고강도 콘크리트 기둥의 압축강도 변화에 따른 화재거동 및 전열특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study for Fire Resistance and Heat Transfer Properties on the Compressive Strength of High-Strength Concrete Column

박경훈* · 김흥열** · 김형준*** · 권기혁****

Park, Kyung-Hoon · Kim, Heung-Youl · Kim, Hyung-Jun · Kwon, Ki-Hyuk

Abstract

In this study, we have intended to evaluate fire resistance performance by analyzing fire behavior according to the strength property(60 MPa, 100 MPa) of high strength concrete column. With 2 variables(60 MPa, 100 MPa) for the strength of high strength concrete column, the fire behavior and the heat transfer property according to strength has been evaluated. In addition, we have evaluated fire resistance performance of the test object in the condition of mixing wire-rope method and fiber cocktail with comparing to the one of general test object(applied by hoop) to evaluate the improving method of fire resistance performance. In the result of the experiment, the fire resistance performance is shown as lower, as the concrete strength gets higher, and this can be analyzed to result from bigger cracks and spalling for 100 MPa high strength concrete, compared to 60 MPa high strength concrete. Also, in case of applying wire-rope and fiber cocktail, the fire resistance performance has been shown as enhanced. In this case, it can be judged because the softness has been increased more than the case we applied the hoop after applying the wire-rope, and that the spalling of test objects has been reduced due to mixing the fiber cocktail.

Key words : High strength concrete, Fire behavior, Heat transfer, Wire-rope, Fiber cocktail

요 지

본 연구는 고강도 콘크리트 기둥의 강도특성(60 MPa, 100 MPa)에 따른 화재거동을 분석하여 내화성능을 평가하고자 하였다. 고강도 콘크리트 기둥의 강도는 2가지 인자(60 MPa, 100 MPa)를 변수로 하여 강도에 따른 화재거동 및 전열특성을 평가하였다. 또한 내화성능 향상방안을 평가하기 위해 와이어로프 공법 및 폭렬저감제 혼입한 경우의 시험체의 내화성능을 일반 시험체(띠철근 적용)의 내화성능과 비교하여 평가하였다. 실험결과 콘크리트 강도가 높을수록 내화성능은 저하되는 것으로 나타났으며, 이는 100 MPa의 고강도 콘크리트 경우 60 MPa 고강도 콘크리트에 비해 균열 및 폭렬이 크게 발생되기 때문인 것으로 분석된다. 또한 와이어로프와 폭렬저감제 적용한 경우 내화성능이 향상되는 것으로 나타났으며, 이는 띠철근을 적용한 경우보다 와이어로프를 적용함으로써 발생한 연성의 증가와 폭렬저감제 혼입으로 인해 시험체의 폭렬현상이 저감되었기 때문인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 화재거동, 전열특성, 와이어로프, 섬유보강

1. 서 론

최근 콘크리트의 성능은 비약적인 발전을 통해 50 MPa 이상의 많은 고내구, 고성능 콘크리트들의 개발이 진행되었다. 콘크리트가 고강도화 · 고성능화 될수록 콘크리트 내부 조직

은 더욱 치밀해지기 때문에 단면내력 증대, 부재단면 축소, 균열저항성 및 변형 저항성 등의 성능을 향상시킬 수 있으나 반대로 급격한 취성파괴 및 연성이 감소하며, 폭렬현상에도 더 취약해 질 수 있으므로 화재시에는 더 큰 손상을 입을 수 있다. 현재 국토해양부에서 제정한 「고강도 콘크리트 기

*정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구원(E-mail: khpark@kict.re.kr)
Member. Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

**교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구위원(Tel: +82-31-369-0507, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: hykim@kict.re.kr)
Corresponding Author. Member. Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

***정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구원
Member. Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

****서울시립대학교 도시과학대학 건축공학과 교수
Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

등.보의 내화성능 관리기준(국토해양부 고시 제2008-334호)」에 의거하여 50 MPa 이상의 고강도 콘크리트 기둥, 보의 경우 비재하상태에서 내화구조 성능기준(국토해양부 고시 제2005-122호)이 규정한 시간까지 주철근의 평균온도 및 최대온도를 규정하여 내화성능을 인증하고 있는 실정이다. 하지만 재하상태인 고강도 콘크리트 구조부재의 경우 구속 및 응력의 실제 조건에 따라 화재 시 내력 및 연성저하에 중요한 영향을 받게 될 수 있으며, 주철근은 조기좌굴로 인해 콘크리트 박리 및 폭열에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 고강도 콘크리트 기둥을 대상으로 KS F 2257-7에 의거한 하중지지력으로 내화성능을 평가하였으며, 국토해양부 고시 제2008-334호에서 제시한 주철근의 평균온도 및 최대온도 측정을 통한 한계온도를 평가하여 고강도 콘크리트 기둥의 화재거동 및 전열특성에 대해 분석하였다. 고강도 콘크리트의 설계강도는 60 MPa와 100 MPa 2가지 인자를 변수로 수행하였으며, 와이어로프 공법, 폭발저감재(Fiber-Cocktail) 혼입 공법 등의 내화공법 등을 적용한 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능 확보방안에 대해서도 평가하였다.

2. 적용된 내화성능 향상 공법

2.1 폭열 방지를 위한 섬유보강 공법

폭열을 방지하기 위한 섬유보강 공법은 화재에 노출시 혼입된 유기섬유가 폭열이 발생하기 전 용융되어(200°C 이하) 시멘트 매트릭스 내 미세통로(micro channel)를 형성시켜 콘크리트 내부의 수증기, 공기, 가스 등을 효과적으로 빠져나가게 하여 폭열을 방지하는 공법이다. 이 공법은 콘크리트의 내화성능을 확보하는 데 있어 가장 경제적이고 시공방법도 간단하여 가장 널리 쓰이고 있다. 일반적으로는 단일 또는 두 개 이상의 유기섬유를 혼입하는 공법을 사용하나 본 연구에서는 강섬유와 두가지 타입의 폴리프로필렌 섬유를 혼합한 섬유(Fiber Cocktail)를 혼입하는 공법(원종필 등 2008; 김형준 등 2010)을 적용하였다. 위와 같은 타입의 섬유를 혼입할 경우 400°C이상의 온도에서도 강섬유가 용해되지 않고 콘크리트의 균열 제어 및 열팽창 구속 역할을 하여 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 폭열제어에 일반 유기섬유보다 효과적인 것으로 판단된다.

2.2 횡구속 보강 공법

프리스트레스 와이어로프 공법은 그림 1과 같이 프리스트

Fig. 1. Method of applied wire-rope

레스가 도입된 고강도 · 고유연성의 와이어로프를 이용하여 철근콘크리트 부재의 내·외부의 구속압을 높임과 동시에 화재 시 철근콘크리트 부재의 내력저하를 방지하는 횡구속 내화보강 기술이다. 와이어로프에 도입되는 프리스트레스는 너트에 작용하는 토크에 의해 제어된다. 프리스트레스가 도입된 와이어로프 시스템은 콘크리트 및 주철근을 구속함으로써 화재에 의한 콘크리트의 폭열 및 주철근의 조기좌굴을 방지할 수 있어 기존 부재의 내화보강에 매우 효율적으로 이용될 수 있다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 실험배합

본 연구에서는 고강도 콘크리트 기둥에 대하여 내화성능을 평가하기 위하여 표 1과 같은 콘크리트의 배합설계를 통해 500×500×3000 mm 크기의 기둥부재에 대한 60 MPa 및 100 MPa 고강도 콘크리트 기둥시험체를 제작하였으며 본 배합에 사용된 콘크리트 배합의 재료적 특성은 표 2와 같다.

3.2 사용재료

3.2.1 폭발저감재(Fiber cocktail)

화재실험 시 콘크리트의 폭열현상을 저감시키기 위해 폴리프로필렌(Polypropylene) 섬유와 강(Steel) 섬유를 혼합한 섬유를 사용하였다. 강 섬유는 양단후크형(Hook-end)의 번들식으로 제작된 K사 제품을 사용하였다. 또한 폴리프로필렌 섬

Table 1. Mix proportion of concrete

Classification		W/B (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit weight (kg/m ³)							Ad (kg/m ³)	Fiber (kg/m ³)	
Sterngth	Type				W	C	S	G	Slag	F/A	S/F		P.P	Steel
60 MPa	Non	26.2	46.0	2.0	165	572	639	759	163	82	0	8.19	0	0
	FC*	26.2	46.0	2.0	165	572	639	759	163	82	0	9.45	1.5	40
100 MPa	Non	19.1	41.5	2.0	156	400	571	814	286	82	49	10.62	0	0
	FC*	19.1	41.5	2.0	168	680	572	834	286	82	49	13.07	1.5	40

FC* : Fiber Cocktail

Table 2. Material properties of concrete

Classification	Cement	Slag	Fly Ash	Silica Fume	Sand	Gravel	Admixture
Type	Type I (KS L 5201)	Type III (KS F 2563)	Type I (KS L 5405)	SF94 (ASTM C 1240)	sea sand	crushed gravel	Water reducing admixture
Specific gravity	3.15	2.82	2.20	1.90	2.59	2.61	-
Absorptance	-	-	-	-	0.70	0.60	-
Grain size	-	-	-	-	2.72	6.56	-

Table 3. Physical properties of steel

Lateral Tie		Type of steel	Spacing (mm)
Rebar	Main	HD25	250
	Hoop	HD10	200
Wire-rope		Ø6	43

유는 섬유간의 엉킴현상을 방지하고 공극압의 효율적인 제어를 위해서, 길이와 직경이 다른 두 가지 타입의 섬유를 혼합하여 사용하였다.

3.2.2 강재

기둥 제작시 사용된 철근은 표 3과 같이 건축구조물에 일반적으로 사용되고 있는 SD400 강종으로, 주근은HD25, 늑근은 띠철근 방식으로 HD10을 적용하였다. 띠철근을 대체할 와이어로프의 경우 시공성과 경제성을 고려하여 직경 6 mm의 와이어로프를 사용하여 제작하였다. 와이어로프의 경우 SD400에 비해 항복강도 기준으로 4배, 인장강도 기준으로 3 배 이상의 강도를 가지고 있다.

3.3 실험계획

3.3.1 실험체 제작

본 연구에서는 섬유혼입 및 와이어로프 보강을 통한 고강도 내화콘크리트 공법개발을 위하여 기둥실험체에 대하여 각각 60 MPa와 100 MPa에 대해서 재하하중과 하중비, 내화보

강 정도를 산정하여 총 6개 인자의 실험체를 그림 2 및 그림 3과 같이 크기 500×500×3000 mm로 제작하였다. 철근은 SS400을 원재료로 하여 주근 D25로 16개를 배근하였으며, 띠철근은 D10을 200 mm 간격으로 배근하였다. 와이어로프를 적용한 실험체는 시공성과 경제성을 고려하여 공칭직경 6 mm를 적용하였다. 또한 와이어로프의 배근간격은 띠철근의 체적비와 와이어로프 체적비가 동일하게하기 위하여 43 mm 간격으로 일체형 나선형 배근으로 황구속력 확보가 가능하도록 실험체를 제작하였다. 전열특성 계측을 위한 열전대는 K-Type 1 mm 직경을 사용하여 고강도 콘크리트 내화성능 관리 기준에 의거하여 설치하였으며, 기둥의 중앙부 주근에 총 4 개소를 설치하였다.

3.3.2 실험방법 및 실험인자

고강도 콘크리트 기둥의 가열조건은 KS F 2257-1에 의거한 표준화재조건에서 수행하였으며, 내화실험 시 기둥의 양단 경계조건은 실제 구조물과 동일한 양단 경계조건으로 볼트와 ㄷ형강을 활용하여 고정단조건을 구현하여 콘크리트의 표준 화재 재하조건에서의 KS F 2257-7 「건축 부재의 내화 시험 방법-기둥의 성능 조건」에 따라 실험을 진행하였다. 실험체의 재하하중은 표 4와 같이 설계하중의 70%인 552 ton(60 MPa 강도 시험체) 및 737 ton(100 MPa 강도 시험체)을 적용하였다. 실험에 사용된 가열로는 그림 3과 같으며, 한국건설기술 연구원 화재안전연구센터에서 보유한 1000 ton까지 재하가 가

Table 4. Factor of fire test

No	Type	Strength of concrete (MPa)	Thcikness of concrete cover (mm)	Load (Ton)	Lateral Tie (Hoop & Wire-rope)	
					Volumetric ratio	Spacing (mm)
S-1	Non	60	40	552	0.003	200 (Hoop)
S-2	WR*+Non			552		43 (WR*)
S-3	WR*+FC*			552		43 (WR*)
S-4	Non	100		737		200 (Hoop)
S-5	WR*+Non			737		43 (WR*)
S-6	WR*+FC*			737		43 (WR*)

WR* : Wire Rope, FC* : Fiber Cocktail

Fig. 2. Drawing of specimen

Fig. 3. Furnace

능하며 시험체 높이는 3000 mm까지 수용이 가능한 1000 Ton 재하 기둥가열로이다.

3.3.3 화재거동 특성 평가방법

고강도 콘크리트 기둥의 내화성능 평가는 KS F 2257-7의 성능조건에 따라 하중지지력으로 내화성능을 평가하였다. 축방향 재하 부재의 경우 수축량과 변형률에 의해 판정하며, 수축량 식 (1)과 변형률 식 (2)의 2가지 기준을 모두 초과하였을 때 내화성능을 상실한 것으로 판단한다. 이에 따라 실험체의 높이는 모두 3000 mm로 수축량 기준은 30 mm이고 변형률 기준은 12 mm/min이다.

$$\text{수축량} : C = \frac{h}{100} \text{mm} \quad (1)$$

$$\text{변형률} : \frac{dC}{dt} = \frac{3h}{1000} \text{mm/min} \quad (2)$$

여기서,

h : 시험체의 초기 높이(mm)

3.3.4 전열특성 평가방법

고강도 콘크리트 기둥의 전열특성을 평가하기 위해 국토해양부 고시 제2008-334호의 제 4조에 규정되어 있는 주철근의 평균 538°C, 최고 649°C 이하의 온도를 한계온도로 규정하여 평가하였다.

4. 실험결과

4.1 60 MPa 고강도 콘크리트 기둥의 화재거동 및 전열특성

4.1.1 화재거동 특성 평가

100 MPa 고강도 콘크리트에 황구속보강(와이어로프) 및 폭렬저감제(Fiber-Cocktail) 혼입을 통한 내화보강 공법 적용 유무에 따라 S-1(NON)↔S-2(Wire)↔S-3(Wire+Fiber)에 대하여 내화실험을 실시하였으며 실험 전·후의 형상은 그림 4와 같으며, 실험결과는 표 5 및 그림 5와 같다.

S-1은 146분의 내화성능을 만족하였으며, S-2 및 S-3 시험체는 모두 180분 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 재하상태인 고강도 콘크리트 구조부

Fig. 4. Before&after of HSC column by fire test [60 MPa]

Table 5. The test result of HSC column [60 MPa]

Specimen	Time (min)	Displacement (mm)	Rate of displacement (mm/min)	Fire resistance (min)
S-1 (NON)	60	1.5	0.03	146
	120	0.7	-0.02	
	147	-42.6	-38.08	
S-2 (WR)	60	2.3	0.02	180
	120	2.9	-0.02	
	180	0.1	-0.05	
S-3 (WR +FC)	60	1.9	0.05	180
	120	3.5	0.03	
	147	4.5	0.01	

재의 경우 구속 및 응력의 실제 조건에 따라 화재 시 연성저하에 따른 내화성능에 중요한 영향을 끼치게 되므로 이를 근거로 하여 60 MPa 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능 영향을 분석하였다. S-1의 경우 실험체의 열팽창으로 인하여 75분경 최대 1.6 mm의 최대 팽창이 발생한 후 수축이 시작되었고, S-2의 경우에는 100분경 최대 3.1 mm의 팽창이 발생한 후 수축이 시작되었으며 S-3의 경우 내화실험을 수행한 180분 동안 수축이 진행되지 않았다. 최대 팽창이 발생한 이후 S-1은 열팽창이 제거되고 변위가 0 mm가 되는 시점까지 약 55분이 소요되었으며, S-2는 약 80분이 소요되었다.

Fig. 5. The deformation of HSC column in fire test [60 MPa]

4.1.2 전열특성 평가

60 MPa 고강도 콘크리트에 횡구속보강(와이어로프) 및 내화보강(Fiber-Cocktail) 공법 적용 유무에 따라 S-1(NON)↔S-2(Wire)↔S-5(Wire+Fiber)에 대하여 주철근의 한계온도 규정범위에 대한 전열특성을 평가한 결과, 표 6 및 그림 6과 같이 S-1은 105분, S-2는 142분, S-3는 180분 이상의 시간 동안 한계온도기준을 만족하는 것으로 나타났다. 내화보강을

Table 6. The variation temperature of HSC column according to time [60 MPa]

Specienn	Time (min)	Temp. AVG (°C)	Temp .MAX (°C)	Note
S-1 (NON)	60	224	245	내화성능: 146분 평균초과: 105분 최고초과: 107분
	120	646	740	
	147	823	935	
S-2 (WR)	60	185	257	내화성능: 180분 평균초과: 142분 최고초과: 144분
	120	440	533	
	147	559	662	
	180	696	795	
S-3 (WR +FC)	60	152	163	내화성능: 180분 평균초과: - 최고초과: -
	120	316	339	
	180	493	544

Fig. 6. The steel temperature of HSC column in fire test [60 MPa]

하지 않은 실험체인 S-1의 경우 내화성능을 상실한 147분에서 평균 및 최고온도는 각각 823°C, 935°C로 나타났고, 적용공법에 따라 내화실험 종료시점인 180분에서 평균온도 및 최고온도는 S-2의 경우 696°C, 795°C로 나타났고 S-3의 경우 493°C, 544°C로 나타났다. 이는 프리스트레스 와이어로프를 적용한 S-2가 내화보강을 하지 않은 S-1에 비해 최대 팽창량 기준으로 2배 이상 연성이 증가되어 고강도 콘크리트의 조기좌굴로 인한 콘크리트 박리 및 균열을 저감시켰기 때문에 판단된다.

그럼 5에서 보는 바와 같이 화재에 노출된 시험체는 시험 시작 후 폭열이 발생되는 30분을 기점으로 하여 다른 전열특성을 보인다. Fiber Cocktail을 혼입한 S-3 시험체의 경우에는 시험체가 고온에 노출된 지 30분이 경과한 후 콘크리트 내부에서 발생하는 공극압을 효과적으로 콘크리트 외부로 배출시키고 콘크리트 내부의 균열을 제어하여 폭열을 저감시켰기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 100 MPa 고강도 콘크리트 기둥의 화재거동 및 전열특성

4.2.1 화재거동 특성평가

100 MPa 고강도 콘크리트에 횡구속보강(와이어로프) 및 내화보강(Fiber-Cocktail) 공법 적용 유무에 따라 S-4(NON)↔S-5(Wire)↔S-6(Wire+Fiber)에 대하여 내화실험을 실시하였으

Fig. 7. Before&after of HSC column by fire test [100 MPa]

Table 7. The test result of HSC column [100 MPa]

Specimen	Time (min)	Displacement (mm)	Rate of displacement (mm/min)	Fire resistance (min)
S-4 (NON)	40	-35.6	-30.83	43
	120	-	-	
	180	-	-	
S-5 (WR)	60	-0.2	-0.13	69
	70	-37.8	-33.31	
	180	-	-	
S-6 (WR +FC)	60	2.2	0.03	180
	120	3.8	-0.01	
	180	3.7	-0.03

Fig. 8. The deformation of HSC column in fire test [100 MPa]

며 실험 전·후의 형상은 그림 7과 같으며, 실험결과는 표 7 및 그림 8과 같다. 실험결과 내화보강을 하지 않은 S-4 시험체는 43분, 와이어로프로 내화보강을 한 S-5 시험체는 69분, 와이어로프와 섬유보강 공법의 내화보강을 한 S-6 시험체는 180분 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 내화보강을 하지 않은 일반 고강도 콘크리트 기둥인 S-4의 경우 실험을 수행한지 25분이 경과하여 최대 팽창을 0.6 mm를 나타낸 후 수축이 시작되었으며, 내화성능을 상실한 44분에서 수축량 및 변형률이 각각 -35.6 mm, -30.83 mm로 나타났다. 와이어로프를 적용한 S-5 실험체의 경우의 경우 41분이 경과한 후 최대팽창율은 0.6 mm를 나타낸 후 수축을 시작하였다. 내화성능을 상실한 70분이 경과한 시점에서는 수축량 및 변형률이 각각 -37.8 mm, -33.31 mm로 나타났다. 반면 와이어로프와 섬유보강 내화공법을 적용한 S-6의 경우 142분이 경과한 후 4.0 mm로 최대 팽창한 후 시험이 종료된 시점인 180분에서의 변형량 및 변형률은 각각 3.7 mm, -0.03 mm로 나타났다.

4.2.2 전열특성 평가

100 MPa 고강도 콘크리트에 황구속보강(와이어로프) 및 내화보강(Fiber-Cocktail) 공법 적용 유무에 따라 S-4(NON)↔S-5(Wire)↔S-6(Wire+Fiber)에 대하여 주철근의 한계온도 규정범위에 대한 전열특성을 평가한 결과, 표 8 및 그림 9와 같이 S-4는 44분, S-5는 61분, S-3는 112분의 시간동안 한

Table 8. The variation temperature of HSC column according to time [100 MPa]

Speciemn	Time (min)	Temp. AVG (°C)	Temp .MAX (°C)	Note
S-4 (NON)	44	422	574	내화성능: 43분 평균초과: 44분 최고초과: 44분
	120	-	-	
	180	-	-	
S-5 (WR)	60	487	642	내화성능: 69분 평균초과: 64분 최고초과: 61분
	61	500	652	
	64	539	677	
	70	674	765	
	120	-	-	
	180	-	-	
S-6 (WR +FC)	60	272	328	내화성능: 180분 평균초과: 113분 최고초과: 124분
	113	540	593	
	120	573	631	
	124	593	653	
	180	863	931	
	180	863	931

Fig. 9. The steel temperature of HSC column in fire test [100 MPa]

계온도기준을 만족하는 것으로 나타났다. 내화보강을 하지 않은 실험체인 S-4의 경우 내화성능을 상실한 44분에서 평균 및 최고온도는 각각 422°C, 574°C로 한계온도 범위를 초과하지 않았으나 극심한 폭열 및 변형으로 인해 실험이 중단되었다. 와이어로프 공법을 적용한 S-5 시험체의 경우 61분에서 주철근 최대온도 범위인 649°C를 초과하는 652°C의 온도 범위를 나타냈으며, 주철근 평균 임계온도인 538°C를 초과한 시간은 시험 시작 후 64분이었다. S-5 시험체는 시험시작 70분 경과 후 폭열 및 시험체의 변형으로 인해 실험이 중단되었다. 와이어로프 공법과 섬유혼입 공법을 동시에 내화보강한 S-6 시험체의 경우 변형량 기준으로 180분의 내화성능을 만족하였으나, 주철근의 평균 임계온도 및 최대 임계온도 초과시간은 각각 113분, 124분이었다. 및 최고온도는 S-2의 경우 696°C, 795°C로 나타났고 S-3의 경우 493°C, 544°C로 나타났다. 한계 임계온도에 따른 100 MPa 고강도 콘크리트의 전열특성은 내화보강을 하지 않은 일반 시험체(S-4)에

비해 와이어로프와 섬유혼입을 동시에 내화보강한 시험체(S-6)가 2배 가까운 시간동안 한계온도 성능을 확보할 수 있었으나, 180분의 시간동안 임계온도 확보는 만족하지 못하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 60 MPa 및 100 MPa 고강도 콘크리트 기둥의 강도에 따른 화재거동 및 전열특성에 대해 알아보기 위해 500×500×3000 mm 크기의 기둥을 대상으로 내화실험을 수행하였으며, 하중지지력에 의한 내화성능과 국토해양부 관리기준에 의한 한계온도를 기준으로 성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강도에 따른(60 MPa, 100 MPa) 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 분석한 결과, 내화보강을 하지 않은 60 MPa 시험체(S-1)의 경우 146분, 고강도 콘크리트 관리기준(국토해양부 고시 제2008-334)에는 105분의 내화성능 시간을 만족하는 것으로 나타났다. 반면 내화보강을 하지 않은 100 MPa 시험체(S-4)의 경우를 적용한 경우 43분, 고강도 콘크리트 관리기준에는 44분의 내화성능 시간을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트가 고강도화가 될수록 시멘트 매트릭스 구조가 치밀해지며 폭열에 큰 영향을 주는 공극압이 더욱 커져 폭열이 더욱 극심하게 이루어 지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 고강도화에 따른 콘크리트의 취성이 더욱 증가하여 화재에 노출된 기둥 시험체의 조기좌굴이 발생한 것으로 판단된다.
- 2) 와이어로프 공법을 적용한 시험체의 내화성능을 분석한 결과 60 MPa 시험체(S-2)의 내화성능은 180분, 국토해양부 고강도 콘크리트 관리기준에는 142분의 시간동안 성능을 만족하는 것으로 나타났다. 반면 100 MPa 시험체(S-5)의 경우 내화성능은 69분, 국토해양부 고강도 콘크리트 관리기준에는 61분의 시간동안 성능을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 와이어로프를 적용할 경우 기둥부재의 연성을 증가시키고, 주근에 대한 횡구속력을 강화시켜 기둥부재의 좌굴을 지연시키고, 주철근 횡보강에 따른 콘크리트의 균열을 저하시켰기 때문으로 판단되며 100 MPa 이상의 고강도 콘크리트 기둥의 3시간 이상 내화성능을 확보하기 위해서는 주철근의 횡보강 이외의 내화공법이 별도로 필요한 것으로 판단된다.
- 3) 와이어로프 공법과 섬유보강 공법(Fiber-Cocktail 혼입) 동시에 적용한 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 분석한 결과, 60 MPa 시험체(S-3)의 시험체는 내화성능 및 고강도 콘크리트 관리기준에 180분 이상의 시간동안 성능을 만족하는 것으로 나타났다. 반면 100 MPa 시험체(S-6)의 경우 내화성능은 180분을 확보하였지만, 국토해양부 고강도 콘크리트 관리기준에는 113분의 시간동안 성능을 만족하는 것으로 나타났다. 이는 와이어로프의 횡보강을 통한 주철근의 하중지지력의 성능향상과 Fiber cocktail 보강을 통해 화재에 노출된 콘크리트의 폭열

및 균열방지를 통해 기둥 시험체의 철근이 고온에 노출되는 시간을 지연시켰기 때문인 것으로 판단되며 두가지 공법을 동시에 내화보강할 경우 고강도 콘크리트의 내화성능이 우수한 것으로 나타났다.

- 4) 와이어로프 및 섬유보강 공법을 100 MPa고강도 콘크리트에 적용할 경우 3시간의 내화성능을 확보하였으나, 국토해양부 고시의 관리대상 기준에는 성능이 미치지 못하는 것으로 판단된다. 하지만 열화가 발생한 콘크리트 피복부분에 대한 적절한 보수·보강이 이루어질 경우 구조체의 재사용까지도 가능할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부의 지원하에 한국건설기술연구원이 수행하고 있는 국가 R&D인 “(12주요)구조물 성능기반 화재거동해석 및 설계기술연구” 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Anderberg, Y. (1997) “Spalling phenomena of HPC and OC”, NIST Workshop on Fire Performance of High Strength Concrete in Gaithersburg.
- Andrew H. Buchanan (2002) “Structural Design for Fire Safety”, John Wiley & Sons Ltd.
- Harada, T. (1972) “Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures”, ACI SP-34, Vol. 1, pp. 393.
- Hertz, K.D. (2003) Limits of spalling of fire-exposed concrete, *Fire Safety Journal*, pp. 103-116.
- Kim, H.-J. (2007) Review of Spalling Effect on Concrete Element in Fire, *Journal of Korea Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 21, No. 2.
- Kim, H.-Y. (2002) An Experimental Study on the Mechanical Behavior of Normal Strength at High Temperature, *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 18, No. 11, pp. 77-82.
- Kim, H.-Y. (2010) A Study on Fire Performance and Heat Transfer of HPC Column with Fiber-Cocktail in ISO under Loading Condition, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-39.
- Korea Standard Association (2005) “Method of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction-General Requirements(KS F 2257-1)”, pp. 3-13.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2008) “Fire Resistance Performance Management Standard for High Strength Concrete Column and Beam Member”, Public notice of Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(No.2008-334), pp. 1-8.
- Won, J.-P. (2008) Fire Resistance Performance for Hybrid Fiber Reinforced High Strength Concrete Column Member, *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 6, pp. 827-832.

◎ 논문접수일 : 2012년 10월 23일
 ◎ 심사외뢰일 : 2012년 10월 31일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 11월 07일