

일본 내화안전성 평가 기준에 따른 국내 초고층 주거시설의 화재위험성 평가 사례

이우윤, 정수철*, 유진우*, 서동구*, 권영진**
호서대학교 소방방재학과 건설 방화 및 방재 연구실
**호서대학교 소방방재학과 교수

A Case Study on the Fire Hazard Evaluation of High-Rise Buildings by Performance Based Safety Design Methods.

Woo-Yun Lee, Soo-Chul Jung*, Jin-Woo Yoo*, Dong-Goo Seo*,
Young-Jin Kwon**

Lap for disaster prevention & safety technology professor,
Dep. of fire and disaster prevention Eng.

1. 서 론

최근 경제적·사회적 요구와 더불어 초고층 구조물이 국내외에서 빠르게 시공·증가하고 있다. 초고층 구조물은 설계, 시공, 재료, 구조, 설비, 안전, 관리 등이 집적되어야 가능한 것으로, 국내 건설사들 또한 많은 연구와 기술 축적을 통하여, 초고층 구조물의 시공에 참여하고 있다. 그러나 국내 시공기술의 수준을 살펴보면 구조안전성에는 많은 연구 성과를 보이고 있으나 화재 위험성 평가 등과 같은 방재분야는 매우 미진한 것을 알 수 있다. 일례로써 국내 건설사가 참여하고 있는 초고층 구조물의 방재 계획 및 관리의 대부분은 외국의 엔지니어링이 담당하고 있으며, 초고층 구조물에 대한 내화안전성 평가기준 또한 국내에는 정립되어 있지 못한 실정이다. 반면 이웃 일본의 경우 1998년부터 건축기준법이 성능기준으로 개정되고 있으며, 따라서 본 연구는 일본의 건축기준법의 내화안전성평가 기법에 의해 안전성평가를 수행함으로써 국내 초고층 주거시설의 화재위험성을 평가하고 그 결과를 분석하여, 이를 국내의 내화안전성 평가기준의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 일본 내화성능검증법에 의한 평가 방법 및 수치적 해석 공식

2.1 내화 안전성 평가 방법

그림1은 일본의 내화성능 검증법 등에서 규정하고 있는 내화성능 평가 단계를 나타낸 것이다. 내화성능 검증 방법은 먼저 검증대상의 일부 화재구간을 선정하여 화재온도와 상승계수 및 화재지속시간 T_f 를 이용하여 화재의 강도 및 시간을 산출함으로써 부재에 가해지는 화재 외력을 산출하는 단계와, 옥내 화재보유 내화시간 T_{fr} 의 값이 각

구조별(강구조, 철근콘크리트조, 목조, 기타)로 정해지면 각 구조부재가 특정 화재에 대해서 어느 정도 견디는지 판단하는 단계로 나누어 그 결과를 비교·검토하여 평가하는 검증방법이다.

2.2 안전성평가 수식적 해석 공식

(1) 화재의 지속시간

화재 시 화염에 의해 주요 구조부에 화재 외력이 가해지면, 시간에 따른 온도변화 (T_f)는 화재온도의 상승계수 α 를 사용하여 시간의 1/6 승으로 근사시킬 수 있다.

$$T_f = \alpha t^{1/6} + 20 \quad (0 \leq t \leq t_f) \quad \text{식(1)}$$

여기서 사용되는 화재온도 상승계수 α 는 연소에 의한 발열에 대응하여 실의 온도가 상승하는 정도를 나타낸 계수이고, 다음 식으로 나타낸다.

$$\alpha = 1280 \left(\frac{q_b}{\sqrt{\sum A_c I_k} \sqrt{f_{op}}} \right)^{2/3} \quad \text{식(2)}$$

위 식의 분모에 나타낸 $\sqrt{\sum A_c I_k}$ 및 $\sqrt{f_{op}}$ 는 각각 화재실 주벽으로의 열손실과 화재실 개구부로부터의 열방출 정도를 나타내는 인자이다.

식(1) 및 식(2) 통하여 화재 시 주요 구조부에 가해지는 화재 외력에 따른 온도 변화를 평가할 수 있으며, 이때 화재온도가 급격하게 감소하는 시간까지를 화재지속시간(t_f)으로 평가할 수 있다. 즉, 화재지속시간은 실내 가연물이 연소 완료되기까지의 시간이며, 화재실의 가연물 총발열량 (Q_r)을 가연물의 연소에 의한 1초당의 발열량 (q_b)으로 나눈 값이다. 그러므로 t_f 는 다음 식(3)과 같이 나타낸다.

$$t_f = \frac{Q_r}{60q_b} \quad \text{식(3)}$$

(2) 화재보유 내화시간 평가

화재 시 주요구조부에 요구되는 내화성능이 유지 가능한 한계시간, 즉 보유내화시간을 부재단위에 산정한다. 화재 보유 내화시간의 산정순서는 먼저 화재성장(화재 지속시간 (t_f), 화재온도상승계수 (α))을 평가한다. 요구되는 성능에 따른 구조부재의 비손상성에 대해서는 열에 의한 열화 깊이 (d)를 산정하고, 열 열화 깊이에서의 콘크리트 온도가 500℃가 되는 한계의 가열시간을 산출한다.

또한 구획부재(차열성)에 관해서는 이면온도가 가연물 연소온도가 되는 한계의 시간을 산출한다. 비손상성과 차열성이 요구되는 부재에 대해서는 양자 중 짧은 쪽이 화재 보유 내화시간이 된다. 실내보유 내화시간의 산정식은 식(4)와 같다.

$$T_{fr} = \min \left[\max \left\{ \frac{16722(cd)^2}{\alpha^{3/2} \left(\log_e \frac{0.673}{(cd)^{1/3}} \right)^2}, \left(\frac{480}{\alpha} \right)^6 \right\}, \frac{118.4_{cd} D^2}{\alpha^{3/2}} \right] \quad \text{식(4)}$$

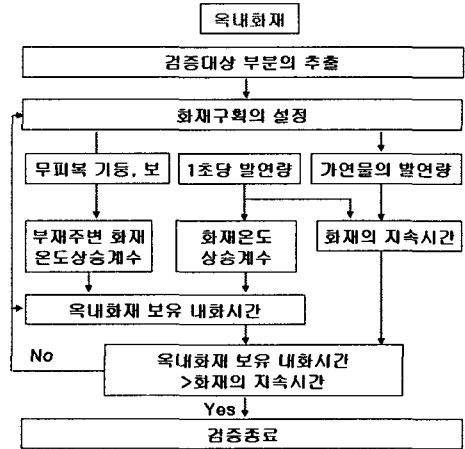


그림 1. 내화안전성 평가 흐름도

3. 내화 안전성 평가 결과 및 화재시물레이션(FDS) 해석 비교 검토

일본내화안전성 평가(수치적 해석)를 화재 해석에 일반적으로 사용 되어지는 화재시물레이션(FDS)을 통하여 화재 위험성 평가를 연구하였으며, 이를 위하여 평가대상구조물로 국내초고층 L사의 60평 공동주택의 일부 공간을 화재실과 인접실로 선정하여 비교연구 하였다.

표1은 평가대상물의 구조물 개요를 나타낸 것이며, 표2는 화재실의 가연물의 종류와 그에 따른 발열량을 나타낸 것이다.

표 1. 수치해석 대상 구조물 개요

구 분	내 용
규모 및 용도	60평형 공동주택(m ³)
구 조	철골, 철근콘크리트조
화재실	침실 & 서재 (34m ²)
인접실	거실 & 드레스룸 (40.7m ² , 5.0m ²)

표 2. 화재실의 가연물에 대한 발열량

종 류	총 무게(kg)	재 질	가연물 무게(kg)	발열량(kcal)
장롱	150	목재	150	675,000
침대	80	목재	50	225,000
		울, 직물	20	100,000
서랍장	70	목재	70	315,000
화장대	30	목재	30	135,000
거울	10	목재	5	22,500
tv	60	폴리스틸렌	60	570,000
옷, 이불, 커튼	90	울, 직물	90	450,000
책상 2개	60	목재	60	270,000
책장	30	목재	30	135,000
컴퓨터	30	폴리스틸렌	10	95,000
프린터	4	폴리스틸렌	4	38,000
책	60	종이	60	240,000
에어컨	60	폴리스틸렌	30	285,000
액자	4.5	목재	4.5	20,250
합계	3,125,750 kcal ==> 13,084.3 MJ			

*가연물의 발열량(kcal/kg)

목재:4500 , 울, 직물:5000 , 폴리스틸렌:9500 , 종이:4000

3.1 수치적 해석에 의한 평가

수치적 해석 수치해석 결과는 그림2와 같으며, 수치해석을 통해 계산된 실내 가연물 연소완료 시간은 67분으로 나타났으며, 이 결과는 수식(1)과 같이 화재실의 발열량과 해당실과 인접한 실의 가연물 발열량을 더하여 가연물의 1초당 발열량으로 나뉜 값이다. 또한 초고층의 구조에 적용되는 고강도 콘크리트의 성능을 적용하여 보유내화시간을 (4)수식을 통해 도출해낸 결과 비순상성 591분, 차염성(또는 차열성) 800분으로

일본 내화안전성 평가기준(부재에 대해서는 양자 중 짧은 쪽)에 의거하여 보유 내화시간이 591분임을 확인 하였다.

3.2 화재시물레이션에 의한 평가

초고층 화재 시 구조물에 화재 외력이 가해지게 되는데 그에 따른 연구 동향을 살펴보면, Schneider (1796)는 300~500°C의 고온에서 콘크리트의 탄성계수가 상온에서보다 50%감소한다고 제시한바 있고, Framura(1996)의 연구에 의하면 500°C와 700°C에서 콘크리트의 변형 폭이 상온에서보다 2~4배 증가한다는 결론을 내린 바 있다.

이에 본 평가에서 시물레이션을 이용하여 화재외력에 의해 부재의 강도 저하와 고강도 콘크리트 폭발현상이 일어날 수 있는 온도점까지의 시간을 측정하고자 한다.

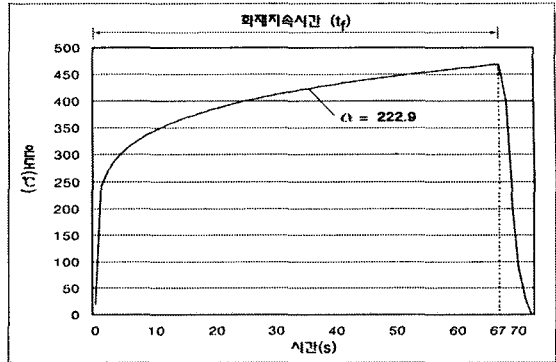


그림 2. 수치해석결과 (화재 온도상승 곡선)

(1) 화재 시물레이션(Fire Dynamics Simulator)의 모델링

FDS는 화재 모사 프로그램으로서 특정 위치의 온도를 시간대별로 측정할 수 있는 열전대 기능뿐만 아니라, 여러 구획된 공간에서의 연기유동, 생성된 가스의 종류, 가지거리 등 화재와 관련된 여러 가지 기능을 수행할 수 있다.

본 평가에서는 화재 시 부재의 시간대별 온도를 측정하기 위해 FDS를 사용하였다. 모델의 크기는 우리나라 국내초고층인 L사의 60평형 공동주택을 적용하였으며, 격자간격30cm, 총 그리드 개수 184,320개로 모델링하였다. 또한 평가에 필요한 데이터는 일본 내화성능평가 기준을 통하여 나온 수치값을 적용하였고, 해석시간 단축을 위해 일부 수정하여 나타낸 것이다. 그림 3은 본 평가에서 사용되는 도면을 FDS로 형상화하여 나타낸 것과 화재 시 온도측정 장소를 표시한 도면이다.

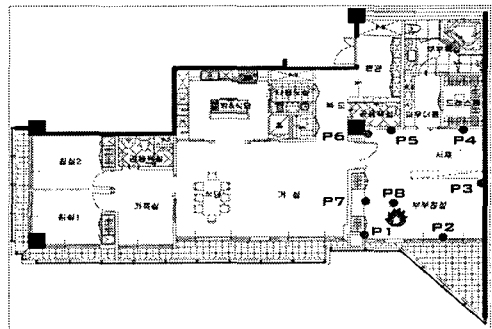
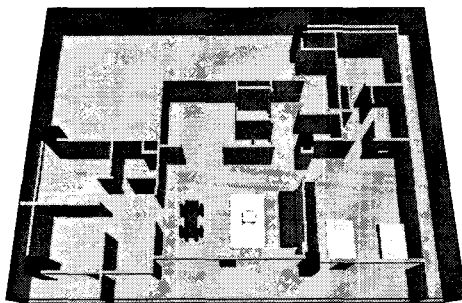


그림 3. 공간 해석 및 화재 위치, 측정 지정 위치

(2) 화재 시물레이션의 결과해석

그림 4는 화재실에 설치한 온도감지기의 시간에 따른 평균적 온도 변화 그래프이며, 이는 일본 내화안전성 평가 기준에 따른 수치해석 결과를 시물레이션에 적용한 결과이다. 표3은 이론적 수치와 그에 따른 결과를 나타낸 것이다.

표3. 시뮬레이션에 적용되는 이론적 수치 및 결과

화재지속시간 (계산시간)	4020[sec]			
화원의 발열량	3256 [KW/m ²]			
시간에 따른 측정부위별 최고온도	구분	시간	최고온도	측정 포인트
	위치			
	천정	약18분	613℃	P8
	벽	약17분	312℃	P7
	기둥	약21분	357℃	P1

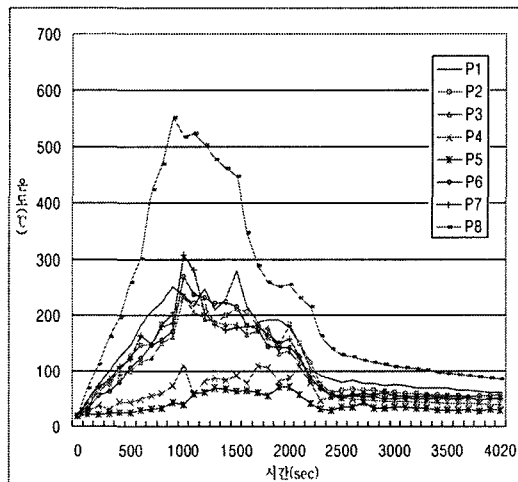


그림 4. 측정시간에 따른 온도변화(그림3 참조)

4.결 론

일본 내화 안전성평가 기준에 따른 해석과 FDS를 통한 결과 화재실의 주요구조부의 특성에 따라 화재 시 그에 따른 온도변화를 이론적 해석과 시뮬레이션을 통해 비교·분석하였으며, 이와 같은 해석을 통해 주요구조부의 온도분포 특성을 알 수 있었다.

- 1) 화재실의 위치에 따른 온도변화는 시간에 따라 약간의 차이는 갖지만 화원의 직상부에서 받는 온도(600℃)보다 약 1/2정도의 온도변화를 나타내었다. 이는 화재실의 벽면보다 천정쪽의 콘크리트 변형이 2~4배정도 높을 것으로 예상된다.
- 2) 화재 시뮬레이션의 해석결과 수치적 해석에 따른 지속시간과 단위시간당 발열량을 적용한 결과 화재발생 후 약 18분정도에 최대 온도점까지 상승함을 확인 하였다. 또한 수치해석보다 화재지속시간이 일찍 완료됨을 보여주는데 이는 실화재 시에는 가연물이 연소함에 따라 확산이 이루어지는데 반해 시뮬레이션에서는 화재성상에 따른 확산이 잘 이루어지 지지 않기 때문이라 사료된다.
- 3) 초고층 주거시설의 화재위험성 평가는 일본 내화안전성 기준과 시뮬레이션을 통

한 해석으로부터 주요구조부의 내화 성능 향상 및 콘크리트의 변형과 폭열에 대한 보완 등이 예상되며, 향후 초고층 주요구조부의 내화성능향상에 기여할 수 있는 지속적인 연구가 선행되어야 할 것이다.

5. 참고 문헌

1. 권영진 외7, “철근콘크리트 구조물의 내화특성”. 한국콘크리트학회,콘크리트 특집도서 시리즈 KCI SP4 pp. 103-113.
2. 권영진, 이춘하, 오규형, 박용환, 김무한, “화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 수열온도 평가에 관한 문헌적 고찰”, 한국화재.소방학회 2003 추계학술논문발표회논문집, pp. 297-301
3. 권영진, “화재피해를 입은 콘크리트구조물의 수열온도 추정을 위한 실험적 연구” 한국화재소방학회논문지, 1738-7167, 제18권3호, pp.51-56, 2004
4. 박외철 외2, “FDS를 이용한 실내화재 모사의 문제점” 한국화재.소방학회 2003 추계학술논문발표회논문집, pp.3-8, 2003