60 MPa급 고강도 콘크리트 기둥의 내화공법 유형별 화재거동 및 전열 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study for Fire Behavior and Heat Transfer Properties for Types of Fire Protection Method for 60 MPa High-Strength Concrete Column

김형준* · 김흥열** · 조범연*** · 김경옥**** · 권기혁*****

Kim, Hyung-Jun · Kim, Heung-Youl · Cho, Bum-Yean · Kim, Kyung Ok · Kwan, Ki-Hyuk

Abstract

In this study, we intend to propose a method for improving fire resistance performance by adding Fiber-Cocktail made by hybridizing steel fiber and Polypropylene fiber as the materials for reducing explosion to enhance the fire resistance performance of high-strength concrete and the effect on the fire resistance performance under standard fire loading conditions, in case of applying pre-stressed wire rope to 60 MPa high-strength reinforced concrete column. According to the test result, in case of applying hoops, the fire performance for 147 minutes has been secured and the wire-rope for 180 minutes. However, it was shown that the temperature of the main reinforcement exceeded 538°C in average, 649°C at maximum specified in the notices related to fire resistance performance of high strength concrete. However, in case of applying both of wire-rope and fiber-cocktail, it was shown that the fire performance for more than 180 minutes has been secured.

Key words : High strength concrete, Wire rope, Hybrid fiber, Fire resistance, Column

요 지

본 연구는 60 MPa급 고강도 철근콘크리트 기둥에 와이어로프를 적용할 경우 표준화재 재하조건에서 내화성능에 미치는 영향 및 고강도 콘크리트의 내화성능 향상을 위하여 폴리프로필렌 섬유(Polypropylene Fiber)와 강섬유(Steel fiber)를 하이브리드한 섬유(Fiber-Cocktail)를 폭발저감재로 첨가하여 내화성능의 향상방안을 제시하고자 한다. 실험결과 띠철근을 적용한 경우 147분의 내화성능을 확보하였으며, 와이어로프를 적용한 경우 180분의 내화성능을 확보하는 것은 가능하였지만 주철근의 온도가 고강도 콘크리트의 내화성능 관련 고시에서 제시하고 있는 평균 538°C, 최고 649°C를 초과하는 것으로 나타났다. 하지만 와이어로프 및 Fiber-Cocktail을 모두 적용한 경우 내화성능은 180분 이상을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 고강도 콘크리트, 와이어로프, 하이브리드 섬유, 내화성능, 기둥

1. 서 론

고강도 콘크리트의 경우 일반강도 콘크리트에 비해 취성이 강해지고, 풍하중 및 지진하중과 같은 횡하중을 수용하는 연성이 떨어지게 된다. 따라서 고강도 콘크리트로 시공된 기둥의 경우 축하중에 대한 저항이 향상되는 장점과 횡하중에 대한 저항이 저하되는 단점을 동시에 가지게 되므로, 고강도

콘크리트 기둥은 강도와 연성을 동시에 확보할 수 있도록 설계되어야 한다.

최근의 연구결과에서는 고강도 철근콘크리트 기둥의 연성을 높이기 위하여 띠철근 대신 동일한 체적비의 고강도·고유연성의 와이어로프를 적용하는 대안이 제시되고 있다. 띠철근과 동일한 체적비의 와이어로프를 적용한 고강도 철근콘크리트 기둥의 경우 상온에서 띠철근을 적용한 경우 보다 높은

*정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구원(E-mail: kimfestival@kict.re.kr)

Member. 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. Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

***한국건설기술연구원 화재안전연구센터 연구원

Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

****㈜목양엔지니어링건축사사무소 대표이사

MokYang Architecture & Engineering

*****서울시립대학교 도시과학대학 건축공학과 교수

Dept. of Architectural Engineering, College of Urban Sciences, University of Seoul

연성을 확보하여 횡하중에 대한 저항능력이 향상되고 횡구속력을 향상시켜 수직하중에 대한 저항능력 또한 향상되는 것으로 나타났다. 이와 같이 상온에서 우수한 성능을 가지고 있는 와이어로프가 적용된 고강도 철근콘크리트 기둥을 현장에 적용하기 위해서는 내화성능 확보가 필수적이다.

이에 본 연구에서는 60 MPa급 고강도 철근콘크리트 기둥의 연성 및 횡구속력 향상을 위하여 띠철근 대신 와이어로프를 적용하고, 고강도 콘크리트의 내화성능 향상을 위하여 폴리프로필렌 섬유(Poly propylene Fiber)와 강섬유(Steel fiber)를 하이브리드한 섬유(Fiber-Cocktail)를 폭발저감재로 첨가하여 표준화재 재하조건에서 내화성능을 검증하여 현장적용을 위한 요구내화성능(3시간)의 확보방안을 제시하고자 한다.

2. 와이어로프 공법특성

와이어로프 공법은 고강도·고유연성의 와이어로프를 이용하여 철근콘크리트 부재의 횡구속력을 높임과 동시에 화재시 철근콘크리트 부재의 내력저하를 방지할 수 있는 기술이다. 대상공법은 와이어로프, 아이볼트, 정착플레이트, 너트로 구성된다. 와이어로프는 정착플레이트를 관통하는 아이볼트에 연결된다. 와이어로프의 비부착 고정을 위하여 아이볼트를 조이는 너트에서 토크가 가해진다.

3. 실험 개요

3.1 실험인자 및 수준

본 연구에서는 연성 및 횡구속력 향상을 위한 고강도·고연성의 와이어로프 및 내화성능 향상을 위한 Fiber-Cocktail을 적용한 고강도 철근콘크리트 기둥에 대하여 내화성능을 평가하기 위하여 Table 1과 같은 실험인자와 수준으로 내화실험을 진행하였다. 크기 500×500×3000 mm 고강도 철근콘크리트 기둥에 대하여 횡구속(띠철근↔와이어로프) 및 내화보강(무보강↔섬유혼입)을 실험인자로 설정하여 실험을 수행하였다.

3.2 사용재료

3.2.1 콘크리트

60 MPa 고강도 콘크리트는 Table 2와 같은 배합으로

Table 1. Factor of fire test

Parameter	Factor
Lateral tie	Tie bar↔Wire rope
Fire resistance reinforcement	Non↔Fiber-Cocktail

Table 2. Mix proportion of concrete

Parameter	W/B (W%)	S/a (V%)	Air (W%)	Unit weight of material(kg/m ³)							Ad. (kg/m ³)	Fiber (kg/m ³)	
				W	C	Slag	F/A	S/F	S	G		P.P	Steel
NON	26.2	46.0	2.0	165	572	163	82	0	639	759	8.19	0	0
MIX	26.2	46.0	2.0	165	572	163	82	0	639	759	9.45	1.5	40

Table 3. Physical properties of concrete

Type	Flow (mm)		Air content (%)	Strength at 28days (MPa)
Non	550	550	3.0	68.5
Fiber	630	620	3.5	75.5

Table 4. Physical properties of steel

Lateral tie		Type	Spacing (mm)
Rebar	Main	HD25	250
	Hoop	HD10	200
Wire rope		Ø6	43

Fiber-Cocktail 혼입 유무에 따라 H사의 배척플랜트를 통하여 생산하였다.

굳지않은 콘크리트의 플로우는 Fiber-Cocktail 무혼입 콘크리트의 경우 500 mm 이상, 혼입 콘크리트의 경우 600 mm 이상을 목표로 배합설계를 하였으며 측정결과 기준치를 모두 만족하였다. Fiber-Cocktail 혼입 콘크리트의 경우 30 mm 길이의 강섬유에 의해 콘크리트 타설시 시공성 저하될 가능성을 고려하여 무혼입 콘크리트에 비해 100 mm 높은 플로우를 목표로 배합설계를 실시하였다. 공기량 측정결과 Fiber-Cocktail 무혼입과 혼입 콘크리트 모두 목표 공기량 3%를 만족하였다. 콘크리트 강도는 28일간의 표준양생 후 압축강도를 측정한 결과 설계강도 이상의 압축강도를 확보할 수 있는 것을 확인하였다. 28일 표준양생 기준으로 콘크리트 압축강도는 무혼입 콘크리트가 68.5 MPa, Fiber-Cocktail 혼입 콘크리트의 경우 75.5 MPa로 나타났다. 60 MPa 고강도 콘크리트의 물성은 Table 3과 같다.

3.2.2 강재

기둥 제작 시 사용된 철근은 Table 4와 같이 건축구조물에 일반적으로 사용되고 있는 SS400 강종으로, 주철근은 HD25, 띠철근은 HD10을 적용하였다. 띠철근을 대체할 와이어로프의 경우 시공성과 경제성을 고려하여 직경 6 mm의 와이어로프를 사용하여 제작하였다. 와이어로프의 경우 SS400에 비해 항복강도 기준으로 4배, 인장강도 기준으로 3배 이상의 강도를 가지고 있다.

3.2.3 Fiber-Cocktail

폭발저감제인 Fiber-Cocktail은 폴리프로필렌 섬유(polypropylene fiber)와 강섬유(steel fiber)를 혼합한 하이브리드 섬유이다. 강섬유는 시공성을 고려하여 접착제를 사용한 묽음 형태로 플랜트 배치 시 혼합하고, 콘크리트 비빔 시에 해체

됨으로써 시공 시 펌프 타설이 가능한 형상의 K사 제품을 사용하였다. 또한 폴리프로필렌 섬유는 섬유간의 엉킴현상을 방지하고 수증기압의 효율적인 제어를 위해서, 길이와 직경이 다른 두 가지 타입의 섬유를 3(10 mm-5°):7(5 mm-3°)의 비율로 혼합하여 사용하였다.

3.3 실험체 제작

와이어로프 및 Fiber-Cocktail을 혼입한 60 MPa급 고강도 철근콘크리트 기둥의 내화성능 평가를 위하여 실험체는 Table 5와 같이 구성하였다. 콘크리트는 설계강도 60 MPa이며, 피복두께는 40 mm로 제작하였다. 실험인자인 횡보강근은 띠철근 및 와이어로프로 구분하여 적용하였으며, 이때 띠철근 및 와이어로프의 배근간격은 체적비 기준으로 0.003으로 동일하게 구성하여 내화성능을 평가하였다. 기둥 실험체 형상은 크기 500×500×3000 mm로 Fig. 1과 같이 제작하였다.

주근은 HD25로 250 mm 간격으로 실험체당 16개를 배근하였으며, 띠철근은 HD10로 200 mm 간격으로 배근하였다. 와이어로프를 적용한 실험체는 시공성과 경제성을 고려하여 공칭직경 6 mm를 적용하였다. 또한 와이어로프의 배근간격은 띠철근의 체적비와 와이어로프 체적비가 동일하게 하기 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 관리기준에 의거하여 설치하였으며, 기둥의 중앙부 주근에 총 4개소를 설치하였다.

Table 5. Composition of specimen.

Specimen	Parameter	Concrete strength	Thickness of concrete cover	Lateral tie	
				Volumetric ratio	Spacing
S-1	TB*	60 MPa	40 mm	0.003	200 mm
S-2	WR**				43 mm
S-3	WR+FC***				43 mm

TB* : Tie Bar, WR** : Wire Rope, FC*** : Fiber Cocktail

(a) Tie bar (b) Wire rope

Fig. 1. Drawing of specimen

Fig. 2. Furnace

3.4 실험방법

와이어로프 및 Fiber-Cocktail 혼입 고강도 철근콘크리트 기둥의 내화성능 평가를 위하여 Fig. 2와 같이 KS F 2257-7 「건축 부재의 내화 시험 방법-기둥의 성능 조건」을 따랐다. 온도조건은 ISO 834 화재곡선에 따라 부재를 가열하였다. 재하조건은 기둥부재가 실제 건축물에 적용되었을 경우를 가정하여 재하조건에서 내화성능을 평가하였다. 재하하중은 설계하중의 70%인 552 ton을 적용하였다.

재하조건에서 내화성능의 평가기준은 KS F 2257-1 「건축 부재의 내화 시험 방법-일반 요구 사항」에 따라 축방향 재하 부재의 경우 수축량과 변형률에 의해 판정하며, 수축량(1)과 변형률(2) 2가지 기준을 모두 초과하였을 때 부적합한 것으로 간주한다. 이에 따라 실험체의 높이는 모두 3000 mm로 수축량 기준은 30 mm이고 변형률 기준은 12 mm/min이다.

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

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

여기서, h : 시험체의 초기 높이(mm)

4. 실험결과

4.1 화재거동

4.1.1 와이어로프 적용에 따른 화재거동

와이어로프 적용 유무에 따라 S-1(TB), S-2(WR)에 대하여 내화실험을 실시한 결과 Table 6과 같이 S-1은 146분, S-2는 180분 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

S-1의 경우 실험체의 열팽창으로 인하여 75분경 최대 1.6 mm의 팽창이 발생한 후 수축이 시작되었고, S-2의 경우 100분경 최대 3.1 mm의 팽창이 발생한 후 수축이 시작되었다. 최대 팽창이 발생한 이후 S-1은 열팽창이 제거되고 변위가 0 mm가 되는 시점까지 약 55분이 소요되었으며, S-2는

Table 6. The test result of HSC column[S-1&S-2]

Specimen	Time (min)	Displacement (mm)	Rate of displacement (mm/min)	Fire resistance (min)
S-1 (TB)	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

Fig. 3. The deformation of HSC column in fire test[S-1&S-2]

약 80분이 소요되었다. 이처럼 S-2의 경우 최대 팽창량은 S-1에 비해 2배 이상 발생하였고, 열팽창이 최대로 발생하는데 소요되는 시간과 제거되는데 소요되는 시간은 각각 33%, 46%이상 더 발생하였다. 또한 60 MPa급 고강도 철근콘크리트 기둥에 와이어로프를 적용할 경우 띠철근을 배근할 경우보다 최소 39%이상 내화성능을 확보할 수 있을 것으로 나타났다. 따라서 60 MPa급 고강도 철근콘크리트 기둥에 와이어로프를 적용할 경우 화재 시 띠철근을 적용한 경우에 비해 기둥부재의 축방향 연성이 증대되며, 주근에 대한 횡구속력을 강화되어 기둥부재의 좌굴을 지연시켜 내화성능이 향상되는 것으로 판단된다. 와이어로프 적용 유무에 따른 S-1 및 S-2의 변형량은 Fig. 3과 같다.

4.1.2 와이어로프와 Fiber-Cocktail 혼입에 따른 화재거동

와이어로프 적용조건에서 Fiber-Cocktail 혼입 유무에 따라 S-2(WR), S-3(WR+FC)에 대하여 내화실험을 실시한 결과 Table 7과 같이 S-2과 S-3 모두 180분 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

S-2의 경우 100분경 최대 3.1 mm의 팽창이 발생한 후 수축이 시작되었다. S-3의 경우 180분까지 4.5 mm의 팽창이 발생하였으며, 수축은 발생하지 않았다. 이처럼 60 MPa급 고강도 철근콘크리트 기둥에 와이어로프와 Fiber-Cocktail을 적용한 경우 와이어로프만을 적용한 경우에 비해 폭렬에 의한 단면손실이 저감되고 내력저하의 감소로 이어져 내화성능이 향상되는 것으로 판단된다. 와이어로프 적용조건에서 Fiber-Cocktail 혼입에 따른 S-2 및 S-3의 변형량은 Fig. 4와 같다.

Table 7. The test result of HSC column[S-2&S-3]

Specimen	Time (min)	Displacement (mm)	Rate of displacement (mm/min)	Fire resistance (min)
S-2 (WR)	60	2.3	0.02	180분
	120	2.9	-0.02	
	180	0.1	-0.05	
S-3 (WR+FC)	60	1.9	0.05	180분
	120	3.5	0.03	
	180	4.5	0.01

Fig. 4. The deformation of HSC column in fire test[S-2&S-3]

4.2 전열 특성

4.2.1 와이어로프 적용에 따른 전열 특성

와이어로프를 적용에 따른 주철근의 온도변화를 측정할 결과 Table 8과 같이 나타났다. S-1의 경우 내화성능을 상실한 147분에서 평균 및 최고온도는 각각 823°C, 935°C로 나타났다. S-2의 경우 S-1이 내화성능을 상실한 147분에서 평균 및 최고온도는 각각 559°C, 662°C로 나타났고, 내화실험을 종료한 180분에서 평균 및 최고온도는 696°C, 795°C로 나타났다. S-1이 내화성능을 상실한 147분에서 S-2는 S-1에 비해 평균온도는 264°C, 최고온도는 273°C가 낮은 것으로 나타났다. 이는 와이어로프를 적용한 S-2가 띠철근을 적용한 S-1에 비해 최대 팽창량 기준으로 2배 이상 연성이 증가되어 수축이 발생하게 되는 시점이 지연되고, 실험체에 가해진 열 및 하중에 의한 고강도 콘크리트의 균열이 저감되었기 때문으로 판단된다.

Table 8. The variation temperature of HSC column according to time[S-1&S-2]

Specimen	Time (min)	Rebar AVG Temp. (°C)	Rebar MAX Temp. (°C)
S-1 (TB)	60	224	245
	120	646	740
	147	823	935
S-2 (WR)	60	185	257
	120	440	533
	147	559	662
	180	696	795

Fig. 5. The steel temperature of HSC column in fire test[S-1&S-2]

와이어로프 적용에 따른 고강도 콘크리트 기둥의 주철근 온도변화 양상은 S-1이 최대 열팽창이 발생한 이후 수축이 시작되는 시점인 75분경까지는 비슷한 온도상승 경향을 나타냈지만, 수축이 시작되면서 S-1의 온도가 S-2에 비해 빠르게 상승하기 시작하였다. 이는 S-1의 콘크리트 파복이 수축에 의해 균열이 증가되기 때문으로 판단된다.

4.2.2 와이어로프와 Fiber-Cocktail 혼입에 따른 전열특성

와이어로프 적용 조건에서 Fiber-Cocktail 혼입에 따른 주철근의 온도변화를 측정한 결과 Table 9와 같이 나타났다. 내화실험을 종료한 180분에서 S-2의 경우 평균 및 최고온도가 각각 696°C, 795°C로 나타났고, S-3의 경우 평균 및 최고온도가 각각 493°C, 544°C로 나타났다. 이처럼 내화실험을 종료한 180분에서 S-3은 S-2에 비해 평균온도는 203°C, 최고온도는 251°C가 낮은 것으로 나타났다. 이는 와이어로프 적용 조건에서 Fiber-Cocktail을 적용함으로써 폭렬이 저감되었기 때문으로 판단된다.

S-2 및 S-3의 주철근 온도를 비교한 결과 Fig. 6과 같이 나타났다. S-2는 내화실험 시작 30분 경 폭렬에 의해 일부 콘크리트 파복이 탈락되면서 평균온도와 최고온도의 차이가 발생하기 시작하여 내화실험 종료시점인 180분에서 99°C의 차이가 발생하였으나, S-3의 경우 내화실험 종료 시점인 180분에서 51°C의 차이가 발생하였다. 따라서 S-2에 비해 S-3이 폭렬제어가 효과적으로 이루어졌음을 확인할 수 있었다.

Table 9. The variation temperature of HSC column according to time[S-2&S-3]

Specimen	Time (min)	Rebar AVG Temp. (°C)	Rebar MAX Temp. (°C)
S-2 (WR)	60	185	257
	120	440	533
	180	696	795
S-3 (WR+FC)	60	152	163
	120	316	339
	180	493	544

Fig. 6. The steel temperature of HSC column in fire test[S-1&S-2]

Fig. 7. Before & After of HSC column by the fire test

5. 결 론

60 MPa급 고강도 콘크리트 기둥의 내화공법 유형별 화재거동 및 전열 특성을 비교한 결과 다음과 같이 나타났다.

- 1) 와이어로프 적용에 따른 60 MPa급 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 분석한 결과 띠철근(S-1)을 적용한 경우 146분, 와이어로프(S-2)를 적용한 경우 180분 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 이는

와이어로프를 적용할 경우 기둥부재의 연성을 증가시키고, 주근에 대한 횡구속력을 강화시켜 기둥부재의 좌굴을 지연시키기 때문에 판단된다.

- 2) 와이어로프 적용조건에서 Fiber-Cocktail 혼입 유무에 따른 60 MPa급 고강도 콘크리트 기둥의 내화성능을 분석한 결과, 와이어로프만 적용한 경우(S-2)와 와이어로프와 Fiber-Cocktail을 모두 적용한 경우(S-3) 각각 180분 이상의 내화성능을 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 와이어로프와 Fiber-Cocktail을 모두 적용한 경우 와이어로프만을 적용한 경우보다 변형량이 적게 발생하여 내화성능이 우수한 것으로 나타났다.
- 3) 와이어로프를 적용에 따른 주철근의 온도변화를 측정된 결과 띠철근을 적용한 실험체(S-1)가 내화성능을 상실한 147분을 기준으로 와이어로프를 적용한 실험체(S-2)가 띠철근을 적용한 실험체(S-1)에 비해 평균온도는 264°C, 최고온도는 273°C가 낮은 것으로 나타났다. 이는 와이어로프를 적용할 경우 띠철근을 적용한 경우에 비해 연성이 증가되어 실험체에 가해진 열 및 하중에 의한 균열 및 폭렬이 저감되었기 때문에 판단된다.
- 4) 와이어로프 적용 조건에서 섬유혼입에 따른 주철근의 온도변화를 측정된 결과 내화실험을 종료한 180분에서 와이어로프 및 Fiber-Cocktail을 적용한 실험체(S-3)은 와이어로프만 적용한 실험체(S-2)에 비해 평균온도는 203°C, 최고온도는 251°C가 낮은 것으로 나타났다. 이는 와이어로프 적용 조건에서 Fiber-Cocktail을 적용함으로써 폭렬이 저감되었기 때문에 판단된다.

실험결과 띠철근을 적용하고 Fiber-Cocktail을 적용하지 않을 경우 내화성능 3시간 확보에 실패하였고 와이어로프를 적용할 경우 3시간의 내화성능은 확보하였지만 내화성능의 한계점에 도달한 것으로 판단된다. 하지만 와이어로프 및 Fiber-Cocktail을 적용한 경우 목표 내화성능인 3시간을 무난히 만족하였다. 따라서 향후 60 MPa급 고강도 콘크리트 기둥이 화재피해를 입을 경우에 적용할 적절한 보수·보강 공법을 개발·적용한다면 재사용까지도 가능할 것으로 기대된다.

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

- Kim, H.Y., Kim, H.J., Jeon, H.K., Youm, K.S., and Lee, J.S. (2010) A Study on Fire Performance and Heat Transfer of HPC Column with Fiber-Cocktail in ISO Fire under Loading Condition, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, pp. 29-39.
- Kim, H.J., Kim, H.Y., Park, K.H., Jung, J.Y., Kwon, K.H. (2009) An Experimental study on Thermal Damage and Spalling of Concrete Lining in Tunnel Fire, *Journal of Korea Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 54-63.
- 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 2002.
- Hertz, K.D. (2003) Limits of spalling of fire-exposed concrete, *Fire Safety Journal*, pp. 103-116.
- Morris, W.A. (1998) “Guidelines for the construction of fire-resisting structural elements”, Building Research Establishment Report
- Phan, L.T. (2002) High-strength concrete at high temperature: An overview, *Proceedings of 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Leipzig, Germany, pp. 501-518.
- William, D. Callister, Jr. (2006) ‘Materials Science and Engineering : An Introduction’, John Wiley & Sons, Inc.

◎ 논문접수일 : 2012년 10월 22일
 ◎ 심사의뢰일 : 2012년 10월 31일
 ◎ 심사완료일 : 2012년 11월 22일