2.3 주요구조부 설계

성능기반 내진설계를 목적으로 건축구조기준의 지진

력의 75% 수준으로 기둥, 보, 벽체의 최적화 설계를 수행하였으며 최적설계 시 주요 기둥과 보의 상세는 Table 3, 4와 같다.

참고로, 지진력 75% 수준의 최적설계 결과 100% 지진력 요구 대비 기준층의 물량감소는 콘크리트의 경우 약 14%, 철근의 경우 약 3.7% 물량이 감소되었다.

3. 내진성능평가

제진설계에 앞서 ASCE7-10 설계제한 사항의 검토 및 위의 대상건물의 내진성능을 확인하고자 Perform 3D(비선형 전용 해석 프로그램; 이하 P3D)를 이용하여 비선형 해석모델을 구축하고 비선형 시간이력해석을 수행하였다.

3.1 비선형 해석모델

일반적으로 내진성능평가를 위한 비선형 해석모델에 적용하는 재료강도는 설계 시 적용되는 재료강도의 하한값이 아닌 보정계수를 적용한 평균강도를 사용한다. Table 5는 ASCE 41-06에서 제시하는 평균강도를 구하기 위한 재료별 보정계수를 나타내며 이를 참고하여 대상건물의 재료강도를 산정하는데 적용하였다. 또한 해석모델에 철근콘크리트 부재의 균열을 고려하기 위하여 ASCE 41-06에 따라 Table 6와 같이 구조요소에 따른 유효강성을 적용하였다.

대상건물의 주요 구조부재인 보, 기둥, 전단벽, 인방보에 대한 비선형 모델은 P3D를 이용하여 다음 Fig. 3과 같이 해석모델을 작성하였다. 우선 보는 Fig. 3(a)와 같이 FEMA 콘크리트 보 타입을 적용하여 보의 양단에 소성힌지가 발생하는 것으로 가정하였다. 기둥은 축력과 모멘트를 동시에 받는 부재이기 때문에 FEMA 콘크리트

Table 1 Wind design parameters

Parameter	Design coefficient	Remark
Design velocity	30 m/sec	-
Wind force	B	-
Importance factor	1.0	I_w

Table 2 Seismic design parameters

Parameter	Design coefficient	Remark
Zone	0191	-
Site soil	S_D	-
Seismic design category	D	-
Reponse modification factor	5.0 (2-o. ordinary reinforced shear walls)	-
Overstrength factor	2.5	-
Deflection amplification factor	4.5	-
Importance factor	1.2	I_e

Table 3 Column detail

Mark	C2A	C2B	C3		C3A	C4B
Detail						
Spec.	8-D25	12-D25	10-D25	8-D25	8-D25	8-D25
Mark	C1,C6	C1A	C1AA	C1B	C4A	C5A
Detail						
Spec.	6-D25	10-D25	8-D25	12-D25	10-D25	10-D25

Table 4 Beam detail

Mark	G2B		G3(2~11F)		G6A	
Detail						
Upper	7-D19	3-D19	8-D19	3-D19	6-D19	9-D19
Lower	3-D19	4-D19	3-D19	4-D19	4-D19	5-D19
Stirrup	D10@100	D10@200	D10@100	D10@200	D10@100	D10@200
Mark	G1		G1A		G4	
Detail						
Upper	8-D19	3-D19	7-D19	3-D19	6-D19	2-D19
Lower	3-D19	4-D19	3-D19	4-D19	3-D19	4-D19
Stirrup	D10@100	D10@200	D10@100	D10@200	D10@100	D10@200

Table 5 Factors to translate lower-bound material properties to expected strength material properties

Material property	Factor
Concrete compressive strength	1.50
Reinforcing steel tensile and yield strength	1.25
Connector steel yield strength	1.50

Table 6 Effectives stiffness values

Component	Flexural rigidity	Shear rigidity	Axial rigidity
Beam-non-prestressed	$0.5E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	-
Beam-prestressed	E_cI_g	$0.4E_cA_w$	-
Column with compression due to design gravity loads $\geq 0.5A_gf_c$	$0.7E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	E_cA_g
Column with compression due to design gravity loads $\leq 0.3A_gf_c$ or with tension	$0.5E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	E_cA_g
Walls-uncracked (or inspection)	$0.8E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	E_cA_g
Walls-cracked	$0.5E_cI_g$	$0.4E_cA_w$	E_cA_g

기둥 타입을 이용하여 Fig. 3(b)와 같이 P-M-M 상관도를 생성, 해석 후 지진하중에 의해 항복곡면을 넘어서는지를 검토하였다. 보와 기둥의 모델에 적용되는 비선형 특성은 ASCE 41-06를 참고하여 산정하였다. 인방보는 전단변형으로 지배되는 것으로 가정하였으며 Fig. 3(c)와 같이 부재의 중앙에 전단힌지를 적용하였다. 전단힌지에 적용한 비선형 특성은 간단히 강체-소성 모델을 적용하여 하중지배 부재로서 설계강도에 대한 안전성을 검토하였다. 전단벽은 Fig. 3(d)와 같이 파이퍼 모델을 바탕으로 콘크리트와 철근의 비선형 재료특성을 이용하여 비선형 모델을 적용하였다. 콘크리트는 비구속 콘크리트로서 비선형 재료특성은 Kent & Park 모델을 참고하였으며 철근의 비선형 재료특성은 항복 후 강성이 초기 강성의 2%가 되도록 이선형 모델을 적용하였다.^{9,11,12)}

3.2 지진파 선보정

Fig. 4는 선보정된 7개의 지진파의 응답스펙트럼을 나타낸다.

비선형 응답이력해석에 사용되는 지진파를 선보정하기 위해 재해수준이 2400년 재현주기의 2/3에 해당하는 지진에 대한 설계응답스펙트럼을 목표 스펙트럼으로 선정하였으며 건축구조기준에 따라 7개의 지진파를 선보정하였다.

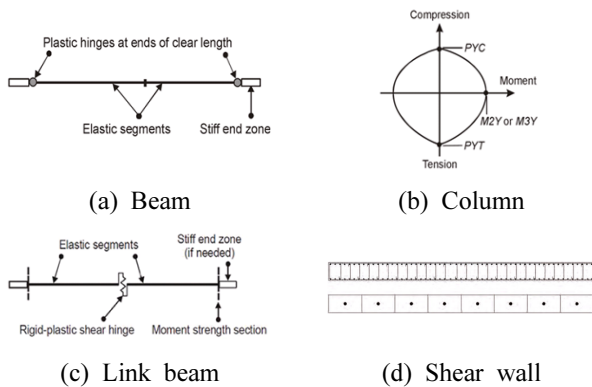


Fig. 3 Nonlinear model for structural components

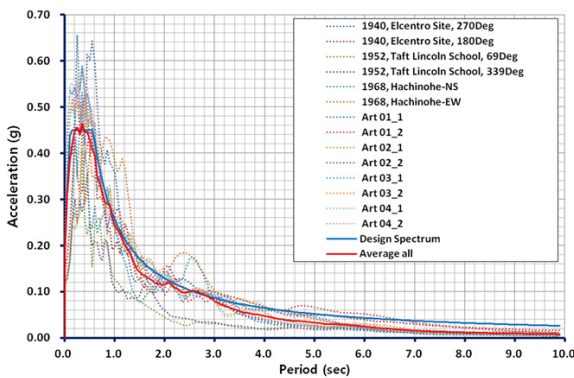


Fig. 4 Response spectra for ground motions

3.3 비선형 응답이력해석 결과

위에 선보정된 7개의 지진파를 이용하여 대상건물에 대한 비선형 응답이력해석을 수행하였다. Fig. 5와 6은 각각 x방향 y방향에 대한 층간변위율을 나타내며 허용층간변위율인(내진등급 I) 0.015를 만족하였다.

부재들의 성능수준은 Fig. 7과 같이 중·하층부 벽체의

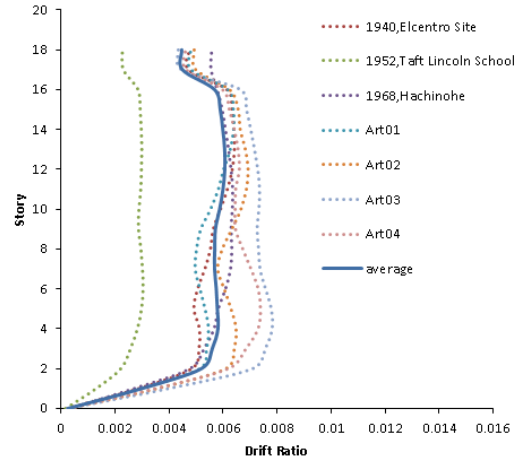


Fig. 5 Inter-story drift ratio for X direction

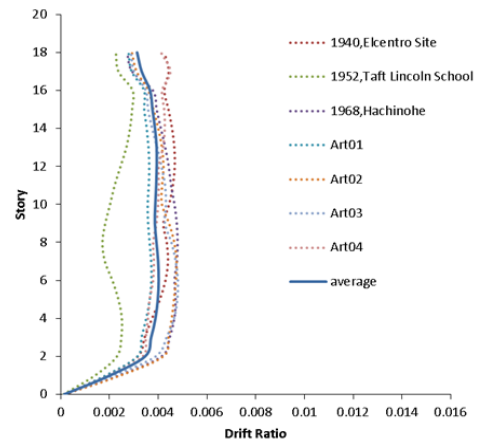


Fig. 6 Inter-story drift ratio for Y axis

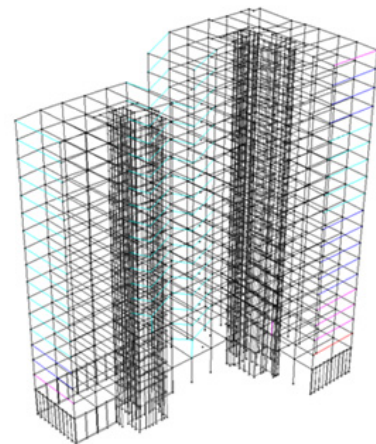


Fig. 7 Performance Level for structural members

일부분에서 콘크리트가 항복하지만 압축 변형률이 극한 변형률인 0.003을 초과하지는 않았다. 기둥은 거의 탄성 상태이지만 보는 일부 소성힌지가 발생하며 특히 비틀림 변형이 발생하는 외곽보에서는 LS(life safety)수준 이상의 변형률이 발생하였다. 비선형 해석 결과 감쇠시스템 도입 시 설계지진력 75% 이상으로 제한하는 ASCE7-10 설계방법은 최소 규정으로서 적절한 것으로 사료된다.

4. 등가모델을 이용한 감쇠시스템 설계

4.1 등가프레임 모델

골조모델의 경우 전단거동을 효과적으로 반영할 수 있으므로 간략화 등가골조모델을 예비설계 검토용으로 제안하였다. 설계검토를 위해 사용된 등가모델은 간단히 3가지 절차로 작성하였다. 첫째, FSFE 모델의 층질량과 층강성을 파악하여 선형 동특성을 일치시키고 둘째, pushover해석을 수행하여 ASCE7-10 등가횡력절차에서의 지진력저항시스템의 등가횡력수준으로 밀면전단력을 결정하였다. 마지막으로 기둥에 비선형 특성을 ASCE41-06의 콘크리트 기둥 1차부재의 LS 허용변형각수준인 0.012으로 입력하여 간략화된 비선형 등가프레임 모델을 완성하였다.

제안된 골조모델은 L-구조평면의 형태를 동일면적의 형태의 다각형으로 구성하여 구조물의 평면비정형으로 인한 비틀림 거동의 특성을 반영토록 하였으며 골조의 경간에 따라 회전 저항력이 커지게 되는 효과를 고려하였다. 대상 구조물은 Fig. 8에서 a와 b의 길이비가 1:2이며 등가모델은 동일한 면적을 가지는 사다리꼴 형태로 구성된다. 이때 평면의 중심은 L형-구조평면 중심의 경우 $G1(\frac{5}{16}b, \frac{1}{2}a)$ 이고 등가사다리꼴 평면의 경우 $G2(\frac{2}{5}b, \frac{7}{20}a)$ 이며 등가모델 작성 시 계산한 중심을 고려하여 집중질량으로 질량의 정보를 구조해석 자료로 입력한다.

4.1.1 등가모델의 강도분포

층 휨모멘트 강도 지표는 다음 Table 7과 같다.

등가모델에 반영된 층별 기둥의 강도는 Fig. 2의 콘크리트 강도 구획과 설계 시 철근배근의 타입에 따른 구획

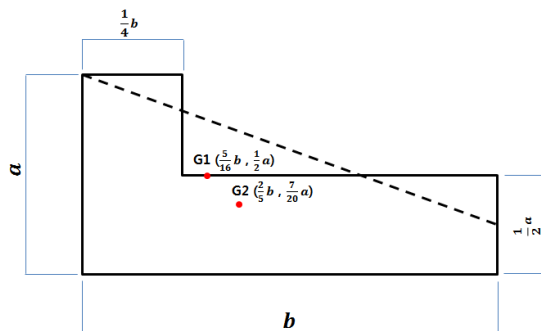


Fig. 8 Equivalent plan of the apartment building

으로 구분하여 다음의 강도 분포를 얻었으며 건물의 재료강도 구획과 철근배근에 따른 강도저감 구획을 조합하여 등가모델의 층별 기둥강도를 Table 8에 정리하였다.

여기서, Z3, Z2, Z1은 콘크리트 재료강도를 층별 구역으로 나타낸 것으로 Z3(B1~5층) 30 MPa, Z2(6~10층) 27 MPa, Z1(11~18층) 24 MPa 이며 A, B, C, D, E는 철근 배근상세에 따른 강도의 저감을 적용하였으며 A=1, B=0.98, C=0.96, D=0.94, E는 상부 2개층의 1/2 면적만 고려한 0.5 이다.

4.1.2 등가모델의 고유주기

등가모델의 고유주기는 선형해석의 층별 강성을 반영하여 각층 기둥의 휨과 회전의 등가강성을 부여하면 쉽게 등특성을 일치시킬 수 있다. 단, 건물의 휨거동과 전단거동의 상호작용을 모두 반영하긴 어렵고 평면 질량의 이동(mX, mY)과 회전(rZ)의 1차 주기 특성만 정확히 반

Table 7 Strength coefficient according to division of the material strength and the reduced strength by rebar

	A	B	C	D	E	Remark
Z3	1	0.98	0.96	0.94	-	-
Z2	-	-	-	0.846	0.45	-
Z1	-	-	-	0.752	0.4	-

Table 8 Column capacity of equivalent model

	Zone	Strength factor	Moment strength Xdir (kNm)	Moment strength Ydir (kNm)	Remark
B1	Z3A	1	11238	10473	-
1F	Z3B	0.98	11014	10264	-
2F	Z3C	0.96	10789	10054	-
3F	Z3D	0.94	10564	9845	-
4F	Z3D	0.94	10564	9845	-
5F	Z3D	0.94	10564	9845	-
6F	Z2D	0.846	9508	8860	-
7F	Z2D	0.846	9508	8860	-
8F	Z2D	0.846	9508	8860	-
9F	Z2D	0.846	9508	8860	-
10F	Z2D	0.846	9508	8860	-
11F	Z1D	0.752	8451	7876	-
12F	Z1D	0.752	8451	7876	-
13F	Z1D	0.752	8451	7876	-
14F	Z1D	0.752	8451	7876	-
15F	Z1D	0.752	8451	7876	-
16F	Z1D	0.752	8451	7876	-
17F	Z1E	0.4	4495	4189	-
18F	Z1E	0.4	4495	4189	-

영할 수 있다. 작성된 등가모델의 주기는 1차모드(mY) 주기가 2.039 sec, 2차모드(mX) 주기가 1.872 sec, 3차모드(rZ) 주기는 1.70 sec 이며 Table 9와 같이 FSFE 모델과 비교하여 1%이하의 오차 수준이다.

4.1.3 Pushover 해석 결과

Table 8의 층별 강도를 적용한 등가모델의 정적비선형 해석(pushover)을 수행하였다. 전체 시스템에서 첫 항복 구간이 탄성한계를 상회하고 있으나 결과는 적절하다고 판단된다. 등가모델 특성상 소성힌지가 고르게 분포되지 않아 연성능력은 1.3이하로 작게 나타난다.

Fig. 10의 pushover 응답으로 6층 강도변화 구간에서 지진력에 대하여 매우 취약함을 알 수 있다. 물론 등가모델이기 때문에 단순하게 비선형 특성이 반영되어 완만한 성능곡선을 얻을 수는 없으나 강도가 약한 층을 경계로 취약한 부위에 집중해서 변형이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10(a)는 X방향 응답을 나타내고 Fig. 10(b)는 Y방

Table 9 Comparison between the modal periods of full scale FE model and equivalent model

	FSFE model	Equivalent model	error (%)
1st mode	2.0365	2.039	0.12
2nd mode	1.8732	1.872	0.06
3rd mode	1.7022	1.700	0.13

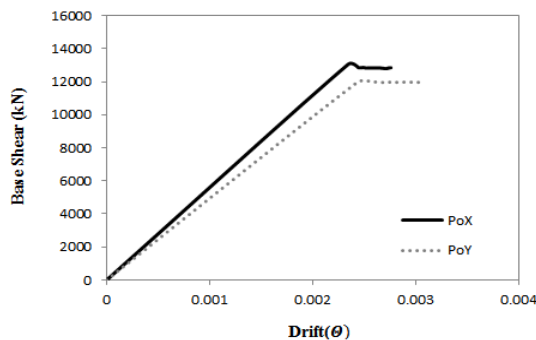


Fig. 9 Pushover results of equivalent frame model

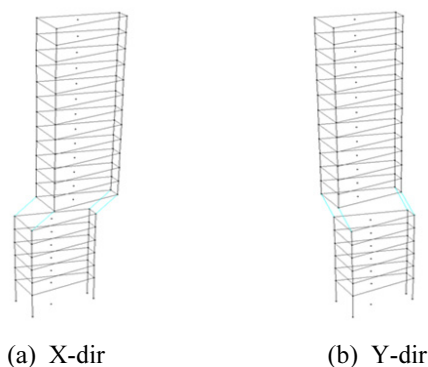


Fig. 10 Pushover responses of equivalent frame model

향의 변형 응답을 나타낸다. 각각 6층에서 응력이 집중되어 강도의 한계와 변형의 한계를 벗어난다.

4.1.4 비선형 응답이력해석 결과

Fig. 11은 Design Based Earthquake Demand(이하: DBE)의 7개 지진파 지진동 적용 시 등가프레임모델의 주요응답으로 El Centro 지진파 지진동에서 2층 LS-CP 수준의 응답(a)을 얻었고 영구변형이 발생하였다. Hachinohe의 경우 2층에서 LS-CP 수준, 6층에서 IO-LS 수준의 응답(b)을 얻었다. Taft의 경우 비선형거동 없이 전층 탄성응답(c) 기능수행 수준이다.

인공지진파1의 경우, 2층 LS 응답(d) 수준이고, 인공지진파2의 경우, 2층 LS, 6층 IO-LS의 응답(e) 수준, 인공지진파3의 경우, 2층 LS의 응답(f) 수준이며, 인공지진파4의 경우, 2층 LS의 응답(g) 결과를 얻었다.

그 외의 부재들은 모두 탄성응답 수준이다.

평균적으로 2층의 응답이 LS의 응답수준이며 최대변위는 El Centro 지진동 적용 시 발생하였다.

Fig. 12는 Maximum Considered Earthquake Demand(이하: MCE)의 7개 지진파 지진동 적용 시 등가프레임모델의 주요응답으로 El Centoro 지진파 지진동 적용 시 1층

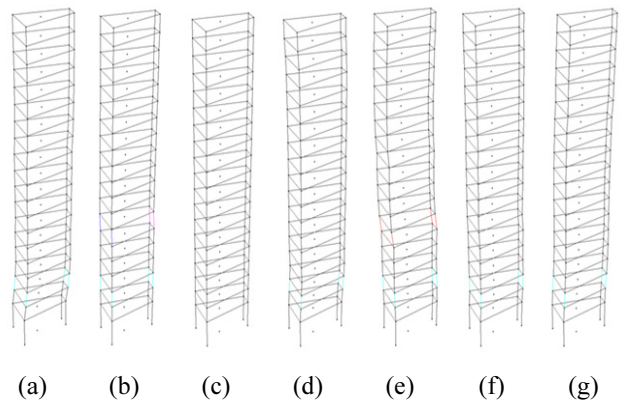


Fig. 11 Response of equivalent model from nonlinear time history analysis (DBE Level)

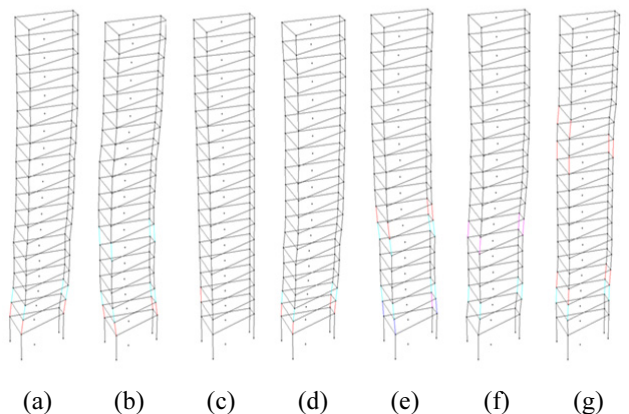


Fig. 12 Response of equivalent model from nonlinear time history analysis (MCE Level)

IO-LS, 2층 LS-CP 수준의 응답(a)을 얻었고 Hachinohe의 경우, 1층 IO-LS, 2층과 6층에서 LS-CP 응답(b) 수준이며, Taft의 경우, 2층에서 IO-LS 수준이다.

인공지진파1의 경우, 1층 IO-LS, 2층 LS-CP 응답 수준 인공지진파2의 경우, 2층과 6층에서 LS-CP 응답 수준이며 1층과 7층에서 IO-LS 수준의 응답을 얻었고 인공지진파3의 경우, 2층에서 LS-CP, 6층에서 IO-LS, 인공지진파4의 경우, 2층에서 LS-CP, 3층, 11층, 13층이 IO-LS 수준의 응답을 얻었다. 그 외 부재는 모두 탄성응답 수준이다.

4.1.5 등가프레임 모델과 Full Scale FE Model의 비선형 응답 이력해석 결과 비교

Fig. 13과 14는 El Centro DBE 지진동 적용 시 등가프레임모델과 FSFE 모델의 비선형 응답이력해석 결과를 나타낸다. 초기 최대치와 잔류변형의 분포 및 응답포락 곡선의 형태를 비교하여 판단하였을 때 전반적인 지진응답의 경향은 유사하다. 그러나 FSFE 모델과 질량 및 선형동특성만 일치시키고 수직부재에만 기본적인 비선형 특성을 부여한 간략화 등가모델은 FSFE 모델과 부분적으로 응답의 차이가 다소 발생한다. 이는 간략화한 등가모델 특성상 고르게 소성힌지가 분포되지 않아 각 층별로 대부분의 수직부재가 탄성으로 거동하고 집중된 몇 개 층에서 소성변형이 발생하기 때문으로 판단된다. 상기 등가모델의 특성을 감안할 때, 기본적인 선형고유주

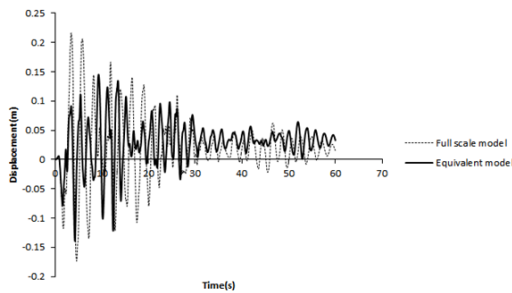


Fig. 13 Nonlinear response history Results of equivalent model and Full Scale FE Model (El Centro DBE Level X-dir.)

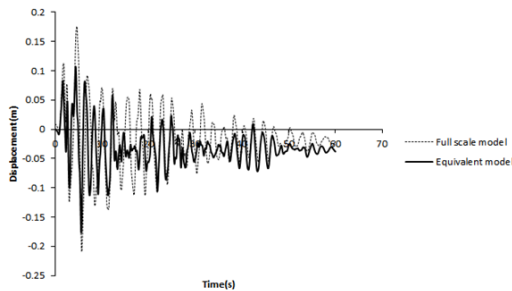


Fig. 14 Nonlinear response history Results of equivalent model and Full Scale FE Model (El Centro DBE Level Y-dir.)

기특성을 일치시키고 ASCE41-06의 콘크리트 기둥 1차부재의 LS 허용변형각수준인 0.012으로 입력한 간략화 등가모델의 최대변형과 그 응답경향은 충분히 엔지니어가 횡력저항 시스템의 지진 시 거동특성을 판단할 수 있는 정보를 제공하는 것으로 판단되며 이는 감쇠시스템을 적용한 구조물의 내진설계를 위한 간략화 지진력저항 시스템(Seismic Force Resistance System: 이하SFRS)으로 활용할 수 있다.

4.2 등가프레임 모델을 이용한 감쇠시스템 검토

4.2.1 감쇠시스템 설계절차

이 연구에서는 감쇠시스템의 설계절차로 ASCE7-10의 등가설계절차를 응용하여 감쇠시스템의 설계를 수행하였다. 그 설계 개요를 간단히 정리하면 설계하고자하는 SFRS의 등가항응답 거동을 FSFE 모델의 성능평가 결과에 기반한 등가프레임모델로 정의하고 등가프레임 모델의 pushover와 비선형응답이력 해석을 통하여 감쇠시스템의 적정 제어 수준과 제어방법을 결정하는 것이 설계의 핵심이다. ASCE7-10의 설계개념은 Fig. 15와 같다.^{1,10)}

Fig. 15의 점선은 지진력저항 시스템을 등가 이상화로 이상화한 것이며 구조물의 항복응답과 이 때의 변위 수준은 감쇠시스템에 있어서 중요한 설계지표가 된다. SFRS의 항복변위와 항복응답 그리고 연성도가 정의되면 건물의 성능이 정해진 것이고 어느 정도까지 변위를 제어할 것인가가 관건인데 엄밀히 구조물의 항복변위는 탄성해석을 기반으로 전층에서 고르게 소성응력이 분포되었을 때 지붕층 변위를 나타내는 것이다. 이 정보가 감쇠 장치의 제어력 수준을 결정하는 근거가 되기 때문에 설계적으로 대단히 중요하다. 식 (1)은 ASCE7-10, 18장에서 감쇠시스템을 포함한 구조물의 감쇠비를 계산하는 식이다.^{6,10)}

$$\beta = \frac{W_D}{4\pi W_s} \quad (1)$$

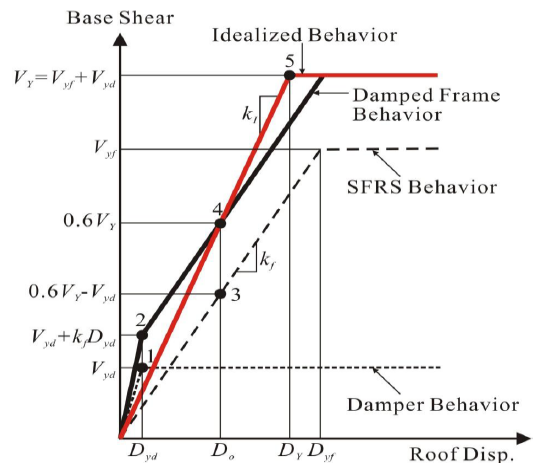


Fig. 15 Design philosophy for damping system (ASCE7-10)

여기서, W_s 는 제어코자하는 특정 응답변위에서의 유효 탄성변형 에너지이고 W_D 는 그 응답변위에서 감쇠시스템의 한주기 동안의 소산에너지이다.

순수한 점성감쇠장치를 적용한 감쇠시스템의 경우 W_s 에 추가되는 강성이 존재하지 않아 응답탄성에너지의 양이 원 SFRS의 변위탄성에너지와 같지만 항복강성을 가지는 이력감쇠장치의 경우 W_s 에 추가적인 강성이 반영된다. 예를 들어, SFRS의 강성을 1000 kN/mm과 탄성변위한계를 10 mm이라 가정하여 이때의 응답력을 10000 kN으로 정하고 항복형 이력감쇠시스템을 마찰감쇠와 같이 조정하여 초기 0변형부터 10 mm까지 250 kN의 제어력을 갖는 감쇠시스템을 적용 시 10 mm 변위에서 감쇠비를 산정해 보면 감쇠비 β 는 1.55%가 된다.

항복력의 25% 수준의 2500 kN으로 제어력을 증가시켜 감쇠비를 구해 보면 β 는 12.73%가 되어 구조물의 25% 응답을 저감할 수가 있다. 이것이 Fig. 15 ASCE7-10에서 제시하는 감쇠시스템의 설계이론이다.

그러나 감쇠장치는 응답이력의 상대변위가 발생해야 적절한 제어력을 발휘하므로 비선형 응답이력해석 결과는 ASCE7-10의 선형의 기대치만큼 크게 나타나진 않는다. 때문에 감쇠시스템을 적용한 구조물의 내진설계 시 엔지니어는 감쇠시스템이 작동하기에 적합한 구조물로 설계해야 하며 비선형 응답이력해석을 정확하게 수행하거나 반복함으로써 적정 감쇠시스템을 도출해야 한다.

앞서 수행한 등가프레임모델의 pushover 해석을 수행하여 지진 시 취약부가 6층이 됨을 알았다. 그리고 Fig. 15의 감쇠시스템의 제어효과를 검토하기 위해 등가프레임모델의 비선형 응답이력해석을 통하여 성능평가를 수행해 본 결과 2층과 6층에서 지진 시 가장 취약했으므로 이를 보완하는 시스템이 필요하다. 해결 방안의 일례로 외부의 제어구조물과 SFRS 사이에 감쇠장치를 연결하여 감쇠시스템을 구성하는 것이다. 단순기둥 형식의 외부의 제어구조가 충분히 강하여 변위 발생 없이 SFRS에 감쇠장치가 연결될 수 있다면 고층부에 감쇠장치를 연결하여 상대 변위 효과를 크게 가질 수 있는 가장 이상적인 시스템이 되지만 외부구조물의 강한 강성을 고층부까지 구현하기가 어려워 감쇠장치에 발생하는 큰 상대변형에 대한 제어력을 구현하는 데 현실적으로 제어기동이 비대해지는 문제가 있을 수 있다. 반면에 입체트러스구조나 경간을 넓게 하여 가새구조를 형성하거나 다이아그리드 방식으로 제어구조물을 만들 시에는 현실적으로도 강한 강성을 구현하는 것이 가능하다.

이 논문에서는 등가프레임 골조 외부제어구조물 2층상부와 6층 상부 총 8개소에 이력형 감쇠장치를 연결하였을 때 제어 성능과 동일한 용량으로 전층 내부 층간에 감쇠장치를 설치하였을 때의 제어효과를 비교하여 설치 용량 대비 경제적으로 구조성능에 보다 효과적인 감쇠시스템을 도출하고자 한다.

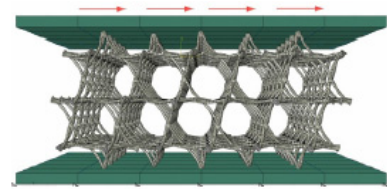
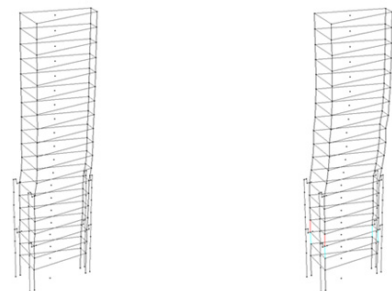


Fig. 16 Detail of damping device

Table 10 Characteristics of damping device

Wire diameter (mm)	δ_y (mm)	δ_{max} (mm)	K1 (kN/mm)	K2 (kN/mm)	F_y (kN)
0.9	0.48	30	520.83	6.30	250



(a) DBE Level (b) MCE Level

Fig. 17 Time history responses of outer damping system applying the El Centro Earthquake

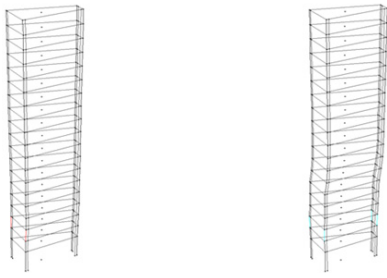
4.2.2 적용 감쇠장치

감쇠장치는 Fig. 16과 같이 와이어의 카고메트러스 형태가 3차원 공간상에서 연속하여 주기적으로 존재하는 구조체를 활용한 이력감쇠장치로써 일반 강재이력감쇠기에 비해 초경량, 등방성, 고강도, 고강성의 특성을 가진다. 적용한 감쇠장치의 특성은 Table 10과 같으며 해석에서는 이선형 이력특성의 모델을 적용하였다.¹⁾

4.2.3 감쇠시스템의 비선형 응답이력 해석

감쇠시스템의 대안설계 2가지 중 첫째는 외부에 강한 골조를 세우고 취약부인 2층과 6층 총 8개소에 각 250 kN의 항복형 이력댐퍼를 적용한 감쇠시스템이고 둘째는 전층 내부 층간에 동일한 제어력으로 감쇠장치를 설치하는 대안이다. 이에 대하여 7개 지진파 응답이력해석을 수행한 결과 두 가지 대안 모두 상당한 제어효과를 발휘하였으며 내부 전층 76개소에 각 250 kN의 항복형 이력감쇠기를 설치한 감쇠시스템이 다소 우수하였으나 그에 1/9 수준 미만의 감쇠장치를 적용한 외부제어 감쇠시스템의 경우는 유사하게 경제적으로 매우 우수한 제어력을 발휘하였다.

7개 지진파 응답 결과 중 가장 응답이 크게 나왔던 El Centro 지진파에 대해서 건물의 성능을 평가해 보면 외부 제어 구조물의 경우 El Centro 지진파 DBE에서 전층에



(a) DBE Level (b) MCE Level

Fig. 18 Time history responses of inner damping system applying the El Centro Earthquake

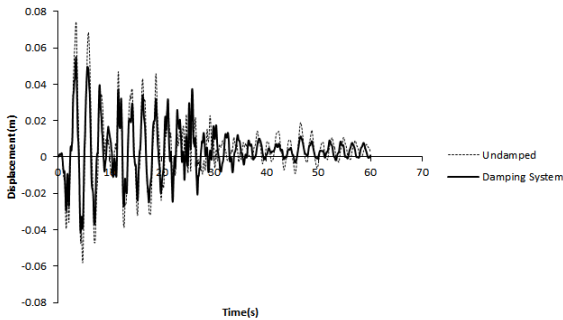


Fig. 19 Nonlinear response history analysis Comparison between Damping System and Undamped System (El Centro DBE, 6F X-dir.)

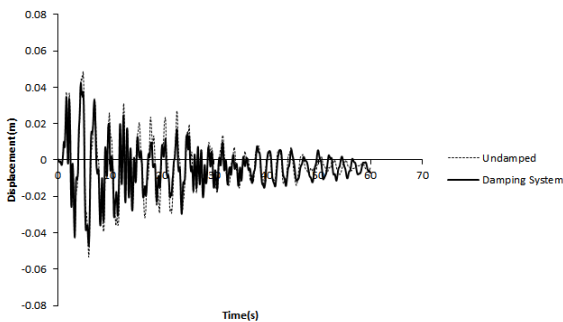


Fig. 20 Nonlinear response history analysis Comparison between Damping System and Undamped System (El Centro DBE, 6F Y-dir.)

기능수행 수준인 탄성수준의 응답 결과를 얻었다. MCE에서는 2층에서 LS-CP의 응답 결과를 얻었으며 3층에서는 IO-LS 수준의 응답 결과를 얻었다.

내부 전층 층간에 감쇠장치를 적용한 경우 El Centro 지진과 DBE에서 2층에서 IO-LS 수준이었으며 그 외 전층에서 기능수행 수준인 탄성수준 응답을 얻었다. MCE에서는 2층에서 LS-CP의 수준의 응답 결과를 얻었다.

5. Full Scale Model 감쇠시스템 적용 검토

4장에서 검토한 2가지 제어방법 중에 보다 경제적이며 제어에 효과적인 외부제어시스템을 설계안으로 선택하여

FSFE 모델의 비선형 응답이력해석을 수행하여 제어효과를 검토하였다.

제어 전 후 응답을 비교해 보면, 7층 이상에서는 비슷하거나 작은 응답을 얻었으며 감쇠기가 설치된 6층 이상에서는 가속도 응답이 크게 감소하였다. Fig. 19와 20은 6층에서의 제어 시와 비제어시에서의 가속도 응답이다. X방향에서 원구조물의 최대응답가속도가 0.074 g이라면 제어 시 0.055 g 수준으로 25% 감소하였고 Y방향에서는 0.053 g에서 0.047로 11.32% 감소하였다. 이는 예측된 등가모델의 응답경향을 잘 반영하고 있으며 감쇠시스템 설계 시 FSFE 모델 대신 여러 조건에서 등가모델로 비선형 해석을 수행하여 대안설계 검토가 가능함을 나타낸다.

6. 결 론

이 연구에서는 최근 이슈화 되고 있는 공동주택의 감쇠시스템 설계에 대한 실무적인 근거를 마련하기 위하여 현행기준 밀면전단력 75% 지진력저항시스템의 내진성능을 검토하고 감쇠시스템 적용한 구조물의 내진설계 시간약화한 등가프레임모델의 사용을 제안하였다. ASCE7-10 감쇠시스템의 내진설계 절차에 제안된 간략화한 등가프레임모델을 도입하여 감쇠시스템 설계 시 여러 조건에 대한 비선형 해석을 수행하여 성능 및 경제적으로 우수한 설계안을 채택하고 최종적으로 FSFE 모델에 감쇠시스템을 적용하여 그 효용성을 검토하였으며 연구 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 제안된 간략화 등가프레임 모델은 비선형 응답이력 해석 시 FSFE 모델의 지진력저항 시스템의 해석 결과와 유사한 응답 거동을 나타내어 감쇠시스템을 적용한 구조물의 내진설계를 위한 간략화 SFRS로 활용할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 비선형 응답이력해석 시 FSFE 모델의 경우 많은 시간이 소요되어 여러 조건에서의 검토가 어려운 반면, 제안된 간략화 등가프레임 모델의 경우 해석시간의 단축으로 인하여 여러 조건에 대하여 비선형응답이력해석을 빠르게 수행할 수 있었으며 적절한 실무적 대안으로 발전시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 한국토지주택공사의 연구비지원과 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원(09첨단도시A01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Chun, Y. S., Park, J. Y., and Chol, G. R., *Development of Damping System for improvement of Seismic Performance of Apartment Buildings (1): Application Plan of Damping System for Apartment Buildings*, Lang

- & Housing Institute, 2012.
2. Kim, J. H., "Cautions for Damping System Application of Korean Apartment," *Architectural Structure*, Vol. 19, No. 1, 2012, pp. 42-48.
 3. Architectural Institute of Korea, Examples and Guideline of Design for Structures with Damping System, 2010.
 4. Symans, M. D., Charney, F. A., Constantinou, M. C., Johnson, M. W., and McNamara, R. J., "Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No.1, 2008, pp. 3-21. (doi: [http://dx.doi.org/10.1061\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:1\(3\)](http://dx.doi.org/10.1061(ASCE)0733-9445(2008)134:1(3)))
 5. Architectural Institute of Korea, *Korean Building Code and Commentary*, 2009.
 6. ASCE/SEI 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineering, 2010.
 7. Kim, T. W., Park, Y. K., Kim, H. J., and Lee, D. G., "An Equivalent Model for the Seismic Analysis of High-Rise Shear Wall Apartments," *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 11, No. 5, 2007, pp. 11-21, 2007. (doi: <http://dx.doi.org/10.5000/EESK.2007.11.5.011>)
 8. Park, Y. K., Kim, H. S., and Lee, D. G., "Efficient Analysis of Wall-Frame Structures," *Proceedings of Conference on Earthquake Engineering Society of Korea*, 2011, pp. 187-191.
 9. ASCE/SEI 41-06, *Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*, American Society of Civil Engineers, 2006.
 10. Ramirez, O. M., Constantinou, M. C., Kircher, C. A., Whittaker, A. S., Johnson, M. W., Gomez, J. D., and Chrysostomou, C. Z., "Development and Evaluation of Simplified Procedures for Analysis and Design of Buildings with Passive Energy Dissipation Systems," Technical Report MCEER-00-0010, 2000.
 11. Computers and Structures Inc, *PERFORM USER GUIDE ver 5*, CSI, 2011.
 12. Moehle, J., Bozorgnia, Y., Jayaram, N., Jones, P., Rahnanma, M., Shome, N., Tuna, Z., Wallace, J., Yang, T., and Zareian, F., "Case Studies of the Seismic Performance of Tall Buildings Designed by Alternative Means," Task 12 Report for the Tall Buildings Initiative, 2011.

요 약 이 연구의 목적은 감쇠시스템 설계 시 ASCE7-10의 등가선형해석과 응답스펙트럼해석의 설계절차 및 비선형해석에 간략화된 등가프레임모델을 제안하여, 선형 및 비선형 해석 시 소모되는 시간을 줄이고 해석 조건 및 변수조건을 다양화함으로써 감쇠시스템 적용 시 효과를 합리적으로 검토하는데 있다. 이 연구에서는 최근에 이슈화 되고 있는 공동주택의 감쇠시스템 도입과 관련하여 ASCE7-10의 성능기반 내진설계를 근간으로 내진성능평가 및 감쇠시스템 설계를 비선형응답이력 해석을 통하여 수행하였다. 특히 공동주택 대상건물을 건축구조기준의 75% 지진력 수준으로 최적화 설계 시 내진성능평가를 수행하여 안전성을 검토하는 한편, 기준에 제시된 지진력 수준으로 내진설계 시 골조물량을 비교 하여 경제성을 검토하였다. 또한, 대상건물에 외부 제어 이력형 감쇠장치를 적용 시 제안한 프레임 등가모델을 이용하여 ASCE7-10 감쇠시스템 설계를 수행하였으며 Full Scale Model에서 그 제어효과를 검증하였다.

핵심용어 : 감쇠시스템, 간략화 등가프레임모델, 비선형 응답이력해석, 내진성능평가, 성능기반 내진설계