



화해를 입은 실물크기 보통강도 RC 기둥의 거동

이치돈^{1)*} · 신영수²⁾ · 홍성걸²⁾ · 이경구³⁾ · 이승환¹⁾

¹⁾ 중앙대학교 건축공학과 ²⁾ 이화여자대학교 건축학과 ³⁾ 서울대학교 건축학과 ⁴⁾ 방재시험연구원

(2003년 7월 3일 원고접수, 2003년 10월 30일 심사완료)

Fire Damaged Behavior of Real Sized Normal Strength RC Columns

Chadon Lee^{1)*}, Yeong-Soo Shin²⁾, Sung-Gul Hong³⁾, Kyung-Ku Lee⁴⁾, and Seung-Whan Lee¹⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Chung-Ang University, Ansong, 456-756, Korea

²⁾ Dept. of Architecture, Ewha womans University, Seoul, 120-750, Korea

³⁾ Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

⁴⁾ Fire Insurance Laboratories, Yejoo, 469-880, Korea

(Received July 3, 2003, Accepted October 30, 2003)

ABSTRACT

Experiments were performed for the real sized 12 reinforced concrete columns of 350 x 350 x 3360 mm with normal concrete in order to observe the fire-damaged behavior of these columns. Columns were heated according to the ISO heating curve. Main experimental parameters were: magnitude of axial load, heating time, cover thickness, and eccentricity. Effects of these parameters on the axial expansion and contraction, rotation, buckling, ISO fire resistance, and structural stability were experimentally quantified. It has been observed that the contraction rate of axial deformation was affected mostly by the duration of heating time and buckling of reinforcement or member by the magnitude of axial load, duration of heating time, cover thickness and eccentricity in order. Based on the experimental observations, ISO fire resistance criteria were qualitatively criticized.

Keywords : experiments, reinforced concretes columns, heating time, ISO fire resistance

1. 서 론

화해를 입은 콘크리트구조물의 구조적 거동은 재하하중의 크기, 가열 시간, 피복 두께, 편심여부, 콘크리트 강도, 함수율 등에 의하여 영향을 받는다¹⁻³⁾. 특히 건축에서 구조부재로서 이용되는 기둥의 경우에는 하중을 지지하는 상태에서 화재의 영향을 받으므로 재료 실험만의 결과를 토대로 화해를 입은 기둥의 구조적 거동을 정확히 예측할 수 없다. 이러한 이유 때문에 선진 외국에서는 실제건축에서와 유사한 지지조건 하에서의 철근콘크리트 기둥에 대한 실험 및 연구가 이루어져 왔다³⁻⁶⁾. 피복 두께, 가열 시간, 단면 크기, 구속 조건, 하중재하 속도, 편심 여부, 철근비, 함수율 등 다양한 변수들에 대한 내화성능의 관계에 대한 연구가 진행되었다³⁻⁹⁾. 국내에서는 주로 재료적 관점에서 화재피해를 입은 콘크리트의 역학적 거동을 규명하는 연구가 수행되어 왔다. 국내의 경우, 내부온도분포와 열응력분포^{10,11-13)}, 피복 두께와 내화성의 관계, 급속냉

각에 대한 화재피해콘크리트 물성, 화해를 입은 철근콘크리트 구조부재의 강도 검사 및 내력 평가 그리고 화재피해를 입은 구조부재에 관한 연구 등으로 요약된다^{2,11-13)}. 철근콘크리트 기둥에 대한 연구는 축소모형 및 실물크기 시험체에 대한 실험연구와 이론연구로 진행되었으나 가력 상태에서의 실물크기의 시험체에 대한 실험은 그 중요성에 비하여 국내의 경우 거의 없는 상태이다.

대개 일반적인 화재의 경우, 그 지속시간이 30분에서 2시간 정도로서 시간적으로 단기적인 화해를 입는 경우가 많다. 그러나 국·내외적으로 이러한 단기 화해에 의한 철근콘크리트 기둥의 거동에 대한 실험연구는 거의 없는 실정이다. 한편, 철근콘크리트 구조는 화재에 대하여 내화성이 비교적 우수한 것으로 알려져 왔으며 단면의 크기와 피복두께의 제한만으로 내화구조로 인정하고 있다^{4,17)}. 그러나 철근콘크리트구조는 피복두께, 단면의 크기 이외에도 콘크리트의 강도, 사용 골재의 종류, 콘크리트 내 함수율, 하중의 종류와 크기, 철근량, 화재 노출 시간 등 여러 가지 변수들에 의해 내화성능이 변하기 때문에 단순한 피복두께와 단면크기의 제한은 구조적인 측면에서의 정확한 제한이라고 볼 수 없다¹⁶⁾. 본 연구에서는 상기와 같은

*Corresponding author

Tel : 031-670-3346 Fax : 031-675-6489

E-mail : cdlee@cau.ac.kr

배경 하에서 실험을 통하여 단기 화해에 따른 실물크기의 보통콘크리트 철근콘크리트 기둥의 변화에 대한 기본적인 실험 데이터를 수집하고자 하였다. 또한 주요 변수로서 축하중의 크기, 편심여부, 피복두께, 가열시간 등이 철근콘크리트 기둥에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하고자 하였다. 이와 함께 ISO 기준에서 제시한 내화기준에 대한 정성적인 평가도 실시하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험변수

실험변수로는 재하하중의 크기 (637.4 kN, 372.7 kN), 가열시간(1,2,3시간 및 ISO 기준에 따른 내화력 상실 시점까지의 소요시간 (In)), 피복두께 (40 mm, 50 mm), 편심의 유무 (편심, e=0 mm, 35 mm)이다. 기존문헌^{3,5)} 등에 의하면, 내화 실험시, 기둥 시험체에 가하는 축하중의 크기는 기둥 최대 내력의 4%~93% 정도의 하중 크기를 적용하고 있다. 본 실험에서는 2층 건물의 내부기둥을 대상으로 하였으며 2층 및 1층 내부 기둥이 부담하는 계수하중 372.7 kN 와 637.4 kN 을 재하하중의 크기로 하였다. 이 축력을 기준으로 기둥단면 및 배근을 결정하였다. 가열시간은 ISO 기준의 3시간에 비하여 단시간인 1시간 또는 2시간을 주 가열시간으로 하되 2개의 시험체에 관하여는 3시간 및 ISO 기준에 따른 내화력 상실 시점까지의 가열시간을 설정하였다. 피복두께는 콘크리트 구조설계기준¹⁷⁾에서 제시한 값들을 중심으로 결정하였다. 편심의 크기는 가열로의 실험여건을 고려하여 산정되었다. 편심에 의한 모멘트는 축하중이 작은 경우 13.0 kN·m, 축하중이 큰 경우에는 22.4 kN·m 이다.

2.2 재료

Table 1은 시험체에 사용된 콘크리트의 배합비를 나타낸다. 콘크리트에 사용된 모래는 세척사(해사)로서 비중은 2.60, FM은 2.94이며 골재의 비중은 2.64이다. AE감수제는 표준형(리그넌계)로서 시멘트 중량의 0.5%를 사용하였다. 28일 콘크리트 강도는 평균 24.5 MPa 이다. 기둥 시험체의 주철근 및 띠철근의 항복강도는 $f_y = 392 \text{ MPa}$ 이고 주철근은 D22, 띠철근은 D10을 사용하였다.

Table 1 Mix proportions of concrete

W/C	S/A	Unit weight of materials (kg/m ³)					
		water	portland cement	fly ash cement	sand (specific gravity 2.60)	25 mm gravel (specific gravity 2.64)	AE water reducer
51.2	49.8	140	315	27	913	893	1.71

2.3 기둥 시험체

전체 12개의 시험체의 형상 및 배근 내용상에 관하여는 Table 2 및 Fig. 1에 정리하였다. Table 2의 시험체 명칭은 고찰하고자 하는 변수들의 영향에 따라 다음과 같이 명명되었다; $RCt_cP_iP_mh_f$ 에서 RC:철근콘크리트 기둥, t_c :피복두께 (5=50 mm, 4=40 mm), P_i :하중종류 (C=중심축하중, E=편심하중), P_m :축하중 크기 (L=축하중 637.4 kN, S=축하중 372.7 kN), h_f :가열시간 (1=1시간, 2=2시간, 3=3시간, In=ISO 내화 기준에 따른 내화력 상실 시점까지 가열). Fig. 1에는 기둥 단면에 설치한 열전대의 위치와 번호를 나타내었다. 열전대는 30x30x360 mm 모르타르 직육면체를 제작한 후, 이를 콘크리트 타설 전에 기둥 배근에 고정하였다. 열전대는 이 직육면체 면에 고정하여 콘크리트와 다른 이물질을 열전대의 고정대로 사용함에 따른 열전도의 부정확성을 최소화하도록 하였다. 단면 내부의 상세한 온도 변화를 기록하기 위하여 RC4CLIn 및 RC5CL2 시험체에 한하여 대각선 및 중심선 방향으로 각각 7개의 열전대를 설치하였으며 철근에는 주철근의 외부 및 내부에 각각 1개씩 설치하였다. 상기 2개의 시험체를 제외한 나머지 시험체에는 콘크리트의 단면 내부의 온도추적을 위하여 기둥길이의 중간부분에 3개, 철근의 온도를 추적하기 위하여 주철근의 바깥쪽에 1개의 열전대를 설치하였다. 콘크리트는 공칭강도 20.6 MPa, 슬럼프 10 cm 인 레미콘을 사용하여 시험체를 제작하였으며, 1주일간 양생 후 거푸집 탈형을 한 후 화재 실험을 위해 3개월간 양생을 하였다. 가열을 위한 기둥 양단의 지지형태는 KS F 2257-1, KS F 2257-7^{18,19)}의 규준에 따라 힌지로 고정하였다. 편심이 있는 경우에는 가열로의 가열판의 중심축선과 편심거리(35 mm)만큼 기둥을 빗대어 설치하여 편심이 가하여 지도록 하였다(Fig. 1).

2.4 가열곡선

KS, ISO, ASTM 에서 제시한 가열곡선은 Fig. 2에서 나타나듯이 거의 동일한 형태를 띠고 있다. 본 실험연구에서는 ISO²⁰⁾에서 제시한 가열곡선에 따라 시험체를 가열하였다.

2.5 실험방법

시험체 가열은 다음과 같은 순서로 진행되었다.

- 1) 가열로에 기둥을 설치하기 전에 기둥 양단에 두께 20 mm 강판으로 제작된 직경 560 mm와 770 mm의 단열판을 기둥 상단과 하단에 설치한다.
- 2) 단열판 외부에 제작된 직사각형의 강제 힌지를 볼트로

연결한 후, 기둥 양단의 단열판에 접한 기둥 하부에 유리섬유 보드를 대어 단열판과 양단지점 한지에 열이 전달되지 않도록 단열시킨다.

- 3) 크레인을 이용하여 가열로에 기둥을 설치한 후, 열전대를 automatic data acquisition system과 연결한다.
- 4) 기둥에 축하중을 가하고 축하중이 소정의 값에 도달하면 ISO 가열곡선에 따라 가열로 내부의 온도를 상승시킨다.

5) 가열을 하는 동안 가열로에 장착된 내부 관찰용 창구를 통해 폭열시간 및 폭열의 정도, 잉여수의 누출, 좌굴 등을 육안 관찰한다. 좌굴크기는 가열 후 냉각된 상태에서 재축방향에 대한 수직방향으로의 최대 횡변위를 측정하여 기록하였다. 또한 automatic data acquisition system을 통하여 가열시간과 가열로 내부온도 변화에 대한 시험체의 온도변화 및 길이변화에 대한 data를 수집한다.

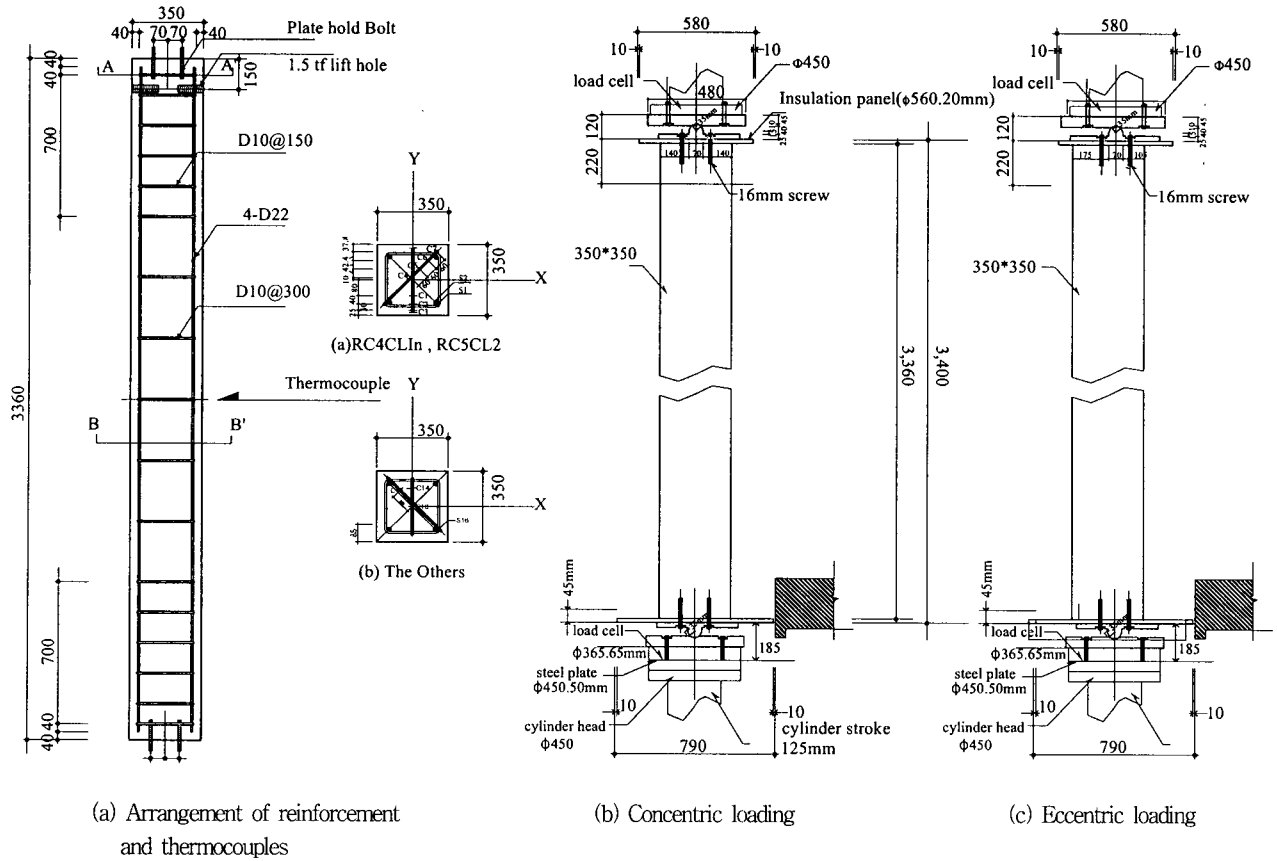


Fig.1 Column test specimens and their loading schemes

Table 2 Experimental parameters of the column specimens

No.	Names	Cover thickness (mm)	Eccentricity (mm)	Loads			Heating time (min)	
				Axial load (kN)	$\frac{\bullet}{\square}$	Moment (kN · m)	Planned	Exposed
1	RC4ES1	40	35	372.7	0.17	13.0	60	60
2	RC5CS2	50	-	372.7	0.17	-	120	120
3	RC4CS1	40	-	372.7	0.17	-	60	60
4	RC4CL1	40	-	637.4	0.29	-	60	60
5	RC4EL3	40	35	637.4	0.29	22.4	180	140
6	RC5EL3	50	35	637.4	0.29	22.4	180	180
7	RC4CLIn	40	-	637.4	0.29	-	*	207
8	RC5CL2	50	-	637.4	0.29	-	120	120
9	RC5ES1	50	35	372.7	0.17	13.0	60	60
10	RC4CS2	40	-	372.7	0.17	-	120	120
11	RC4EL1	40	35	637.4	0.29	22.4	60	60
12	RC4CL2	40	-	637.4	0.29	-	120	120

* Continued heating until column fails by the ISO fire resistance standard

** $P_n = 0.8(0.85f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st})$

- 6) 가열의 종료는 미리 정한 시간이 경과되었거나 시간이 경과되지 않았어도 ISO 기준에 따른 내화력 상실기준에 도달한 경우에 실험을 종료한다.
- 7) 가열이 종료된 후 고열의 가열로 온도가 식을 때까지 약 18시간 이상 경과하기를 기다린 후 시험체를 해체한다.

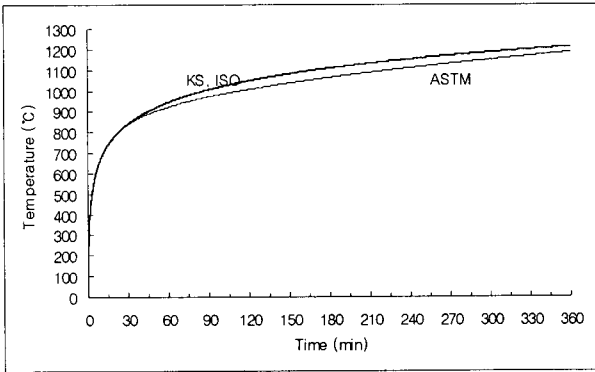


Fig. 2 KS, ISO and ASTM heating curves



Fig. 3 Furnace and a fire damaged column after 60 minutes of heating

해체 후에는 야외의 야적장에 존치한 상태에서 실험 후 관찰을 실시하였다. 실험 후 화해를 입은 기둥 시험체에 대하여 외부적으로 나타난 손상정도를 육안으로 관찰하고 기록하였다. Fig. 3은 가열실험 후 가열로 내의 손상된 기둥 시험체를 나타내고 있다.

3. 실험결과

본 절에서는 각 시험체별로 실험 중 관찰된 초기 폭열의 시작 시간, 위치 및 정도, 기둥길이 증가의 시간, 총 증가길이, 증가율, ISO 기준에 따른 내화력 상실을 측정하기 위한 기둥길이 축소에 대한 초기시간, 최종 축소길이, 화해 후 기둥의 좌굴 정도 및 단면 내 온도변화 등에 대한 실험결과를 정리하였다. Table 3에 실험 관찰된 내용들을 정리하였다.

3.1 잉여수 누출 및 폭열

RC4CS1의 시험체를 제외하고는 모든 시험체가 가열 후 잉여수가 누출되는 것이 관찰되었다. RC4CS1 시험체를 제외한 모든 시험체에서 가열시작 후 7분~20분(화로 내 가열온도 615°C~732°C) 사이에 국부적인 초기폭열이 발생하였으나 시간이 경과함에 따른 더 이상의 폭열은 발생하지 않았다. 이후 균열과 단면의 손상으로 인한 박리현상과 부재의 좌굴현상이 시험체별로 일부 관찰되었다 (Table 3).

3.2 ISO 내화기준 만족도

ISO 834(10.2.1)에 의하면 재축방향으로의 기둥 축소길이 기둥길이(h)/100mm에 이르거나 지지 단부에서의 기둥 회전 길이가 $3 \times h/1000 \text{ mm/min}$ 를 초과하게 될 때

Table 3 Results of heating test

No.	Name	Exposed time (min)	Spalling			Expansion			ISO standard		Member lateral buckling (mm)	
			Initiating time (min)	Location	Range (mm)	Total time (min)	Total elongated length (mm)	Rate (mm/min)	Contraction		Directions	
									Initiating time (min)	Final contracted length (mm)	x-x	y-y
1	RC4ES1	60	14	surface	400~500	60	4.3	0.0717	-	-	0	0
2	RC5CS2	120	10	edge	700~800	120	6.9	0.0575	-	-	6	0
3	RC4CS1	60	-	-	-	60	4.5	0.0750	-	-	0	0
4	RC4CL1	60	14	surface	200	60	1.9	0.0317	-	-	26	20
5	RC4EL3	140	15	surface	3000	80	1.9	0.0217	80	54.2	270	0
6	RC5EL3	180	7	edge	300~400	114	1.1	0.0124	120	4.2	27	12
7	RC4CLIn	207	20	edge	400~500	174	3.8	0.0221	174	52.8	178	0
8	RC5CL2	120	12	edge	600	120	4.5	0.0375	-	-	0	0
9	RC5ES1	60	12	edge	300~400	60	3.2	0.0533	-	-	0	0
10	RC4CS2	120	20	edge	800	120	13.1	0.1092	-	-	0	0
11	RC4EL1	60	15	surface	500~600	60	2.5	0.0417	-	-	0	0
12	RC4CL2	120	20	edge	400~500	120	4.4	0.0367	-	-	30	0

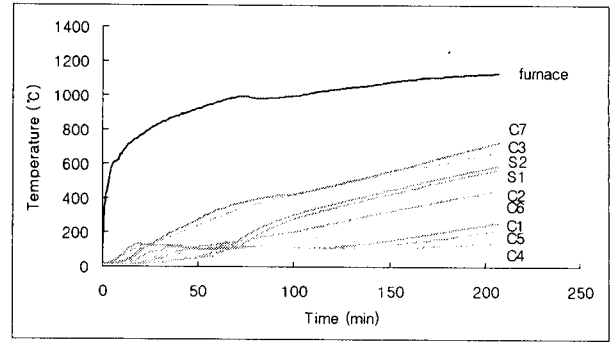
내화력을 상실하는 것으로 정의하고 있다²⁰⁾. 본 실험에서는 기둥의 시간에 대한 회전률에 대한 측정은 불가능하였으나 기둥 축소길이 변화량을 중심으로 ISO 기준을 적용한 결과, 중심축하중을 가한 피복두께 40mm의 RC4CLIn 시험체의 경우, 3시간 27분에서 내화력을 상실하였으며 편심하중을 가한 피복두께 40mm의 RC4EL3 시험체는 2시간 20분이 경과한 후에 내화력을 상실하였다. 한편 피복두께 50mm인 RC5EL3 시험체는 가열시간 3시간 동안 ISO내화기준에 의한 내화력을 유지하였다. 상기의 시험체를 제외한 나머지 시험체는 최대 1시간 또는 2시간 가열한 경우로서 이들 모든 시험체는 ISO 내화기준에 따른 내화력을 확보하고 있음이 관찰되었다.

3.3 기둥 단면 내 온도변화

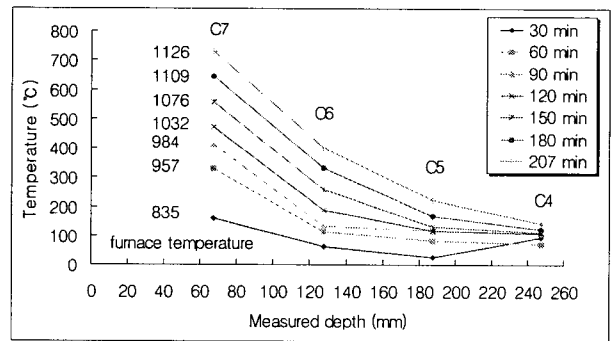
Fig. 4는 RC4CLIn 기둥의 가열로의 온도변화에 따른 단면 내 온도분포를 나타내고 있다. 가열로의 온도 변화가 초기에 급격한 기울기로 상승함에 비하여 기둥 단면 내부 온도는 완만한 속도로 상승하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(a)의 S1 및 S2는 기둥의 주철근 온도 변화를 나타내고 있다. 주철근의 온도(게이지 S1과 S2의 온도)는 주철근 주위의 콘크리트 온도(게이지 C1과 C3에 의해 측정된 온도) 사이의 값을 나타내고 있으며 가열시간에 따른 온도의 증가율은 초기영역을 제외하고는 콘크리트 온도증가율과 유사하게 나타나고 있다. Fig. 4(b)에 의하면 ISO 가열곡선에 따라 기둥을 가열한 경우, 가열 후 초기 30분 동안의 기둥 단면 내 온도가 200°C 이하임을 알 수 있다. 따라서 고온수열콘크리트의 성상에 관한 실험적 연구¹¹⁾의 결과를 적용하면 기둥의 잔존압축강도와 잔존탄성계수가 원래 값의 99% 및 85%가 회복될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 시간이 경과함에 따른 단면 내 동일한 깊이의 콘크리트 온도변화는 거의 비례적으로 증가함을 보이고 있으며 특히 3시간이 경과한 후의 단면 내 온도는 심부에서 120°C 정도, 그리고 표면근처에서 650°C 정도의 온도로 가열되므로 물성저하로 인한 상당한 기둥 내력의 저하가 예측된다. Fig. 5는 RC5CL2 기둥의 가열로의 온도변화에 따른 단면 내 온도분포를 나타내고 있다. RC4CLIn 기둥과 비교하여 피복두께를 40mm에서 50mm로 10mm 증가시킨 경우이다. 전체적으로 RC4CLIn 기둥과 유사한 온도분포를 나타내고 있다.

3.4 비교 고찰

본 절에서는 축하중, 가열시간, 피복두께, 편심에 대한 영향을 서로 다른 시험체의 실험결과들을 비교함으로써 고찰하고자 하였다. 화해를 입은 기둥에 대한 구조적 기

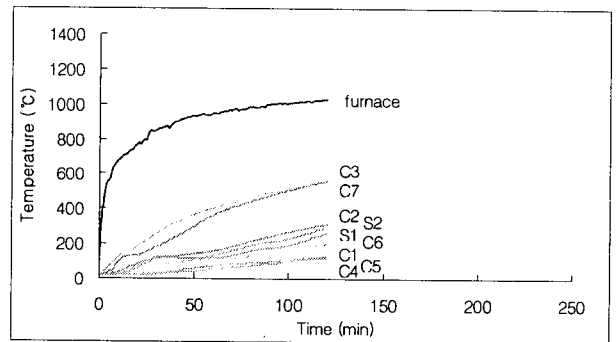


(a) Time-temperature relations

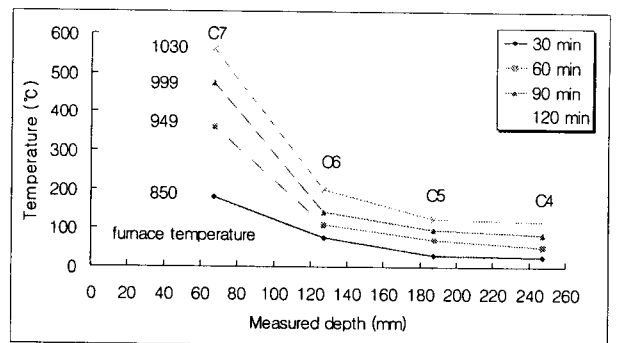


(b) Temperature variations at different column depths

Fig. 4 Temperature distributions in RC4CLIn at different furnace temperatures



(a) Time-temperature relations



(b) Temperature variations at different column depths

Fig. 5 Temperature distributions in RC5CL2 at different furnace temperatures

능 손상의 평가기준 또는 방법이 현 기준에 제시되어있지 않은 점을 고려해 기둥의 주철근 또는 부재 자체가 좌굴을 일으킨 경우, 구조적 기능에 손상이 왔다고 판단하였다.

3.4.1 축하중

1) RC4CS1 vs. RC4CL1

피복두께 40mm와 1시간 가열한 시험체가 서로 다른 축하중(372.7 kN, 637.4 kN)을 받는 경우이다. 두 시험체는 모두 길이방향으로 팽창하였으나 비교적 큰 압축력을 받은 RC4CL1의 경우, 그 팽창길이가 상대적으로 적게 관찰되었다(Fig. 6). 그러나 비교적 큰 압축력을 받은 RC4CL1의 경우, 기둥 재축방향에 대하여 직각방향으로 횡좌굴이 26mm 발생하였다(Table 3). RC4CL1의 경우, ISO 내화기준은 만족하였으나 구조적 기능은 부분적 손실을 가져왔다 할 수 있다.

2) RC4CS2 vs. RC4CL2

피복두께 40mm와 2시간 가열한 시험체가 서로 다른 축하중(372.7 kN, 637.4 kN)을 받는 경우이다. 앞의 경우와 마찬가지로 큰 압축력을 받는 RC4CL2 시험체의 팽창이 RC4CS2의 경우보다 적게 관찰되었다. 더 큰 압축력을 받은 RC4CL2의 경우, 기둥 재축방향에 대하여 직각방향으로 횡좌굴 30mm 발생하였다(Table 3). 이 기둥의 경우, ISO 내화기준을 만족하나 구조적 기능은 부분적 상실을 가져왔다 할 수 있다.

3) RC5CS2 vs. RC5CL2

피복두께 50mm와 2시간의 가열한 시험체가 서로 다른 축하중(372.7 kN, 637.4 kN)을 받는 경우이다. 앞의 경우와 마찬가지로 큰 압축력을 받는 RC4CL2 기둥 시험체의 팽창이 RC4CS2의 경우보다 그 팽창길이가 적게 관찰되었다. 이들 기둥들의 경우에는 팽창길이가 RC5CS2의 경우 6.9mm, RC5CL2의 경우 4.5mm 발생하여 피복두께가 40mm인 기둥들의 팽창길이(RC4CS2 : RC4CL2 = 13.1 mm : 4.4mm)에 비하여 그 차이가 미소하게 발생하였음을 알 수 있다. RC5CL2의 기둥에는 좌굴이 발생하지 않았으나(Table 3) 더 작은 압축력을 받은 RC5CS2의 경우에는 횡좌굴이 6mm 정도 발생하였다. RC5CS2 기둥의 경우, ISO 기준을 만족하나 구조적 기능은 부분적 상실을 가져왔다 할 수 있다.

4) RC4ES1 vs. RC4EL1

피복두께 40mm이고 1시간 가열한 시험체가 서로 다른 축하중(372.7 kN, 637.4 kN) 및 편심하중(13.0 kN·m, 22.4 kN·m)을 받는 경우이다. 큰 압축력을 받는 RC4EL1 시험체의 경우에 그 팽창길이가 적게 관찰되었으며 두 시험체 모두 좌굴현상이 관찰되지 않았다. 따라

서 주어진 하중조건에 대하여 두 시험체 모두 구조적 기능의 손상 없이 안정된 거동을 확보하고 있다.

3.4.2 가열시간

1) RC4CS1 vs. RC4CS2

피복두께 40mm, 중심 축하중 372.7 kN 을 받는 기둥이 1시간 및 2시간 가열된 경우이다(Fig. 7). 두 시험체 모두 시간이 경과함에 따라 재축방향으로 팽창이 지속되었으나 부재의 좌굴이나 철근의 좌굴이 관찰되지 않았다. 따라서 본 시험체의 경우, ISO 기준에 따른 2시간 내화성능을 확보하고 있을 뿐 아니라 주어진 하중에 대한 구조적인 안정성도 만족하고 있다고 판단된다.

2) RC4CL1 vs. RC4CL2 vs. RC4CLIn

피복두께 40mm, 중심축하중 637.4 kN 을 받는 시험체를 1시간, 2시간, 그리고 ISO 기준에 따른 내화력 상실이 일어날 때까지 가열한 경우이다. 모든 경우 가열 후 2시간 경과 시까지 팽창하였다(Fig. 7). 시험체 RC4CLIn의 경우, 가열시간이 2시간 54분에 이르러 3.8mm 팽창길이를 최대길이를 하여 3시간 27분까지 완만한 수축을 보이나 이후 급격한 수축이 발생하였다. RC4CLIn 시험체의 경우, 수축변위는 52.8mm로서 최대팽창길이 3.8mm보다

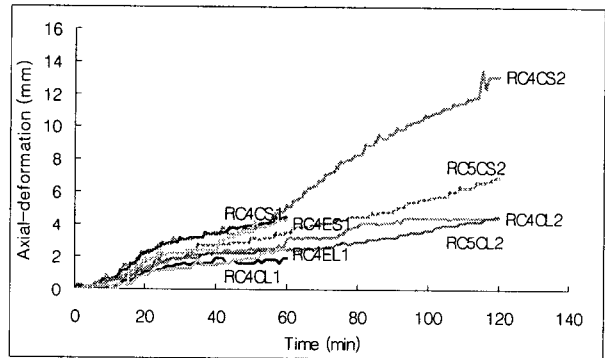


Fig. 6 Time vs. axial-deformation curves under different axial loads

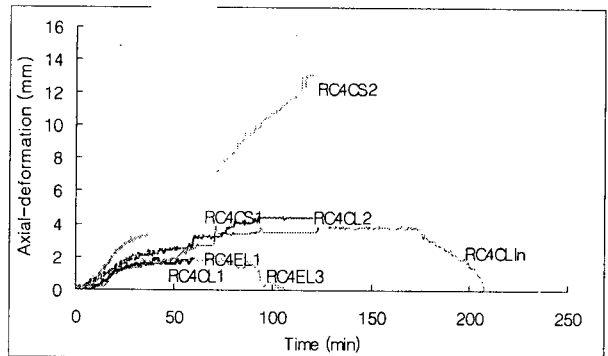


Fig. 7 Time vs. axial-deformation curves for different heating time

훨씬 큰 값으로 수축하였다(Table 3). 이 수축률은 매우 큰 값으로 ISO 기준의 내화기준을 만족하지 못하였다.

RC4CL2 시험체의 경우, 재축방향에 대한 직각방향으로 횡좌굴이 30mm 정도 발생하였으며 RC4CLn 시험체의 경우, 178mm의 심한 좌굴이 발생하였다(Fig. 8). 따라서 RC4CLn 시험체의 경우, ISO 기준에 따르면 주어진 하중에서 최대 3시간 27분 정도의 내화성능을 가짐을 알 수 있으나 구조적 성능면에서는 좌굴이 발생함으로 구조적 측면에서의 내화시간이 이보다 작을 수 있음을 알 수 있다.

3) RC4EL1 vs. RC4EL3

RC4EL1 시험체의 경우, 가열 1시간 후 실험을 종료할 때까지 팽창이 지속되었다. 최대 팽창길이는 2.5mm로 관찰되었다(Fig. 7). RC4EL1 시험체의 경우에는 팽창만이 가열시간 1시간 동안 관찰되었으며 RC4EL3 시험체의 경우에는 1시간 20분(80분)이 경과한 때에 최대 팽창되었다가 이후 60분동안 54.2mm의 수축이 발생하였다.

RC4EL1 시험체의 경우에는 좌굴현상이 나타나지 않았으나 RC4EL3 시험체의 경우에는 재축방향에 대한 직각방향으로 횡좌굴이 270mm 정도 발생하였다. 따라서 RC4EL 시험체의 경우, ISO 기준에 따르면 주어진 하중에서 최대 2시간 20분 정도의 내화성능을 가짐이 관찰되었으며 이 시간동안 좌굴 발생으로 인한 구조적 성능도 저하됨이 관찰되었다.

3.4.3 피복두께

1) RC4ES1 vs. RC5ES1

가열시간은 1시간이고, 비교적 작은 편심하중을 받는 기둥으로서 서로 다른 피복두께(40mm 및 50mm)를 갖는 경우이다. 최대 팽창길이는 RC4ES1과 RC5ES1의 경우 각각 4.3mm 및 3.2mm로 관찰되었다(Fig. 9, Table 3).

RC4ES1 시험체의 경우에는 좌굴현상이 나타나지 않았으나 RC5ES1 시험체의 경우에는 폭열로 인하여 피복 콘크리트가 일부 탈락되어 철근이 노출됨으로 말미암아 국부적으로 노출된 철근이 좌굴하였음이 관찰되었다. 비록 두 기둥 모두 ISO의 1시간에 대한 내화기준을 만족하나 RC5ES1 시험체의 경우에는 피복콘크리트의 탈락에 의한 국부적인 철근의 좌굴이 발생함으로 인하여 구조적인 기능의 부분적 상실을 가져왔다고 할 수 있다.

2) RC4CS2 vs. RC5CS2

가열시간은 2시간이고, 비교적 작은 축하중(372.7 kN)을 받는 기둥으로서 서로 다른 피복두께 (40mm 및 50mm)를 갖는 경우이다. 두 시험체 모두 실험종료 시까지 팽창이 지속되었으며 최대 팽창길이는 RC4CS2와 RC5CS2 시험체의 경우, 각각 13.1mm 및 6.9mm로 관찰되었다(Fig. 9).

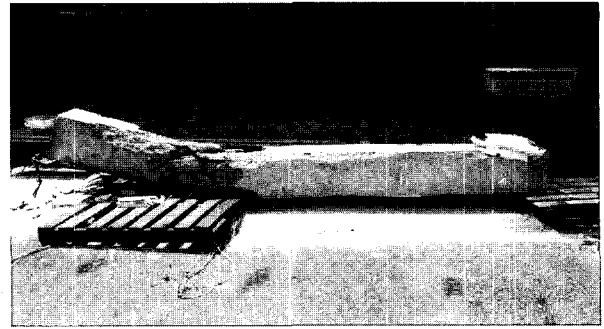


Fig. 8 Buckling of fire-damaged column of RC4CLn with 207 minutes of heating

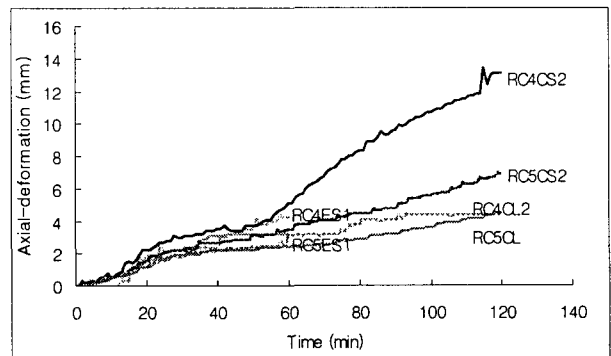


Fig. 9 Time vs. axial-deformation curves with different cover thicknesses

RC4CS2 시험체의 경우에는 좌굴현상이 나타나지 않았으나 RC5CS2 시험체의 경우에는 부재축에 직각방향으로 한방향에 대하여 6mm 정도의 부재 좌굴이 발생하였다(Table 3). 두 기둥 모두 ISO의 2시간에 대한 내화기준을 만족하나 RC5CS2 시험체가 부재좌굴을 함으로서 기둥 부재의 구조적인 기능의 부분적 상실을 가져왔다고 할 수 있다.

3) RC4CL2 vs. RC5CL2

가열시간은 2시간이고, 비교적 큰 축하중(637 kN)을 받는 기둥으로서 서로 다른 피복두께(40mm 및 50mm)를 갖는 경우이다. RC4CS2와 RC5CS2 두 시험체의 경우, 가열 2시간 후 실험을 종료할 때까지 팽창이 지속되었으며 최대 팽창길이는 4.4mm 및 4.5mm로 관찰됨으로서 피복두께에 상관없이 거의 유사한 팽창이 발생하였음을 알 수 있다(Fig. 9).

RC5CL2 시험체의 경우에는 부재의 좌굴현상이 나타나지 않았으나 RC4CL2 시험체의 경우에는 30mm 정도의 부재 좌굴이 발생하였다(Table 3). 두 기둥 모두 ISO의 2시간에 대한 내화기준을 만족하나 RC4CL2 시험체가 부재좌굴을 함으로서 기둥 부재의 구조적인 기능의 부분적 상실을 가져왔다고 할 수 있다.

3.4.4 편심

1) RC4CS1 vs. RC4ES1

피복두께 40mm이고 비교적 적은 축하중 또는 편심을 받는 기둥의 화재거동을 비교하였다. RC4CS1과 RC4ES1 두 시험체의 경우, 가열 1시간 후 실험을 종료할 때까지 팽창이 지속되었다(Fig. 10). 최대 팽창길이는 각각 4.5mm 및 4.3mm로서 그 값의 차이가 거의 없었으며 전체적인 구조적 거동에도 큰 차이가 없음이 관찰되었다(Table 3).

2) RC4CL1 vs. RC4EL1

피복두께 40mm이고 비교적 큰 축하중 또는 편심하중

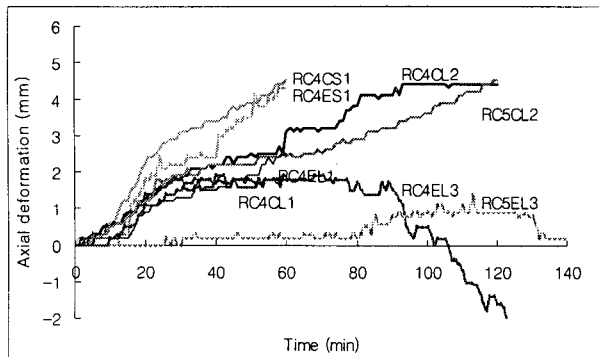


Fig. 10 Time vs. axial-deformation curves with and without eccentricities

을 받는 기둥의 화재거동을 비교하였다. RC4CL1 시험체의 경우, 최대 팽창길이가 1.9mm로서 좌굴이 발생하였으나, RC4EL1 시험체는 종료할 때까지 최대 2.5mm 팽창하였고 좌굴은 관찰되지 않았다(Table 3). 최소 가열시간 1시간동안은 편심이 좌굴에 미치는 영향은 미약하다고 볼 수 있다.

3) RC4CL2 vs. RC4EL3

피복두께 40mm이고 비교적 큰 축하중 및 편심하중을 받는 기둥을 비교, 관찰하였다. RC4CL2 시험체의 경우, 가열 2시간 후 팽창길이는 4.4mm로 관찰되었으나 RC4EL3 시험체의 경우에는 1시간 20분 동안 최대 1.9mm 팽창하였다가 이 후 수축이 진행되었다(Fig. 10). 축하중이 큰 경우에는 팽창길이가 감소함이 관찰되었다. RC4CL2 시험체의 경우에는 2시간 가열동안 수축이 발생하지 않았으나 RC4EL3 시험체의 경우에는 1시간 20분이 경과하여 약 60분간 52.8mm의 급격한 수축이 발생하였다. RC4CL2 시험체의 경우에는 재축방향에 대한 직각 방향으로 한 방향에 대하여 30mm 정도의 좌굴 현상이 발생하였다. RC4EL3 시험체의 경우에는 가열 후 2시간 20분에 이르러 실험이 종료되었으며 이 때 한 방향으로 270mm의 심각한 좌굴이 발생하였다(Table 3). 따라서 피복이 40mm에 비교적 큰 편심 하중을 받는 시험체의 경우에는 단순히 축하중만을 받는 경우와는 달리 ISO 기준에 근거할 경우, 2시간 20분 내화기능을 유지하나 심각한 부

Table 4 Summary of relative effects of main parameters

Parameters			Specimen numbers (percentages)													
			Initial spalling (specimens) (%)		Expansion rate (mm/min)		Contraction rate (mm/min)			ISO fire resistance (%)		Buckling (%)				
												Reinforcement		Member		
Types	Magnitude	No. of specimens	No	Yes	Small (≤0.05)	Large (>0.05)	No	Small (≤0.1)	Large (>0.1)	Pass (≤33.6)	Fail (33.6>)	No	Yes	No	Small (≤50 mm)	Large (>50 mm)
Axial load (kN)	372.7	4	3 (25)**	1,2,10 (75)	10 (25)	1,2,3 (75)	1,2,3,10 (100)	-	-	1,2,3,10 (100)	-	1,3,10 (75)	2 (25)	1,3,10 (75)	2 (25)	-
	637.4	4	-	4,8,11,12 (100)	4,8,11,12 (100)	-	4,8,11,12 (100)	-	-	4,8,11,12 (100)	-	8,11 (50)	4,12 (50)	8,11 (50)	4,12 (50)	-
Heating time (hour)	1	3	3 (33.3)	4,11 (66.7)	4,11 (66.7)	3 (33.3)	3,4,11 (100)	-	-	3,4,11 (100)	-	3,11 (66.7)	4 (33.3)	3,11 (66.7)	4 (33.3)	-
	2	2	-	10,12 (100)	10,12 (100)	-	10,12 (100)	-	-	10,12 (100)	-	10 (50)	12 (50)	10 (50)	12 (50)	-
	3 (140)*	1	-	5 (100)	5 (100)	-	-	5 (100)	-	5 (100)	-	5 (100)	-	5 (100)	-	5 (100)
	In (207)*	1	-	7 (100)	7 (100)	-	-	7 (100)	-	7 (100)	-	7 (100)	-	7 (100)	-	7 (100)
Cover (mm)	40	3	-	1,10,12 (100)	10,12 (66.7)	1 (33.3)	1,10,12 (100)	-	-	1,10,12 (100)	-	1,10 (66.7)	12 (33.3)	1,10 (66.7)	12 (33.3)	-
	50	3	-	2,8,9 (100)	8 (33.3)	2,9 (66.7)	2,8,9 (100)	-	-	2,8,9 (100)	-	8 (33.3)	2,9 (66.7)	8 (33.3)	2,9 (66.7)	-
Eccentricity (mm)	-	3	3 (33.3)	8,12 (66.7)	8,12 (66.7)	3 (33.3)	3,8,12 (100)	-	-	3,8,12 (100)	-	3,8 (66.7)	12 (33.3)	3,8 (66.7)	12 (33.3)	-
	35	3	-	1,5,6 (100)	5,6 (66.7)	1 (33.3)	1 (33.3)	6 (33.3)	5 (33.3)	1,6 (66.7)	5 (33.3)	1 (33.3)	5,6 (66.7)	1 (33.3)	6 (33.3)	5 (33.3)

* Values in () are real heating time(minutes)

** Values in () are percentages

재 좌굴을 동반함으로 인하여 구조적인 기능을 완전히 상실한다고 볼 수 있다.

4) RC5CL2 vs. RC5EL3

피복두께 50mm이고 비교적 큰 축하중 또는 편심하중을 받는 기둥의 화재거동을 비교하였다. RC5CL2 시험체의 경우, 가열 2시간 후 팽창길이는 4.5mm로 관찰되었으나 RC5EL3 시험체의 경우에는 가열 2시간 후 1.1mm 정도 팽창하였다(Fig. 10). 비교적 큰 편심하중이 가하여진 경우에는 축하중만을 받는 기둥에 비하여 동일 시간대에 팽창길이가 적게 발생함이 관찰되었다. RC5CL2 시험체의 경우에는 2시간 가열동안 수축이 발생하지 않았으나 RC5EL3 시험체의 경우에는 가열 후 2시간이 경과한 후에 서서히 수축이 진행되었으며 3시간 후에 실험이 완료된 시에 수축이 4.2mm 정도 발생하였다. RC5CL2 시험체의 경우에는 좌굴이 발생하지 않았으나 RC5EL3 시험체의 경우에는 재축방향에 대한 직각 방향으로 두 방향에 대하여 27mm와 12mm 정도의 좌굴 현상이 발생하였다(Table 3). ISO 기준에 근거할 경우, RC5EL3 시험체는 3시간의 내화성능을 유지하나 부재의 좌굴로 인하여 그 구조적 성능은 일부 상실함이 관찰되었다.

3.4.5 주요 변수들의 상대 영향

Table 4에 축하중, 가열시간, 피복두께, 편심 등에 따라 기둥부재의 초기폭열, 기둥의 신장, 기둥의 축소, ISO 기준에 의한 내화력 확보 여부, 철근 및 부재의 좌굴 등이 발생한 시험체 수와 이에 해당되는 시험체 번호를 나타내었다. 또한 상대적인 발생빈도를 괄호안에 백분율로 나타내었다. Fig. 11은 Table 4에 근거하여 기둥 부재의 팽창률 및 수축률, ISO 내화기준, 철근 및 부재의 좌굴 등에 영향을 미치는 축력, 가열시간, 피복두께, 편심의 상대적인 영향을 나타내었다.

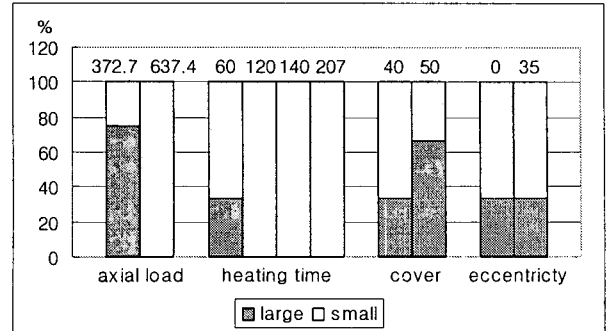
Fig. 11(a)에 의하면 부재의 팽창률은 축력에 의하여 가장 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 즉, 축력이 작은 경우에 더 큰 팽창이 발생한다. 가열시간, 피복두께, 편심정도는 팽창에 대하여 축력보다 덜 민감하게 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig. 11(b)에 의하면 기둥 부재의 수축률은 가열시간이 가장 크게 영향을 미치며 특히 가열시간이 2시간 20분이 상일 경우 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 중심축하중인 경우보다 편심모멘트가 가해진 경우에 기둥의 수축률이 더 발생함을 알 수 있다. 그러나 본 실험에서 적용한 축하중의 크기 및 피복두께는 부재의 수축률에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

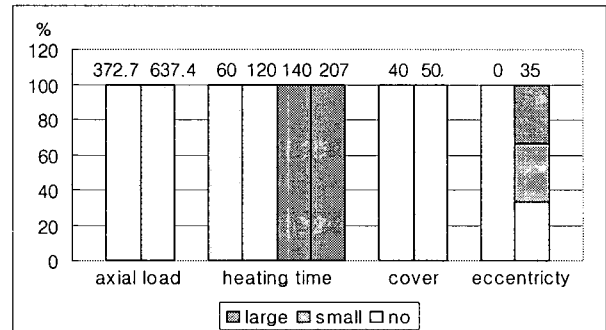
Fig. 11(c)는 기둥부재를 2시간 20분이상 가열할 경우 ISO 내화력을 상실함을 나타내며 편심모멘트가 있는 경우에도 ISO 내화력을 상실함을 나타낸다. 한편, 본 실험

에서 적용한 축하중의 크기 및 피복두께는 ISO 내화력 정도에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

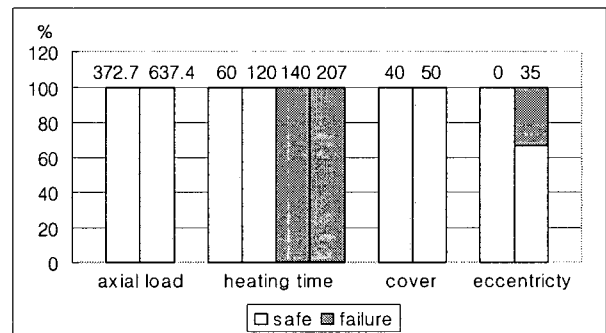
Fig. 11(d)에 따르면 철근의 좌굴은 축하중, 가열시간,



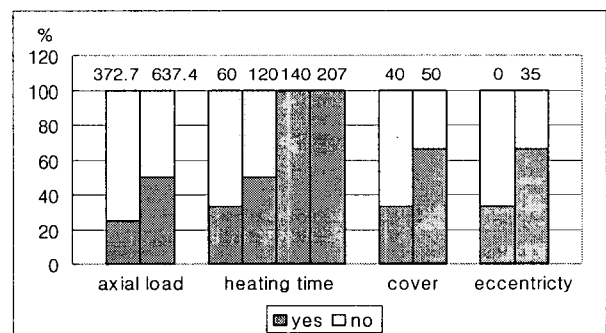
(a) Expansion rate



(b) Contraction rate



(c) ISO criterion



(d) Reinforcement buckling

Fig. 11 Effects of different parameters on different column behaviors related to the fire-related damages (continued)

4. 결 론

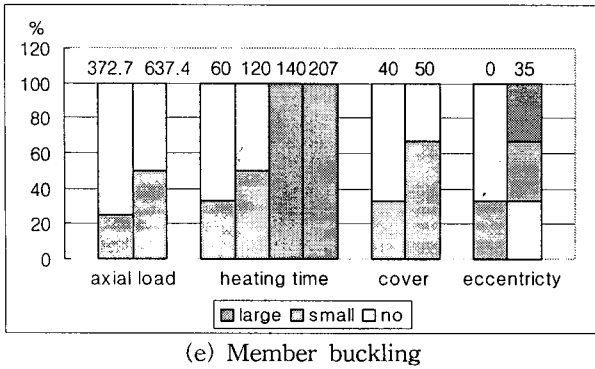


Fig. 11 Effects of different parameters on different column behaviors related to the fire-related damages

Table 5 Relative effects of main parameters on the fire damaged column behavior

Parameters		Axial force	Heating time	Cover thickness	Eccentric loading
ISO fire-resistance criterion		-	O*	-	O
Structural stability	Expansion rate	O	-	O	-
	Contraction rate	-	O	-	O
	Reinforcement buckling	O	O	O	O
	Member buckling	O	O	O	O

* Correlations are observed

피복두께, 편심이 커질수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 특히 가열시간이 2시간 20분이상일 경우, 전체적으로 철근의 좌굴이 많이 발생함을 나타내고 있다. 부재의 좌굴발생 변수는 Fig. 11(e)에 나타난 바와 같이 Fig. 11(d)의 철근의 좌굴을 일으키는 변수와 연관성이 있음을 나타내고 있다. 즉, 축하중, 가열시간, 피복두께, 편심이 커질수록 많이 발생한다. 특히 편심을 갖고 가열시간이 2시간 20분이상일 경우에는 모든 부재에서 좌굴이 발생하였다.

Fig. 11(c)에 의하면 ISO의 내화기준에 준할 경우, 2시간 동안 기둥이 내화력을 유지하고 있다고 판단된 반면, Fig. 11(d), Fig. 11(e)은 1시간 정도의 가열에도 철근 및 부재의 좌굴이 발생하였음을 나타내고 있다. 따라서 ISO 기준은 실제 기둥부재의 구조적 내력에 미칠 수 있는 가열시간의 영향이 부적절하게 반영되어 있음을 알 수 있다. Table 5는 Fig. 11의 결과에 근거하여 정성적으로 축력, 가열시간, 피복두께, 편심 등이 정성적으로 미치는 영향을 상대 평가하여 나타내고 있다. Table 5에 따르면 가열시간 및 편심하중이 전체적으로 가열된 기둥부재에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 축력 및 피복두께 정도가 가열된 기둥부재의 구조적 안정성에 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고 현재의 ISO 내화기준에 그 영향이 적게 반영되고 있음을 고찰할 수 있다.

본 실험연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 본 실험에 적용한 기둥단면의 경우, 가열 후 초기 30분 동안의 기둥 단면 내 온도가 200°C 이하로서 원래값의 99% 및 85% 내에서 기둥의 잔존압축강도와 잔존탄성계수의 회복이 기대된다. 그러나 시간이 경과함에 따라 단면 내 동일한 깊이의 콘크리트 온도변화가 거의 비례적인 증가로 인하여 3시간 이상 ISO 가열곡선에 따른 가열이 지속될 경우, 단면 내 온도는 심부에서 120°C 정도, 그리고 표면근처에서 650°C 정도로 단면을 구성하는 재료의 물성저하로 인한 상당한 기둥내력의 저하가 예측되었다.
- 2) 가열 시 부재의 팽창률은 축력이 작으면 더 발생한다. 가열시간, 피복두께, 편심정도는 팽창에 대하여 축력보다 덜 민감하게 영향을 미친다. 한편, 기둥 부재의 수축률은 가열시간에 가장 큰 영향을 받으며 중심축하중의 경우보다 편심모멘트가 가해진 경우에 기둥의 수축률이 더 발생함을 알 수 있다. 본 연구에서 적용한 축하중의 크기 및 피복두께는 부재의 수축률에 영향을 미치지 않았다.
- 3) 기둥부재를 2시간 20분 이상 가열할 경우 기둥은 ISO 기준에 의한 내화력을 상실하였다. 편심모멘트가 있는 경우에도 일부 기둥의 경우 ISO 내화력을 상실함이 관찰되었다. 본 실험에서 적용한 축하중의 크기 및 피복두께를 갖는 기둥의 경우 ISO 기준에 따른 내화력을 확보하였다.
- 4) 철근의 좌굴은 축하중, 가열시간, 피복두께, 편심이 커질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 철근의 좌굴은 전체적으로 2시간 20분 이상 가열된 기둥부재에서 가장 많이 발생하였다.
- 5) 부재의 좌굴발생은 부재 내 철근의 좌굴을 일으키는 변수와 연관성이 있음이 관찰되었다. 특히 부재의 좌굴은 편심을 갖고 가열시간이 2시간 20분 이상일 경우의 모든 부재에서 발생하였다.
- 6) 일부 기둥의 경우, ISO의 내화기준에 따라 내화력을 유지하고 있다고 판단된 반면, 1시간 정도의 가열에도 철근 및 부재의 좌굴이 발생하였다. 따라서 ISO 기준은 실제 기둥부재의 구조적 내력에 미칠 수 있는 가열시간의 영향이 부적절하게 반영되어 있음을 알 수 있다.
- 7) 실험결과에 따르면 가열시간 및 편심하중이 전체적으로 가열된 기둥부재에 가장 큰 영향을 주는 것으로 관찰되었다. 또한 축력 및 피복두께 정도가 가열된 기둥부재의 구조적 안정성에 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고 현재의 ISO 내화기준에 그 영향이 적게 반영되고 있음을 고찰할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설기술연구원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업 「화재피해를 입은 고강도 및 일반강도 철근콘크리트 부재의 구조적 성능 규명 및 보수」에 관한 산·학·연 공동개발사업으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. [과제번호 : R&D/2001-제안E-04]

참고문헌

1. 강병희, 오창희, “고온수열콘크리트의 성상에 관한 실험적 연구(2)/물리적 성질을 중심으로,” 대한건축학회 논문집, 5권(통권24호), 1989, pp.285~292.
2. 조재열, “고온에 노출된 콘크리트의 잔류압축강도특성에 관한 연구,” 공학석사학위논문, 서울대학교대학원, 1995, pp.34~42.
3. Lin, T. D., Zwiers, R. I., Burg, R. G., Lie, T. T., and McGrath, R. J., “Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns,” PCA Research and Development Bulletin RD101B, Portland Cement Association, 1992, pp.1~26.
4. Lie, T. T. and Allen, D. E., “Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns,” *Division of Building Research National Research Council of Canada Ottawa, Canada*, pp.245~254.
5. Lie, T. T., Lin, T. D., Allen, D. E., and Abrams, M. S., “Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns,” National Research Council Canada Division of Building Research, Canada, 1984, pp.1~20.
6. Lie, T. T., “New facility to determine fire resistance of columns,” Fire Research Section, Division of Building Research, National Research Council of Canada, Ottawa, Ont., KIA 0R6, 1980, pp.551~558.
7. Yamazaki, N., Yamazaki, M., Mochida, T., Mutoh, A., Miyashita, T., Ueda, M., Hasegawa, T., Sugiyama, T., Hirakawa, K., Kikuchi, R., Hiramoto, M., Saito, K., “Structural Behavior of Reinforced Concrete Structures at High Temperatures,” *Nuclear Engineering and Design*, Vol.156, 1995, pp.121~138.
8. Franssen, J. M., “Failure Temperature of a System Comprising a Restrained Column Submitted to Fire,” *Fire Safety Journal*, Vol.34, 2000, pp.191~207.
9. Harmathy, T. Z., “Fire Safety Design and Concrete,” Longman Scientific & Technical. 1993. pp.1~412.
10. 강병희, 오창희, 김화중, 김인수, “가열시의 콘크리트 내부온도분포 산정에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회 논문집, 7권, 6호, 1991, pp.237~245.
11. 강석원, 홍성걸, 신영수, “고온에서의 비선형 변형도를 고려한 콘크리트 구조물에서의 열응력 분포,” 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 12권 2호, 통권 제23호, 2000, pp.1145~1150.
12. 허은진, “철근콘크리트 휨부재의 내화성능에 관한 실험적 연구,” 공학석사학위논문, 부산대학교대학원, 2001, pp.1~100.
13. 강석원, “고온에 노출된 철근 콘크리트 기둥 및 보의 수치 해석,” 공학박사학위논문, 서울대학교대학원, 2001, pp.1~151.
14. “내화구조의 인정 및 관리기준, 건축물의 피난·방화 구조등의 기준에 관한 규칙 제 3조, 건교부고시 제 2000 - 93호, 2000. pp.1~2.
15. ACI Committee 216R, “Guide for Determining the Fire Endurance of Concrete Elements,” ACI 216R-89, American Concrete Institute, Detroit MI, 1989, pp. 1~26.
16. Sidibe, K., Duprat, F., Pinglot, M., And Bourret, B., “Fire Safety of Reinforced Concrete Columns,” *ACI Structural Journal*, 2000, pp.642~647.
17. 콘크리트 구조설계기준, 건설교통부, 1999. pp.70.
18. KSF2257-1, “건축구조부재의 내화시험방법 - 일반요구사항,” 한국표준협회, 산업표준심의회심의. 1999년11월30일 제정. pp.1~17
19. KSF2257-7, “건축구조부재의 내화시험방법 - 기둥의 성능조건,” 한국표준협회, 산업표준심의회 심의. 1999년11월30일 제정. pp.1~7
20. Draft International Standard ISO/FDIS 834-1: 1999 (E), pp.12~26.

요 약

철근 콘크리트 기둥 부재의 경우 하중을 지지한 상태에서 화재의 영향을 받기 때문에 일반적인 재료실험 연구 결과는 그 구조적 거동에서 상이한 거동을 나타낸다. 본 연구에서는 350×350×3360 mm의 실험물기 철근 콘크리트 기둥 12개에 대하여 재하 하중의 크기, 가열시간, 피복두께, 편심 크기 등을 변수로 하여 화재 시 이들 변수들의 영향을 고찰하였다. 고찰 대상은 기둥 콘크리트의 폭열, 기둥의 길이방향 팽창 및 수축, 좌굴 등이다. 이들 변수들이 기둥 축방향 팽창과 수축, 회전, 좌굴, ISO 기준에 따른 내화력, 구조적 안정성 등에 미치는 영향을 실험에 근거하여 정성적으로 평가하였다. 실험 결과, 축방향 수축은 가열 시간에 가장 큰 영향을 받으며 철근이나 부재의 좌굴은 축력의 크기, 가열시간, 피복두께, 편심의 유무에 따른 순으로 영향을 받음이 관찰되었다. 실험 관찰을 통하여 ISO 기준에서 제시한 내화기준에 대한 정성적인 평가를 실시하였다.

핵심용어 : 실험, 철근콘크리트 기둥, 가열시간, ISO 기준 내화력