



하중비에 따른 화재시 매입형 합성기둥의 내화성능에 관한 실험적 연구

김예솜¹ · 최병정^{2*}

¹석사과정, 경기대학교, 일반대학원 건축공학과, ²교수, 경기대학교, 건축공학과

Experimental Study on the Fire Resistance of Steel-Reinforced Concrete Column in Fire According to Load Ratio

Kim, Ye Som¹, Choi, Byong-Jeong^{2*}

¹MSc. Student, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University Graduate School, Suwon, 16227, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea

Abstract - The paper covers heating test results under vertical loadings with load ratios of SRC column specimens to find out the effect of load ratio against the fire resistance performance. The nominal compressive strength of composite columns at the elevated temperatures was calculated by both Eurocode 4 and AISC 360-16 to compare experiment to analytical values. In addition, by analyzing the previous experimental studies, the suspended fire duration with the variation of the load ratio was expressed in the form of regression curve for three types of cross-sectional dimensions of composite columns (RC column, CFT column, SRC column). Conclusively, it was confirmed that the fire time of 400 mm × 400 mm specimen was longer than those of both 200 mm × 200 mm and 300 mm × 300 mm specimens at the same load ratio. Also, the reduction rate of fire duration for the 400 mm × 400 mm specimen was larger than those of both 200 mm × 200 mm and 300 mm × 300 mm specimens. Comparing the standards(Eurocode 4, AISC 360-16) with the experimental values, the calculation of fire suspending duration using the standards(Eurocode, AISC) reached very similar to the experimental value at 0.4 - 0.6 load ratios. But at load ratio of 0.7, the calculation of standards(Eurocode, AISC) estimated the higher fire duration than the one of experimental value.

Keywords - Load ratio, Fire rating, SRC column, Fire regression curve, Loading heating experiment, Elevated temperature

1. 서론

매년 건축물의 화재가 빈번하게 발생하여 경제적 손실뿐만 아니라 인명피해까지 발생하고 있다^[1]. 화재와 같은 고온에 장시간 노출되면, 재료의 강성 및 강도가 감소하게 되어 구조물 전체 붕괴로 이어지는 원인이 될 수 있다^[2]. 특히, 초고층·특수 구조물은 화재 시 붕괴가 발생할 경우 경제적·인적 피해를 넘어서 국가적으로도 심각한 피해를 입게 된다. 이러한 화재피해는 건축물의 보 또는 슬래브의 휨균열에 영

향을 주고, 기둥과 같은 압축재에는 전반적인 건축물의 붕괴로 이어지는 심각한 영향을 주게 된다. 기둥은 구조물에서 하중전달과 축력을 담당하는 부재로서, 축력비가 증가할수록 변형 능력이 낮아지고, 취성적인 거동을 보이는 특징이 있다^[3]. Eurocode의 경우 축력비(load ratio)를 화재시 소요강도(required strength) 대비 부재의 설계강도(design strength)의 비로 나타낸다. 축력비는 하중비라는 명칭으로도 사용되며, 재하하중이 증가하게 되면 하중비가 증가하게 되어 변형 능력이 감소하게 된다. 반대로 재하하중이 설계강도 대비 낮으면 하중비가 감소하게 되고, 변형 능력이 상대적으로 증가하게 된다. 따라서 화재시간에 따른 하중비를 산정하는 것은 내화설계 시 매우 중요하다. 또한 화재 시 기둥부재에서 하중비는 내화성능을 감소시키는 요인 중 하나이므로 내화설계 시 하중비에 따른 고려가 필요하다^{[3],[4]}. 국내의 경우 사양적 내화설계(prescriptive rules)로 화재 시 건물별, 부재별 내화시간에 대한 내용만 규정되어 있어, 화재시간별 구조부재

Note.-Discussion open until June 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 06, 2019; revised November 26, 2019; approved on November 28, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. bjchoi@kyonggi.ac.kr

의 손상정도를 파악할 수 있는 명확한 기준이 없다. 반면 국외기준(Eurocode)은 성능기반내화설계(performance based for fire resistance design)로 건물의 특성 및 화재상황을 고려할 수 있다는 특징이 있다. 또한 부재의 하중비에 따른 내화성능을 평가할 수 있는 기준이 정립되어 있다.

합성기둥은 구조성능과 내화성능 뛰어나 많은 현장에서 많이 사용된다. 합성기둥에는 철근콘크리트 기둥(reinforced concrete, 이하 RC기둥), 콘크리트 충전 강관기둥(concrete-filled tube, 이하 CFT기둥), 매입형 합성기둥(steel-reinforced concrete columns, 이하 SRC기둥) 등이 있으며, 내화성능에 관한 실험과 연구가 꾸준히 이루어지고 있다^{[4],[23]}. SRC기둥은 강재와 철근이 콘크리트에 완전히 매입되어있는 형태로 특수건물이나 고층건물에 주로 사용된다^{[24],[25]}. 그러나 CFT기둥에 비해 화재시 SRC 기둥은 하중비에 따른 내화성능에 관한 국내·외 연구가 부족한 실정이다. SRC기둥에 관한 선행된 연구^{[6]-[10]}에서는 단면크기, 높이, 편심비, 하중비 등의 변수에 따른 연구가 이루어졌는데, 공통적으로 하중비가 높아질수록 해석값과 이론값이 실제 실험값과 차이가 난다는 것을 알 수 있었다. 하중비에 따른 내화성능은 기둥 단면크기, 높이 등 설계조건에 따라 달라지기 때문에 다양한 변수를 기반으로 수많은 실험과 연구, 해석을 통해 데이터를 축적해야 한다^[4]. 따라서, 본 연구에서는 4단계로 나누어 연구를 수행하였다. (1) 선행연구 분석을 통해 합성기둥의 하중비에 따른 내화시간을 파악하고, (2) 하중비에 따른 SRC 기둥의 재하가열실험을 실시해 내화성능 및 거동특성을 확인하였다. 또한 (3) 도출된 내화시간을 기준으로 Eurocode와 AISC 계산식에 따른 화재시 공칭압축강도를 산정하였다. 그리고 (4) 산정된 화재시 공칭압축강도값 및 실험값을 기준으로 Kodur 등 선행 연구자들과 비교분석하여 하중비가 내화시간에 미치는 영향을 파악하였다. 따라서, 본 연구를 통해 도출된 실험데이터와 이론값을 성능기반내화설계의 데이터베이스로 활용할 수 있을 것으로 보인다.

2. 국내·외 연구동향

하중비 및 내화성능을 결정짓는 매개변수(parametric factor)에 대한 합성기둥의 국내·외 연구동향을 파악하고, 합성기둥(RC기둥, CFT기둥, SRC기둥)의 하중비에 따른 내화시간을 그래프로 나타내었다. 부재의 상온에서의 공칭압축강도 대비 재하하중을 하중비로 나타내어 내화실험을 진

행하였다. 따라서 하중비는 합성기둥의 종류 및 설계조건(단면, 세장비 등)에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. CFT 기둥은 강재가 노출되어 있어, 화재시 RC 기둥, SRC 기둥과 다른 역학적 거동을 보이지만 하중비에 따른 내화시간을 평가함에 있어 하중비가 합성기둥 종류의 특성을 포함하고 있다고 판단되어 연구동향에 포함하였다. 합성기둥 종류별 하중비에 따른 내화시간은 Fig. 1, Fig. 2, Fig. 3과 같다. Mao and Kodur는 350 mm × 250 mm 단면의 SRC기둥을 기준으로 하중비 0.7 - 0.85와 편심비 0.3 - 0.6에 따른 내화실험을 실시해 이를 Eurocode 4에 따른 내화시간과 비교 분석하였다^[10]. 그 결과 하중비 0.42에서 내화시간 64분, 하중비 0.5에서의 내화시간은 편심비 0.3에서 35분, 편심비 0.6에서 65분으로 편심비가 증가할수록 동일 하중비에서의 내화시간이 크게 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 하중비가 클수록 기

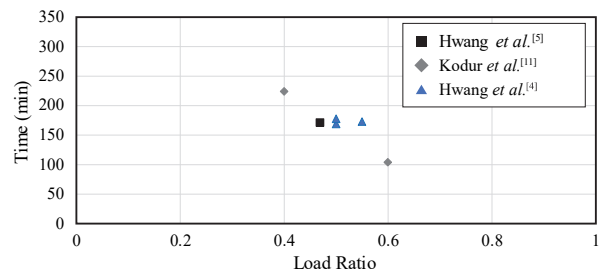


Fig. 1. Load ratio-fire resistance time relationship of RC column

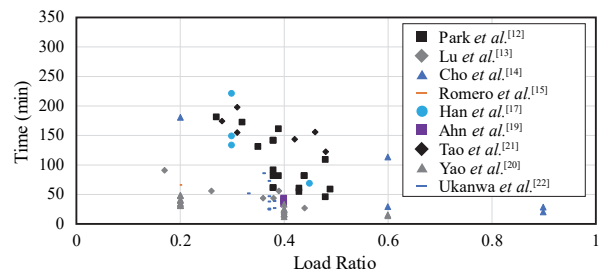


Fig. 2. Load ratio-fire resistance time relationship of CFT column

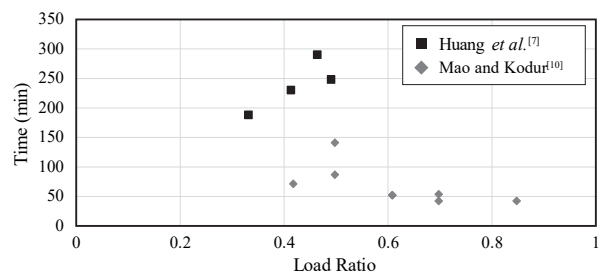


Fig. 3. Load ratio-fire resistance time relationship of SRC column

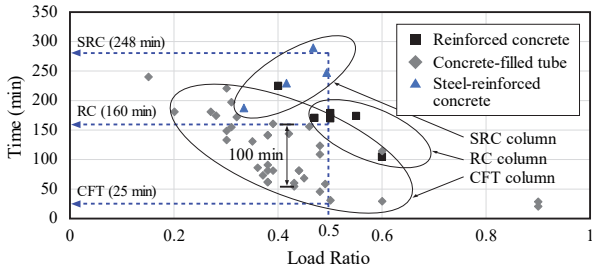


Fig. 4. Load ratio-fire resistance time relationship

준에 의해 도출된 값이 부정확함을 확인하였다. 원인으로 는 전단철근으로 인한 콘크리트 구속력 미고려와 고온으로 인한 콘크리트 팽창로 분석하였다. 각 합성기둥의 하중비에 따른 내화시간을 확인한 결과, 단면이 작아질수록, 편심비가 증가할수록, 하중비에 따른 내화시간이 크게 감소하는 양상이 나타났다. 따라서 단면 200 mm × 200 mm 이상, 원형 단면의 경우 지름 200 mm 이상, 그리고 편심을 적용하지 않는 실험체로 제한하여 Fig. 4에 정리하였다. 위 사항을 반영하여 Figs. 1-3의 각 합성기둥의 하중비에 따른 내화시간 결과를 종합하여 정리하였다. 그 결과, 각 합성기둥별로 동일 하중비에서 내화시간 비교 시 차이가 최대 100분으로 나타났고, 하중비 0.4 - 0.6에서 RC기둥과 SRC기둥이 CFT기둥에 비해 동일한 하중비에서 비교적 높은 내화시간을 가지는 것을 확인하였다. 예를 들어 Fig. 4의 하중비 0.5에서 CFT기둥의 경우 25분, RC기둥의 경우 160분, SRC기둥의 경우 248분의 내화시간을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그 원인으로 는 CFT기둥의 단면이 주로 200 mm × 200 mm, 300 mm × 300 mm인 실험체로 이루어져 있으며, RC기둥과 SRC기둥의 경우는 주로 단면이 400 mm × 400 mm로 되어 있어 동일 하중비에서 긴 내화시간을 가지는 것으로 판단된다.

이와 같이 선행연구동향 분석을 통해 하중비에 따른 내화시간을 그래프로 나타내, 합성기둥의 종류와 상관없이 하중비가 증가할수록 내화시간이 감소하며 단면치수가 증가할수록 내화시간 감소율이 달라진다는 것을 알 수 있었다. 또한 높은 하중비에서 기준(Eurocode)에 의한 내화시간이 실제 실험과 비교 시, 공통적으로 높게 도출된다는 것을 확인하였다. 그러나 Fig. 3에서 확인한 바와 같이 SRC기둥의 경우 비교실험체가 적고, Fig. 2의 CFT기둥에 비해 하중비에 따른 내화실험이 많이 이루어지지 않은 실정이다. 따라서 본 연구에서 단면이 400 mm × 400 mm인 SRC기둥의 내화실험을 실시해 하중비 및 기둥의 단면치수가 SRC기둥의 내화시간에 미치는 영향을 확인하고, 이를 기준(Eurocode, AISC)과

비교하였다. 또한 0.7, 0.6, 0.5의 하중비를 적용해 높은 하중비에 따른 SRC기둥의 내화성능 특성을 확인하고자 하였다.

3. 재하가열실험

3.1 실험체

화재시 하중비에 따른 SRC기둥의 내화성능을 알아보고자, 재하가열실험을 실시하였다. 실험체의 구속조건은 단순 지지로, 단면 가로 400 mm, 세로 400 mm 및 높이 3,000 mm인 실험체로 제작되었다. EN 1994-1-2^[26]에 따르면 합성기둥의 철골피복 두께에 따른 화재등급 및 합성기둥의 단면치수와 철근 피복두께에 따른 화재등급에 대한 사양적 기준이 제시되어 있다. EN 1994-1-2^[26]의 화재등급에 따른 합성기둥의 최소 철골피복두께는 Table 1과 같으며, 본 연구에서 수행한 SRC기둥 실험체는 철골 피복두께는 50.8 mm로 내화등급 R180을 만족하도록 계획하였다. 실험체 단면치수 및 재료물성은 Table 2와 같으며, 기준상에 명시되어 있는 공칭강도값을 나타내었다.

또한, Table 3과 같이 온도에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 알아보기 위해 압축강도 실험을 실시하고, 기준(EN 1992-1-2^[27])에 따른 강도감소계수와 비교하였다. 공시체는 28일 수중양생을 실시하고 항온항습실(20 °C, 60 %R.H.)에서 기건양생을 실시한 후 실험을 진행하였다. 실험은 사전 비재하로 수행되었으며, 비재하 상태에서 가열하여 목표온도에 도달시 역학실험을 실시하였다. 가열조건은 분당 5 °C

Table 1. Minimum concrete cover for a steel section with concrete acting as fire protection (EN 1994-1-2^[26])

	Standard fire resistance				
	R30	R60	R90	R120	R180
Concrete cover, <i>c</i> (mm)	0	25	30	40	50

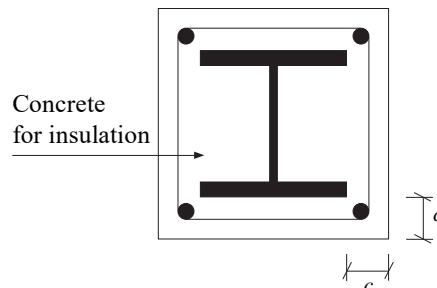


Table 2. Section and mechanical properties of column

Section of column		
Strength (MPa)		
Steel (SM490A)	Yield f_y	315
	Ultimate f_u	490
Reinforcement (SD400)	Yield f_y	400
	Ultimate f_u	560
Concrete	Compression f_c	35
Stirrup	Yield f_y	400
	Ultimate f_u	560
Stud (SS400)	Yield f_y	235
	Ultimate f_u	400

Table 3. Reduction factor of concrete at elevated temperature

Concrete temperature (°C)	Reduction factor		
	EN 1992-1-2 ^[27]	Test	Difference
20	1.00	1.00	0.00
100	1.00	0.73	0.27
200	0.95	0.76	0.19
300	0.85	0.98	-0.13
400	0.75	0.94	-0.19
500	0.60	0.71	-0.11
600	0.45	0.54	-0.09
700	0.30	0.43	-0.13
800	0.15	0.31	-0.16
900	0.08	0.17	-0.09
1,000	0.04	0.00	0.04
1,100	0.01	0.00	0.01
1,200	0.00	0.00	0.00

의 온도로 상승시켜 목표온도에 도달한 후 계속 가열하여 실험체가 목표온도로 열평형이 되도록 하였다. 열평형이 되면 하중을 가하여 압축강도 및 응력변형곡선을 측정하였고, 역학실험은 ASTM C 39(Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens)에 따라 실시하였다. 실험결과 압축강도는 100 °C에서는 25.9 MPa로 상온압축강도의 73 % 수준으로 하락하였으며, 200 °C부터 점차 회복하는 경향을 나타내어 300 °C, 400 °C에서는 34.7 MPa와 33.2 MPa로 상온강도의 90 % 이상으로 회복되는 경향을 보였다. 일반적으로 콘크리트는 복합재료로 고온에 노출되면 콘크리트 내부에 미세 균열이 증가해 강도를 저하시킨다. 그러나, 200 °C-400 °C에서는 콘크리트 구성인자의 열팽창이 오히려 콘크리트 매트릭스의 공극을 채워주기 때문에 콘크리트의 강도에 유리하게 작용하는 것으로 보인다. 그리고 500 °C에 25.1 MPa로 감소하기 시작하여 온도상승에 따라 직선적으로 압축강도가 감소하여, 900 °C에서는 상온압축강도의 17 % 수준인 6.1 MPa를 나타내었다. EN 1992-1-2^[27]에 따른 강도감소계수와 비교한 결과, 실험에서는 온도 100 °C에서 급격하게 강도가 감소되어 300 °C에 강도가 회복된 것과 달리 기준에 따른 강도감소계수는 온도가 증가함에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 300 °C 이후에는 같은 온도에서 최대 0.19의 차이를 보이며, 실험에서 기준에 비해 높은 압축강도 감소계수가 도출된 것을 알 수 있다. 강재 및 철근의 경우, EN 1994-1-2^[26]와 AISC 360-16^[29]에 따른 구조강재의 고온에서의 역학적 특성을 제시한 표에 따라 특정온도에서의 재료의 강도 및 감소를 확인하였다. 추후 콘크리트의 경우 고온에서의 압축강도 실험에 따른 값과 강재와 철근의 경우에는 EN 1994-1-2^[26]와 AISC 360-16^[29]에 따른 강도감소계수를 이용해 화재시 합성기둥의 공칭압축강도를 산정하였다.

3.2 실험방법

본 연구에서는 Table 4와 같이 KBC 2016^[31] 기준에 따른 상온에서의 공칭압축강도인 6,351 kN의 0.7, 0.6, 0.5에 해당하는 하중을 가력하여 재하가열실험을 진행하였다. 한국건설기술연구원 기둥가열로를 이용하여 실험을 수행하였으며, 실험방법은 기본적으로 ASTM E 119 - 15(Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, 2015)에 따라 실시하였다. 따라서, Fig. 5와 같이 ASTM E119 표준화재곡선을 사용하여 가열하였으며, 실제 가열

곡선(actual furnace)은 붉은 선으로 나타내었다. ASTM E 119에는 해당 등급의 가열시간동안 하중에 견디면 된다는 선언적 성능기준으로 되어 있어, KS F 2257-1^[28] 성능기준을 사용하였다. KS F 2257-1^[28] 성능기준은 Table 5와 같으며, 축변형량(total axial strain) 30 mm, 분당 축변형률(axial strain per minute)이 9 mm를 초과하면 파괴된 것으로 간주하였다. 시간에 따른 온도 및 변형량을 기록하여 합성기둥의 화재시 내화시간 및 거동을 확인하였으며, 화재시간별 합성기둥의 온도분포를 알아보기 위하여 콘크리트 표면으로부터 단면 안쪽 중앙방향(Line A)으로 20 mm, 40 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm에서의 위치와 콘크리트 모서리로부터 단면 중앙방향(Line B)으로 28.5 mm, 57 mm, 85.5 mm, 128 mm에서의 위치에 1개씩 총 9개의 열전대를 설치하였다. 열전대 설치방식에 따른 온도 차 비교를 위해 Line A와 Line B로 나누어 온도를 측정하였고, 화재시 공칭압축강도 산정시 Line B의 온도를 기준으로 산정하였다. 열전대의 위치 및 번호는 Fig. 6과 같다.

Table 4. Test plan with loading ratio

Specimen	Loading ratio	Load (kN)	EA
R-1	0.7	4,445	1
R-2	0.6	3,810	1
R-3	0.5	3,175	1

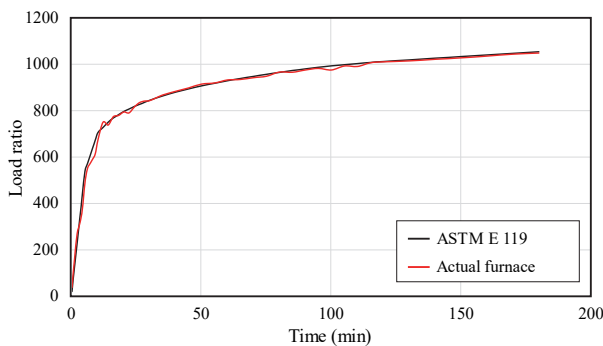


Fig. 5. Time-temperature graph

Table 5. Performance standard of column (KS F 2257-1^[28])

Performance criteria		Remarks
Load bearing capacity	· Total axial strain (mm): $h/100 (= 30 \text{ mm})$	h : height of specimen (= 3,000 mm)
	· Axial strain per minute (mm/min): $3h/100 (= 9 \text{ mm})$	

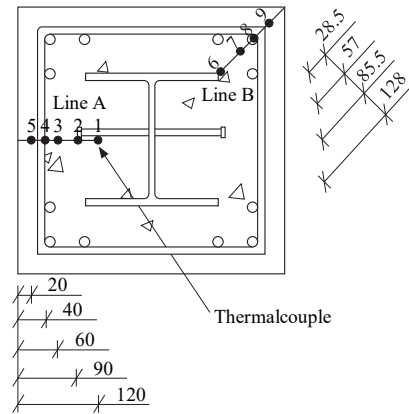


Fig. 6. Location of thermocouple (Unit: mm)

4. 실험결과

4.1 시간에 따른 변형량

시간에 따른 축방향 변위 및 내화시간을 측정하였다. Table 6에 따르면, R-1(38 min) 실험체는 공칭압축강도의 70%를 재하하여 실험을 진행하였으며, 약 40분 동안 가열하였을 때 30.9 mm의 급격한 압축변위가 발생하여 파괴되었다. R-2(110 min) 실험체는 공칭압축강도의 60%를 재하하여 실험을 진행하였으며, 내화시간이 110분으로 측정되었다. 가열 시작부터 압축 변위가 점차 증가했으며, 화재시간 110분에서 30.6 mm의 급격한 압축변위가 발생하여 파괴되었다. 또한, R-3(180 min) 실험체는 공칭압축강도의 50%를 재하하여 실험을 진행하였다. 축방향 변위는 90분 이후부터 콘크리트의 강도와 강성의 저하로 보다 큰 압축력을 받으며 인장 변위가 점차 감소하다 약 150분 이후부터 압축 변위가 발생했다. 화재시간 180분까지만 진행하였으며, 180분에서 축방향 변위 2.9 mm, 분당 축방향 변형률의 0.1으로 측정되어 성능기준으로 초과하지 않았다. 실험체가 파괴가 일어나지 않은 것으로 보아 내화시간 180분 이상으로 예상된다. 또한, 화재시간별 파괴형상은 Fig. 7과 같다. R-1(38 min) 실험체의 경우, Fig. 7(a)와 같이 전체적인 콘크리트가 탈락이 발생하였고, 압축파괴 형상을 보였다. R-2(110 min) 실험체의 경우, Fig. 7(b)와 같이 실험체 상부 콘크리트 피복 탈락으로 인해 콘크리트 상부 주철근이 모두 좌굴되어 압축파괴가 일어났다. R-3(180 min) 실험체는 Fig. 7(c)와 같이 축방향 압축변위 2.9 mm만 발생하고, 파괴가 일어나지 않았다. 파괴가 일어난 두 개의 실험체 모두 공통적으로 급격한 압축변위의 증가로 인해 파괴가 일어난 것을 알 수 있다.

Table 6. Fire resistance and displacement of column in fire

No.	Nominal strength, P_n (kN)	Loading ratio	Fire resistance (min)	Displacement (mm)	Strain (mm/min)
R-1	6,351	0.7	38	30.9	29.5
R-2		0.6	110	30.6	25.2
R-3		0.5	180	2.9	0.1



(a) R-1 (38 min) (b) R-2 (110 min) (c) R-3 (180 min)

Fig. 7. Comparison of shape after fire tests

4.2 화재시간에 따른 온도

실험결과 화재시간에 따른 콘크리트 피복두께별 온도를 Table 7에 정리하였다. Fig. 6과 같이 측정 방법에 따라 Line A, Line B로 나누어 정리하였으며, EN 1992-1-2^[27]와 ACI 216.1-07^[30]의 화재시간별 콘크리트 온도분포와 비교하여 나타내었다. EN 1992-1-2^[27]와 ACI 216.1-07^[30]의 화재시간별 콘크리트 온도분포를 비교한 결과, 동일한 콘크리트 피복두께 위치에서 온도차이가 발생하는 것을 알 수 있었다. 그 이유는 기준에 수록되어 있는 단면치수가 제한되어

있어, EN 1992-1-2^[27]의 경우 단면 300 mm × 300 mm, ACI 216.1-07^[30]의 경우 단면 305 mm × 406 mm의 온도분포를 적용하였다. 따라서 이에 따른 오차가 발생한 것으로 보인다. 또한 EN 1992-1-2^[27]와 ACI 216.1-07^[30]의 온도를 평균값($T_{Avg.}$)으로 나타내어 실험값(T_{Test})과 비교하였다. 비교 결과, R-1(38 min) 실험체의 경우 콘크리트 피복 20 mm에서 실험값(T_{Test})이 547 °C로 기준($T_{Avg.}$)과 218 °C의 큰 차이를 보였다. Fig. 7(a)와 같이 R-1(38 min)의 실험체 파괴시 콘크리트 피복이 탈락한 것을 알 수 있다. 따라서 콘크리트 탈락으로 인한 실험체 바깥쪽 열전대의 급격한 온도상승이 나타난 것으로 보인다. 콘크리트 피복 40 mm 이상에서는 피복 두께가 증가할수록 온도 차이 100 °C 이내로 기준($T_{Avg.}$)과 유사한 경향을 보였다. R-2(110 min) 실험체의 경우, Line B의 28.5 mm의 온도를 제외하고, 기준 온도 평균값($T_{Avg.}$) 대비 실험값(T_{Test})이 전체적으로 최소 9 °C에서 최대 159 °C 차이를 보였다. R-3(180 min) 실험체의 경우에는 Line A(콘크리트 피복 20 mm, 40 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm)에서 온도는 기준($T_{Avg.}$) 대비 실험값(T_{Test})이 최소 36 °C 최대 128 °C의 높은 값이 도출되었다. Line B(콘크리트 피복 28.5 mm, 57 mm, 85.5 mm, 128 mm)에서 온도는 기준($T_{Avg.}$) 대비 실험값이 최소 61 °C에서 최대 237 °C의 낮은 값이 도출되었다. 각 기준에 따른 온도는 화재시 SRC기둥의 공칭압축강도 산정 시 단면별 온도를 산정할 때 사용되었다.

4.3 하중비에 따른 내화시간

재하가열실험시 하중비에 따른 내화성능을 확인하였다.

Table 7. Temperature of inner concrete (EN 1992-1-2^[27], ACI 216.1-07^[30], Test)

(Unit: °C)

Concrete cover (mm)	R-1 (38 min)					R-2 (110 min)					R-3 (180 min)				
	T_{EC}	T_{ACI}	$T_{Avg.}$	T_{Test}	$T_{Avg.-Test}$	T_{EC}	T_{ACI}	$T_{Avg.}$	T_{Test}	$T_{Avg.-Test}$	T_{EC}	T_{ACI}	$T_{Avg.}$	T_{Test}	$T_{Avg.-Test}$
Line A															
20.0	350	309	330	547	-218	700	704	702	579	123	800	715	758	885	-128
40.0	200	193	197	115	82	500	500	500	369	131	600	570	593	710	-118
60.0	95	113	104	100	4	380	360	370	242	128	570	420	495	562	-67
90.0 (Steel)	80	83	82	63	19	250	250	250	128	122	450	310	380	459	-79
120.0	40	63	52	42	10	190	170	180	117	63	420	250	335	371	-36
Line B															
28.5	550	365	458	497	39	940	820	880	908	-28	1,000	900	950	889	61
57.0 (Rebar)	270	309	290	354	-64	710	650	680	521	159	850	730	790	553	237
85.5	120	168	144	143	1	520	480	500	363	137	680	593	637	419	218
128.0	80	103	92	103	11	300	305	303	294	9	430	460	445	322	123

여기서 하중비는 재하하중 대비 상온 시 부재의 공칭강도이다. 본 절에서는 화재시 휨좌굴 한계상태의 공칭압축강도를 산정하고, 산정된 공칭압축강도의 압축력이 재하되면 파괴한다고 가정하였다. 따라서 가열시간에 따라 하중비를 산정하였으며, 이를 실험값과 비교하였다.

4.3.1 EN 1994-1-2

Table 7과 같이 EN 1994-1-2^[26]에 따라 단면을 강재플랜지, 강재웹, 콘크리트, 철근으로 나누고, 콘크리트 위치별 온도 및 강재와 철근 위치에서의 온도를 도출하였다. 위에 도출된 온도에 따른 강도감소계수와 해당 단면적을 사용하여 식 (1)과 식 (2)와 같이 4가지 단면의 합으로 합성기둥의 압축강도와 유효휨강성을 산정하였다. γ 은 화재시 각 재료 물성에 따른 계수로 각각 1.0 값을 넣어 산정하였다. Table 8은 강도 산정시 사용하였던 콘크리트 피복두께 온도별 압축강도와 탄성계수 감소계수(k_{EC})이다. 감소계수는 온도에 따른 콘크리트 압축강도 실험결과인 Table 3에 따라 산정하였다. 화재시간 38분(R-1)의 경우, 콘크리트 피복두께가 큰 경우에도 불구하고 낮은 강도감소계수가 도출된 것을 알 수 있다. 그 이유는 Table 3과 같이 200 °C에서 400 °C 온도 사이에 콘크리트 강도가 회복되어 콘크리트 피복두께 57 mm에서의 압축강도와 탄성계수 감소계수가 피복두께 85.5 mm

보다 크게 도출된 것으로 보인다. Table 9는 강재 및 철근 온도별 압축강도 및 탄성계수 감소계수(k_{EC})이다. 화재시간 38분(R-1)의 경우, 모두 400 °C 미만이므로 강도감소가 일어나지 않았다. 그리고 화재시간이 증가함에 따라 110분(R-2), 180분(R-3)에서 온도가 400 °C 이상으로 도출되어 온도에 따른 강도감소가 일어난 것을 확인하였다. 또한 $\varphi_{f,\theta}$, $\varphi_{w,\theta}$, $\varphi_{s,\theta}$, $\varphi_{c,\theta}$ 는 열응력에 따른 휨강성 감소계수로 각각 강재플랜지, 강재웹, 철근, 콘크리트의 감소계수를 의미한다.

$$P_{fi,no} = \sum (A_{a,\theta} f_{ay,\theta}) / \gamma_{M,fi,a} + \sum (A_{s,\theta} f_{sy,\theta}) / \gamma_{M,fi,s} + \sum (A_{c,\theta} f_{c,\theta}) / \gamma_{M,fi,c} \quad (1)$$

$$(EI)_{fi,eff} = \sum \varphi_{a,\theta} E_{a,\theta} I_{a,\theta} + \sum \varphi_{s,\theta} E_{s,\theta} I_{s,\theta} + \sum \varphi_{c,\theta} E_{c,\theta} I_{c,\theta} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 이용한 탄성좌굴강도식(P_e)은 식 (3)과 같다. 이에 따라 식 (4)와 같이 좌굴효과에 따른 계수(χ)를 산정하여 화재시 합성기둥의 압축강도($P_{fi,n}$)를 산정하였다.

$$P_e = \frac{\pi^2 (EI)_{fi,eff}}{l_\theta^2} \quad (3)$$

$$P_{fi,n} = \chi P_{fi,no} \quad (4)$$

Table 8. Reduction factor (k) of concrete compression strength (f_c) and modulus of elasticity (E_c) at elevated temperature

Concrete cover (mm)	R-1 (38 min)						R-2 (110 min)						R-3 (180 min)					
	f_c			E_c			f_c			E_c			f_c			E_c		
	k_{EC}	k_{ACI}	k_{EC-ACI}	k_{EC}	k_{ACI}	k_{EC-ACI}	k_{EC}	k_{ACI}	k_{EC-ACI}	k_{EC}	k_{ACI}	k_{EC-ACI}	k_{EC}	k_{ACI}	k_{EC-ACI}	k_{EC}	k_{ACI}	k_{EC-ACI}
28.5	0.62	0.96	-0.34	0.21	0.76	-0.55	0.10	0.28	-0.18	0.00	0.06	-0.06	0.00	0.17	-0.17	0.00	0.00	0.00
57.0	0.92	0.98	-0.06	0.93	0.97	-0.04	0.42	0.48	-0.06	0.09	0.14	-0.05	0.24	0.39	-0.15	0.04	0.09	-0.05
85.5	0.74	0.75	-0.01	0.75	0.76	-0.01	0.68	0.76	-0.08	0.23	0.32	-0.09	0.45	0.55	-0.10	0.11	0.18	-0.07
128.0	0.80	0.73	0.07	0.81	0.74	0.07	0.98	0.98	0.00	1.00	0.98	0.02	0.87	0.80	0.07	0.51	0.39	0.12

Table 9. Reduction factor (k) of steel and reinforcement yield strength (f_y) and modulus of elasticity (E) at elevated temperature (EN 1994-1-2^[26], AISC 360-16^[29])

Heating time (min)	Material	Temperature (°C)		Reduction factor (k)					
				f_{ay}, f_{sy}			E_{ay}, E_{sy}		
		T_{EC}	T_{ACI}	k_{EC}	k_{AISC}	$k_{EC-AISC}$	k_{EC}	k_{AISC}	$k_{EC-AISC}$
38	Steel	80	102	1.00	1.00	0.00	1.00	0.99	0.01
	Reinforcement	270	309	1.00	1.00	0.00	0.83	0.79	0.04
110	Steel	270	305	1.00	1.00	0.00	0.83	0.80	0.03
	Reinforcement	710	650	0.22	0.35	0.13	0.13	0.22	0.09
180	Steel	450	460	0.89	0.86	0.03	0.65	0.62	0.03
	Reinforcement	850	730	0.09	0.21	0.12	0.08	0.14	0.06

4.3.2 AISC 360-16^[29], ACI 216.1-07^[30]

AISC의 경우 아직 합성기둥의 내화설계에 관한 상세한 계산식이 제시되어있지 않아 AISC 360-16^[29]의 상온설계식에 재료온도에 따른 감소계수만 적용하여 화재시 공칭압축강도를 산정하였다. ACI 216.1-07^[30]에 따라 위치별 온도를 산정하였으며, 도출된 온도에 따른 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 강도감소계수(k_{ACI})를 Eurocode와 마찬가지로 온도에 따른 콘크리트 압축강도 실험결과인 Table 3에 따라 산정하였다. 강재와 철근의 경우 AISC 360-16^[29]의 구조강재의 온도에 따른 강도감소계수를 참고하여 산정하였다. Table 7과 Table 8은 강도 산정시 사용하였던 화재시간에 따른 콘크리트 피복두께별 온도 및 온도에 따른 압축강도와 탄성계수 감소계수(k_{ACI})이다. 화재시간 38분(R-1)의 경우, Eurocode와 마찬가지로 피복두께 28.5 mm에서 365 °C, 57 mm에서 309 °C으로, 200 °C에서 400 °C 사이에 콘크리트 강도가 회복되는 현상으로 인해 콘크리트 피복 두께가 작음에도 불구하고, 압축강도 감소계수 0.96, 0.98로 높은 감소계수가 도출된 것을 알 수 있다. 또한 콘크리트 피복두께 28.5 mm에서 Eurocode 온도(T_{EC})에 의한 감소계수(k_{EC}) 보다 압축강도의 경우 0.34, 탄성계수의 경우 0.55의 차이로 높게 산정된 것을 알 수 있다. Table 7에서 정리한 바와 같이 콘크리트 피복두께 28.5 mm에서 T_{ACI} 의 경우 365 °C로 콘크리트 강도가 회복되었지만, T_{EC} 는 550 °C로 강도가 크게 감소하여 감소계수 산정 시 차이가 발생한 것으로 보인다. 화재시간 110분(R-2)과 180분(R-3)의 경우, Eurocode와 마찬가지로 콘크리트 피복두께가 증가할수록 강도감소계수(k_{ACI})가 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 Eurocode에 의한 감소계수(k_{EC})와 비교결과, 최대 오차가 0.18 이내로 온도비교결과와 마찬가지로 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다. Table 9는 화재시간에 따른 강재와 철근의 온도(T_{ACI}) 및 온도에 따른 항복강도와 탄성계수 감소계수(k_{AISC})이다. 화재시간이 증가할수록 감소계수(k_{AISC})가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 Eurocode에 의한 감소계수(k_{EC})와 비교결과, 최

대 오차가 0.12 이내로 발생하는 것을 확인하였다. 위와 같이 산정된 온도에 따른 강도감소계수를 바탕으로, 해당 단면적에 적용시켜 식 (5)와 같이 화재시 고온효과를 고려한 공칭 압축강도를 산정하였다. 또한 유효휨강성은 식 (6)과 같이 각각 단면온도에 따른 유효휨강성의 합으로 계산한다. C_1 은 합성기둥일 때의 콘크리트의 감소계수를 의미한다.

$$P_{fi,no} = \sum(A_{a,\theta} f_{ay,\theta}) + \sum(A_{s,\theta} f_{sy,\theta}) + \sum(0.85 A_{c,\theta} f_{c,\theta}) \tag{5}$$

$$(EI)_{fi,eff} = (EI)_{fi,f} + (EI)_{fi,w} + C_1(EI)_{fi,c} + (EI)_{fi,s} \tag{6}$$

식 (3)에 따라 Eurocode와 동일하게 탄성압축좌굴강도(P_e)를 산정한 뒤, 식 (7)과 같이 기둥세장비에 따른 휨좌굴 한계상태의 기둥의 공칭압축강도($P_{fi,n}$)를 산정하였다.

$$\text{If } \frac{P_{fi,no}}{P_e} \leq 2.25, P_{fi,n} = P_{fi,no} (0.658)^{\frac{P_{fi,no}}{P_e}} \tag{7}$$

4.3.3 실험값과의 비교

화재시간에 따른 화재시 공칭강도($P_{fi,n}$) 및 하중비(η_{fi})는 Table 10과 같다. EN 1994-1-2^[26]와 AISC 360-16^[29]의 계산식에 따라 실험으로 도출된 화재시간 38분(R-1), 110분(R-2), 180분(R-3)에 따른 화재시 공칭압축강도($P_{fi,n}$) 및 하중비(η_{fi})를 산정하고, 이 값을 실험값 하중비 0.7, 0.6, 0.5와 비교하였다. 상온에서의 SRC기둥의 공칭압축강도(P_n)는 Eurocode와 AISC 각각 6,901 kN과 7,009 kN로 유사하고, 국내 KBC 2016^[31] 기준으로 산정된 공칭압축강도는 6,351 kN로 국외 기준에 비해 보수적으로 평가하고 있다. 그리고 하중비(η_{fi})는 상온에서의 공칭압축강도에 대한 화재시 공칭압축강도의 비($P_{fi,n}/P_n$)로 나타내어, 실험값과 비교하였다. 그 결과, 38분(R-3) 화재시 하중비가 Eurocode의 경우 0.80, AISC의 경우 0.82로 유사한 결과가 도출되었다. 110분(R-2) 화재시

Table 10. Nominal compression strength and load ratio in fire (EN 1994-1-2^[26], AISC 360-16^[29], Test)

Heating time (min)	EN 1994-1-2			AISC 360-16			Test (KBC 2016)			Difference (%)
	P_n (kN)	$P_{fi,n}$ (kN)	$\eta_{fi,EN}$ ($P_{fi,n}/P_n$)	P_n (kN)	$P_{fi,n}$ (kN)	$\eta_{fi,AISC}$ ($P_{fi,n}/P_n$)	P_n (kN)	$P_{fi,n}$ (kN)	$\eta_{fi,Test}$ ($P_{fi,n}/P_n$)	$(\eta_{fi,Test} - \eta_{fi,(EN+AISC)/2}) / \eta_{fi,(EN+ACI)/2}$
38	6,901	5,493	0.80	7,009	5,739	0.82	6,351	4,445	0.7	13
110		3,828	0.55		4,059	0.58		3,810	0.6	5
180		3,173	0.46		3,279	0.47		3,175	0.5	7

Eurocode의 경우 0.55의 하중비가 도출되었고, AISC의 경우 하중비 0.58가 도출되었다. 180분(R-1) 화재시 또한 Eurocode, AISC 각각 0.46, 0.47로 유사한 값이 도출되었다. 따라서 두 개의 국외기준(Eurocode, AISC)에 따른 화재시 공칭압축강도를 산정한 결과 두 개의 국외기준이 매우 유사한 값을 보인 것을 알 수 있다. 그리고 기준(Eurocode, AISC)에 따른 산정결과를 실험값과 비교한 결과, 110분(R-2) 가열시 실험값은 하중비 0.6로 매우 유사한 결과가 도출되었고, 180분(R-1) 가열시 기준(Eurocode, AISC)에 의한 온도값이 높게 도출되어 다소 차이를 보였지만 하중비 0.5으로 유사한 결과가 도출된 것을 알 수 있었다. 그러나 38분(R-1) 가열시 실험값은 0.7로 기준(Eurocode, AISC)에 의한 하중비가 약 0.81이므로, 약 13% 높게 평가하는 것을 확인하였다. R-1 실험체의 파괴형상을 살펴보면 다른 실험체에 비해 콘크리트 피복탈락이 많이 발생한 것을 알 수 있다. 따라서 콘크리트 단면손실로 인한 조기파괴가 발생한 것으로 보인다. Mao and Kodur는 단면 350 mm × 350 mm인 SRC 기둥 실험체를 기준으로 0.4 - 0.7 하중비에서의 내화시간을 확인한 결과, 0.7 하중비 이상에서 Eurocode 기준에 의한 내화시간보다 다소 낮은 값이 도출된 것을 확인하였다^[10]. 또한 Ellobdy and Young은 유한요소해석을 이용해 SRC 기둥의 세장비, 하중비, 단면치수에 따른 내화시간에 대해 parameter study를 수행한 결과, 공통적으로 하중비 0.5, 세장비 0.69 이상에서 기준(Eurocode)에 의한 내화시간보다 낮은 결과가 도출된다는 것을 확인하였다^[8]. 따라서 SRC기둥의 경우, 비교적 높은 하중비에서 기준(Eurocode)에 따른 내화시간이 실제 실험값에 비해 다소 길다는 것을 실험과 선행연구를 통해 확인하였다. 이에 따라 SRC기둥의 경우 하중비가 높아지면 기준(Eurocode, AISC)을 만족하지 못하는 내화성을 발현하는 경우가 많은 것으로 파악되므로, 보다 면밀한 실험 및 관찰이 요구된다.

5. 단면, 하중비 따른 내화시간

선행된 합성기둥의 내화실험 및 본 연구에서 수행한 실험을 바탕으로 하중비에 따른 내화시간 추세를 Fig. 8에 나타내었다. 실험데이터는 총 50개를 사용하였으며, 추세선과 함께 본 연구에서 산정한 화재시 온도에 따른 공칭강도 값(Eurocode, AISC)을 정리하여 비교하였다. 비교결과, 0.2 - 0.35 하중비에서는 유사한 내화시간이 도출되었다. 그러나 하중비 0.35 - 0.6에서는 기존 연구결과와 비교적 상이한 결

과가 도출되었다. 이는 모든 크기의 단면을 통한 결과를 그래프로 나타내었기 때문에 차이가 발생한 것으로 보인다. 또한 추세선과 기준(Eurocode, AISC) 비교 시 기울기와 동일 하중비에서 내화시간이 큰 차이를 보였다. 합성기둥의 연구동향 분석 시 기둥단면에 따라 하중비에 따른 내화시간 및 내화시간 감소율이 달라진다는 것을 알 수 있었다. Fig. 8 추세선 도출시 사용되었던 데이터는 단면 200 mm × 200 mm와 300 mm × 300 mm는 45개, 단면 400 mm × 400 mm 데이터는 5개로 단면 200 mm × 200 mm와 300 mm × 300 mm의 특성이 주로 반영되어있다. 따라서 기준(Eurocode, AISC)은 실험체 단면 400 mm × 400 mm을 기준으로 산정되었기 때문에 추세선과 기준(Eurocode, AISC) 비교 시 서로 다른 경향이 나타나는 것으로 보인다. 이에 따라 기둥 단면치수 200 mm, 300 mm, 400 mm으로 나누어 추세선을 그려 Fig. 9와 같이 나타내었다. 단면 200 mm × 200 mm은 15개, 단면 300 mm × 300 mm은 30개의 데이터, 단면 400 mm × 400 mm은 5개의 데이터를 사용하였다. 그 결과 단면 200 mm × 200 mm과 단면 300 mm × 300 mm은 동일 하중비에서 내화시간이 약 30분 이내로 유사한 경향을 보였다. 또한 하중비 약 0.1 - 0.45에서 단면 200 mm × 200 mm의 내화시간이 단면 300 mm ×

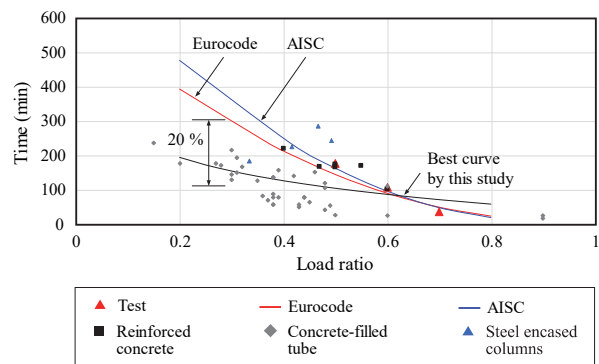


Fig. 8. Load ratio-fire resistance relationship

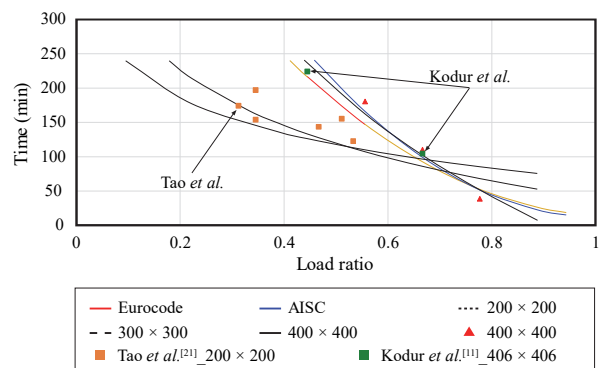


Fig. 9. Load ratio-fire resistance relationship of section

300 mm의 내화시간보다 더 길게 도출되었다. 그리고 하중비 0.45 이상에서는 단면 300 mm × 300 mm의 내화시간이 더 길게 나타났다. 또한 이 추세선과 선행연구를 비교하였다. 각형인 단면 200 mm × 200 mm, 원형단면인 지름 200 mm의 스테인레스 강재 튜브를 사용한 CFT기둥 실험체를 기준으로 하중비, 보강유무를 변수로 하여 재하가열실험과 유한요소해석을 비교한 Tao의 연구와 비교한 결과는 다음과 같다^[21]. Fig. 9의 단면 200 mm × 200 mm 추세선과 비교한 결과, 하중비 0.28 - 0.48에서 내화시간 40분 이내의 유사한 결과가 나타났다. Fig. 9의 단면 400 mm × 400 mm의 추세선의 경우, 하중비 0.4에서 0.1 하중비 증가 시 내화시간이 약 70분 감소하였으며, 기준이 되는 하중비가 증가할수록 내화시간 감소량이 약 10분씩 줄어드는 경향을 보였다. 그리고 단면 200 mm × 200 mm과 300 mm × 300 mm의 추세선에 비해 동일 하중비에서의 내화시간이 길고, 하중비 증가에 따른 내화시간 감소율이 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 추세선과 실험체 단면 400 mm × 400 mm을 기준으로 산정된 기준값(Eurocode, AISC)과 비교 시 동일 하중비에서 내화시간 오차 20분 이내로 유사한 경향을 나타냈다. Kodur는 RC기둥의 하중비, 기둥단면, 전단철근 구부림 각도에 따른 내화실험을 실시하였다^[18]. 전단철근의 구부림 각도가 90°이고 단면이 406 mm × 406 mm인 Kodur의 실험체의 결과를 기준으로 추세선과 비교한 결과, 동일 하중비에서 내화시간 최대 20분 이내, 최대 오차 5 %로 기준값(Eurocode, AISC) 및 추세선과 유사한 결과를 보였다. 따라서 단면 400 mm × 400 mm인 SRC기둥의 하중비에 대한 내화시간에 대한 선행연구를 조사하고 실험을 실시한 결과, 0.4 - 0.6 하중비에서는 기준값(Eurocode, AISC)이 선행연구(Tao, Kodur) 및 실험과 유사한 경향을 나타내거나 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 수행한 재하가열실험에서 하중비 0.7의 내화시간이 기준을 통한 내화시간 52분보다 약 14분 낮게 도출된 것을 알 수 있었다. 따라서 기준(Eurocode, AISC)을 통한 하중비에 따른 내화시간 산정 시, 단면 400 mm × 400 mm의 하중비 0.7 이상에서는 높은 하중비에 대한 보다 많은 실험을 통한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 하중비에 따른 합성기둥의 내화성능을 알아보고자, 매입형 합성기둥(SRC 기둥) 400 mm × 400 mm 규격의 실험체를 제작하여 재하가열실험을 실시하였다. 하중

비에 따른 내화시간을 확인하고, 기준(Eurocode, AISC)을 이용해 화재시간에 따른 합성기둥의 공칭압축강도를 산정하였다. 연구과정에서 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 매입형 합성기둥의 하중비에 따른 내화시간을 알아보기 위해 재하가열실험을 실시한 결과, 하중비 0.7에서 38분, 0.6에서 110분, 0.5에서 180분 이상의 내화시간이 도출되었다.
- (2) 또한 매입형 합성기둥의 Eurocode 및 AISC 계산식을 이용하여 온도에 따른 공칭압축강도 산정결과, Eurocode의 경우 화재시간 38분에서 0.80, 110분에서 0.55, 180분에서 0.46로 산정되었다. AISC의 경우 각각 0.82, 0.58, 0.47로 산정되었다. 따라서 기준과 실험값을 비교한 결과 0.5, 0.6 하중비에서는 내화시간이 유사하나, 0.7 하중비에서는 기준(Eurocode, AISC)이 다소 높게 평가하는 것을 알 수 있다.
- (3) 국내·외 연구동향 파악을 통해 단면 가로, 세로 200 mm × 200 mm 이상, 편심이 적용되지 않은 합성기둥 실험체를 기준으로 하중비-내화시간의 그래프를 도출하였다. 기둥 단면에 따라 200 mm, 300 mm, 400 mm으로 나누고 추세선을 그려 비교한 결과, 단면 200 mm × 200 mm과 단면 300 mm × 300 mm은 하중비에 따른 내화시간 30분 이내로 유사한 경향을 보였다. 그러나, 단면 400 mm × 400 mm의 경우, 단면 200 mm × 200 mm과 단면 300 mm × 300 mm에 비해 동일 하중비에서의 내화시간이 길고, 하중비 증가에 따른 내화시간 감소율이 크게 나타나는 것을 확인하였다.
- (4) SRC 기둥 단면 400 mm × 400 mm에서 Eurocode, AISC 기준과 선행연구 및 본 연구에서 수행한 실험결과를 비교한 결과, 0.4 - 0.6 하중비에서 기준을 통한 내화시간은 최대 오차 20분 이내로 실험값 및 선행연구결과와 매우 유사함을 알 수 있었고, 하중비 0.7에서는 기준이 동일 하중비에서 내화시간을 약 14분 높게 평가하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 20161510400110, 원전광역화재를 고려한 정략적 화재영향 평가 기술개발), 2018년도 경기대학교 대학원 연구원 장학금 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Kim, S.H., Won, Y.A., and Choi, S.M. (2012) A Study on the Evaluation of Residual Strength of Double Concrete Filled Tube Column by Unstressed Test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.81-89 (in Korean).
- [2] Hwang, J.-Y., and Kwak, H.-G. (2015) A Numerical Model of Reinforced Concrete Members Exposed to Fire and After-Cooling Analysis, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.28, No.1, pp.101-113 (in Korean).
- [3] Chung, J.-A., Yang, I.-S., and Choi, S.-M. (2003) Effects of Axial Force on Deformation Capacity of Steel Encased Reinforced Concrete Beam-Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.15, No.3, pp.251-259 (in Korean).
- [4] Hwang, K.-J., Yeo, I.-H., and An, J.-H. (2014) A Study on the Determination of the Fire Resistant Axial Load Ratio for Reinforced Concrete Columns, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol.30, No.6, pp.27-34 (in Korean).
- [5] Hwang, K.-J., Cho, B.-Y., and Yeo, I.-H. (2013) A Study on the Fire Resistance Performance of Reinforced Concrete Columns According to Axial Load Ratio, *Fire Science and Engineering*, Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.27, No.6, pp.26-31 (in Korean).
- [6] Huang, Z.-F., Tan, K.-H., and Phng, G.-H. (2007) Axial Restraint Effects on the Fire Resistance of Composite Columns Encasing I-Section Steel, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.63, No.4, pp.437-447.
- [7] Huang, Z.-F., Tan, K.-H., Toh, W.-S., and Phng, G.-H. (2008) Fire Resistance of Composite Columns with Embedded I-Section Steel: Effect of Section Size and Load Level, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.64, No.3, pp.312-325.
- [8] Ellobody, E., and Young, B. (2010) Investigation of Concrete Encased Steel Composite Columns at Elevated Temperatures, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.48, No.8, pp.597-608.
- [9] Ellobody, E., and Young, B. (2011) Performance of Axially Restrained Concrete Encased Steel Composite Columns at Elevated Temperatures, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.33, No.1, pp.245-254.
- [10] Mao, X., and Kodur, V.K.R. (2011) Fire Resistance of Concrete Encased Steel Columns Under 3- and 4-Side Standard Heating, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.3, pp.270-280.
- [11] Kodur, V., Khaliq, W., and Raut, N. (2013) An Approach to Account for Tie Configuration in Predicting Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.56, pp.1976-1985.
- [12] Park, S.H., Ryoo, J.Y., Chung, K.S., and Choi, S.M. (2007) An Evaluation for the Fire Resistance of Concrete-Filled Steel Square Tube Columns Under Constant Axial Loads, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.6, pp.703-714 (in Korean).
- [13] Lu, H., Zhao, X.-L., and Han, L.-H. (2009) Fire Behaviour of High Strength Self-Consolidating Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.65, pp.1995-2010.
- [14] Cho, K.S., Kim, H.-Y., Kim, H.-J., Min, B.-Y., and Kwon, I.-K. (2010) Experimental Study on Fire Resistance Performance of CFT (Concrete Filled Tube) Column According to Cross Section of Steel, Concrete Compressive Strengths and Load Ratios, *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, KIFSE, Vol.24, No.6, pp.104-111 (in Korean).
- [15] Romero, M.L., Moliner, V., Espinos, A., Ibañez, C., and Hospitaler, A. (2011) Fire Behavior of Axially Loaded Slender High Strength Concrete-Filled Tubular Columns, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.67, No.12, pp.1953-1965.
- [16] Chung, S.K., Kim, S.H., Lee, S.H., and Choi, S.M. (2011) Fire Resistance of Concrete Filled Double Skin Tubular Columns Under Axial Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.1, pp.51-59 (in Korean).
- [17] Han, L.-H., Chen, F., Liao, F.-Y., Tao, Z., and Uy, B. (2013) Fire Performance of Concrete Filled Stainless Steel Tubular Columns, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.56, pp.165-181.
- [18] Koo, C.H., Lee, C.H., and Ahn, J.K. (2013) Prediction of Temperature Distribution to Evaluate Axial Strength of Unprotected Concrete-Filled Steel Tubular Columns Under Fire, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.6, pp.587-599 (in Korean).
- [19] Ahn, J.K., and Lee, C.H. (2014) Evaluation of Fire Resistance of Unprotected Concrete-Filled Rectangular Steel Tubular Columns Under Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.4, pp.323-334 (in Korean).
- [20] Yao, Y., Li, H., Guo, H., and Tan, K. (2016) Fire Resistance of Eccentrically Loaded Slender Concrete-Filled Steel Tubular Columns, *Thin-Walled Structures*, Elsevier,

Vol.106, pp.102-112.

[21] 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.

[22] Ukanwa, K.U., Sharma, U.K., Hicks, S.J., Abu, A., Lim, J.B.P., and Clifton, G.C. (2017) Behaviour of Continuous Concrete Filled Steel Tubular Columns Loaded Concentrically in Fire, *Journal of Constructional Research*, Elsevier, Vol.136, pp.101-109.

[23] Kim, S.H., Yom, K.S., Kim, Y.H., and Choi, S.M (2016) Analysis Study on Fire Performance with Internal Anchored Concrete Filled Steel Tube Columns According to Percent of Steel-Fibers, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.1, pp.23-34 (in Korean).

[24] Kim, H.J, Hwang, H.J, Park, H.G, Kim, D.K, and Yang, J.M (2017) Eccentric Axial Load Test of Prefabricated Composite Columns Using Bolt-Connected Steel Angles, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.3, pp.249-260 (in Korean).

[25] Cho, K.H., and Kim, S.B. (2019) Compressive Strength of Concrete-Encased Composite Columns According to Design Specifications, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.3, pp.223-231 (in Korean).

[26] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design* (EN 1994-1-2), Belgium, pp.43-52, p.100.

[27] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 4: Design of Concrete Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design* (EN 1992-1-2), Belgium, pp.63-71.

[28] Korean Agency for Technology and Standards (2014) *Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - General Requirements* (KS F 2257-1: 2014), Korea (in Korean).

[29] American Institute of Steel Construction (2016) *Speci-*

fication for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16), USA, pp.86-59.

[30] American Concrete Institute (2016) *Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies* (ACI 216.1-07/TMS-0216-07), USA. pp.13-16.

[31] Architectural Institute of Korea (2016) *Korean Building Code-Structural* (KBC 2016), AIK, Korea (in Korean), pp.340-345.

기 호(Notation)

$A_{a,\theta}, A_{c,\theta}, A_{s,\theta}$: 화재 피해를 받는 재료별 단면적
E_{ay}, E_c, E_{sy}	: 강재, 콘크리트, 철근의 탄성계수
$E_{a,\theta}, E_{c,\theta}, E_{s,\theta}$: 온도에 따른 강재, 콘크리트, 철근의 탄성계수
$(EI)_{fi,fs}, (EI)_{fi,us}, (EI)_{fi,cs}, (EI)_{fi,ss}$: 화재시 재료별 유효휨강성
$(EI)_{fi,eff}$: 화재시 매입형 합성기둥의 유효휨강성
$I_{a,\theta}, I_{c,\theta}, I_{s,\theta}$: 화재시 재료별 단면 2차 모멘트
$P_{fi,no}$: 화재시 합성기둥의 공칭압축강도
C_1	: 합성기둥일 때의 콘크리트의 감소계수
f_{ay}, f_{sy}	: 강재, 철근의 항복강도
f_c	: 콘크리트 압축강도
$f_{ay,\theta}, f_{sy,\theta}$: 온도에 따른 강재, 철근의 항복강도
$f_{c,\theta}$: 온도에 따른 콘크리트 압축강도
$\gamma_{M,fi,a}, \gamma_{M,fi,c}, \gamma_{M,fi,s}$: 화재시 재료물성에 따른 계수(= 1.0)
$\varphi_{c,\theta}, \varphi_{f,\theta}, \varphi_{s,\theta}, \varphi_{w,\theta}$: 재료별 열응력에 따른 감소계수
T_{EC}	: EN 1992-1-2에 따른 콘크리트 위치별 온도
T_{ACI}	: ACI 216.1-07에 따른 콘크리트 위치별 온도
$T_{Avg.}$: T_{EC}, T_{ACI} 의 평균값
T_{Test}	: 실험에 따른 콘크리트 위치별 온도
$\eta_{fi,EN}$: EN 1994-1-2에 따른 화재시 공칭압축 강도 비
$\eta_{fi,AISC}$: AISC 360-16에 따른 화재시 공칭압축 강도 비

요 약: 본 연구에서는 내화 성능에 대한 하중비의 영향을 알아보기 위해 SRC 기둥의 하중비에 따른 재하가열실험을 수행하였다. 그리고 Eurocode 4와 AISC 360-16에 따른 화재시 합성기둥의 공칭 압축 강도를 산정하고, 실험 결과와 비교하였다. 또한, 합성기둥(RC 기둥, CFT 기둥, SRC 기둥)의 각 단면 치수별 하중비에 따른 내화시간을 추세선으로 나타내었다. 그 결과, 400 mm × 400 mm 단면의 내화시간이 200 mm × 200 mm 및 300 mm × 300 mm 단면보다 동일한 하중비에서 더 길다는 것이 확인하였다. 또한, 400 mm × 400 mm 단면의 내화시간 감소율은 200 mm × 200 mm 및 300 mm × 300 mm 단면보다 크게 나타났다. 그리고 기준(Eurocode, AISC)과 실험값을 비교한 결과, 0.4-0.6 하중비에서 실험값과 매우 유사한 결과가 나타났다. 그러나 0.7의 하중비에서 기준(Eurocode, AISC)에 의한 내화시간은 실험값에 비해 더 높게 평가하는 것을 확인하였다.

핵심용어: 하중비, 내화성능, SRC 기둥, 내화시간 추세선, 재하가열실험, 재료온도