

패널존과 점성감쇠기를 고려한 강골조 구조물의 내진 설계 모델

Seismic Design of Steel Frame Model Considering the Panel Zone and Viscous Dampers

박 순 응*
Park, Sun-Eung

이 택 우**
Lee, Tack-Woo

Abstract

The present study is aimed to calculate the optimal damping according to the seismic load on the structure with a non-seismic design to perform structure analysis considering the deformation of structural joint connection and panel zone; to develop design program equipped with structural stability of the steel frame structures reinforced with the panel zone and viscous dampers, using the results of the analysis, in order to systematically integrate the seismic reinforcement of the non-seismic structures and the analysis and design of steel frame structures. The study results are as follows:

When considering the deformation of the panel zone, the deformation has been reduced up to thickness of the panel double plate below twice the flange thickness, which indicates the effect of the double plate thickness on the panel zone, but the deformation showed uniform convergence when the ration is more than twice. The SMRPF system that was applied to this study determines the damping force and displacement by considering the panel zone to the joint connection and calculating the shear each floor for the seismic load at the same time. The result indicates that the competence of the damper is predictable that can secure seismic performance for the structures with non-seismic design without changing the cross-section of the members.

Keywords : Seismic design, Panel zone, Viscous dampers

1. 서론

지진으로부터 구조물의 안전을 확보하기 위해서는 설계 기준을 정립하여 내진 설계를 실시하고, 기존 구조물의 내진 향상을 위한 내진 보강이 필요하다. 우리나라도 2016년 9.12지진 및 2017년 포항 지진으로 피해를 겪으면서 내진 설계 및 내진 보강에 대한 중요성이 대두되었다. 특히 내진 설계가 반영되지 않은 1988년 이전에 건설된 사회주요기반시설 및 학교시설에 대해 국가정책으로 우선순위를 두어 내진 보강 사업을 추진 중에 있다. 내진 보강법 중 구조물 내·외부에 감쇠기를 설치하여 지진 하중으로 인한 구조물의 진동력을 상쇄시키는 제진 보강법은 지진 하중에 의한 응력이 감쇠기에 집중되어

감쇠기 손상에 대한 교체 및 구조물의 단순보수만으로 복구가 용이한 장점이 있다. 또한 지진 하중의 크기에 따라 감쇠기의 부가 및 교체를 통해 대응할 수 있어 최근 학교시설 내진 보강에 감쇠기를 이용한 제진보강 사례가 늘고 있다(Fig. 1).



(Fig. 1) Seismic system using smart frame (Britec)

* 정희원, 한국철도공사 차장, 공학박사
KORAIL, Building Structure Team
** 교신저자, 정희원, 한국철도시설공단 기술연구처 과장,
공학박사
KOREA RAIL NETWORK AUTHORITY
Tel: 042-607-4317 Fax: 031-750-5837
E-mail: tackwoo@kr.or.kr

기존 구조물에 대한 내진 성능 향상을 위해서는 예상되는 지진에 대해 구조물이 가진 성능을 평가하고 성능의 개선이 필요하다¹⁾.

내진 성능 개선 설계 방법 중 직접변위기반 설계법(D-DBD)²⁾은 Kowalsky, Priestley & MacRae(1995)에

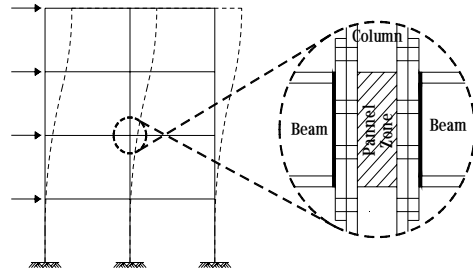
의해 제안³⁾된 이후 국내에서도 구조물 보강 시 직접변위 기반 설계법을 적용한 연구가 꾸준히 진행되고 있다. Jung, Park & Kim(2012)은 강재 매입형 SRC 합성기둥에 직접변위기반 설계법을 적용하여 SRC 합성기둥의 내진 성능 개선 설계를 위한 성능설계 방법을 제시하였으며⁴⁾, Lin et al.(2003)은 선형 점성 감쇠기로 보강된 모멘트 저항 프레임(MRF) 구조에 직접변위 설계법을 접목하여 새로운 해석법을 제시하였다⁵⁾. MRF 구조는 전단벽 보강, 브레이싱 보강, 댐퍼 보강 등의 방법으로 내진 성능을 향상시킬 수 있다. 하지만 MRF 구조는 많은 제안식이 적용되어 있어 실무자가 현장에서 적용하기에 어려움이 있다.

Sullivan & Lago(2012)이 제안한 개선된 직접변위 설계법은 강골조 구조에 점성감쇠기 산정 시 구조물의 연성 능력과 각 층별 보강된 감쇠기의 용량을 산정해 분산시키는 설계법이다⁶⁾.

본 논문에서는 Sullivan & Lago(2012)이 제안한 개선된 직접변위기반 설계법⁶⁾에 패널존의 영향을 고려할 수 있는 SMRPF(Steel Moment Resistance with Panel Frame) System을 제안한다. 이를 통해 산정된 감쇠기와 접합부의 패널존을 고려하여 비내진 강골조 구조물의 내진 보강 효과를 검토하고자 한다.

2. 패널존의 유한요소해석

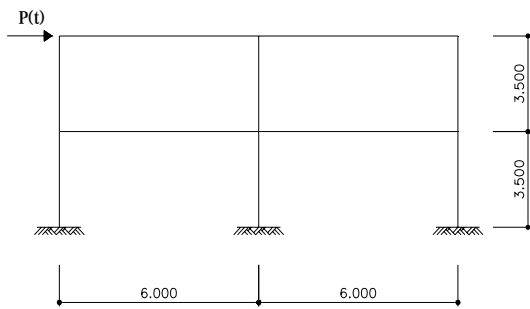
강골조 구조물의 대부분은 보와 기둥을 강접합한 철골모멘트골조로 설계하고 있다. 이러한 설계법은 구조물의 보와 기둥을 연결하는 접합부에서 횡력 작용 시 보의 불균형모멘트로 인해 전단력이 집중되어 강골조 구조물 전체의 횡변위를 크게 증가시킬 수 있으며, 과도한 전단 변형과 접합부의 조기 항복을 야기할 수 있으므로 내진 설계 시 중요한 검토사항이 되어야 한다. 본 논문에서는 구조물의 거동 시 패널존의 영향을 규명하기 위해 패널존의 여러 해석 모델 중 Mozzolani & Piluso(1996)의 모델을 이용하였다. 패널존은 보에서 유입되는 큰 전단력을 전달할 수 있는 충분한 강도와 패널존에서의 변형이 층간 변위에 과도한 영향을 미치지 않는 충분한 강성을 가져야 한다. <Fig. 2>는 보-기둥 접합부에 대한 패널 연결을 나타내고 있다⁷⁾.



<Fig. 2> Beam-Column joint consider panel zone³⁾

2.1 패널존 해석법에 따른 거동 분석

패널존을 고려한 강골조 구조물의 거동 특성을 분석하고자 2층 2경간 강골조 구조물에 단조 하중을 작용하여 최대 변위 및 단면력을 통해 구조물의 거동을 분석하였다(Fig. 3).



<Fig. 3> Model of steel-frame structure (2S2B)

일반적인 강골조 구조물의 접합부에 패널존을 고려하는 방법은 크게 다음의 2가지 방법이 있다⁸⁾.

2.1.1 Elastic properties from column option

기둥 부재의 주축과 약축에서 발생하는 휨모멘트의 값을 특성치로 해석하는 방법으로 휨모멘트의 회전 속성을 절점의 스프링 강성으로 할당하여 내부 패널존의 절점을 유효 길이로 해석을 수행한다. 이때 패널존의 내부 연결은 강접합으로 해석을 수행한다. 즉 보의 소성힌지 발생을 감소시켜 지진 하중과 같은 외부 하중을 분산시키는 이론에 근거한 해석법이다

2.1.2 Elastic properties from column and plate option

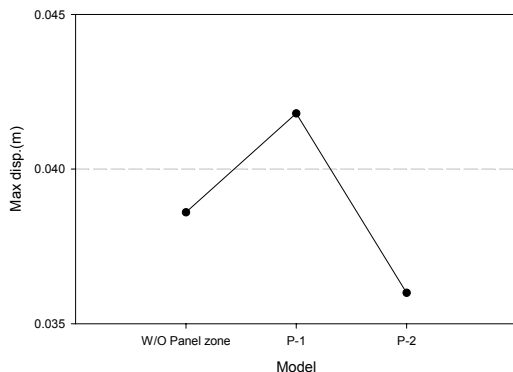
기둥 부재에 패널존 보강판을 보강하여 보를 연결하는 형태로 패널존 보강판의 두께를 결정 인자로 계산한다. 이때 기둥의 주축에 대한 굽힘모멘트는 기둥의 단면

에 패널존 보강판의 두께를 더한 단면값으로 패널존에 있는 2개의 내부 절점을 연결하는 패널존 스프링 강성에 할당하여 계산을 수행한다. 즉 패널존 보강판이 패널존의 항복을 방지하고 패널 영역에서 내력을 감소하게 되는 것이다. 이는 다음 식 (1)을 통해 알 수 있다.

$$V_p = \frac{\sum M_b}{(h_b - t_{bf})} - V_c \quad (1)$$

- V_p : 패널존에서 발생하는 전단 응력
- M_b : 보의 절점 모멘트
- h_b : 보의 높이
- t_{bf} : 보의 플랜지 두께

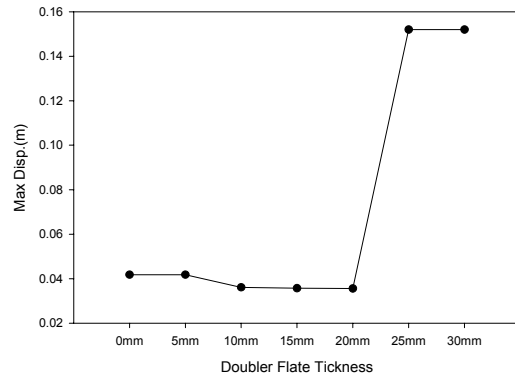
단조 하중에 대해서 W/O Panel zone(Without Panel zone), P-1(Elastic properties from column option), P-2(Elastic properties from column and plate option) 모델로 각각의 거동 특성을 분석하였다. 단조 하중에 대해 시간이력해석을 수행한 결과, 좌측 상단부 절점의 최대 변위는 W/O Panel zone일 때 0.0386m로 관측되었으며, P-1 모델에서 0.0418m로 무보강 모델 대비 변위가 약 8% 증가하였다. P-2 모델에서는 0.0360m로 무보강 모델 대비 변위가 약 7% 감소하는 것으로 관측되었다. <Fig. 4>는 W/O Panel zone 모델, P-1 모델, P-2 모델의 단조 하중에 대한 좌측 상단부 절점의 최대 변위를 나타내고 있다. 해석 결과, 응력이 집중되는 연결부에 패널존 보강판을 용접하여 사용하면 패널존의 전단 저항을 높이는 것이 더욱 유리한 것으로 판단된다.



<Fig. 4> Maximum displacement of top joint by model

2.2 패널존 보강판 두께에 따른 거동 분석

패널존의 모델에 따른 강골조의 거동 분석 결과, 패널존 보강판을 용접한 강골조의 구조물이 하중에 저항하는 힘이 가장 크게 관찰되었다. 패널존의 강도 확보를 위해서 기둥 플랜지가 두껍고 폭이 넓을수록 강도 증진에 기여하는 바가 크다. 따라서 패널존의 강도가 미달될 경우 패널존 보강판을 사용하여 보강하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 패널존 보강판 두께에 따른 강골조 구조물의 거동을 분석하고자 패널존 보강판의 두께를 0mm, 5mm, 10mm, 15mm, 20mm, 25mm로 구분하여 단조 하중에 대한 해석을 수행하였으며, 결과는 <Fig. 5>와 같다.



<Fig. 5> Maximum displacement of top joint by depth of plate

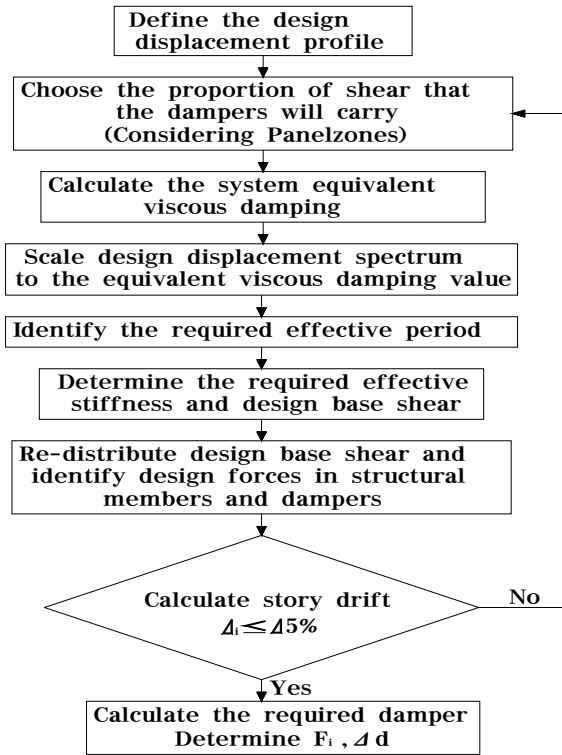
패널존 보강판 두께가 증가할수록 단조 하중을 받는 강골조 구조물의 최대 변위는 감소하지만 25mm 이상일 경우 변위가 증가하였다. 이는 Faella, Piluso & Rizzano(2000)의 이론 중 패널존의 두께가 기둥의 플랜지 두께의 2배를 넘어서는 안된다는 규정과 일치한다⁸⁾.

3. SMRPF System의 감쇠력 산정

3.1 패널존과 점성감쇠기를 고려한 SMRPF System

본 논문에서 제안한 SMRPF 구조 시스템은 개선된 직접변위 설계법에 기초를 두고 있으며, 기시공된 구조물 부재의 단면 변화 없이 지진 하중의 크기에 따라 요구되는 감쇠기의 크기를 산정할 수 있다. 이를 적용하여 현재 비내진 설계의 강골조 구조물에 산정된 용량의 감

최기로 보강 후 내진 성능의 개선 효과를 평가하고자 한다. 본 논문에서 제안한 SMRPF 구조 시스템의 직접변위 설계법의 흐름도는 <Fig. 6>과 같다.



<Fig. 6> Flow chart by SMRPF System

SMRPF System을 이용한 직접변위기반 설계법의 절차는 다음과 같다.

3.1.1 Define the design displacement profile

MRF의 내진 설계는 재료 변형 한계, 층변위 또는 잔류변형한계에 의해 결정된다. 그 중 층간 변위는 매우 중요하며 다음 식 (2)와 같다. FEMA- 356(2000)에서는 철골모멘트골조의 인명안전(LS) 성능수준에 대한 층간 변위한계값을 2.5%로 규정하고 있다⁹⁾.

$$\Delta_i = w_\theta \theta_c h_i \frac{4H_n - h_i}{4H_n - h_1} \quad (2)$$

θ_c : 층간 한계 변위(2.5%)

H_n : 전체 층의 높이(m)

h_i : i 층의 높이(m)

w_θ : 영향 계수

상기 식에서 산정된 층간 변위를 SDOF 시스템에 적용할 설계 변위, 유효 질량과 유효 높이는 다음 식 (3a)~(3c)를 통하여 구할 수 있다.

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i^2}{m_i \Delta_i} \quad (3a)$$

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i}{\Delta_d} \quad (3b)$$

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i h_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i} \quad (3c)$$

m_i, Δ_i, h_i : i 층의 질량, 변위, 높이

3.1.2 Choose the proportion of the design base shear force that will be resisted by the dampers (Considering panelzone)

각층의 접합부는 패널존을 고려한 해석을 수행하며, 이때 패널존은 보강판으로 보강한다. 보강판의 두께는 보의 플렌지 두께의 2배가 넘지 않도록 한다. 또한 각 층별 전단력을 산정하여 각각의 감쇠기에 분담해야할 힘을 결정한다. 감쇠기의 설계 축력은 다음 식 (4)와 같으며, 설치된 감쇠기의 크기를 분담해야 할 전단력과 β_i 계수에 의해서 결정된다. β_i 은 0.3~0.6의 값을 적용하여야 하며, 각 층의 높이가 일정할 경우 모든 층에서 0.3의 값을 적용한다⁶⁾.

$$F_{d,i} = \beta_i V_i \quad (4)$$

3.1.3 Calculate the equivalent SDOF system damping

설계 전단력의 비율을 고려하여 점성감쇠기의 ξ_{eq} 를 다음 식 (5)에 의하여 구한다⁶⁾.

$$\xi_{eq} = \xi_{eq,fr} + \frac{\beta}{2} \quad (5)$$

ξ_{eq} : 등가 점성 감쇠비, β : 0.3

$$\xi_{eq, fr} : 0.05 + 0.710 \left(\frac{\mu - 1}{\mu \pi} \right)$$

$$\mu : \frac{\Delta_d}{\Delta_y}, \Delta_y = H_e \cdot 0.5 \frac{\epsilon_y l_b}{h_b}$$

ϵ_b : 철근의 항복 변형률

l_b, h_b : 부재의 치수

$$\text{Level 1 to n-1} : F_i = k V_b \frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i} \quad (8a)$$

$$\text{Level n} : F_i = (1 - k) V_b + k V_b \frac{m_i \Delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \Delta_i} \quad (8b)$$

k : 10층 이상일 경우 0.9, 그 외 1.0

3.1.4 Scale the design displacement spectrum

탄성변위스펙트럼을 사용하여 등가 점성감쇠력으로 변환해주어야 한다. 다음 식 (6)은 등가 점성감쇠력의 변환식을 나타내고 있다.

$$S_{d, \xi\%} = \left(\frac{10}{5 + \xi} \right)^{0.5} S_{d, 5\%} \quad (6)$$

3.1.5 Identify the required effective period

탄성변위스펙트럼으로부터 변위에 따른 유효주기 (T_e)를 구한다.

3.1.6 Determine the required effective stiffness and design base shear

설계에 적용할 밀면전단력(V_b)과 유효강성(K_{eff})을 결정한다. 기본적인 직접변위기반 설계법의 식은 다음 식 (7)과 같다.

$$K_{eff} = 4\pi^2 \left(\frac{m_e}{T_e^2} \right), V_b = K_{eff} \Delta_d \quad (7)$$

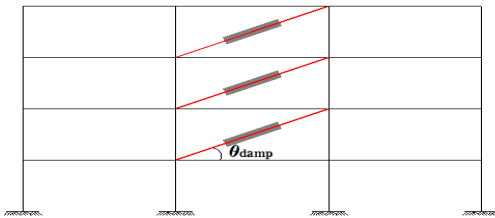
3.1.7 Calculate the design member forces and design damper forces

기존의 직접변위 설계법에서 단자유도 모델을 다자유도 모델로 변환하기 위한 등가 절점력(F_i)은 다음 식 (8a) 및 식 (8b)와 같다. MRF System에서 10층 이상의 고층 구조물인 경우 고층 구조물의 응답 특성을 고려하기 위해 설계 전단력의 10%에 해당하는 하중을 최상층에 집중 하중으로 변환하여 적용한다²⁾.

3.1.8 Calculate the required design damper constants and strokes

요구되는 감쇠기상수(C_i)와 i 층에서 감쇠기의 유효변위($\Delta_{d,j}$)는 각각 다음 식 (9)와 같다. θ_{damp} 는 <Fig. 7>과 같다.

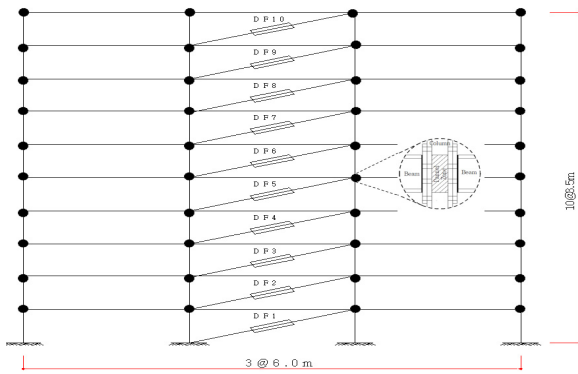
$$C_i = \frac{F_{d,i} T_e}{2\pi \Delta_{d,j}}, \Delta_{d,j} : \theta_{d,j} h_s \cos(\theta_{damp}) \quad (9)$$



<Fig. 7> Steel-frame structure reinforced with viscous dampers

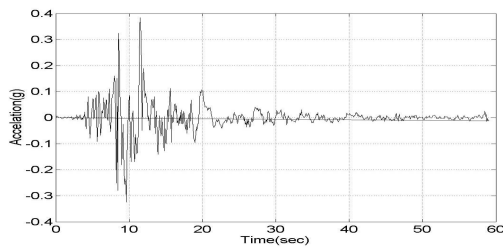
3.2 해석 예제

SMRPF System을 적용해 산정된 감쇠력을 적용하여 1층 강골조 구조물에 감쇠력을 결정하고 보강한 후 내진 성능을 평가하였다. 감쇠기의 보강 위치는 선행 연구 결과¹⁰⁾를 준용하여 보강 효과가 가장 우수한 중앙 경간에 설치하였다. 유한요소해석 모델에서는 보 부재와 기둥 부재를 각각 W12X14, W14 X26을 일괄 적용하였으며, 패널존을 고려하기 위해 기둥 부재에 패널존 보강판으로 보을 연결하는 형태로 패널 보강판의 두께를 보 부재의 플렌지 두께의 2배인 0.0254m로 고려하였다. <Fig. 8>은 수치 해석 모형을 나타내고 있으며, 경간과 높이는 각각 6.0m, 3.5m이다.



〈Fig. 8〉 Flow chart by SMRPF System

구조물에 작용하는 지진 하중은 1979년 미국에서 발생한 지진파(Imperial Valley, 2317UTC)를 직접 구조물에 가한 후 비선형시간이력해석을 통한 절점의 최대 변위, 층간 변위, 단면력을 비교 분석하였다. 해석에 사용된 지진 하중은 〈Fig. 9〉와 같다.



〈Fig. 9〉 Seismic load used in analysis (Imperial Valley, El Centro)

SMRPF System을 적용하여 10층 3경간 강골조 구조물 설계법 중 Step 1 및 Step 2를 수행하면 〈Table 1〉과 같으며, Step3~7을 수행하여 감쇠기의 크기를 산정하면 〈Table 2〉와 같다.

〈Table 1〉 Analysis of steel structure using SMRPF System (kN, m)

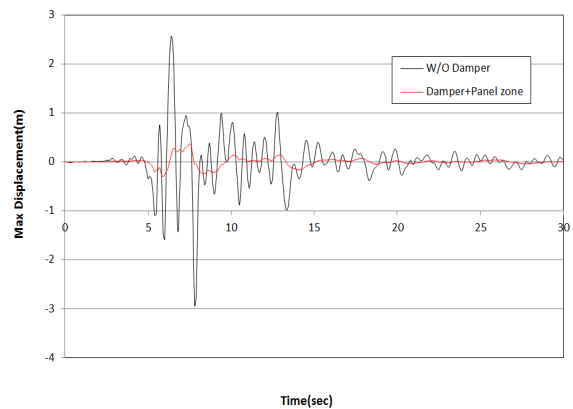
	h_i (m)	θ_i (%)	$h_i\theta_i$	Δ_i (m)	m_i	Δ_d (m)	m_e
10	35.0	1.26	0.04	0.657	0.099	0.485	0.818
9	31.5	1.40	0.05	0.613	0.099	-	-
8	28.0	1.53	0.05	0.565	0.099	-	-
7	24.5	1.67	0.06	0.511	0.099	-	-
6	21.0	1.81	0.06	0.452	0.099	-	-
5	17.5	1.95	0.07	0.389	0.099	-	-
4	14.0	2.09	0.07	0.321	0.099	-	-
3	10.5	2.22	0.08	0.248	0.099	-	-
2	7.0	2.36	0.08	0.170	0.099	-	-
1	3.5	2.50	0.09	0.088	0.099	-	-

〈Table 2〉 Estimation of damping force using SMRPF System (kN, m)

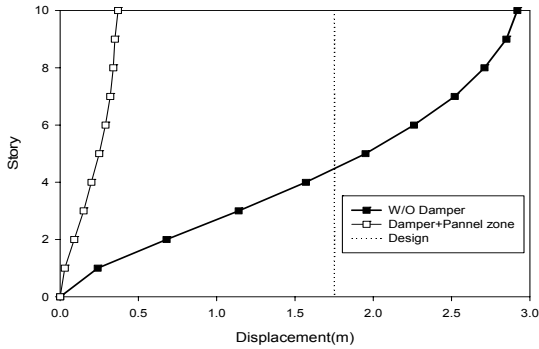
	f_i (kN)	V_i (kN)	$M_{b,i}$ (kNm)	$f_{d,i}$ (kN)	$\Delta_{d,i}$ (m)	C_i (kNs/m)
10	4.72	4.723	1.38	1.889	0.036	41.398
9	4.41	9.130	2.66	3.652	0.039	72.104
8	4.06	13.19	6.51	3.956	0.043	71.069
7	3.68	16.86	8.76	5.057	0.047	83.346
6	3.25	20.11	10.78	6.032	0.051	91.830
5	2.80	22.90	12.55	6.871	0.055	97.180
4	2.31	25.21	14.03	7.563	0.059	99.882
3	1.78	26.99	15.23	8.097	0.063	100.30
2	1.22	28.21	16.10	8.464	0.067	98.711
1	0.63	28.84	14.96	8.653	0.071	95.336

5층 3경간 강골조 구조물과 같은 방법으로 10층 3경간 SMRPF System을 적용한 강골조 구조물의 내진 성능을 알아보았다. 〈Fig. 10〉은 지진 하중 작용 시 최상층부의 시간이력-변위 그래프이다.

〈Fig. 11〉은 층간 변위를 나타내는 그래프이며, 감쇠기로 보강된 경우 전체 시간이력해석에 따른 변위 제어 효과가 우수한 것으로 관측되었다. 무보강 강골조 구조물의 최대 변위가 2.92m로 내진 설계 기준 구조물 전체 높이의 5%(1.75m) 기준을 초과하였지만 감쇠기와 패널존을 고려한 모델에서는 0.47m로 내진 기준을 만족하였다.



〈Fig. 10〉 Time-Displacement graph of top joint

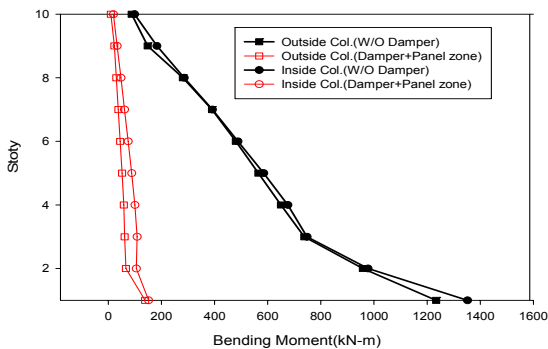


〈Fig. 11〉 Story drifts by EQ1 load

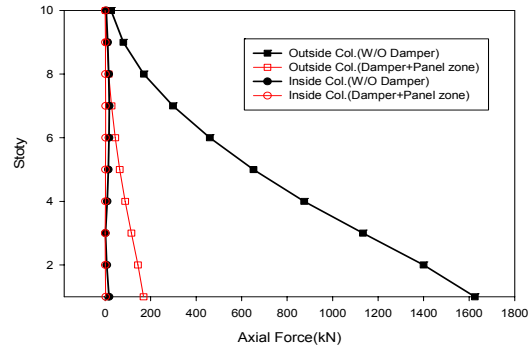
또한 층간 변위 그래프에서 알 수 있듯이 전층에 고른 변위 분포를 나타내어 층간 변위를 억제하는데 효과가 있다. 내진 보강 성능을 알아보기 위해 무보강 강골조 구조물과 감쇠기와 패널존을 고려한 10층 3경간 강골조 구조물의 기둥의 모멘트, 전단력, 축력 등의 부재력을 검토하였다. 〈Fig. 12~13〉는 각각 기둥 부재의 최대 모멘트와 축력을 나타내고 있으며, 감쇠기와 패널존을 고려한 강골조 구조물이 탁월한 감쇠 효과를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

감쇠기와 패널존을 고려한 모델에서 감쇠기의 감쇠 효과에 의해 부재력에 있어서도 감소된 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 무보강 구조물의 부재력 값을 분석해보면 외측 기둥부의 부재력에 비해서 내측 기둥부 부재력의 값이 크게 관찰되었으며, 예비 검토를 통해 감쇠기를 내측 경간 중앙부에 보강할 경우 보강 효과가 가장 우수한 것으로 나타났다.

또한 감쇠기로 보강된 구조물의 부재력을 살펴보면 외측 기둥과 내측 기둥의 부재력 편차가 감소하였음을 알 수 있는데 이는 내측 기둥의 부재력을 감쇠기가 부담하여 부재의 전체적인 균형을 맞추었음을 알 수 있다.



〈Fig. 12〉 Max. bending moment of column by EQ



〈Fig. 13〉 Max. bending moment of column by EQ

4. 결론

본 연구는 비내진 설계된 구조물의 지진 하중에 따른 최적의 감쇠력을 산정하고, 구조물에서 접합부와 패널존의 변형을 복합적으로 고려하여 구조 해석을 수행하였다. 해석 결과를 이용하여 패널존과 점성감쇠기로 보강된 강골조 구조물의 내진 해석 프로세스를 구축하여 비내진 구조물의 내진 보강과 강골조 구조물의 해석 및 설계 문제를 체계적으로 종합화하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 본 연구에서 적용한 SMRPF System은 접합부에 패널존을 고려하는 동시에 지진 하중에 대한 각 층별 전단력을 산정하여 댐퍼의 감쇠력과 변위를 결정해준다. 이는 내진 설계가 반영되지 않은 구조물에 적용할 경우 부재 단면을 변경하지 않고 내진 성능을 확보할 수 있는 감쇠기 역량의 결정이 가능함을 보여주었다.

2) 비선형시간이력해석을 통해 수정된 직접변위 설계법을 적용한 SMRPF 강골조 구조물의 내진 성능 향상을 확인할 수 있었다. 또한 설계스펙트럼을 이용하여 감쇠기의 감쇠력을 조정할 경우 감쇠기의 적정 용량 산정이 가능하여 보강 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

3) 패널존의 변형을 고려할 경우 패널존 보강판의 두께가 플랜지 두께의 2배까지는 변형이 감소하여 패널존에 대한 보강판 두께의 효과를 나타내고 있으나 2배 이상에서는 일정하게 수렴함을 보여 주었다.

References

1. Jung, I. K., Cho, C. G., & Park, S. E., "Displacement Based Seismic Performance

- Improved Design of RC Column Retrofitted Steel Jacket”, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.10, No.4, pp.49~57, 2010
2. Chopra, A. K., & Goel, R. K., "Direct Displacement-Based Design : Use of Inelastic vs. Elastic Design Spectra", *Earthquake Spectra*, Vol.17, No.1, pp.47~64, 2001, doi: 10.1193/1.1586166
 3. Kowalsky, M. J., Priestley, M. J. N., & MacRae, G. A., "Displacement-based Seismic Design of RC Bridge Columns in Seismic Regions", *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Vol.24, No.12, pp.1623~1643, 1995, doi: 10.1002/eqe.4290241206
 4. Jung, I. K., Park, S. E., & Kim, D. H., "Seismic Performance Evaluation of SRC Composite Column using Direct Displacement Based Design Method”, *Journal of Korean Association for Spatial Structures*, Vol.12, No.3, pp.63~70, 2012, doi: 10.9712/KASS.2012.12.3.063
 5. Lin, Y. Y., Tsai, M. H., Hwang, J. S., & Chang, K. C., " Direct displacement-based design for building with passive energy dissipation systems”, *Engineering Structures*, Vol.25, No.1, pp.25~37, 2003, doi: 10.1016/S0141-0296(02)00099-8
 6. Sullivan, T. J., & Lago, A., "Towards a simplified Direct DBD procedure for the seismic design of moment resisting frames with viscous dampers”, *Engineering Structures*, Vol.35, pp.140~148, 2012, doi: 10.1016/j.engstruct.2011.11.010
 7. Mazzolani, F. M., & Piluso, V., "Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames”, 1st ed., CRC Press, pp.1~516, 1996.
 8. Faella, C., Piluso, V., & Rizzano, G., "Structural Steel Semirigid Connections”, 1st ed., CRC Press, pp.1~536, 2000.
 9. FEMA, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, "Report FEMA-356”, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.
 10. Cho, C. G., & Park, M. H., "Nonlinear Dynamic Analysis of RC Frame Structures Retrofitted By Passive Control of Fluid Viscous Dampers”, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.21, No.1, pp.21~32, 2001
- Received : April 23, 2020
 - Revised : May 22, 2020
 - Accepted : May 24, 2020