

## 화재시뮬레이션

김상문\* · 윤상열\* · 김경천†

### Fire Simulations

Sang Moon Kim, Sang Youl Yoon and Kyung Chun Kim

**Abstract** Fire simulation has been developed for decades to analyze fire cases and provide a tool to study fundamental fire dynamics and combustion. There are three way of fire simulation which are a full scale simulation, an experimental simulation and a computational simulation. In case of a full scale simulation, because a higher cost, a higher risk, more efforts are needed, a demand for it has been decreased. But recently a demand for an experimental simulation and a computational simulation has been increased. A computational simulation has several advantages; lower cost, short period, many case studies, more visual results, a quantitative result and etc. FDS(Fire Dynamics Simulator) which has been developed in BFRL (Building and Fire Research Laboratory), NIST(National Institute of Standards and Technology) is a popular world wide code for fire simulation. Lack of accurate predictions by the model could lead to erroneous conclusions with regard to fire safety. All results should be evaluated by the informed judgment of the qualified user.

**Key Words:** Fire(화재), Fire Simulation(화재 시뮬레이션), FDS(Fire Dynamics Simulator), Densimetric Fr Number(Fr), Full Scale Simulation, Experimental Simulation, Computational Simulation

### 1. 서 론

화재사고란 소방법에서 정한 소방대상물들이 화재로 인명과 재산피해가 발생한 경우를 말한다. 이러한 법적인 정의가 아니더라도 누구나 화재사고라 여겨할 것인지는 잘 알고 있으며 화재가 무엇인지도 알고 있다. 실제로 화재는 그 과정상 여러 가지 형태로 나타나며 모두 가연물과 공기중 산소와의 화학반응을 수반한다. 적절히 이용하면 산업용 또는 가정용의 동력원과 열원으로서 혜택을 얻을 수 있으나, 부주의에 따라 예측하지 못한 물질이나 인명의 막대한 손실을 초래하게 된다.

국내의 경우만 하더라도 작은 화재사고 뿐아니라 터널이나 지하철 화재사고와 같은 큰 화재사고에 의해서 수많은 인명과 재산이 손실이 발생해왔고 해마다 산불로 인하여 많은 재산과 인명의 손실이 발생하

는 등 장소를 불문하고 화재에 의해서 심각한 손실을 입고 있는 실정이다.

이에 많은 국가들이 수 많은 사고들을 바탕으로 하여 실험을 통하여 제정한 안전 범규 사항으로 건축기 준등을 제시하고 있는 실정이지만, 통계적인 기준이므로 실제 적용에 있어 그 기능보다는 범규 준수 차원에서 설계가 되거나 건축이 되므로 화재 발생시 그 실제의 효과는 의심되지 않을 수 없게 된다.

설계 단계에서 이를 예측하기 위하여 모형 실험들이 수행되기도 하였고, 터널의 경우 실제 완공후에 차량의 화재를 통하여 실제 측정 실험이 수행되기도 하였다. 그러나 실험에 따른 많은 위험성이 존재하고 있으며 큰 비용이 소요되는 단점이 있음에 따라 실험 수행에 대한 요구는 많이 존재하였으나 실제 수행은 손에 꼽을 정도로밖에 수행되지 못하는 실정이었다.

근래에는 다른 공학분야와 마찬가지로, 급속한 컴퓨터의 발달에 따라 이러한 화재에 대한 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 연구가 활발히 진행되었으며 그렇게 개발된 코드가 국내외 실제 현장에서 적용되고 있다.

†부산대학교 기계공학부  
E-mail: kckim@pusan.ac.kr

\*부산대학교 기계공학과

여기서는 화재 시물레이션에 대하여 간략히 소개하고, 전산 시물레이션의 실제 적용 사례를 간단히 소개하고자 한다.

화재는 화학, 열역학, 유체역학 그리고 열전달이 관여되는 제어되지 않는 연소현상이다. 화재역학을 이해하고 전산 시물레이션을 수행하기 위해서는 이러한 다방면의 지식을 함양하여야 하고 실제 건축물의 특성과 구조를 이해하여야 하며 시물레이션 입력 조건에 따라 그 전산 결과는 엄청난 차이를 보일 수 있기 때문에 시물레이션의 결과를 분석할 수 있는 능력을 가진 전문가들이 시물레이션을 수행하여야 함을 강조하고자 한다.

## 2. 시물레이션 분류

### 2.1. 실물 시물레이션(Full scale experiment)

열방출율의 측정이나 스프링클러의 작동, 제연팬의 성능 측정, 플래시오버 연구등을 위하여 실제 크기의 구획실이나 건물에서 혹은 건설되어 있는 실제의 터널에서 상사법칙을 적용하지 않고 실제 스케일의 화재를 발생시키고 연구목적에 부합하는 항목들의 측정이 행하여지고 있다. 실물 시물레이션의 가장 큰 장점은 실험조건에 대한 그 효과를 가장 정확히 파악할 수 있다는 것이지만 실험을 위한 비용이나 제반사항들에 많은 제약이 따르게 된다.

터널의 경우 유럽의 몽블랑터널 화재 오스트리아 산악터널 화재등에서 볼 수 있듯이 사고 발생시 다수의 인명피해가 동반되며 대형사고로 이어지게 된다. 실제 터널에서의 실측으로 터널에서 연소가스의 온도 측정 및 열방출에 따른 연소가스의 맥동파악(Anders Lönnermark<sup>1)</sup>), 터널내 자동차화재시 연기거동과 온도측정(J. S. Choi<sup>2)</sup>)등이 수행되었다. 특히 근래에는 터널이 많이 생기고 터널의 길이가 길어짐에 따라 실제 터널에 대한 연구가 활발해지고 있다.

### 2.2. 모형 시물레이션(Experimental simulation)

많은 연구들은 실제 상황에 대하여 상사법칙을 사용하여 축소모형을 제작하고 화재강도에 따라 Pool Fire를 사용하여 온도장이나 연기의 흐름을 측정(Lee, Sung-Ryoung<sup>3)</sup>)하거나 Densimetric Froude 수에 따른 공기 + 헬륨 혼합물을 사용하여 화재의 연기 거동을 가시화(O. Vauquelin<sup>4)</sup>)하여 수행되어지고 있다.

모형시물레이션에서는 가시화 실험 및 측정을 위해

기하학적인 상사를 이용하여 축소모형을 제작하고

$$\frac{L_M}{L_P} = \frac{W_M}{W_P} = \frac{H_M}{H_P} = CONST \dots\dots\dots (1)$$

$$Fr = \left( \frac{V^2}{g'D} \right) \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{V_M}{V_P} = \left( \frac{L_M}{L_P} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \frac{t_M}{t_P} = \left( \frac{L_M}{L_P} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (3)$$

Densimetric Froude 수를 사용하여 화재연기의 부력에 대한 성질을 상사시키고 화재연기 속도와 시간의 스케일을 상사시킨다.

이렇게 상사된 실험조건과 건축물 설계시 제한된 제연운전 시나리오에 따라서 실험이 수행되고 그 결과 제연운전의 안전성과 적정성을 판단하게 된다.

실험을 통한 분석방법에는 단순 가시화와 같은 정성적 기법과 온도 측정, PIV측정, 가스농도 측정 등과 같은 정량적 기법이 있으며 실무관계자들이 보고자 하는 사항에 따라 선택된다.

특히 모형시물레이션의 경우는 전산시물레이션과 마찬가지로 터널이나 지하철역사 지하상가등 화재발생시 큰 인명피해가 발생되는 건축물들에 대하여 수행되고 있으며 꾸준히 그 수요가 증대되고 있는 실정이다.

모형시물레이션의 실제 적용 사례로 지하철역사에 대하여 수행된 모형시물레이션에 관해 간략히 소개하기로 한다.

가시화실험을 위한 투명 아크릴소재의 모델을 제작하기 위하여 3차원 CAD 소프트웨어를 사용하여 모델을 설계하였다(Fig. 1). 실제 화재크기에 대한 상사를 통하여 Air+He혼합물의 비를 결정하고 가시화 측



Fig. 1. 지하철역사 모형제작을 위한 3차원 모델링

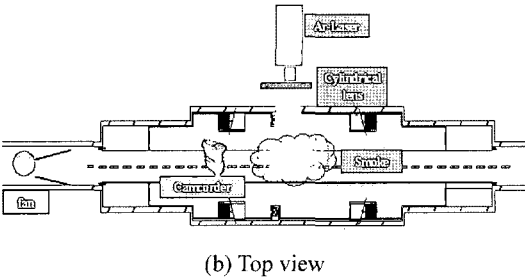
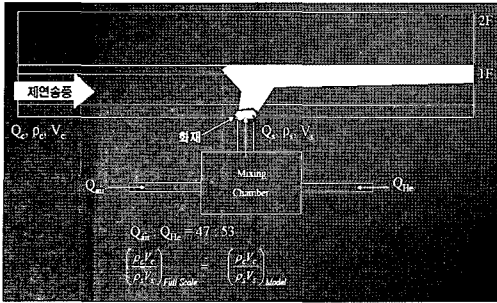


Fig. 2. Schematic view of the experimental setup

정을 위한 광원으로 레이저 시트빔을 사용하고 캠코더의 배치가 Fig. 2에 보여지고 있다.

실제 제작된 모형의 입구조건이 정확한지를 확인하기 위하여 PIV측정을 통하여 유도장을 확인하였다 (Fig. 3).

선진국에서는 승객의 안전확보와 승강장의 폐적합과 정숙함을 확보하기 위하여 PSD(Platform Screen

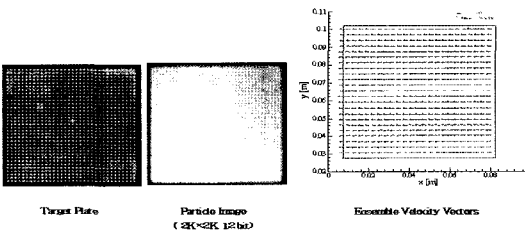


Fig. 3. 모델 입구유속 PIV 측정 결과

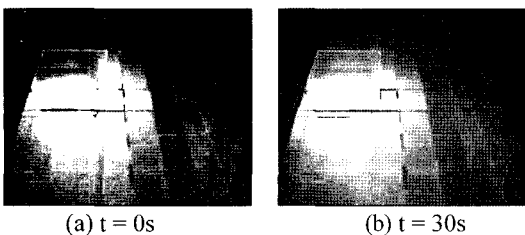


Fig. 4. PSD 미설치 경우

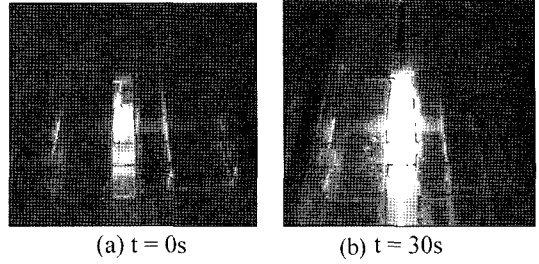


Fig. 5. PSD 설치 경우

Door) 설치가 보편화 되어 있고 국내에도 차츰 설치가 증가하고 있는 추세이다. PSD의 유무에 따라 화재 발생시 제연효과와 차이를 확인하고자 실험이 수행되었다(Fig. 4, Fig. 5). PSD 미설치의 경우 화재 연기가 승강장 전체에 걸쳐 퍼지면서 2층 대합실까지 번져나가는 것을 확인할 수 있으며 대구지하철 참사 후 역사내 환경과 동일한 경향임을 알 수 있다. 이와는 달리 PSD가 설치된 경우 PSD가 닫혀있기 때문에 화재 연기가 터널부로부터 전파가 되고 승객들이 위치하는 승강장에는 침입되지 않는 것을 확인할 수 있다.

PSD가 설치되지 않은 경우 제연운전의 유무에 따른 경향의 차이를 확인하였다. Fig. 6의 경우 제연운전이 없기 때문에 열차에서 발생하는 화재연기가 계단을 따라 2층으로 확산되는 것을 확인하였다. Fig. 7은 제연운전이 있을 경우 확산경향으로 PSD가 설치

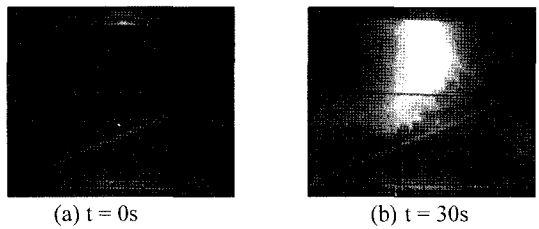


Fig. 6. 제연운전이 없을 경우(PSD미설치)

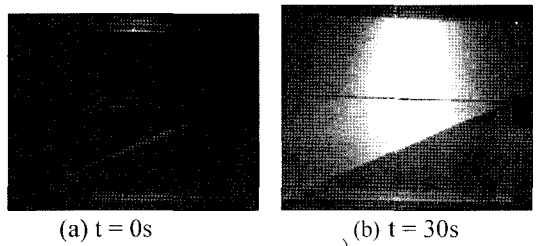


Fig. 7. 제연운전이 있을 경우(PSD미설치)

되지 않았기 때문에 제연운전이 오히려 화재연기 확산에 모멘텀을 실어주어 더욱 급격히 확산되는 것을 확인하였고 결과적으로 PSD설치가 필수적인 것으로 판단되었다.

**2.3. 전산 시물레이션(Computational simulation)**

실물이나 모형 시물레이션의 경우 막대한 비용과 노력이 필요하고 위험성이 크기 때문에 최근에는 전산 시물레이션이 활발하게 수행되고 있는 실정이다. 전산시물레이션의 주된 목적은 화재 피해 예측, 설계도면 검토 그리고 발생한 화재의 재현 등이 되겠다. 화재발생시 피해상황을 쉽게 예측할 수 있기 때문에 건물의 화재 피난 시나리오 검토가 가능하고 이에 따라 건축물 설계시 전산 시물레이션을 통하여 도면을 수정하여 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 또한 발생한 화재 사건의 재현이 가능하기 때문에 발화점 확인, 화재성장 파악 등에 대한 객관적이고 시각적인 자료를 제공할 수 있다는 점이 큰 장점이 된다. 시물레이션에 따른 정성적/정량적 데이터를 쉽게 확보할 수 있으며 모델링이 완료되고 나면 여러 경우에 대한 시물레이션이 가능하므로 건축물 특성에 따른 효과적인 방재계획 수립 및 평가가 가능하다.

사용목적에 따라 화재 전산 시물레이션을 위한 다수의 소프트웨어가 있으나, 여기서 크게 2차원 Zone model과 3차원 Field model 두 가지에 대해 간략히 소개하고 3차원 Field model의 대표적인 코드인 FDS에 대하여 소개하도록 한다.

화재 전산 시물레이션 코드를 개발하는 대표적인 그룹으로 미국 상무성 산하 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 BFRL(Building and Fire Research Laboratory)과 영국University of Greenwich, School of Computing & Mathematical Sciences의 Fire Safety Engineering Group 을 들 수 있다. 각 그룹은 화재 시물레이션 코드와 피난 시물레이션 코드를 개발하고 있으며 전세계적으로 널리 사용되고 있다.

2차원 Zone model로 BFRL의 CFAST를 들 수 있으며 이는 공간을 하나의 Zone으로 정의하고 다시 Zone을 2개의 층(Hot, Cold)으로 구분하고 공간끼리의 연결을 설정하여 화염전파속도, 화재강도, 공간간의 통기구를 통한 연기의 유량, 연기 침강비율, 플래시오버 발생여부 등을 파악하기 위해 사용된다. 사용이 간편하고 계산시간이 실시간이므로 실무적으로 많

이 사용되고 있다.

3차원 Field model의 대표적인 코드로 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 들 수 있다. FDS는 BFRL에서 대학, 연구소, 기업등과 함께 개발해 오고 있는 코드로서 화재에 의해 유도되는 열과 연기의 유동 예측에 중점을 두고 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 계산하며 2000년에 FDS V1이 발표되었고 현재 V4가 제공되고 있다. 특히 FDS는 실제로 화재 예방을 위한 화재 사건의 해석뿐 아니라 기본적인 화재역학과 연소공학을 연구하기 위한 도구로서 개발이 되고 있다. FDS는 화재로부터의 열, 연기 거동, 기상과 고체상간의 복사/대류열전달, 열분해, 화염전파, 화재성장, 스프링클러, 화재진압 등과 같은 현상을 모델링하고 해석한다.

수력학 모델로는 LES, DNS 해석이 가능하고 연소 모델로는 상태식에 의해 주요 반응물과 생성물의 정량적 해석을 위한 Mixture fraction model 이 사용되고 특히 화재에서 가장 큰 효과를 가지는 요인중의 하나인 복사열전달을 더욱 정확하게 해석하기 위해 FVM 기법을 도입하고 있다. 더욱 자세한 사항은 FDS User's manual을 참고하도록 하고 FDS 시물레이션을 통하여 얻을 수 있는 결과치들을 가스 상에 대하여 Table 1에, 고체 상에 대하여 Table 2에 나타내고 다음 장에서 FDS의 실제 적용사례를 보이도록 한다.

**3. FDS 실제 적용 사례**

Fig. 8 은 911테러에 의해 붕괴된 WTC건물의 화재를 재현한 사례를 보인다.

Fig. 9는 소방관들의 화재현장 진화에 사용되는 PPV 팬의 성능평가를 위한 실험 및 FDS 시물레이션

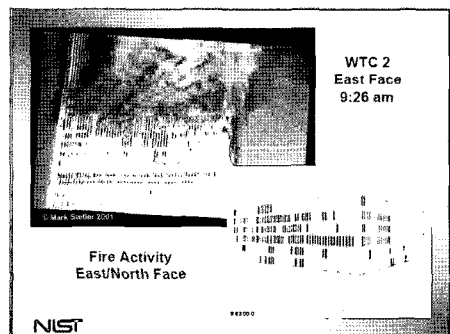


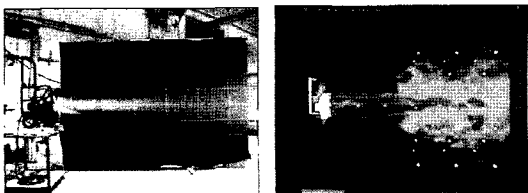
Fig. 8. World Trade Center investigation(911 Terror)

**Table 1** 기체 상에 대한 결과치

Quantity	내용	단위
DENSITY	농도	Kg/m3
TEMPERATURE	온도	°C
THERMOCOUPLE	열전대 온도	°C
U-, V-, W- VELOCITY	u, v, w 속도성분	m/s
VELOCITY	유동 속도 $(u^2+v^2+w^2)^{1/2}$	m/s
PRESSURE	순간 압력	Pa
H	전체압력/농도	(m/s) <sup>2</sup>
HRRPUV	단위체적당 Heat Release Rate	kW/m3
MIXTURE_FRACTION	혼합물 비율	kg/kg
DYNAMIC_VISCOSITY	점성계수	kg/m/s
KINEMATIC_VISCOSITY	동점성계수	m <sup>2</sup> /s
DIVERGENCE	발산	s <sup>-1</sup>
WMPUV	단위체적당 물(Water) 질량	kg/m3
oxygen	산소(O <sub>2</sub> ) 체적 비율	mol/mol
oxygen mass fraction	산소(O <sub>2</sub> ) 질량 비율	kg/kg
fuel	연료 체적 비율	mol/mol
nitrogen	질소(N <sub>2</sub> ) 체적 비율	mol/mol
water vapor	수증기(H <sub>2</sub> O) 체적 비율	mol/mol
carbon dioxide	이산화탄소(CO <sub>2</sub> ) 체적 비율	mol/mol
carbon monoxide	일산화탄소(CO) 체적 비율	ppm
soot volume fraction	매연 체적 비율	ppm
soot density	매연 입자 농도	mg/m <sup>3</sup>
extinction coefficient	빛 단절 계수	l/m
visibility	가시거리	m
DROPLET_FLUX-X, Y, Z	x,y,z 방향의 물(Water) 유량	kg/m <sup>2</sup> /s

**Table 2.** 고체 상에 대한 물성치

Quantity	내용	단위
RADIATIVE_FLUX	정미 복사 열유속	kW/m2
CONVECTIVE_FLUX	고체로의 대류 열유속	kW/m2
HEAT_FLUX	고체로의 정미 열유속	kW/m2
GAUGE_HEAT_FLUX	찬 벽에 대한 등가 열유속	kW/m2
INCIDENT_HEAT_FLUX	투입 열 유속	kW/m2
WALL_TEMPERATURE	벽 온도	°C
INSIDE_WALL_TEMPERATURE	내부 벽 온도	°C
BURNING_RATE	단위면적당 질량손실률	kW/m2
PRESSURE_COEFFICIENT	압력계수	-
WMPUA	단위면적당 수(Water) 질량	kW/m2
WCPUA	단위면적당 수냉각(Water Cooling)량	kW/m2

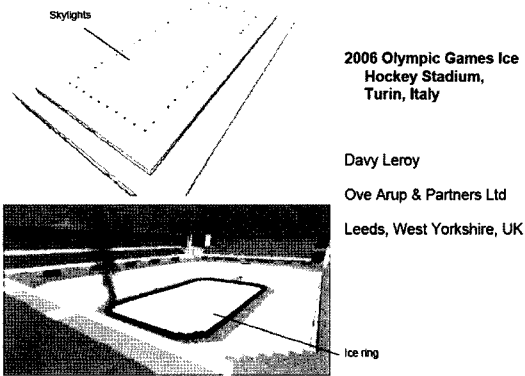


**Fig. 9.** PPV Fan efficiency test

결과를 보이고 있다.

#### 4. 결 론

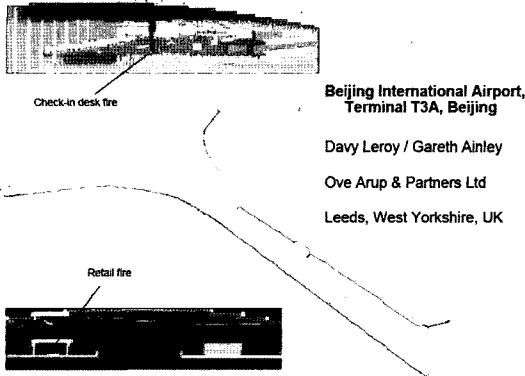
작은 화재사고 뿐만아니라 터널이나 지하철 화재사고와 같은 큰 화재사고에 의해서 수많은 인명과 재산이 손실이 발생해왔고 해마다 산불로 인하여 많은 재산과 인명의 손실이 발생하는 등 장소를 불문하고 화재에 의해서 심각한 손실이 발생하고 있다. 이러한 화재사고에 대한 분석과 예방을 위하여 여기서는 화재



2006 Olympic Games Ice Hockey Stadium, Turin, Italy

Davy Leroy  
Ove Arup & Partners Ltd  
Leeds, West Yorkshire, UK

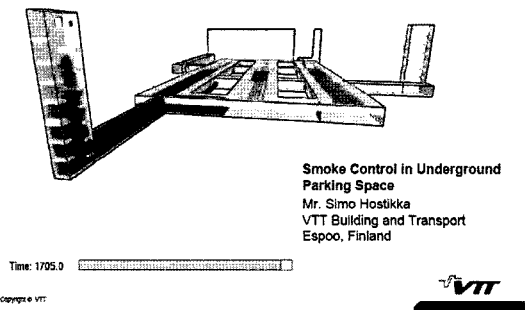
Fig. 10. 2006 Olympic games ice hockey stadium



Beijing International Airport, Terminal T3A, Beijing

Davy Leroy / Gareth Ainley  
Ove Arup & Partners Ltd  
Leeds, West Yorkshire, UK

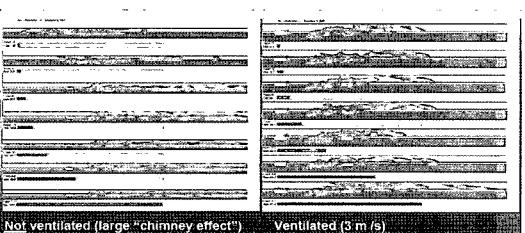
Fig. 11. Beijing Int. Airport terminal



Smoke Control in Underground Parking Space  
Mr. Simo Hostikka  
VTT Building and Transport  
Espoo, Finland

Time: 1705.0  
Copyright VTT

Fig. 12. Underground parking space



Not ventilated (large chimney effect)      Ventilated (5 m/s)

Fig. 13. Road tunnel

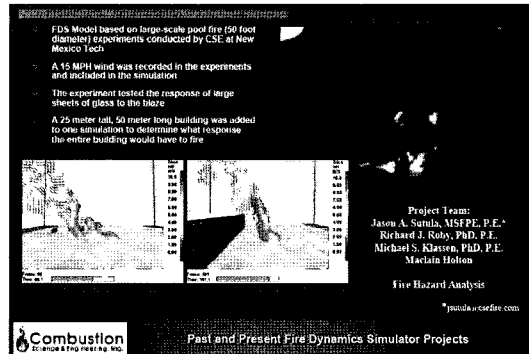


Fig. 14. Pool fire test and FDS simulation

시뮬레이션에 대하여 간략히 소개하고, 전산 시뮬레이션의 실제 적용 사례를 간단히 소개하였다.

화재는 화학, 열역학, 유체역학 그리고 열전달이 관여되는 제어되지 않는 연소현상이다. 화재역학을 이해하고 전산 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 이러한 다방면의 지식을 함양하여야 하고 실제 건축물의 특성과 구조를 이해하여야 한다.

특히 전산 시뮬레이션의 경우 입력 조건에 따라 그 전산 결과는 엄청난 차이를 보일 수 있기 때문에 시뮬레이션의 결과를 분석할 수 있는 능력을 가진 전문가들이 시뮬레이션을 수행하여야 함을 다시 한 번 강조하고자 한다.

### 참고문헌

- 1) Anders Lönnermark, Bror Persson, Haukur Ingason, 2006, "Pulsations during large-scale fire test in the Runehamar tunnel", Fire Safety Journal, Vol.41, pp.377-389.
- 2) J. S. Choi, B. I. Choi, M. B. Kim, Y. S. Han, Y. J. Jang, Y. W. Lee, N. S. Hwang and P. Y. Kim, 2002, "The Study of Pool and Car Fires in Tunnel", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.15(3), pp.71-76.
- 3) Lee, Sung-Ryong, Kim, Choong-Ik and Ryou, Hong-Sun, 2001, "An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation", T. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng., Vol.15(1), pp.21-32.
- 4) O. Vauquelin, O. Mëgret, 2002, "Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel", Fire Safety Journal, Vol.37, pp.525-533.