

# 고강도콘크리트의 폭발대책공법에 대한 국내외 현황과 성능적 구조내화설계를 위한 과제

## Trends of Research and Practical Use on Explosive Spalling Properties and Performance Based of Structural Design of the High-Strength Concrete

권 영 진\*

Kwon, Young Jin

### ABSTRACT

When reinforced concrete is subjected to high temperature as in fire, there is deterioration in its properties of particular importance are loss in compressive strength, cracking and spalling of concrete, destruction of the bond between the cement paste and the aggregates and the gradual deterioration of the hardened cement paste. Assessment of fire-damaged concrete usually starts with visual observation of color change, cracking and spalling of the surface.

In this paper, it was reported the trends of research and practical use on the Explosive Spalling Properties and Performance Based of Structural Design of the High-Strength Concrete.

### 요 약

지금까지 콘크리트는 내화재료로서 일정한 두께만 확보하면 내화구조로 인정됨으로서, 콘크리트는 화재에 대하여 매우 우수한 소재로 알려져 왔다. 그러나 콘크리트가 고강도화 됨에 따라 부재의 내부 조직이 치밀화되어 화재 시에 발생하는 열응력 및 수증기압 등의 이유로 인하여 일정 이상의 고온에서 피복콘크리트가 심한 폭음과 함께 박리·박락되는 폭발(Explosive Spalling) 현상이 발생되며, 이러한 폭발현상은 철근콘크리트 부재 파편의 비산되는 1차 폭발현상으로 인하여 피난자들의 인명안전성을 위협 할 뿐만 아니라 철근의 노출 및 부재단면의 감소되는 2차 폭발현상이 발생됨에 따라 구조물의 붕괴로 이어질 수 있다는 것이 2005년 스페인 마드리드시의 원저타 워화재사례에서 경험한바이다.

이러한 사실은 2004년~2008년도의 각종 매스컴 및 중앙일간지 등의 보도자료로 이슈화됨으로써 고강도, 초고강도 및 고성능 콘크리트의 내화성능에 대한 근본적인 재확인 작업이 요구되었으며, 2008년 5월에는 「고강도콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준」이 국토해양부의 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」으로 고강도콘크리트에 대한 내화 성능확보 방안으로 개정되었고, 이에 따라 국내의 각 주요 건설사에서는 고강도콘크리트의 폭발을 고려한 내화공법의 개발에 박차를 가하고 있다.

한편, 본 관리규정의 적절성에 대한 검증과 이미 축조된 구조물에 대한 대책 및 현재 선진 각국에서 시행되고 있는 성능적 구조내화설계기법에 대한 대책 등이 향후 본 학회의 주요 과제로 됨으로써, 본 위원회에서는 폭발메커니즘을 중심으로 한 제1차 전문위원회 연구발표를 2006년도에 시행하였고, 그 후 2년간의 각 건설업체의 내화공법개발현황에 대한 발표회를 통하여 현재의 국내 기술수준 및 현황을 파악하고 향후 진전방향등에 대한 토론을 통하여 구체적인 추진방향을 모색하고자 한다.

\* 정회원, 호서대학교, 소방방재학과, 초고층·장대터널방재연구실, 교수·공박, 콘크리트 내화위원장

## 1. 서 론

최근 콘크리트 기술의 비약적인 발전에 따라 건축물은 대형화·(초)고층화 되어 바야흐로 우리나라에도 초고층 건축물 시대가 도래하였으며, 이는 도시의 스카이라인을 변모시켜 랜드마크로서 상징성을 갖게 되었다. 초고층 건축물은 당대의 첨단건설기술이 총체적으로 집약된 결정체일 뿐만 아니라 오늘날에 이르러서도 한 국가의 상징물 또는 경제성장의 척도로 인식되는 경향이 강하기 때문에 지난 세계무역센터의 붕괴사건으로 인한 일각의 우려에도 불구하고 세계적인 초고층화 추세는 향후에도 계속될 것으로 전망된다.

한편, 2004년도에 중앙매스컴인 KBS에서 보도된 바와 같이 고강도, 초고강도 및 고성능 콘크리트의 내화성능에 대한 근본적인 재확인 작업이 요구되어 이에 대한연구가 진행되고 있으며, 콘크리트 학회에서는 「콘크리트의 내화특성」에 관한 단행본이 발간된 후 내화콘크리트위원회가 발족되어, 폭발현상에 대한 특집과 제1차 전문위원회 연구발표가 됨으로서 그 결과 주관부처인 정부관계부처, 공인평가기관, 시공사 및 연구자들의 대응방안이 활발하게 논의되었으며, 2007년에는 대한건축학회 고강도콘크리트 구조내화설계 지침의 제정 기준안에 관한 연구를 중심으로 공청회가 개최되었다.

이러한 배경으로 지난 2008년 국토해양부에 의하여 「고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준」 제정안이 마련되었으며, 그 기준은 설계기준강도 50 MPa 이상의 고강도콘크리트를 대상으로 내화성능을 평가하도록 함으로서, 이에 따라 각 주요 건설사들이 내화대책을 위한 연구·개발이 활발하게 진행되고 있으나 본 관리규정의 적절성에 대한 검증과 이미 축조된 구조물에 대한 대책 및 현재 선진 각국에서 시행되고 있는 성능적 구조내화설계기법에 대한 대책 등이 향후 본 학회의 주요 과제로 대두되고 있다.

따라서 본 위원회에서는 폭발메커니즘을 중심으로 한 제1차 전문위원회 연구발표를 2006년도에 시행하였고, 그 후 2년간의 각 건설업체의 내화공법개발현황에 대한 발표회를 통하여 현재의 국내 기술수준 및 현황을 파악하고 향후 진전방향등에 대한 토론을 통하여 구체적인 추진방향을 모색하고자 한다.

## 2. 한국과 일본의 고강도콘크리트 폭발대책 공법현황

### 2.1 한국의 고강도콘크리트의 폭발대책 공법현황

국내 건설사들의 고강도콘크리트 내화성능을 향상시키기 위한 연구는 주로 대기업을 중심으로 이루어지고 있으며, 현재 적용되고 있거나 개발 중인 고강도콘크리트의 내화대책·공법은 표1과 사진1에 나타난 바와 같이 설계기준강도 40~100 MPa 고강도콘크리트를 대상으로 폭발대책공법의 연구 및 실용화가 진행되고 있다. 주요내용은 섬유혼입방법, 내화보드부착방법 및 내화모르타르 뿔칠공법 등이 주류를 이루고 있는 것으로 평가된다.

표 1. 한국 건설사의 고강도콘크리트 폭발대책공법

건설사	설계강도	공법 개요
(주) 포스코건설	40~100 MPa	- PFB 공법은 외부에서 열을 차단하는 공법으로 시축 및 기존건축물에 적용가능 - PFR 보드는 알루미늄실리케이트계 내화보드를 내화접착제로 구조체에 부착 - 건축부재의 내화시험(KS F 2257-1) 실시 ⇒ 주근온도를 300℃이하로 제어
삼성물산(주) 건설부문	80 MPa	- 콘크리트에 PP섬유를 혼입하여 폭발을 방지 - 사진에 섬유혼입 고강도의 콘크리트의 폭발시험을 실시함 - 서초 프로젝트 현장 적용
두산산업 개발(주)	40 MPa	- 콘크리트에 PP섬유를 혼입하여 폭발저감 및 메탈라스 구속 횡변형 제어 - 건설교통부 신기술 제454호 획득 - 부산 수영만 주상복합 건축물에 현장 적용
GS 건설	50~100 MPa	- 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입하여 사용하는 섬유혼입공법(Fiber Cocktail) - 60 MPa 보 부재 및 80 MPa 기둥부재 내화시험을 통한 폭발저감 및 내화성능확인
대림산업(주) 건설부문	60~80 MPa	- ECC 시멘트 복합체를 영구거푸집으로 활용하여 고강도콘크리트의 내화공법 - 내화시험을 통한 내화성능 확인
PNR 건설	60~80 MPa	- 고인성내화모르타르의 내화피복공법(신설 및 보수공법) - 일본 공개내화실험을 통하여 우수한 내화성능확인 - 일본 HIDA 터널(일본 제2 장대터널)의 내화재료로 선정



a. FFR 내화보드 부착공법    b. PP섬유 혼입공법    c. PP섬유혼입 및 메탈라스 구축공법    d. Fiber Cocktail 혼입공법    e. ECC 영구거푸집 공법    f. ECC내화모르타르의 내화피복공법

사진 1. 한국의 고강도콘크리트의 폭렬대책 공법 현황

## 2.2 국외의 고강도콘크리트의 폭렬대책 공법현황 및 연구방향

### 2.2.1 국외의 고강도콘크리트의 폭렬대책 공법현황과 연구현황

일본의 경우 설계기준강도 60 MPa를 기준으로 그 이상의 고강도콘크리트를 대상으로 내화성능기준을 규정됨에 따라 초기에는 60 MPa~100 MPa 급에 대한 고강도콘크리트를 대상으로 한 연구가 주류를 이루었으나, 2003년도 이후부터는 150 MPa이상의 초고강도 콘크리트를 대상으로 한 폭렬대책공법에 대한 연구 및 실용화가 주류를 이루어지고 있다. 또한, 일본콘크리트공학협회를 중심으로하여 일본건축학회, 토목학회 및 화재학회 등이 중심이 되어 폭렬현상해석에 대한 연구가 체계적으로 이루어지고 있다.



a. 유기섬유 & 강섬유혼입    b. 섬유혼입&내화피복    c. 폴리프로필렌 수지혼입    d. 발포형 내화도료    e. 강판에 의한 비산방지

사진 2. 일본의 고강도콘크리트의 폭렬대책 공법 현황

표 2. 일본 건설사의 고강도콘크리트 폭렬대책공법

건설사	설계강도	공법 개요
카지마건설	150~180 MPa	- 실기등부재에 대한 내화성능 평가 완료 - 폭렬방지를 위한 PP섬유의 적정 혼입율은 W/B 0.15에서 1.5~2.0kg/m <sup>3</sup> , W/B 0.18~0.20에서는 1.0kg/m <sup>3</sup> 로 나타남 - 단면 1,000mm×1,000mm 기동시험체의 내화실험시, 주근의 최고온도를 500℃ 이하로 제어
다이세이건설	130~150 MPa	- 에틸렌비닐알콜(EVA)공중합체 유기섬유를 콘크리트에 일정량 혼입한 기술 - 물시공실험 결과, 기존의 PP섬유에 비하여 EVA공중합체 유기섬유를 사용함으로써 고강도콘크리트의 시공성이 개선됨
다케나카공무점 및 시미즈건설	80 MPa 이상	- 유기섬유 혼입량을 증가시키기 위한 전용의 초고성능감수제를 개발하고, 유기섬유와 강섬유를 동시에 혼입하여 고강도콘크리트의 폭렬저항성 및 인성능을 확보 - 다케나카공무점 및 시미즈건설은 AFR(Advanced Fire Resistant) 콘크리트에 대하여 공동연구 개발하여 건축기술성능증명(제60-01호)을 일본건축총합시험으로부터 취득
구마가이건설의 6개사 공동컨소시엄	60~100 MPa	- 대상으로 한 피복공법은 1)섬유혼입 규산칼슘판, 2)세라믹계 경질내화피복재, 3)모르타르, 4)셀룰로스 섬유혼입 모르타르의 4종류 - 철근콘크리트조 기둥부재의 외주면에 각종 피복을 설치하여 내화성능을 향상시킨 공법으로, 건축기술성능증명(제02-17호)을 일본건축총합시험으로부터 취득
FPC공법 공동개발연구회	60~120 MPa	- FPC(Fire Performance Concrete)공법이란 설계기준강도 60~120MPa의 고강도콘크리트에 폴리프로필렌 수지분말을 1.0~3.0kg/m <sup>3</sup> 혼입하여 부재의 내화성능을 향상시킨 공법 - 일본건축총합시험소로부터 건축기술성능증명(제03-15호)을 취득

또한, 영국의 경우는 사진 3에 나타낸바와 같이 폭렬현상을 실 구조물 화재로서 평가하여 그 대책을 강구한바 있고 더 나아가 폭렬을 고려한 성능적 내화설계를 위한 체계적인 프로젝트가 추진되고 있다.



사진 3. BRE 콘크리트 건축 구조물의 내화성능

### 3. 고강도콘크리트 폭발대책 공법의 품질관리 기준에 대한 재검토

#### 3.1 고강도콘크리트의 내화성능판정기준에 대한 재검토

국내의 고강도콘크리트의 내화성능기준은 설계기준강도 50 MPa 이상의 고강도콘크리트의 기둥과 보 부재를 대상으로 내화성능을 검증하도록 규정하고 있다. 내화성능관리기준은 국토해양부 고시 제 2005-122호로써 ISO 834-7의 시험(비재하시험)에 의하여 평가되며, 이는 주 철근의 온도가 평균 538 °C, 최고 649 °C 이하의 성능기준을 보유하고 있는 것을 사용하도록 규정되었다.

그러나 이러한 규정은 표 3에 나타난 바와 같이 미국 및 한국의 강구조 내화규정과 유사하나, 일본의 콘크리트 온도관리규정과 는 차이를 보임으로써 향후 온도관리규정에 대한 체계적인 재검토가 요망된다.

표 3. 고강도 콘크리트 기둥 부재의 내화 성능 판정 기준

구분	내화 성능 판정 기준		비고
한국	재하가열시험방법	최대 수축량 $C=h/100\text{mm}$ 최대 변형률 $dC/dt=3h/1000\text{mm}/\text{min}$ .	-
	비재하가열시험방법	평균 538°C, 최고 649°C	4지점
일본	재하가열시험방법	최대 수축량 $C=h/100\text{mm}$ 최대 변형률 $dC/dt=3h/1000\text{mm}/\text{min}$ .	-
	비재하가열시험방법	500°C	임의지점
한국, 미국 강구조 기준	비재하가열시험방법	· 각 단면에서 측정된 강재의 평균온도 평균 < 538°C(1,000°F)    최고 < 649°C(1,200°F)	강기둥 비재하 내화성능 시험 한국 (KS 2257-6, 7) 미국 (ASTM E119-00)

#### 3.2 관련성능에 대한 재검토

기존의 관리규정은 온도 및 변형률 특성만을 강조한 나머지 유동성, 특히 펌파빌리티가 현저하게 저하되는 콘크리트를 사용하여 평가를 받고, 실현장에서는 시공성이 저하됨에 따라 실제 사용하는 콘크리트와는 그 배합이 상이함으로써 각 대책공법별 상시성능 및 유지관리성능 등의 종합적인 검증이 필요할 것으로 사료된다. 따라서 고강도콘크리트에 대한 폭발억제 및 내화성능을 유지하기 위한 대책에 따른 각 공법에 따른 특징과 검토사항을 표 4와 같이 나타내었다.

#### 3.3 60 MPa 이하의 콘크리트에 대한 구조기술사의 평가문제

현행의 관리체계는 공인시험기관의 시험을 실시하고 시험성적서를 제출한 경우와 설계기준강도 60 MPa 이하의 경우 별도 시험없이 구조기술사가 내화성능기준에 적합한 구조보강을 확인한 경우, 감리자가 현장의 일치여부를 확인, 내화성능을 인정토록 규정하고 있으나 구조보강의 의미가 모호하고 구체적이지 않으며 구조기술사가 평가할 수 있는 방법이 구축되어있지 않은 상황에서 본 규정에 따라 60 MPa이하 급의 내화성능확보방안에 대한 혼란과 책임공방이 예상된다.

#### 3.4 고강도콘크리트의 내화성능설계

성능설계의 목적은 건축물 용도별 가연물의 종류·양 등의 화재하중과 개구부등의 조사를 통하여 화재성상을 예측하고 그에 대한 대책을 강구하는 것으로서 기존의 시방적이고 획일적인 설계방법과는 확연한 차이가 있다. 이러한 화재안전분야에 대한 성능설계는 표 5에 나타난 바와 같이 1985년 영국을 시작으로 미국, 호주, 일본 등의

표 4. 고강도콘크리트에 폭발을 억제하기 위한 대책의 특징 비교

항 목	표층부 온도상승·온도구배 저감	폭발억제형 피복콘크리트 이용	폭발에 의한 콘크리트 비산방지	수증기압 저감, 수분이동 용이	
공 법	내화재를 구조재의 표면에 피복하여 내부의 온도상승을 제어하는 공법	코어부분은 고강도콘크리트를 사용, 피복부분만 폭발이 발생 않는 재료로 치환하는 공법	강관이나 와이어 메쉬 등을 콘크리트 표면에 설치하여 비산을 방지하는 공법	콘크리트에 합성섬유 등을 첨가하여 콘크리트 자체의 폭발(비산)을 방지하는 공법	
세부 공법분류	내화보드 · 내화모터	압출성형 영구거푸집 이용	와이어 메쉬보강	합성섬유 혼입	
적 용	전구조물 적용가능	콘크리트 구조물	콘크리트 구조물	콘크리트 구조물	
화재 시 성능	낙하	균열, 박락 낙하 등이 발생하지 않도록 부착에 관한 검토 필요	특별한 문제없음	와이어메쉬 충전용 모르타의 부착성능에 관한 검토 필요	특별한 문제없음
	폭렬	방지가능	방지가능	폭발억제에 관한 실험적 검증 필요	폭발억제에 관한 실험적 검증 필요
	내력 저하	허용온도 내 제어가능	허용온도 내 제어가능	열적영향을 고려한 실험적 검증 필요	열적영향을 고려한 실험적 검증 필요
	열변형	적음	적음	상대적으로 크므로, 구조안전성 검토가 필요	상대적으로 크므로, 구조안전성 검토가 필요
화재 후 손상 성능	영향도, 손상 진단	화재 후 본 부재는 열에 의한 영향이 적으므로 내화재의 손상에 대한 검토만 필요	화재 후 본 부재는 열에 의한 영향이 적으므로 내화재의 손상에 대한 검토만 필요	폭렬의 깊이 및 균열에 관한 검토가 필요	손상부위에 대한 내구성 유지, 보수성능의 검토가 필요 또한 열에 의한 손상진단이 필요
상시 성능	낙하지 않도록 설계가 필요 장기적인 내구성관점에서 적절한 재료의 선택이 필요	특별한 문제없음	장기적인 내구성관점에서 적절한 재료의 선택이 필요	특별한 문제없음	
시공시 성능	내화재료 설치 공사의 공기 및 공경 필요	부분복합화 공법 적용시 최적화	내화재료 설치 공사의 공기 및 공경 필요	콘크리트 타설 중의 워커빌리티 확보가 필요	
유지관리성능	구조부재의 점검시 함께 검토	통상의 콘크리트 유지관리시 검토	구조부재의 점검시 함께 검토	통상의 콘크리트 유지관리시 검토	
종합검토	구조부재의 온도제어를 통한 폭발대책으로 가장 우수한 대책이지만, 공사비의 증가, 추가공정이 필요	구조부재의 온도제어를 통한 폭발대책으로 가장 우수한 방법이	기본적으로 폭발을 억제·방지하기 보다는 폭발의 비산을 방지하는 개념의 내폭렬대책임	폭렬을 제어할 수 있으나 섬유의 혼입으로 인한 시공성의 저하, 시공시 품질관리의 어려움	

표 5. 각국의 성능설계기준의 역사

년 도	개최지	영국	스웨덴	호주	뉴질랜드	미국	일본	캐나다	국제
1985		●							
1986		Building REgulation							
1987						○ 국가 위험평가 프로젝트			
1988			건축기준 위원회						● CPD(EU)
1989			○						○
1990									ISO/TC92 /SC4 Fire Safety Engineering 창립
1991									
1992									
1993		DD240	BRR94	FCRC설립					
1994		●	●	○					
1995			●	●	●	○ NFPA 기준개정 계획		○ 성능기준 도입계획	
1996	오타와		계산법	pb-BCA	NZBC				
1997	(캐나다)			Fire Eng. Guide-lines					
1998	마우이								
1999	(미국)								
2000	문도								○
2001						● IBC/IFC 2000	● BLI2000		ISO/TR 13387 Fire Performance Concepts
2002	멜버른					●			
2003	(호주)					●			
2004	룩셈부르크					Life Safety Code 2003	●		
2005							● FSL 2004		
2006								○ OBC 개정	

○: 성능설계도입, ●: 성능설계적용

많은 선진국에서 시행되고 있다. 또한, 이러한 성능설계를 지향하는 국가의 경우 그림 1과 같이 건축물의 기능적인 요구조건과 요구수준, 검토방법 그리고 공학적인 방법으로 성능설계를 위한 체계적인 시스템을 갖추고 있다.

그러나 우리나라의 경우에는 화재안전분야의 양법중 소방법의 경우에는 2006년도에 성능설계가 도입되어 2009년도부터 일정이상의 건축물에 대하여 성능설계가 시행될 예정으로 있으나, 건축법의 경우에는 부분적으로 성능설계의 개념이 도입은 있었으나 법체계에서부터 규정되어있지 않으므로 건축법과 소방법과의 화재안전분야에 대



한 설계시스템이 혼란이 가중될 것이 예상된다.

여기에서 콘크리트의 내화성능설계를 하기 위해서는 폭렬에 대한 대책이 선결되어야하며, 또한 스프링클러등과 연계된 체계적인 성능설계의 도입이 요망된다. 한편, 대한건축학회의 경우 폭렬현상을 고려한 내화설계기법의 사례를 그림 2에 나타내었다.

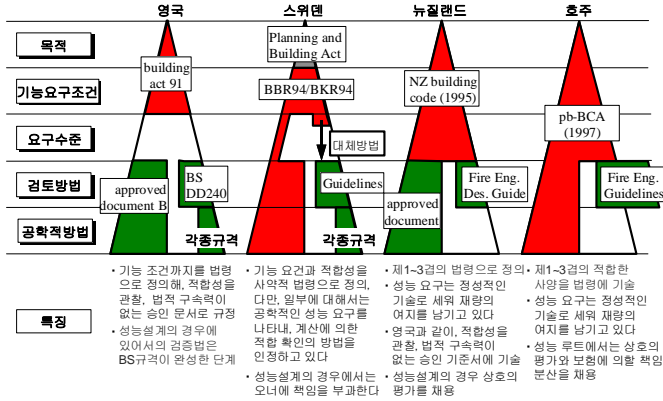


그림 1. 각국의 성능 지향적 건축기준

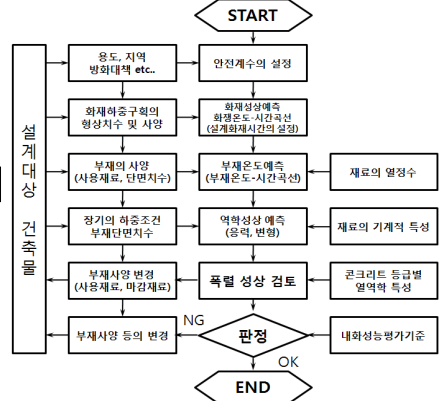


그림 2. 고강도 콘크리트 내화성능설계

#### 4. 맺음말

고강도콘크리트의 경우 화재 시 폭렬 발생이라는 위험성으로 인하여, 2008년 「고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준」이 제정됨으로서 이에 따라 현재 국내의 주요 건설사는 고강도콘크리트의 내화공법에 연구·개발에 박차를 가하고 있는 상황이나, 고강도콘크리트의 폭렬현상에 대한 본 규정과 향후대책 방안은 다음과 같다.

- 1) 현재는 강구조 내화성능 규정과 동일한 평가기준을 채택하고 있으나 일본의 고강도콘크리트의 내화성능 평가기준 온도와는 상이함으로 이에 대한 체계적인 재검토가 요망된다.
- 2) 설계기준강도 60 MPa 이하의 경우 별도 시험없이 구조기술사가 내화성능기준에 적합한 구조보강을 확인한 경우, 내화성능을 인정토록 규정하고 있으나 구조보강 및 구조기술사의 역할에 대한 재검토가 요망된다.
- 3) 각 대책공법별 기준의 관리 규정 뿐만 아니라 상시성능 및 유지관리성능 등의 종합적인 검증이 필요할 것으로 사료된다.
- 4) 콘크리트의 내화성능설계를 위한 선결과제로서 폭렬에 대한 대책이 선결되어야하며, 특히 대상으로하는 압축강도 관리수준에 대한 철저한 재검토가 요구된다.

따라서 진출한 4가지 사안을 토대로 고강도콘크리트의 폭렬대책은 철저하게 재검토 되어야하며, 화재안전설계를 위한 소방법과 건축법의 상호보완을 토대로 성능설계기법이 규정되어야 하며, 더 나아가 스프링클러등과도 연계된 체계적인 구조내화성능설계의 시스템 구축이 요망된다

#### 참고문헌

1. 권영진, "내화재료 및 구조로서 콘크리트의 한계성능과 초고층 주거시설의 화재안전성", 콘크리트학회지, Vol.17, No.5, 2005, 9, pp.8-13
2. 권영진, 한병찬, 김재환, "고강도·고성능 콘크리트의 폭렬특성에 대한 연구 및 실용화 동향", 콘크리트학회, 전문위원회 연구발표집, 2006.5, pp.71-83
3. 대한건축학회, "KBC-S 고강도콘크리트 구조내화설계 지침서(안)", 2007.08
4. 권영진, 이재영, "고강도콘크리트의 폭렬메커니즘과 성능적 구조내화설계(PBD)의 동향", 국립방재연구원 방재연구지, 2008.06, pp.43-55
5. 「건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙」 일부 개정안, 고강도 콘크리트 내화성능 관리기준 근거 규정(안 제3조 제3호 및 제4호), 국토해양부(도시정책관), 2008.04
6. 国土交通省住宅局建築指導課, 国土交通省建築研究所, 日本建築主事會議, 財團法人日本建築センター, "耐火性能證政法の解説及び計算例とその解説"第1版 第1刷發行, 2001.03.15
7. Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures, Structural Fire Design, 2004