

# 건축물의 화재시뮬레이션 모델링 적용시 설계화재의 설정

김동익\*† · 김상철<sup>1</sup>\*\*

한국건자재시험연구원 안전·환경평가센터 연구원

<sup>1</sup>한국건자재시험연구원 안전·환경평가센터 센터장

(\*ican0815@kicm.re.kr, \*\*sangchul@kicm.re.kr)

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목표

건물의 고층화, 대형화, 심층화 및 대공간을 가진 건축물이 증가하고 있는 시점에서, 현재의 법규만으로는 화재시 많은 인명피해와 재산피해가 발생할 우려가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 정부는 내년 연말 또는 내후년부터 연면적 5 만m<sup>2</sup>, 높이 100 m 이상의 대규모 및 초대형 건축물을 신축할 경우, 화재 등 예상되는 대규모 재난 영향을 사전에 분석하여 대책을 강구하기 위한 화재 영향 평가를 해야 한다고 발표하였다. 이 중 방화공학의 측면에서 화재영향평가는 신기술 도입, 제연 시스템, 화재 제어 설비에 의한 화재 안전성 확보, 화재·피난 시뮬레이션에 의한 화재 안전성을 평가하는 것이다. 이 중에서 화재 시뮬레이션은 건물에서 가상의 화재를 설정하여 화재시 발생될 수 있는 문제점을 찾고 보완하기 위하여 사용되고 있다. 하지만, 화재를 설정함에 있어서 위험수준을 낮게 평가한다면 초고층 및 대형 건물의 화재시 많은 인명 및 재산 손실의 위험을 초래할 우려가 있으며, 만약 위험수준을 과하게 설정한다면, 과도한 설비비용 및 공간 효율의 비효율성을 가져올 수가 있다. 시뮬레이션 적용시 이런 문제점을 인지하지만, 적절한 설계 화재를 설정하는데, 연구 및 데이터가 많이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 향후에 실시될 예정인 화재영향평가를 대비하여 화재 시뮬레이션을 적용할 때 적절한

설계 화재크기 및 화재성장 그래프를 설정하고, 합리적인 화재영향 평가를 실시하기 위하여 설계화재에 대한 외국의 연구 내용 및 기준을 소개 및 공간별 용도별 적절한 설계 화재를 설정하기 위한 방법에 관하여 논의하고자 한다.

### 1.2 연구의 범위

공간별, 용도별 설계화재를 도출하는데 있어서 다음과 같은 변수가 있다.

- ① Heat Release Rate
- ② 독성물질 발생속도
- ③ 연기 발생속도
- ④ 화재 크기
- ⑤ 화재성장속도

하지만, 본 연구에서는 화재크기 및 화재성장속도를 통한 설계 화재성장 그래프 도출 및 최대 HRR을 설정하는데 범위를 두고 있다.

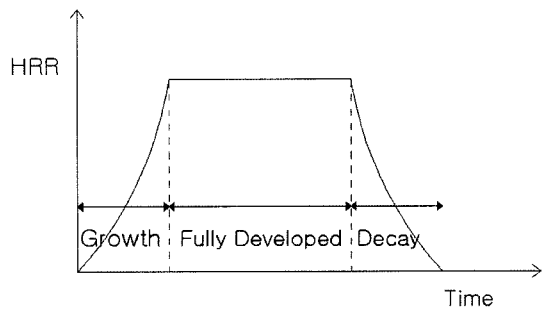


그림 1. 화재 성장 그래프

## 2. 선진외국의 설계 화재 설정

### 2.1 미국

#### 2.1.1 International Building Code

화재 설계 전문가 또는 건축 공무원에 의해 합리적인 설계화재를 설정하는 실정이다. 화재 공학적 분석시, 화재가 비정상·정상 상태에 관계없이 연료 특성 및 화재하중, 화재에 영향을 주는 인자들을 포함해야 한다.

#### 2.1.2 Building Officials and Code Administrator International

사람이 거주하는 공간에 대해서 설계 화재의 크기는 최소 4.64 MW, 그 외의 공간에 대해서는 2.1 MW 이상으로 화재 크기를 설정하도록 하고 있다.

#### 2.1.3 National Fire Protection Association 92B

NFPA 92B에서는 설계화재를 HRR 값이 일정한 steady fire와 시간에 따라 HRR 값이 변하는 unsteady fire로 나누어 생각하고 있다. 여기에서는 후자의 경우를 살펴보기로 한다. 비정상 설계화재는 성장 단계(a growth stage) - 정상(steady) 또는 감소(decay) 단계로 표현할 수 있다. 화재 성장 곡선은 다음 3가지 경우의 한 가지를 선택하여 화재설계를 설정한다.

- 1) 화재 실험 데이터
- 2)  $t^2$  화재 성장 모델
- 3) 전문가 인정에 의한 화재 성장 모델

1)의 경우는 공개된 실험 데이터를 활용한다. 3)의 경우는 화재설계 전문가가 새롭게 개발해야 하는 것이다. 따라서 여기에서는 2)에 대해서 살펴보기로 한다.

#### ① $t^2$ 화재 성장 곡선 모델

$$Q = 1055 \left( \frac{t}{t_g} \right)^2$$

$Q$ : 설계화재의 HRR(kW)

$t$ : 화재 후 걸린 시간(s)

$t_g$ : 화재발생 이후 1055 kW까지 도달하는데 걸리는 화재 시간(s)

#### ② 화재 지속 시간

$$\Delta t = \left( \frac{mH_c t_g^2}{333} \right)^{1/3}$$

$\Delta t$ : 화재지속시간(s)

$m$ : 연소된 전체 연료량(kg)

$H_c$ : 연료의 연소열(kJ/kg)

이상을 종합하여 화재 곡선 그래프를 도출하여 시뮬레이션에 적용한다.

이 방법을 화재시뮬레이션에 적용하기 위해서는 화재하중, 화재성장속도, 최대화재크기 등을 알아야 하므로, 쉽게 적용하기가 어렵다.

### 2.2 영국

#### 2.2.1 제연설계를 위한 화재설계

영국에서의 화재설계는 화재발생시 연기를 제어하는 제연 설비 설계를 하기 위하여 많은 연구가 있었다. 이 중에서 BS 7346 Part4에서 제시하는 설계화재의 크기에 관하여 살펴보기로 한다. BS 코드에서는 건물의 용도별, 스프링클러 설치 유무 등에 따라 다음과 같이 설계화재를 제시하고 있다.

표 2. 건축물의 용도별 설계화재 설정

Occupancy	Fire area (m <sup>2</sup> )	Fire perimeter (m)	HRR per unit area (kW/m <sup>2</sup> )
소매상점			
일반 스프링클러 설치	10	12	625
조기 반응형 스프링클러	5	9	625
No 스프링클러	전체 실	개구 폭	1200
사무실			
일반 스프링클러 설치	16	14	225
No 스프링클러	47	24	255
No 스프링클러 : 성기화재	전체 실	개구 폭	255
호텔 객실			
일반 스프링클러 설치	2	6	250
No 스프링클러	전체 실	개구 폭	100
주차장	10	12	400

### 2.3 캐나다

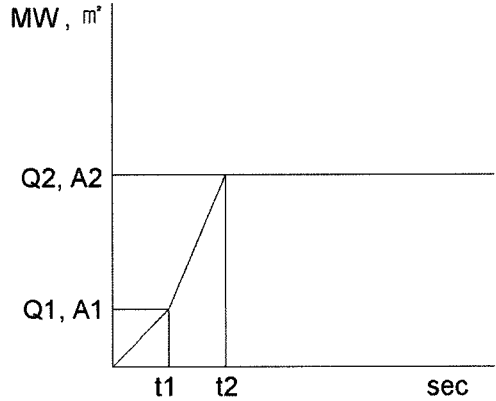
G.D. Lougheed *et al.*에 아트리움에서의 화재 설정시 다음과 같은 기준으로 최대 화재를 설정한다

## 건축물의 화재시뮬레이션 모델링 적용시 설계화재의 설정

(steady design fires).

**표 3.** 아트리움 공간에서의 설계 화재 설정(steady-state)

Fuel loading	Design fires (MW)
Low (minimum fire for fuel-restricted atrium)	2
Typical (minimum fire for atrium with combustibles)	5
High(large fires)	25



**그림 2.** 표준화원의 발열속도 및 화원면적

### 2.4 일본

건축물 내의 공간은 그 용도에 따라 수납 가연물이 다소 차이가 있고, 기상상태와 취침상태에서 확보해야 할 안전을 생각하는 입장, 수준에 차이가 있는 것을 고려하여 3종류의 발열 이력을 가지는 표준화원을 고려하여 표 4와 같이 적용하는 것으로 한다. 또한 표에서 공간 용도는 화재층 피난의 경우에도 화재실에 상정하는 공간의 용도를 나타내고 있다.

각 표준화원은 다음 그림과 같이 시간에 따라 발열속도, 화원 면적이 변화하는 연소성상을 고려하였고, 이것을 표 5에 나타내었다.

**표 4.** 공간용도와 적용화원(일본)

피난자 상태	공간용도	적용화원	
		화재실 피난	화재층 피난
기상	사무실, 집회실, 교실 등 수납 가연물이 적은 공간	화원 No.1	화원 No.1
	점포 등 수납 가연물이 많은 공간	화원 No.2	화원 No.2
취침	숙박실, 병실 등	화원 No.3	화원 No.1

### 2.5 International Organization for Standardization (ISO)

ISO/TR 13387-2에서는 다음과 같은 순서로 화재 시나리오 및 설계 화재를 설정하고 있다. 다음과 같은 순서로 설계화재를 설정하지만, 화재 크기 및 화재 성장 곡선은 화재 설계전문가의 판단에 맡기고 있다.

- step 1 : Location of fire
- step 2 : Type of fire
- step 3 : Potential fire hazards
- step 4 : Systems impacting on fire
- step 5 : occupant response
- step 6 : event
- step 7 : consideration of probability
- step 8 : consideration of consequence
- step 9 : risk ranking
- step 10 : final selection and documentation

**표 5.** 표준화원의 발열속도 및 화원면적

화원 No.	설정값					
	시간 (s)		발열속도 (kW)		화원면적 (m <sup>2</sup> )	
	t1	t2	Q1	Q2	A1	A2
화원 No.1	120	240	300	3000	1.7	1.7
화원 No.2	120	320	750	25000	0.5	17
화원 No.3	480	720	200	1000	2.5	2.5

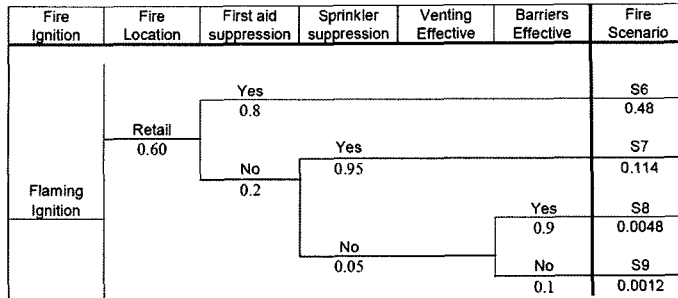


그림 3. Event tree의 예

2.6 주요 선진국의 용도별 설계화재 크기 비교<sup>1)</sup>

표 6. 용도별 외국의 설계화재 크기 비교

구분	미국	일본	캐나다	호주
객실	6MW까지 정상 fast 성장	환기 또는 연료 표면에 의해 정의되는 I <sup>2</sup> 정상 화재	52초에 5.5 MW, 이 시간에 SP가 작동한다고 가정	flashover가 될 때까지 화재는 급격한 화재성장
로비	NIST Full scale test data, 3 MW then decay	-	SP 작동할 때까지 fast 성장	-
연회장	3 MW 정상 상태	환기 또는 연료 표면에 의해 정의되는 I <sup>2</sup> 정상 화재	5MW 정상 상태 열대류 HRR	3 MW 정상 상태
아트리움	3 MW 정상 상태	환기 또는 연료 표면에 의해 정의되는 I <sup>2</sup> 정상 화재	5 MW 정상 상태 열대류 HRR	fast 화재 성장 후, 1 MW 정상상태
지하	-	환기 지배형, 3 MW까지 상승	SP 작동할 때까지 fast 성장	-
복도, 로비	-	연료 지배형, 3 MW까지 상승 후, 소화	SP 작동할 때까지 fast 성장	-
주차장	-	-	최대 3MW	-
지상 판매점	-	-	SP 작동할 때까지 fast 성장	1.5 MW 정상상태
회의실	-	-	SP 작동할 때까지 fast 성장	flashover가 될 때까지 화재는 급격한 화재성장

2.7 소결

외국에서 제시하는 설계화재를 비교·분석하면, 용도별로 최대 HRR의 크기를 제시하는 기준도 있지만, 주로 화재설계 전문가의 판단에 의해 설계화재의 크기를 제시하고 있다. 그러나 실제 화재는 화재하중, 환기계수 등에 의해 화재의 성장속도와 크기가 지배된다. 이와 같이 선진 외국이나 규격에서도 많은 연구가 진행되고 있지만, 초고층 또는 대형 건물의 화재 하중이 존재하는 공간에 대해서는 실험 데이터 및 연구가 미비한 실정이다.

3. 건축물의 화재성상을 통한 설계화재 설정

건물의 화재에는 목조와 같이 건물자체와 건물내부의 가연물이 연소하는 전면적 화재와 내화건축물과 같이 발생하는 국부적화재가 있으며 그 성상은 서로 다르다. 따라서 건축물의 화재성상을 파악한 후, 적절한 화재설계를 하는 것이 바람직하다고 판단된다.

고려해야 할 화재의 종류는 3가지로 분류되며 다

<sup>1)</sup>한국화재보험협회 방재기술교육-최신방재기술, 2006.

## 건축물의 화재시뮬레이션 모델링 적용시 설계화재의 설정

음과 같다.

- ① 공간 내에 한정된 부분에서 연소하는 국소화재
- ② 화재구획 내 전역에서 격하게 가연물이 연소하는 성기화재
- ③ 분출화염의 화재

다음 그림은 건축물의 화재성장 파악 후, 그에 맞는 설계화재를 도출하기 위한 흐름도를 나타내고 있다.

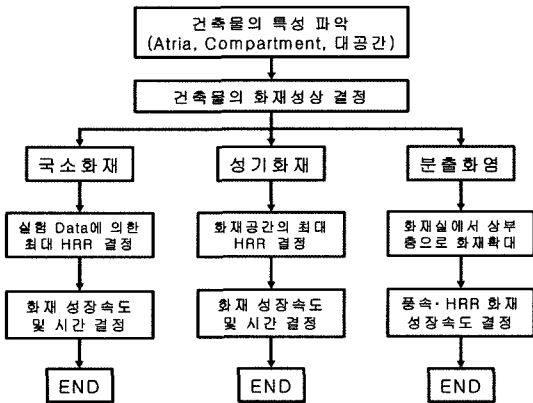


그림 4. 설계화재 설정 흐름도

### 3.1 국소화재를 통한 설계화재의 설정

#### 3.1.1 국소화재의 조건

국소화재는 공간의 크기(면적 및 높이)에 대하여 가연물 양이 적고, 가연물이 분산하여 배치되어 있는 경우에는 flashover가 발생하는 위험은 적다.

화재가 국소화재로 진화되기 위해서는 다음의 조건이 하나의 방법이 된다.

- (1) 가연물이 분산 배치되어 있고 연소중의 가연물이 주변의 가연물에 연소 확대가 되지 않도록 하는 것. 그렇게 하기 위해서는 분산배치된 가연물의 서로의 거리가 충분히 확보되도록 하고, 가연물 주변의 내장에 착화하지 않도록 불연화 하는 것이 중요하다.
- (2) 연소중의 가연물에서 발생하는 열기류와 연기 등이 공간 상부에 축적되어 열기류로부터 방사열에 의해 공간 내의 가연물이 착화 되지 않도록 하는 것, 일반적으로 화염이 천정에 도달하면 그 아래로 화염이 내려가 바닥 근방에서 방사 수열량이 급격히 증대하는 것으로 알려

져 있어, 화염이 천정에 도달하지 않도록 하는 것이 중요하다.

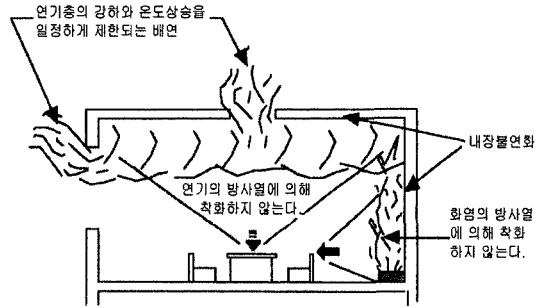


그림 5. 국소화재에 해당되는 조건

#### 3.1.2 설계화재의 설정

국소화재에 해당하는 공간에서의 설계화재 설정시, 이 공간은 다른 가연물로의 연속확대가 일어나지 않은 것으로 간주하기 때문에, 설계화재는 그 공간에서의 가연물의 종류를 파악하고, 그것이 화재성장 곡선에 의해 화재가 발생하는 것으로 설정한다.

#### 3.1.3 아트리움 공간에서의 설계 화재 설정 예제

아트리움 공간에 설치되어 있는 소파에서 화재가 발생했다고 가정한다. 위에서 언급하였지만, 가연물 사이의 거리가 멀고, 연소 확대가 발생하지 않는다고 판단한다. Sofa 실험에 의해 나타난 화재성장 곡선을 이용하여 이 공간에서 화재영향 평가를 실시하여 안전성 여부를 판단한다.

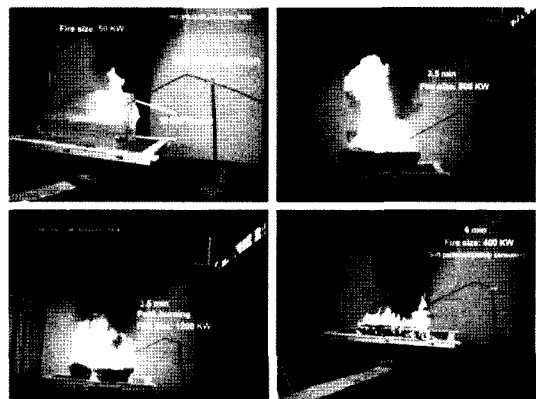


그림 6. Sofa 화재 실험

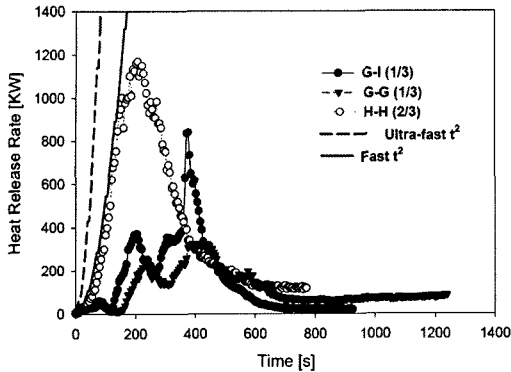


그림 7. Sofa 화재성장 그래프

### 3.2 성기화재를 통한 설계화재의 설정

가연물의 양, 공간의 기하학적 형상 등에 의해 성기화재가 발생할 것으로 판단된 공간에서 화재가 발생할 경우, 그것에 맞는 적절한 설계화재를 설정하여야 한다. 공간의 크기, 환기, 화재하중에 의해 화재크기 및 화재성장 곡선이 크게 달라진다. 따라서

화재크기 및 화재성장 곡선을 예측하여 설계화재를 설정하는 것이 바람직하다. 또한 성기화재시 화재설계를 하기 위해서는 주화원의 화재크기 및 성장속도, 화재실의 화재하중의 양, 연소지배형태 등에 관한 것을 숙지하여야 한다. 단, 여기에서는 가연물의 배치에 따른 화재크기는 고려하지 않기로 한다.

#### 3.2.1 주화원의 설정

여기에서 설명하는 주화원이란, 화재가 발생한 장소에서의 발화 물체 또는 물질을 의미한다. 주화원의 설정 및 크기는 다음과 같다.

- 1) 건축물 용도별 화재사례 및 화재원인 조사
- 2) 선정된 건축물 용도에서의 화재 발생확률이 높은 장소 선정
- 3) 선정 장소의 주변 가연물 예측
- 4) 예측한 가연물에 관한 실험 데이터 또는 설계자에 의한 설계화재 곡선 결정

표 8. 각국의 용도별 화재하중

용도구분		적용화재하중(kgf/m <sup>2</sup> ) <sup>2)</sup>				
		일본	미국	호주	캐나다	체코
사무실	일반사무실	13.8~33.4	19.0~79.9	18.75~50	50	40
	회의,응접실	2.4~14.7	5.1~70.3	-	-	40
	서류보관실 (도서실)	66.2~18.5	21.9~193.7 (85.1~146.7)	125	-	-
	창고	209.2~369	10.3~165.9	-	-	120
	설계실	44.1~60.7	64.2	-	-	40
도서관	서가	-	-	-	-	-
	서고	-	-	125	-	-
학교(교실)		-	-	18.7	30	-
아파트(주거)		-	-	18.7	45	-
극장	제작실, 창고	56.9~73	76.3	-	-	75
	오디토리움(객석)	20.6~21.0	24.4	18.7	-	-
백화점		6.3~23.5	16.6	25	-	90
호텔	객실	7.8~13.3	12.2	18.7	-	30
	연회실	2.2~5.9	4.5	31.2	-	30
병원		-	26.4	18.7	20	25
창고(종이류)		844~1261	1,247	250	-	120
체육관		12.0~42	29.3	-	-	-

<sup>2)</sup>한국건설기술연구원, 강구조물의 내화성능 검증법 개발, 2004

## 건축물의 화재시뮬레이션 모델링 적용시 설계화재의 설정

**표 9. 등가목재 화재하중 치환 방법**

순서	내용	비고 <sup>3)</sup>
1	주화원 화재실(주변)의 목재등가 화재 하중에 의한 총발열량 산정(MJ)	화재하중×18.8
2	화재시뮬레이션에서 화재실(주변)에 배치할 물품 선정 및 단위 발열량 결정	upholstery = 30,000(MJ/kg) carpet = 22,300(MJ/kg) plastic A = 40,000(MJ/kg)
3	화재시뮬레이션에서 주변 가연물의 밀도 선정	upholstery = 40(kg/m <sup>3</sup> ) carpet = 750(kg/m <sup>3</sup> ) plastic A = 12.5(kg/m <sup>3</sup> )
4	화재시뮬레이션에서 주변가연물의 질량 및 부피 결정	질량 = 화재하중×18.8/발열량 부피 = 질량/밀도
5	화재시뮬레이션에서 격자 간격에 맞게 가연물 배치	

### 3.2.2 목재등가 화재하중 양 계산

위의 화재하중 단위는 목재발열량 4,500 kcal/kg을 환산하여, 1 kg/m<sup>2</sup>=18.8 MJ/m<sup>2</sup>으로 환산하였다. 위의 데이터를 바탕으로 목재등가 화재하중을 화재시뮬레이션에 등가 화재하중으로 치환하여 가연물을 배치한다. 위에서도 언급하였지만, 가연물의 배치는 여기에서 고려하지 않는다. 목재 등가화재하중을 화재시뮬레이션에 맞는 화재하중 치환하는 방법은 다음과 같다.

### 3.2.3 화재실의 연소지배 모델 결정

현재 화재 전문가들에 의해 널리 사용되고 있는 화재시뮬레이션의 경우, 연소 지배형태가 연료지배형 모델의 경우는 시험결과와 거의 일치된 경향을 보이지만, 환기 지배형 모델에서는 잘 맞지 않는다. 따라서 화재실의 경우 산소가 충분한 연료지배형 화재가 되도록 화재 시뮬레이션 모델링을 해야 한다.

### 3.3 분출화염화재를 통한 설계화재의 설정

아파트 발코니 등에서 발생한 화재가 창문을 깨트리고 상부로 화염이 올라가서 상부층이 화염에 휩싸이는 사례를 종종 볼 수가 있다. 여기에서는 화재가 상부층으로 확산되는 화재의 크기 및 주변 가연물을 설정하고자 한다. 스펠드럴의 높이 및 발코니가 있는 경우 고려하여 화재 시뮬레이션에 반영한다.

설계화재 설정 방법은 다음과 같다.

- 1) 주화원의 설정(일반적으로 거실 또는 부엌, 안방에서 발생한 화재실험 등을 참고하여 화재시나리오에 맞는 화재크기를 선정한다.)
- 2) 주변 가연물의 배치(성기화재에서 언급한 화재하중 치환법을 이용하여 가연물 부피 산정 및 배치)
- 3) 창문의 파괴온도 결정

#### ① W.Mowrer의 실험에 의한 유리창 파괴온도

유리 (t=2.5 mm)	프레임	유리창 파괴 온도(°C)	노출시간(s)
Single	Wood	100-130°C	134
Double	Wood	150°C 이상	152
	Vinyl	200°C 이상	130

#### ② 일반유리, 반강화유리, 강화유리의 파괴온도

유리창의 종류	파괴온도(°C)
일반유리	57.7
반강화유리	144
강화유리	222

- 4) 외부 풍속의 결정
- 5) 스펠드럴 및 발코니 유무에 따른 화재시뮬레이션 적용
- 6) 화재실 유리창 열전대 측정을 통한 파괴시간 결정
- 7) 상부층 유리창 열전대 측정을 통한 파괴시간 결정

<sup>3)</sup>FDS(화재시뮬레이션)의 데이터를 활용하여 치환한 값이다.

8) 상부층 화염 화재성상 파악

5. 결 론

설계화재에 관한 외국의 기준 및 연구자에 의해 제시된 설계화재 크기와 화재성상을 통한 화재크기의 설정에 관한 내용을 살펴보았다. 이 내용을 정리 하면 다음과 같다.

1. 건축물 화재시뮬레이션에서 화재크기의 결정은 소규모 실험 데이터가 많이 이용되고 있으나, 이것은 개개 건축물의 형상 및 용도, 화재성상에 따라 다르게 나타난다. 따라서 건축물의 용도별 형상별로 화재성상을 파악하여 그것에 맞는 설계화재를 설정해야 한다고 사료된다.
2. 화재가 발생하더라도 화재실의 가연물이 적고, 인접실로의 연소확대가 발생되지 않는 공간 및 구획에 대해서는 실험 데이터를 이용하여 설계화재를 설정하는 것이 합리적이라고 사료된다.
3. 외국 기준 및 연구자에 의해 제시된 용도별 설계화재를 적용할 경우, 성기화재로 판단되는 공간 및 구획에 관하여 최대 화재크기 산정 및 화재성장속도를 판단하여 설계화재 곡선을 도출하는 것이 합리적이라고 판단된다.
4. 화재실의 가연물량에 대한 정량화된 데이터를 이용하여, 설계화재 곡선 및 시간을 설정할 경우, 보다 합리적인 설계화재가 결정된다고 사료된다.

앞으로의 연구과제는 성기화재의 경우, 실제 크기 공간에 대해서, 화재실험을 통한 설계화재 곡선을 설정하는 것과 건축물의 용도별 화재에 대하여 화재성

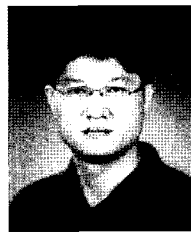
장속도에 관한 자료의 확보가 필요하다. 또한 아파트 발코니 화재의 경우, 상부층으로 확대되어 인명 및 재산피해를 야기할 수 있으므로 이에 대한 대책을 강구할 수 있도록 많은 연구가 필요할 것이다.

참고문헌

1. G. O. Hansell and H. P. Morgan, Design Approaches for Smoke Control in Atrium Buildings, Building Research Report, 1994
2. Roth Phylaktou, Smoke Movement and Toxicity, ERRI University of Leeds
3. Falls Church, International Building Code(section 909.9), 2000.
4. ISO/TR 13387-2, Fire Safety Engineering-part2 : Design Fire Scenarios and Fires, 1999
5. G.D. Lougheed, Considerations in the Design of Smoke Management System for Atrium, National Research Council Canada, 2000
6. John. H. Klote, Design Fires : What you Need to you, 2002. 9.
7. SP Swedish National Testing and Research Institute, Design Fires for Enclosures, 2003. 2.
8. Components for Smoke and Heat Control System-Part4 : Functional Rrecommendations and Calculation Methods for Smoke and Heat Exhaust Ventilation Systems, Employing Steady-state Design Fires-code of Practice, BS 7346-4:2003.
9. 日本建築センター, 建築物の 総合放火設計法, 第3巻 避難安全設計法, 1986.
10. 성능위주의 소방설계 기술기준, 함무라비, 2005.
11. 한국건설기술연구원, 강구조물의 내화성능 검증법 개발, 2004.



<저 자>  
김 동 익  
한국건자재시험연구원 안전·  
환경평가센터 연구원  
ican0815@kicm.re.kr



<저 자>  
김 상 철  
한국건자재시험연구원 안전·  
환경평가센터 센터장  
ican0815@kicm.re.kr