

컴퓨터 화재 시뮬레이션을 이용한 화재조사

Introduction to fire modeling for use in fire scene reconstruction

삼성화재 방재연구소 석 미 혜

Samsung Fire & Marine Insurance Co., Ltd. Mihye Seok

요 약

컴퓨터 화재 모델링은 1960년대부터 연구 개발되어 왔지만, 화재조사 및 감식 분야에서는 미국의 NIST : National Institute of Standards and Technology, NIST와 영국의 BRE : Building Research Establishment, BRE를 중심으로 약 10여년 전부터 적용되기 시작했다.

처음 화재 모델링이 개발되었을 때에는 화재 자체의 물리적인 특성을 설명하는 데에만 사용되어 그 활용분야가 제한적이었으나, 방화공학적 분석기법과 컴퓨터 기술의 발달로 요즘에는 화재현장을 재현하고 예측하는데 많이 사용되고 있으며 앞으로 더 많은 활용이 예상된다.

따라서 본 글에서는 화재모델링을 이용한 시뮬레이션이 무엇인지를 배우고, 화재 조사에 적용된 구체적인 사례를 살펴봄으로써 컴퓨터 화재 시뮬레이션을 이용한 화재 조사에 대한 이해를 높이고자 한다.

1. 모델이란 무엇인가?

1.1 용어의 정의

우선 구체적인 이론을 설명하기 전에 용어의 정의를 내려보자. 보통 "모델"이라는 단어와 "시뮬레이션"이라는 단어를 많이 혼용하여 사용하는데 두 단어의 의미에는 어떤 차이가 있을까?

모델이란 현실세계를 간단히 표현된 가상세계 (Simplified Virtual World)로서 수학적인 프리즘을 통해 실제세계 (Real World)를 예측하는 툴 (Tool)이 되며, 시뮬레이션이란 모의실험, 재현 또는 "모사하다"의 뜻이다.

따라서 화재시뮬레이션이라 하면, 선정된 화재 시나리오를 수학적 모델을 이용해서 재현해 내는 것이라고 정의할 수 있다.

1.2 어떠한 모델이 좋은 것일까?

좋은 모델은 사용된 수식의 질(Quality)이 높아 결과에 대한 신뢰도가 높으며, 모델에 입력할 자료를 찾는 데 어려움이 없어야 한다.

또한 앞서 언급한 바와같이 모델은 툴(Tool)이므로 안전하고 적합하게 사용해야 하는데, 여기서 안전하고 적합하게 사용한다는 의미는 사용자가 해당모델의 제한점을 잘 이해하고 있는 상태에서 사용을 해야 함을 의미하므로 수학적 인 모델뿐만 아니라 사용자의 모델에 대한 지식 습득의 여부도 좋은 모델을 평가하는데 영향을 준다.

2. 화재 모델의 종류

2.1 화재 모델의 개념

화재 모델의 개념의 이해를 위해서 간단한 것에서부터 복잡한 것의 순서로 예제와 함께 살펴 보자.

2.1.1 실험에 의해 도출된 결과(Curve fit data)

아래의 자료출처 : The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Third Edition, Table 2-15.22
그래프는 JP-8가 콘크리트 바닥으로 누출되어 화재가 발생할 때 누출유량에 따른 단위면적당 질량 손실율(Mass burning rate per unit area)을 측정 한 실험 자료이다.

만약 JP-8이 아래의 실험결과와 동일한 조건으로 누출되어 화재가 발생 되었다면, 굳이 재 실험을 하거나 시뮬레이션을 수행하지 않고도 아

래의 결과 값을 대입하여 적용할 수 있다.

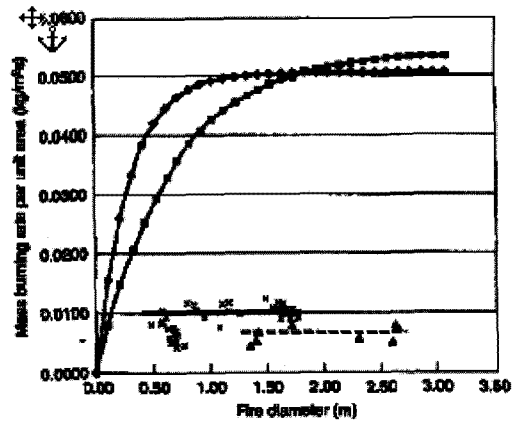


Figure 2-15.22. Mass burning rates for unconfined JP-8 spill fires on concrete²²: (x) denote 0.4- to 1.7-lpm, continuous spill fires with an average value (—) for diameters >1.5 m; (Δ) denote 1- to 5-l fluid-quantity spills with an average value (---) for diameters >1.5 m; the calculated pool fire burning rates per Equation 22 are shown for JP-8 (-x-) and JP-5 (-Δ-).

2.1.2 상관식

상관식이란 반복된 실험을 통해서 얻어진 변수간의 연관관계를 정의하여 수식으로 표현한 것으로 위의 JP-8의 실험을 통해서 Zabetakis와 Burgess는 연에 액체 누출시 형성되는 pool을 함수로 하여 단위 면적당 질량 손실율(Mass burning rate per unit area)을 산출하는 상관식을 정의했다.

본 상관식의 경우에는 가솔린과 같은 탄화수소계 연료에는 잘 맞으나 알콜류나 초저온 액화 연료 등에는 적용이 적합하지 않다.

$$m'' = m''_{\max} [1 - \exp(-k\beta D)] \quad (\text{kg/m}^2\text{s})$$

위의 상관식에서 m''_{\max} , k , β 는 모두 물질에 따른 특성값이며, D 에 의해면적당 질량 손실율이 결정된다. 따라서, 위의 식을 이용하면 D 를 변수로 바꾸어 가면서 단위면적당 질량손실율을 달리 적용하여 화재의 크기를 예측할 수 있다.

2.1.3 존 모델 (Zone model)

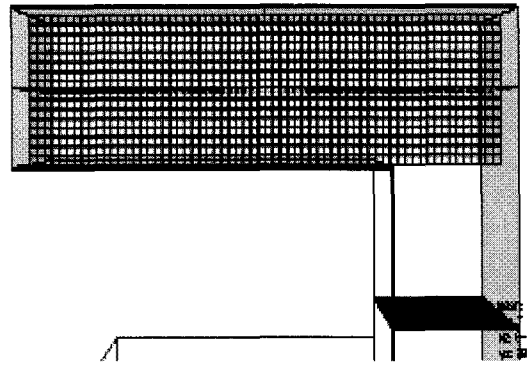
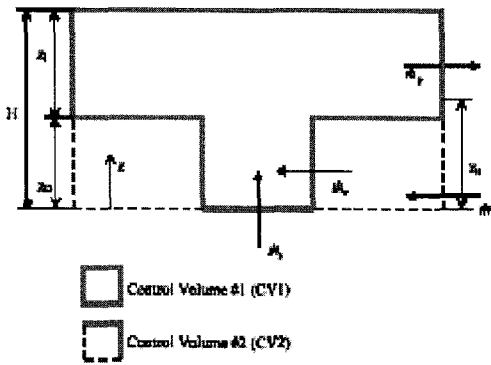
구획(Compartment)내에서 화재의 환경을 예측하는데 사용하는 모델로서, 이름에서 예시하는 바와 같이 화재실을 2개의 존으로 나누어서 결과를 산출한다.

여기서 2개의 존은 아래의 그림에서 보여주는 바와 같이 Control Volume1 (CV1)과 Control Volume2 (CV2)로 정의할 수 있으며, CV1은 화재를 포함하고 화재로 인해 생성된 뜨거운 열기로 이루어진

층이며, CV2는 바닥 주위의 차가운 공기층을 의미한다.

2.1.4 필드 모델 (Field model)

필드 모델은 풀이해야 할 계산영역(Computational domain)을 육각형의 셀(cell)로 나누어서 각각의 셀에 대해서 시간과 공간에 따른 물리적 변화값을 산출해 내는 모델이다.



〈Figure 2〉 존 모델(좌)과 필드모델(우)

2.2 화재 모델로 풀이할 수 있는 것들

화재 모델로는 풀이할 수 있는 대표적인 내용은 다음과 같다.

- Fire growth
- Smoke movement
- Smoke control system
- Detector / Sprinkler response
- Fire exposure to target
- Toxic gas concentration
- Temperature
- Visibility

- Suppression by sprinkler system etc.

2.3 대표적인 컴퓨터 모델링 프로그램

미국의 표준기술국(NIST, <http://www.bfrl.nist.gov>)에서는 많은 종류의 컴퓨터 모델링 프로그램을 제공한다.

(Table 1) 컴퓨터 모델링 프로그램

프로그램명	특징
ASCOS	재연설비 분석 모델
ASET-B	단일실(Single compartment)에서의 화재 예측 프로그램
BREAK1	구획화재에서 창문이 깨지는 것에 대한 예측 프로그램
CFAST	다 구획실(Multi compartment)에서의 화재 예측 프로그램
ELVAC	엘리베이터를 이용한 이동시간 예측
FPETOOL	화재의 성장과 확대에 따른 열감지기의 작동시간 예측 프로그램
FDS	화재로 생성된 유체의 흐름을 Navier-stokes 방정식을 이용하여 풀이하며, Smokeview라는 프로그램을 이용해서 3차원으로 결과를 구현함.

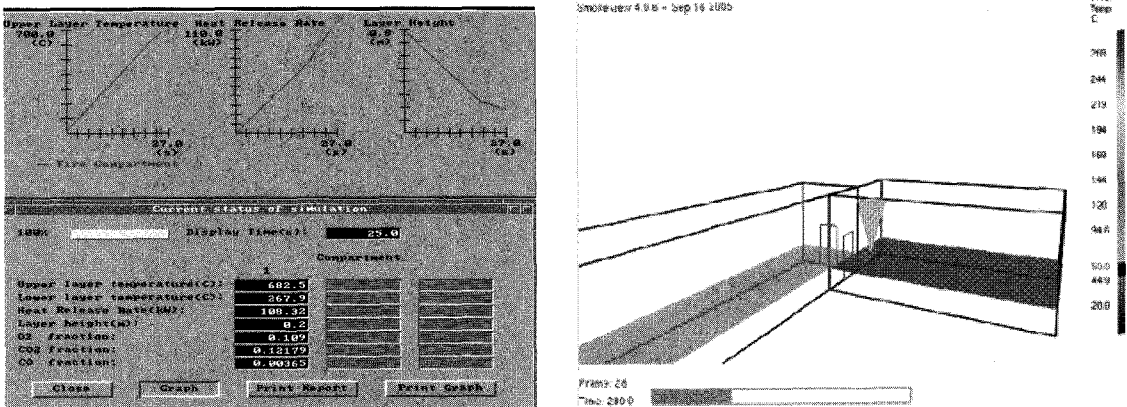
화재 모델링 이외에 안전방재 분야에서 사용 되는 그 밖의 유용한 프로그램을 소개하면 다음과 같다.

Table 2 방재분야 프로그램

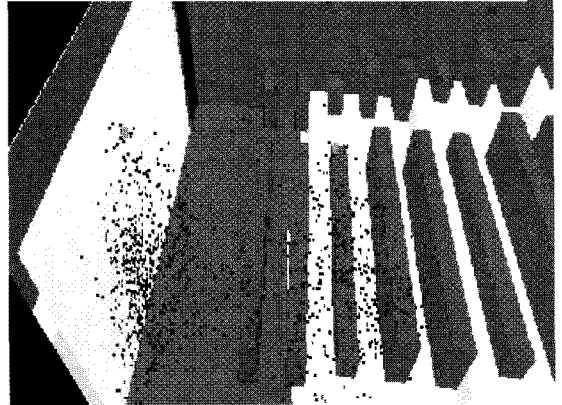
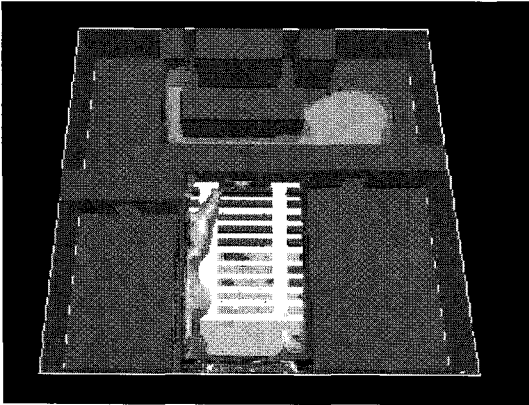
시뮬레이션 내용	프로그램 명
폭발및 가스확산	CHARM, FLACS, SUPERCHEM, SAFER 등
피난	SIMLUEX, EXODUS 등

2.4 시뮬레이션 결과 창 소개

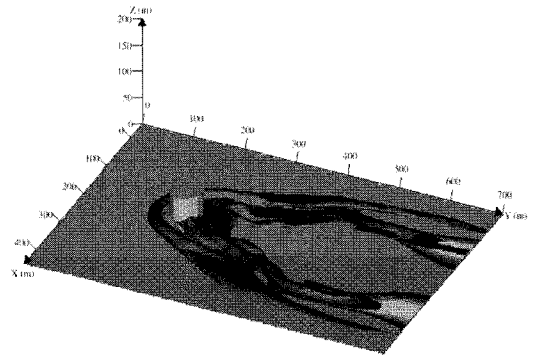
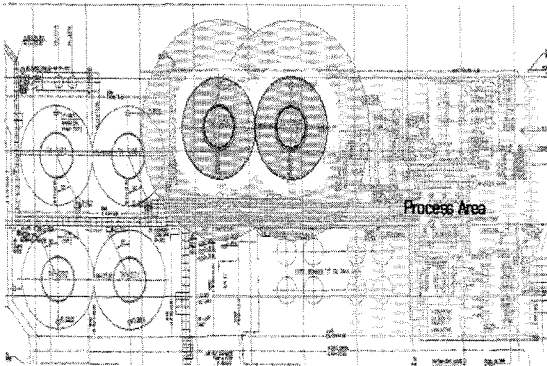
주요 프로그램에 대한결과창은 다음과 같다.



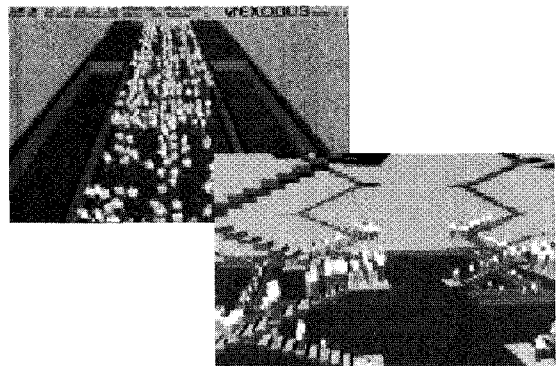
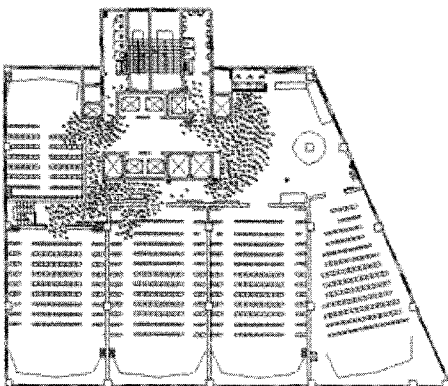
(Figure 3) CFAST 결과창



〈Figure 4〉 FDS 결과창



〈figure 5〉 CHARM 및 FLACS 결과창



〈Figure 6〉 SIMULEX 및 EXODUS 결과창

3. 모델의 제한점과 불확실성

3.1 모델의 제한점

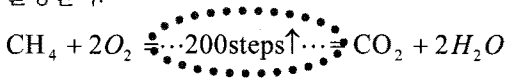
화재모델은 계속적으로 발전되고 있는 분야로 현재까지의 모델은 많은 제한점을 가지고 있으나, 그 중에서도 기본적인 한계점은 다음과 같다.

3.1.1 실제 세계(Real World)는 Zone이나 Cell로 구성되어 있지 않으나, 화재

모델에서는 구획(Compartment)된 실을Zone이나 Cell로 나누고 각 Zone과 Cell 내부에서 화재로 인해 변화되는 물리량은 모두 균일하다(Homogeneous)하다고 간주하는 것이 제한점이다.

3.1.2 모델 내에서 화재의 연소를 정의할 때는 완전연소에 의한 정량 반응만을 (Stoichiometric reaction) 간주하고 계산을 수행한다.

그러나, 가장 간단한 구조의 탄화수소계 연료인 메탄의 경우, 연소과정은 200단계이상으로 구성되어 있어 정량적인 반응으로 간주하고 모델을 수행하는 경우와 실제 화재 사이에는 차이가 발생한다.



3.2 불확실성(Uncertainty)

3.2.1 시뮬레이션 결과에 불확실성을 가중시키는 경우

시뮬레이션 결과에 불확실성을 가중시키는 일반적인 경우의 예를 들어보면 다음과 같다.

(1) 프로그램 사용 오용하는 경우

예를 들어대부분의 상용화된 구획화재 프로그램에서는 화재가스의 부력에 대비하여 모멘텀의 비가 월등히 큰 경우(Jet fire)에 대해서는 시뮬레이션을 수행할 수 없으나 Jet fire의 모델링에 대해 구획화재 프로그램을 적용하는 경우이다.

Q*는 화재가스의 부력에 대한 모멘텀의 비로 $0.1 < Q^* < 2.5$ 의 범위에 내에서 구획화재 프로그램을 적용해야 한다.

또한 Zone modeling인 CFAST의 경우, Plume model을 McCaffrey가 개발한 식을사용하므로 화재의 직경이 0.3m 이하이고, HRR의 크기가 100kW이하인 화재에 적당하나 이보다 훨씬 큰 화재에 대해서도 적용하는 경우가 있다.

위의 두가지 예와 같이 프로그램을 오용하는 경우에는 시뮬레이션 결과에 신뢰도가 떨어지며, 불확실성을 가중시키게 된다.

(2) 시나리오 작성 과정에서 가정을 사용함.

화재는 복잡한 메커니즘에 의해 발생되나, 이를 시뮬레이션 하기위해서는 단순화하여 계산하는 것이 불가피하다.

따라서, 시나리오 작성 과정에서 결과에 큰 영향을 미치는 부분을 과소 또는 과대 해석하여 설정하게 되면 불확실성이 가중된다.

(3) 컴퓨터 프로그램 사용시 불확실성 발생

프로그램 사용시 발생할 수 있는 불확실성은 다음과 같이 정리된다.

- 프로그램 계산상의 오류 발생
- 프로그램 입력값의 잘못된 적용
- 실험값의 데이터 에러
- 풀이하려는 문제에 맞는 Tool이 선택되지 않았을 때

3.2.2 불확실성을 제거하기 위한 노력

시뮬레이션 결과에 불확실성을 제거하여 신뢰도를 높이기 위해서는 Sensitivity analysis가 필요하다.

즉, 모델에 사용한 변수와 입력치에 대한 근거를 준비하고, 결과가 도출되기까지 사용한 가정과 제한사항들을 언급하며, 근거치(Baseline)라고 할 수 있는 실험치나 상관식에 의한 결과값을 모델에 의한 결과와 비교함으로써 시뮬레이션의 결과와 트렌드가 합당한지를 시뮬레이션을 수행하는 동안 지속적으로 검증하고 확인하는 노력이 필요하다.

또한, 시뮬레이션을 수행하는 사용자는 화재 모델링과 화재 역학에 대한 기본 지식을 습득해야 한다.

(1) 화재 시뮬레이션 수행을 위해 필요한 기본 지식

- Fire dynamics & Basic computational analysis skill
- Heat Transfer
- Thermodynamics
- Fluid mechanics
- Fire modeling

4. 화재 조사에 화재 시뮬레이션을 적용한 사례

본 장에서는 화재 조사에 화재시뮬레이션이 적용된 2가지 사례를 간단히 살펴보자.

4.1 미국 WTC(World Trade Center)

화재 사고

(1) 사고일시 : 2001년 9월 11일 15:53

(2) 건물규모

110층 세계무역센터 쌍둥이 건물

(3) 원인

항공기 납치에 의한 테러

(4) 피해현황

인명피해 - 항공기 탑승인원 266명 전원

사망 세계무역센터 건물 내
2,500~3,000명 사망

재산피해 - 세계무역센터 건물 11억 달러(1조 4300억 원)

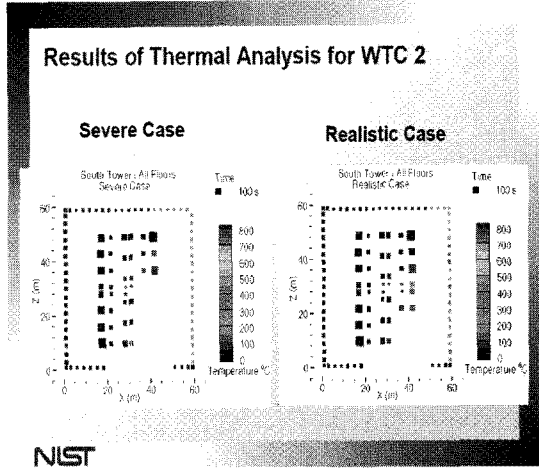
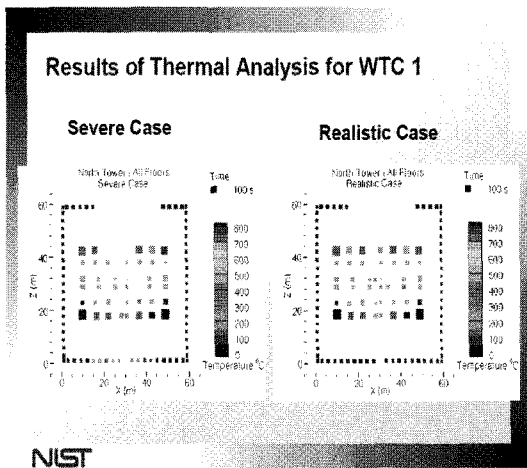
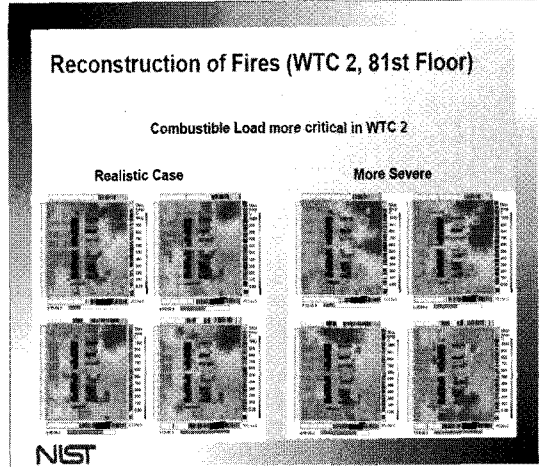
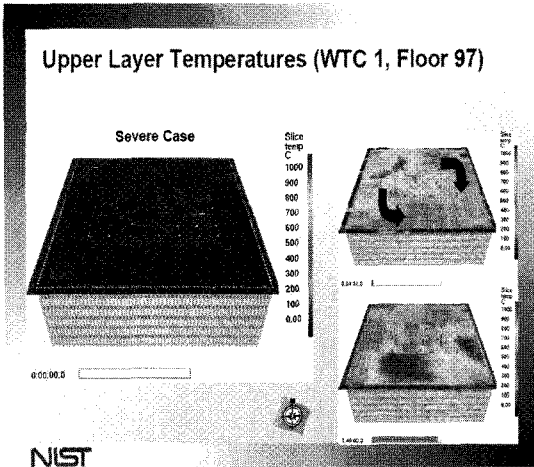
테러 응징을 위한 긴급 지출
안 400억 달러(약 52조 원)

재난극복 연방 원조액 111
억 달러(약 52조 원)

그 외의 각종 경제활동이나 재산상 피해는 화폐가치로 환산하기 어려움

미국 WTC 사고를 조사하기 위해서 174명의 인원이 4년간 실험 및 연구하고 조사 Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers, NIST NCSTAR1, NIST보고서를 제출하였다.

화재부분을 재현하고 해석하는 데에는 NIST에서 개발한 FDS 프로그램을 주로 사용하였으며, 비행기 충돌로 화재가 발생한 층에서의 온도분포와 발생된 열로 인한 열해(Thermal damage)를 분석하였다.



〈figure 7〉 온도분포도

4.2 미국 IOWA 듀플렉스 화재 사고

- 1) 사고일시 : 1999년 12월 22일
- 2) 건물규모
2층 규모의 듀플렉스 하우스

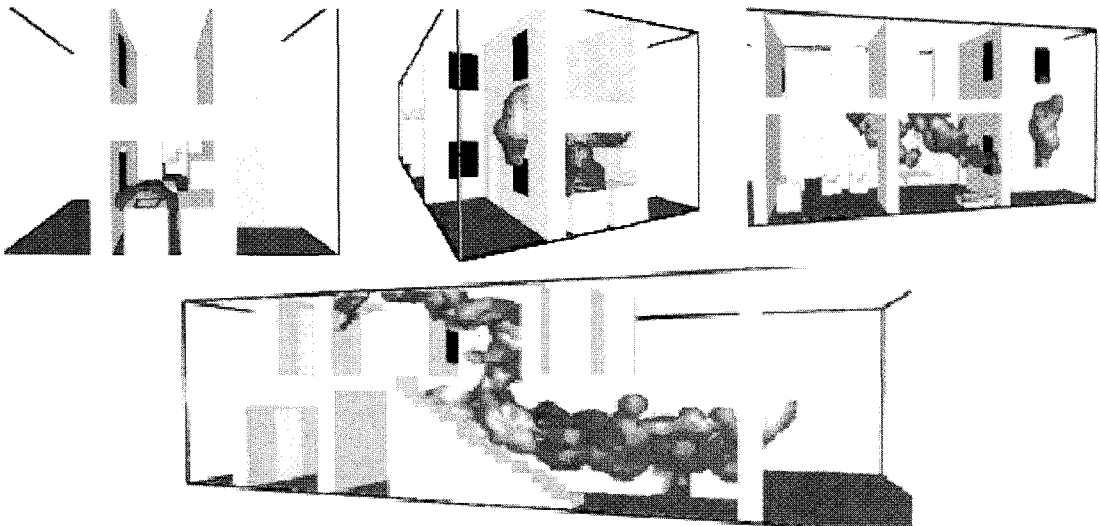
- 3) 원인
스토브 위에 있던 플라스틱에서 점화됨.
- 4) 피해현황
인명피해 - 6명 사망 (어린이 3명, 소방
대원 3명)

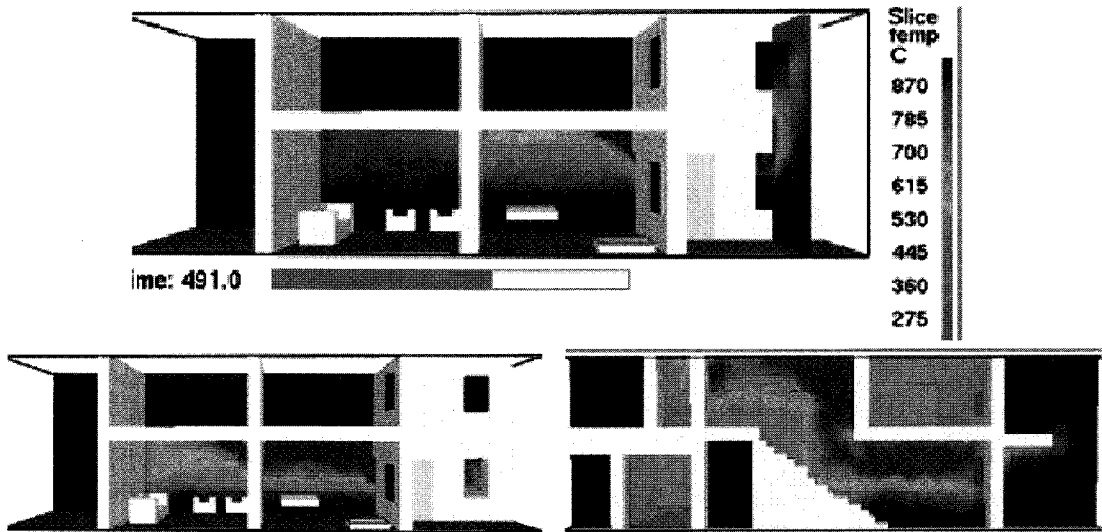


〈Figure 8〉 듀플렉스 화재

본 화재 조사는 NIOSH(National Institute for Occupational Safety & Health)와 ATF(Bureau of Alcohol, Tobacco and Firearms)의 요청과 지원에 의해서 NIST에서 FDS를 이용하여 화재현장을 재현하였다.

본 화재로 건물 내부에서 사망 사고가 발생하였으므로 NIST에서는 화재시 건물 내부에서 화재의 성장에 따른 온도 분포를 분석하여 화재실의 상황을 예측하고 사망할 수 있는 환경이 조성되었는지를 확인하였다.





〈Figure 9〉 화재의 확대 및 건물 내부의 온도분포

References

1. "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", National Fire Protection Association, 3rd Ed, ISBN : 087765-451-4
2. David J. Icove, John D. DeHaan, "Forensic Fire Scene Reconstruction", Brady, Prentice Hall, 2004, ISBN : 0-13-094205-7
3. Dougal Drysdale, "An Introduction to Fire Dynamics", John Wiley & Sons, 2nd Ed., ISBN : 0-471-97290-8
4. "Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers", NIST NCSTAR1
5. NIST, <http://www.bfrl.nist.gov>
6. Inter Fire Online, <http://www.interfire.org>