

아파트형 공장 구획 공간 화재시 Flash Over 예측과 Sprinkler RTI 작동특성

- Prediction of Flash Over and Characteristics Operation of Sprinkler RTI in Compartment Fire -

진 복 권*

Jin Bok Kweon

정 수 일**

Jung Soo Il

Abstract

In this paper, computer simulation was used for researching into the estimate of flash over result from compartment fire and the characteristics operation of sprinkler RTI.

Computing simulation, we analyzed and verified the path of the flame in compartment fire and the adaptation of sprinkler system concerned with sprinkler RTI.

1. 서 론

Compartment Fire의 진행은 Flash Over 현상이 절대적인 영향을 미치는 것으로 연구되어 있다. 아파트형 공장 등 생산 현장내의 구획공간 화재의 연소 특성과 화세의 전파경로를 예측한다는 것은 공정안전 시스템 확보에 절대적 요인이라 할 수 있다.

문제는 건축물에 대한 Sprinkler설비 등 안전설비 설치 시 실대확대모형을 가지고서 Flash Over를 관찰하고 그 결과를 예측한다는 것은 비용이나 장소적인 면에서 다소 한계가 있다.

* 인천남부소방서 구조구급과

** 인하대학교 산업공학과

그러므로 Flash Over에 대한 관찰과 분석이 없이 건축물 방화설계에 있어 안전을 확보한다는 것은 중대한 오류를 초래하고 있는 것이다.

뿐만 아니라 아파트형 공장에 설치된 Sprinkler System 등 안전설비도 문제의 심각성이 있다. Sprinkler, 비상경보시설 등 방재안전설비를 설치만 하면 건축물의 화재 안전이 확보되어 있는 것으로 착각하고 있는 것이 우리나라의 소방시설과 안전관리의 현실태이다.

하지만 Sprinkler System 은 그 작동 운영에 여러 제약요인을 가지고 있으며 분명한 것은 시스템을 실제 작동하여 설비의 적응성 여부를 가늠하는데에는 건축물 사용에 따른 공간적, 시간적 제약요인이 있어 이 시스템이 설계조건과 온도에 작동하는지에 대한 실제 성능시험은 대부분의 건축물에 있어서 전무한 실정이다.

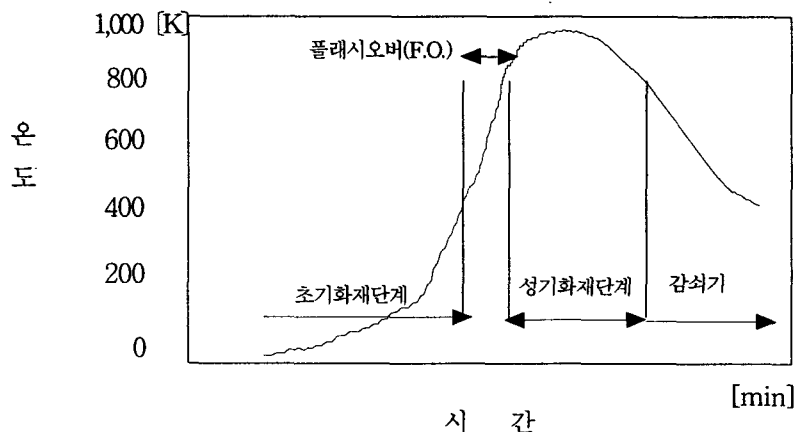
지난 2003. 2. 18. 09:55에 대구지하철 1호선 중앙로역에서 발생한 방화사고도 연기를 제어할 수 있는 제연설비가 있었지만 사고 공간에서는 전혀 작동치 않아 330여명의 사상자를 발생케 하였다는 사실은 전자의 분명한 증거일 것이다.

그러므로 본 연구에서는 Compartment Fire의 특성을 컴퓨터로 Simulation 하고 그 결과를 최근 실험에 의하여 증명된 실험식을 활용하여 분석 평가함으로써 아파트형 생산시설에 대한 전실화재의 예측과 Sprinkler System 적응성 여부를 RTI(Response Time Index)와 관련하여 방화공학적 접근으로 검증함으로써 제조업 현장에서의 화재피해로 인한 안전성을 확보하고자 한다.

2. Compartment Fire의 특성과 RTI

2.1. Compartment Fire의 특성

구획공간내의 화재성상은 [그림2-1] 과 같이 진행되어 나가는 것이 일반적이다.

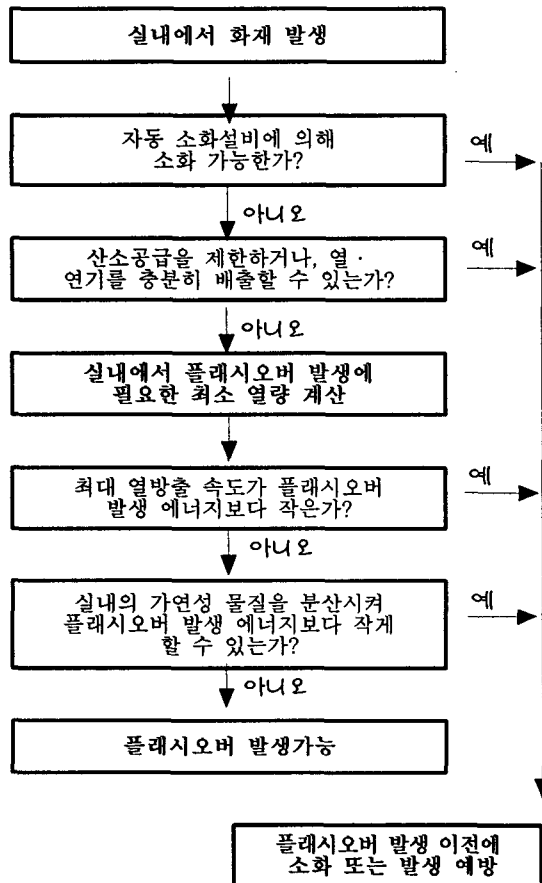


[그림 2-1] 실내화재 단계

일반적으로 Flash Over의 전개과정은 [그림2-2] 와 같으며 이는 NFPA555 (Guide on Methods for Evaluating Potential for Room Flashover)에 의한 플래시오버 발생가능성 평가방법에 관한 지침에 따른 것이다.

Flash Over 이후의 화재성상은 화재의 확산이 실 전체로 확산되어져 실내의 연소 가능한 모든 물질이 연소하게 되고 실내온도가 1,200℃이상 상승하게 되어 인명의 손실은 물론 건축물의 붕괴까지도 야기되어 진다.

그러므로 Flash Over에 대한 예측은 매우 중요하며 이에 대한 판단은 화실내의 천장류의 온도를 실험식을 사용하여 예측 가능하다.



[그림2-2] Flash Over전개방법

2.1.1. 연소시 발생열량

전체연소열량이 같은 물질이라도 단위시간당 발생하는 연소열량은 다르다. 시간변화에 따른 연소시 발생하는 열량은 다음과 같다.

$$Q = \dot{m} A \Delta H_c$$

Q : 열방출율[KW]
 \dot{m} : 질량연소흐름[g/m²-s]
 A : 연소면적[m²]
 ΔH_c : 유효연소열[KJ/g]

화재와 관련된 가장 중요한 양은 에너지방출속도이며 이는 [KW]로 측정되는 화재의 힘이라

할 수 있고 \dot{Q} 로 나타낸다. 이는 다른 어떤 요소들보다 화재의 크기와 손상에 대한 잠재력을 나타낸다. 전체적인 화재성장과 플래쉬 오버의 잠재력도 에너지방출속도 \dot{Q} 와 관계된다. 연소시 발생열량에 대한 자료는 여러 문헌에서 제시되고 있으나 대표적으로 Quintiere의 실험식⁹⁾을 사용하는 것이 일반적이다.

2.1.2. Flash Over에 필요한 연소속도

$$m = k \cdot A_o \sqrt{H} \quad [\text{kg/s}]$$

A_o : 환기개구부의 면적
 H : 개구부의 높이
 k : 상수

2.1.3. Compartment Fires에서의 연기층 온도

Mc Caffrey는 100회 이상의 화재실험으로부터 얻어진 데이터에 의해 아래와 같은 상호관계를 정립하였다.

$$\Delta T = 480 \left[\frac{\dot{Q}_c}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot \sqrt{g} \cdot A_o \cdot \sqrt{H_o}} \right]^{2/3} \left[\frac{h_k \cdot A_T}{\rho_a \cdot c_p \cdot \sqrt{g} \cdot \sqrt{H_o}} \right]^{-1/3}$$

아래와 같은 화실주위의 대기조건값을 대입하면 Mc Caffrey 근사식이 유도되어진다.

$$\Delta T = 6.85 \left[\frac{\dot{Q}_c^2}{h_k \cdot A_T \cdot A_o \sqrt{H_o}} \right]^{1/3}$$

$g = 9.8 \text{m/sec}^2$
 $c_p = 1.05 \text{kJ/kg} \cdot \text{k}$
 $\rho_a = 1.2 \text{kg/m}^3$
 $T_a = 295 \text{k}$

2.1.4. Flash Over가 되기 위한 화재크기의 조건

$$\dot{Q}_{F_o} = 624 [(h_k \cdot A_T) (A_o \sqrt{H_o})]^{1/2} = 620 [(h_k \cdot A_T) (A_o \sqrt{H_o})]^{1/2}$$

\dot{Q}_{F_o} : 천장아래의 500℃의 더운층을 만드는데 필요한 열방출을
 - 상수값의 차이는 공기의 비열값 차이 때문임

2.2. RTI (Response Time Index)

화염으로부터의 상승기류와 Sprinkler 열감지부 사이의 열교환은 아래식으로 나타내어진다.

$Q = at^2$ $Q : [kw]$ $a : [kw/sec^2]$ $t : [sec]$	화재성장속도	a 값의 범위
	Fast Fire	$a > 0.0444$
	Medium Fire	$0.062 < a < 0.0444$
	Slow Fire	$0.0027 < a < 0.0062$

그러므로 Flash Over에 대한 관찰과 분석이 없이 건축물 방화설계에 있어 안전을 확보한다는 것은 중대한 오류를 초래하고 있는 것이다.

$$mc \cdot dT_e/dt = hA(T_g - T_e) + qr - C'(T_e - T_o)$$

일반적으로 화재발생시 열감지부에서의 열전달은 상승기류와 대류열전달이 전도나 복사열 전달에 비해 훨씬 크므로 상기식은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$dT_e/dt = 1/\tau(T_g - T_e)$$

$$\tau = m \cdot c/hA$$

- m : 열감지부 질량
- c : 열감지부 비열
- T_e : 열감지부 온도
- t : 시간
- h : 대류열전달계수
- A : 열감지부 표면적
- T_g : 상승기류의 온도
- qr : 복사열 전달량
- C' : 스프링클러의 전도열전달계수
- T_o : 주위온도

“τ”는 시간의 단위를 가지므로 “시간상수” 또는 “시상수”라 한다.

스프링클러설비 열감지기부의 열전달은 성격상 강제대류 열전달과 매우 유사하여 대류열전달계수 h는 아래와 같이 표현된다.

$$h = B(k/\sqrt{\nu})(\sqrt{U/L})$$

- B : 열감지부에 따른 상수
- k : 상승기류의 열전도도
- U : 상승기류의 속도
- ν : 상승기류의 동점성도
- L : 열감지부의 특성길이

실제 k 와 ν는 온도에 따라 변하지만 공기에 있어서 $k/\sqrt{\nu}$ 는 온도에 관계없이 거의 일정하므로 열감지부에서의 h는

$$h \propto \sqrt{U}$$

이며 따라서

$$RTI \text{ (상수)} = \sqrt{U} / h = \tau \sqrt{U}$$

$$dT_e/dt = \frac{\sqrt{U}}{RTI} (T_g - T_e) \quad \begin{array}{l} T_g : \text{상승기류의 온도} \\ T_e : \text{열감지부의 온도} \\ U : \text{상승기류의 온도} \end{array}$$

로 표시될 수 있으며 이 상수를 스프링클러의 반응시간지수라 부르며 스프링클러가 열전달에 따라 얼마나 빨리 개방온도에 도달하는가를 재는 척도가 된다. 이는 다시

로 표시할 수 있으며 시간에 대한 T_g 와 U 의 변화를 알면 RTI가 정해진 스프링클러의 개방시간을 계산 할 수 있다.

RTI 는 원칙적으로 상승기류의 속도 및 온도에 무관하게 정하여 지는 스프링클러 열감지부의 물성치로서 실험에 의해 그 값을 측정한다. ISO 6128-1(스프링클러의 감도 에 따른 분류 ; 1993)에 의하면 일반적인 RTI 값은 다음과 같다.

- Standard response sprinklers : 81초과 350 [m · s]^{1/2} 이하
- Special response sprinklers : 51초과 80 [m · s]^{1/2} 이하
- Fast response sprinklers : 50 [m · s]^{1/2} 이하

2.3. 성능 평가 기준

본 연구에서 사용한 성능평가기준은 아래 연구소등에서 제시한 기준을 사용하였다.

가. SFPE Engineering Guide to PBFP Analysis and Design of Buildings. p.39, (2002)

나. NIST's Fire Experiment Results, Three Panel Workstation.

- (1) Minimum Visibility : [7m]
- (2) Max Co Concentration : [8000ppm]
- (3) Smoke Layer : [1.5m]
- (4) Upper Layer Temperature : [200℃]
- (5) Max. Heat Flux : [5kw · m²]
- (6) Max. Evacuation Time : [5mins]

3. Fire scenario

목적에 따른 성능기준이 설정되고 나면 화재분석의 초점은 이 기준과 비교하기 위한 결과값을 도출하기 위한 과정으로 진행되어야 한다. 시나리오는 이러한 조건을 충족시키기 위한 중간과정이며 만일 시나리오가 잘못 설정되어 있다면 결과자체가 만족스럽지 못할 것이다. 시나리오에 있어서 가장 중요한 요인은 실현 가능하여야 한다. 실현 가능한 시나리오를 작성하기 위해서는 많은 요소들을 고려하여야 한다.

화재 시나리오 내용에는 화재의 속성과 건물특성, 그리고 거주인원의 속성들을 감안하여야 한다. 시나리오 구성에 있어서 세부특성에 대한 고려사항은 아래(표3-1)와 같다.

(표3-1) 화재 시나리오 설계시 세부고려사항

화재 특성	건물 특성	거주 인원
- 점화원	- 건축특성	- 거주밀도
- 화재성장속성	- 구조적요인	- 피난로의 다원성
- 플래쉬 오버	- 소방시설	- 거주상태(취침, 일상생활)
- 화재최성기	- 건축물 운영 및 관리	- 용도(정신병원, 수용소 등)
- 화재소멸	- 운영특성	- 신체적, 정신적 능력
	- 환경적 요소	- 역할
	- 소방서 대응특성	- 친숙도

3.1. Fire scenario의 구성

공장동내 작업대 (Three Panel Workstation)에서 화재가 발생하여 인근 공구보관함으로 연소를 가정

가. Three Panel Workstation의 연소로 인한 공간내 공구함 등 집기류 연소가능여부와 시점판단

나. 공장동 내부로의 Flash Over 예측

다. 스프링클러설비 작동과 RTI의 상관성 등

을 변별코자 하였으며 구획공간의 크기, 재질, 화재특성곡선, 각 재료별 HRR, PR등의 설정값과 화재전파 시나리오는 다음과 같다.

3.1.1. 건축물의 구조와 재질

아파트에 공장 내부구조물에 대한 크기,구조,재질등 입력사항을 아래(표3-2)에 나타내었다. **Compartment 1** 은 발화층을, **Compartment 2** 는 발화층과 함께 있는 복도를 의미한다.

(표3-2) 건축물의 구조와 재질

구 분	Compartment 1	Compartment 2
가 정	발 화 층	연소대상공간
Depth(m)	3.00	40.00
Width(m)	5.00	1.80
Interior Height(m)	3.00	3.00
Elevation	0	0
Ceiling	Gypsum	Gypsum
Floor	Concrete	Concrete
Walls	Gypsum	Gypsum

3.1.2. 가연물 및 대상물의 설정

가연물 및 대상물의 위치는 출화실에서 좌표값으로 설정하며 대상물의 위치는 점화원으로부터 가장 가까운 부분을 기준으로 한다.

(표3-3) 메인화재 설정 값

입 력 내 용	설 정 값		
구 분	발 화 원		
품 명	Three Panel workstation		
Position(X, Y, Z)	2.20	2.50	0.00
Lower Oxygen Limit	10%		
Heat of Combustion	29700		
Initial Fuel Temperature	293.5k(21℃)		
Gaseous Ignition Temp	718		
Radiative Fraction	0.3		

3.1.3. 화재성장 곡선

이 실험자료는 미국국립표준기술협회(NIST)의 빌딩과 화재시험연구소에서 1991에 시험한 자료이며 시간은 점화로부터 초단위로 실험한 결과를 Killowatts 단위로 나타내었다.

(표3-4) 시간변화에 따른 화재의 크기

Time	Workstation		공구함	
	HRR(kw)	PR(kg/sec)	HRR(kw)	PR(kg/sec)
0	30	0.0010	0	0
50	190	0.00639	500	0.0314
100	220	0.00740	1300	0.08164
180	260	0.00875	5300	0.33284
240	110	0.00370	500	0.03768
300	150	0.00505	250	0.0157
1800	370	0.01245	50	0.0314

※ 자료출처 : NIST's Fire Data BFRL Report

4. 결과분석

가. 화재 시뮬레이션 소프트웨어 소개

화재를 모델링하는 방법에는 크게 나누어 두가지 방법이 있다. 그 중 하나는 Zone Fire Modeling이고 다른 하나는 Field Modeling이다. Zone Fire Modeling은 실내의 단면도를 통해서 화재성상을 예측하는 것이고 Field Modeling의 경우는 3차원 공간에서 화재 성상을 예측하는 것이다. 본 시뮬레이션 작업에 사용된 소프트웨어는 Zone Fire Modeling에서 사용되는 CFAST316(개발기관 : National Institute of Standards and Technology)을 사용하여 분석하였다.

나. 시뮬레이션 모델 화재실험 자료

본 시뮬레이션 연구에 사용된 실험자료는 미연방표준기술연구소(NIST)에서 실험하여 제공한 "Three Panel Workstation의 자료값"으로 아파트형 공장내에 화재가 발생하여 주변 가연물로의 연소로 인한 공장동내 화염확산여부와 Sprinkler 작동특성을 RTI와 관련하여 그 적용성여부를 시뮬레이션하였다.

4.1. Flash Over 예측

일반적으로 ISO3261의 조건에 의하면 Flash Over 발현시 평균온도는 1000F(537.7°C), 바닥면의 복사 수열량은 20kW/m², 산소농도 10%, CO₂/CO 비율이 150에 이르고 있다고 정의하고 있다. 전장에서 Fire Scenario를 가지고 시뮬레이션 결과⁴⁾를 분석하여 보면 (표 4-1)과 같다.

(표 4-1)

Main Fire Size

구분 시간	Main Fire				RTI 50				RTI 260			
	Upper Temp	Lower Temp	Fire Size	Ambient Target	Upper Temp	Lower Temp	Fire Size	Ambient Target	Upper Temp	Lower Temp	Fire Size	Ambient Target
	(K)	(K)	(W)	(W/m ²)	(K)	(K)	(W)	(W/m ²)	(K)	(K)	(W)	(W/m ²)
0	293	293	3.00E+4	12.8	293	293	3.0E+04	12.8	293	293	3.00E+04	12.8
20	322	293	8.33E+4	77.1	322	293	8.33E+04	77.1	322	293	8.33E+04	77.1
380	561	304	9.063E+05	2.7E+03	353	295	7.26E+04	229	373	296	1.07E+05	328
480	805	347	2.79E+06	2.7E+33	342	295	5.50E+04	194	358	296	8.16E+04	277
560	1280	559	5.85E+06	1.016	335	295	4.40E+04	172	248	296	6.53E+04	244
1000	608	335	8.39+05	9.797000	312	295	1.29E+04	98.2	318	296	1.92E+04	136
2040	487	321	3.99E+07	3.369E+3	298	294	719	40.6	299	295	1.06E+03	54

4.1.1. Flash Over의 발생

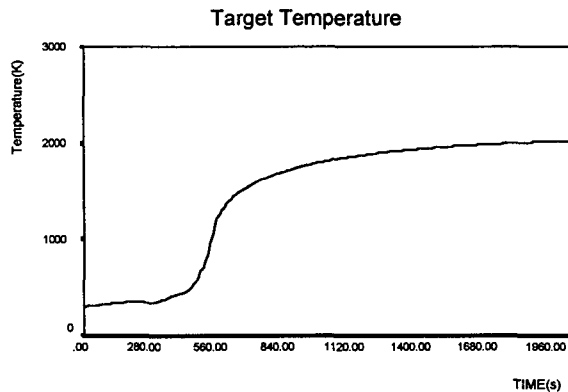
위(표 4-1)에 의하면 380초에서 480초 사이에서 Flash Over를 예측할 수 있으며 본 시뮬레이션에 의하면 488.7 S에 발생함을 보여주고 있다. 이때의 화실의 조건은 아래와 같다.

Upper Layer Temp(K)	Lower Layer Temp(K)	Layer H(m)	O ₂	CO ₂	CO
874.1	363	0.47	0.15	0.08	0.0

4.2. 공구함등으로의 화염전파분석

공구함의 재질이 Wardrobe로서 Pyrolysis Temperature가 685(K)이므로 Main Fire 발생으로 목적대상물 주변온도가 이에 이르는지를 살펴보면 된다.

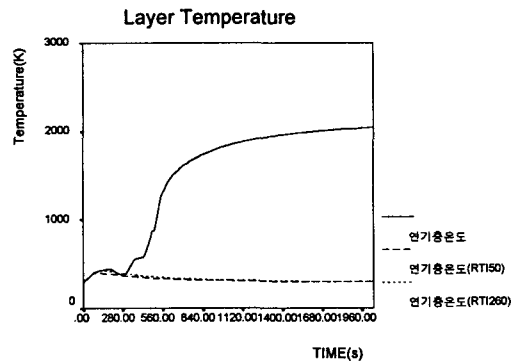
우측(그림4-1) 살펴보면 440초 이후에 Three panel Workstation에서 발생한 화염으로 20cm이격하여 있는 공구함으로 화재가 전파됨을 알 수 있다.



(그림4-1)

연기감지기는 화재발생후 35.7초에 감지하고 있으며 RTI 260 S/P Head의 경우 그 개방시간이 121.4초로 RTI 50보다 66초나 늦게 헤드가 작동됨을 나타내고 있어 그 민감도에서 2.2배 정도의 차이를 나타내고 있다.

양쪽 모두 본 실험에서는 Flash Over (488.7s)전에 헤드를 개방하고 있어 스프링클러설치시Flash Over의 발생을 예방할 수 있음을 나타내고 있다.



(그림4-2)

4.3. 스프링클러 설비 작동과 RTI 상관성

화염확산으로 인한 스프링클러헤드 개방시간 예측과 RTI가 스프링클러 개방에 주는 민감도 분석은 아래와 같다.

(표 4-2) 스프링클러개방과 RTI 민감도 분석

구분	Main Fire	RTI 260	RTI 50
연기감지기 작동	35.7s	35.7s	35.7s
S/P Head 개방	.	121.4s	55.7s

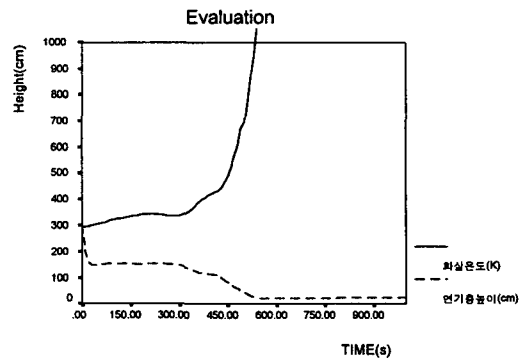
4.4. 피난설계평가

4. 4. 1. 소화설비 설치전

화재실의 온도는 60초후에 384(K)를, 연기층의 높이는 300초 후에 1.5(m)를 나타내고 있어 체류가능시간>대피가능 시간의 조건을 나타내어 240초의 피난여유시간을 보여주고 있다.

4. 4. 2. 소화설비 설치후

스프링클러설비설치시는 화재공간내의 온도와연기층의 높이 모두 조건에 만족하여 안정감을 보여주고 있다.



(그림4-3)

5. 결 론

구획공간 화재의 경우 실제화재모형으로 Flash Over를 예측한다는 것은 현실적 제약요인이 많은 것으로 사료된다. 그러므로 화염확산 현상을 방화공학적으로 접근하여 이를 해석하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 검증은 시스템에 대한 신뢰성을 제공할 뿐 아니라 건축물에 대한 인명안전확보를 위하여 매우 바람직한 방법이라 할 수 있다. 열방출률등 각종 재료의 실험데이터와 실험식등을 가지고 시뮬레이션 하여본 결과 이번 연구에서 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) Flash Over의 발생가능성 : 발화후 488.7초후 발생
- (2) 20cm 이격된 주변가연물로의 인화여부 : 화재발생후 440초후 인화됨
- (3) Sprinkler 작동과 RTI 상관성 : RTI 값이 작을수록 조기에 개방됨을 알수 있다. 본 실험에서는 RTI 50의 경우 RTI 260보다 66초정도 앞서서 시스템을 작동시키고 있다.

(4) 피난평가 : 체류가능시간이 대피가능시간보다 여유가있어 타당성이 있으며 Sprinkler 설비등 소화설비 설치시는 Flash Over의 발생방지는 물론 인명대피에 확실한 보장을하여 주고 있는것으로 분석되어진다. 그러나 프로그램 자체가 지니고 있는 한계, 각종 재료의 실험 Data 부족등으로 실제와는 다소의 차이가 있으나 건축물 설계시 설치되어야 할 전 시스템에 대한 적용성 검증은 앞으로 반드시 선행되어야 할 것이다.

6. 참 고 문 헌

- [1] 김운형, 건물화재개론, 도서출판의제, 1998.
- [2] 김원주, Room Fire Modelling for Performance Based Fire Protection Design, 오름시스템 (주), 1999.
- [3] 김동일, "성능위주의 방화설계와 플래쉬 오버", 소방기술자료집 제 5권, PP.16-17, 2002.
- [4] (주)RMS, 제1회 성능위주의 소방설계 및 화재 시뮬레이션 전문가 과정 매뉴얼, 2002.
- [5] 이창욱, Fire Protection Engineering, 도서출판 의제, 2000.
- [6] 전국소방인연합회, 소방전문교육강좌 A 물소화설비편, PP.16-36, 1999.
- [7] Arthur cote, P.E and Percy Bugbee, Principle of Fire Protection, NFPA, 1993.
- [8] Delbert F. Boring, P.E. and James C. spence, P.E. and Water G. Well, P.E. , Fire Protection Througe Modern Building Codes, AISI, Wasington D.C. 1981.
- [9] James G. Quintiere, "principles of fire Behavior", pre-publication copy courtesy of Delmar Publishers, 1999.
- [10] Richaed D. Peacock, Paul A. Reneke, "A User's Guide for FADT", NIST, 2002.
- [11] SFPA, "SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection Analysis and Design of Buildings," 2000.

저 자 소 개

진 복 권 : 소방기술사이고, 제4기 소방간부후보생으로 인하대학교 대학원에서 경영학 석사 및 동 대학원 산업공학과에서 박사과정 중이며, 현재는 인천남부소방서 구조과장으로 재직 중이다. 관심 분야는 안전공학, 방화공학, 시뮬레이션, PBD 등이다.

정 수 일 : 현재 인하대학교 산업공학과 교수로 재직중이고 서울대학교 화학공학과를 졸업, 동 대학교 대학원에서 공학석사, 미국 Univ. of Minnesota에서 공학석사, 홍익대학교에서 경영학박사를 취득하였다. 주요 연구 관심분야는 품질관리, 신뢰성공학 등이다.