

보통모멘트골조에 사용된 매입형합성기둥의 화재 후 내진성능 평가

최병정^{1*}

¹교수, 경기대학교, 건축공학과

Post-Fire Seismic Performance Evaluation of Encased Composite Column in Ordinary Moment Frame

Choi, Byong Jeong^{1*}

¹Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 15442, Korea

Abstract – To investigate the post-fire seismic behavior of encased composite steel column with different fires under different temperature conditions, three specimens were fabricated in full scale. The fire test was conducted in a furnace chamber, followed by static tests under a low cycle load. The temperature transmissions through the structures were measured using thermometers installed. In the cyclic loading tests, the load vs. displacement relationship, drift ratio, secant stiffness, equivalent damping ratio, and accumulated energy are measured and compared in the loading process. The experimental results expressed that the peak flexural moment, drift ratio, ductility ratio, secant stiffness, and accumulated energy capacity of the encased composite steel column decreased after fire exposure and cyclic loading. The temperature distribution of specimens are increased with the increment of fire exposed times. The maximum flexural moment is also decreased with the increase of fire exposed times under cyclic loading.

Keywords – ISO-834-1, Cyclic seismic loading, Encased steel composite column, Equivalent damping ratio, Drift ratio

1. 서론

화재 후 지진에 관한 연구는 재료적인 연구로부터 시작된다고 할 수 있다. 성능기반설계에서는 재료의 성능을 파악한후 그 구조물의 성능을 구조물의 설계에 고려하도록 하고 있다. 일반적으로 상승온도에서는 구조재료의 강도와 강성은 저감된다^[1].

최근에는 강재와 철근에 대한 고온에서의 온도를 고려한 재료적인 특성인 탄성계수, 변형률 특성 등이 많이 연구되어 왔다. 널리 알려진것처럼 화재를 고려한 재료의 실험은 정적상태실험(steady-state test)와 과도상태실험(transient-state test)를 사용한 실험이 주를 이루었다.

Lee *et al.* 연구자들은 ASTM A992를 포함한 고강도 강재에 대한 온도특성을 파악하기 위한 예측모델(Constitutive model)을 제시하였고, 900°C 범위에서 재료의 고온변형률 특성 실험을 수행하였다^{[2][6]}. HSA800의 고강도 강재에 대한 재료의 열적특성실험은 Choi *et al.*에 의해서 1000°C까지 실험을 수행하였다^[7]. 이 연구를 통해서 항복강도, 비례한도, 탄성계수, 극한강도, 응력-변형률 관계의 비례식을 제시하여 성능기반설계의 물성치를 제시하였다. 화재영향을 받은 슬래브의 온도분포 및 내화예측에 대한 연구는 Yoon *et al.*^[8]가 수행하였고 철근 콘크리트 부재를 사용한 온도결정방식에 대한 비교연구를 수행하였다. 파이버시멘트계 합성조인트로 이루어진 2층 골조에 대한 화재후 실험은 Li *et al.*^[9]에 의해서 수행되었다. 이 실험은 강도저감, 에너지소산, 하중능력, 변위연성 등을 사용하여 화재후 성능을 분석한 것이다. Wang *et al.*^[10]은 5개의 실험체를 사용하여 SRC column frame에 대한 화재후 내진성능 실험을 실시하였다. Wang *et al.*^[11]은 십자형 SRC기둥의 지진 응답실험 및 해석을 수행하였고 화재노출온도는 1000°C

Note.-Discussion open until February 28, 2027. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 8, 2026; revised on May 24, 2026; approved on June 8, 2026.

Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-249-9702 Fax. +82-31-249-9702

E-mail. bjchoi@kyonggi.ac.kr

까지 사용하였다. 실험체의 시켄트강성이 약 가열체실험에서 28.5 %까지 감소하는 것을 확인하였다. 위 연구에서도 Hysteretic curve, $P-\Delta$ skeleton 곡선을 사용하여 화재후의 구조성능 실험을 실시하였다. Shah *et al.*^[12]은 RC 철근콘크리트 골조를 사용하여 화재후 지진이 발생하는 조건을 고려하여 구조물의 성능실험을 실시하였다. 지진하중을 받은 RC 골조에 대해서 1시간 동안 가열을 실시하여 잔존성능을 연구하였다. 1시간 동안 900°C에서 1000°C의 온도를 유지한후 반복하중을 가하였다. $P-\Delta$ 곡선을 분석하여 잔존강도를 파악하였고, Spalling, Temperature in accordance with depth 등을 측정하였다. Hutchinson *et al.*^[13]은 6층의 냉간성형으로 이루어진 중층정도의 건물에 대해서 화재후 지진실험을 수행하였다. 화재후 지진실험에서 실험체는 광범위한 벽체에서 전체적인 좌굴 및 국부좌굴을 나타냈다.

Li *et al.*^[14]은 철근콘크리트 모멘트골조를 사용하여 화재후 지진성능실험을 수행하였다. 시간의 증가에 따른 온도분포특성을 관찰하였고 온도는 1200°C까지 사용하였다. 그는 변위분석, 에너지소산량 분석, 하중변위곡선을 통한 상관성분석을 수행하였다. Tao *et al.*^[15]은 원형 및 정사각형 단면의 매입형합성기둥을 사용하여 화재후 압축성능실험을 실시하였다. 목표온도는 800°C를 사용하였고, 화재시 122분후 강도가 36 % 저감되는 것을 확인하였다. Jung *et al.*^[16]은 PC합성보-합성기둥, Park *et al.*^[17]은 CFT기둥-U 합성보 및 Eom *et al.*^[18]은 브래킷모멘트연결부를 사용하여 무화재 접합부내진을 연구하였다. 전반적으로 합성기둥에 대한 화재후-지진실험은 수행되었으나, 화재성능을 파악하기 위해서 보다 많은 실험이 필요하다고 판단된다. 보통모멘트골조에 사용되는 매입형합성기둥의 화재후-지진 거동에 대한 연구는 아직도 충분하지 않았다. 특히 시간의 경과에 따른 하중-변위, 균열양상, 소산에너지의 패턴, 화재후 초기시켄트강성 등에 대한 값의 관찰이 미진하였기 때문에 본 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 매입형합성기둥을 계획하고 화재 후 지진 상황을 가정하여 화재노출시간을 변수로 두어 상온 비가열, 30분 가열, 60분 가열로 3개의 실물대 실험체를 계획하여 화재실험 및 반복하중실험을 진행하였다.

2. 실험

2.1 실험체 상세

화재실험을 실시한후 내진성능실험을 수행하기 위해서 총 3개의 실물대 매입형합성기둥실험체를 제작 계획하였다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 보통모멘트골조에 사용이 가능한 매입형합성기둥(OSRC)의 단면은 300×300이며, 높이는 1,400 mm이다. 합성기둥의 철근배근 상세를 적용하였고 내화성능실험을 먼저 수행하였다(Fig. 1). 내화성능에서 나타난 온도응답특성은 열전대를 통해서 기록된 값을 수집하여 측정하였다. 이후 지진발생시를 고려하여 지진에 대한 잔존능력을 검증하기 위해서 반복복재하가력을 수행하여 화재 후 지진에 대한 성능실험을 실시하였다.

본 실험에서 매입형합성기둥의 주철근은 SD400 강도의 D19 철근을 4대 배근하였으며 띠철근은 SD400 강도의 D10 철근을 사용하였다. 따라서 주철근에 의한 주철근 비는 0.013(1.3 %)이고 띠철근에 의한 횡보강근 비는 0.71이다. 기둥의 중심에 H형강 SHN275를 설치 후 주근을 코너에 설치하였다. H형강은 SHN 275이며, H-100×100×6×8을 사용하였다.

각 실험체에 사용된 철근 및 H-형강의 최소항복강도, 최대인장강도의 재료실험값, 화재후 지진 실험 상세를 위한 3개의 실물실험체에 대한 상세 조건은 Table 1에 정리하였다. 여기서 화재시간은 30분 및 60분으로 구분하

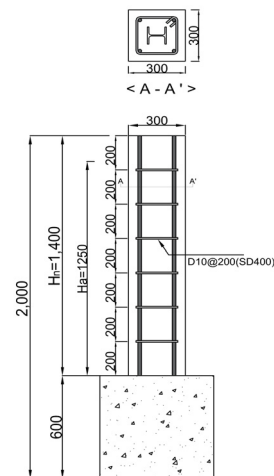
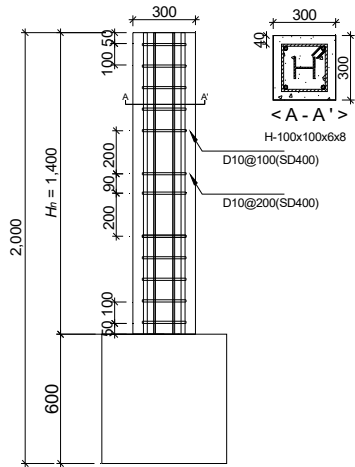


Fig. 1. Experimental detail in typical OSRC specimen

Table 1. Minimum yield strength and the maximum tensile strength

Steel type	Yielding strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Strain (mm/mm)	Elastic modulus (MPa)
D10	471.7	614.5	3.088×10^{-3}	190,394
D19	487.2	638.9	2.365×10^{-3}	206,948
SHN275	341.7	449.2	1.631×10^{-3}	209,530

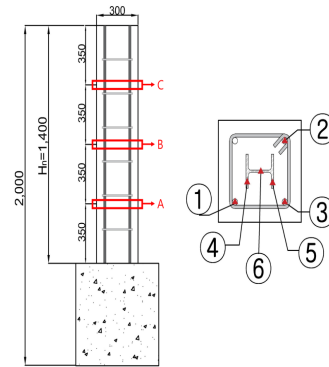
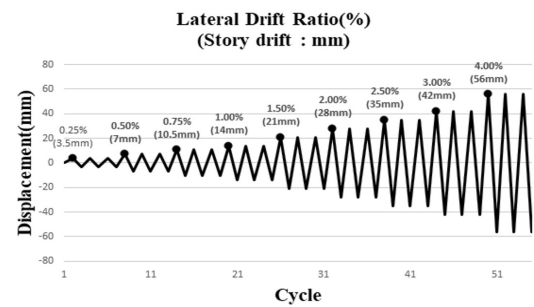
**Fig. 2.** Reinforcement detail of typical specimen

여 셋팅하였다. 일반매입형합성기둥의 실험체인 OSRC (Ordinary Steel Reinforced Composite Columns)를 3개를 제작하여 실험을 수행하였다.

콘크리트의 강도분석에는 공시체는 90일 수중양생 후 24.18 MPa, 24.81 MPa와 23.54 MPa를 각각 나타냈고, 평균값인 24.18 MPa의 강도를 분석에 사용하였다. 강재 및 철근의 기계적 성질은 Table 1에 표기하였다. 실험체의 단면상세는 또한 Fig. 2에 표시하였다.

2.2 실험방법

실험은 내화실험과 지진성능실험 등 두 단계로 나누어 실험을 수행하였다, 1차 화재실험에서는 화재실험을 ISO-834의 화재곡선에 따라 화재실험을 수행하였다. 내화실험에서는 ISO834-1의 화재곡선에 따라 실험체에 30분 60분으로 나누어서 내화실험을 수행하였다. 화재실험 후 ACI 374.2R-13를 따라 지진성능 실험을 실시하여 화재 후 매입형합성기둥의 성능을 확인하였으며, 보통모멘트골조에 사용될 수 있는 매입형합성기둥(OSRC)의 화재실험은 가열하지 않은 실험체는

**Fig. 3.** Installation of thermometer for OSRC specimen and setting with variation of exposed times**Fig. 4.** Loading cycle history

OSRC-0, 30분 가열한 실험체는 OSRC-30, 60분 가열한 실험체는 OSRC-60으로 구분하였다.

모든 실험체의 결과값은 상온 실험체와 비교하였다. OSRC실험체에 대한 화재노출시간동안의 열전달 온도 특성을 파악하기 위해서 Fig. 3와 같이 A, B 및 C의 위치 6개의 열전대를 설치하였다. H형강의 경우 플랜지에 2개와 웹에 1개를 설치하여 상승 온도의 전달온도를 측정하고자 하였다.

모든 실험체의 결과값은 상온 실험체와 비교하였다. OSRC실험체에 대한 화재노출시간동안의 열전달 온도 특성을 파악하기 위해서 Fig. 3와 같이 A, B 및 C의 위치 6개의 열전대를 설치하였다. H형강의 경우 플랜지에 2개와 웹에 1개를 설치하여 상승 온도의 전달온도를 측정하고자 하였다.

화재실험이 종료된후 실험체를 이동하여 10,000 kN UTM을 사용하여 반복가력을 사용한 지진실험을 수행하였다. 실험체는 횡력에 대한 저항성능을 파악하기 위해서 실험체를 Fig. 4에서 나타난 것처럼 반력벽에 설치하여 합성기둥의 단부에 수직력을(Fig. 4) 가하여 최

Table 2. Specimen type and detail with fire load and seismic load

Specimen	Specimen details						Fire load		Seismic load	
	Dimension (mm)	Total length (mm)	Longitudinal bars	H-beam	Hoop	f_c (MPa)	Fire load	Heat time	Load	h
OSRC-0t	300×300	1400 (1250*)	4-D19 ($\rho_s=0.013$)	H-100×100×6×8 ($\omega=0.024$)	D10@200 ($\rho_{vh}=0.17$)	24	ISO 834-1	0	Cyclic loading (ACI374.2R)	0.2
OSRC-30t								30		
OSRC-60t								60		

Note. ρ_{vh} = volumetric transverse reinforcing bar ratio; ρ_s = longitudinal reinforcing bar ratio; ω = H-beam ratio; h = applied axial load level

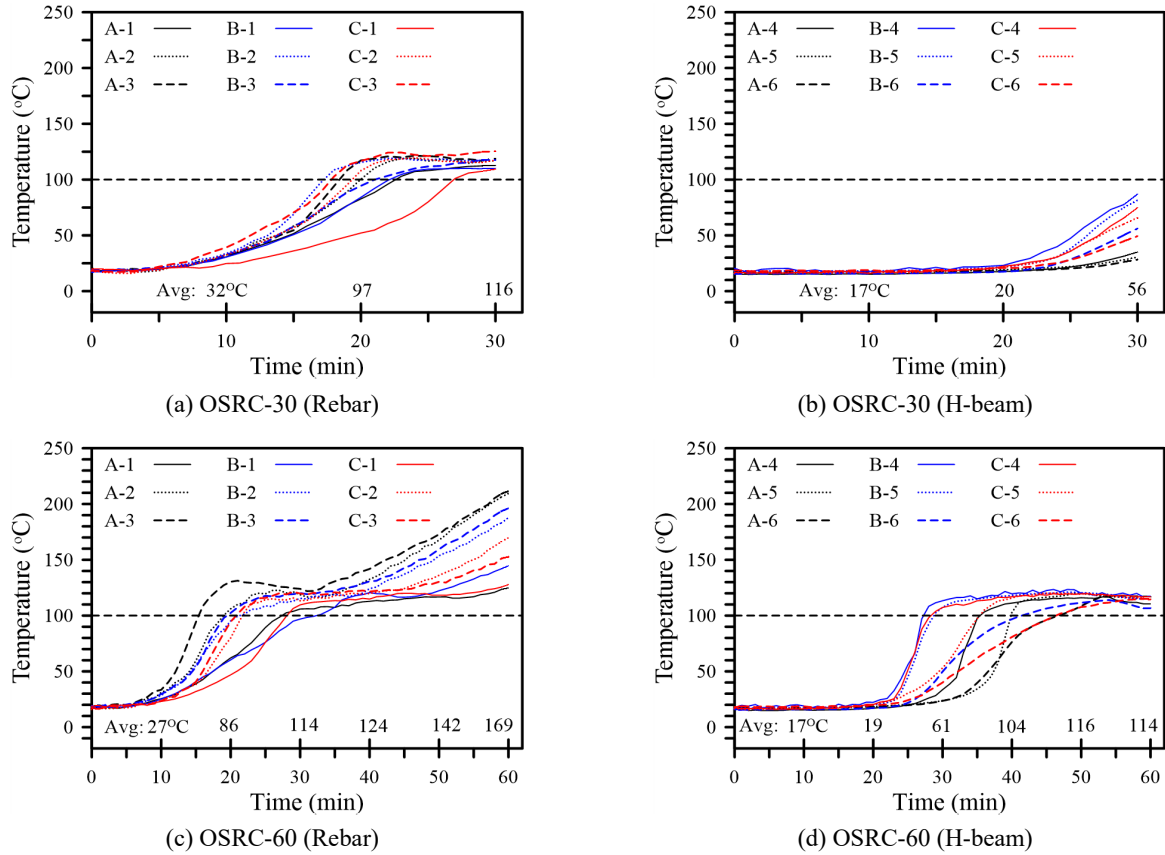


Fig. 5. Temperature variation curves at 30t and 60t

대모멘트와 누적에너지량을 측정하였다. 다만, 압축력은 실험 여건상 가력하지 않았다.

3. 화재실험 결과 및 분석

3.1 화재에 의한 손상 모드

철근과 H-형강의 온도분포는 Table 2에 수록한 값과 같다. OSRC-30t의 경우, A지점에서의 철근의 온도는 30분 가열후, 113°C에서 121°C의 분포를 나타냈다. B

위치(실험체의 중앙부)에서는 110°C에서 118°C의 분포를 나타냈다. C지점에서 온도분포는 109°C에서 125°C에 이르는 것으로 나타났다.

이때 H-형강은 28°C–75°C의 낮은 온도분포를 나타냈다(Fig. 5(b)). 화재시간 60분이 경과하면, OSRC-60 실험체에서 철근은 125°C–196°C에 분포하지만, H형강의 경우 약 115°C에서 123°C의 온도 분포도를 나타냈다(Fig. 5(d)). 두 실험체를 살펴볼 때 화재 후 30분이 경과하면, 주요 축하중을 받고 있는 H-형강은 온도가 낮은 상태임을 확인할 수 있었으며 수분증발이 발생하기

시작하는 온도가 됨을 확인하였다(Table 3). OSRC-60t 실험체의 경우, A지점에서의 철근의 온도는 125°C에서 212°C의 분포를 나타냈다. 중앙부인 B위치에서는 145°C에서 196°C로 나타났다. C지점에서는 128°C에서 153°C를 나타냈다. 또한 H형강의 온도는 114°C에서 최고 123의 분포를 나타냈다.

3.2 화재에 의한 시간-온도 이력분포 측정

OSRC-30t와 OSRC-60t의 경우를 보면, 60t에서 온도가 더 상승하는 결과는 나타냈고 이는 실험체의 열전대 온도를 통해 확인할 수 있었다. 이는 H-형강에 대해서도 패턴을 나타낸 것으로 확인되었다. 이는 짧은 온도점 이상이 된다는 것을 의미하고 있다. Fig. 5(c)와 Fig. 5(d)의 경우 30분 이후 100°C 근처에서 완만한 온도분포추이를 나타냈다(Fig. 6(a)). 시간이 더 경과하게 되면 Fig. 6(b)의 경우에서 나타난 것과 같이 균열은 단부에서 다른 끝쪽의 단부로 연결되는 증가패턴을 나타냈다. 이는 온도의 증가와 더불어 미세균열이 증가하고 있음을 나타내 준 것이다. 30분 및 60분에 의한 매입형합성기둥의 화재실험결과 균열의 길이는 늘어났으나, 심각한 구조 균열을 나타내는 영향은 보이지 않았다.

OSRC-0의 실험체는 변위비가 2.5 %에 도달할 때 수평미세균열이 나타나기 시작했다. 0.5 % 변위비에서

실험체의 균열길이는 약 500 mm 정도 나타났다.

OSRC-30실험체는 변위비가 2.5 %~3.0 %에 이를 때 400 mm 길이의 균열이 나타났다.

OSRC-60 실험체의 경우, 0.25 % 변위비에서 120 mm의 균열길이가 나타났으며, 3.5 % 변위비에서 420 mm의 균열이 나타났다. 균열의 분포는 화재가 가해지는 단부에서 내부면 쪽으로 이동하고 있음을 알 수 있었다.

3.3 지진에 의한 하중 변위-관계

화재에 0분, 30분, 60분간 노출된 매입형합성기둥의 실험체가 어느 정도 건전성을 나타내는지 그 잔존강도 여부를 파악하기 위해서 지진하중 실험을 이어서 수행하였다. 계산적인 실험체의 공칭휨모멘트(M_{n-cul})는 142 kN-m로 산정하였다(Table 3(칸 2)).

Fig. 7은 OSRC-0, OSRC-30, OSRC-60에 대한 것으로서 최대 Drift 4 %에서의 균열양상을 나타내고 있다. OSRC-60의 실험체는 하단부에서 보다 깊은 파괴균열 형상을 나타내고 있다. 비록 계산된 공칭모멘트보다는 약간 높은 거동을 보이기는 하였으나, 항복모멘트 도달 이후 많은 균열이 단부에서 나타났다. 실험을 통해서 예측된 실험 최대휨모멘트(M_{peak})는 Table 3(칸 4)에 정리하였다.

OSRC-0실험체의 경우, 최대정모멘트가 1.8 % 변위



(a) OSRC-30



(b) OSRC-60

Fig. 6. Crack Shapes for OSRC-30t (OSRC-60t after fire)



(a) OSRC-0



(b) OSRC-30



(c) OSRC-60

Fig. 7. Crack patterns for specimens at 4% drift

Table 3. Temperature measurement for rebar and H-beam at elevated temperatures

Specimen	Measuring point (°C)																	
	Rebar									H-beam								
	A-1	A-2	A-3	B-1	B-2	B-3	C-1	C-2	C-3	A-4	A-5	A-6	B-4	B-5	B-6	C-4	C-5	C-6
OSRC-30t	113	119	121	110	119	118	109	120	125	35	30	28	87	81	56	75	66	49
OSRC-60t	125	210	212	145	188	196	128	170	153	117	120	118	123	121	114	120	120	115

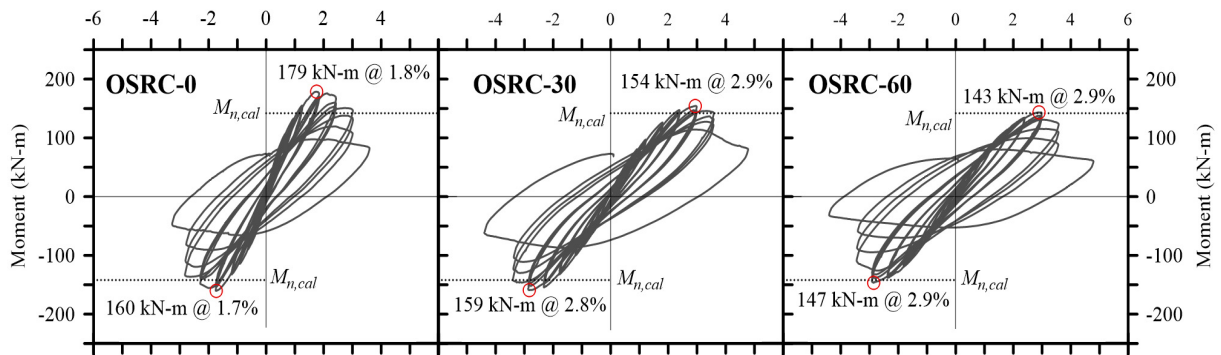


Fig. 8. Moment vs. Drift curves for OSRC-0, OSRC-30 and OSRC-60

Table 4. The maximum moment, drift and stiffness for three specimens

Specimen	Dir. (1)	$M_{n,cal}$ (kN-m) (2)	M_y (kN-m) (3)	M_{peak} (kN-m) (4)	$M_{peak}/M_{n,cal}$ (5)	Δ_y (%) (6)	Δ_{peak} (%) (7)	$\Delta_{0.8}$ (%) (8)	Ductile ratio, (m) (9)	K_y (kN-m) (10)	K_p (kN-m) (11)	E_{acc} (kN-m) (12)	ξ_D (%) (13)
OSRC-0t	+	142	140.4	178.6	1.26	1.3	1.8	3.1	2.4	9.7	6.1	8800	16.7
	-	142	127.6	160.4	1.13	1.3	1.8	2.9	2.2	8.5	5.8		
	Avg.	142	134	170	1.20	1.3	1.8	3.0	2.3	9.1	6.0		
OSRC-30t	+	142	122.7	154.3	1.09	2.1	3.0	4.0	1.9	5.3	3.3	8166	9.7
	-	142	126.2	159.2	1.12	2.1	2.9	3.6	1.8	5.6	3.5		
	Avg.	142	124.5	156.8	1.10	2.1	3.0	3.8	1.9	5.5	3.4		
OSRC-60t	+	142	113.5	143.4	1.01	2.2	3.0	3.8	1.7	4.7	3.0	8848	11
	-	142	114.4	146.7	1.03	2.1	2.9	3.4	1.6	4.9	3.1		
	Avg.	142	114	145.1	1.02	2.2	3.0	3.6	1.7	4.8	3.1		

Note. $M_{n,cal}$ is the calculated peak moment and input shear force based on measured material properties; M_{peak} is the measured peak moment; M_y , K_y and Δ_y are the yield moment, stiffness and drift at yielding point estimated based on ACI 374.2R-13 (2013), respectively; Δ_{peak} and K_p are the drift ratio at peak moment; $\Delta_{0.8}$ is the post-peak drift ratio corresponding to $0.8M_{peak}$; m is the ductile ratio ($=\Delta_y$ divided by $\Delta_{0.8}$); E_{acc} is the accumulated energy up to drift ratio of 3%; ξ_D is the equivalent damping ratio at drift ratio of 3%.

*Ductility was determined using the displacement at the last loading step, as it remained above 80% of peak load in the descending branch.

비에서 179 kN-m, 최대부모멘트는 1.7 % 변위비에서 160 kN-m로 나타났다. OSRC-30 실험체는 2.0 % 변위비에서 154 kN-m을 나타냈고, 부최대모멘트는 159 kN-m으로 나타났다. 또한 OSRC-60에서는 최대정모멘트는 143 kN-m, 최대부모멘트는 147 kN-m으로 각각 나타났다. 상온실험체인 OSRC-0 상온실험체는 반복하중가력후 최대휨모멘트는 공칭휨모멘트 대비 약 1.2배의 값을 나타냈다. OSRC-30실험체의 경우 최대휨모멘트는 공칭휨모멘트대비 1.2배 증가하는 것으로 나타났다.

OSRC-60 실험체의 경우, 실험최대휨모멘트는 공칭휨모멘트대비 1.02배까지 거동하는 것을 확인하였다. 화재 후 지진의 실험에서 화재온도가 0도에서 60도로 증가한 후의 지진거동시의 최대휨모멘트의 감소현상은 Kalavand의 연구에서도 30분 화재노출 온도마다 강도가 약 10 % 저감한 것과 유사한 것으로 확인하였다^[19].

최대모멘트 및 변위비의 관찰은 Fig. 8과 같고, OSRC-0, OSRC-30 및 OSRC-60 실험체의 최대 변위비(Δ_{peak})는 1.8, 3.0 및 3.0으로 각각 측정되었다(또한 Table 3(칸 7)). 최대모멘트의 80 %에서의 OSRC-0, OSRC-30 및 OSRC-60 실험체의 변위비($\Delta_{0.8}$)은 3.0, 3.8, 3.6으로 각각 측정되었다(Table 3(칸 8)). 화재실험 온도가 0에서 60분까지 증가하면 연성비(m)는 2.3에서 1.7까지 감소하였으며 상온대비 60분 화재시간 노출 후 약 26 %가 감소하는 것으로 나타났다. 실험을 통해 측정한 항복모멘트, 최대모멘트를 계산한 공칭모멘트의 비로 나타났다.

OSRC-0의 항복변위비는 1.3으로 나타났고, OSRC-30의 항복변위비는 2.1, OSRC-60의 항복변위비는 약 2.1-2.2까지 나타났다.

Fig. 9은 정모멘트와 부모멘트에서의 OSRC-0, OSRC-30, OSRC-60의 Backbone Curve로서 각 싸이클

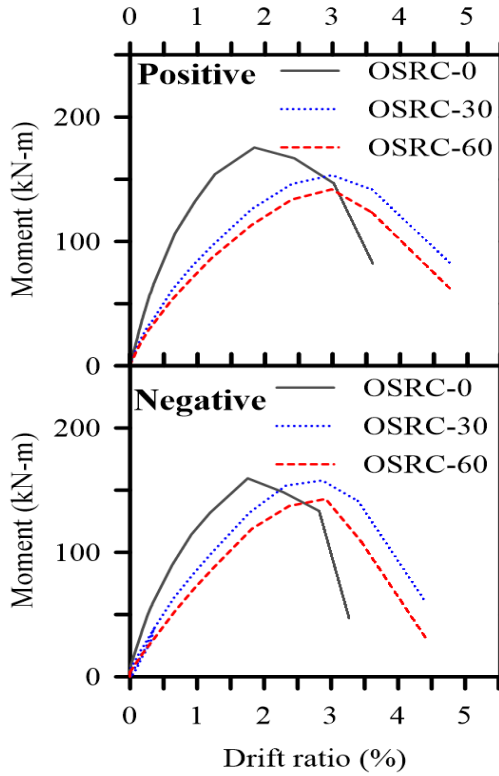


Fig. 9. Backbone curve of subjected seismic loads

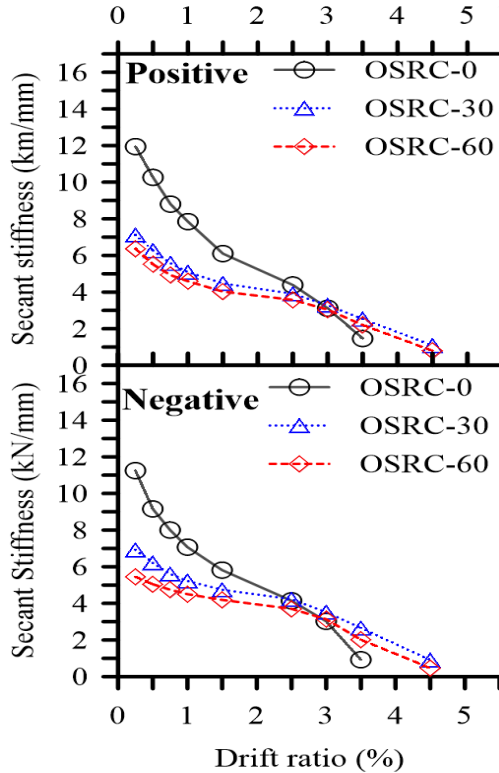


Fig. 10. Secant stiffness of specimens under cyclic loading

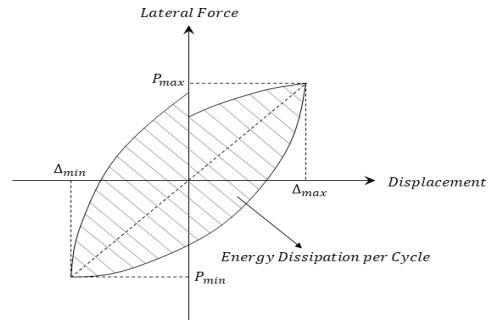


Fig. 11. Accumulated energy calculation

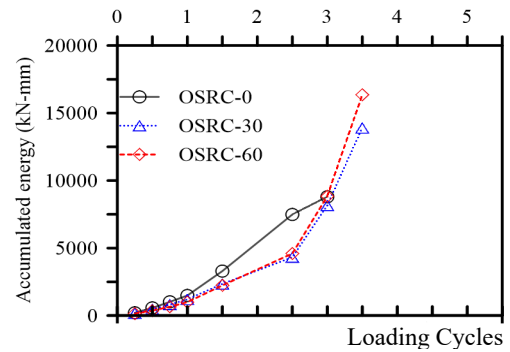


Fig. 12. Accumulated energy of under cyclic loading

에서의 최대점을 연결하여 나타낸 곡선이다. 60분의 화재노출이 일어난 실험체인 OSRC-60의 실험체가 가장 낮은 모멘트를 나타내주고 있음을 알 수 있다. OSRC-60의 정모멘트는 2.9 % 변위비에서 약 143 kN, 부모멘트는 2.9 % 변위비에서 약 147 kN으로 나타났다. Fig. 10에 시컨트강성값을 변위비별로 산출하여 표식하였다. 시컨트강성^[11]은 하중-변위곡선을 사용하여 초기접선과 $0.75P_y$ 점을 연결하여 시컨트강성을 계산하였다. Fig. 10에 나타난 것과 같이 시컨트강성은 초기 변위 값에서부터 OSRC-0에 비해서 OSRC 30 및 OSRC-60의 실험체가 낮게 나타남을 알 수 있었다. 시컨트강성은 화재시간이 30분이 경과하면 약 36.29 %가 감소하고 60분이 경과하게되면 약 46.37 %가 감소하는 것으로 나타났다. 변위비 2.5 % 범위에서 시컨트강성은 급격히 낮아지는 경향을 나타냈는데, 이는 콘크리트의 탄성계수와 인장강도가 화재의 노출에 민감하게 반응하였기 때문이다^[20].

Fig. 11은 누적에너지량을 산출하는 방법을 설명하고 있다. Fig. 12는 3개의 실험체에 대한 총누적에너지량($kN \cdot m$)량을 나타내주고 있다. 누적에너지량은 약간의 차이는 있었으나, 하중 싸이클이 증가함에 따라서

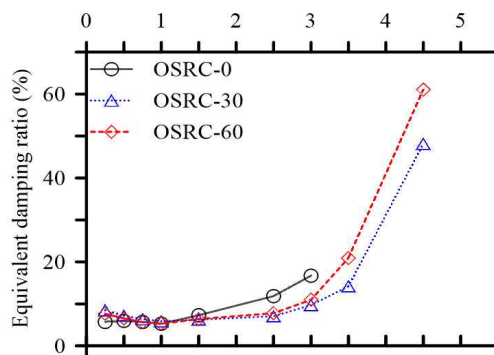


Fig. 13. Equivalent damping ratio vs. Loading cycles for 3-specimen

누적에너지량지량($kN \cdot m$)량을 나타내주고 있다.

누적에너지량은 약간의 차이는 있었으나, 하중 사이클이 증가함에 따라서 누적에너지량이 함께 증가함을 알 수 있었다. 약 2.5사이클이 경과한 지점에서 OSRC-30과 OSRC-60의 실험체는 에너지량의 저하가 나타났다. OSRC-30과 OSRC-60의 실험체의 에너지량은 하중 사이클의 증가와 함께 유사한 양으로 증가하는 경향을 나타냈다(Fig. 12). 각 실험체의 등가감쇠비의 검토는 1 Cycle의 횡하중-횡변위 반복하중이력거동에서 얻은 에너지소산값으로부터 산정하였다. 각 사이클에서의 정 및 부 가력의 최대 횡변위, 누적에너지에 의한 소산 면적 및 최대변위에서의 내력을 사용하여 등가댐핑에너지의 변화를 살펴본 것이다. 이는 FEMA의 제시식을 사용하였다^[21].

OSRC-0, OSRC-30, OSRC-60 실험체는 7스텝에 이르러서 등가댐핑비는 10 %를 초과하여 수직으로 상승하는 값을 나타냈다(Fig. 13). 이는 화재후에도 지속적으로 변위를 일으키며 하중사이클 증가와 더불어 유효강성이 감소하기 때문에 에너지소산이 증가하였다. 반대로 생각하면, OSRC-60 실험체에서 등가감쇠비가 60 %까지 높게 나타났지만, 반면에 실험체의 강성이 많이 저하되고 있다는 것을 동시에 관찰해야할 내용인 것으로 판단된다.

4. 결 론

보통모멘트골조에서 사용이 가능한 일반매입형합성구조에 대한 화재실험을 실시한 후 내진거동을 파악하

기 위해서 반복가력실험을 수행하였다. 화재실험과 반복가력실험을 통해서 다음과 같은 결론에 도달하였다.

OSRC-30 실험체의 경우, 철근의 온도는 30분 가열 후, 110°C에서 125°C의 분포를 나타냈다. 이때 H-형강은 28°C~75°C의 낮은 온도분포를 나타냈다. 60분이 경과하면, OSRC-60 실험체에서 철근은 125°C~196°C에 분포하지만, H형강의 경우 약 115°C에서 123°C의 온도 분포도를 나타냈다. OSRC-60 실험체의 온도가 OSRC30 실험체보다 낮은 온도분포를 나타냈으며, 화재노출 30분이 경과하면, 온도가 100°C를 초과하여 수분증발이 발생하기 시작하는 온도가 됨을 실험을 통해서 확인하였다.

최대휨모멘트는 다음과 같은 결론에 도달할 수 있다. OSRC-0의 경우최대정모멘트가 변위비 1.8 %에서 179 kN-m, 최대부모멘트는 변위비 1.7 %에서 160 kN-m로 나타났다. OSRC-30 실험체는 변위비 2.0 %에서 154 kN-m을 나타냈고, 최대부모멘트는 159 kN-m으로 나타났다. 또한 OSRC-60에서는 최대정모멘트는 143 kN-m, 최대부모멘트는 147 kN-m으로 각각 나타났다. 이는 화재 온도가 0~60분으로 증가할수록 상온대비 30분 및 60분 실험체의 경우 모멘트비는 1.2배~1.02배로 범위에 있는 것으로 나타나며 휨모멘트비는 감소하는 것을 확인하였다. 이는 Kamalvand의 연구에서 나타난 것과 온도의 증가가 모멘트의 저감을 보여주는 유사한 패턴을 나타냈다.

변위비는 OSRC-0, OSRC-30 및 OSRC-60 실험체의 최대 변위비(Δ_{peak})는 1.8, 3.0 및 3.0으로 나타났다. 최대모멘트의 80 %에서 OSRC-0, OSRC-30 및 OSRC-60 실험체의 변위비($\Delta_{0.8}$)은 3.0, 3.8, 3.6으로 각각 측정되었다. 화재실험온도가 0에서 60분까지 증가하면 연성비(m)는 2.3에서 1.7까지 감소하였으며 상온대비 60분 화재시간 노출후 약 26%가 감소하는 결과를 확인할 수 있었다.

시퀀트강성은 화재시간이 30분이 경과하면 약 36.29 %가 감소하고 60분이 경과하게되면 약 46.37 %가 감소하는 것으로 나타났다. Drift 2.5 % 범위에서 시퀀트강성은 급격히 낮아지는 경향을 나타냈다. 이는 Ni와 Birely의 연구에서 나타났듯이, 콘크리트의 탄성계수와 인장강도가 화재의 노출에 민감하게 반응하였기 때문으로 해석된다. 또한 등가댐핑비는 하중사이클이 2.5-

3.0 %의 시점부터 누적에너지에 의한 등가댐핑비가 증가하는 것으로 나타났다. OSRC-60 실험체의 경우 등가댐핑비는 약 60 %에 이르는 것으로 나타났다. 이는 화재노출 시간이 증가함에 따라서 유효강성이 감소하므로 댐핑비가 증가하는 것으로 해석된다. 다만, 등가댐핑비가 증가한것은 누적에너지의 증가한 면도 있지만, 강성의 저하가 상당히 발생하였기 때문에 댐핑비의 증가와 강성비의 저하를 동시에 관찰하며 구조물의 손상정도를 파악할 필요가 있다고 판단된다.

상기의 실험체는 온도변수에 대한 3개의 실험체만을 대상으로 하여 수록하였기 때문에 일반화에는 한계가 있는 것은 연구의 한계이다. 변수당 3개정도의 실험체를 비교연구하여 일반화 하는 작업이 향후 필요할 것으로 판단된다. 본 연구를 통해서 화재후 지진을 고려하는 경우, 화재후 잔존강도의 평가에 도움을 줄 수 있는 자료가 될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 경기대학교 연구년 수혜로 연구되었음(2022-023-001).

참고문헌(References)

- [1] American Society of Civil Engineers (2018) *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 138. Structural Fire Engineering*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- [2] Ye, J., and Chen, W. (2013) Elevated Temperature Material Degradation of Cold-Formed Steels under Steady- and Transient-State Conditions, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.25, No.8, pp.947-957.
- [3] Badaruddin, M., Wardono, H., Supriadi, H., and Salimor, M. (2020) Experimental Investigation of Mechanical Properties of Cold-Drawn AISI 1018 Steel at High-Temperature Steady-State Conditions, *Journal of Materials Research and Technology*, Elsevier, Vol.9, No.2, pp.1893-1904.
- [4] Shakil, S., Lu, W., and Puttonen, J. (2020) Experimental Studies on Mechanical Properties of S700 MC Steel at Elevated Temperatures, *Fire Safety Journal*, Elsevier, Vol.116, 103157.
- [5] Lee, S.-H., and Choi, B.-J. (2021) Mechanical Properties of ASTM A572 Grades 50 and 60 Steels at High Temperatures, *Applied Sciences*, MDPI, Vol.11, No.24, 11883.
- [6] Lee, J., Engelhardt, M.D., and Choi, B.J. (2015) Constitutive Model for ASTM A992 Steel at Elevated Temperature, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.15, No.3, pp.733-741.
- [7] Choi, I.-R., Chung, K.-S., and Kim, D.-H. (2014) Thermal and Mechanical Properties of High-Strength Structural Steel HSA800 at Elevated Temperatures, *Materials and Design*, Elsevier, Vol.63, pp.544-551.
- [8] Yoon, J., and Choi B.J. (2021) Evaluation of Fire Resistance Performance and Temperature Distribution by Depth of Reinforced Concrete Slab Subjected to Fire, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Kosham, Vol. 21, No.1, pp.179-187 (in Korean).
- [9] Li, X., Xu, Z., Yi, B., and Cong, Z. (2019) Post-Fire Seismic Behavior of Two-Bay Two-Story Frames with High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composite Joints, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.183, pp.150-159.
- [10] Wang, G.-Y., Zhang, C., Xu, J., and Zhang, D.-M. (2020) Post-Fire Seismic Performance of SRC Beam to SRC Column Frames, *Structures*, Elsevier, Vol.25, pp.323-324.
- [11] Wang, Y., Xu, T., Liu, Z., Li, G., and Jiang, J. (2021) Seismic Behavior of Steel Reinforced Concrete Cross-Shaped Columns after Exposure to High Temperatures, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.230, 111723.
- [12] Shah, A.H., Sharma, U.K., and Bhargava, P. (2017) Outcomes of a Major Research on Full Scale Testing of RC Frames in Post Earthquake Fire, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.155, pp.1224-1241.
- [13] Hutchinson, T.C., Wang X., Hegemier, G, Meacham, B., and Kamath, P. (2018) Physical Damage Evolution during Earthquake and Post-Earthquake Fire Testing of a Mid-Rise Cold-Formed Steel Framed Building, *Proceedings of Eleventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering, Integrating Science, Engineering & Policy*, Los Angeles, California.
- [14] Li, L.-Z., Liu, X., Yu, J.-T., Lu, Z.-D., Su, M.-N., Liao, J.-H., and Xia, M. (2019) Experimental Study on Seismic Performance of Post-Fire Reinforced Concrete

- Frames, *Engineering Structure*, Elsevier, Vol.179, pp.161-173.
- [15] Tao, Z., Ghannam, M., Song, T.-Y., and Han, L.-H. (2016) Experimental and Numerical Investigation of Concrete-Filled Stainless Steel Columns Exposed to Fire, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.118, pp.120-134.
- [16] Jung, G., Seo, H., Jin, J.H., Kim, D., and Lee, K. (2025), Experimental Evaluation on Seismic Performance of Side-Diaphragm Connection between CFT Column and U-Shaped Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.6, pp.427-436 (in Korean).
- [17] Park, Y.S., Kim, J., Kim, S.-H., and Park, H.-Y. (2025) Study on the Structural Performance of Rectangular Hollow Section Column-H Beam Connection Detail with Rigid Panel Zone Element, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.1, pp.11-23 (in Korean).
- [18] Eom, T., Lim, J.J., Moon, S.H., Kim, M.J., Youn, S.H., and Chung, J.C. (2024) Seismic Performance of Bracket Moment Connection for Framing PC Composite Beams and PSRC Composite Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.5, pp.275-288 (in Korean).
- [19] Kamalvand, M., Massumi, A., and Homami P. (2023) Prediction of Post-Fire Seismic Performance of Reinforced Concrete Frames, *Structures*, Elsevier, Vol.56, 104874. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104874>
- [20] Ni, S., and Birely, A. C. (2018) Post-Fire Seismic Behavior of Reinforced Concrete Structural Walls, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.168, pp.163-178.
- [21] FEMA 356. (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington, D.C.

요약: 온도조건이 다른 상태에서 매입형합성기둥의 화재후 지진 거동을 연구하기 위해서, 3개의 실험실험체를 제작하였다. 화재 챔버에서 화재실험을 부재에 대해서 실시하였고, 저사이클을 갖는 반복하중실험을 정적으로 실시하였다. 구조물의 화재전이는 설치된 열전대온도측정장치를 통해서 측정하였다. 반복하중실험의 수행을 하는 동안, 하중-변위관계, 변위비, 시퀀트강성, 등가댕핑비, 누적 에너지소산량을 측정하고 비교 검토하였다. 실험값은 화재에의 노출과 하중사이클의 증가와 더불어 최대휨모멘트, 변위비, 연성비, 시퀀트강성 측면에서 관찰하였다. 실험체의 경우온도의 분포는 화재노출시간의 증가와 더불어 증가하는 경향을 나타냈다. 최대휨모멘트는 하중사이클의 증가와 화재노출시간의 증가와 함께 감소하는 패턴을 보였다.

핵심용어: ISO-831, 반복지진하중, 매입형합성기둥, 등가댕핑비, 변위비
