

횡방향 철근으로 구속된 철근콘크리트 기둥의 화재 노출조건에 따른 내화성능

The Fire Resistant Performance of RC Column with Confined Lateral Reinforcement According to Fire Exposure Condition

최광호^{1*}Kwang Ho Choi^{1*}

(Received October 31, 2018 / Revised November 20, 2018 / Accepted November 20, 2018)

When reinforced concrete structures are exposed to fire, their mechanical properties such as compressive strength, elasticity coefficient and rebar yield strength, are degraded. Therefore, the structure's damage assessment is essential in determining whether to dismantle or augment the structure after a fire. In this study, the confinement effect of lateral reinforcement of RC column according to the numbers of fire exposure face and stirrup was verified by fire resistant test with the heating temperatures of 400°C, 600°C and 800°C.

The test results showed that the peak stress decreases and peak strain increases as the temperature is getting higher, also transverse ties are helpful in improving the compressive resistance of concrete subjected to high temperature. Based on the results of this study, the residual stress of confined concrete under thermal damage is higher at the condition of more lateral reinforcement ratio and less fire exposure faces. The decreasing ratio of elastic modulus of more confined and less exposure faces from the relationship of load and displacement was also smaller than that of opposite conditions.

키워드 : 횡철근 구속효과, 기둥의 화재 노출면, 잔존 역학적 특성

Keywords : Confined effect of lateral reinforcement, Fire exposure faces of column, Residual mechanical characteristics

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 화재 등과 같이 고온에 노출되었을 때 내화구조로 저항할 수 있어 예기치 않은 건물의 붕괴나 손상 등으로부터 인명 피해나 재산 손실을 피할 수 있다. 화재에 의한 철근콘크리트 구조물의 손상도 평가는 재료강도의 내력저하와 부재 강성변화에 의한 사용성 저하, 균열이나 중성화 등에 의한 내구성 저하의 관점에서 평가할 수 있는데, 이 중 내력저하는 구조물의 안전과 직접적인 관련이 있는 가장 중요한 평가 항목이기 때문에 강도저하 정도의 파악은 화재 후의 재사용 여부와 그 보수보강법의 검토에 대한 중요한 판단 자료가 된다(Choi et al. 2011).

콘크리트 기둥의 전단 저항을 목적으로 사용되는 횡방향 철근은 주근의 위치 이탈 방지와 시공성 향상 및 기둥의 구속효과로 인한 압축 내력 향상과 콘크리트 연성 증진에 유효하며, 특히 화재 피해 중 기둥 내력의 감소로 인한 급격한 취성파괴의 지연효과를

기대할 수 있다.

철근콘크리트 부재의 내화특성에 대한 기존 연구들을 살펴보면, 콘크리트 재료의 고온 특성과 화재 후 잔존 강도 특성에 대한 연구는 다수 수행되었으나, 기둥 횡방향 철근의 구속효과(confined effect of lateral reinforcement)를 반영한 고온 수열 후 잔존 역학적 특성 등 내화특성 규명관련 상세 연구는 상대적으로 그 수가 적다. 기둥 횡철근의 내화 구조특성에 대한 기존 연구로는 띠철근의 간격을 변수로 한 내화성능 실험을 수행하여 탄성계수 및 잔존 강도 등을 비교 분석한 연구를 찾을 수 있다(Wu et al. 2002).

이 연구에서는, 기둥의 화재 후 잔존 역학적 특성 규명 연구의 일환으로, 화재 시 기둥 위치에 따라 고온 노출면 수가 다른 점을 반영하여, 기둥의 노출면 수 차이에 따른 횡방향 철근의 손실강도 보상효과를 잔존 압축강도, 변형률 및 탄성계수와 하중-변위 곡선의 상대적 비교분석을 통해 규명하여 화재 구조물의 내구성 향상 및 지속가능성을 높이고자 한다.

* Corresponding author E-mail: choikh@nsu.ac.kr

¹남서울대학교 건축공학과 교수 (Department of Architectural Engineering, Namseoul University, Cheonan-city, 31020, Korea)

2. 횡방향 철근의 콘크리트 구속효과

기둥부재의 폭렬에 의한 단면 결손 시 횡방향 철근의 강도손실 보상효과는 Fig. 1과 같이 철근이 콘크리트를 구속하기 때문에 발생한다. Fig. 2는 압축력을 받는 띠철근과 나선철근의 하중-압축 변형의 실험결과를 나타낸 것인데, 나선철근 기둥은 최고 하중에 이르렀을 때 나선철근 외부의 콘크리트가 탈락되고, 이에 따라 단면적의 감소로 하중이 일시 떨어지나, 나선철근의 구속력으로 나선철근이 파괴될 때까지 큰 변형을 하는 양상을 보이고 있다. Fig 1(b)와 같은 수평력의 평형 상태에서 나선철근에 생기는 인장응력을 f_{sp} , 나선철근의 구속에 의하여 콘크리트에 발생하는 압축응력을 f_2 로 나타내면, 평형조건은 식(1)과 같다. 기둥심부에 대한 나선철근 체적비 $\rho_s = (A_{sp}l_{sp}) / (A_{ch}s)$ 와 식(1)로부터 식(2)가 된다. 식(2)에서 나선철근의 구속으로 인한 강도 증가는 극한 하중 상태에서 f_2 가 나선철근의 설계기준 항복강도 f_{yt} 에 도달했을 때 대략 $2f_{yt}A_{ch}$ 임을 알 수 있다. 그러나 이러한 구속력이 발생하는 것은 기둥 심부 외부의 피복이 탈락한 후이며, 이 부분에 의한 강도 손실은 $0.85f_{ck}(A_g - A_{ch})$ 로 계산되며, 나선철근에 의한 강도 증가가 피복 탈락에 의한 강도 손실을 보상하는 조건은 식(3)이

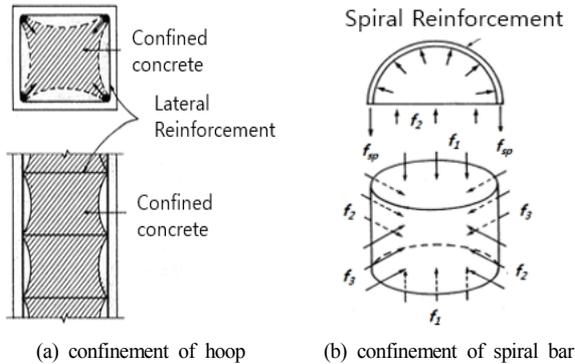


Fig. 1. Confinement of concrete by lateral reinforcement

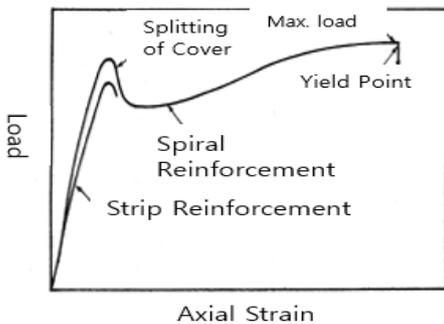


Fig. 2. Behavior of column with lateral reinforcement

된다. 이로부터 나선철근의 체적비는 식(4)로 유도되는데 설계기준에서는 공식의 사용 편의성을 고려하여 식(5)로 규정되어 있다 (Kim 2018).

$$2f_{sp}A_{sp} = f_2d_c s \tag{1}$$

$$f_2 = \frac{f_{sp}\rho_s}{2} \tag{2}$$

$$0.85f_{ck}(A_g - A_{ch}) = 2\rho_s f_{yt} A_{ch} \tag{3}$$

$$\rho_s = 0.425 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_{yt}} \tag{4}$$

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_{ch}} - 1 \right) \frac{f_{ck}}{f_{yt}} \tag{5}$$

여기서, ρ_s = 나선철근 체적비, A_{sp} = 나선철근의 단면적, A_{ch} = 기둥 심부 단면적, s = 나선철근의 피치, f_2 = 나선철근의 구속에 의하여 콘크리트에 발생하는 압축응력, f_{sp} = 나선철근에 생기는 인장응력이다.

3. 콘크리트 기둥의 내화 구조성능 실험

3.1 실험변수 및 실험체 제작

기둥의 고온 수열 시 횡방향 철근 구속효과와 열에 노출되는 면 수에 따른 구조특성을 알아보기 위한 실험 목적으로 크기 150mm x 150mm x 480mm의 Fig. 3과 같은 실험체를 제작하였다. 철근배근으로 주근은 SD400 등급의 HD 10mm 철근을, 띠철근은 Φ 6mm 철선을 사용하였고 횡방향 철근비 ρ 는 0.75%, 1.5%로 하여 5대와 9대를 배근하였다.

일반 강도의 기둥에 대한 실험을 위하여 실험체의 설계 강도는 30MPa로 하였으며, 배합설계 시 굵은 골재 최대치수 25mm, 슬럼프 80mm 및 물/시멘트비 45%가 되도록 하였으며 배합표는 Table 1과 같다. 또한 실험체 내부의 온도변화를 측정하기 위하여 주근과 실험체 중앙에 K-type의 열전대를 설치하였다. 모든 실험체는 1주의 증기양생과 3주 대기양생을 하였으며 4주 양생 후 압축강도 실험을 수행한 결과 횡철근 5개 배근된 실험체는 33.5MPa, 9개 배근된 실험체는 31.9MPa의 압축강도를 나타내었다.

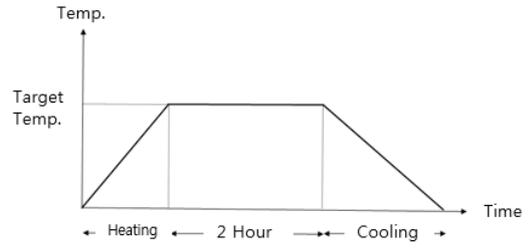
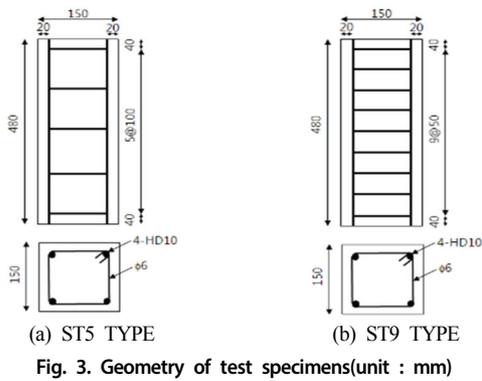


Fig. 4. Temperature Cycle



Fig. 5. The furnace and test setup

Table 1. The concrete mixture proportions

f _{ck} (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Components(kg/m ³)				Air(%)
			W	C	S	G	
30	45	46.9	165	373	837	966	2

3.2 가열 및 가력방법

철근 콘크리트 기둥이 화재 시 횡방향 철근 수와 고온 노출 면수의 변화에 따라 달라지는 역학적 특성변화를 규명하기 위하여 전기로에서의 가열실험과 냉각 후 2 - 3주 경과하여 일축 압축실험을 수행하였으며 그 개요는 다음과 같다.

3.2.1 가열실험

실험체는 가로×세로×길이 87cm×80cm×150cm인 전기로에 넣은 후에 가열하였다. 전기로의 내부 목표온도를 400℃, 600℃ 및 800℃로 설정하고, 13.3℃/분의 속도로 가열하여 30분, 45분과 60분만에 목표 온도에 도달되도록 하였으며, 가열 후 2시간동안 그 온도를 유지시킨 후 자연냉각이 되도록 제어하였다. 가열실험에 적용한 온도곡선은 Fig. 4와 같다. Fig. 5는 전기로 내부 실험체 설치 전경을 보여주고 있는데, 실험체의 고온 비노출은 시중에서 구입 가능한 세라믹 계열의 내화보드를 부착하여 구현하였다. 가열 중 데이터 취득장비(UCAM-500A)를 이용하여 전기로 제어용 온도, 전기로 내부온도 및 기둥 실험체 내부의 온도(실험체 외측 및 중앙)를 함께 측정하였다.

3.2.2 일축 압축실험

실험체에 대해 목표온도(400, 600 및 800℃)로 가열 후 냉각하여 한 달을 상온에 노출시킨 후 Fig. 6의 셋업으로 일축압축강도 실험을 수행하였다. 이때 가력은 1mm/분 속도의 변위제어로 하였으며 실험결과인 하중-변위, 하중-변형률곡선으로부터 탄성계수, 잔존 내력 및 변형률 등의 잔존 역학적 특성을 분석하였다.



Fig. 6. Compression test

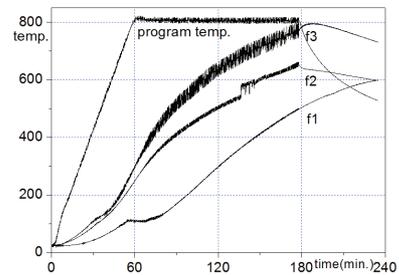


Fig. 7. Temperatures of specimen at 800℃

4. 실험 결과 및 비교분석

4.1 실험체 수열 온도

가열실험 중 전기로 온도와 고온 노출면과 띠철근 수를 변수로 한 실험체 내부 온도를 열전대를 통해 측정하였으며, 예로 800℃ 가열실험의 측정결과는 Fig. 7과 같다. 그림에서 가열 온도는 Fig.

4의 가열 곡선을 그대로 따라 갔으며, 가열면 수가 많을수록 측정 온도가 높게 나타났다. 목표온도인 800°C 도달 후 2시간 경과했을 때의 실험체 내부온도를 살펴보면, 3면 노출이 780°C로서 2면 노출의 640°C, 1면 노출의 500°C보다 1.2배, 1.6배 높게 측정되었다.

4.2 일축 압축실험 결과

횡방향 철근으로 구속된 철근콘크리트 기둥 실험체의 고온 수열 후 잔존 역학적 특성을 규명하기 위하여, 가열속도를 13.3°C/분으로 하여 400°C, 600°C 및 800°C의 목표온도에 도달 후 2시간 유지하는 것으로 가열실험을 수행한 후 자연 냉각시켰다. 가열 실험 후 3주 지나서 압축실험을 실시하였는데, 실험변수인 횡방향 철근 수와 고온 노출면 수에 대해 극한 강도와 변형률 및 하중 - 변위 그래프의 직선 구간에서 계산한 탄성계수를 정리하였으며 Table 2와 같다. 여기서, 잔존 역학적 특성을 비교하기 위하여 상온 실험체의 압축실험 결과도 함께 나타내었고, 실험체 명은 띠철근 수 - 가열온도 - 고온 노출면 수의 순으로 표기하였는데, 예로 ST5-600-3은 횡철근 5개, 가열 온도 600°C 및 3면 고온 노출의 실험체를 의미한다. 실험결과는 예상했던 대로 온도가 증가할수록 모든 실험체의 최대 응력이 감소하면서 변형률은 증가하는 경향을 보였다. 특히 가열면 수가 많고 횡방향 철근이 작을수록 최대 응력은 낮게, 변형률은 크게 나타났다.

4.2.1 최대 응력

횡방향 철근이 5개인 ST5계열 실험체와 9개인 ST9계열 실험체에 대해 수열온도가 400°C, 600°C와 800°C일 때의 최대 응력을 상온 응력에 대한 비로 나타내었으며 그 결과는 Table 3과 Fig. 8 - Fig. 10과 같다.

먼저, Fig. 8에서 ST5계열의 1면부터 4면 고온 노출 실험체의 400°C 수열의 잔존 강도를 살펴보면 ST5-1실험체는 상온보다 15%의 강도상승이 나타났고, 그 외 다른 실험체는 60%에서 70% 정도의 잔존 강도가 있었다. ST5-1실험체만 상온보다 잔존강도가 크게 나타난 것은 압축강도 실험 시 유압 문제로 가력속도가 낮아서 나타난 현상으로 여겨진다. 600°C 수열의 잔존 강도는 상온 대비 40%에서 60% 정도가 되었으며 800°C 경우 20%에서 30% 잔존 강도가 있는 것으로 나타났다.

ST9계열의 가열온도별 잔존 강도비는 Fig. 9에 나타나 있다. 400°C에서 1면 노출인 경우는 강도 저하가 없었으며 2면 노출부터는 75%에서 85% 정도의 잔존강도가 있었다. 600°C에서는 4면 노출의 40%부터 1면 노출의 60%까지의 잔존강도가 남아 있었으며,

Table 2. Test results on specimens

Type*	No. of stirrup	No. of heating face	$f_{ck}(t)$ (MPa)	$E_c(t)$ ($\times 10^3$ MPa)	
ST5-20-0	5	0	33.5	333.3	
ST5-400-1		1	38.7	250	
ST5-400-2		2	22.7	166.7	
ST5-400-3		3	24.4	166.7	
ST5-400-4		4	20.2	125	
ST5-600-1		1	20.3	166.7	
ST5-600-2		2	17.1	142.8	
ST5-600-3		3	13.5	83.3	
ST5-600-4		4	12.3	71.4	
ST5-800-1		1	11.3	76.9	
ST5-800-2		2	8.0	35.0	
ST5-800-3		3	6.8	24.0	
ST5-800-4		4	6.4	15.6	
ST9-20-0		9	0	31.9	250
ST9-400-1			1	31.8	250
ST9-400-2			2	27.5	200
ST9-400-3	3		24.4	200	
ST9-400-4	4		23.3	200	
ST9-600-1	1		20.0	111	
ST9-600-2	2		18.1	91	
ST9-600-3	3		14.8	37	
ST9-600-4	4		13.5	28.6	
ST9-800-1	1		13.0	83.3	
ST9-800-2	2		10.8	57.1	
ST9-800-3	3		8.8	34.5	
ST9-800-4	4		7.4	32.3	

* st5-600-3 : number of stirrups - heating temperature - number of faces on heating

Table 3. Percent residual peak stress after thermal cycle

Temp.	st5-1	st5-2	st5-3	st5-4	st9-1	st9-2	st9-3	st9-4
20	1	1	1	1	1	10	1	1
400	1.15	0.67	0.73	0.60	1.0	0.86	0.76	0.73
600	0.60	0.51	0.40	0.36	0.62	0.56	0.46	0.42
800	0.34	0.24	0.20	0.19	0.41	0.34	0.27	0.23

Table 4. Difference of residual stresses between ST9 and ST5 type(%)

Temp.(°C)	1 face heated	2 faces heated	3 faces heated	4 faces heated
400	(-15)	19	3	13
600	2	5	6	6
800	7	10	7	4

800°C에서는 20%에서 40%까지의 잔존강도를 유지하였다.

Fig. 8의 ST5계열 잔존강도 감소비교나 Fig. 9의 ST9계열 잔존강도 감소비교에서 가열 노출면 마다 가열 온도가 올라갈수록 잔존강도는 감소되는 것을 살펴보았는데, 아울러 가열 노출면이 많

아질수록 잔존강도 감소비가 커지는 것도 확인할 수 있었다. 예로 600°C 가열 시를 살펴보면 ST5계열의 1면 노출의 ST5-1의 잔존강도는 60%인데 4면 노출인 ST5-4는 40%가 된다. ST9계열도 ST9-1은 62%인데 반하여 4면 노출인 ST9-4는 42%의 잔존강도가 남아 1면 노출보다 20%의 낮은 잔존강도를 보였다.

한편, 이 연구의 압축강도 실험으로부터 고온을 받는 기둥의 횡방향 철근의 구속 효과도 확인할 수 있었다. Table 4와 Fig. 10은 가열 온도별 횡철근 5개와 9개 실험체의 잔존강도 비교를 나타낸다. 1면 노출의 경우, 압축강도 실험값이 비정상적으로 나온 400°C이 외에는 모두 ST9계열의 잔존강도가 ST5계열보다 크게 나타났다. 이 표의 특징 중 하나로서, 가열온도 400°C의 2면 노출과 4면 노출, 800°C 2면 노출에서 띠철근 5개와 9개 실험체의 잔존강도 차이가 10%이상 나타나는데, 이는 고온에 따라 실험체 표면의 경도가 약해져서, 압축실험 시 가력면의 지압파괴가 선행되었기 때문으로 판단된다.

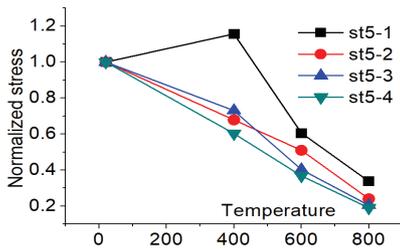


Fig. 8. Normalized peak stress versus temperature(ST5 type)

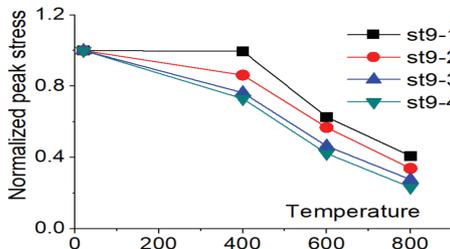


Fig. 9. Normalized peak stress versus temperature(ST9 type)

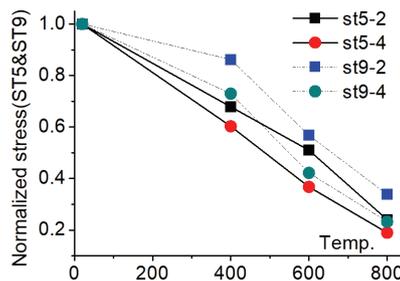


Fig. 10. Comparison of residual stress between ST5 and ST9 type specimen

4.2.2 변형률

압축실험으로부터 받은 변형률 데이터를 통하여 실험체의 변형 과정 추적과 탄성계수 등을 파악할 수 있는데, 이 연구 실험체에 부착된 스트레인게이지는 최대 응력 도달 전까지는 압축 변형률을 나타내다가 최대 응력 즈음 실험체의 편심발생으로 인장 변형률이 나타났다. 모든 실험체 변형률을 비교하기 위해 최대 응력 도달 전의 탄성상태 변형률에 대해 분석하였다.

실험체 가열 면과 횡방향 철근 개수를 변수로 한 실험체의 60 0°C가열 시 응력 10MPa과 800°C가열 시 응력 5MPa의 1면 가열 값을 기준으로 계산한 상대 변형률 값을 Table 5와 Fig. 11에 나타내었다. 여기서, 횡철근 5개와 9개 실험체 모두 가열면이 많아질수록 변형률은 커졌는데, 횡철근 5개 4면 가열인 ST5-4는 1면 가열인 ST5-1 보다 600°C와 800°C 가열실험모두에서 약 3배의 변형률을 보였고, 횡철근 9개 4면 가열인 ST9-4 실험체는 ST9-1보다 약 2배의 변형률이 나타났다. 기둥 실험체의 횡철근 구속효과를 Fig. 11로부터 확인할 수 있다. 1면 가열부터 4면 가열까지의 ST9의 변형률 증가율이 ST5보다 적게 나타나는데, 횡철근의 구속효과로 인하여 압축 변형이 커지지 못하도록 하는 것으로 여겨진다. 60 0°C 실험의 2면 가열 변형률 비교에서 ST9은 1.3배로 ST5 실험체의 1.5배보다 작으며, 4면 가열 시 ST9-4는 1.9로서 ST5-4의 2.9 보다 1배 작게 나타났다. 800°C 2면과 4면 가열 실험에서 ST9은

Table 5. Strains by difference of heating faces and stirrups at 10MPa of stress

Temperature	Faces	st5		st9	
		Strain	Ratio	Strain	Ratio
600 at 10MPa	1	1550	1	1750	1
	2	2250	1.5	2250	1.3
	3	3400	2.2	3800	2.2
	4	4500	2.9	3400	1.9
800 at 5MPa	1	1300	1	1400	1
	2	3050	2.3	2050	1.5
	3	3500	2.7	3600	2.6
	4	4000	3.1	3400	2.4

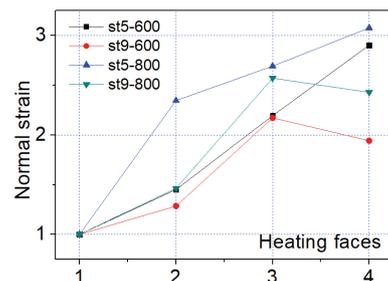


Fig. 11. Comparison of strains between ST5 and ST9 type specimen

1.5배, 2.4배를 나타내고 ST5의 2.3배, 3.1배보다 1.2, 0.8배 작게 나타났다.

4.2.3 탄성계수

띠철근이 5개 9개로 구분되고, 각각 가열면이 1부터 4면인 실험체의 온도증가에 따른 탄성계수는 Table 3에 나타나 있고, 상온 시의 탄성계수를 기준으로 온도증가에 따른 감소율의 변화를 Table 6과 Fig. 12, Fig. 13에 나타내었다. 또한, 가열 온도가 같은 경우 가열면의 증가에 따른 탄성계수 감소비율은 Table 7, Fig. 14, Fig. 15와 같다.

Table 6과 Fig. 12에서 ST5계열의 400°C, 600°C, 800°C의 탄성계수 감소율을 살펴보면 1면 가열 실험체는 상온 대비 75%, 50%, 25%로 25%비율로 감소되었다. 2면 가열부터 가열면이 많아질수록 온도증가에 따라 탄성계수는 급격하게 줄어들어 800°C에서는 2, 3, 4면의 가열면 모두 상온대비 10%미만의 잔존강도만 발휘하는 것을 알 수 있다. ST9 계열의 탄성계수 감소율은 Fig. 13과 같다. ST5계열보다 탄성계수 감소율이 작은 것으로 나타났으며, 이는 횡방향 철근의 구속효과 때문이다.

Fig. 14는 ST5계열의 실험체에 대해, Fig. 15는 ST9 실험체에 대해 고온 노출면 수에 따른 탄성계수 감소율을 나타내고 있다. 2면 3면 4면 고온 노출로 갈수록 탄성계수가 줄어드는데, 온도별

상온대비 탄성계수 감소율 평균을 살펴보면 ST5계열에서는 0.34, 0.51, 0.63배가 된다. ST9계열은 ST5계열보다 감소폭이 적어 0.24, 0.49, 0.52배가 된다.

온도별 실험체 탄성계수를 비교해보면, 고온 노출면이 많은 기둥이 수열온도 증가에 따라 탄성계수 감소율이 크게 나타나고, 횡철근비가 크면 수열온도 증가에 따라 탄성계수 감소율이 작게 나타난다. 이로부터 기둥위치와 횡철근비 등이 내화설계나 화재 안전 진단 시 고려되어 합리적인 내화성능 평가가 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

4.2.4 하중-변위 곡선

실험체의 일축압축실험 시 액츄에이터의 하중 - 스트로크 값으

Table 6. Remaining elastic modulus resulting from a thermal cycle

Temp.(°C)	st5-1	st5-2	st5-3	st5-4	st9-1	st9-2	st9-3	st9-4
20	1	1	1	1	1	1	1	1
400	0.75	0.50	0.50	0.38	1	0.8	0.8	0.8
600	0.50	0.43	0.25	0.21	0.44	0.36	0.15	0.12
800	0.23	0.10	0.07	0.05	0.33	0.23	0.14	0.13

Table 7. Variation in elastic modulus due to heating faces

Temp.(°C)	st5-1	st5-2	st5-3	st5-4	st9-1	st9-2	st9-3	st9-4
400	1	0.67	0.67	0.50	1	0.80	0.80	0.80
600	1	0.86	0.50	0.43	1	0.82	0.33	0.25
800	1	0.45	0.31	0.20	1	0.69	0.42	0.39
Average reducing ratio		0.34	0.51	0.63		0.24	0.49	0.52

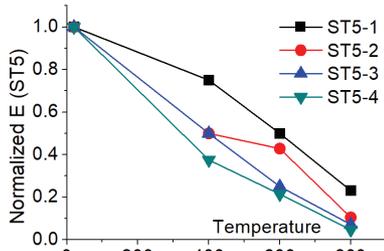


Fig. 12. Elastic modulus of high temperatures compared with E of 20°C(ST 5 TYPE)

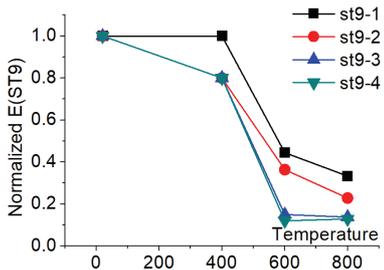


Fig. 13. Elastic modulus of high temperatures compared with E of 20°C(ST 9 TYPE)

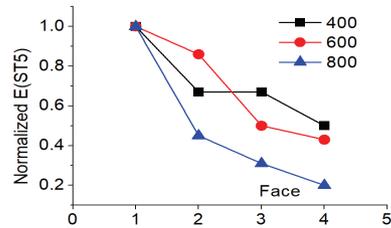


Fig. 14. Elastic modulus due to heating faces(ST5)

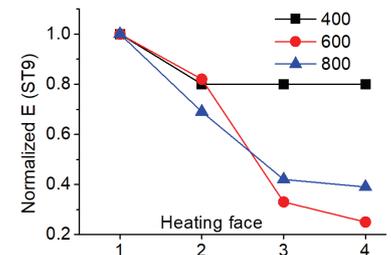


Fig. 15. Elastic modulus due to heating faces(ST9)

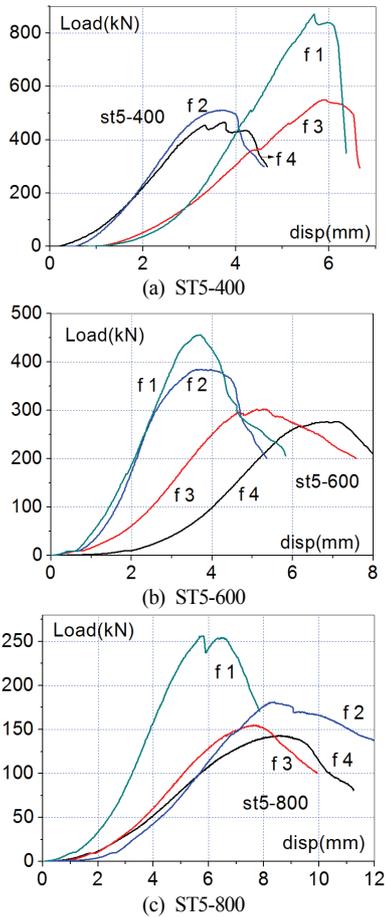


Fig. 16. Load-displacement curves depending on different heating faces with ST5 type specimen

로부터 실험체의 하중 - 변위 곡선을 만들었으며, Fig. 16, 17과 같다. 여기서, 그래프 안의 “f” 표시는 노출 가열면 수이다. 24개 모든 실험체의 일부가 가력 중간에 취성파괴를 일으켜 곡선의 하향 부분을 측정하기가 어려웠지만 대부분의 실험체는 횡방향 철근의 구속으로 연성거동이 나타나서 최대응력 후의 과정도 추적할 수 있었다.

대부분 실험체는 가열면이 적을수록, 그리고 횡방향 철근 개수가 클수록 가열온도별 최대 가력 하중이 크게 나타났다. ST5-400의 1면 고온 노출 실험체에서 가력 속도가 다른 실험보다 늦게 되어, 2면 노출 실험체 하중인 500kN보다 70% 정도 큰 850kN이 되었다. 이 연구의 실험에서 최대 하중은 띠철근 수가 많을수록 고온 노출면이 적을수록 크게 나타났지만, 콘크리트 실험체의 고온 수열 후 경도가 약하기 때문에 가력 부위가 완전히 압착될 때까지는 그래프가 변형도 연화특성을 보여주고 있다.

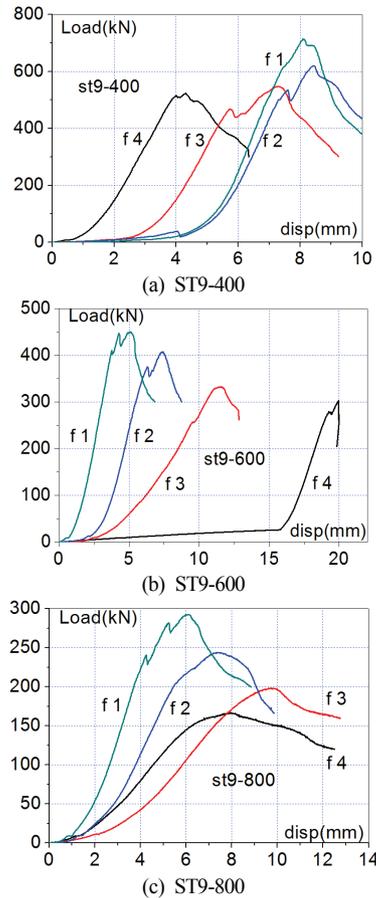


Fig. 17. Load-displacement curves depending on different heating faces with ST9 type specimen

5. 결론

이 연구에서는 고온을 받은 콘크리트에서 횡방향 철근의 구속 및 손실강도 보상 효과를 정량적으로 규명하기 위하여 띠철근의 간격과 가열면 수를 변수로 한 내화성능 실험과 일축 압축실험을 수행하였으며, 그 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 기둥 실험체의 가열면 수가 클수록 잔존강도 감소비가 커졌다. 예로 600℃ 가열 시를 살펴보면 ST5계열의 1면 노출의 ST5-1의 잔존강도는 60%인데 4면 노출인 ST5-4는 40%가 된다. ST9계열도 ST9-1은 62%인데 반하여 4면 노출인 ST9-4는 42%의 잔존강도가 남아 1면 노출보다 20%의 낮은 잔존강도를 보였다.
- 2) 기둥 실험체의 가열면 수가 많아질수록 변형률은 커졌는데, 띠철근 5개 4면 가열인 ST5-4는 1면 가열인 ST5-1 보다

600℃와 800℃ 가열실험 모두에서 약 3배의 변형률을 보였고, 띠철근 9개 4면 가열인 ST9-4 실험체는 ST9-1보다 약 2배의 변형률이 나타났다.

- 3) 온도별 실험체 탄성계수를 비교해보면, 고온 노출 면 수가 많은 기둥이 수열온도 증가에 따라 탄성계수 감소율이 크게 나타나고, 횡철근비가 크면 수열온도 증가에 따라 탄성계수 감소율이 작게 나타났다. 이로부터 기둥 위치와 횡철근비 등이 내화설계나 화재 안전진단 시 고려되어 합리적인 내화성능 평가가 이루어져야 할 것으로 여겨진다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 남서울대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

References

Arioz, O. (2007). Effect of elevated temperatures on properties of concrete, *Fire Safety Journal*, **42(8)**, 516–522.

Choi, K.H., Lee, J.W. (2011). Effect of high temperature on mechanical properties of confined concrete with lateral reinforcement, *Journal of the Korean Institute of Structural Maintenance and Inspection*, **16(1)**, 213–220 [in Korean].

Dos Santos, J.R., Branco, F.A., Brito, J. (2002). Assessment of concrete structures subjected to fire, *Magazine of Concrete Research*, **54(3)**, 203–208.

Kim, S.S. (2018). *Structural Design of Reinforced Concrete*, Munundang, 307–312 [in Korean].

Khoury, G.A. (1992). Compressive strength of concrete at high temperatures: a reassessment, *Magazine of Concrete Research*, **44(161)**, 291–309.

Wu, B., Su, X., Li, H., Yuan, J. (2002). Effect of high temperature on residual mechanical properties of confined and unconfined high-strength concrete, *ACI Material Journal*, **99(4)**, 399–407.

횡방향 철근으로 구속된 철근콘크리트 기둥의 화재 노출조건에 따른 내화성능

이 연구에서는, 기둥 횡방향 철근의 화재 후 잔존 역학적 특성 규명 연구의 일환으로, 횡철근비와 기둥의 고온 노출면 수차이에 따른 횡방향 철근의 손실강도 보상효과를 잔존 압축강도, 변형률 및 탄성계수와 하중-변위 곡선의 상대적 비교분석을 통해 규명하였다. 실험변수로 띠철근의 간격과 고온 노출면 수를 변수로 한 실험체를 제작하여 가열실험을 수행하였다. 이때 전기로 온도를 400℃, 600℃ 및 800℃로 설정하여 13,33℃/분의 속도로 가열하고 2시간동안 그 온도를 유지시켰다. 냉각된 실험체에 대해 응력-변형률 곡선을 구하기 위한 압축실험을 수행하고, 이로부터 탄성계수, 잔존 내력 및 변형률 등의 잔존 역학적 특성을 분석하였다. 실험결과, 고온 노출 면이 많은 기둥이 수열온도 증가에 따라 탄성계수 감소율이 크게 나타나고, 횡철근비가 크면 수열온도 증가에 따라 탄성계수 감소율이 작게 나타났는데, 이로부터 기둥위치와 횡철근비 등이 내화설계나 화재 안전진단 시 고려되어 합리적인 내화성능 평가가 이루어져야 할 것으로 여겨진다.