

국내화재통계 및 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방화화재 특성에 관한 연구

최진* · 강경식**

*명지대학교 산업경영공학과 · **명지대학교 안전경영연구소

A Study on the Arson Fire Characteristics based on Domestic Fire Statistics and Computer Simulation

Jin Choi* · Kyung Sik Kang**

*Department of Industrial Engineering, Myoungji University

**Safety Management Laboratory, Myongji University

Abstract

With the development of the Korean economy, the number of arson fire has been radically increased and become a huge problem and issue in Korea Society for last several decades.

This study is to establish the fire life safety strategy regarding the arson fire through researching domestic fire statistics and performing the computer simulation based on fire scenarios with cutting edge techniques and methods for fire characteristics and fire dynamic. In addition, to design the fire life safety strategy depending on the arson fire pattern, the flow and characteristics of fire flames and smoke are analyzed by the computer modeling.

Keywords : Arson fire, Fire life safety strategy, Domestic fire statistics, Computer simulation

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

국내의 산업발전과 함께 산업구조의 대형화 및 건축물의 증가로 인하여 1980년대부터 화재발생건수가 급격하게 증가하기 시작하였고, 또한 전체화재발생건수 중 방화화재의 비율도 매년 증가하여 2003년부터는 10%를 상회하는 추세로서 경제성장과 함께 방화화재가 급속하게 증가하는 추이를 나타내고 있다.

특히, 2003년에 발생한 대구지하철 방화화재는 192명의 사망자와 148명의 부상자가 발생하는 대형 참사로서 우리 사회에 엄청난 피해를 가져다 주었으며, 국

민 모두에 대한 방화화재의 심각성 및 방재대책의 필요성을 재인식케 하였다.[1]

그러나, 단순한 사회적 관심만으로는 방화화재를 예방하기가 어려운 실정이므로 국내의 일부 학계 및 소방 관련기관에서 방화범죄에 대한 실태 및 방지대책, 정책방향 등에 대한 연구를 수행하고 있으나, 방화화재를 과학적으로 대처하기 위해서는 소방과학 및 선진 기술을 이용한 방재대책 연구가 필요한 실정이다.

또한, 고도의 경제성장을 이룩한 미국 및 영국, 일본 등 선진국의 경우에는 급격하게 증가하는 방화화재의 방지를 위하여 국가적 차원에서 전문기구를 운영하고 있으며, 방화화재와 관련된 과학기술을 국가소방정책에 활용하기 위하여 지속적인 연구를 수행하고 있다.

본 논문은 명지대학교 안전경영연구소 협력에 의해 이루어진 논문임.

† 교신저자: 최진, 서울특별시 강남구 도곡동 418-4 한방빌딩 4층 한방유비스

M · P: 011-9717-4111, E-mail: choijin4111@naver.com

2008년 1월 접수; 2008년 2월 수정본 접수; 2008년 2월 게재확정

이와 같이 선진국의 경제성장 및 방화화재 특성을 감안할 때 국내의 방화화재 발생비율은 급격한 경제성장과 함께 지속적인 증가를 예측할 수 있으므로, 방화화재로 인한 수많은 인명피해 및 재산손실을 사전에 방지하기 위해서는 과학기술을 이용한 방재대책에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

1.2 연구목적

본 연구에서는 경제성장과 함께 급격하게 증가하고 있는 방화화재 방재대책 수립을 위하여 화재통계자료를 조사하여 방화화재 실태를 분석하였으며, 화재특성 및 화재역학에 관한 선진기술자료를 조사하여 방화화재와 관련된 화재시나리오를 작성하였고, 화재 및 피난 시뮬레이션을 수행하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방화화재 특성을 연구하였다.

2. 방화화재 실태조사 및 분석

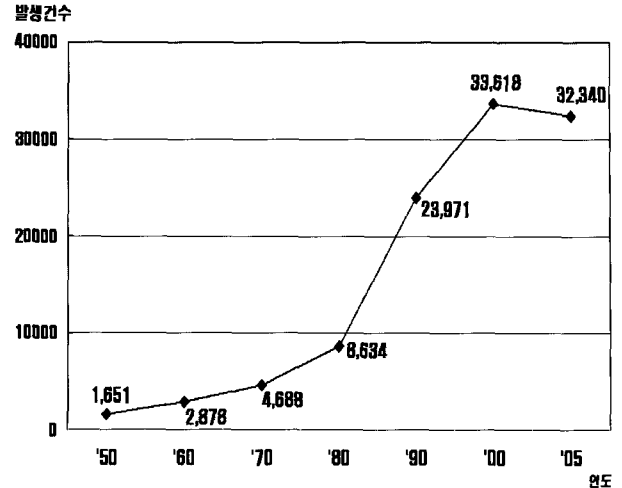
2.1 국내화재통계

국내의 화재통계 및 화재 관련자료는 일제시대인 1910년대 부터 그 기록을 찾아볼 수 있으나 관련자료가 종합적으로 정리되어 있지 않고, 일제시대의 남북한 종합통계와 해방기 및 6.25동란, 화폐단위의 변경 등에 따른 화재관련 자료가 미흡한 실정이나 장기적인 국내의 화재관련 자료를 분석하기 위하여 1950년대부터의 총 화재발생건수 및 방화화재건수 등을 조사하여 앞으로의 방재대책수립에 활용할 수 있도록 분석하였다.[2]

<표 1> 년대별 국내 화재발생 및 피해현황

구 분	화재발생건수(건)	인명피해(명)	재산피해(백만원)
1950년	1,651	428	300
1960년	2,878	567	721
1970년	4,688	1,058	6,047
1980년	8,634	1,246	16,010
1990년	23,971	2,002	97,729
2000년	33,618	2,420	152,679
2005년	32,340	2,342	171,374

국내에서의 총 화재발생건수는 <표 1> 과 같이 1950년에 1,650여건의 화재가 발생하였으며, 1970년부터 매년 증가하여 1990년에는 20,000건을 상회하였고 2000년대에는 매년 30,000건 이상의 화재로 인하여 많은 인명피해와 재산피해가 발생하고 있는 것으로 나타났다.



<그림 1> 년대별 국내 화재발생곡선

또한 우리나라 화재의 원인별 발생현황을 살펴보면 해방 전의 화재발생 주원인은 온돌 및 아궁이에서의 화재가 큰 비중을 차지하였으나, 해방 이후는 1930년대부터 발생하기 시작한 전기와 유류화재가 급증하는 경향을 보이면서 1970년대에는 전기가 연평균 화재건수의 20%, 유류가 19%를 차지하였고, 1980년대 이후부터는 전기가 점점 증가하여 매년 30%이상의 비율을 차지하면서 주요한 화재요인이 되었다.

<표 2> 년대별 국내 방화화재 발생현황

구 분	화재발생건수(건)	방화화재	
		발생건수(건)	발생비율(%)
1950년	1,651	49	3.0
1960년	2,878	100	3.4
1970년	4,688	160	3.4
1980년	8,634	539	6.2
1990년	23,971	2,083	8.7
2000년	33,618	2,911	8.7
2005년	32,340	3,326	10.3

방화화재의 경우에는 목조건물이 주종을 이루던 시대에도 5%이하를 유지하였으나 <표 2> 와 같이 경제가 발전되고 사회가 복잡화된 1980년대부터 방화화재가 증가하면서 1990년대는 연평균 8.7%를 차지하는 등 매년 방화화재가 증가하는 추세를 보이고 있다.

<표 3> 최근 10년간 국내 방화화재 발생현황

구 분	화재발생 건수(건)	방화화재	
		발생건수 (건)	발생비율 (%)
1997년	29,472	2,655	9.0
1998년	32,664	3,056	9.4
1999년	33,856	2,434	7.2
2000년	34,844	2,559	7.3
2001년	36,169	2,709	7.5
2002년	32,966	2,778	8.4
2003년	31,372	3,219	10.3
2004년	32,737	3,291	10.1
2005년	32,340	3,326	10.3
2006년	31,778	3,413	10.7

특히 최근 10년간 국내의 방화화재 발생현황을 살펴 보면 <표 3>과 같이 1997년 이후 매년 30,000건 이상의 화재가 발생하고 있으며, 2003년부터는 3,000건 이상의 방화화재가 발생하여 총 화재발생건수 의 10%를 상회하기 시작하여 선진국으로 힘차게 발돋움 하고 있는 우리나라도 방화화재의 지속적인 증가를 예측할 수 있어 이에 대한 방재대책의 수립이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

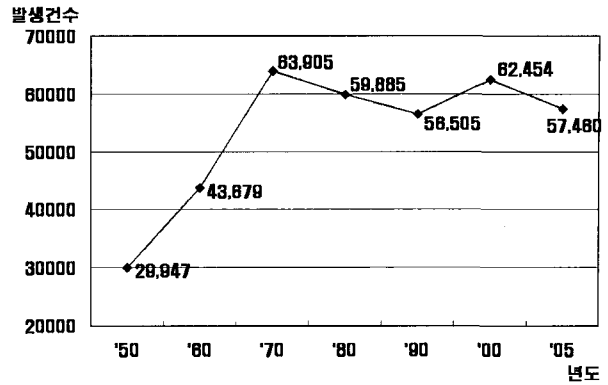
2.2 일본화재통계

일본에서의 총 화재발생건수는 <표 4>와 같이 1950년 경 30,000여건의 화재가 발생하여 1970년도 까지 매년 증가되어 1970년부터 약 30여 년 동안 매년 60,000여건의 화재가 발생하였으며, 1970년대부터 연간 화재 발생 증가율은 비교적 낮은 것으로 나타나고 있다. [3]

<표 4> 년대별 일본 화재발생현황

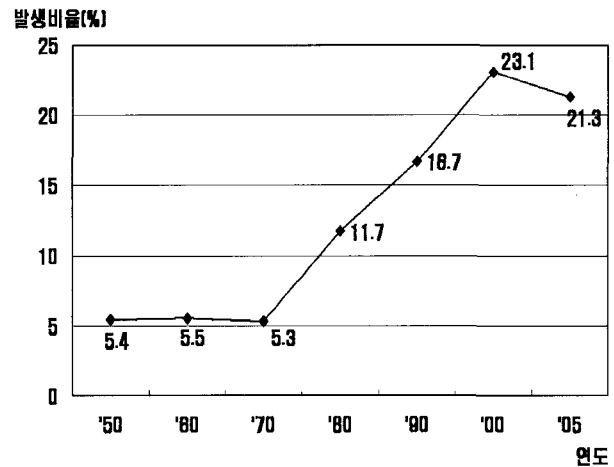
구 분	화재발생 건수(건)	방화화재	
		발생건수 (건)	발생비율 (%)
1950년	29,947	1,607	5.4
1960년	43,679	2,383	5.5
1970년	63,905	3,395	5.3
1980년	59,885	7,025	11.7
1990년	56,505	9,415	16.7
2000년	62,454	14,408	23.1
2005년	57,460	12,264	21.3

그러나 방화관련 화재발생건수는 매년 증가하여 1990년대부터는 매년 10,000여건을 상회하고 있으며, 최근에는 약 12,000여건 이상의 방화화재가 매년 발생하고 있어, 방화화재 발생건수는 매년 증가하고 있는 것으로 나타나고 있다. [4]



<그림 2> 일본 화재발생곡선

또한 총 화재발생건수 대비 방화관련 화재발생비율은 <그림 3>과 같이 1980년대부터 10%를 상회하고 있으며, 2000년대에는 약 23%의 방화관련 화재가 발생하여 방화관련 화재발생비율이 매년 증가하고 있는 추세를 보이고 있다.



<그림 3> 일본 방화화재 발생비율곡선

국내 및 일본 화재발생건수를 비교하여 보면 <표 5>와 같이 국내화재발생 건수가 매년 증가하여 2005년 현재 32,340건으로 국내화재의 급격한 상승을 예측할 수 있으며,

<표 5> 국내 및 일본 화재발생건수 비교

구 분	국내(건)	일본(건)	비율
1950년	1,651	29,947	18.1배
1960년	2,878	43,679	15.2배
1970년	4,688	63,905	13.6배
1980년	8,634	59,885	6.9배
1990년	23,971	56,505	2.4배
2000년	33,618	62,454	1.9배
2005년	32,340	57,460	1.8배

또한 국내 및 일본 방화화재 발생건수를 비교하여 보면 <표 6> 과 같이 국내화재발생 건수가 매년 급속히 증가하여 2005년 현재 3,326건으로 국내 방화화재의 급격한 증가를 예측할 수 있다.

<표 6> 국내 및 일본 방화화재 발생건수 비교

구분	국내(건)	일본(건)	비율
1950년	49	1,607	32.8배
1960년	100	2,383	23.8배
1970년	160	3,395	21.2배
1980년	539	7,025	13.0배
1990년	2,083	9,415	4.5배
2000년	2,911	14,408	4.9배
2005년	3,326	12,264	3.7배

특히 동경소방청 관내에서는 최근 수년간 연 2,500여건의 방화화재가 발생하여 총 화재 발생건수의 약 40%를 차지하고 있으며, 관내 화재발생 원인 중 방화화재가 1977년부터 약 30년간 계속 1위로 나타나고 있어 동경소방청은 물론 각 지자체 관련기관에서도 방화방지를 위한 방화관련기준 등을 정하여 방지대책을 수립하여 시행하고 있다. [5]

3. 방화화재 연소특성

우리 사회에 엄청난 피해를 가져다 주었던 2003년에 발생한 대구지하철 참사는 적은 양의 액체가연물이 대형 참사로 이어질 수 있다는 방화화재의 중요성을 재인식케 하였으며, 날로 증가하고 있는 방화화재를 과학적으로 대처하기 위해서는 방화화재의 특성에 따른 소방과학 및 선진기술을 이용한 방재대책의 정립이 필요한 실정이다. [6][7]

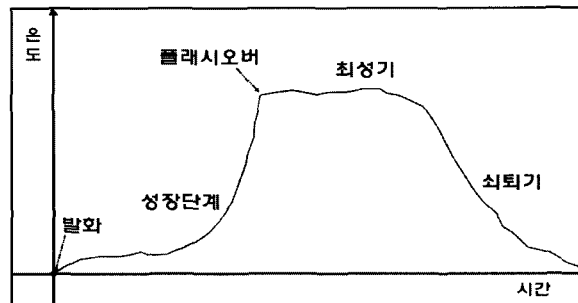
본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션 수행을 위한 시나리오 구성을 위하여 방화화재에서 사용되는 액체가연물의 연소특성과 일반가연물의 연소특성 등을 조사하였으며, 화재관련기준 및 선진기술자료를 이용하여 방화화재와 관련된 화재특성 및 화재역학 자료 등을 분석하였다.

3.1 구획실 화재 (Compartment Fire)

건축물 내의 밀폐된 공간에서 발생하는 화재를 의미하며, 일반적으로 건축물 내의 구획된 방 및 사무실 등을 의미하지만 선박, 항공기, 그리고 열차 등과 같은 운송 수단 내부의 공간을 의미하기도 한다.

이와 같은 실내 공간에서의 화재는 화재진행에 따른

온도변화에 따라 <그림 4>와 같이 발화 및 성장단계, 플래시오버, 최성기, 쇠퇴기단계 등 일반적으로 5단계로 분류되어 연구되고 있다. [8][9]



<그림 4> 구획실의 화재성장단계

3.1.1 발화단계

화재가 시작되는 단계로서 발화원에 따라 여러 가지 형태로 화재가 시작되며, 본 연구에서는 방화화재의 경우에 급속한 연소속도로 화재가 성장하는 액체가연물을 이용한 화재로 발화단계를 시작하여 화재특성을 분석하였다.

3.1.2 성장단계 (Developing Fire)

발화단계 이후 화재 초기에는 주로 가연물 자체의 함수로 성장하고, 구획실의 영향은 아주 적게 받거나 거의 받지 않는다. 이 때 화재는 에너지 및 연소 생성물의 발생율로 설명되고 있으며, 가연물 및 산소가 충분할 경우에 화재는 성장을 계속하면서 구획실 내의 온도를 상승시키게 된다.

3.1.3 플래시오버 (Flash Over)

플래시오버는 일반적으로 성장단계의 화재에서 최성기 화재로 전이되는 현상으로 정의되며, 이 때 구획실 내의 모든 가연성 품목이 화재에 접하는 순간이 된다.

이 과정에서 구획실 환경에 급속한 변화가 일어나며, 외형적으로는 폭발과 같은 속도로 불꽃이 일어나면서 구획실 전체로 연소가 확대된다.

관련 문헌에서는 구획실 내의 고온 가스에서 나오는 복사 에너지가 모든 가연성 물질을 발화시키는 온도를 기준으로 플래시오버가 발생하는 것으로 연구되어 왔으며, 실내의 가스온도가 500 ~ 600°C가 될 때 플래시오버가 일어나는 것으로 적용하고 있다.

3.1.4 최성기 화재

이 단계에서 화재의 열방출률은 최대에 이르며, 이 단계에서는 구획실 내의 가용 산소가 감당할 수 있는

양보다 더 많은 가연물이 열분해 되는 경우가 빈번하다. 구획실내에 개구부가 존재할 경우 연소되지 않은 가연물은 가스 유동형태로 구획실을 빠져나가 구획실 외부에서 연소하게 되며, 최성기 단계에서 구획실 내의 환경은 연소 물질의 열분해율에 현저한 영향을 미친다.

3.1.5 쇠퇴기 단계

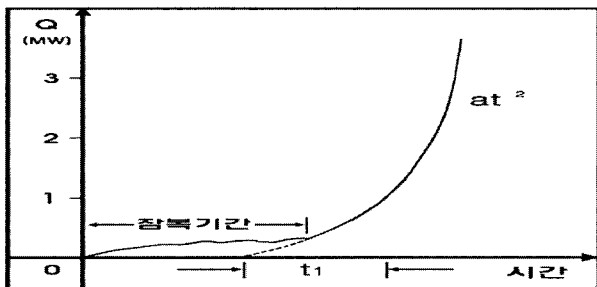
구획실 내의 연소가 가능한 가연물이 소모됨에 따라 연소가 쇠퇴하는 단계로서, 화재의 열방출률이 감소하면서 연소가 서서히 중단되는 단계이다.

3.2 가연물의 연소특성

3.2.1 화재성장속도

가연물의 화재성장속도는 연소과정 또는 화염확산과 관계되는 전체 연소면적에 노출되는 가연물의 종류와 질량, 노출상태 등에 따라 달라질 수 있으며, 고체 가연물 보다 액체 가연물의 화재성장속도가 빠르다는 것을 예측할 수는 있으나 정량적으로 모든 가연물의 화재성장속도를 일정하게 규정하는 것은 매우 어려운 것으로 판단된다. [11]

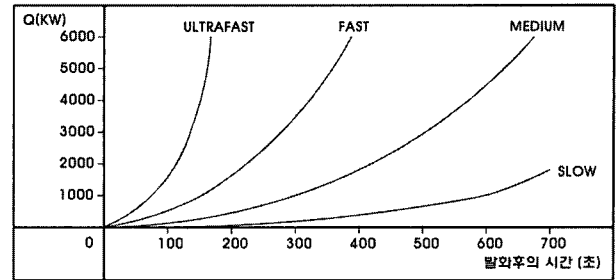
이와같은 가연물의 화재성장속도를 표준화하여 화재 역학 분야에 적용할 수 있도록 많은 가연물의 종류와 질량, 노출상태 등에 따른 실험과 연구가 진행되었다.



<그림 5> 화재의 성장곡선 예시

상기 <그림 5>와 같이 일반 가연물의 화재 시 열방출을 1MW 크기로 화재가 성장하는 시간(t1)은 실험적으로 시간(t)의 제곱에 비례하는 것으로 나타났다.

미국 NFPA에서는 화재 시 열방출을 1MW 크기의 성장시간을 기준으로 화재크기를 Slow(600초), Medium (300초), Fast(150초), Ultrafast(75초)의 네가지로 분류하고 있으며, 여기서 'a' 는 가연물의 종류에 따른 상수로서 가연물의 종류 및 노출상태 등에 따라 가연물이 연소하는 속도가 크게 달라지게 되므로 화재성장속도를 <그림 6>과 같이 분류하여 화재역학 분야 연구에 적용하고 있다. [12]

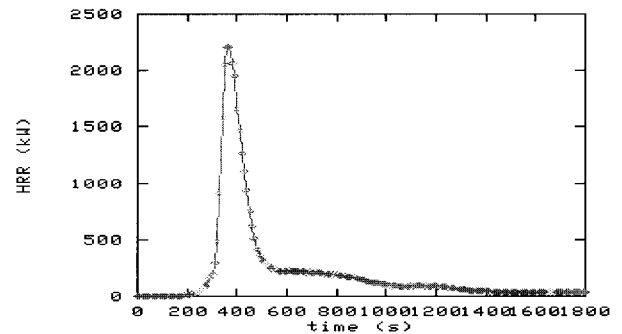


<그림 6> 화재성장속도

3.2.2 일반 가연물

방호구역에 설치되는 가연물은 용도에 따라 크게 달라질 수 있으며, 일반 거실용도에 사용되는 가연물은 의자 및 책상 등의 가구류와 종이류, 의류, 실내장식물류 등으로 폭넓게 구분할 수 있다.

일반적으로 방호구역에 설치된 가연물의 종류와 질량, 노출상태 등에 따라 연소특성이 달라질 수 있으며, 액체 가연물과의 연소특성을 비교하기 위하여 팔걸이 의자 (Armchair)의 연소실험자료를 분석하였다. [13]



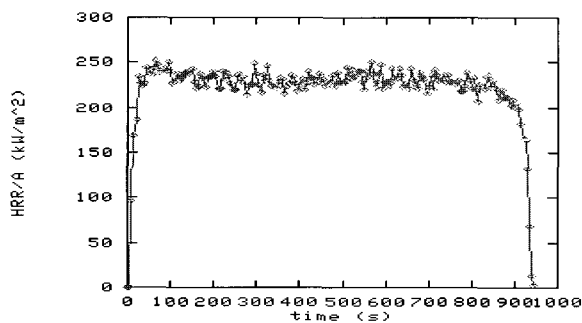
<그림 7> Armchair 연소실험자료 예시

상기 <그림 7>은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 팔걸이 의자 (Armchair)를 이용한 일반 가연물의 연소 실험자료로서 액체 가연물과는 달리 실험용 의자가 발화된 이후 약 300초(5분) 정도의 잠복기간을 거쳐 연소되는 특성을 나타냈으며, 실험용 의자의 종류 및 설치수량, 설치조건 등에 따라 연소조건은 달라질 수 있는 것으로 판단된다.

3.2.3 액체 가연물

대기압 상태에서의 액체 가연물 화재는 발화원에 의하여 연소가 시작되는 단계에서의 노출형태에 따라 Pool Fire 및 Spill Fire로 구분할 수 있으며, 이러한 액체 가연물은 가연성 액체를 사용하는 공장으로부터 인화성 가연물을 이용한 고의적 방화에 이르기까지 여러 가지 형태로 잠재적 화재위험요소가 되고 있다.

Pool 이란 특정 용기에 담겨 있거나 고여 있는 상태의 액체를 말하며, 액체 가연물이 유출되어 도랑과 같은 저부에 모일 경우 형성될 수 있으며, 탱크 및 용기에 가연물을 저장하는 정상적인 상태일수도 있다. 가연물 유출이란 일반적으로 구속되지 않은 상태를 의미하며, 가연물이 유출되면서 형성되는 얇은 가연물 층과 관련이 있다. Spill Fire의 성질은 유출원, 가연물이 유출되는 바닥재(콘크리트, 지면 등)의 표면 특성, 그리고 발화지점에 따라 높은 가변성을 갖고 있다.



<그림 8> Methanol 연소실험자료 예시

상기 <그림 8>은 미국 NIST에서 Methanol을 이용한 액체 가연물의 연소 실험자료로서 일반 가연물과는 달리 실험연료의 발화와 함께 잠복기간이 없이 급속한 화재성장속도로 연소되는 특성을 나타낸다. 그러므로 액체 가연물이 일반 가연물에 뿌려지는 일반적인 방화화재의 경우에 액체 가연물의 유출면적은 화재의 크기와 직결되어 있으며, 액체 가연물의 연소 시 발생하는 열에 의하여 일반 가연물도 급속하게 연소가 되는 것을 예측할 수 있다. [14]

4. 컴퓨터 시뮬레이션 수행 및 분석

구획실 화재 내에서 형성되는 온도를 계산하거나 예측하기 위해서는 해당 화재 현상에 대한 묘사, 즉 모델이 제시 되어야 하며 이 모델을 설명할 때는 여러 개의 물리적 방정식이 사용되고, 이 방정식을 풀면 구획실 내부의 온도를 예측할 수 있다. 천장 아래의 특정 지점에서 시작된 후 에너지와 연소생성물을 방출하는 화재를 생각해 보면 에너지 및 연소생성물이 방출되는 속도는 시간에 따라 변화하는 것을 예측할 수 있다.

고온의 연소생성물은 (연기)플룸을 형성하며, 이 플룸은 부력으로 인해 천장을 향해 상승한다. 이 플룸은 상승함에 따라 구획실 내부의 저온 공기를 빨아들이면서 온도가 하강하고 체적 유량은 중간한다. 이 플룸이 천장에 도달하면 넓게 퍼지면서 고온 가스 층을 형

성하고, 이 가스 층은 플룸의 가스가 계속 내부로 유입되면서 시간이 흐름에 따라 아래로 내려온다.

본 연구에서는 상기와 같은 연소특성을 이용하여 불특정 다수인이 많이 체류하고 평상 시 가연물이 많이 설치되어 있는 공연장과 판매장을 가상 실험공간으로 설정하여 컴퓨터를 이용한 화재 및 피난 시뮬레이션을 수행하였고, 가연물의 연소에 따른 특성을 동일조건으로 정량화하기 위하여 실험공간에 설치될 수 있는 스프링클러설비 및 제연설비 등의 작동은 고려하지 않았으며, 시나리오에 의한 일반화재와 방화화재로 분류하여 시뮬레이션을 수행하였다.

4.1 컴퓨터 시뮬레이션 분류

4.1.1 화재 시뮬레이션

화재를 모델링하는 방법은 Zone Modeling 과 Field Modeling 두 가지 방법이 있다. Zone Modeling은 실의 단면을 통해서 화재성상을 예측하는 것으로서 빠른 시간에 화재의 영향을 예측할 수 있는 장점이 있는 반면, 공간 전체의 화재성상에 대한 예측이 어렵다는 단점을 지닌다. 한편, Field Modeling의 경우에는 3차원 공간에서의 화재성상을 예측하는 기법으로 해석시간이 길다는 단점이 있으나, 전체 공간으로의 화재확산성상을 시각적으로 파악할 수 있는 장점을 가짐에 따라 활용도가 넓어지고 있는 방법이다. [15][16]

현재 국내에서 범용적으로 사용되고 있는 NIST의 FDS 와 CFAST 소프트웨어는 건물 내에 화재가 발생하는 경우에 가연물의 연소이론 및 고온의 화염, 연기로부터의 복사열전달 등을 포함하여 아래와 같은 4가지 이론을 중심으로 구성되었다.

특히, 구획실 화재 내의 온도를 계산하기 위해 사용되는 가장 중요한 기본 원리는 ‘식4’의 에너지 보존원리이며, 고온 상부층에 적용되는 에너지 보존원리는 “화재에 의해 고온 상부층에 가해지는 에너지는 고온 상부층이 잃어버리는 에너지에 고온 상부층 내부의 에너지 변화 속도를 더한 합과 같다”라고 표현할 수 있다. 고온 상부층 내부의 에너지 변화 속도로부터 해당 층의 온도를 계산할 수 있다. 에너지보존원리는 하부층에도 적용할 수 있다. 고온 상부층의 체적은 시간뿐 아니라 상부층을 들고 나는 질량 흐름에 따라 변화하므로, 에너지 보존원리와 함께 질량보존원리를 적용해야 한다. 화재에 의해 생성되는 에너지와 구획실 내부의 온도는 시간에 따라 변화하므로, 에너지보존원리를 적용하면 일련의 미분 방정식이 만들어진다. 에너지보존의 구성요소를 검토하기 위해 고온 상부층의

에너지보존에 대한 정상상태 표현식을 사용하게 된다.

◎ 내장재료의 질량에 따른 보존이론

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

◎ 내장재료의 종류에 따른 보존이론

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i u = \nabla \cdot (\rho D)_i \nabla Y_i + W_i'' \quad \dots\dots\dots (2)$$

◎ 운동량에 따른 보존이론

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right) + \nabla p = \rho g + f + \nabla \cdot \tau \quad \dots\dots\dots (3)$$

◎ 에너지 보존이론

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h u - \frac{Dh}{Dt} = q'' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i h_i (\rho D)_i \nabla Y_i \quad \dots\dots\dots (4)$$

화재에 의해 생성되는 에너지는 구획실 화재 내부의 온도에 가장 큰 영향을 미치며, 이에 대해서는 다양한 조건 하에서 여러 가지 가연물이 방출하는 열을 예측하기 위해 많은 연구가 수행된 바 있다. 이 항의 논의는 구획실 화재의 온도 상승에 가장 중요한 의미를 갖는 화염 연소에 초점을 맞추고 있다. [17]

전 세계적으로 사용되는 화재 시뮬레이션에는 여러 가지 소프트웨어가 사용되고 있으나, 본 연구에서는 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Field Modeling) 와 CFAST(Zone Fire Modeling) 소프트웨어를 사용하였으며, 공연장의 경우에는 Field Model 기법을 적용하였고 판매장의 경우에는 Zone Model 기법을 적용하여 화재특성을 분석하였다.

4.1.2 피난 시뮬레이션

피난 시뮬레이션의 경우에도 전 세계적으로 여러 가지 소프트웨어가 사용되고 있으나, 본 연구에서는 스코틀랜드의 IES사에서 개발한 SIMULEX 소프트웨어를 사용하였으며, 화재 시나리오에 의하여 재실자의 위치, 방향, 걷는 속도 및 피난로 등을 설정하여 피난 특성을 분석하였다.

4.2 화재 및 피난 시나리오 설정

일반화재와 방화화재의 특성을 분석하기 위해 가상의 공연장과 판매장을 대상으로 화재 시나리오를 구성하여 화재 및 피난 시뮬레이션을 수행하였다.

4.2.1 공연장 시나리오

공연장은 크기 16m×27m, 높이 10m 의 가상실험공간의 전면부분 객석의자에서 화재가 발생하는 경우의 화재특성에 따른 피난 안전성을 분석하였으며, 최대발열량이 2.4MW인 팔걸이 의자 (Armchair)에서의 일반화재와 액체가연물이 팔걸이 의자 1개에 뿌려지는 방화화재로 구분하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다.

바닥연소를 위하여 바닥에는 Carpet 재료가 설치되는 조건으로 선정하였고, 일반화재의 경우에는 화재성장속도를 Medium으로 적용하였다. 방화화재의 경우에는 초기 연소하는 의자 1개소에만 Ultrafast 의 성장속도를 적용하였고, 주위에 설치된 다른 의자는 일반화재와 같은 Medium으로 적용하였다.

재실자의 피난 안전성 분석을 위하여 고정좌석수를 375명으로 설정하였으며, 공연장 상하부분에 여러개의 출입구가 설치될 수 있으나 화재초기에 발생하는 연기에 의하여 상부의 출입구는 사용이 어려울 수가 있으므로 하부에 설치된 2개소의 출구만을 피난에 활용토록 하여 피난 시뮬레이션을 수행하였다.

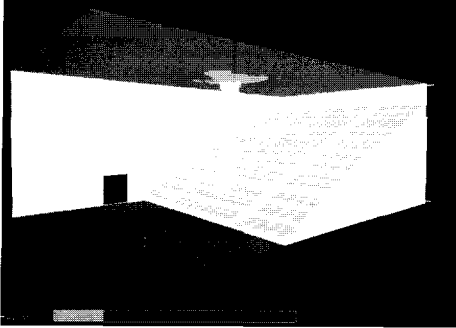
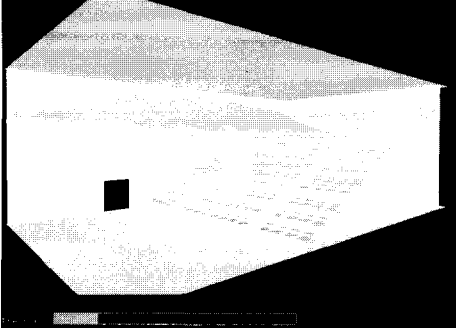
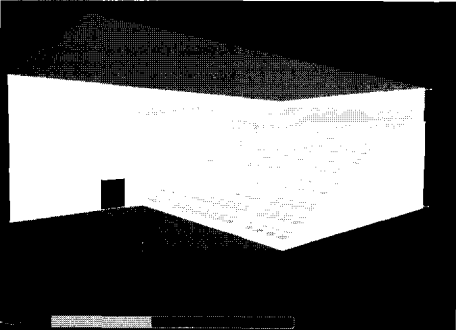
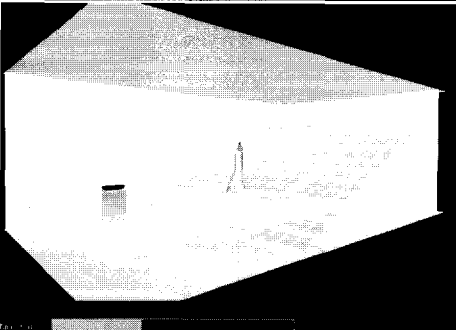
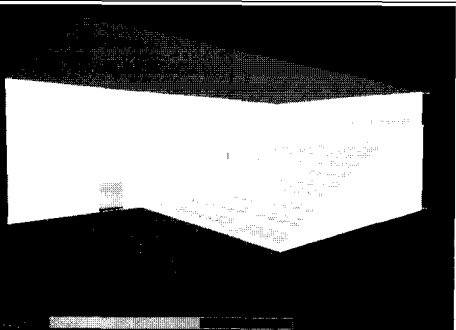
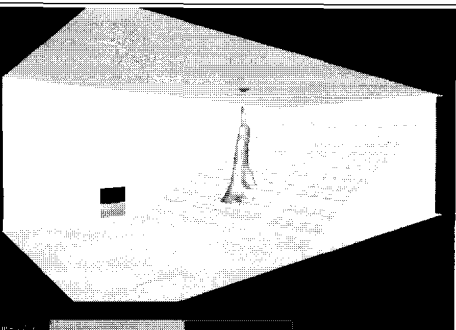
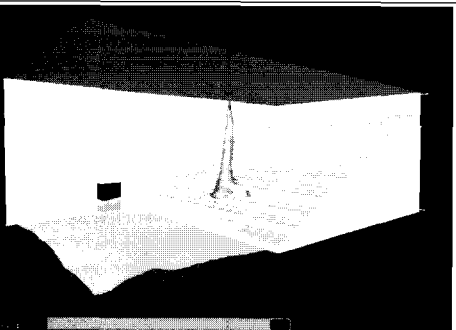
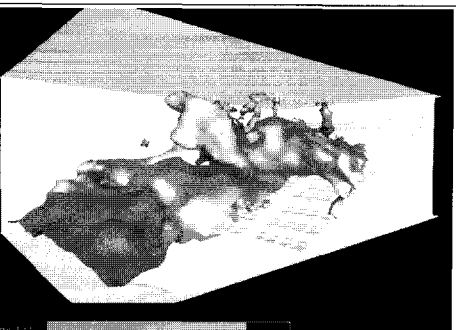
4.2.2 판매장 시나리오

판매장은 크기 9m×16m, 높이 4m 가상실험공간의 진열장에서 화재가 발생하는 경우의 화재특성에 따른 피난 안전성을 분석하였으며, 최대발열량이 10MW 인 단위매장에서의 일반화재와 액체가연물이 매장에 뿌려지는 방화화재로 구분하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 일반화재의 경우에는 NFPA Fire Technology에서 정하는 Retail Fire와 같이 화재성장속도를 Medium

으로 적용하였다.

재실자의 피난 안전성 분석을 위하여 NFPA Life Safety Code에서 정하는 기준으로 판매장의 재실자수

를 28명으로 설정하였으며, 2개의 출입문과 계단을 통하여 피난할 수 있도록 피난 시뮬레이션을 수행하였다.

	
발화 후 90초	발화 후 90초
	
발화 후 180초	발화 후 180초
	
발화 후 270초	발화 후 270초
	
발화 후 400초	발화 후 400초(Flash over 발생)
일반화재 시나리오	방화화재 시나리오

<그림 9> 시간대별 연기하강곡선 (FDS 화면자료)

4.3 피난 안전성 평가기준

화재 발생시 재실자가 연기의 영향을 받지 않고 안전하게 피난할 수 있는 시간을 허용피난시간이라고 하며, 바닥에서 높이 1.8m(호흡안전선)까지 연기가 도달하는 시간을 기준으로 허용피난시간을 산정하였다.

예상피난시간은 재실자의 화재 인지시간 및 피난개시시간, 건축물의 내부 구조 등에 따라 크게 달라질 수 있으므로, 시뮬레이션에 의하여 계산된 피난시간에 안전율(2.0)을 적용하여 허용피난시간과 비교하였다.

4.4 컴퓨터 시뮬레이션 수행

4.4.1 공연장 시뮬레이션 결과

가. 허용피난시간

공연장 내부 화재 시의 허용피난시간 산정을 위하여 가상실험공간의 공연장 전면부분 객석의자에서 화재가 발생하는 경우에 대한 화재 시뮬레이션을 실시하였다.

화재 시 발생하는 연기에 의하여 공연장 내부의 재실자가 영향을 받지 않고 안전하게 피난할 수 있는 허용피난시간 산정을 위해 <그림 9>와 같이 호흡안전선까지의 연기도달시간을 측정하고 일반화재의 경우에는 305초, 방화화재의 경우에는 186초로 나타났으며, 방화화재 시에는 발생하는 연기가 일반화재에 비하여 급속하게 하강하는 것으로 나타났다.

나. 예상피난시간

가상실험공간의 공연장 내에서의 화재 발생 시 재실자가 실제 피난하는 시간을 예측하기 위하여 피난 시뮬레이션을 실시한 결과 <표 7>과 같이 282초로 나타났다. 특히 일반화재의 경우에 허용피난시간이 예상피난시간 보다 23초 크게 나타나 피난에 필요한 여유시간이 있어 재실자가 안전하게 피난을 할 수 있으나, 방화화재의 경우에는 허용피난시간이 예상피난시간 보다 96초 적은 것으로 나타나 피난에 필요한 시간이 절대적으로 부족하므로 예상피난시간의 확보를 위해서는 피난로 증설 및 설비보완 등의 추가조치가 필요한 것으로 나타났다.

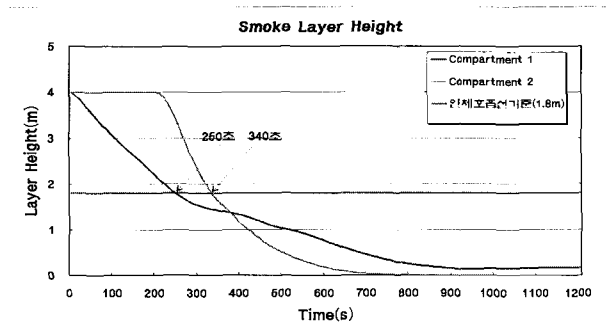
<표 7> 화재별 피난시간 분석표 (공연장)

구분	허용 피난시간	예상 피난시간	피난안전성
일반 화재	305초	282초	여유시간 : + 23초
방화 화재	186초	282초	부족시간 : - 96초

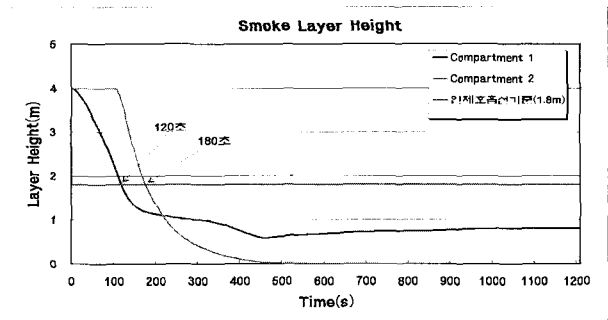
4.4.2 판매장 시뮬레이션 결과

가. 허용피난시간

판매장 내부 화재 시의 허용피난시간 산정을 위하여 가상실험공간의 진열장에서 화재가 발생하는 경우에 대한 화재 시뮬레이션을 실시하였다. 화재 시 발생하는 연기에 의하여 판매장 내부의 재실자가 영향을 받지 않고 안전하게 피난할 수 있는 허용피난시간 산정을 위해 <그림 10> 및 <그림 11>과 같이 호흡안전선까지의 연기도달시간을 측정하고 일반화재의 경우에는 340초, 방화화재의 경우에는 180초로 나타났으며, 판매장에서도 방화화재 시에는 화재 시 발생하는 연기가 급속하게 하강하는 것으로 나타났다.



<그림 10> 일반화재 연기하강 시간곡선



<그림 11> 방화화재 연기하강 시간곡선

나. 예상피난시간

가상실험공간의 판매장 내에서의 화재 발생 시 재실자가 실제 피난하는 시간을 예측하기 위하여 피난 시뮬레이션을 실시한 결과 <표 8>과 같이 264초로 나타났다.

<표 8> 화재별 피난시간 분석표 (판매장)

구분	허용 피난시간	예상 피난시간	피난안전성
일반 화재	340초	264초	여유시간 : + 76초
방화 화재	180초	264초	부족시간 : - 84초

특히 일반화재의 경우에 허용피난시간이 예상피난시간 보다 76초 크게 나타나 피난에 필요한 여유시간이 있어 재실자가 안전하게 피난을 할 수 있으나, 방화화재의 경우에는 허용피난시간이 예상피난시간 보다 84초 적은 것으로 나타나 피난에 필요한 시간이 절대적으로 부족하므로 예상피난시간의 확보를 위해서는 피난로 증설 및 설비보완 등의 추가조치가 필요한 것으로 나타났다.

5. 결론 및 향후 연구과제

화재통계자료 및 선진기술자료 조사, 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 방화화재의 특성을 검토한 결과 다음과 같은 특성이 도출되었다.

- (1) 국내 방화화재의 경우에 1980년대부터 매년 증가하는 추세로서 2006년에는 3,413건의 방화화재가 발생하여 총 화재발생건수 31,778건의 10%를 상회하기 시작하였으며, 우리나라도 방화화재에 대한 과학적인 방재대책의 수립이 절실히 요구되고 있다.
- (2) 방화화재의 경우에 액체 가연물의 유출면적은 화재의 크기와 직결되어 있으며, 액체 가연물의 연소 시 발생하는 열에 의하여 가연물이 급속하게 연소하는 것을 예측할 수 있다.
- (3) 화재 및 피난에 관한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과 일반화재의 경우에는 재실자가 안전하게 피난할 수 있는 것으로 나타났으나, 방화화재의 경우에는 예상피난시간이 부족하므로 예상피난시간의 확보를 위해서는 피난로 증설 및 설비보완 등의 추가조치가 필요한 것으로 나타났다.

향후 연구과제로 방화화재의 경우에는 많은 위험성을 내포하고 있으므로 본 연구과제를 통하여 도출된 특성을 기본으로 향후 실제 화재실험 등을 통하여 화재안전설계에 반영될 수 있도록 하여야 하겠다. 끝.

6. 참고 문헌

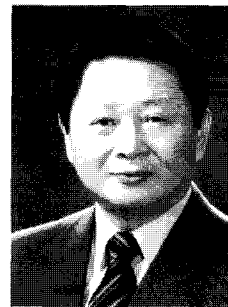
- [1] 소방방재청, 소방행정자료 및 통계, 2007.
- [2] 행정자치부, 화재통계연보, 2000년-2003년
- [3] 일본소방청, 소방백서, 2006.
- [4] 일본소방청, 방화화재방지대책, 2004
- [5] 동경소방청, 동경소방청의 방화화재대책, 2005
- [6] 최종태, 방화범죄의 특성과 예방에 관한 연구, 한국화재소방학회, 제15권 2호, 2001.
- [7] 정기성, 방화범죄의 실태와 대책방안, 한국화재 소

방학회 제19권 2호, 2005.

- [8] SFPE (Society of Fire Protection Engineers), Estimating Temperature in Compartment Fires, SFPE Handbook, 3rd CH3-6.
- [9] NFPA, Fire and Explosion Investigations, NFPA Code 921, CH.22, 2006.
- [10] NFPA, Smoke and Heat Venting, Nfpa 204, CH 8-3, 2006
- [11] Richard W. Bukowski, Fire Hazard Analysis, NFPA Handbook 9th, Section 3, CH.7
- [12] James G. Quintiere, Principles of Fire Behavior, CH. 6, pp101-127
- [13] NIST, Armchair Fire Test Data, File-f261, 1984
- [14] NIST, Methano I(Liquid) Fire Test Data, File-t6042, 1988
- [15] William D. Walton, Zone Computer Fire Models for Enclosures, SFPE handbook 3rd. CH. 3-7.
- [16] Geoff Cox and Suresh Kumar, Modeling Enclosure Fires Using CFD, SFPE handbook 3rd. CH 3-8
- [17] Kevin McGrattan, Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, NIST, CH 3

저자 소개

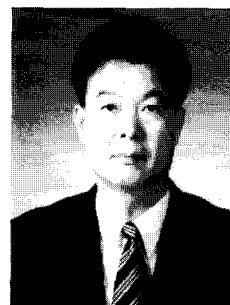
최진



한양대학교 학부 토목공학과를 졸업하고, 동 대학 공학대학원에서 건축공학 석사를 취득하였다. 현재 명지대학교 산업공학과 박사과정에 재학 중이며, 한국화재소방학회 회장과 한국소방기술사회 회장을 역임하였다. 현재 한방유비스(주) 대표이사로 재직 중이다.

주소 : 서울시 강남구 도곡동 418-4

강경식



현 명지대학교 산업공학과 교수, 명지대학교 안전경영연구소 소장, 명지대학교 산업대학원 원장, 대한안전경영과학회 회장, 경영학박사, 공학박사

주소: 경기도 성남시 분당구 정자1동 파크뷰 APT 611동 3103호