

폭렬현상을 고려한 RC구조물의 PBD기반 구조내화설계 기술개발에 관한 연구(II)

- PBD기반 구축을 위한 조사연구 -

이재영 · 김세종 · 권영진
호서대학교 소방방재학과

A Study on the Structural Fire Resistance Performance Design of RC Structural according to the Explosive Spalling - The Investigate Study on the PBD for Fire Resistance -

Lee, Jae Young · Kim, Se Jong · Kwon, Young Jin
Fire and Disaster Protection Engineering of Hoseo University

ABSTRACT

Performance based fire engineering design is being adopted around the world as a rationed means of providing efficient and effective fire safety in Building. This development is being supported by the adoption of performance based codes which specify the objective and minimum performance requirements for fire safety traditional design for fire safety which is still practiced in many countries, relies on "prescriptive" codes which specify how a building is to be built, which no statement of objective and little or no opportunity to offer more rational alterative design.

It is the aim of this study to investigate and analyze the research direction of sturutural fire resistance design of RC structures for recommendation of PBD in Korea.

1. 서 론

최근의 건축구조물은 초고층화 초대형화의 추세로 인하여 고강도콘크리트사용이 점차 증가하고 있으며, 이러한 초고층건축물에 고강도 콘크리트(High-Strength Concrete)가 적용되어 활발히 건설되고 있다. 고강도 콘크리트는 구조적 장점 뿐 만 아니라 내구성 및 사용성이 우수하여 건축·토목 구조물에서의 활용이 점차적으로 증대되고 있다.

그러나 고강도콘크리트의 경우 화재 시와 같은 급격한 온도상승과 고온의 영역에서 부재 표면이 심한 폭음과 함께 박리 및 탈락하는 폭렬(spalling) 현상이 일어나 부재의 안전성이 저하되는 단점을 가지고 있으며, 이러한 폭렬현상은 철근콘크리트 부재 파편의 비산뿐만 아니라 철근의 노출에 따른 부재의 내력 성능 저하를 일으켜 구조물의 붕괴로 이어질 수 있어 화재

시 인명의 안전성 확보에 위협을 주고 있다. 이에 따라 지난 2008년 5월 7일 국토해양부에 의하여 「고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준」 제정안이 마련되어 건축구조물의 내화성능설계를 적용하는 기반을 마련하게 된 것이다.

또한, 국내 소방법의 경우 2009년 소방성능설계(PBD)의 시행을 앞두고 많은 연구진들이 소방성능설계에 관하여 연구를 진행하고 있으나, 국내의 경우 화재안전에 관한 규정이 소방법과 건축법으로 양분화 되어 있다는 문제점을 가지고 있다. 성능적 화재안전설계를 위해서는 소방법에서의 액티브 시스템(Active System)에 관한 규정과 건축법에서의 패시브 시스템(Passive System)에 관한 규정이 함께 변화됨으로써, 성능적 화재안전설계가 성립될 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 본고에서는 국내의 성능적 화재안전설계에 있어서 중요한 요구 성능 중의 하나인 내화성능설계 분야에 있어서, 국내의 체계적인 구조내화성능설계 기술개발을 위한 일환으로 국외 내화성능설계 및 구조내화성능설계의 체계 및 규정을 분석하고, 향후 국내의 성능적 내화성능 및 구조내화성능설계의 제정을 위한 연구의 방향에 관하여 제시하고자 한다.

2. 성능설계(PBD)개념 및 국외 성능설계의 동향

성능설계의 목적은 건축물 설계에 있어서 건축물의 사용용도에 따른 가연물의 종류 및 가연물량 등의 화재하중과 개구부 등을 고려하여 화재위험도에 따른 화재안전설계를 하는 것을 목적으로 경제성과 화재안전성을 최대로 발휘할 수 있도록 하는 것에 있다.

성능설계는 기존의 시방서에 의한 획일적인 설계방법과는 확연한 차이가 있으며, 크게 피난 성능설계와 내화성능설계로 구분되고 있다. 이러한 성능설계는 표 1에 나타난 바와 같이 1985년 영국을 시작으로 미국, 호주, 일본 등의 많은 선진국에서 도입 및 적용하고 있다. 이러한 성능설계를 지향하는 국가의 경우 성능설계를 도입하기 위하여 그림 1에 나타난 바와 같이 건축물의 사용용도에 따른 요구조건과 요구수준을 수립하고, 이를 공학적인 방법을 통하여 이를 규정으로써 검토할 수 있는 체계적인 시스템을 갖추고 있다.

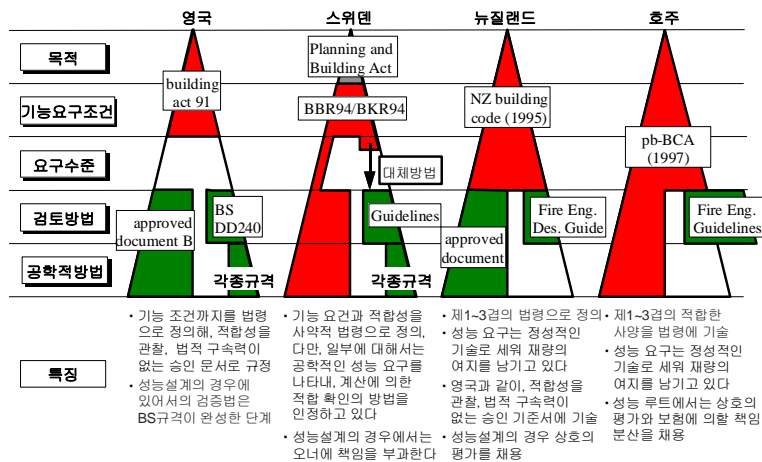


그림 1. 각국의 성능 지향적 건축기준

표 1. 각국의 성능설계기준의 역사

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

○ 성능설계도입, ●: 성능설계적용

3. 내화성능설계 및 고강도콘크리트의 구조내화성능평가 기준

3.1 내화성능설계의 기본개념

콘크리트구조물의 일반화 되어진 내화성능설계를 위한 기본적인 수행과정은 표 2와 같이 개략적으로 나타낼 수 있다. 그 과정으로는 1) 방화구획의 설정, 2) 화재성장에 관한 예측, 3) 구획방화성능 체크, 4) 구조내화성능 체크의 수순으로 이루어지며, 구획내화성능과 구조내화성능을 위한 주요구조부재의 요구 성능은 표 3에 나타난 바와 같다.

표 2. 내화설계를 위한 기본적 수행과정






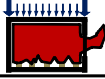
내용 및 유의점			
1) 방화구획 설정	건축설계시 방화구획을 적절히 설정하여, 화재의 범위를 한정한다. 구조내화의 관점에서는, 하기에 유의한다. 층 붕괴의 방지 : 1개의 층을 복수로 분할 과도한 열변형의 방지 : 구획실은 가급적 작게 한다.		
2) 화재성장 예측	설정된 방화구획(실)에 발생하는 화재성장을 상정한다. - 국소화재 엔트런스 홀 등의 가연물이 극히 적은 공간에는, 국소화재가 되는 일이 많다. - 이동화재 주차장에 있어서, 가연물이 비연속적으로 존재하는 공간에는 가연물이 순차적으로 연소하므로 조건에 의한 플래시오버에 이르지 않음. - 전체화재 일반적인 실에는, 플래시오버 화재를 상정함.	국소화재	
		이동화재	
		전체화재	
3) 구획성능 체크	상정된 화재에 대하여, 방화구획의 경계를 넘어 연속하지 않을 것을 확인 차열성 : 구획부재 (벽, 바닥) 차염성 : 방화설비 (개구부)		
4) 구조안전성능체크	상정된 화재에 대하여, 기둥, 보 등의 구조 프레임이 붕괴하지 않을 것을 확인.		

표 3. 주요 구조부의 내화성능에 관한 요구사항

소요성능		주요구조부						
		외벽	칸막이벽	기둥	보	바닥	계단	지붕
실내화재	비손상성	●	●	○	○	○	○	○
	차열성	○						○
실외화재	비손상	●						
	차열성	○						

● 내력벽인 경우 필요

- (1) 비손상성(非損傷性) : 구조 내력상 지장이 있는 손상을 일으키지 않는 것
- (2) 차열성 : 가열면 이외의 면의 온도가 가연물의 연소를 일으킬 우려가 있는 온도이상으로 상승하지 않는 것
- (3) 차열성 : 건축구조의 구획부재의 한쪽 면을 가열했을 경우 화염이나 열기가 그 부재를 관통하거나 또는 이면에 발열(發熱)이 생기지 않는 것

3.2 일본의 내화 규정 및 내화 성능 검정법

일본의 경우 2000년 건축기준법을 개정하여 내화구조에 대한 성능규정을 도입하였으며, 그림 3에 나타난 바와 같이 건축기준법에는 건축물의 규모 및 용도에 따라서 각각의 루트에 의해 내화성능에 관하여 규정하고 있다. 이러한 개정된 규정에서 검정법에 의한 성능규정은 루트 B로 규정되어있다.

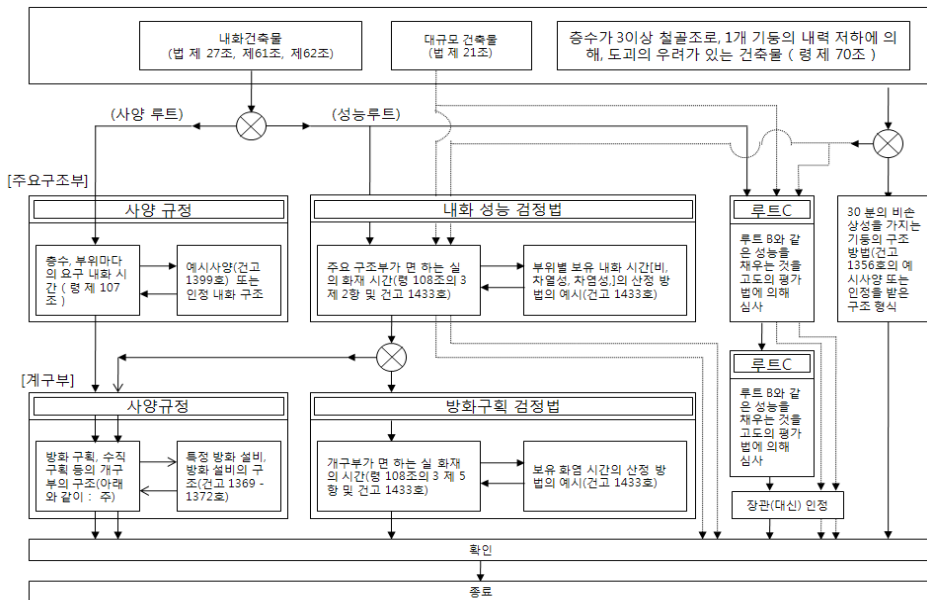


그림 3. 일본의 규정(법 제21조, 제27조, 제61조, 제62조, 정령 제70조 관련)

이러한 내화성능 검정법(루트B)은 법적 규정에 의한 틀에 의하여 수치적 계산에 의해 내화 성능의 안전성 여부를 검증하는 것으로써, 그림 4와 5에 나타난 수순에 따라 내화성능의 검정이 이루어지고 있다. 이는 먼저 검정대상의 부분을 추출하여 실내의 가연물 발열량 및 인접실의 발열량 등을 통해 화재지속시간을 산정한 후, 구조물이 견딜 수 있는 보유내화시간과 비교하여 내화성능의 검정이 이루어진다.

단, 철근콘크리트조의 경우 다음의 조건을 만족하는 경우 검증이 가능하다.

- 1) 보통콘크리트 또는 1종 경량콘크리트
- 2) 설계기준강도가 60 MPa 이하인 것.
- 3) 철근에 대한 피복두께가 30 mm 이상인 것.

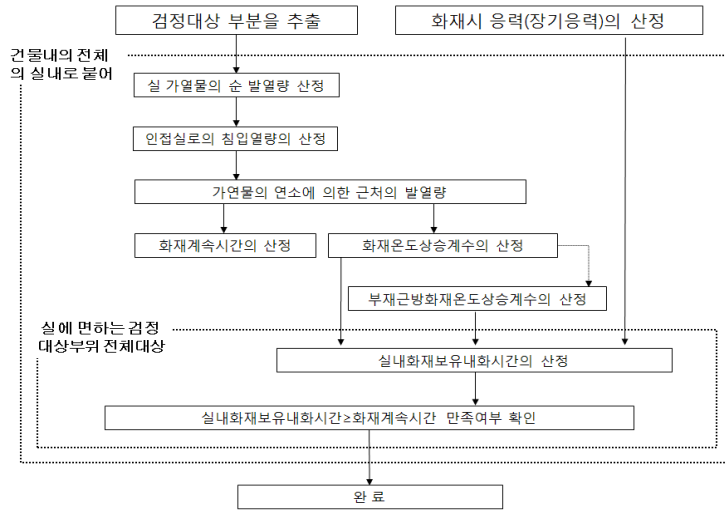


그림 4. 실내 화재에 대한 주요구조부재의 검정방법(루트 B 규정)

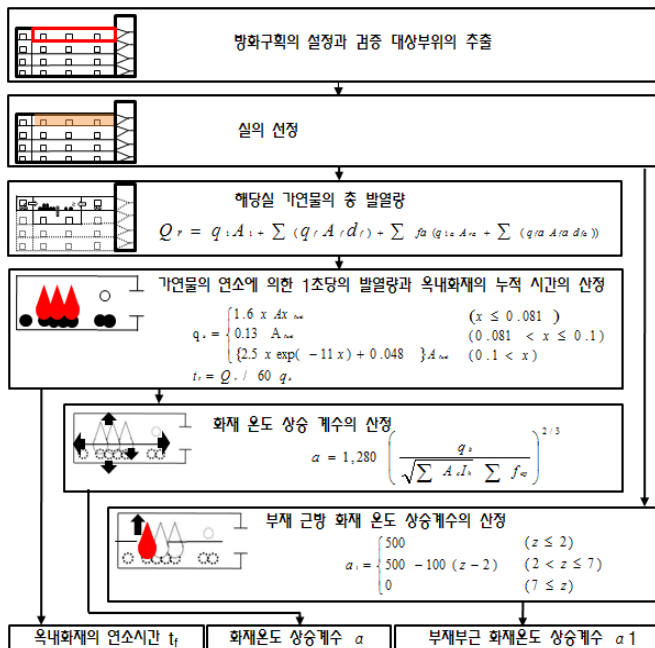


그림 5. 화재 지속시간, 화재 온도상승계수, 부재 부근 화재 온도상승계수의 산정 방법

표 4. 화재지속시간, 화재 온도상승계수, 부재부근 화재 온도상승계수 산정 파라미터

기호	의미	단위
A_c	해당실의 벽, 바닥, 천정의 부분마다의 표면적	[m ²]
A_f	해당실의 내장용 건축 재료의 종류 따라 각 부분의 표면적	[m ²]
A_{fa}	해당실의 인접실의 내장용 건축재료의 종류마다의 각 부분의 표면적	[m ²]
A_{fuel}	가연물 표면적	[m ²]
A_{op}	각 개구부의 면적	[m ²]
A_r	해당실의 바닥 면적	[m ²]
A_{ra}	해당실의 인접실의 바닥 면적	[m ²]
d_f	해당실의 내장용 건축재료의 두께	[mm]
d_{fa}	해당실의 인접실의 내장용 건축재료의 두께	[mm]
f_a	열침입계수	[-]
f_{op}	유동개구인자	[m ^{5/2}]
H_{op}	각 개구부의 상단에서 하단까지의 연직 거리	[m]
H_r	해당실의 바닥면에서 천정까지의 평균 높이	[m]
I_r	해당실의 벽, 바닥, 천정의 부분에서의 열관성	[kWs ^{1/2} /m ² · K]
Q_b	해당실 내의 가연물 1초당 발열량	[MW]
Q_f	해당실의 벽, 바닥, 천정의 실내에 접하는 부분의 내장 건축 재료의 표면적 1m ² , 두께 1mm당의 발열량	[MJ/m ² · mm]
Q_{fa}	해당실의 인접실의 벽, 바닥, 천정의 실내에 접하는 부분의 내장 건축 재료의 표면적 1m ² , 두께 1mm당의 발열량	[MJ/m ² · mm]
Q_l	해당실의 수납가연물의 표면적 1m ² 당의 발열량	[MJ/m ²]
Q_{la}	해당실의 인접실의 수납가연물의 표면적 1m ² 당의 발열량	[MJ/m ²]
Q_r	해당실 내의 가연물의 발열량	[MJ]
t_r	해당실의 화재시간	[min]
z	해당 부재의 마루의 면으로부터의 높이	[m]
α	화재 온도 상승 계수	[°C/min ^{1/6}]
α_1	부재 근방의 온도 상승 계수	[°C/min ^{1/6}]
x	연소형 지배인자	[m ^{1/2}]
ϕ	산소 소비 인자	[-]

이러한 수치적 계산에 의한 검증법(루트 B)의 경우, 설계자의 능력에 따른 다른 설계와 추 후에 발생할 수 있는 문제를 사전에 방지하기 위하여 구체적인 계산 순서 및 단계별 계산식을 규정하고 있다. 또한 여기서 화재지속시간을 산정하기 위한 각각의 건축물의 용도별 화재하중도 별도로 규정하고 있다.

3.3 고강도 콘크리트의 폭발현상을 고려한 구조내화성능의 평가기준

(1) 국외 구조내화설계기준

현재 콘크리트의 내화성능과 관련하여 내화기준 및 성능에 대한 규정을 명시하고 있으나 고강도콘크리트를 적용대상으로 하는 경우는 상대적으로 적다. 일본, 유럽 및 미국에서도 기존의 보통강도콘크리트에 대한 내화기준이나 시험방법만 명시하고, 고강도콘크리트의 경우 기존의 보통강도콘크리트의 시험방법에 준하여 시험이나 평가를 진행하고 있다.

여기서 일본에서의 고강도콘크리트에 대한 구조내화성능규정은 루트C에 해당되며, 이는 60 MPa 이상의 콘크리트를 대상으로 규정하고 있으며, 주된 이유로는 고강도콘크리트 부재의 경우 단면손실을 유발하는 폭발의 가능성이 높고, 탄성계수가 크며, 초기의 고온에 의한 온도변화로 열응력이 커지기 쉽고, 내부에서 증발한 수분으로 인해 공극 내의 수증기압을 형성하여 단면결손을 유발하는 폭발의 가능성이 크고, 더불어 60 MPa를 초과하는 고강도콘크리트를 적

용하는 기회가 증가하고 있기 때문이다.

이러한 고강도콘크리트 부재의 경우 재하 및 비재하에 의한 평가방법을 도입하여 적용하고 있으며, 일본에서 적용되는 비재하 및 비재하 내화시험의 성능 판정기준은 표 5와 같다.

표 5. 일본 고강도콘크리트 구조부재의 내화성능 판정기준

	구조부재 내화성능시험			
	재하	비재하 내화시험		
	재하 내화시험	철근콘크리트조	프리스트레스 콘크리트조	강구조, 박관강구조
벽·기둥	<ul style="list-style-type: none"> · 최대 축방향 수축량(mm) ≤ h/100 · 최대축방향 수축속도(mm/분) ≤ 3h/1,000 (여기서 h= 초기높이(mm)) 	최고 ≤ 500℃	최고 ≤ 400℃	최고 ≤ 450℃, 평균 ≤ 350℃
바닥·슬래브	<ul style="list-style-type: none"> · 최대변형(mm) ≤ I²/400d · 최대변형속도(mm/분) ≤ I²/9,000d (여기서 I=경간(span, mm), d= 단면거리(mm)) 	최고 ≤ 550℃	최고 ≤ 450℃	최고 ≤ 500℃, 평균 ≤ 400℃
가열조건	T=345log10(8t+1)+20 T:가열로내 온도, t:경과시간(min)			

(2) 한국의 구조내화설계기준

국내의 초고층 건축물 건립에 따른 고강도콘크리트 사용이 증가함에 따라 화재 시 폭발현상 등의 위험성을 고려하여 지난 2008년 5월 7일 국토해양부 고시 제 2005-122호 규정에 의하여 고강도 콘크리트의 기둥과 보에 대한 설계기준강도 50 Mpa 이상의 고강도콘크리트에 대하여 내화성능기준안을 제정하였다.

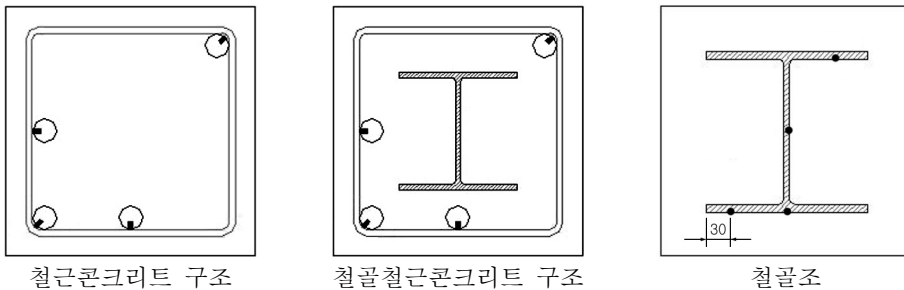


그림 11. 열전도 설치 및 온도측정 위치

고강도콘크리트의 내화성능평가 규정은 ISO834-7의 시험(비재하시험)에 의하여 그림11과 같은 위치에서 주 철근의 온도가 평균 538 ℃, 최고 649 ℃ 이하의 성능기준을 보유하고 있는 것을 사용하도록 규정되었다. 다만, 설계기준강도 60 MPa이하의 경우는 내화성능기준에 적합하도록 구조보강을 하여 구조기술사가 이를 확인·서명한 경우에는 시험을 실시하지 않을 수 있다고 규정하였다. 즉, 콘크리트의 강도가 60 MPa을 초과하는 경우 내화성능시험을 통하여 내화성능을 검증받아야만 시공이 가능하고, 50 MPa이상 60 MPa이하의 경우 구조기술사에게 구조보강 하도록 위임한 것으로 평가된다.

4. 맺음말

최근 한국의 경우 화재안전에서 성능설계(PBD)의 도입을 앞두고 있는 시점에서 소방법과 건축법의 양분화 된 국내 법적 구조에서 좀 더 성능적인 성능설계도입을 위해서는 소방법과 건축법이 각각 가지고 있는 규정이 합리적으로 함께 변화 되어야 할 것이며 피난안전성확보라는 큰 목적을 달성할 것으로 사료되며, 이중 본 연구에서의 성능적 구조내화설계를 위한 국외의 규정을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 성능적 내화설계를 위하여 건축물의 사용용도에 따른 요구조건과 요구수준을 수립 및 이를 검토·평가할 수 있는 체계적인 시스템의 구축
- 2) 국내 건축물의 용도별 화재하중을 고려한 성능적 내화설계를 하기 위한 가연물 조사 및 화재하중에 대한 규정
- 3) 설계자의 능력에 따른 다른 설계와 추후에 발생할 수 있는 문제를 사전에 방지하기 위한 대책 마련
- 4) 고강도콘크리트의 폭렬현상을 억제하기 위한 내화대책에 관한 지속적인 연구·개발 등이 우선되어야 할 것으로 사료되며, 더 나아가 소방에 관한 연구적 관점에서 감지설비 및 소화설비 등을 고려한 다양한 연구가 함께 이루어져야만 화재 시 인명의 안전성확보가 증대될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2008년 한국과학재단 특정기초연구과제 R0120080002052702008 지원에 의하여 수행하였으며 관계자에게 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 권영진, “내화재료 및 구조로서 콘크리트의 한계성능과 초고층 주거시설의 화재안전성” 콘크리트학회지, vol.17 No.5, p.8-13
2. 原田和典, “성능설계 PBD & 고강도콘크리트의 폭렬메커니즘에 관한 연구”, 호서대학교 초청세미나 강연자료, 2008.05.17
3. 國土交通省住宅局建築指導課, 國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
4. 한국콘크리트학회, “철근콘크리트구조물의 내화특성”, KCI SP4, 2005.03
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. Eurocode 4, Design of composite steel and concrete structures, Structural Fire Design, 2004