화재피해를 입은 철근콘크리트 기둥의 잔존강도 추정 및 내화성능 요인 분석

Estimation of Residual Strength and Analysis of Fire Resistant Performance Affecting Elements for Fire Damaged Reinforced Concrete Column

여인환*

Yeo, In Hwan

Abstract

This study aims to estimate the residual strength by experimental and analytic method and analyze the elements affecting fire resistant performance of reinforced concrete column. For predicting strength reduction rate and fire resistant rate of reinforced concrete column 500°C isotherm method of EN 1992-1-2, a simplified calculation method, was used. The residual strength rate of reinforced concrete column, which is exposed to standard fire for 180 minute and assumed to bear the pure axial compressive force, was calculated with inner temperature data achieved from fire resistance test results. Further, the analysis of relations of fire resistance rate affecting elements for reinforced concrete member were performed. The residual strength rate of reinforced concrete column estimated in this study may be used as a significant information for establishing fire load factor and load ratio on performance based fire resistant design.

Key words : 500°C Isotherm method, Residual strength, Fire resistant structure, Performance based design, Reinforced concrete column, Load ratio

요 지

본 연구에서는 화재피해를 입은 철근콘크리트 기둥을 대상으로 실험 및 해석적 방법에 의해 잔존강도를 추정하고 내화성능에 영향을 미치는 요인을 분석하였다. 철근콘크리트 기둥의 강도저감율과 내화성능 예측을 위해 간편 계산모델인 EN 1992-1-2의 500°C 등온선법을 이용하였다. 철근콘크리트 기둥은 순수 축압축력을 받는 것으로 가정하고 표준 내화실험으로부터 얻은 기둥 내부 온도자료를 활용하여 표준화재에 180분간 노출된 철근콘크리트 기둥의 잔존강도율을 산출하였다. 아울러 콘크리트 강도, 피복두께, 단면크기, 잔존 유효단면적 등 철근콘크리트 부재 내화성능 영향요인의 상관관계를 분석하였다. 본 연구를 통해 추정된 철근 콘크리트 기둥의 잔존강도율은 내화성능설계를 위한 계수하중 설정 및 하중비 설정에 중요하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 500°C 등온선법, 잔존강도, 내화구조, 성능설계, 철근콘크리트 기둥, 하중비

1. 서 론

건축물의 내화설계법은 일반적으로 사양적 방법과 성능적 방법으로 크게 구분된다. 최근의 국제적 추세는 사양적 설계를 기본으로 하면서 건축설계의 유연화와 새로운 재료 및 공법의 수용, 경제성 등을 감안한 접근이 요구되는 경우 성능적 설계를 반영하는 방식이 보편화 되고 있다.

국내의 내화구조는 사양구조와 인정구조로 대별된다. 사양구조는 최소한의 기본 구조·재료를 대상으로 건축법령에서 명시하고 있으며, 인정구조는 관련 기준(Ministry of Landscape

and Transportation, 2012)에 따라 개별적 내화성능평가에 의해 성능을 검증한 것, 내화구조 표준으로 인정된 것 또는 인정된 성능설계절차에 의해 검증된 것으로 구분된다.

해외의 경우 사양적 방법과 성능적 방법의 구분은 화재특성의 설정기준에 의한다. 사양적 방법은 표준화재조건에서의 실험결과를 통해 구축된 표 또는 그래프 자료를 취하거나 비교적 간편한 계산방식을 통해 부재단위의 내화성능을 판단할 수 있는 방법이며, 성능적 방법은 화재시나리오와 화재모델조건 설정에 이어 구획공간 조건 및 부재 온도이력으로부터 계산되는 부재 및 구조시스템의 거동을 보다 복잡한 계산과정

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 연구위원(Tel: +82-31-369-0514, Fax: +82-31-369-0670, E-mail: yeo@kict.re.kr)
 Corresponding Author. Member. Research fellow, Ph. D., Korea Institute of Construction Technology

에 의해 해석하는 방법이다(Rigberth, 2000).

성능적 설계방법은 건축물의 공간조건, 가연물, 환기조건, 발화원인 등에 대한 종합적 검토를 수반하며, 여러 조건의 가변성을 반영하므로 특정 건축조건에 대한 세밀한 해석이 가능한 반면, 계산과정이 복잡하고 허용된 범위내에서 대안적 절차를 채택할 수 있는 여지가 존재하기 때문에 일반화된 조건의 내화성능 판단 방법으로 사용하기에는 부적합 할 수 있다. 따라서 일반적인 건축요건에 대한 개별부재의 내화성능 판단은 표준화제조건을 가정한 사양적 규범이나 간편계산법에 의해 비교적 쉽게 적용할 수 있다.

철근콘크리트구조는 화재에 매우 유리한 구조시스템으로 인식되어 왔으며, 시공기술의 발달과 경제적 우위성으로 인해 가장 널리 사용되어 온 구조이다. 그러나 고온에 노출된 콘크리트는 시멘트 경화물과 골재가 각각 다른 팽창·수축을 하고 콘크리트 내 자유수의 수분팽창으로 내부응력이 점차 증가하여 결국 강도 및 탄성계수 등의 역학적 성질이 저하된다. 콘크리트의 역학적 성능저하는 사용재료의 종류와 배합, 재령 등에 의해 지배되는데 일반적으로 300°C이후에 강도저하가 일어나며, 500°C를 넘게 되면 50%이하로 강도가 떨어지게 된다. 화재시의 고열은 콘크리트 표면의 균열과 박리·박락, 폭렬, 철근 노출, 부재의 변형과 파괴를 야기할 수 있으므로 이를 고려한 설계가 필요하다(Yeo, 2012).

본 연구에서는 화재피해를 입은 철근콘크리트 기둥을 대상으로 EN 1992-1-2의 간편계산방식(simplified calculation method)인 500°C 등온선법(500°C Isotherm method)을 적용해 철근콘크리트 기둥의 강도저감율과 내화성능을 예측하였다.

이를 위해 순수 축압축력을 받는 철근콘크리트 기둥을 가정하고 내화실험 실험결과로부터 얻은 기둥 내부 온도자료를 입력하여 표준화재에 180분간 노출된 철근콘크리트 기둥의 잔존강도율을 산출하였다. 아울러 콘크리트 강도, 피복두께, 단면크기, 잔존 유효단면적 등 내화성능 영향요인을 분석하였다.

2. 콘크리트 부재 내화설계법

2.1 Eurocode 2

Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules - Structural fire design는 콘크리트구조의 내화설계규정으로서 이 코드에서는 콘크리트 부재의 화재안전설계와 관련한 건축적 해결방법에 대해 규정하고 있다. 건축내화설계를 위해서는 대상 부재에 가해지는 열적 환경조건, 즉 건축물 공간정보, 화재특성 및 시나리오, 재료의 열물성, 부재크기, 목표시간 등의 설정이 필요하다. 부재 내부의 온도변화와 이로부터 야기되는 열적, 역학적 특성변화의 규명은 내화설계의 핵심이다.

본 연구에서는 부재 내부의 온도와 강도 변화를 추정하기 위해 다수 국가에서 채택하고 있는 Eurocode 2의 설계모델을 활용하였다. 철근콘크리트부재의 내화설계방법을 규정하는 EN 1992-1-2에서는 기둥, 보 및 슬래브의 내화설계를 위한 여러 방법을 제시하고 있는데, 이 중 비교적 쉽게 적용 가능

한 간편계산모델로서 500°C 등온선법에 의한 내화성능 예측 방법을 활용하였다.

2.2 간편계산모델

EN 1992-1-2 Annex B의 간편계산법은 화재에 노출된 콘크리트 부재의 온도상승으로 인한 단면손실을 가정하여 목표 시간에서의 유효단면에 기대할 수 있는 강도, 즉 원래의 단면에서의 부재 강도 대비 잔존강도율에 의해 부재의 내화성능을 예측하는 방법을 제시하고 있다.

간편계산법은 표준화재 혹은 파라메트릭 화재에 적용될 수 있는데 대부분은 표준화재조건을 가정한다. Annex B에서 제시하는 간편계산법은 500°C 등온선법과 존모델법(Zone Method)으로 구분되며, 이 방법들은 화재에 노출된 콘크리트와 철근의 내부 온도변화와 이로 인한 강도 저감 자료를 활용한다. 간편계산법의 적용을 위해서는 부재의 최소단면을 확보해야 한다. Table 1은 부재의 내화시간에 따라 요구되는 최소단면 조건이다.

Table 1. Minimum Concrete Cross section Size according to the Fire Resistance Criteria(EN 1992-1-2)

Fire resistance criteria (Min)	60	90	120	180	240
Minimum cross section size (mm)	90	120	160	200	280

500°C 등온선법에서는 콘크리트 온도가 500°C 이하인 경우 상온시의 강도를 그대로 유지하고, 500°C를 넘으면 강도를 100% 상실하는 것으로 가정하여 콘크리트의 유효단면을 산정한다. 여기에 콘크리트 내부 온도정보와 동일한 기준으로 계수 조정된 철근의 강도로부터 화재피해를 입은 철근콘크리트 부재의 잔존강도를 구한다. 존모델법은 화재노출면에 평행하도록 3개 이상으로 나누어진 동일두께의 콘크리트 단면 중심이 단면 내 평균 온도를 갖는 것으로 가정하여 부재의 잔존강도를 구하는 방법이다. 이 방법은 작은 단면이거나 세장한 기둥에 적합한 방법이나, 오직 표준화재조건만 적용이 가능하다. 간편계산법에서 사용하는 부재의 전열특성은 일반콘크리트와 고강도콘크리트의 차이를 두지 않고 있다. 다만 고강도콘크리트의 경우 다소 제한적이지만 콘크리트 강도에 따라 별도의 강도감소계수를 부여하여 별도로 평가하는 방식을 제안하고 있다.

3. 내화실험

3.1 실험준비

철근콘크리트 기둥의 잔존 축압축강도 산출을 위해서는 콘크리트 및 철근 온도이력 정보를 활용한다(Kodur, 2003). 이에 일반강도 콘크리트를 대상으로 내화실험 계획을 수립하였다. 실험체는 콘크리트 설계강도 기준 24 MPa와 30 MPa를 대상으로 하여 단면크기, 피복두께별로 제작하였다.

실험결과 분석에서는 여기에 40 MPa급 콘크리트를 대상으로 한 선행연구결과(Cho et al, 2011)를 추가하여 함께 분석

Fig. 1. Example of Cross Section(30-400-40 Specimen)

하였다. 분석 대상 콘크리트의 설계강도를 24, 30, 40 MPa급으로 선정한 것은 국내 건축법규상 고강도콘크리트의 관리대상이 설계강도 기준 50 MPa 이상이므로 폭렬의 영향을 최소화 할 수 있고 비교적 사용 비중이 높은 일반강도 콘크리트를 대상으로 했기 때문이다.

내화실험은 2차에 걸쳐 진행하였다. 1차실험은 부재 내부 온도이력을 측정하기 위해 기둥실험체를 1 m 높이의 단주로 9개를 제작하였고, 2차실험은 실험체 높이를 3 m로 제작하였다. 본 실험은 실험체 내부의 온도정보 취득을 목적으로 하기 때문에 내화실험은 모두 비재하실험으로 진행하였다. Fig. 1은 실험체 단면예시이며, (30-400-40)은 실험체명으로서 (콘크리트강도-단면크기·피복두께)를 의미한다.

실험체 내부에는 주철근 및 콘크리트 내부 온도이력을 측정하기 위해 Ø1.6 mm의 K-Type 와이어 열전대(Thermocouple)를 설치하였다. 열전대는 모두 기둥 높이 중앙부위에 설치하였다. 선행실험과 마찬가지로 본 연구 1차실험에서는 철근 온도측정 열전대를 모서리 2지점과 면 중앙부 1지점에 설치하고 콘크리트 내부온도 측정 열전대는 면 중앙부에 콘크리트 표면으로부터 20 mm 간격으로 총 4개를 설치하였다. 2차실험에서는 주철근의 온도측정은 모서리 2개소, 면 중앙부 2개소 총 4개소에서 측정하였고, 콘크리트의 내부온도는 콘크리트 표면으로부터 30, 40, 50 mm의 위치에 열전대를 설치하였다.

설계강도 24, 30, 40 MPa급 콘크리트의 28일 재령압축강도는 각각 29.0, 35.4, 42.6 MPa였으며, 철근콘크리트 기둥의 잔존강도 계산에는 이 자료를 직접 적용하였다.

3.2 내화실험

1차실험은 1 m단주실험체를 KS F 2257-5:2005(건축부재의 내화시험방법-수평 내력 구조부재의 성능조건)에 적합한 수평 가열로에 복수의 실험체를 넣어 동시실험으로 진행하였으며, 2차실험은 KS F 2257-7:2005(건축부재의 내화시험방법-기둥의 성능조건)의 요구조건에 적합한 기둥가열로에서 진행하였다. 시험의 절차와 결과판정은 KS F 2257-1:2005(건축 부재의 내화 시험방법-일반 요구 사항) 및 고강도콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2008)에 따랐다. Fig. 2는 3m높이로 제작·실험한 24-400-50실험체의 실험 전·후 모습이다.

(a) before the test

(b) after the test

Fig. 2. Figure of Specimen 24-400-50

4. 잔존강도 추정 및 내화요인 분석

4.1 500°C 등온선법에 의한 잔존강도 추정

내화실험 결과 내부 온도정보를 활용한 계산을 통해 표준 화재에 노출된 철근콘크리트 기둥의 강도저감율을 예측하고 내화성능에 미치는 영향요인을 분석하였다. 축압축력을 받는 철근콘크리트 기둥이 일정시간 동안 표준화재에 노출되면 내부 온도이력에 따라 강도가 감소하게 된다. 콘크리트 온도가 500°C를 상회하는 단면 외주부는 강도를 모두 상실한 것으로 보고 그 안쪽은 상온시의 강도를 그대로 유지하는 것으로 간주하여 180분 가열 후 콘크리트의 강도가 발휘되는 유효단면을 선정하고 이로부터 상온시 부재 축압축 강도에 대한 화재피해 후 잔존강도율을 산출하였다.

하중계수설계에서 구조부재의 내화성능평가 및 설계를 위해서는 하중비(Load ratio)의 설정이 필요하며, 기둥에 있어 하중비는 부재의 잔존강도율, 즉 축력비와 관계하여 설정된다 (Yeo, 2012). 축압축력을 받는 철근콘크리트 기둥(따철근을 갖는 기둥)의 최대 설계축강도 ϕP_n 는 식 (1)에 의해 구한다 (Kim, 2004).

$$\phi P_n = 0.80\phi[0.85 + f_{ck}(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (1)$$

여기서, ϕ : 강도감소계수 0.65

f_{ck} : 콘크리트 강도(MPa)

A_g : 기둥 전단면적(m^2)

A_{st} : 철근 전단면적(m^2)

f_y : 철근 강도(MPa)

2009년 개정된 건축구조기준(Ministry of Landscape and Transportation, 2009)에서 강도감소계수 ϕ 는 축하중 없이 휨만 받는 부재의 경우 0.9, 나선철근기둥에는 0.7, 따철근기둥에는 0.65의 값을 적용한다. 고온에 노출된 구조부재의 역학적 특성 자료는 내화설계를 위한 중요한 정보이며, 모든 구조부재의 내화설계는 상온시의 부재 강도 대비 화재시의 강도저감율의 관계에 의해 검토된다. 고온에 노출된 순수 축압축부재의 잔존강도율은 상온시의 설계강도 P_n 에 대한 화재시의 강도 $P_{n,fire}$ 의 비, 즉 축력비로 표현된다.

$$P_{n,fire}/P_n \quad (2)$$

따라서 화재시 철근콘크리트 기둥의 잔존강도율을 얻기 위해 필요한 입력변수는 상온시의 콘크리트 강도(f_{ck}), 철근강도(f_y), 콘크리트단면적(A_g-A_{st})과 화재시의 유효단면 내 콘크리트 강도(상온시와 동일), 철근강도($f_{y,fire}$)(Eurocode 2 모델식), 콘크리트 유효단면적($f_{g,fire}$)(실험결과 500°C등온선에 의한 감소

면적), 철근단면적(상온시와 동일)이다.

앞의 내화실험을 통해 표준화재 180분 가열시점에서의 철근콘크리트 기둥의 내부온도가 500°C가 되는 깊이로부터 산정한 콘크리트 유효단면적 $A_{g,fire}$ 와 같은 시간에서의 철근강도 감소 산정식 자료로부터 산출된 철근강도 $f_{y,fire}$ 를 변수로 하

Table 2. Temperature and Remained Strength Rate after 180 Minute Exposure to Fire of Main Reinforcement and 500°C Reaching Time of Specimen by Concrete Depth

	Specimen	Main reinforcement Average Temp. (°C)	$K_s (T)$	500°C Reaching time (min)			
				C20	C40	C60	C80
Presede test	40-250-40	593.8	0.35	68	99	163	-
	40-250-50	541.7	0.47	104	151	-	-
	40-250-60	462.4	0.62	116	153	-	-
	40-400-40	501.7	0.57	104	-	-	-
	40-400-50	410.7	0.69	105	-	-	-
	40-400-60	362.5	0.74	87	-	-	-
	40-600-40	441.5	0.65	126	-	-	-
	40-600-50	365.9	0.73	146	-	-	-
1st test	30-250-40	549.2	0.45	115	140	-	-
	30-250-50	428.3	0.66	132	176	-	-
	30-250-60	312.1	0.79	95	143	-	-
	30-400-40	421.1	0.67	118	-	-	-
	30-400-50	327.0	0.77	138	-	-	-
	30-400-60	271.5	0.83	122	-	-	-
	30-600-40	469.3	0.61	146	-	-	-
	30-600-50	301.7	0.80	128	-	-	-
2nd test	24-250-50	502.7	0.56	106	131	154	-
	24-400-50	390.3	0.71	128	169	-	-

Table 3. Residual Axial Compressive Strength Calculated from Concrete inner Depth of reach 500°C and Main Reinforcement temperature data of Reinforced Concrete Columns

	Specimen	Normal condition							Fire exposure condition							Residual strength rate	
		fck (MPa)	Ag (mm ²)	fy (MPa)	B (mm)	D (mm)	Po (kN)	Pn (kN)	fck (MPa)	Ag (mm ²)	fy (MPa)	B (mm)	D (mm)	ks (°)	Po (kN)		Pn (kN)
Presede test	40-250-40	42.6	62,500	400	250	250	3,390	2,712	42.6	18,423	140	136	136	0.35	988	790	0.29
	40-250-50	42.6	62,500	400	250	250	3,390	2,712	42.6	20,709	189	144	144	0.47	1,222	978	0.36
	40-250-60	42.6	62,500	400	250	250	3,390	2,712	42.6	12,007	248	110	110	0.62	1,089	871	0.32
	40-400-40	42.6	160,000	400	400	400	6,920	5,536	42.6	102,552	226	320	320	0.57	4,302	3,442	0.62
	40-400-50	42.6	160,000	400	400	400	6,920	5,536	42.6	110,624	274	333	333	0.69	4,743	3,795	0.69
	40-400-60	42.6	160,000	400	400	400	6,920	5,536	42.6	104,350	295	323	323	0.74	4,580	3,664	0.66
	40-600-40	42.6	360,000	400	600	600	14,162	11,330	42.6	289,501	258	538	538	0.65	11,171	8,937	0.79
	40-600-50	42.6	360,000	400	600	600	14,162	11,330	42.6	300,512	294	548	548	0.73	11,679	9,343	0.82
	40-600-60	42.6	360,000	400	600	600	14,162	11,330	42.6	293,958	294	542	542	0.73	11,442	9,154	0.81
1st test	30-250-40	35.4	62,500	400	250	250	3,026	2,421	35.4	18,383	182	136	136	0.45	1,023	818	0.34
	30-250-50	35.4	62,500	400	250	250	3,026	2,421	35.4	24,942	265	158	158	0.66	1,479	1,183	0.49
	30-250-60	35.4	62,500	400	250	250	3,026	2,421	35.4	20,067	315	142	142	0.79	1,487	1,189	0.49
	30-400-40	35.4	160,000	400	400	400	5,960	4,768	35.4	104,573	269	323	323	0.67	3,886	3,109	0.65
	30-400-50	35.4	160,000	400	400	400	5,960	4,768	35.4	104,863	309	324	324	0.77	4,020	3,216	0.67
	30-400-60	35.4	160,000	400	400	400	5,960	4,768	35.4	102,833	331	321	321	0.83	4,027	3,222	0.68
	30-600-40	35.4	360,000	400	600	600	11,978	9,582	35.4	279,626	244	529	529	0.61	9,076	7,261	0.76
	30-600-50	35.4	360,000	400	600	600	11,978	9,582	35.4	282,160	319	531	531	0.80	9,386	7,509	0.78
	30-600-60	35.4	360,000	400	600	600	11,978	9,582	35.4	245,720	335	496	496	0.84	8,337	6,670	0.70
2nd test	24-250-50	29.0	62,500	400	250	250	2,703	2,162	29.0	16,641	226	129	129	0.56	1,032	826	0.38
	24-400-50	29.0	160,000	400	400	400	5,106	4,085	29.0	99,225	284	315	315	0.71	3,249	2,599	0.64

여 식 (1)과 식 (2)에 의해 유효단면의 기둥 강도를 계산하고 잔존강도비를 계산하였다. 180분 가열시점에서의 주철근 평균온도와 EN 1992-1-2의 철근온도에 따른 강도저감율 모델식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} 20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 100^{\circ}\text{C} \quad K_s(T) &= 1.0 \\ 100^{\circ}\text{C} < T \leq 400^{\circ}\text{C} \quad K_s(T) &= 0.7 - 0.3(T - 400)/300 \\ 400^{\circ}\text{C} < T \leq 500^{\circ}\text{C} \quad K_s(T) &= 0.57 - 0.13(T - 500)/100 \\ 500^{\circ}\text{C} < T \leq 700^{\circ}\text{C} \quad K_s(T) &= 0.1 - 0.47(T - 700)/200 \\ 700^{\circ}\text{C} < T \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad K_s(T) &= 0.1(1200 - T)/500 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, T : 철근의 온도, $K_s(T)$: 철근 강도 감소계수

Table 2는 실험체 별 180분 가열 후 주철근 평균 온도값과 철근 강도감소계수 $K_s(T)$ 및 콘크리트 깊이별로 온도가 500°C에 도달하는 시간을 나타낸다. 결론적으로 Table 3은 철근콘크리트 기둥의 표준화재 180분 가열시 콘크리트 내부 온도 500°C 도달 깊이 및 주철근 평균온도 측정 결과를 토대로 계산한 잔존강도비를 보여주고 있다.

Table 3으로부터 내화실험 후의 기둥 단면크기 별 콘크리트 유효단면비 및 잔존 축압축강도비의 평균을 정리하면 Table 4와 같다. 250×250단면의 유효단면비가 0.30인데 비해 600×600단면의 유효단면비는 0.79로 부재 단면크기에 따라 유효단면비의 차이가 크게 나타나고 있으며, 이는 축압축강도 잔존율의 차이로 나타나고 있다.

Table 4. Effective Section Area Ratio and Residual Axial Compressive Strength According to Concrete Section Size

Specimen Contents	250×250 Section	400×400 Section	600×600 Section
Effective section area ratio	0.30	0.65	0.78
Residual axial compressive strength	0.38	0.66	0.78

4.2 내화성능 영향요인 분석

이상에서는 내화실험으로부터 얻은 실험체 내부 온도데이터를 활용하여 철근콘크리트 기둥의 잔존 축압축강도율을 산출하였다. 다음은 이를 바탕으로 ① 콘크리트 강도와 콘크리트 유효단면적비 및 기둥 잔존강도율의 관계, ② 콘크리트 피복두께와 유효단면적비의 관계, ③ 단면크기와 콘크리트 유효단면, 철근 강도감소율 및 기둥강도감소율의 관계, ④ 콘크리트 유효단면과 기둥강도저감율의 관계에 대해 고찰하였다.

4.2.1 콘크리트 강도와 콘크리트 유효단면 및 기둥 강도저감율의 관계

Fig. 3은 콘크리트 강도별 기둥잔존강도율과 콘크리트 유효단면적비를 나타내고 있다. 설계강도 24 MPa의 실험체 수가 적은 한계는 있지만, 30 MPa 및 40 MPa와 비교했을 때 콘크리트 강도 차이는 콘크리트 유효단면적 감소 및 기둥 강도저감에 크게 관여하지 않는 것으로 보인다. 이는 고강도콘크리트 관리대상이 50 Mpa이상인 것과도 관련이 있다고 하겠다.

Fig. 3. Residual Strength rate of Column and Effective Section Area Ratio by Concrete strength

4.2.2 콘크리트 피복두께와 유효단면적비의 관계

Fig. 4에서는 콘크리트 피복두께와 유효단면적비의 관계를 볼 수 있다. 그래프상으로 피복두께의 증가가 콘크리트 유효단면에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 보인다. 특히 400×400단면과 600×600단면의 경우는 피복두께 차이에 따른 유효단면적 비가 수평적으로 나타나고 있다. 다만 250×250단면의 경우 피복두께 증가에 따라 약간의 유효단면적 상승이 관찰되었는데, 단면이 작은 경우 피복두께가 늘어나면 콘크리트 내부 온도상승 지연에 다소 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 4. Concrete Cover Thickness and Effective Section Area Ratio

4.2.3 단면크기와 콘크리트 유효단면, 철근 강도저감율, 기둥강도저감율의 관계

1) 단면크기별 콘크리트 유효단면적비

Fig. 5는 기둥 단면크기별 콘크리트 유효단면을 나타내고 있다. 250×250단면의 경우 다른 단면에 비해 단면감소율이 커 유효단면적이 0.2에서 0.4범위로 작아지며, 단면감소율 폭도 다른 단면보다 넓게 분포한다. 이는 부재 단면이 작은 경우 내부로의 열유입이 빠르고 특히 모서리부분의 취약성이 바로 영향을 미칠 수 있기 때문으로 판단된다.

콘크리트 표면으로부터 내부로 이어지는 균열 및 틈 발생으로 인해 급격한 열유입이 진행될 수 있으며, 폭렬이 발생하지 않더라도 미세한 균열 등 다양한 요인에 의한 영향이 내부 온도상승에 직접 작용하는 것으로 생각된다. 250×250단면과 400×400단면 간의 기율기보다 400×400단면과 600×600단면간의 기율기가 완만하며, 데이터의 변동폭도 줄어든다

Fig. 5. Concrete Effective Section Area Ratio by Column Section Size

2) 단면크기와 철근 강도저감율

Fig. 6에서 볼 때 철근의 강도저감율과 단면크기는 상관성이 적다. 250×250단면은 철근 강도저감율 변동폭이 큰 것을 알 수 있다. 하지만 여전히 작은 단면보다는 큰 단면에서의 강도감소율이 적은 것을 관찰할 수 있다. 철근의 강도저감은 단면크기의 영향과 함께 피복두께의 영향이 크게 작용할 것으로 사료된다. 때문에 철근의 강도저감율은 폭렬발생 우려가 높은 고강도콘크리트의 경우 더 크게 나타날 것으로 판단된다.

Fig. 6. Reinforcement Residual Strength Rate by Column Section Size

3) 단면크기와 기둥 강도저감율

Fig. 7은 단면크기별 기둥 잔존강도율의 관계를 보여주고 있다. 전반적으로 콘크리트 단면감소율 및 철근 강도저감율과 유사한 분포를 보이고 있는데, 변동폭은 상대적으로 작은 것

Fig. 7. Residual Strength Rate of Column by Section Size

을 볼 수 있다. 이는 콘크리트 유효단면감소와 철근 강도저감의 복합작용에 의해 기둥 강도감소율이 정해지기 때문으로 사료된다.

실험으로 확인된 250×250단면에서 600×600단면 구간의 추세를 파악하기 위해 2차 선형회귀곡선을 도출한 결과 91.4%의 높은 유의도를 나타냈는데, 이는 단면크기와 잔존강도간의 높은 상관성이 있음을 시사한다. 앞의 분석결과들과 마찬가지로 250단면에서는 데이터의 상대적 분산도가 높았으며, 400×400단면 및 600×600단면에서는 데이터의 분산도가 낮게 나타났다.

4.2.4 콘크리트 유효단면적비와 기둥 강도저감율의 관계

Fig. 8은 단면크기와 콘크리트 유효단면적비와 기둥 강도저감율의 관계를 보여주고 있다. 단면이 커질수록 유효단면적과 기둥강도 잔존율이 선형적으로 정비례하는 것을 볼 수 있다. 250×250단면은 400×400, 600×600단면에 비해 기둥강도 잔존율의 분포가 넓게 나타난 반면 400×400, 600×600단면에서는 그 분포가 크지 않음을 알 수 있다.

단면크기별 기둥 강도저감율의 분포를 살펴보면 250×250, 400×400, 600×600단면의 평균값은 각각 0.38, 0.66, 0.78로 나타났으며, 표준편차는 각각 약 0.08, 0.02, 0.04로 나타났다. 분산은 각각 0.006, 0.001, 0.002로 나타났다. 250×250단면에서의 표준편차는 400×400단면보다 4배, 분산도는 6배를 보이고 있고, 600×600단면과는 표준편차 2배, 분산도 3배로 나타나고 있다. 이로부터 250단면의 강도저감율 분포가 상대적으로 넓은 영역에 걸쳐 산재하는 것을 통계적으로 확인할 수 있다. 콘크리트 유효단면적비와 기둥 잔존강도율의 관계를 선형회귀식으로 도출한 결과 약 95.9%의 높은 유의도가 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 실험결과는 콘크리트 유효단면적비와 잔존강도율 간에 비례적 관계가 성립하는 것으로 파악된다.

Fig. 8. Effective Section Area and Residual Strength Rate

5. 결 론

본 연구에서는 화재피해를 입은 철근콘크리트 기둥의 내부 온도이력을 이용해 기둥의 강도저감을 추정하였다. 내화실험 및 잔존강도를 산출과정에서 얻어진 철근콘크리트 기둥의 내화성능 영향요인 분석결과는 다음과 같다.

1) 24~40 MPa 범위의 콘크리트의 강도는 화재시 콘크리트

기둥의 유효단면 감소 및 기둥감도저감에 크게 관여하지 않는다.

- 2) 40~60 mm의 콘크리트 피복두께는 콘크리트 유효단면 감소에 영향을 미치지 않는다. 다만 단면이 작은 경우 피복두께 증가에 따라 콘크리트 유효단면이 다소 증가한다.
- 3) 단면이 작은 경우는 부재 내부로의 열유입이 빠르고 특히 모서리부분의 취약성이 바로 영향을 미칠 수 있어 유효단면적이 줄어들며, 단면크기가 일정 이상 되면 콘크리트 내부로의 열유입이 줄어들고 유효단면적비의 변동폭도 줄어든다.
- 4) 철근의 강도저감과 단면크기는 상관성이 비교적 적으며, 피복두께의 영향이 크게 작용한다. 때문에 철근의 강도저감율은 폭발발생 우려가 높은 고강도콘크리트의 경우 더 크게 나타날 것으로 사료된다.
- 5) 단면크기 별 기둥 잔존강도율의 관계그래프에서 250×250에서 600×600단면 구간의 추세를 파악하기 위해 2차 선형회귀곡선을 도출한 결과 91.4%의 높은 유의도를 나타냈다. 이는 단면크기와 잔존강도간의 높은 상관성이 있음을 시사한다.
- 6) 단면이 250×250, 400×400, 600×600으로 커질수록 유효단면적비와 기둥잔존강도율이 선형적으로 정비례하는 것을 확인하였다. 250×250단면은 400×400, 600×600단면에 비해 기둥강도 잔존율의 분포가 넓게 나타난 반면 400×400, 600×600단면에서는 그 분포가 크지 않았다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2013-0229-1-1 “화재응력비를 고려한 철근콘크리트 부재의 내화성능 평가기술 개발”)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Annelies De Wit (2011) Behavior and structural design of concrete structures exposed to fire, Master of Science Thesis, KTH

- Architecture and the Built Environment.
- Cho, K.S., Yeo, I.H., Cho, B.Y., Kim, H.Y., and Min, B.Y. (2011) An Experimental Study on the Fire Resistance Performance of the Reinforced Concrete Columns according to the Cross Section Size and Depth of Concrete Cover, *Journal of Korea Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 25, No. 1, pp. 78-84.
- Eurocode1(EN 1991-1-1:2002) Actions on structures – Part 1-2 : General actions – Actions of structures exposed to fire, CEN(European Committee for Standardization)
- Eurocode2(EN 1992-1-2:2004) Design of concrete structures, Part 1-2 : General rules – Structural fire design, CEN(European Committee for Standardization).
- Kim, S.S. (2004) Structural Design for Reinforced Concrete, 3rd Edition.
- Kodur, V.K.R. (2003) Fire Endurance of High Strength Concrete Columns, *Fire Technology*, 39.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2008) The Guideline of Fire Resistant Performance for High Strength Concrete Column and Girder(Ministry of Land, Infrastructure and Transport Gazette No. 2008-334.
- Ministry of Landscape and Transportation (2009) The Guideline of Structural Design for Building(Ministry of Land, Infrastructure and Transport Gazette No. 2009-1245.
- Ministry of Landscape and Transportation (2012) Regulation on the Standards for Evacuation and Fire proof Construction of Buildings, Article 3.
- Purkiss, J.A. (2007) Fire safety engineering – Design of structures, Second Edition, *Elsevier*.
- Rigberth, J. (2000) Simplified Design of Fire Exposed Concrete Beams and Columns – An Evaluation of Eurocode and Swedish Building Code Against Advanced Computer Models, Department of Fire Safety Engineering Lund University Report 5063, Sweden.
- Yeo, I.H. (2012) A Proposal for Load Ratio of Reinforced Concrete Column Subjected to Standard Fire, Ph. D. Thesis, University of Seoul.
- Yeo, I.H., Kim, H.Y., Kim, H.J., Kim, K.O., Oh, C.S. (2012) An Experimental Study on the Fire Resistance Performance and Spalling of 100MPa HSC Column Mixed with Fiber-Cocktail, *Advanced Materials Research*, Vol. 472-475.

© Received October 10, 2013

© Revised October 11, 2013

© Accepted October 21, 2013