

# 고강도 H형강 기둥의 세장비 변화에 따른 화재 후 지진거동

황선웅, 최병정\*  
경기대학교 일반대학원 건축공학과

## Post-Fire Earthquake Behavior due to Slenderness Variation of High Strength H-Shape Columns after Fire Damage

Sun-Woong Hwang, Byong-Jeong Choi\*  
Department of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School

**요약** 강구조 건축물은 높은 연성과 강도를 가지고 있어 주요 지진구역의 고층 및 대형건물에 널리 사용되어왔다. 고층 건물의 강기둥(steel columns)부재 설계시 내진거동특성을 파악하는 것은 상당히 중요하다. 이러한 고층건물에 화재가 발생한다면, 화재보수·보강을 한 기둥의 내진성능이 확보가 되는지에 대한 검토가 필수적이다. 본 연구에서는 고강도 H형강 기둥의 화재 후 내진성능을 파악하기 위하여 다변수 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 ANSYS를 이용하여 기존연구의 실험결과를 바탕으로 해석결과를 비교분석하여 열전달 및 구조해석 모델링을 검증하였다. 검증된 모델링을 통해 화재시간(0, 30, 60분), 세장비(20.8, 52.2, 66.6, 104.2)를 변수로 두어 총 12가지 열-구조 해석을 수행하였다. 열-구조해석을 통해 하중-변위 이력곡선, 내력비, 연성, 에너지소산능력, 초기강성을 도출하여 화재 후 기둥의 내진성능을 파악하였다. 해석결과, 화재 후 기둥의 내력비, 연성, 에너지소산능력, 초기강성은 화재시간과 세장비가 증가함에 따라 감소하였다. 또한, 화재 후 기둥의 내진성능은 화재시간보다 세장비에 따라 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다. 본 연구의 목적은 보수·보강 고강도 H형강 기둥의 내진성능 예측을 위한 데이터를 제공하는 것이다.

**Abstract** While designing steel columns of high-rise buildings, it is highly important to find their seismic behavior. Furthermore, if a fire occurs in such a high-rise building, it is essential to review whether the seismic performance of the columns repaired and reinforced after the fire meets the requirements. In this study, a parametric finite element analysis was conducted to find the post-fire seismic performance of high-strength H-section columns. The finite element analysis used ANSYS to compare and analyze the results of previous studies' experiments to verify the heat transfer and structural analysis models. Later, twelve types of thermo-structural analyses were conducted with different fire exposure times (0, 30, and 60 minutes) and slenderness ratios (20.8, 52.2, 66.6, and 104.2) using the validated models. From the thermo-structural analyses, the load-displacement hysteresis curve, strength ratio, ductility, energy dissipation capacity, and initial stiffness were obtained, and the post-fire seismic performance of the columns was analyzed. The results suggest that the post-fire seismic performance of the columns was influenced more by the slenderness ratio than by the fire exposure time. The results of this study are expected to be used as data for predicting the seismic performance of repaired and reinforced high-strength H-section columns.

**Keywords** : H-Section Columns, Post-Fire Earthquake, Slenderness, Fire Exposure Time, Finite Element Analysis

본 연구는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2020R1A2C110233111), 2021학년도 경기대학교 대학원 연구원장학생 장학금 지원에 의하여 수행되었음.

\*Corresponding Author : Byong-Jeong Choi(Kyonggi Univ.)

email: bjchoi@kyonggi.ac.kr

Received October 1, 2021

Accepted November 5, 2021

Revised October 28, 2021

Published November 30, 2021

## 1. 서론

강구조 건축물은 높은 연성과 강도를 가지고 있기 때문에 내진성능이 우수하며, 주요 지진구역의 고층 및 대형건물에 널리 사용되어왔다[1,2]. 특히 고강도 H형강을 활용한 기둥은 기존의 연강(mild steel)기둥에 비해 높은 축력과, 층고 및 공간을 비교적 많이 확보할 수 있기 때문에 주로 고층건물에 사용된다[2]. 그러나 400 °C 이상의 화재상황에서 강구조물의 강도와 강성은 급격히 감소하게 되어 좌굴이 발생하기 때문에 내화성능 검증이 요구된다[3,4].

고층건물의 기둥 부재 설계시 내진거동특성은 상당히 중요하다. 이러한 고층건물에 화재가 발생한다면, 화재보수 보강을 한 뒤 내진성능이 확보되는지에 대한 검증이 필수적이다. 500 °C 이상 가열 후 냉각된 고강도 강재는 강도가 100 % 회복되지 않는 것으로 알려져 있다[5,6]. 화재 후에도 강구조물의 강도가 100 % 회복하지 않는다면, 지진에 대해 안전하다고 볼 수 없다. 특히, H형강 기둥의 경우, 좌굴 거동 특성으로 인해 전체 구조물의 급격한 붕괴를 유발할 수 있기 때문에 화재 후 특성 파악은 매우 중요하다.

고온에 노출된 H형강 기둥의 내화성능을 파악하기 위해 Eurocode(EN1993-1-2[7])와 AISC(AISC Appendix 4[8]) 등의 기준에서는 세장비와 온도에 따라 직접 압축 좌굴강도를 계산할 수 있는 식을 제안하였다. 그러나 제안식은 화재시 온도에 따른 강재의 강도감소계수를 이용하여 H형강 기둥의 세장비를 산출하였기 때문에, 화재 후 기둥의 내화성능을 유추할 수는 없다. 또한 현재 기준(Eurocode3[7], AISC[8], KDS[9])에서는 화재 후 재료 특성에 대한 자료가 제시되어있지 않으며, 화재 후 내력을 계산할 수 있는 식이나 방법이 매우 부족하다.

최근 화재 후 기둥의 성능에 대한 연구는 많이 수행되고 있다[10-15]. 그러나 고강도 H형강 기둥에 대한 연구는 철근콘크리트(RC) 및 철근철골콘크리트(SRC) 기둥 연구에 비해 그 수가 매우 부족하다. Wang[14]은 고강도 강관기둥 및 H형강 기둥을 이용하여 1시간 비재하 가열 후 공기 중 냉각시켜 축가력 실험을 수행하였다. 또한 실험결과와 유한요소해석모델링 검증을 통해 세장비, 화재 온도 등의 변수를 두어 다변수 해석을 수행하였다. 해석 결과, 하중지지력을 저감시키는 요인은 화재온도보다 세장비가 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. Chen[15]은 I형강 기둥을 이용하여 화재시간과 최고 온도를 변수로 두어 비재하 가열 후 공기 중 냉각시켜 축가력 실험을

수행하였다. 또한 실험결과와 유한요소해석 모델링 검증을 통해 세장비 및 판폭두께비를 변수로 두어 다변수 해석을 수행하였다. 해석결과, 세장비가 증가할수록 기둥의 하중지지력이 감소하였으며, 세장비 150이상일 때는 화재온도에 영향을 크게 받지 않는다고 제시하였다. 따라서 기존 연구[14,15]와 같이 기둥의 세장비 구간에 따라 하중지지력에 끼치는 영향이 크기 때문에 세장비에 대한 연구가 매우 중요하다. 본 연구에서는 이에 착안점을 두어 세장비를 변수로 하는 연구를 수행하였다.

기존 기준들은 화재 후 기둥의 성능에 대해서 제시하고 있지 않으며, 기존 고강도 H형강 화재 후 연구들은 하중지지력, 연성 등을 제시하였으나, 내진성능 평가 시 중요한 요소인 에너지소산능력, 초기강성, 횡하중지지력에 대한 내용이 매우 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 고강도 H형강 기둥의 화재 후 지진성능을 알아보기 위해 유한요소해석 프로그램(ANSYS 2021R1)을 이용하여 열-구조 해석을 수행하였다. 유한요소해석검증을 위해 기존 실험데이터[16,17]와 결과유사성을 검증하였다. 해석에 사용되는 주요 변수로는 세장비(slenderness), 화재 시간(fire time)을 포함하였다. 추후 본 연구를 통해 화재 후 보수·보강 고강도 H형강 기둥의 내진성능을 예측할 때 중요한 데이터로 활용할 수 있다.

## 2. 연구범위 및 방법

본 연구에서는 유한요소해석프로그램 ANSYS(2021 R1)을 이용하여 기존 지진(Chen[16]), 화재연구(Choi[17])의 실험결과를 바탕으로 해석을 수행하였다. 기존연구의 실험결과와 해석결과를 비교분석하여 열전달 및 구조 해석 모델링을 검증하였다. 검증된 모델링을 통해 화재시간과 세장비( $KL/r$ )를 변수로 두어 열-구조 해석을 통해 하중-변위 이력곡선(hysteresis curve), 내력비( $P_{max}/P_y$ ), 연성, 에너지소산능력, 초기강성을 비교분석하였다. 이를 바탕으로 화재 후 고강도 H형강 기둥의 잔존 내진성능을 파악하였다.

## 3. 유한요소해석 모델링 검증

### 3.1 기존 지진실험 및 화재실험의 경계조건

Chen[16]은 고강도 H형강 기둥을 하단부 고정, 상단부 편지지 경계조건에서 축가력 하에 반복 횡가력 실험

을 수행하였다. 반복 횡가력은 Fig. 1과 같이 강기둥의 강축 방향(strong axis)으로 항복변위( $\Delta d_y$ )를 점진적으로 증가시키며 1스텝(step)당 3사이클(cycle)씩 변위제어를 하여 실험을 수행하였다. 축가력은 하중비 0.35 조건으로 Table 1과 같이 3,617 kN을 가력하였다. Chen[16]의 기둥 치수와 축하중에 대해 Table 1에 나타내었으며,  $H$ 는 H형강 단면의 춤,  $B$ 는 플랜지의 폭,  $t_w$ 는 웨브의 두께,  $t_f$ 는 플랜지의 두께,  $L$ 은 기둥의 높이,  $P_n$ 은 실제 가력한 축하중이다. Chen[16]연구의 사용된 강재는 Q690D를 사용하였으며, 항복강도, 인장강도, 탄성계수를 Table 2에 나타내었다. 본 연구는 Chen[16]연구에서 도출된 좌굴형상과 하중-변위력곡선(hysteresis curve)을 통해 본 연구 해석모델링과 비교 검증하였다.

Choi[17]는 H형강 기둥을 양단 핀지지 경계조건에서 ISO-834 표준화재곡선[18]에 근거하여 4면 가열실험을 수행하였다. Choi[17]의 기둥 치수에 대해 Table 1에 나타냈다. Choi[17]연구의 사용된 강재는 SS275를 사용하였으며, 항복강도, 인장강도, 탄성계수를 Table 2에 나타내었다. Choi[17]는 Fig. 2와 같이 높이별 온도분포를 파악하기 위해 기둥을 최상단·하단부 569 mm, 나머지 568 mm씩 6등분하여 웨브에 1개, 플랜지에 2개씩 총 15개의 열전대를 설치하였다. 본 연구에서는 강재의 열전도율을 통해 전구간이 균일한 온도를 나타낸다고 가정하여 기둥 중앙부의 온도를 본 연구의 해석모델과 우선적으로 비교를 실시하였다.

Table 1. Dimensions of specimens by Chen[16] & Choi[17]

	H (mm)	B (mm)	$t_w$ (mm)	$t_f$ (mm)	L (mm)	$P_n$ (kN)	TEST
Chen[16]	250	250	16	16	2,505	3,617	ET*
Choi[17]	300	300	10	15	3,410	-	FT*

\*ET : Earthquake Test, FT : Fire Test

Table 2. Material property by Chen[16] & Choi[17]

	Steel Grade	Yield strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
Chen[16]	Q690D	780	835	206
Choi[17]	SS275	275	410	205

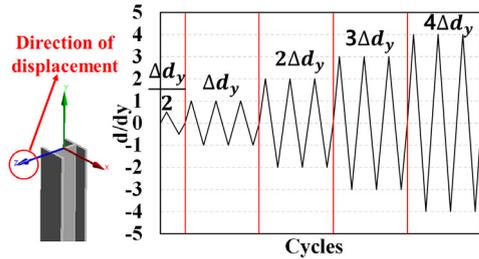


Fig. 1. Loading protocol with displacement control

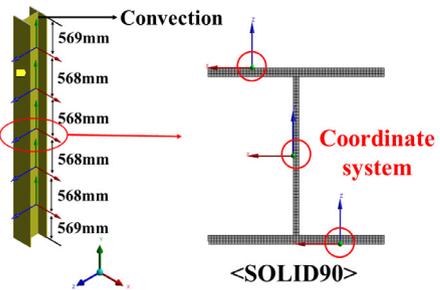


Fig. 2. Thermal boundary condition by Choi[17]

### 3.2 해석모델링

#### 3.2.1 재료의 열적 및 역학적 특성

열전달해석을 수행하기 위해서는 재료의 열전도율, 비열, 밀도와 같은 열적특성을 입력해야한다[19,20]. 강재의 경우 Table 3와 같이 EN1993-1-2[7]에 따라 열적특성을 도출하였다. 열전도율(thermal conductivity)은 물체가 실제로 열을 전달하는 정도이며, 강재의 열전도율은 온도가 상승할수록 감소하다가 800 ℃ 이상부터 27.3 W/mK로 일정하게 유지된다. 비열(specific heat)은 재료가 온도 1 ℃ 올리기 위해 필요한 열량으로 강재는 735 ℃에서 5,000 J/kg·K로 최댓값을 가지며, 900 ℃ 이상에서는 650 J/kg·K을 유지한다. 밀도는 온도에 상관없이 온도에 상관없이 7,850 kg/m<sup>3</sup>이다[21].

기존 연구에 따르면 화재 후 강재의 기계적 특성은 가열 단계에서 도출된 최고 온도에 크게 영향을 받는다[5]. 따라서, 열전달해석으로 도출된 최고 온도 값을 적용해 구조해석을 수행하기 위해서는 화재 후 온도에 따른 재료의 역학적 특성을 정의해야한다. 화재 후 강재의 역학적 특성을 파악하기 위해 Tao[5] 모델을 참고하였다. Tao[5]모델은 목표 온도에서 공기 중 냉각(natural cooling)을 했을 경우에 대한 응력-변형률 곡선식을 제시하였으며, Table 3와 Fig. 3에 온도에 따른 화재 후 Q690D강재의 역학적 특성을 나타냈다. Tao[5] 모델은

Table 3, Fig. 3와 같이 온도가 500 ℃까지 상온과 같은 역학적 특성을 가지다가 500 ℃를 초과했을 때부터 온도가 상승할수록 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 극한변형률이 감소하였다.

본 연구에서 비선형 해석을 위한 재료의 이력특성으로 이동성 경화 모델(kinematic hardening)을 사용하였다. 이동성 경화모델은 가력 싸이클에 따라 항복응력의 절대값이 줄어드는 이력 특성으로 바우싱거 효과가 반영된다[22]. 따라서 Chen[16]의 실험과 유사한 기둥의 거동을 나타내기 위해 바우싱거 효과가 반영되는 다중선형 이동성 경화(multi-linear kinematic hardening)모델을 적용하였다.

### 3.2.2 지진해석 모델링(Chen[16])

본 연구에서 지진해석은 ANSYS(2021 R1)에서 제공하는 정역학해석(static structural)으로 수행하였다. 해석 모델링은 Table 1를 바탕으로 Fig. 4(a)처럼 모델링

을 수행하였고, Fig. 4(b)와 같이 솔리드186 타입 메쉬(mesh)를 구성하였다. 경계조건은 Fig. 4(a)와 같이 기둥 하단에 고정단을 표현하기 위해 고정단(fixed support) 기능을 사용하였고, 축력과 반복가력을 표현하기 위해 각각 가력(force)과 변위(displacement)기능을 사용하였다. 가력기능은 Table 1과 같이 3,617 kN( $P_n$ )을 부여하였다. 변위기능은 Fig. 1와 같이 강축 방향으로 변위 제어를 수행하였다. 항복 변위는 푸시오버(pushover)해석을 통해 도출한 83 mm로 지정하였다. 재료 모델은 Table 3와 Fig. 3에 따라 상온일 때 응력-변형률 곡선을 사용하였다.

### 3.2.3 열전달해석 모델링(Choi[17])

본 연구에서 열전달 해석은 ANSYS(2021 R1)에서 제공하는 전이열해석(transient thermal)을 이용하여 수행했다. 전이열해석은 시간에 따른 영향을 반영하기 때문에 점진적으로 시간에 따라 온도가 상승하는 표준화재곡

Table 3. Thermal & mechanical property of Q690D steel

Temperature (℃)	EN1993-1-2[7] for thermal properties			Tao model[5] for mechanical properties			
	Thermal conductivity (W/m·K)	Specific heat (J/kg·K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Elastic Modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Ultimate strain (mm/mm)
20	53.3	439.8	7,850	206,000	780	835	0.106
100	50.7	487.6		206,000	780	835	0.106
200	47.3	529.8		206,000	780	835	0.106
300	44.0	564.7		206,000	780	835	0.106
400	40.7	605.9		206,000	780	835	0.106
500	37.4	666.5		206,000	780	835	0.106
600	34.0	760.2		203,322	759	819	0.104
700	30.7	1,008.2		200,644	732	802	0.102
800	27.3	803.3		197,966	698	786	0.099
900	27.3	650.0		195,288	659	770	0.094
1,000	27.3	650.0	192,610	613	754	0.089	

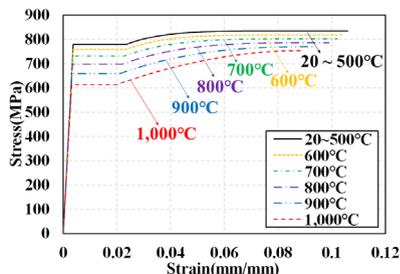


Fig. 3. Stress-strain relationships at Tao[5] model

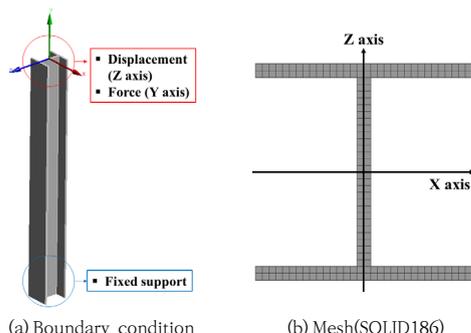


Fig. 4. Structure finite element modeling

선 같은 조건을 해석할 때 유용하게 쓰인다[19]. 해석 모델링은 Table 1를 바탕으로 Fig. 2와 같이 모델링을 수행하였고, 솔리드90 타입 메쉬를 구성하였다. 기둥의 4면 가열을 구현하기 위해 Fig. 2와 같이 상단·하단을 제외한 나머지 표면에 대류(convection)기능을 설정하였다. 대류기능 조건은 시간, 온도, 대류계수의 설정을 포함하고 있다. 시간과 온도는 ISO-834 화재곡선[18]에 따라 설정하였고, 대류계수는 EN1991-1-1[23]에 따라 25 W/m<sup>2</sup>℃로 설정하였다. 재료 모델은 Table 3와 같이 밀도, 비열, 열전도율을 적용하였다. 기둥 중앙부 온도를 확인하기 위해 사용자가 직접 좌표계를 설정할 수 있는 좌표계(coordinate system)을 활용하여 Fig. 2와 같이 중앙부 온도를 확인하였다.

### 3.3 기존지진 및 화재실험의 해석결과 분석

지진해석 검증은 Chen[16]실험의 좌굴형상, 하중이력곡선, 내력비, 초기강성을 해석결과와 비교하였다. 좌굴형상은 Fig. 5처럼 실험과 동일하게 플랜지 국부좌굴이 발생하였다. Chen[16]과 해석의 하중-변위 이력곡선은 Fig. 6과 같이 나타났으며, 각 싸이클당 최대 횡강도를 Table 4에 비교분석하였다. 7싸이클의 부(-) 부분은 기둥이 파단된 것으로 판단하여 제외하였다. 실험과 해석값의 최대 횡강도 차이는 Table 4와 같이 6싸이클 정

(+)부분에서 11.9%가 도출됐으며, 이 차이는 Chen[16]의 실험체 지지단 조건이 해석과 달리 이상적으로 고정되지 않고, 하중플레이트와 힌지사이에 간격이 있어 가력과정에서 미끄러짐이 발생하여 생기는 차이라고 판단했다. 내력비( $P_{max}/P_y$ )는 최대 강도에 대한 항복강도의 비로 나타냈으며, Table 5와 같이 정(+)방향에서 7.6%, 부(-) 방향에서 9.4% 차이가 발생했다. 최대 내력비 차이가 9.4%이기 때문에, 충분히 해석이 실험결과에 부합하는 결과를 보였다. 초기 강성은 Eq. (1)과 같이 정(+), 부(-)부분의 항복강도의 차이와 그에 따른 항복변위 차이를 나누어 산정하였으며, Table 5에 정리를 하였다.

$$K_i = \frac{|+P_y| + |-P_y|}{|+\Delta_y| + |-\Delta_y|} \quad (1)$$

Where,  $P_y$  denotes yield strength,  $\Delta_y$  denotes yield displacement

초기강성은 Table 5와 같이 실험값이 2.52, 해석값이 2.55가 도출됐다. 초기강성 차이가 1.2%이기 때문에, 충분히 지진해석이 실험결과와 유사한 패턴을 나타냈다.

열전달해석 검증은 30분일 때 기둥의 중앙부 온도를 통해 온도실험결과와 온도해석결과를 비교하였다. 실험 결과는 Table 6와 같이 실험값은 578℃, 해석 값은 571℃가 도출됐다. 실험 값과 해석 값의 차이는 Table

Table 4. Maximum lateral force per cycle

	Maximum strength per cycle(kN)													
	1cycle		2cycle		3cycle		4cycle		5cycle		6cycle		7cycle	
	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
Test by Chen[16]	49	56	104	108	172	191	181	185	197	231	212	191	187	-
Proposed FEA	52	52	104	104	188	182	188	181	188	240	238	197	180	-
Deviation (%)	5.5	6.5	0.3	3.6	9.0	4.5	4.0	2.2	4.8	3.6	11.9	2.9	3.6	-

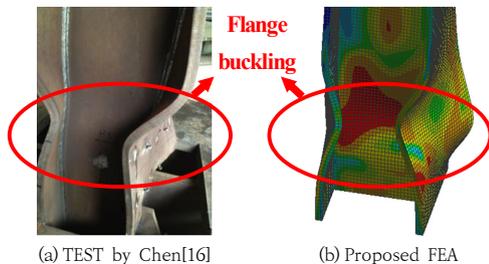


Fig. 5. Failure shape

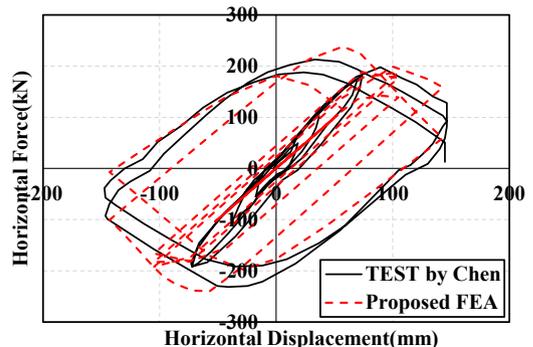


Fig. 6. Comparison of hysteresis curves

6와 같이 1.2 %이기 때문에 충분히 해석이 실험결과에 부합하는 결과를 보였다.

기존 지진(Chen[16]), 화재(Choi[17])연구의 실험값과 유한요소해석 모델링을 통한 결과 값을 비교한 지진 해석과 열전달해석 모델링을 실험값을 충분히 예측할 수 있으며, 다변수 해석을 수행하는데 있어 사용될 수 있음을 보여준다.

Table 5. Comparison with result of Chen[16]

		TEST by Chen[16]	Proposed FEA	Deviation (%)
$P_{max}$	(+)	1.17	1.26	7.6
	(-)	1.21	1.32	9.4
$P_y$				
Initial stiffness (kN/mm)		2.52	2.55	1.2

Table 6. Comparison with result of Choi[17]

Heating time (min)	Temperature(°C)		Deviation (%)
	TEST by Choi[17]	Proposed FEA	
30	578	571	1.2

## 4. 화재 후 기둥 지진해석

### 4.1 해석모델링 및 경계조건

본 연구는 Chen[16]의 H형강 규격에 대해 세장비 ( $KL/r$ )를 변수로 두어 다변수 해석을 수행하였다. 변수

는 Table 7와 같이 세장비에 따라 4개의 그룹으로 분류하였으며, SC-X-Y에서 SC는 강재 기둥(steel column), X는 화재시간, Y는 세장비를 의미한다. 세장비는 AISC360-16[8]에 따라 Fig. 7과 같이 20.8(비탄성 좌굴 구간), 52.2(Chen[16] 모델), 66.6(한계 세장비), 104.2(탄성 좌굴구간)로 선택하였다. H형강은 같은 규격을 사용하기 때문에 단면 2차반경과 유효좌굴길이계수는 동일하여 높이만을 변형시켜 세장비를 변경시켰다. 세장비 20.8일 때 높이는 1,000 mm, 52.2일 때는 2,505 mm, 66.6일 때는 1,818 mm, 104.2일 때는 5,000 mm이다 (Table 7). 하중비는 실제 가하게 될 축력에 대한 기둥의 설계압축강도의 비이며, Chen[16]연구와 동일한 0.35로 지정하였다. 세장비 20.8일 때는 3,411 kN, 52.2일 때는 2,379 kN, 66.6일 때는 1,818 kN, 104.2일 때는 784 kN이다(Table 7). 화재 시간은 0, 30, 60분으로 설정하였으며, 이는 건물 안전성을 위협하기 전에 성공적으로 진화될 대부분의 화재시나리오를 구현하기 위해 설정하였다[24]. 재료모델은 Table 3에 따라 물성치를 적용하였다. 열-구조 해석은 3장에서 검증한 지진-열전달 모델링을 이용하여 열전달해석을 수행한 후 온도결과를 구조해석에 적용하여 해석을 수행하였다. 반복가력 프로토콜은 Fig. 8와 같은 AISC2005[25]에 따른 반복가력 프로토콜을 활용하였다. AISC2005[25]에서는 회전각에 따라 프로토콜을 제시하고 있지만, 본 연구에서는 회전각과 높이를 변위로 치환하여 해석을 수행하였다.

### 4.2 화재 후 지진 해석결과분석

#### 4.2.1 온도차이

Table 7. Proposed parametric study for FEA analyses

Group	No	Specimen	Heating time (min)	Slenderness (KL/r)	Length (mm)	$P_n$ (kN)
A	1	SC-0-20.8	0	20.8	1,000	3,411
	2	SC-30-20.8	30			
	3	SC-60-20.8	60			
B	4	SC-0-52.2	0	52.2	2,505	2,379
	5	SC-30-52.2	30			
	6	SC-60-52.2	60			
C	7	SC-0-66.6	0	66.6	3,195	1,818
	8	SC-30-66.6	30			
	9	SC-60-66.6	60			
D	10	SC-0-104.2	0	104.2	5,000	784
	11	SC-30-104.2	30			
	12	SC-60-104.2	60			

화재시간 30, 60분의 온도분포를 검증하기 위해 중앙 부 온도를 도출하여 EN1993-1-2[7]에서 제시한무피복 H형강 온도결정식과 비교하였다.

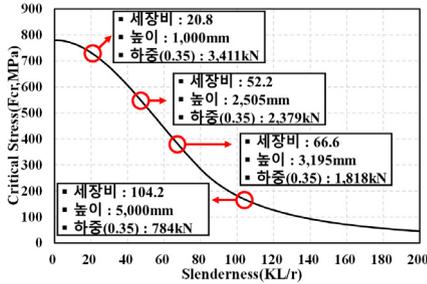


Fig. 7. Slenderness by AISC 360-16[8]

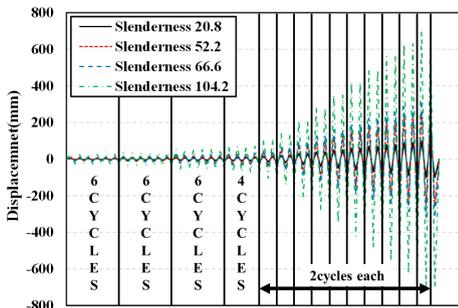


Fig. 8. Loading protocol by AISC2005[25]

EN1993-1-2[7]에서 제시하는 온도결정식은 아래의 Eq. (2)를 사용하였다.

$$\Delta\theta_s = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} h_{net} \Delta t \quad (2)$$

Where,  $\Delta\theta_s$  denotes the increase of temperature,  $k_{sh}$  denotes correction factor for the shadow effect,  $A_m$  denotes the surface area of the member,  $V$  denotes the volume of the member,  $c_a$  denotes the specific heat of steel,  $h_{net}$  denotes the design value of the heat flux,  $\Delta t$  denotes the time interval,  $\rho_a$  denotes the unit mass of steel

유한요소해석 값과 온도결정식 값을 Table 8에 나타냈다. 화재시간 30분일 때 해석값 533 ℃, 온도결정식 값 511 ℃로 4 %차이가 났으며, 60분일 때는 해석 값 945 ℃, 온도결정식 값 940 ℃로 1 % 차이가 나타났다. 따라서, EN1993-1-2[7]제안식과 유사한 경향을 나타내고 있어서 온도 해석은 비교적 정확함을 알 수 있었다.

Table 8. Temperature results

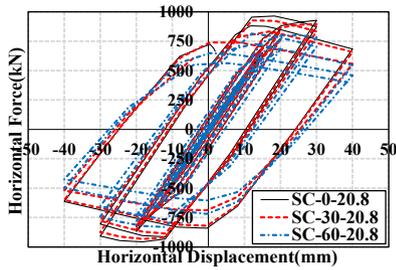
Heating time (min)	EN1993-1-2[7] (°C)	Proposed FEA (°C)	Deviation (%)
0	20	20	0
30	511	533	4
60	940	945	1

#### 4.2.2 하중-변위특성

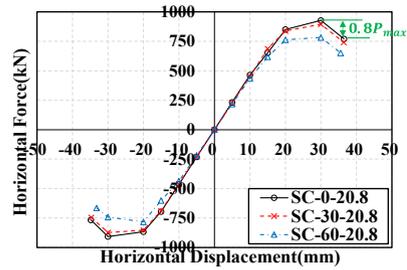
세장비와 화재시간 조건에 따른 H형강 기둥의 하중-변위 이력곡선 및 단조화곡선(skeleton curve)를 각각 Fig. 9와 Fig. 10에 나타냈다. 하중-변위 단조화 곡선은 최대 하중( $P_{max}$ )의 80 %까지만 나타내었다. 세장비와 화재시간 조건별 이력곡선 및 단조화곡선 특성을 Table 9 과 Table 10에 정리하였다.

동일한 세장비일 경우 화재시간의 증가가 내력비 증가에 미치는 영향은 다음과 같다.

세장비 20.8인 경우, 정하중(+)의 내력비는 0분에서 2.07, 30분에서 2.02 및 60분에서 1.90이다. 또한, 부하중(-)의 내력비는 0분에서 2.06, 30분에서 2.03 및 60분에서 1.87이다. 세장비 20.8의 내력비는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 정하중(+)에서 최대 (-)9.7 % 감소하였다(Fig. 9(a), Table 9). 세장비 52.2인 경우, 정하중(+)의 내력비는 0분에서 1.30, 30분에서 1.25 및 60분에서 1.21이다. 또한, 부하중(-)의 내력비는 0분에서 1.30, 30분에서 1.28 및 60분에서 1.25이다. 세장비 52.2의 내력비는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 정하중(+)에서 최대 (-)6.9 % 감소하였다(Fig. 9(b), Table 9). 세장비 66.6인 경우, 정하중(+)의 내력비는 0분에서 1.07, 30분에서 1.05 및 60분에서 1.03이다. 또한, 부하중(-)의 내력비는 0분에서 1.09, 30분에서 1.03 및 60분에서 1.02이다. 세장비 66.6의 내력비는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 부하중(-)에서 최대 (-)6.4 % 감소하였다(Fig. 9(c), Table 9). 세장비 104.2인 경우, 내력비는 화재시간에 관계없이 1.00이다(Fig. 9(d), Table 9). 동일한 세장비일 경우 내력비는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 평균 (-)4.8 % 감소하였다(Table 9). 다만, 내력비는 세장비가 증가할수록 화재시간에 따른 저감률이 감소하였으며, 세장비 104.2 이상에서는 화재시간에 대한 영향을 받지 않았다. 이는 Chen[15]의 세장비에 따른 기둥의 화재 후 내력특성 연구와 유사한 경향을 나타내었다. Chen[15]은 내력비가 세장비 150 이상일 때 화재시간에 대해 영향을 받지 않는다고 하였으나, 본 연구에서는 세장비 104.2 이상에서 내력비(횡하중)가 화재시간에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

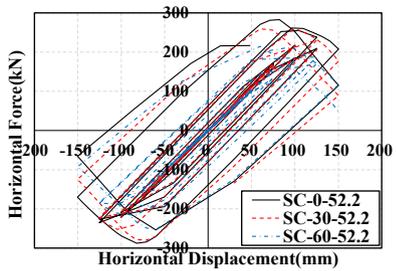


Hysteresis curve

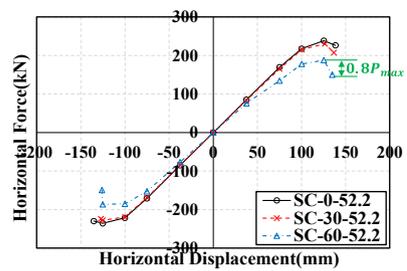


Skeleton curve

(a) Slenderness 20.8

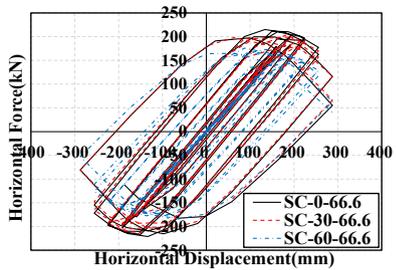


Hysteresis curve

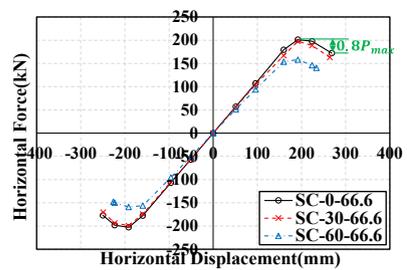


Skeleton curve

(b) Slenderness 52.2

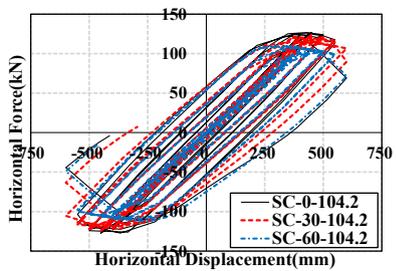


Hysteresis curve

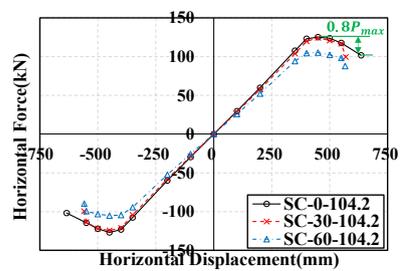


Skeleton curve

(c) Slenderness 66.6



Hysteresis curve



Skeleton curve

(d) Slenderness 104.2

Fig. 9. Time Hysteresis & Skeleton curve due to slenderness

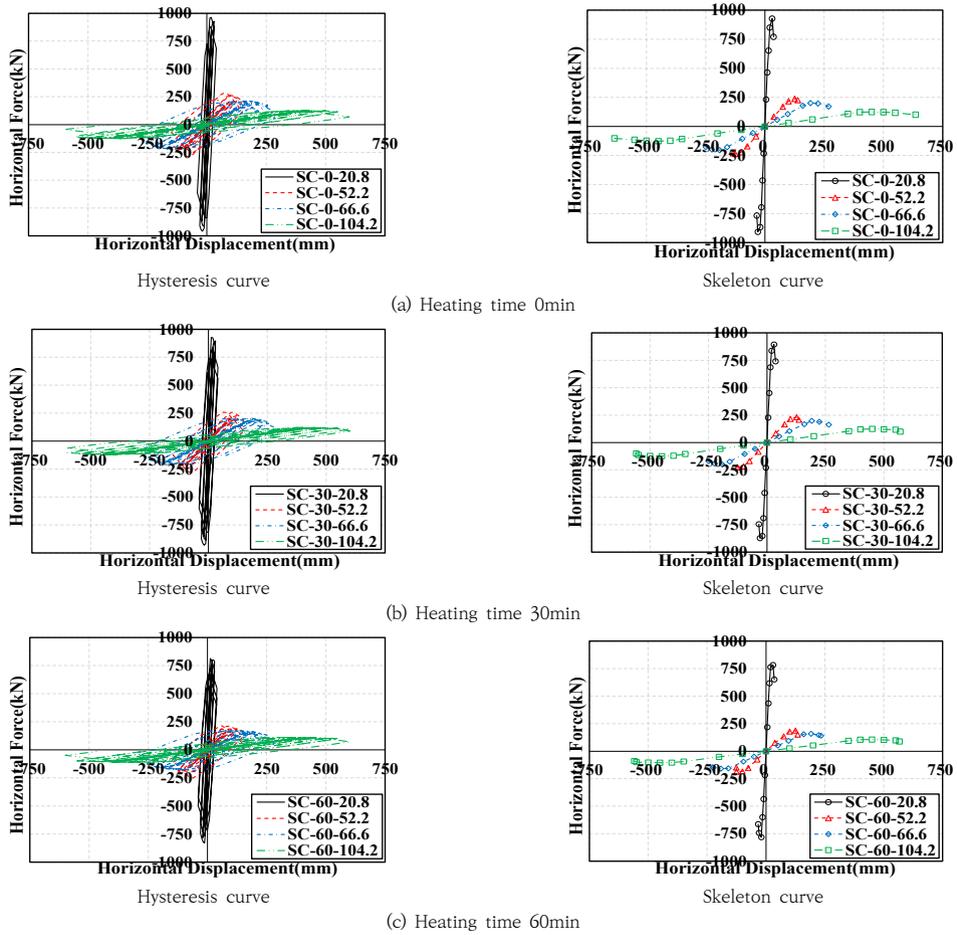


Fig. 10. Slenderness Hysteresis & Skeleton curve due to heating time

Table 9. Lateral load capacity ratio

Slenderness	Lateral load capacity ratio( $P_{max}/P_y$ )									$\Delta_{l,max}^*$ (%)	
	0min			30min			60min				
	$P_{max}$	$P_y$	$\frac{P_{max}}{P_y}$	$P_{max}$	$P_y$	$\frac{P_{max}}{P_y}$	$P_{max}$	$P_y$	$\frac{P_{max}}{P_y}$		
20.8	(+)	964	465	2.07	927	460	2.02	814	435	1.87	Average -4.8
	(-)	958	465	2.06	932	460	2.03	830	437	1.90	
52.2	(+)	283	217	1.30	259	207	1.25	215	178	1.21	
	(-)	287	221	1.30	280	219	1.28	252	202	1.25	
66.6	(+)	215	201	1.07	198	189	1.05	158	154	1.03	
	(-)	221	202	1.09	199	194	1.03	159	156	1.02	
104.2	(+)	127	127	1.00	124	124	1.00	110	110	1.00	
	(-)	127	127	1.00	125	124	1.00	112	112	1.00	
$\Delta_{s,max}^*$ (%)	(+)										-
	(-)	-51.7			-50.5			-46.5			
Average :- 49.7											

\* $\Delta_{l,max}$  : If the same slenderness, maximum reduction rate of the load capacity due to heating time,  $\Delta_{s,max}$  : If the same heating time, maximum reduction rate of the load capacity due to slenderness

Table 10. Ductility factor

Slenderness		Ductility factor( $\Delta_{max}/\Delta_y$ )									$\Delta_{t,max}^*$ (%)
		0min			30min			60min			
		$\Delta_{max}$	$\Delta_y$	$\frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$	$\Delta_{max}$	$\Delta_y$	$\frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$	$\Delta_{max}$	$\Delta_y$	$\frac{\Delta_{max}}{\Delta_y}$	
20.8	(+)	36.49	15.00	2.43	36.43	15.00	2.42	35.56	15.00	2.37	-2.5
	(-)	34.81	15.00	2.32	34.68	15.00	2.31	33.21	15.00	2.21	-4.7
52.2	(+)	138.53	75.15	1.84	136.73	75.15	1.82	134.86	75.15	1.80	-2.2
	(-)	135.25	75.00	1.80	127.3	75.00	1.69	126.15	75.00	1.68	-6.7
66.6	(+)	268.47	159.75	1.68	264.11	159.75	1.65	233.44	159.75	1.46	-13.1
	(-)	249.90	160.00	1.56	249.25	160.00	1.55	226.41	160.00	1.42	-9.0
104.2	(+)	635.64	450.00	1.41	569.70	450.00	1.27	566.44	450.00	1.26	-10.6
	(-)	634.81	450.00	1.41	559.72	450.00	1.24	558.98	450.00	1.23	-12.8
$\Delta_{s,max}^*$ (%)	(+)	-42.0			-47.5			-46.8			-
	(-)	-39.2			-46.3			-44.3			
Average :- 44.4											

\* $\Delta_{t,max}$  : If the same slenderness, maximum reduction rate of ductility factor due to heating time,  $\Delta_{s,max}$  : If the same heating time, maximum reduction rate of ductility factor due to slenderness

동일한 화재시간일 경우 세장비 증가가 내력비 증감에 미치는 영향은 다음과 같다.

화재시간 0분인 경우, 정하중(+)의 내력비는 세장비 20.8에서 2.07, 세장비 52.2에서 1.30, 세장비 66.6에서 1.07 및 세장비 104.2에서 1.00이다. 또한, 부하중(-)의 내력비는 세장비 20.8에서 2.06, 세장비 52.2에서 1.30, 세장비 66.6에서 1.09 및 세장비 104.2에서 1.00이다. 화재시간 0분일 때의 내력비는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 정하중(+)에서 최대 (-)51.7 % 감소하였다(Fig. 10(a), Table 9). 화재시간 30분인 경우, 정하중(+)의 내력비는 세장비 20.8에서 2.02, 세장비 52.2에서 1.25, 세장비 66.6에서 1.05 및 세장비 104.2에서 1.00이다. 또한, 부하중(-)의 내력비는 세장비 20.8에서 2.03, 세장비 52.2에서 1.28, 세장비 66.6에서 1.03 및 세장비 104.2에서 1.00이다.

화재시간 30분일 때의 내력비는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 부하중(-)에서 최대 (-)50.7 % 감소하였다(Fig. 10(b), Table 9). 화재시간 60분인 경우, 정하중(+)의 내력비는 세장비 20.8에서 1.87, 세장비 52.2에서 1.21, 세장비 66.6에서 1.03 및 세장비 104.2에서 1.00이다. 또한, 부하중(-)의 내력비는 세장비 20.8에서 1.90, 세장비 52.2에서 1.25, 세장비 66.6에서 1.02 및 세장비 104.2에서 1.00이다. 화재시간 60분일 때의 내력비는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 부하중(-)에서 최대 (-)47.4 % 감소하였다(Fig. 10(c), Table 9). 동일한 화재시간일 경우 내력비는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 평균 (-)49.7 % 감소하였다. 또한, 화재시간이 증가

할수록 세장비에 따른 저감률이 감소하였다(Table 9).

연성이 큰 구조물일수록 파괴이전에 상당한 에너지를 흡수 할 수 있다. 이 때문에 지진에 대한 구조물의 내력성을 평가하는 중요한 지표로 연성이 사용된다[26]. 연성 효과를 나타내는 지표는 아래의 Eq. (3)과 같이 각 하중-변위 단조화 곡선에서 최대변위를 항복변위로 나눈 값으로 나타낼 수 있으며. 이를 연성계수( $\mu$ )라고 한다.

$$\mu = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (3)$$

Where,  $\mu$  denotes ductility factor,  $\Delta_{max}$  denotes max displacement(mm),  $\Delta_y$  denotes yield displacement(mm)

위의 Eq. (3)을 이용하여 도출한 연성계수를 Table 10에 정리를 하였다. 동일한 세장비일 경우 화재시간 증가가 연성계수 증감에 미치는 영향은 다음과 같다.

세장비 20.8인 경우, 정하중(+)의 연성계수는 0분에서 2.43, 30분에서 2.42 및 60분에서 2.37이다. 또한, 부하중(-)의 연성계수는 0분에서 2.32, 30분에서 2.31 및 60분에서 2.21이다. 세장비 20.8의 연성계수는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 부하중(-)에서 최대 (-)4.7 % 감소하였다(Table 10). 세장비 52.2인 경우, 정하중(+)의 연성계수는 0분에서 1.84, 30분에서 1.82 및 60분에서 1.80이다. 또한, 부하중(-)의 연성계수는 0분에서 1.80, 30분에서 1.69 및 60분에서 1.68이다. 세장비 52.2의 연성계수는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 부하중(-)에서 최대 (-)6.7 % 감소하였다(Table 10).

세장비 66.6인 경우, 정하중(+)의 연성계수는 0분에서 1.68, 30분에서 1.65 및 60분에서 1.46이다. 또한, 부하중(-)의 연성계수는 0분에서 1.56, 30분에서 1.55 및 60분에서 1.42이다. 세장비 66.6의 연성계수는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 정하중(+)에서 최대 (-)13.1 % 감소하였다(Table 10). 세장비 104.2인 경우, 정하중(+)의 연성계수는 0분에서 1.41, 30분에서 1.27 및 60분에서 1.26이다. 또한, 부하중(-)의 연성계수는 0분에서 1.41, 30분에서 1.24 및 60분에서 1.23이다. 세장비 104.2의 연성계수는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 부하중(-)에서 최대 (-)12.8 % 감소하였다(Table 10). 동일한 세장비일 경우 내력비는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 평균 (-)7.7 % 감소하였다(Table 10).

동일한 화재시간일 경우 세장비 증가가 연성계수 증감에 미치는 영향은 다음과 같다.

화재시간 0분인 경우, 정하중(+)의 연성계수는 세장비 20.8에서 2.43, 세장비 52.2에서 1.84, 세장비 66.6에서 1.68 및 세장비 104.2에서 1.41이다. 또한, 부하중(-)의 연성계수는 세장비 20.8에서 2.32, 세장비 52.2에서 1.80, 세장비 66.6에서 1.56 및 세장비 104.2에서 1.41이다. 화재시간 0분일 때의 연성계수는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 정하중(+)에서 최대 (-)42.0 % 감소하였다(Table 10). 화재시간 30분인 경우, 정하중(+)의 연성계수는 세장비 20.8에서 2.42, 세장비 52.2에서 1.82, 세장비 66.6에서 1.65 및 세장비 104.2에서 1.27이다. 또한, 부하중(-)의 연성계수는 세장비 20.8에서 2.31, 세장비 52.2에서 1.69, 세장비 66.6에서 1.55 및 세장비 104.2에서 1.24이다. 화재시간 30분일 때의 연성계수는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 정하중(+)에서 최대 (-)47.5 % 감소하였다(Table 10). 화재시간 60분인 경우, 정하중(+)의 연성계수는 세장비 20.8에서 2.37, 세장비 52.2에서 1.80, 세장비 66.6에서 1.46 및 세장비 104.2에서 1.26이다. 또한, 부하중(-)의 연성계수는 세장비 20.8에서 2.21, 세장비 52.2에서 1.68, 세장비 66.6에서 1.42 및 세장비 104.2에서 1.23이다. 화재시간 60분일 때의 연성계수는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 정하중(+)에서 최대 (-)46.8 % 감소하였다(Table 10). 동일한 화재시간일 경우 연성계수는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 평균 44.4 % 감소하였다(Table 10).

결과적으로 내력비와 연성계수는 세장비와 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 화재시간 1시간까지는 화재시간보다 세장비에 따라 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.

### 4.2.3 에너지소산능력

에너지소산능력은 지진 발생시 구조물 자체 소성변형을 통해 지진에너지를 소비하는 능력을 의미하며, 구조물의 내진성능을 평가하는 가장 중요한 요소 중 하나이다 [27]. 에너지소산능력은 Fig. 11과 같이 각 사이클당 하중-변위 이력곡선의 면적을 누적하여 비교하였으며, 변수별 사이클당 소산에너지를 누적하여 Table 11에 누적소산에너지를 정리하였다.

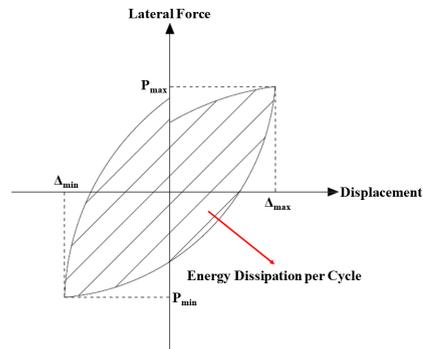


Fig. 11. Definition of dissipate energy

동일한 세장비일 경우 화재시간의 증가가 누적소산에너지 증감에 미치는 영향은 다음과 같다.

세장비 20.8인 경우, 누적소산에너지는 0분에서 125.6 kN·m, 30분에서 119.3 kN·m 및 60분에서 108.2 kN·m이다. 세장비 20.8의 누적소산에너지는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)13.9 % 감소하였다(Fig. 9(a), Table 11). 세장비 52.2인 경우, 누적소산에너지는 0분에서 104.6 kN·m, 30분에서 99.3 kN·m 및 60분에서 95.7 kN·m이다. 세장비 52.2의 누적소산에너지는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)8.5 % 감소하였다(Fig. 9(b), Table 11). 세장비 66.6인 경우, 누적소산에너지는 0분에서 65.7 kN·m, 30분에서 56.2 kN·m 및 60분에서 55.2 kN·m이다. 세장비 66.6의 누적소산에너지는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)16 % 감소하였다(Fig. 9(c), Table 11). 세장비 104.2인 경우, 누적소산에너지는 0분에서 32.6 kN·m, 30분에서 21.7 kN·m 및 60분에서 19 kN·m이다. 세장비 104.2의 누적소산에너지는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)41.7 % 감소하였다(Fig. 9(d), Table 11). 동일한 세장비일 경우 누적소산에너지는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 평균 (-)20 % 감소하였다(Table 11).

동일한 화재시간일 경우 세장비 증가가 누적소산에너지 증감에 미치는 영향은 다음과 같다.

화재시간 0분인 경우, 누적소산에너지는 세장비 20.8에서 125.6 kN·m, 세장비 52.2에서 104.6 kN·m, 세장비 66.6에서 65.7 kN·m 및 세장비 104.2에서 32.6 kN·m이다. 화재시간 0분일 때의 누적소산에너지는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)74.0 % 감소하였다(Fig. 10(a), Table 11). 화재시간 30분인 경우, 누적소산에너지는 세장비 20.8에서 119.3 kN·m, 세장비 52.2에서 99.3 kN·m, 세장비 66.6에서 56.2 kN·m 및 세장비 104.2에서 21.7 kN·m이다. 화재시간 30분일 때의 누적소산에너지는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)81.8 % 감소하였다(Fig. 10(b), Table 11). 화재시간 60분인 경우, 누적소산에너지는 세장비 20.8에서 108.2 kN·m, 세장비 52.2에서 95.7 kN·m, 세장비 66.6에서 55.2 kN·m 및 세장비 104.2에서 19.0 kN·m이다. 화재시간 60분일 때의 누적소산에너지는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)82.4 % 감소하였다(Fig. 10(c), Table 11). 동일한 화재시간일 경우 누적소산에너지는 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 평균 (-)79.4 % 감소하였다(Table 11).

결과적으로 누적소산에너지는 세장비와 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 화재시간 1시간까지는 화재시간보다 세장비에 따라 더 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.

Table 11. Cumulative dissipate energy

KL/r	Cumulative dissipate energy(kN·m)				Average : -20.0
	0 min	30 min	60 min	$\Delta_{t,max}^*$ (%)	
20.8	125.6	119.3	108.2	-13.9	Average : -20.0
52.2	104.6	99.3	95.7	-8.5	
66.6	65.7	56.2	55.2	-16.0	
104.2	32.6	21.7	19.0	-41.7	
$\Delta_{s,max}^*$ (%)	-74.0	-81.8	-82.4	-	Average : -79.4

\* $\Delta_{t,max}$  : If the same slenderness, maximum reduction rate of cumulative dissipate energy due to heating time,  $\Delta_{s,max}$  : If the same heating time, maximum reduction rate of cumulative dissipate energy due to slenderness

#### 4.2.4 초기 강성

초기강성은 기둥의 변위, 연성 및 구조물 내력분포 추정에 영향을 미치기 때문에 내진성능을 평가하는 지표 중 하나이다[28]. 초기강성은 Eq. (1)를 사용하여 산정하였으며, Table 12에 정리를 하였다.

동일한 세장비일 경우 화재시간 증가가 초기강성 증감에 미치는 영향은 다음과 같다.

세장비 20.8인 경우, 초기강성은 0분에서 46.45 kN/mm, 30분에서 45.96 kN/mm 및 60분에서 43.64 kN/mm이다. 세장비 20.8의 초기강성은 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)6.04 % 감소하였다(Table 12). 세장비 52.2인 경우, 초기강성은 0분에서 2.26 kN/mm, 30분에서 2.23 kN/mm 및 60분에서 2.03 kN/mm이다. 세장비 52.2의 초기강성은 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)10.18 % 감소하였다(Table 12). 세장비 66.6인 경우, 초기강성은 0분에서 1.11 kN/mm, 30분에서 1.09 kN/mm 및 60분에서 0.99 kN/mm이다. 세장비 66.6의 초기강성은 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)10.81 % 감소하였다(Table 12). 세장비 104.2인 경우, 초기강성은 0분에서 0.29 kN/mm, 30분에서 0.28 kN/mm 및 60분에서 0.26 kN/mm이다. 세장비 104.2의 초기강성은 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)10.34 % 감소하였다(Table 12). 동일한 세장비일 경우 누적소산에너지는 화재시간이 증가할수록 감소하였으며, 평균 (-)9.34 % 감소하였다(Table 12).

Table 12. Initial stiffness

KL/r	Initial stiffness(kN/mm)				Average : 9.34
	0 min	30 min	60 min	$-\Delta_{t,max}^*$ (%)	
20.8	46.45	45.96	43.64	6.04	Average : 9.34
52.2	2.26	2.23	2.03	10.18	
66.6	1.11	1.09	0.99	10.81	
104.2	0.29	0.28	0.26	10.34	
$-\Delta_{s,max}^*$ (%)	99.37	99.40	99.41	-	Average : 99.39

\* $\Delta_{t,max}$  : If the same slenderness, maximum reduction rate of initial stiffness due to heating time,  $\Delta_{s,max}$  : If the same heating time, maximum reduction rate of initial stiffness due to slenderness

동일한 화재시간일 경우 세장비 증가가 초기강성 증감에 미치는 영향은 다음과 같다.

화재시간 0분인 경우, 초기강성은 세장비 20.8에서 46.45 kN/mm, 세장비 52.2에서 2.26 kN/mm, 세장비 66.6에서 1.11 kN/mm 및 세장비 104.2에서 0.29 kN/mm이다. 화재시간 0분일 때의 초기강성은 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)99.37 % 감소하였다(Table 12). 화재시간 30분인 경우, 초기강성은 세장비

20.8에서 45.96 kN/mm, 세장비 52.2에서 2.23 kN/mm, 세장비 66.6에서 1.09 kN/mm 및 세장비 104.2에서 0.28 kN/mm이다. 화재시간 30분일 때의 초기강성은 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)99.40 % 감소하였다(Table 12). 화재시간 60분인 경우, 초기강성은 세장비 20.8에서 43.64 kN/mm, 세장비 52.2에서 2.03 kN/mm, 세장비 66.6에서 0.99 kN/mm 및 세장비 104.2에서 0.26 kN/mm이다. 화재시간 60분일 때의 초기강성은 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 최대 (-)99.41 % 감소하였다(Table 12). 동일한 화재시간일 경우 초기강성은 세장비가 증가할수록 감소하였으며, 평균 (-)99.39 % 감소하였다(Table 12).

결과적으로 초기강성은 세장비와 화재시간이 증가할수록 감소하며, 화재시간 1시간까지는 화재시간보다 세장비에 대한 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

화재 후 지진상황에서 고강도 H형강 기둥의 내진-내화 성능을 알아보기 위해 열-구조해석을 수행하였다. 열-구조해석은 세장비(20.8, 52.2, 66.6, 104.2)와 화재시간(0, 30, 60분)을 변수로 두어 총 12가지를 해석하였다. 연구과정에서 도출된 결과는 다음과 같다.

- 1) 내력비는 동일한 세장비일 경우 세장비 104.2 미만 구간까지는 화재시간이 증가할수록 감소하였다. 하지만, 세장비 104.2 이상 구간에서의 내력비는 화재시간에 관계없이 1.00으로 나타났다. 이는 기존 Chen[15]의 연구와 유사한 경향을 나타냈다. Chen[15]은 화재 후 축가력만 고려했을 경우 세장비 150 이상 구간에서는 내력비가 온도에 영향을 받지 않는다고 제시했다. 그러나 본 연구는 화재 후 조합력(축력, 횡력)을 고려했을 경우 세장비 104.2 이상 구간에서 온도에 영향을 받지 않았다. 이처럼 온도에 영향을 받지 않은 세장비 구간은 횡력이 추가적으로 적용되었을 경우 기동내력 감소로 인해 세장비 구간이 줄어든 것으로 판단된다. 또한 내력비는 동일한 세장비일 경우 화재시간에 따라 평균 4.8 % 감소하였으며, 동일한 화재시간일 경우 세장비에 따라 평균 49.7 % 감소하였다. 따라서 화재시간 1시간까지의 내력비는 화재시간보다 세장비에 대한 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있다.

- 2) 연성계수는 동일한 세장비일 경우 화재시간이 증가할수록 평균 7.7 % 감소하였으며, 동일한 화재시간일 경우 세장비가 증가할수록 평균 44.4 % 감소하였다. 따라서 화재시간 1시간까지의 연성계수는 화재시간보다 세장비에 대한 영향이 더 큰 것을 확인하였다.
- 3) 누적소산에너지는 동일한 세장비일 경우 화재시간이 증가할수록 평균 20 % 감소하였으며, 동일한 화재시간일 경우 누적소산에너지는 세장비가 증가할수록 평균 79.4 % 감소하였다. 따라서 화재시간 1시간까지의 누적소산에너지는 화재시간보다 세장비에 대한 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있다.
- 4) 초기강성은 동일한 세장비일 경우 화재시간이 증가할수록 평균 9.34 % 감소하였으며, 동일한 화재시간일 경우 세장비가 증가할수록 평균 99.39 % 감소하였다. 따라서, 화재시간 1시간까지의 초기강성은 화재시간보다 세장비에 대한 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있다.
- 5) 본 연구에서는 화재 후 지진시 기둥부재에 대해서만 연구를 수행하였다. 하지만, 화재 후 지진시 골조의 거동은 단일 부재의 거동과는 달리 복합적인 구조거동(소성 힌지)이 예상된다. 따라서 추후에 화재 후 지진에 따른 강구조 골조에 대한 연구가 필요하다.

## References

- [1] Y. Y. Chen, L. Niu, X. Chen, "Hysteretic Behavior of H Steel Columns with Large Width-Thickness Ratios Under Bi-axis Moments", *Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering*, EERI, Alaska, July 2014.
- [2] Y. B. Wang, G. Q. Li, S. W. Sun, F. F. Sun, "Experimental and numerical study on the behavior of axially compressed high strength steel columns with H-section", *Research in Engineering Structures*, Vol.43, pp.149-159, October 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.05.018>
- [3] J. H. Kim, C. K. Kang, B. J. Choi, "The Effect of Temperature Characteristics Toward Composite Beams with Fire Conditions Subjected Vertical Loading", *Research in Korean Society of Steel Construction*, Vol.32, No.3, pp.149-159, December 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.7781/kioss.2020.32.3.189>
- [4] J. H. Yoon, C. H. Lee, S. K. Yoon, "A Study on

- Compressive Strength of Centrally-Loaded Steel Columns at Elevated Temperatures”, *Research in Korean Society of Steel Construction*, Vol.32, No.3, pp.189-200, August 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2016.28.4.253>
- [5] Z. Tao, X. Q. Wang, B. Uy, “Stress-Strain Curves of Structural Steel and Reinforcing Steel after Exposure to Elevated Temperatures”, *Research in Materials in Civil Engineering*, Vol.25, No.9, pp.1306-1316, September 2013. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000676](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000676)
- [6] F. Wang, E. M. Lui, “Experimental Study of the Post-fire Mechanical Properties of Q690 High Strength Steel”, *Research in Constructional Steel Research*, Vol.167, April 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105966>
- [7] European Committee for Standardization (2005) Eurocode 3:Design of Steel Structures, Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design(EN1993-1-2:2005), Belgium, PP.20-26.
- [8] American Institute of Steel Construction (2016) Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC360-16), USA.
- [9] Korea Construction Standards Center (2016) Steel Structure Retention and Fire Design Standards (KDS 14 31 50), Korea.
- [10] Y. Wang, T. Xu, Z. Liu, G. Liu, J. Jiang “Seismic Behavior of Steel Reinforced Concrete Cross-shaped Columns after Exposure to High Temperatures”, *Research in Engineering Structures*, Vol.230, March 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111723>
- [11] H. Mostafaei, F. J. Vecchio, N. Bénichou, “Seismic Resistance of Fire-Damaged Reinforced Concrete Columns”, *ATC and SEI Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures*, ASCE, USA, December 2009.  
DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/41084\(364\)128](http://dx.doi.org/10.1061/41084(364)128)
- [12] D. Ugur, E. B. Caglar, I. Alper, “Impact of Time after Fire on Post-Fire Seismic Behavior of RC Columns”, *Research in Structures*, Vol.26, pp.537-548, August 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.049>
- [13] G. Wang, D. Zhang, “Experimental Research on the Post-Fire Seismic Performance of Steel Reinforced Concrete Columns”, *Research in Procedia Engineering*, Vol.210, pp.456-463, November 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.101>
- [14] W. Wang, T. Liu, “Experimental and Numerical Study on Post-Fire Behavior of High-Strength Q460 Steel Columns”, *Research in Advances in Structural Engineering*, Vol.19, No.12, pp.1873-1888, May 2016.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1369433216649390>
- [15] Y. Chen, W. Xie, “Investigation on Mechanical Behavior of I-Section Steel Columns After Elevated Temperature”, *Research in Fire Technology*, Vol.54, pp.503-529, January 2018.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-017-0694-7>
- [16] S. Chen, X. Chen, Z. Lu, G. Q. Li, Y. B. Wang “Cyclic Behavior of Welded Q690D H-Section Columns”, *7th European Conference on Steel and Composite Structures*, ECCS, Italy, September 2014.
- [17] H. S. Choi, S. D. Kang, J. E. Kim “The Experimental Study on the Resistance Forces and the Failure Temperatures of H-Shaped Steel Compressive Members by Elevated Temperatures”, *Research in Korean Society of Steel Construction*, Vol.25, No.2 ,pp.131-139, April 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2013.25.2.131>
- [18] ISO (1999) ISO 834-1 Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction and Materials.
- [19] Y. S. Kim, B. J. Choi, “An Analytical Study on Encased Steel Composite Columns Fire Resistance According to Axial Force Ratio”, *Research in the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol.24, No.1 ,pp.97-107, February 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2020.24.1.97>
- [20] S. S. Kwak, B. J. Choi, “An Analytical Study on Composite Beam Performance with Post-Fire Temperature Using ANSYS Program”, *Research in the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.20, No.1 ,pp.391-400, January 2019.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.1.391>
- [21] M. Z. Naser, “Properties and Material Models for Modern Construction Materials at Elevated Temperatures”, *Research in Computational Materials Science*, Vol.160, pp.16-29, April 2019.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2018.12.055>
- [22] H. S. Lee, J. H. Hwang, K. Lee, “Experimental of ENTA Hysteretic Damper and Verification of Seismic Performance Through Finite Element Analysis”, *Research in the Korean Association for Spatial Structures*, Vol.20, No.1, pp.79-86, September 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.9712/KASS.2020.20.1.79>
- [23] European Committee for Standardization (2002) Eurocode 1:Actions on Structures, Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire(EN1991-1-2:2002), Belgium, PP.23-25.
- [24] G. Y. Wang, C. Zhang, J. Cu, D. M. Zhang, “Post-Fire Seismic Performance of SRC Beam to SRC Column Frames”, *Research in Structures*, Vol.25, pp.323-334, June 2020.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.016>
- [25] American Institute of Steel Construction (2005) Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC360-05), USA.
- [26] H. Y. Park, C. K. Kang, B. J. Choi, “Cyclic Test of welding connections for Steel-Plate Concrete Column to H-shaped Steel Girders”, *Research in Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol.18, No.1, pp.63-71,

January 2014.

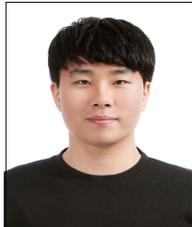
DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2014.18.1.063>

- [27] T. N. T. Cao, L. Bing, "Initial Stiffness Reinforced Concrete Columns with Moderate Aspect Ratios", *Research in Advances in Structural Engineering*, Vol.15, No.2, pp.265-276, June 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1260%2F1369-4332.15.2.265>
- [28] Z. L. Li, X. Liu, J. T. Yu, Z. D. Lu, M. N. Su, J. H. Liao, M. Xia, "Experimental Study on Seismic Performance of Post-Fire Reinforced Concrete Frames, Journal of Engineering Structures", *Research in Engineering Structures*, Vol.15, pp.161-173, January 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.080>

---

황 선 웅(Sun-Woong Hwang)

[준회원]



- 2009년 3월 ~ 2012년 2월 : 영생  
고등학교 졸업
- 2014년 3월 ~ 2020년 2월 : 경기  
대학교 건축공학과(학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 경기대학교  
일반대학원 건축공학과(석사과정)

<관심분야>

건축, 건축구조

---

최 병 정(Byong-Jeong Choi)

[정회원]



- 1999년 1월 ~ 1999년 3월 :  
(미)BSW ARCHITECT  
(Engineering Specialist)
- 1999년 4월 ~ 2000년 12월 :  
(미) HARZA ENGINEERING  
COMPANY (구조설계부)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 경기대학교  
(정교수)

<관심분야>

건축, 토목