

초고층 복합건축물의 화재안전을 위한 성능기반 내화 설계기술의 필요성과 향후과제

권영진 호서대학교 소방방재학과 교수



I. 서론

최근 콘크리트기술의 비약적인 발전에 따라 건축물은 대형화 고층화되어 바야흐로 우리나라에도 초고층 건물시대가 도래하면서 도시의 스카이라인을 변모시켜 랜드마크로서 상징성을 갖게 되었다. 초고층 건축물은 당대의 첨단 건설기술이 총체적으로 집약된 결정체일 뿐만 아니라 오늘날에 이르러서도 한 국가의 상징물 또는 경제성장의 척도로 인식되는 경향이 강하기 때문에 지난 월드트레이드센터의 붕괴사건으로 인한 일각의 우려에도 불구하고 [그림 1]과 같은 세계적인 초고층화 추세는 향후에도 계속될 것으로 전망된다.

그러나 이러한 초고층구조물은 초고층이라는 이유만으로 화재발생 확률이 높다고는 말할 수 없으나, [사진 1]의 국내외 초고층건축물의 화재 사례를 통해 화재확대 및 화재진압의 어려움 등으로 인하여 그 잠재적 위험성이 대단히 높다는 것을 확인할 수 있다.

또한, 초고층 구조물에 적용되어지는 고강도 콘크리트는 화재와 같은 고온에 노출될 경우 조직이 조밀하기 때문에 내부의 수증기를 배출시키지 못하여 일정 정도의 고온에서 갑작스럽게 부재 표면이 심한 폭음과 함께 박리 및 탈락하는 폭렬(Spalling) 현상발생하며, 이러한 폭렬현상은 철근콘크리트 부재 파편의 비산뿐만 아니라 부재단

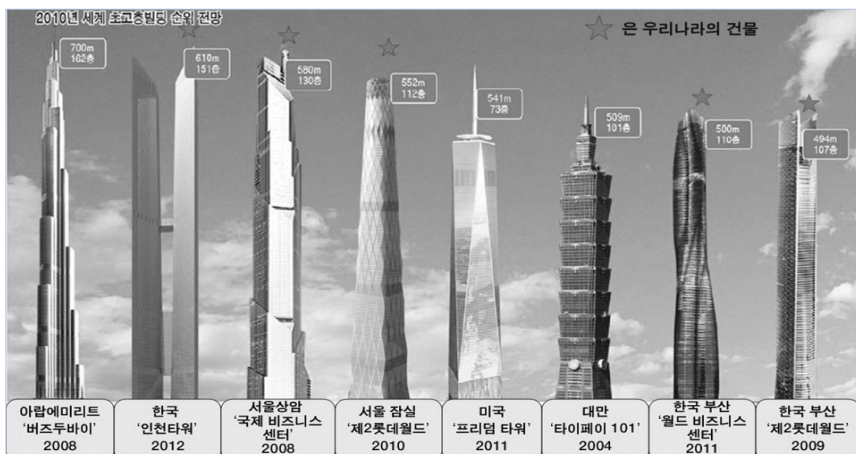
면감소로 인한 구조내력의 감소, 철근의 노출로 인한 부재의 내력성능저하를 일으켜 구조물의 붕괴까지 발생할 수 있으므로 그 위험성은 더 클 것으로 예상되어진다*).

이러한 배경으로 국내 소방법에서 연면적 20만㎡이상, 건축물 높이 100m이상, 연면적 3만 제곱미터 이상의 철도역사·공항시설, 영화상영관이 10개 이상인 특정소대상물을 대상으로 2009년 성능위주설계의 실시가 법제화되었고 초고층 및 지하연계 복합건축물을 대상으로 「초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법」이 법제화되었다.

또한 2008년 7월 21일 국토해양부고시 제2008-334호「고강도 콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준*」에 의하여 50MPa 이상의 고강도 콘크리트에 대하여 내화성능을 반드시 검증을 받도록 규정되었다.

그러나 이러한 기준은 건축물의 화재위험도 및 스프링클러설치와 같은 화재진압시스템 등을 고려되지 않으므로 향후 내화 및 방화의 성능을 향상 시킬 수 있도록 내화 및 방화의 총량적 개념 도입이 필요하며, 화재위험도에 따른 유연성과 탄력성을 주어 방화 및 내화의 목적을 달성할 수 있도록 하면서 고강도 콘크리트의 활용이 증대 할 수 있도록 국외와 같은 성능기반 내화설계기준 마련을 위한 대책 연구가 필요하다.

따라서 본고에서는 철근콘크리트 구조내화설계에 대한 선진 각국의 성능설계의 동향 및 그 운영 체계에 대하여 분석하였고, 그에 따른 국내의 구조내화분야에 대한 성능기반 설계개념의 도입을 위한 방안을 고찰하고자 한다.



[그림 1] 초고층 건축구조물의 동향



[사진 1] 초고층 구조물의 화재사례

II. 성능기반 구조내화설계에 대한 국내외 동향분석

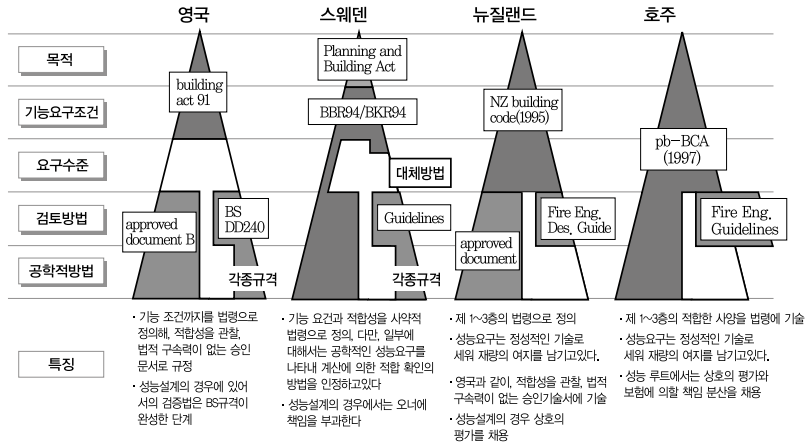
성능기반의 화재안전설계를 지향하는 국가는 [표 1]에 나타난 바와 같으며, 기존의 사양적 규정만으로는 화재의 안전성을 확보할 수 없다고 판단되어, 공학적 연구를 기반으로 하여 성능기반 화재안전설계(Performance-Based Design)를 적용하고 있다.

[표 1] 각국의 성능설계기준의 역사

년도	개최지	영국	스웨덴	호주	뉴질랜드	미국	일본	캐나다	국제
1985		○							
1986		Building Regulation				○			
1987						국가 위험평가 프로젝트			
1988				건축기준 위원회					●
1989									CPD(EU)
1990				○					○
1991						○			ISO/TC92/SC4
1992						FSD in 21st Century			Fire Safety Engineering 창립
1993		DD240	BBR94	FCRC설립					
1994		●	●	○					

년도	개최지	영국	스웨덴	호주	뉴질랜드	미국	일본	캐나다	국제
1995			●	●	●	○		○	
1996	오타와		계산법	pb-BCA	NZBC	NFPA 기준개정 계획		○	
1997	(캐나다)			Fire Eng. Guidelines				○	성능기준 도입계획
1998	마우이								
1999	(미국)								●
2000	룬도								ISO/TR 13387 Fire performance concepts
2001						●	●		
2002	멜버른					IBC/IFC 2000	B니 2000		
2003	(호주)								
2004	룩셈부르크					● Life Safety 2003	●		
2005							FSL2004	○	
2006								○	OBC개정





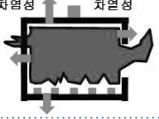
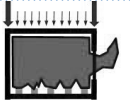
○ : 성능설계도입 ● : 성능설계적용



[그림 2] 국외 성능적 화재안전설계 도입국가의 체계

이러한 성능설계를 도입한 국가의 성능설계 체계를 보면, [그림 2]에 나타난 바와 같이 건축물의 사용용도별 화재안전성능에 대한 요구조건과 요구수준을 수립하고, 이를 만족하기 위하여 각종의 기술을 규정하고 있으며, 이러한 규정은 연구·실험 등의 공학적인 방법을 기초로 하여 보완하고 있다.

[표 2] 구조내화설계의 기본 수행내용

단 계	내용 및 유의점		
1)방화구획 설정	건축설계 시 방화구획을 적절히 설정하여, 화재 범위를 한정한다. 구조내화의 관점에서는, 하기에 유의한다. 층 붕괴의 방지: 1개의 층을 복수로 분할 과도한 열변형의 방지: 구획실은 기급적 작게 한다.		
2)화재성장 예측	설정한 방화구획(실)에 발생하는 화재성장을 상정한다. • 국소화재 엔트런스 홀 등의 가연물이 극히 적은 공간에는, 국소화재가 되는 일이 많다.	국소 화재 	
	• 이동화재 주차장에 있어서, 가연물이 드문드문 존재하는 공간에는, 가연물이 순차 연소하므로, 조건에 의한 플래시오버에 이르지 않음.	이동 화재 	
	• 전체화재 일반적인 실에는, 플래시오버 화재를 상정함.	전체 화재 	
3)구획성능 체크	상정된 화재에 대하여, 방화구획의 경계를 넘어 연속하지 않을 것을 확인 차열성 : 구획부재 (벽, 바닥) 차열성 : 방화설비 (개구부)		
4)구조안전 성능체크	상정된 화재에 대하여, 기둥, 보 등의 구조 프레임이 붕괴하지 않을 것을 확인. • 작용하중		

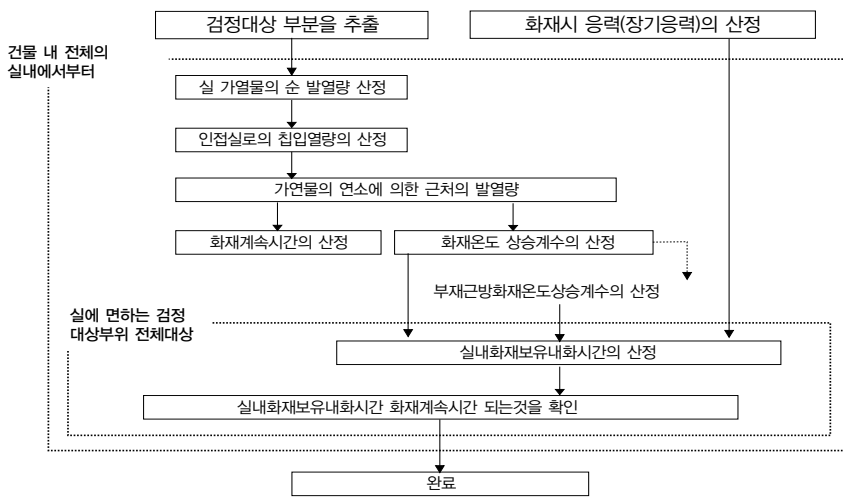
이러한 성능적 화재안전설계에 있어서 가장 중요하게 고려되는 사항은 화재성상이다. 일반적으로 기존의 내화성능설계의 경우 플래시오버 이후 구조·비구조방내화성능이 요구되는 것을 확인할 수 있으며, [표 2]에 나타난 바와 같이 구조내화설계를 위해서는 방화구획의 설정, 화재성상의 예측 구획에서의 내화성능체크, 구조의 안전성능을 고려하여 내화설계를 수행하게 된다.

2.1 일본의 화재안전성능설계

국내와 가장 유사한 법규정체계를 가지고 있는 일본의 경우 2000년 건축기준법을 개정하여 내화구조에 대한 성능규정을 도입하였으며, 건축기준법에는 건축물의 규모 및 용도에 따라서 각각의 루트에 의해 내화성능에 관하여 규정하고 있다. 이러한 개정된 규정에는 기존의 법적규정에 의하여 설계된 경우와 성능규정에 의하여 설계되는 성능 루트(검증법 B, C)로 구분되어있으며, 사양적 규정과 성능규정을 선택적으로 적용 가능

하도록 나타내고 있다.

여기서 내화성능 검증법(루트B)에 의한 검증은 법적규정에 의한 툴 그림 3에 의하여 수치적 계산에 의해 내화성능의 안전성 여부를 검증이 이루어지며, 먼저 검정대상의 부분을 추출하여 실내의 가연물 발열량 및 인접실의 발열량 등을 통해 화재지속시간을 산정한 후, 구조물이 견딜 수 있는 보유내화시간과 비교하여 내화성능의 검정이 이루어진다.



[그림 3] 내화성능 검증법에 의한 검증체계

이러한 수치적 계산에 의한 검증법 (루트 B)의 경우 설계자능력에 따른 설계의 차이와 추후에 발생할 수 있는 문제 등을 사전에 방지하고자 구체적인 계산 순서 및 단계별 계산식, 용도별 단위면적당 발열량 등을 규정하고 있으며, 보통강도 콘크리트 내화설계의 경우 목표내화 성능을 설정한 후, 이에 대한 열해석과 응력해석의 결과에 따라 사용 재료, 부재의 치수 및 강도 그리고 마감재료 등을 결정한다.

단, 본 검정법에서 철근콘크리트조의 경우 다음의 조건을 만족하는 경우에만 검증을 수행하고 있다.

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

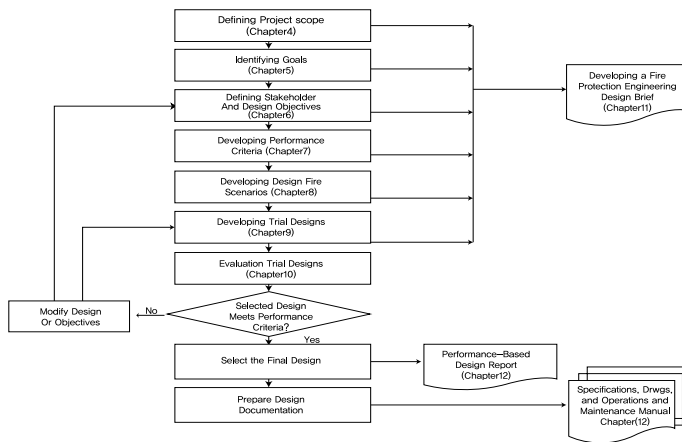
2.2 미국의 화재안전성능설계

미국의 화재 및 내화에 관한 연구는 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)등에서의 실험 및 연구를 통해 이루어지고 있다.

여기서 미국의 화재안전설계를 위한 연구는 고층건축물의 화재위험성으로 시작되었으며, 이로 인하여 1971년 GSA (General Service Administration)에서 고층건물 화재안전에 관한 국제회의를 개최하였으며, 이와 더불어 성능설계를 위한 기초로서 1981년 NFPA에서는 병원화재안전평가 방법을 발표하였다. 이후 1986년 국가위험평가 프로젝트로서 성능설계를 위한 연구가 시작되었으며, NFPA에서 화재안전개념도(NFPA550)를 발간하였다. 또한, 1990년 International Organization for Standardization에서 건축물 화재안전에서 방화공학의 응용을 위한 그룹을 형성하였다.

더 나아가 1995년 NFPA에서 NFPA기준을 성능위주 기준 변경에 대한 개념발표, SFPE에서 성능위주의 소방설계를 위한 기초 작업 준비를 위한 과제를 시작으로 2000년 IBC2000(International Building Code), IFC2000(International Fire Code) 및 2003년 Life Safety Code와 같은 성능위주의 화재안전설계가 도입되었으며, 미국 SFPE에서 제시된 성능설계과정은 [그림 4]와 같다.

또한, [표 1]에 나타낸 바와 같이 전술한 미국, 일본 이외에도 스웨덴 및 영국과 영연방 국가를 중심으로 성능기반 내화설계기술이 정착되고 있는 것을 알 수 있다.



[그림 4] 미국의 성능설계과정 (SFPE ENGINEERING GUIDE)

2.3 국내의 화재안전성능설계

국내 내화관련규정은 1962년 건축법령의 제정으로 시작으로, 제정 당시의 방화 관련 규정은 건축법과 시행령으로 규정되었으며, 1973년에는 기술적 관련 규정 일부를 건설교통부령으로 신설하였다. 더 나아가 기존의 내화규정과 더불어 2000년 4월 20일 건설교통부고시 제2000-93호「내화구조의 인정 및 관리기준」이 규정되었으며, 이와 같이 건설교통부령으로 정하는 것은 급속히 발전하는 기술개발과 신 재료 개발을 고려하여 신속하게 관련규정을 개정할 수 있다는 장점에서 이루어진 것으로 일부 방화부재의 성능을 고려한 규정이 일부 도입된 것으로 사료된다.

또한, 최근 화재와 같은 고온의 영역에서 고강도콘크리트의 내화성능에 관한 논란과 안전성 확보에 대한 대책으로 2008년 7월 21일 국토해양부고시 제2008-334호「고강도콘크리트 기둥·보의 내화성능 관리기준」이 고시되었으며, 이는 50MPa 이상의 고강도 콘크리트 기둥과 보에 대하여 ISO834-7 비재하시험에 의한 성능기준이 마련되었으며, 그 기준은 주철근의 지정된 위치에서 평균온도 538℃, 최고온도 649℃ 이하의 성능기준을 보유하고 있는 것을 사용하도록 규정되었다. 이는 내화재료로 인식되어져 왔던 콘크리트에 대한 성능관리기준이 마련된 것으로 사료된다.

더 나아가 건축물의 지하화, 고층화, 대형화로 인하여 기존의 사양적 기준으로는 새로운 형태의 건축물이나 신기술 개발 등 소방환경 변화에 탄력적으로 대응하기에 어려움이 있으므로 이러한 문제점을 해결하고자 연면적 5만m²이상 또는 건축물의 높이가 100미터 이상의 건축을 신축하는 경우 화재영향평가를 시행하고 있으며, 또한 전술한 바와 같이 2008년에는 초고층건축물의 화재위험성으로 인하여 “초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법(안)”이 법제화되었다. 더 나아가 2009년에는 소방법에서는 성능기반 화재안전설계(PBD)의 법제화를 통하여 실시되고 있으며 향후 건축법에서의 성능기반에 대한 법제정 등이 활발하게 논의 되어야 할 것으로 사료된다.

Ⅲ. 성능적 구조내화설계를 위한 향후과제

현재의 대부분의 설계기준 및 시공기준은 사양중심의 설계기준과 서술중심의 시방서라고 할 수 있다. 사양중심의 설계기준과 서술중심의 시방서는 공통적으로 신기술,

신공법의 적용이 곤란하여 설계자 및 시공자의 개발된 기술 적용에 한계가 존재한다는 단점이 있다. 반면 성능기반 설계기준과 성능시방서는 모두 기준의 작성 및 적용에 어려움이 있지만, 설계 및 시공자의 창의성이 반영될 수 있도록 함으로써 기술개발을 촉진시킬 수 있다는 장점이 있다. 이러한 두 설계 및 시공기준의 장점에도 불구하고 기술력에 의한 차별성이 확실한 성능중심의 기준이 미래지향적이며, 국제기준의 흐름에 부합하는 기준으로 앞으로 나아갈 방향임에는 틀림없다.

특히 한국의 경우 많은 초고층 건축물이 건설예정에 있으며 이에 따라서 고강도 콘크리트 사용이 증가함에 따라 화재 시 폭발현상 등의 위험성을 고려하여 고강도 콘크리트에 관하여 내화성능 기준안을 제정되었으며, 이는 재료적 특성을 고려한 내화성능설계의 적용이 시작되어진 것으로 사료된다.

그러나 구조내화설계 전반적으로는 사양적 규정이 중심이 되고있으며, 건축물의 규모, 용도, 가연물의 양 등에 의한 화재위험도를 고려한 내화성능의 체계적인 규정이 부족하며, 이러한 내화성능설계를 위한 화재예측에 관한 기초자료 및 예측기술이 부족한 실정이다.

따라서 향후 체계적인 내화성능을 만족하기 위해서는 건축물의 용도별 가연물 조사 및 화재하중의 예측기술 그리고 이러한 자료를 통한 화재성상에 관한 연구가 동반되어야하며, 또한, 화재소화시스템 등을 고려하여 최종적으로는 화재의 지속시간에 대한 예측 기술이 체계적인 내화성능기준 마련을 위해서 연구하는 것이 앞으로의 과제일 것이라 판단된다.

참고문헌

- 이재영, 한병찬, 김재환, 신영수, 권영진, “[특집]고강도콘크리트의 성능기반 구조내화설계 필요성과 향후 대책” 콘크리트학회지, Vol.20 No5, 2008.09, pp. 33-42
 - 권영진, “고강도콘크리트의 폭발대책공법에 대한 국내외 현황과 성능적 구조내화설계를 위한 과제” 한국콘크리트학회 2008년도 가을 학술발표회 논문집, Vol.20 No2, pp.935-940
 - 권영진, “내화재료 및 구조로서 콘크리트의 한계성과 초고층 주거시설의 화재안전성”, 콘크리트학회지, Vol. 17, No.5, 2005. 9, pp.8-13
 - 권영진, “국내 초고층 주거시설의 화재안전상의 과제”, 한국초고층건축포럼, 2007.04.10
 - 권영진, 이재영, 신이철, 서동구, 한병찬, 김재환, “고강도콘크리트 구조내화설계 지침의 제정 배경 및 고찰”, 한국화재소방학회, 2007년 추계학술논문발표대회 논문집, pp.3-8
 - 이재영, 김세중, 권영진, “폭렬현상을 고려한 PBD기반 구조내화설계기술개발에 관한 연구(Ⅰ. 고강도콘크리트의 폭발현상에 대한 국내외 주요 건설사의 대응방안 조사)”, 한국화재소방학회 2008년도 추계학술논문발표회 논문집, pp. 195-201
 - 이재영, 김세중, 권영진, “폭렬현상을 고려한 PBD기반 구조내화설계기술개발에 관한 연구(Ⅱ. 철근콘크리트 구조물의 구조내화설계에 관한 문헌적 고찰)”, 한국화재소방학회 2008년도 추계학술논문발표회 논문집, pp. 195-201
 - 김세중, 이재영, 권영진, “폭렬현상을 고려한 PBD기반 구조내화설계기술개발에 관한 연구(Ⅲ. 일본의 내화안전성평가 기법을 활용한 사례조사 연구)”, 한국화재소방학회 2008년도 추계학술논문발표회 논문집, pp. 310-315
 - 이재영, “鐵筋콘크리트 構造物의 爆裂現象을 고려한 構造耐火 性能設計를 위한 研究”, 2009.01, 석사학위논문, 호서대학교
 - 구재동, 김태송, 송하원, “성능중심의 건설기준 개발의 필요성”, 한국콘크리트학회지, Vol.18 No.4, pp.8-10
 - Young-Jin Kwon(Hoseo University), Byung-Chan Han, Jae-Hwan Kim, Sun-Gyu Park, Joung-Young Lee, “Structural Behaviors of Reinforced Concrete Frames Exposed to Fire”, 3rd International Symposium Tokyo University of Science, 20080310, pp. 89-100
 - 原田和典(HARADA Kazumori); 京都大学 工学研究科 建築学専攻, “성능설계 PBD & 고강도콘크리트의 폭발메커니즘에 관한 연구”, 호서대학교 초청세미나 강연, 2008.05.17
 - 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, 財団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
 - Jim Linville, “SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design of Building”, 2000
-