

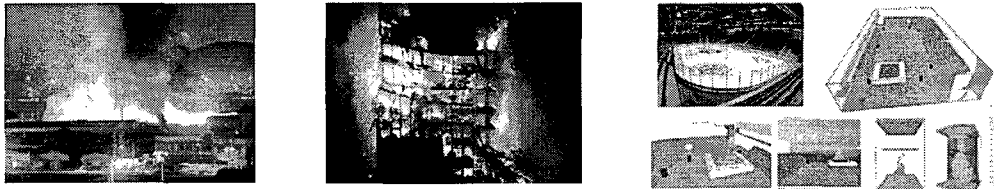
화재 시뮬레이션 및 가시화 기술

김 경 천

(부산대 기계공학부)

화재 시뮬레이션 및 가시화 기술

김 경 천(부산대 기계공학부)



화재 시뮬레이션의 종류

- **실물 시뮬레이션(Full scale experiment)**
 - 실제 상황을 그대로 재현한 시뮬레이션
 - 예) 실제 터널에서 차량에 화재를 발생시켜 측정
- **모형 시뮬레이션(experimental simulation)**
 - 축소 모형과 상사법칙을 이용한 물리적 시뮬레이션
 - 예) 축소 모형 터널에서 상사조건하의 pool fire를 측정
- **전산 시뮬레이션(computational simulation)**
 - CFD등의 코드를 이용한 컴퓨터 시뮬레이션
 - 예) 실제 크기의 터널 차량화재를 컴퓨터로 시뮬레이션



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션

모형 실험방법

- 상사법칙에 따라 축소 모형 제작
- 화재발생 및 제연운전 시나리오 작성
- 상사법칙에 따른 화재시뮬레이션 조건 선정
- 가시화 및 PIV측정을 통한 정성적/정량적 분석



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

상사 법칙

■ 모형 상사

- 기하학적 상사에 따라 축소 모형 제작

■ 화재의 상사

- 화재 연기의 상사 : Densimetric Froude 상사 만족
 - 일반적으로 Air + He Mixture를 사용

$$Fr = \frac{V^2}{g'D} \quad \frac{t_M}{t_F} = \left(\frac{L_M}{L_F} \right)^{1/2}$$



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

터널관련 선행 연구

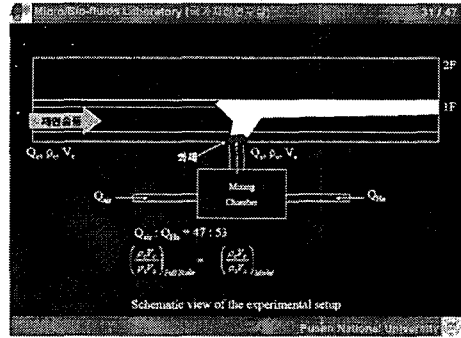
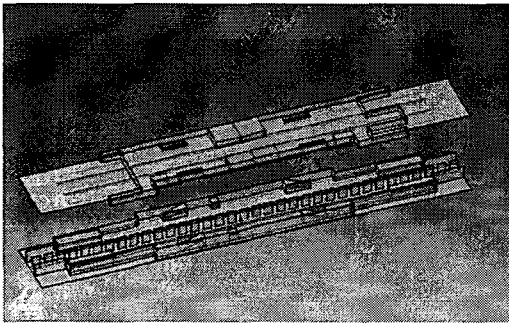
- 김상훈 등, "터널내에서 화재 발생시 연기 거동에 대한 연구", 한국화재·소방학회, 제14권 2호(2000)
- 이성룡 등, "터널 화재시 자연 배기에 의한 연기 거동에 관한 실험적 연구", 한국화재·소방학회, 제15권 1호(2001)
- O. Vauquelin et al., "Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel", Fire Safety Journal, Vol. 37 (2002)
- ...



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션 사례

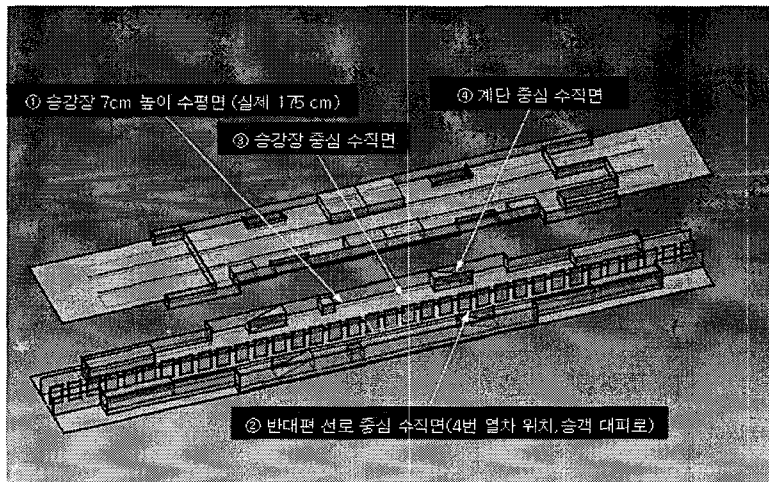
■ 지하철 역사내 열차 화재 시뮬레이션



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션 사례

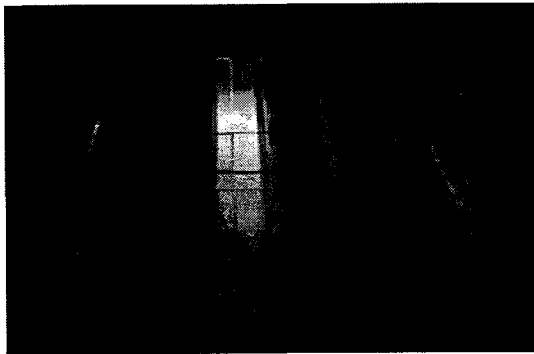
■ 측정위치



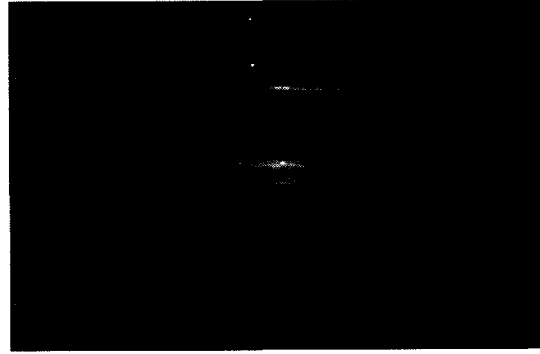
마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션 사례

- 지하철역사 PSD 미설치시 비제연운전에 따른 가시화
 - 승강장과 대피로 쪽으로 연기 확산



① 위치



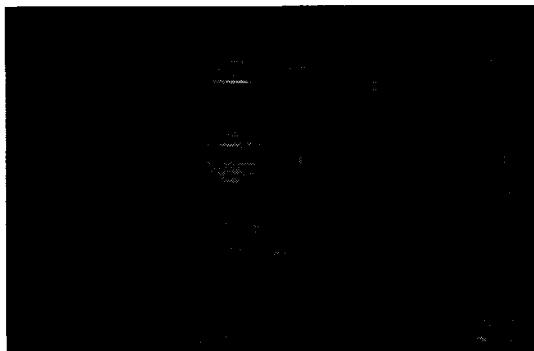
② 위치



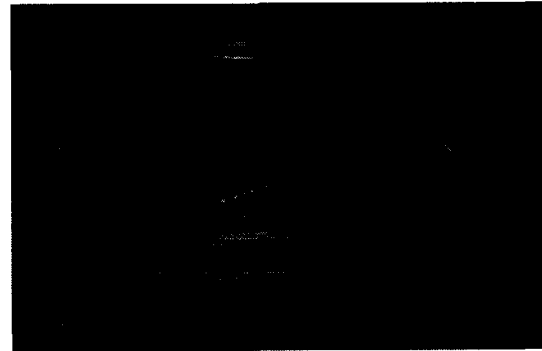
마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션 사례

- 지하철역사 PSD 미설치시 비제연운전에 따른 가시화
 - 2층으로 연기확산, 계단이 굴뚝 역할



③ 위치



④ 위치



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션 사례

- 지하철역사 PSD 미설치시 제연운전에 따른 가시화
 - 제연운전후에도 승강장, 대피로 방향으로 계속해서 연기 확산



① 위치



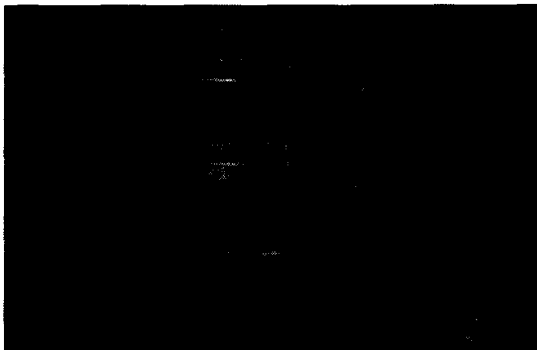
② 위치



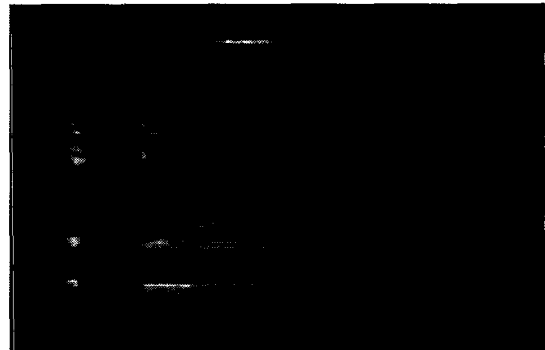
마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션 사례

- 지하철역사 PSD 미설치시 제연운전에 따른 가시화
 - 제연운전후 계단에서의 유량이 더욱 커짐 → 2층 피해가 더욱 커짐
 - 제연운전이 승강장이나 2층으로의 연기확산을 도와주는 역할



③ 위치



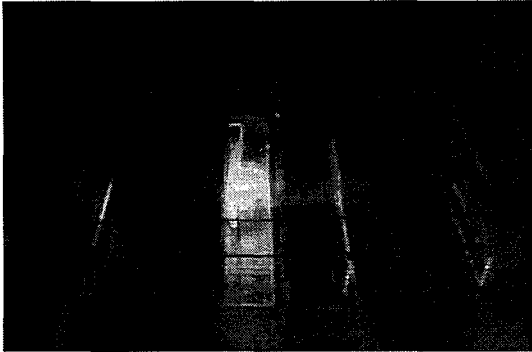
④ 위치



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

모형 시뮬레이션 사례

- 지하철역사 PSD 설치시 제연운전에 따른 가시화
 - 승강장이나 2층으로의 확산이 없음.
 - 선로를 통한 신속한 제연이 수행됨



① 위치



② 위치



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

전산 시뮬레이션

전산 시뮬레이션의 목적

- 화재 피해 예측
 - 화재발생시 피해상황 예측
 - 건물의 화재 피난 시나리오 검토

- 설계도면 검토
 - 설계도면에 대한 화재시 피난시나리오 평가
 - 이에 따른 도면 수정

- 화재의 재현
 - 발생된 화재사건의 재현에 따른 정확한 분석
 - 시뮬레이션 코드 자체의 성능 개선/신뢰도 향상



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

전산 시뮬레이션의 기대효과

- 정량적 분석에 의한 객관적인 자료 제공
 - 정성적, 정량적 분석을 통한 객관적 자료 도출
 - 유동/온도장, 매연, 스프링클러 작동등의 결과 제공

- 수치해석모델을 통한 다양한 CASE STUDY
 - 모델링후 여러 경우에 대한 시뮬레이션 가능
 - 건축물을 컴퓨터상에서 수정하여 결과 확인

- 건물특성에 따른 방재계획 수립
 - 건축물 특성에 따른 효과적인 방재계획 수립 및 평가
 - 건축허가, 사용승인 등에 대한 기초 자료 활용



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

대표적 화재 시뮬레이션 S/W

구분	대표 S/W	산출자료	시뮬레이션 내용
2차원 Zone Model	CFAST FASTLite	<ul style="list-style-type: none"> • 피난시간 • 스프링클러와 감지기의 동작점 • Atrium 연기속도 • 천정면에서의 화염확산온도 • 화염전파 • 화재강도 • 통기구를 통한 연기의 질량유량 • 연기 침강비율 • 복사열로 인한 인접가연물의 발화여부 • 개구부를 통한 연기흐름 • FLASHOVER • 환기한계 	피난시뮬레이션의 입력자료 및 화재의 성상을 공학적으로 재현하여 경로를 규명



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

대표적 화재 시뮬레이션 S/W

구분	대표 S/W	산출자료	시뮬레이션 내용
3차원 Field Model	FDS + Smokeview	<ul style="list-style-type: none"> • 시간별 열·연기 유동 파악 • 스프링클러/감지기의 동작점 • 스프링클러 헤드의 작동지연 파악 • 벽과 천정의 화재시 온도변화 • 3축으로 구성된 복사열 파악 • 연기의 하강속도파악 • 문틈, 창문틈에서 연기유출시간파악 • 스프링클러의 방수밀도와 방수량 파악 	<p>화재시 시간진행에 따른 3차원 공간의 모든 화재 관련 정량적 정보를 파악</p> <p>피난시뮬레이션의 입력자료 및 일반공장에서의 화재 복사열 등으로 인한 화재확대 가능성과 화재성상 파악</p>



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 개요

- Computational fluid dynamics (CFD) model of fire-driven fluid flow
- The software solves numerically a form of the Navier-Stokes equations appropriate for low-speed, thermally-driven flow with an emphasis on smoke and heat transport from fires.
- FDS is Fortran 90 computer program that solves the governing equations of fluid dynamics



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 개요

- Smokeview is a visualization program that is used to display the results of an FDS simulation.
- Smokeview is a companion program written in C/OpenGL programming language that produces images and animations of the results.



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

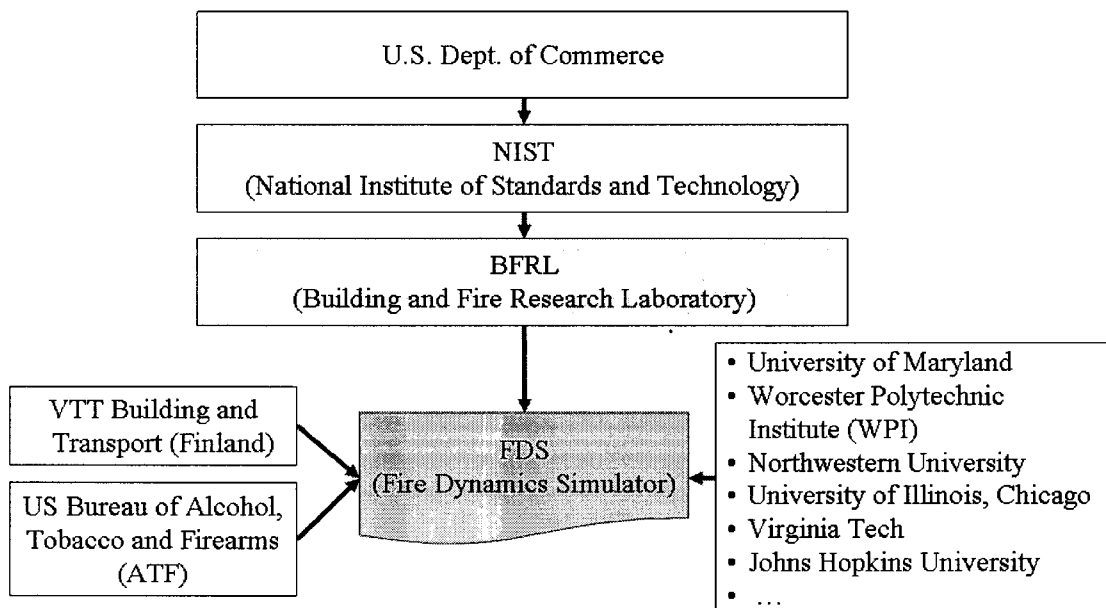
FDS 개요

- FDS has been aimed at solving practical fire problems in fire protection engineering, while at the same time providing a tool to study fundamental fire dynamics and combustion.
 - FDS can be used to model the following phenomena:
 - Low speed transport of heat and combustion products from fire
 - Radiative and convective heat transfer between the gas and solid surfaces
 - Pyrolysis
 - Flame spread and fire growth
 - Sprinkler, heat detector, and smoke detector activation
 - Sprinkler sprays and suppression by water



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 개발과정



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 적용기법

■ Hydrodynamics Model

- CFD : LES, DNS
- 더욱 정확한 난류 유동 해석

■ Combustion Model

- Mixture Fraction Model
- 상태식에 의한 주요 반응물과 생성물의 정량적 측정

■ Radiation Transport

- FVM (Finite Volume Method)
- 더욱 정확한 복사열전달 해석



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 개요

■ 지배방정식

Conservation of Mass

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0$$

Conservation of Momentum (Newton's Second Law)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij}$$

Conservation of Energy (First Law of Thermodynamics)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot \rho h \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \nabla \cdot \mathbf{q} + \Phi$$

Equation of State for a Perfect Gas

$$p = \frac{\rho \mathcal{R} T}{M}$$



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 개요

$$\tau_{ij} = \mu \left(2 S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right) \quad ; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad ; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad i, j = 1, 2, 3$$

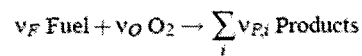
$$\begin{aligned} \Phi &\equiv \tau_{ij} \cdot \nabla \mathbf{u} \equiv \mu \left(2 S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right) \\ &= \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] \end{aligned}$$



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 개요

■ Combustion Reaction



The mixture fraction Z is defined as:

$$Z = \frac{s Y_F - (Y_O - Y_O^\infty)}{s Y_F^\infty + Y_O^\infty} \quad ; \quad s = \frac{\nu_O M_O}{\nu_F M_F}$$

The mixture fraction satisfies the conservation law

$$\rho \frac{DZ}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla Z$$



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 개요

■ Radiative Transport Equation

$$s \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{x}, s) = -[\kappa(\mathbf{x}, \lambda) + \sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)]I(\mathbf{x}, s) + B(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(s, s') I_\lambda(\mathbf{x}, s') d\Omega'$$

$I_\lambda(\mathbf{x}, s)$ is the radiation intensity at wavelength λ .

s is the direction vector of the intensity.

$\kappa(\mathbf{x}, \lambda)$ and $\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)$ are the local absorption and scattering coefficients

$B(\mathbf{x}, \lambda)$ is the emission source term



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 결과항목(Gas Phase)

Quantity	내용	단위
DENSITY	농도	Kg/m ³
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) ²
HRRPUV	단위체적당 Heat Release Rate	kW/m ³
MIXTURE_FRACTION	혼합물 분율	kg/kg
DYNAMIC_VISCOSITY	점성계수	kg/m/s
KINEMATIC_VISCOSITY	동점성계수	m ² /s
DIVERGENCE	발산	s ⁻¹
WMPUV	단위체적당 물(Water) 질량	kg/m ³
WATER VAPOR	수증기 질량 분율	kg/kg

FDS 결과항목(Gas Phase)

Quantity	내용	단위
oxygen	산소(O ₂) 체적 분율	mol/mol
oxygen mass fraction	산소(O ₂) 질량 분율	kg/kg
fuel	연료 체적 분율	mol/mol
nitrogen	질소(N ₂) 체적 분율	mol/mol
water vapor	수증기(H ₂ O) 체적 분율	mol/mol
carbon dioxide	이산화탄소(CO ₂) 체적 분율	mol/mol
carbon monoxide	일산화탄소(CO) 체적 분율	ppm
soot volume fraction	매연 체적 분율	ppm
soot density	매연 입자 농도	mg/m ³
extinction coefficient	빛 단절 계수	1/m
visibility	가시거리	m
DROPLET_FLUX_X, _Y, _Z	x, y, z방향의 물(Water) 유량	kg/m ² /s



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 결과항목(Solid Phase)

Quantity	내용	단위
RADIATIVE_FLUX	정미 복사 열유속	kW/m ²
CONVECTIVE_FLUX	고체로의 대류 열유속	kW/m ²
HEAT_FLUX	고체로의 정미 열유속	kW/m ²
GAUGE_HEAT_FLUX	찬 벽에 대한 등가 열유속	kW/m ²
INCIDENT_HEAT_FLUX	투입 열 유속	kW/m ²
WALL_TEMPERATURE	벽 온도	°C
INSIDE_WALL_TEMPERATURE	내부벽 온도	°C
BURNING_RATE	단위면적당 질량손실율	kg/m ² /s
PRESSURE_COEFFICIENT	압력계수	-
WMPUA	단위면적당 수(Water) 질량	kg/m ²
WCPUA	단위면적당 수냉각(Water Cooling)량	kW/m ²

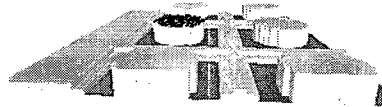


마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 계산 결과 Animation

- Particle Animation
 - Tank farm
 - Crude oil

NIST

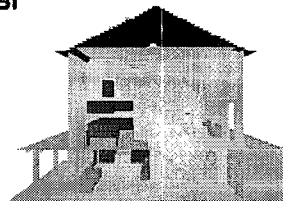


마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 계산 결과 Animation

- 3D Smoke and Fire
 - House

NIST



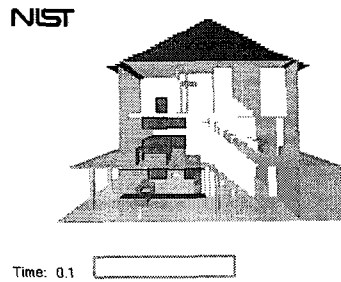
Time: 0.1 



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 계산 결과 Animation

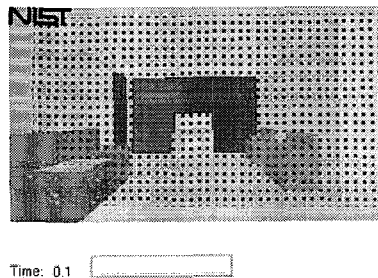
- Temperature Contour Slice
 - House



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 계산 결과 Animation

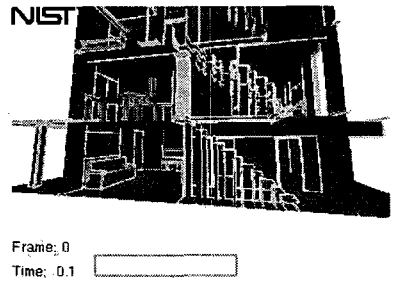
- Velocity Vector Slice
 - House



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 계산 결과 Animation

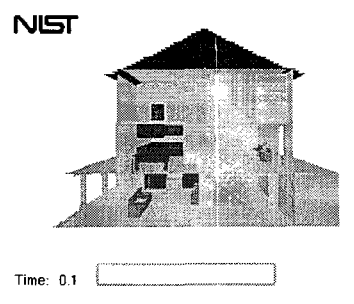
- Boundary Surface
 - House
 - Wall Temperature



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 계산 결과 Animation

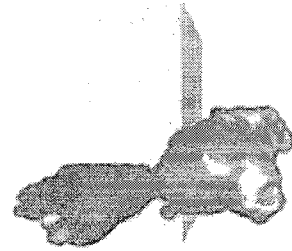
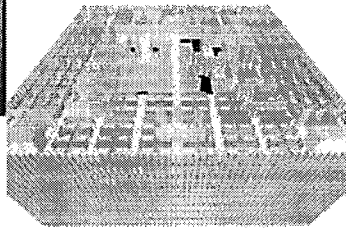
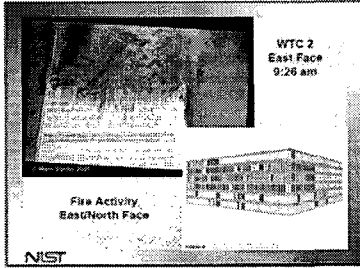
- Iso-surface
 - House
 - Mixture fraction



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ World Trade Center Investigation



A computer simulation of the WTC South Tower (2 WTC) fireball seconds after impact of the second aircraft.

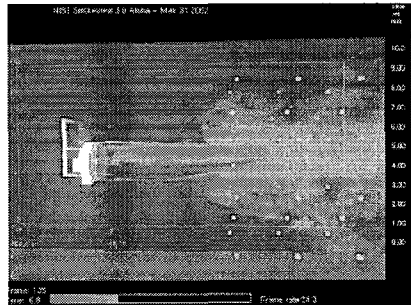
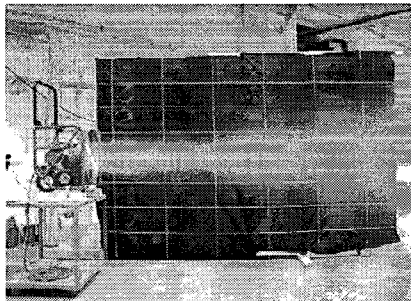
Mock up of WTC Tower 1 in FDS/Smokeview.



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ PPV Fan Efficiency Test



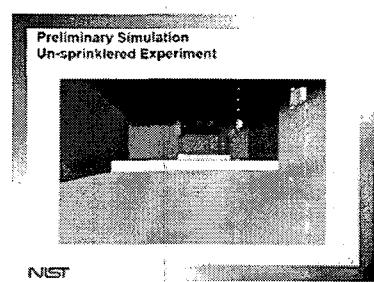
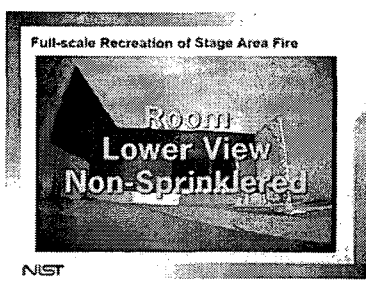
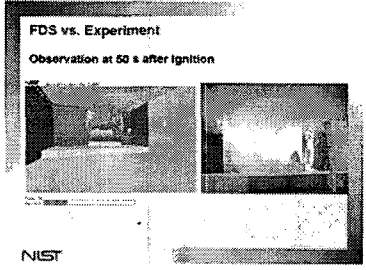
Experiment's characterizing PPV fan flow (a) and corresponding model simulation using FDS/Smokeview (b).



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

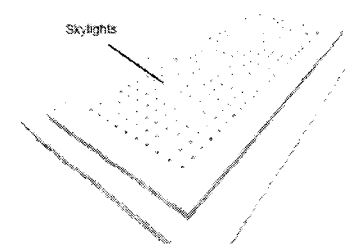
- Nightclub fire reconstruction
 - Full scale recreation
 - FDS simulation



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

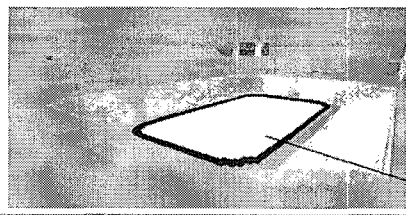
FDS 실제 적용 사례

- 2006 Olympic Games Ice Hockey Stadium



2006 Olympic Games Ice Hockey Stadium, Turin, Italy

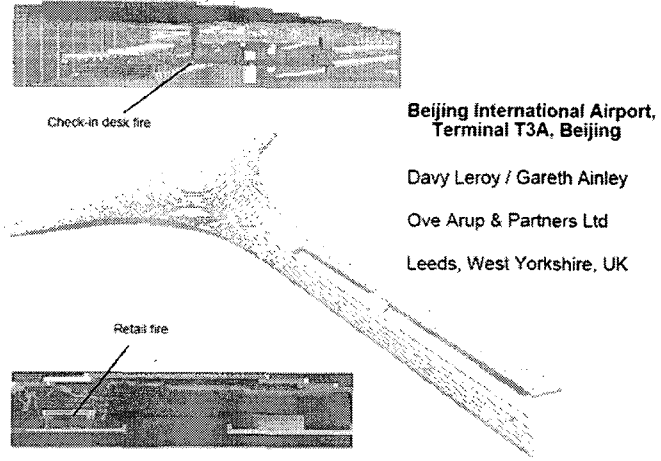
Davy Leroy
Ove Arup & Partners Ltd
Leeds, West Yorkshire, UK



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

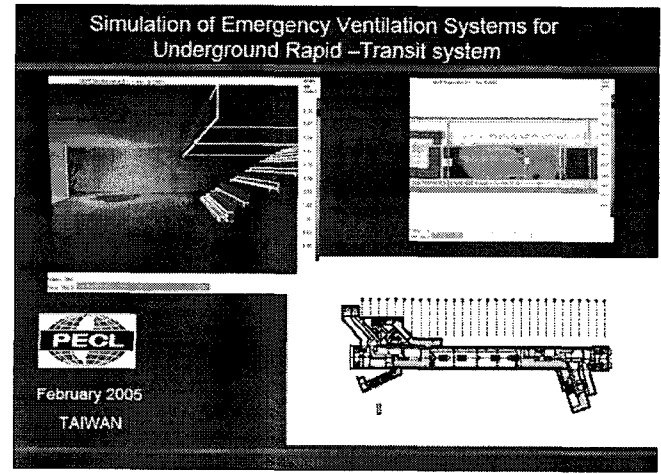
■ Beijing Int. Airport, Terminal



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Emergency Ventilation System

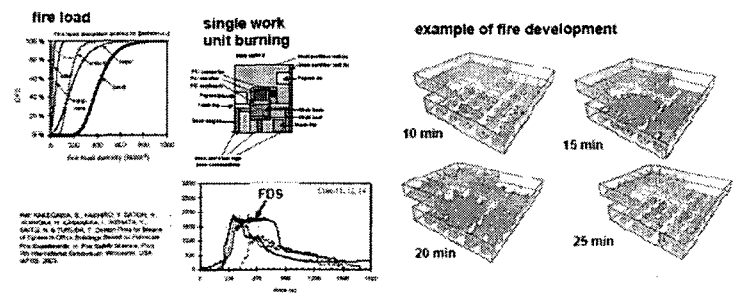


마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Open-space Office Building

- OBJECTIVE OF THE STUDY:
 - Finnish Fire Safety Engineering Guidelines for office building fire design



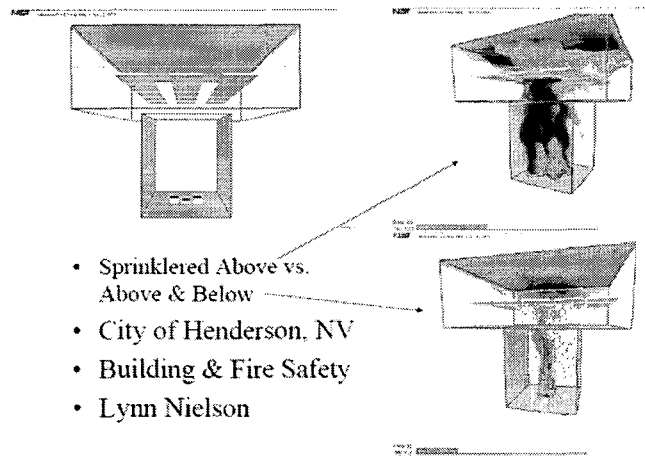
Ref. Hietanen, J. Fire safety design of an office building using FDS field modeling. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2005. VTT Working Papers, to be published. Copyright © VTT 2005. 19.1.2004



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Sprinkler Obstruction Study



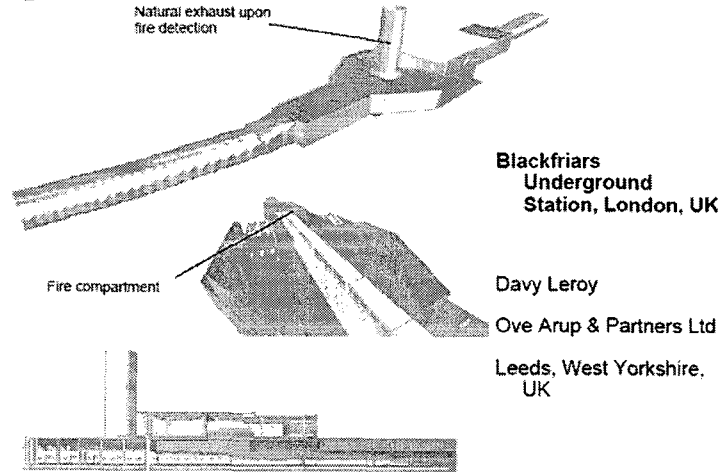
- Sprinklered Above vs. Above & Below
- City of Henderson, NV
- Building & Fire Safety
- Lynn Nielson



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

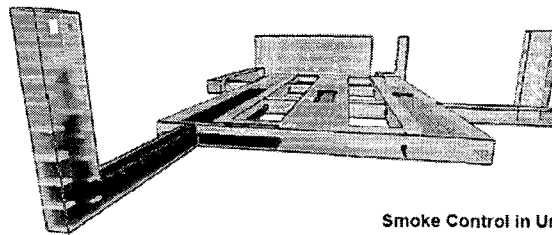
■ Underground Station



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Underground Parking Space



Smoke Control in Underground Parking Space

Mr. Simo Hostikka

VTT Building and Transport

Espoo, Finland

Time: 1705.0

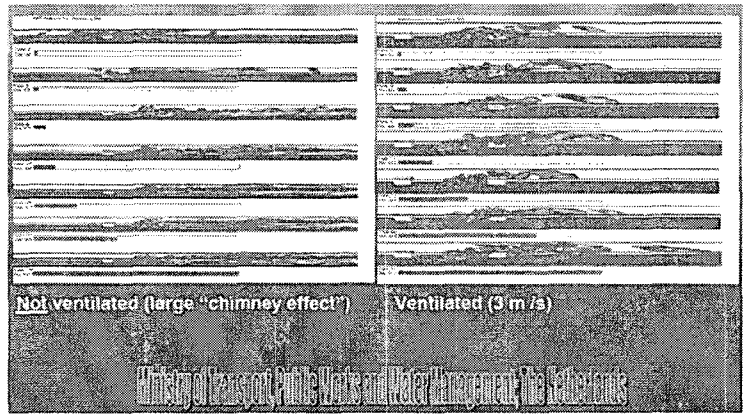
Copyright © VTT



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Road Tunnel

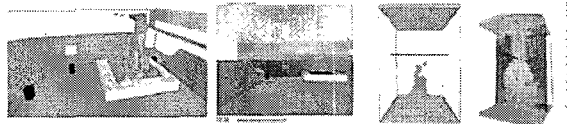
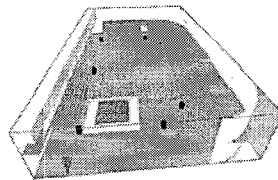
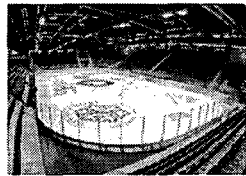


마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Multi-purpose Arena

- Lappi Arena in Rovaniemi, Finland
- Objective: performance-based fire-safety design using the FDS



Ref: Hakkarainen, T. & Miettinen, J. Fire safety design of a large-space building using FDS field modeling. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2006. VTT Working Paper's, to be published.
Copyright © VTT 2005 18.12.2004



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Large Pool Fire

- FDS Model based on large-scale pool fire (50 foot diameter) experiments conducted by CSE of New Mexico Tech
- A 15 MPH wind was recorded in the experiments and included in the simulation
- The experiment tested the response of large sheets of glass to the blaze
- A 25 meter tall, 50 meter long building was added to one simulation to determine what response the entire building would have to fire

Project Team:
 Jason A. Sutula, MSFPE, P.E.*
 Richard J. Koby, PhD, P.E.
 Michael S. Klassen, PhD, P.E.
 Maclain Holton

Fire Hazard Analysis
 *jsutula@csefire.com

Combustion Science & Engineering, Inc. Past and Present Fire Dynamics Simulator Projects



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교

FDS 실제 적용 사례

■ Tank Fire

Model constructed to include three tanks with surrounding sites as well as a pump station and nearby roadway

Model area covers approximately 160,000 square meters

For the fire scenario, the storage tank roof was removed, the fire was allowed to burn inside the tank, and a 10 MPH wind was included to blow from behind the large tank toward the pump station

The results of the model were used to determine the potential hazardous effects to life saving personnel located at the fire truck locations as well as the damage potential to the tank pumping station from the tank fire

Project Team:
 Jason A. Sutula, MSFPE, P.E.*
 Andrew Hamer, P.E.
 Maclain Holton

Fire Hazard Analysis
 *jsutula@csefire.com

Combustion Science & Engineering, Inc. Past and Present Fire Dynamics Simulator Projects



마이크로 생체/유체 연구실 @ 부산대학교