

# 건축물 화재온도 및 화재지속시간 추정 연구

- FASTLite 프로그램을 이용한 컴퓨터시뮬레이션을 중심으로 -

임 홍 순 | 방재시험연구원  
건축구조부 건재환경팀장

## 1. 개 요

건축물에서의 화재현상을 보다 경제적이고 간편하게 예측하기 위한 노력이 각국의 많은 연구진에 의해 이루어져 왔으며, 이를 토대로 화재현상을 수치적으로 분석할 수 있는 기본도구 즉, 화재모델링기법이 정립되었다. 더욱이 최신 건물에 대규모 방화시스템(내화구조 및 방화설비 등) 설치에 따른 낭비적 비용을 줄이기 위한 노력으로, 이들 시스템이 해당 건물에서 그 방화성능이 과도하지도 부족하지도 않은 적정 방화성능을 예측하여 설계하고자 하는 건축법규의 성능규정(Performance-Based Code)이 도입되면서, 컴퓨터를 이용, 계산할 수 있도록 프로그램화하여, 건물화재를 가상적으로 예측하는 화재모델링기법(이하 컴퓨터시뮬레이션이라 함)은 더욱 활용성이 높아지고 있다.

이 화재 컴퓨터시뮬레이션 기법에는 필드모델(Field model) 및 존모델(Zone model)이 있다. 필드모델은 건물 내 공간을 미소한 셀(Cell)부분으로 나누어 다수 셀간의 열에너지 이동을 고차원 수치해석을 통해 해석하는 방법으로 수많은 계산을 복합적으로 해야 하기 때문에 고성능 컴퓨터 등 고가 장비와 많은 시간을 필요로 한다. 반면, 존모델은 실공간을 고온층과 저온층으로 구분하고 양 층간의 에너지이동을 단순화시켜 수치해석하는 방법으로, 적용하기 쉽고 경제적이어서 폭넓게 적용될 수 있는 도구로 평가되고

있다.

필드모델은 1974년 노틀담대학에서 개발한 UNSAFE모델로 시작되어, 미국 기술표준국(NIST - National Institute of Standards and Technology)의 BF3D모델로 이어지는 초기 필드모델들이 있었으며, 기초적인 화재해석에 한정되어 있었다. 이후 실질적인 화재해석에 응용되어진 필드모델로서는 영국의 FRS에서 개발한 JASMINE 모델이 대표적이라 할 수 있다.

존모델은 일본 건설성 건축연구소에서 川越 關根모델이 1958년에 처음으로 개발된 이후 영국의 Thomas, 캐나다의 Tamura, NRCCI, 일본의 田中(BRI), 미국의 FAST, CFAST, Havard Mark-VI 등과 이외에도 많은 존모델이 개발되어 사용되고 있다.

이 연구는 건축물의 용도에 따른 화재지속시간 및 화재온도성상을 추정하기 위하여, 미국 기술표준국(NIST)에서 개발한 실용적인 화재예측 존모델인 CFAST 모델을 프로그램화한 FASTLite 화재시뮬레이션 컴퓨터프로그램을 이용하여, 현행 건축법규에서 층수에 의하여 일률적으로 규정하고 있는 내화성능기준과 비교 검토하였다.

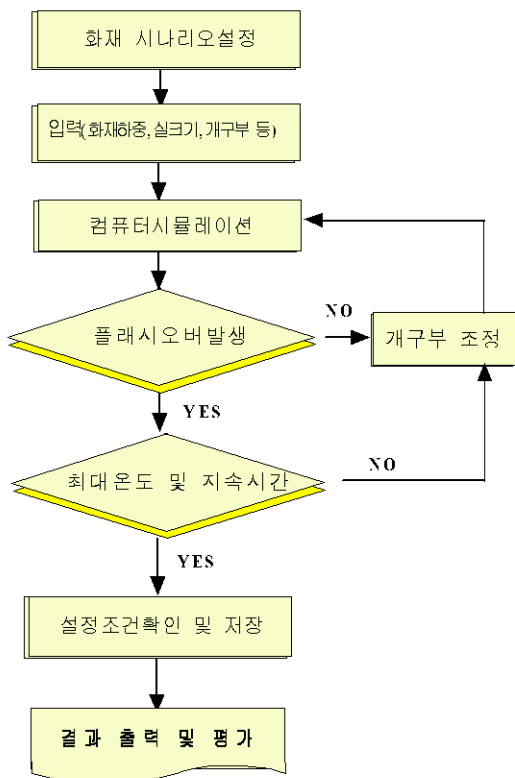
## 2. FASTLite 프로그램

FASTLite는 장방향으로 단순화된 인접된 3개 실까지 평가가 가능하며, 사용자가 평가 대상

건물의 실의 크기, 내장재 및 가연물량 및 가연물 연소특성을 입력하여 화재조건 규정하며, 이에 따른 평가항목으로서 실내연기축적 및 실내화재 온도, 연소가스농도, 실내바닥 및 상부벽 온도, 바닥면에 대한 복사열 크기를 예측평가할 수 있다.

가. 화재온도예측을 위한 프로그램 FLOW CHART

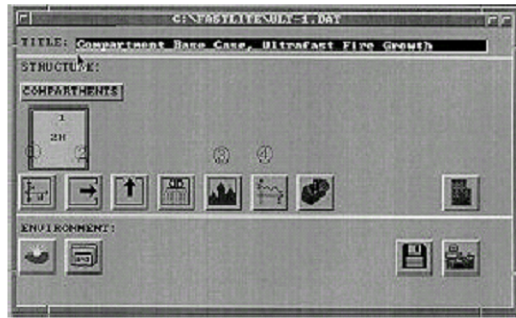
FASTLite에 의한 화재온도성상 예측은 다음 [그림 1]의 Flow-chart에 따라 수행되었다.



[그림 1] FASTLite 화재온도성상 예측 FLOW-CHART

나. 화재온도 예측 시뮬레이션 입력요소 및 설정  
FASTLite 프로그램의 실내온도 예측에서 입력 기본요소는 실 구조(크기, 내장재), 개구부(크

기 및 설치높이) 및 가연물(가연물량 및 연소특성)로서 입력은 [그림 2]에 나타난 그래픽 화면의 아이콘 중 ①~④의 입력 아이콘을 사용하며, FASTLite프로그램의 초기 그래픽 화면에 나타난 ①~④ 입력 아이콘의 각 단계별 입력요소 및 설정방법 개요는 다음과 같다.



[그림 2] FASTLite 프로그램 입력초기화면

(1) 1단계 : 화재구획실 크기 및 내장재

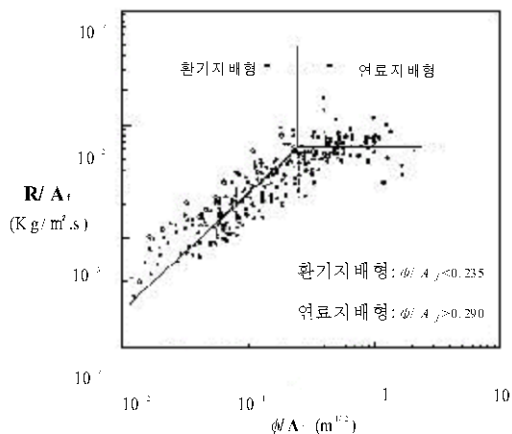
이 화재시뮬레이션 프로그램에서 요구되는 화재실 구조내역은 장방형으로 단순화된 가로, 세로, 높이로 구분하여 규정되며, 화재구획실 내장재는 재질의 비열 및 단열성에 의해 열손실 및 복사량의 영향을 규정하는 것으로 이 프로그램 내의 데이터베이스에 의해 해당재료를 선택하여 입력한다.

(2) 2단계 : 개구부 설정

화재시의 최대상승온도를 추정하기 위하여, 플래시오버 현상이 발생하는 경우의 한 개구부의 크기를 폭과 높이로 설정 입력한다.

이렇게 입력된 개구부 크기로부터 FASTLite 프로그램은 환기에 의한 연소속도(Heat release rate,  $Q_{vent}$ )를 결정한다. 즉, 화재실 연소속도 ( $Q_{vent}$ )가 환기구를 통한 공기의 유입량을 규정하는 환기인자  $A\sqrt{H}$  [여기서 A : 환기구의 면적 ( $m^2$ ), H : 환기구의 높이 (m)] 값에 비례하

는 것에 근거한다. 또한, 건물 화재시 초기에는 가연물, 즉 화재하중에 의해 영향(연료지배형 화재)을 받으나 어느 정도 진행되면 환기량에 의해 영향(환기지배형 화재)을 받는다. 다만, 화재가 진전될 조건으로는 개구부 크기에 의해 결정되는 환기인자( $\phi = \rho \sqrt{g} * A \sqrt{H}$ ; 공기밀도( $\rho$ ), 중력 가속도( $g$ ), 개구부면적( $A$ ), 개구부유효높이( $H$ ))와 가연물 전노출 표면적( $A_f$ )이 관계하며, 가연물 전노출면적에 대한 환기비율, 즉  $\phi / A_f$  로 표현되는 「환기인자비」가 0.235 미만이면 환기지배형 화재로 진전되며, 0.290을 초과하면 연료지배형 화재특성을 나타내는 것으로 알려져 있으며, 환기비에 따른 연소속도 변화 추이를 보면 [그림 3]과 같다.



[그림 3] 환기인자( $\phi$ )와 연소속도( $R$ )와의 관계

(3) 3단계 : 출화원 배치 및 가연물 설정

화재발생원의 위치는 바닥의 한 모서리를 중심으로 3차원 좌표(x, y, z)로 나타내며, 이번 연구에서는 화재실 바닥의 중앙에 위치하는 것을 기본값으로 하였다.

가연물은 실내에 노출되는 표면방향, 즉 수평 및 수직면으로 구분하여 각 방향별 가연물의 두

께와 그 두께 분포비를 입력한다.

또한, 건물 내 설치된 내장재 등을 포함한 가연물은 실제 현장조사에 의하여 가연물량을 설정해야 하나 많은 시간과 인원이 소요되는 과제로서 현실적으로 어려움이 있어, 기 조사된 화재하중 자료를 이용하였다. 참고한 호주의 건물화재 위험도 평가 프로그램인 FREM (Fire Risk Evaluation Model, 1996)에 소개된 용도별 및 공장 공정별 화재하중은 <표 1> 및 <표 2>와 같으며, 각국에서 기 조사된 주요 용도별 화재하중의 비교현황을 보면 <표 3>과 같다.

FASTLite프로그램은 입력된 가연물에 근거하여 가연물량에 의한 실내 연소속도(HRR  $Q_{fuel}$ )를 결정한다.

<표 1> 일반건물 용도별 화재하중

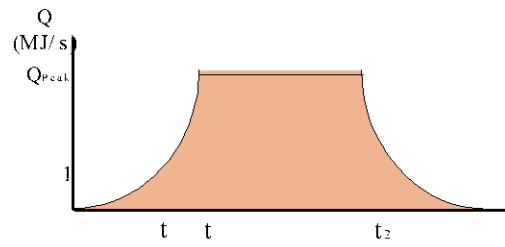
(단위 : MJ/ m<sup>2</sup>)

용도	화재하중	용도	화재하중	용도	화재하중
주택	300	사무실(일반)	300	호텔(객실)	300
교회	200	사무실(영업)	800	호텔(음식점)	500
극장	300	판매장(섬유)	600	백화점	300
기숙사	300	판매장(일반)	300	병원	300
도서관	2000	여관	300	학교	300
방송국	300	우체국	400	유치원	300
박물관	300	은행	300	식당	300

(4) 4단계 : 가연물 연소특성 설정

일반적인 실내 화재시 가연물 연소특성은 연소속도에 의해 성장한 후 일정시간동안 열 평형을 이루어 실내의 열에너지가 일정하게 유지되다가 가연물이 소진되면 감소하는 화재현상을 나타내며, 전형적인 곡선도는 [그림 4]와 같다. 따라서 가연물 연소특성 설정은 가연물 종류에 따라 [그림 5]의 slow, medium, fast, ultra fast 중에서 연소속도를 선택하여 연소속도 상승곡선을 설정하게 되어 있으며, 연소속도가 최고점

(QPeak)에 도달하는 시간(Level-off time ; t1)과 감쇄시점(Decay time ; t2)으로 입력하며, 이때 FASTLite 프로그램은 연소속도의 최고점(QPeak)으로 앞서 결정된 개구부에 의한 연소속도(Qvent)와 가연물의 연소속도(Qfuel)를 비교하여 작은 값을 선택하며, 화재 온도 계산에 반영한다.



[그림 4] 가연물 연소시 전형적인 연소속도곡선

<표 2> 공장 공정별 화재하중

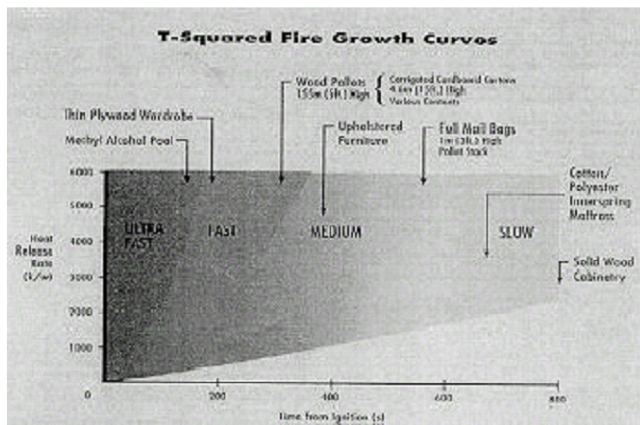
(단위 : MJ/m)

공정/용도	화재하중	공정/용도	화재하중	공정/용도	화재하중
금속주조	40	금속가구	300	자동차도장	500
축산물가공	40	건축재단	300	장난감	500
석조공사	40	금속도장	300	섬유포장	500
알루미늄제조	40	납땜	300	카펫트	500
철공소	40	트랙터	300	펠트	500
음료수제조	80	모터사이클	300	인쇄(잉크)	700
도금	80	무기	300	타이어	700
제철	80	변전소	300	플라스틱용접	700
금속용접	80	시계	300	제과(포장)	800
맥주	80	자동차	300	접착제(단백질)	800
발전소(수력)	80	자동차정비	300	타르	800
소금제조	80	전선	300	합성수지패널	800
유리	80	카메라	300	합판	800
전선	80	커피정제	300	타이어재생	1000
단조(금속)	100	화장품	300	인조가죽	1000
치즈	100	술(알코올)	400	접착제(솔벤트)	1000
유리제조	200	플라스틱성형	400	제빵	1000
기계(일반)	200	가전제품	400	제분	1000
담배	200	Quenching	400	목재팔레트	1000
도자기	200	스키	400	인쇄물포장	1700
보일러실	200	인쇄	400	플라스틱원료	2000
세탁소	200	목공	400	합성수지	3400
우유	200	건축제품	400	물감(가연성)	4000
제빵작업	200	도장실(Spray)	500	섬유프린팅	700
섬유봉제	300	모자	500	수건	700
합판제분	300	섬유표백	500	식품포장	800

<표 3> 각국 건축물의 주요 용도별 적용화재하중 비교

용도구분		적용화재하중(kg m <sup>2</sup> )					
		일 본		미 국	호 주	캐나다	체 코
		강구조협회	藤田실측값				
사무실	일반사무실	13.8~33.4	30~150	16.2~68.0	18.75~50	50	40
	회의응접실	2.4~14.7	-	4.4~59.9	-	-	40
	서류보관실 (도서실)	66.2~185	-	18.7~164.9 (72.5~194.9)	125	-	-
	창고	209.2~369	-	8.8~141.2	-	-	120
	설계실	44.1~60.7	-	54.7	-	-	40
도서관	서가	-	100~250	-	-	-	-
	서고	-	150~500	-	125	-	-
학교(교실)		-	30~45	-	18.75	30	-
아파트(주거)		-	35~60	-	18.75	45	-
극장	제작실창고	56.9~73.1	-	65.0	-	-	75
	오디토리움(객석)	20.6~21.0	20~35	20.8	18.75	-	-
백화점		6.3~23.5	-	14.2	25	-	90
호텔	객실	7.8~13.3	25~40	10.4	18.75	-	30
	연회실	2.2~5.9	-	3.9	31.25	-	30
병원		-	15~30	22.5	18.75	20	25
창고(종이류)		844~1261	200~1000	1061.4	250	-	120
체육관		12.0~42.3	-	25.0	-	-	-

\* 상기 화재하중 단위는 목재환산량에 근거한 것으로, 1kg/m<sup>2</sup> = 16MJ/m<sup>2</sup>으로 환산됨.



[그림 5] 가연물 종류에 따른 연소속도 구분(t2)

### 3. FASTLite 프로그램을 이용한 화재온도 추정

#### 가. 시뮬레이션 대상건물

이번 연구에 있어서의 화재시뮬레이션 대상건물은 한국화재보험협회의 특수건물 화재조사 보고서, 일본 소방행정연구회의 화재건물 위험성분석 보고서의 건물사례를 참조하여 과거 실제로 화재가 일어났던 건축물 중 대형의 재산 및 인명 피해를 냈던 13개의 건물을 용도별로 선정하였으며, 선정된 건축물의 주 용도는 호텔, 공장, 복합건물, 전시장, 극장, 백화점, 병원, 오피스빌딩이다. (대상건물의 현황은 <표 4> 참조)

<표 4> 화재시뮬레이션 대상건물

건물명	구조	층수	연면적 (m <sup>2</sup> )
D호텔	철근콘크리트	지상21층, 지하2층	32,391
K호텔	철근콘크리트	지상 4층, 지하1층	2,841
U방직	철골조	지상1층	2,723
Y화학	철골조	지상2층, 지하1층	9,142
테마파크	철골+유리	지상3층, 지하1층	101,760
N빌딩	철근콘크리트	지상7층, 지하1층	4,959
U상가	철근콘크리트	지상3층, 지하1층	9,090
G과학관	철근콘크리트	지상5층, 지하1층	10,629
A극장	철근콘크리트	지상5층, 지하1층	15,764
S백화점	철근콘크리트	지상8층, 지하3층	45,659
D병원	철근콘크리트	지상7층, 지하1층	5,187
E사무실	철근콘크리트	지하12층, 지하5층	41,936
랙식창고	철골+RC조	지상6층	19,606

#### 나. 화재시뮬레이션 조건 및 실행

이번 연구의 화재지속시간 추정을 위한 화재시뮬레이션은 몇 가지 기본적인 화재조건 하에서 실시하였으며, FASTLite 프로그램 실행에 필요한 입력항목 중 화재지속시간 예측을 위한 입력

DATA는 <표 5>와 같이 하였다.

#### 【화재시뮬레이션 조건】

- 1개의 화재실에 대한 최고화재온도를 추정
- 환기지배형 화재로 플래시오버 발생
- 가연물은 화재실 바닥면 전체에 등분포하는 것으로 함.

<표 5> 화재시뮬레이션 입력요소 DATA SHEET

건물 사례별 화재시뮬레이션 data sheet				
건물 개요				
건물명			업종	
소재지			화재일시	
건물구조			진입시간	시간
층수			연면적	m <sup>2</sup>
화재실 조건				
위치			주요가연물	
구획실 크기 ①	폭	m	구획면적	m <sup>2</sup>
	길이	m		
	높이	m		
개구부 크기 ②	폭	m	내장재 ①-1	벽 : 바닥 : 천정 :
	높이	m		
화재 특성 입력				
평균화재 하중	MJ/m <sup>2</sup>	총 발열량	MJ	
목재 환산량	m <sup>3</sup>	환산두께 ③	m	
연소속도 구분 ④	(s low/medium/fast/u-fast)	Q <sub>0.1</sub>	MJ/s	
Level off Time ④	sec	Q <sub>1.0</sub>	MJ/s	
Decay Time ④	sec	비고		

주) [ ] 표시(음영)란은 FASTLite 프로그램에서 요구되는 입력 값임.

#### 다. 대상건물별 화재시뮬레이션 결과

건물 내 구획면적 및 화재하중 조건의 각 화재구획실에 대한 최고 화재온도 및 화재지속시간을 추정하기 위하여 대상건물별로 화재시뮬레이션을 실시하였으며, 추정된 화재지속시간은 KS F 2257(건축구조부분의 내화시험방법-1993)의 표준화재온도곡선에 의한 온도시간면적으로 등가

<표 6> 대상건물별 화재시뮬레이션 결과

건물명	화재실		화재하중 (MJ/m <sup>2</sup> )	화재시뮬레이션 결과			실제화재사례	
	위치	면적(m <sup>2</sup> )		최고온도 (°C)	최고온도 도달시간	등기화재 지속시간 <sup>1)</sup>	화재소실부분	실제화재시간 <sup>2)</sup>
D호텔	1층(로비)	800	300	905	1시간07분	57분	21개층 전소	7시간40분
K호텔	3층(객실)	336	300	1,230	36분	39분	3, 4층 소실	1시간13분
U방직	1층(일부)	2,166	300	886	3시간12분	2시간24분	화재실 전소	2시간20분
Y화학	1층(일부)	2,520	400	1010	4시간26분	3시간35분	화재실 일부	2시간02분
테마파크	1층파크	34,800	1,148	124	2시간05분	19분	-	-
N빌딩	지하나이트	870	300	870	1시간48분	1시간28분	무대부 일부	14분
U상가	1층	1,080	300	994	1시간19분	1시간13분	1층 전소 붕괴	1시간2분
G과학관	3층(전시실)	1,750	300	845	2시간18분	1시간40분	3층 및 4,5층 일부	2시간10분
A극장	1-4층(객석)	2,500	300	823	2시간34분	1시간47분	화재실 전소	1시간36분
S백화점	5층(일부)	1,440	300	836	2시간17분	1시간39분	5,6,7층 일부	5시간34분
D병원	3층(병실)	1,785	300	1,150	1시간04분	59분	화재실 일부	55분
E사무실	2층(일부)	630	300	816	2시간25분	1시간42분	화재실 일부	52분
레크창고	3,4층(창고)	3,120	1,000	1,210	4시간05분	4시간07분	화재실 전소	3시간42분

주1) 등기화재지속시간은 KS F 2257-93(건축구조부분의 내화시험방법)의 표준가열곡선에 의한 온도, 시간면적(°C×분)으로 등기환산한 시간임.

2) 실제화재시간은 화재진압시간에 근거함.

환산하여 등기화재지속시간을 산출하였다.  
그 결과는 <표 6>과 같이 나타났다.

#### 4. 분석

##### (1) 화재시뮬레이션 화재지속시간 추정 결과와 실제화재시간 비교

U방직, U상가, A극장, 레크창고 건물은 화재실 면적이 실제화재의 소실면적과 유사한 경우로서, 컴퓨터화재시뮬레이션 등기화재지속시간은 <표 7>에서 나타난 바와 같이, 실제화재의 화재시간과 거의 동일하게 나타났다.

또한, D호텔, K호텔, G과학관, S백화점의 경우는 시뮬레이션에서 설정한 화재실 외로 연소 확대된 경우로서 실제 화재시간이 컴퓨터시뮬레이션에서 추정된 지속시간이 보다 길게 나타났으며, N빌딩, Y화학, D병원, E사무실은 화재구획

내에서 일부만 소실된 경우로서 실제 화재시간이 컴퓨터시뮬레이션으로 추정된 화재지속시간보다 짧았다. 따라서 조기소화로 화재실 일부만 연소하여 실제 화재시간이 컴퓨터시뮬레이션에서 추정된 지속시간보다 짧아진대거나 화재실 밖으로 연소 확대되어 실제화재시간이 컴퓨터시뮬레이션에서 추정된 지속시간보다 길어지는 경우를 제외하고 화재실 설정이 실제화재면적과 유사한 경우 화재시뮬레이션 화재지속시간은 실제화재시간과 유사하게 나타났다.

<표 7> 화재실 설정이 실제 화재면적과 유사한 조건의 화재시간 비교

건물명	시뮬레이션에 의한 등기화재지속시간	실제화재시간	비고
U방직	2시간 24분	2시간 20분	
U상가	1시간 13분	1시간 2분	
A극장	1시간 47분	1시간 36분	

그러므로 1개의 화재실에 대한 컴퓨터시뮬레이션 결과와 실제화재시간이 유사성을 나타내고 있어 본 연구에 사용된 FASTLite 프로그램은 화재예측에 적합함이 검증되었다.

(2) 용도별 화재지속시간 추정 결과

총 9개 용도 13개 건물의 각각 하나의 화재구획실에 대한 컴퓨터시뮬레이션에서 추정된 등가 화재지속시간은 <표 8>과 같으며, 구획실이 많은 숙박·주거·의료시설은 1시간 이내, 업무·관람·집회·판매·근린생활시설은 2시간 이내, 공장시설은 3시간, 창고시설은 4시간 이내로 나타났다. 한편, 대공간 건물의 경우 내부 가연물의 연소에 의한 화재지속은 길었으나(2시간 5분), 층고가 35m로 높고 주변공간이 커서 실내 최고 온도는 120℃ 정도로 낮게 나타나 주요 구조부의 내화에 미치는 영향은 적은 것으로 판단되었다.

따라서 건물의 화재지속시간은 용도특성에 따라 달라질 수 있으므로 현행의 층수에 따라 획일적으로 적용되는 내화성능기준은 화재위험에 따라 달리 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

<표 8> 건물용도별 화재지속시간 추정 결과

건 물 용 도	화재지속시간 <sup>주1)</sup>
숙박시설 (D호텔, K호텔)	0.8시간
근린생활시설 (N빌딩, U상가)	1.3시간
업무시설 (E사무실)	1.7시간
판매시설 (S백화점)	1.6시간
관람집회시설 (A극장)	1.8시간
전시시설 (G과학관)	1.6시간
의료시설 (D병원)	1.0시간
창고시설 (레이크창고)	4.1시간
공장 (U방직, Y화학)	3.0시간
대공간 (L테마파크)	0.2시간

주1) KS F 2257(건축구조부분의 내화시험방법, 1993)의 표준화재온도곡선에 의한 등가화재시간임.

5. 맺는 말

실제로 화재가 발생한 건축물을 용도별로 선정하여, FASTLite 컴퓨터 화재시뮬레이션 프로그램을 이용 화재지속시간을 추정한 결과, 컴퓨터 시뮬레이션에서 추정된 화재지속시간은 건물 용도별로 다르게 나타나 내화성능기준에 건물용도가 고려되어야 할 것으로 판단되었다.

아울러 이번 연구를 통해 화재시뮬레이션에 의해 추정된 화재지속시간이 실제 화재사태의 화재진압시간과 유사성을 나타내고 있어, 건물의 가연물량, 배치, 개구부 조건 등이 정확히 파악되면 화재실에서의 보다 타당성있는 화재성상 추정이 가능하다고 판단되었으며, 이번 사용된 바와 같이 Zone model 화재해석 방식의 프로그램은 제한적이기는 하지만 설계단계에서의 실용적인 화재성상 검증도구로서, 건축설계사무소, 소방기술사, 안전점검 업무 등에 손쉽게 적용될 수 있다고 본다. 🍷

<방재기술 제28호에서 전제>

참고문헌

- [1] 田中孝義, 建設省建築研究所, 建築火災安全工學入門, 日本火災學會論文集, vol 13, No 1, 1963, p208
- [2] Fire risk evaluation model manual(1996), p33-44, Gallagher Bassett Australia Pty Ltd.
- [3] 建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法, 日本建築センター刊, p142, 日本鋼構造協會調査
- [4] 建築防災工學, オーム社, p143; 日本 藤田今 郎 實測直(1970)
- [5] NFPA(National fire protection association) handbook, p6-77 ; 1991
- [6] 강구조내화설계기준 및 내화기법에 관한 연구 (1997, 건축학회) p.88- p90