

수직벽화재의 수치 시뮬레이션

II. 프로판 화재

Numerical Simulation of Vertical Wall Fires

II. Propane Fire

박외철[†] · 아노드 트루베*

Woe-Chul Park[†] · Arnaud Trouve*

[†]부경대학교 공과대학 안전공학부

*Dept. of Fire Protection Engineering, University of Maryland, College Park, Maryland, USA
(2008. 1. 16. 접수/2008. 9. 11. 채택)

요 약

높이 1 m의 수직벽면에서 3 g/m²-s로 연소하는 프로판 수직벽 화재에 대한 수치모사를 수행하였다. 본 연구의 목적은 자연대류에서의 검증결과를 확인하고, 수직벽 화재의 수치모사의 결과를 이전의 연구와 비교하는 것이다. C_s=0.2일 때 유동이 층류 경계층으로 나타났지만, C_s=0.1일 때는 난류 경계층임을 확인하였다. z 방향 속도로부터 자연대류에서와 마찬가지로 난류혼합이 부족한 것으로 나타났고, 온도와 속도의 분포가 실험 및 이전의 시뮬레이션과 비교적 잘 일치하였다. 특히 x 방향 속도가 실험과 매우 잘 일치함으로써 경계층으로 공기유입이 잘 예측됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Numerical simulation was carried out for a propane fire of mass transfer rate 3 g/m²-s on a 1m high vertical wall. The objectives of this study are to confirm the outcomes of evaluation of the simulator through simulation of natural convection, and to compare the results of the wall fire with those of previous studies. It was confirmed that the simulated boundary layer was laminar at C_s = 0.2 while it was turbulent at C_s = 0.1. The z direction velocity showed lack of turbulent mixing as seen in the natural convection case, and the profiles of temperature and velocities were in relatively good agreement with those of experiment and previous simulation. It was found that the air entrainment into the boundary layer was well predicted.

Keywords : Propane gas, Vertical wall fire, Turbulent boundary layer, Velocity profile, Temperature profile, Numerical simulation

1. 서 론

수직벽 화재가 발생하면 부력에 의해 화재가 급속히 확산된다. 수직벽 화재에 대한 연구 중 Annarumma 등¹⁾은 프로판가스 수직벽 화재와 풀(pool)화재 및 수직벽 화재-풀화재 조합의 세 가지 화재에 대한 실험과 k-e 난류모델을 사용한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Wang 등²⁾은 이 실험과 동일한 조건에서 k-e 난류모델과 대와동모사(large eddy simulation, LES)³⁾로 수치 시뮬레이션을 수행하였고, LES의 결과는 실험과 잘 일

치하였으나 k-e난류모델은 적합하지 않음을 확인하였다. 그러나 LES 시뮬레이션 중 수직벽 화재에서는 난류 혼합이 부족한 것으로 나타났고, 특히 유속 u가 실제와 달라 경계층으로의 공기유입(air entrainment)을 예측하는데 실패하였다.

본 연구는 Annarumma 등¹⁾의 실험과 Wang 등²⁾의 시뮬레이션 중 프로판 가스 수직벽 화재에 대한 수치모사로, LES를 기본으로 한 Fire Dynamics Simulator (FDS)⁴⁾ v5.0.3를 사용하였다. I에서는 등온 수직벽 난류 자연대류의 시뮬레이션을 통해 FDS를 검증하였다. Tsuji와 Nagano⁵⁾의 자연대류에 관한 실험과 비교한 결과, 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant) C_s의 기

[†] E-mail: wcpark@pknu.ac.kr

본값인 0.2에서는 난류 경계층의 시뮬레이션이 불가능하였고, $C_s = 0.1$ 일 때 속도와 온도분포가 실험과 잘 일치하였다. 수직벽 위의 자연대류에서는 벽과 주위 공기 사이의 온도차이에 따른 부력으로 유동이 발생하고 층류-천이-난류 경계층이 형성된다. 이러한 자연대류에서의 경계층의 형성은 수직벽 화재에서의 경계층 형성과 매우 유사하지만, 수직벽 화재에서는 가연성물질의 연소가 유동을 일으키므로 수직벽 화재의 수치모사에 연소모델이 사용된다. 따라서 연소가 포함된 수직벽 화재에 FDS를 적용하기 위해서는 I에서의 검증결과를 확인할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 난류 자연대류에서의 검증결과를 수직벽 화재의 수치 시뮬레이션으로 확인하고, 이전의 실험¹⁾ 및 시뮬레이션²⁾과 비교하는 것이다. 이를 위해 실험과 동일한 조건하에서 계산한 속도분포 및 온도분포를 비교하였다.

2. 연구방법

비교대상 실험¹⁾의 프로판 가스 버너는 높이 1 m의 수직벽으로부터 단위면적당 질량유량 $3 \text{ g/m}^2\text{-s}$ 의 프로판(C_3H_8) 가스가 방출되어 연소하는 구조이다. 본 연구에서도 실험과 동일하게 높이를 1 m로 하였다. x 방향과 y 방향의 계산영역 크기는 계산영역의 크기에 무관한 결과를 얻을 수 있도록 x 방향 0.3 m, y 방향 0.15 m로 하였다. I의 자연대류와 달리 $z=0$ 에 바닥이 존재하며, 프로판 가스 버너와 좌표축은 Figure 1과 같다.

본 연구의 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식, 이상기체의 상태방정식으로 I에 주어져 있다. 수직벽면과 바닥면에서는 비활조건(no slip condition)에 따라 속도가 0이며, 수직벽은 단열, 바닥면과 주위온도는 20°C 로 하였다. 이에 따라 속도와 온도의 경계조건은 다음과 같다.

$$\mathbf{u}(0, y, z) = 0, \quad \partial T / \partial x(0, y, z) = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{u}(\infty, y, z) = 0, \quad T(\infty, y, z) = 20^\circ\text{C} \quad (2)$$

$$\partial \mathbf{u} / \partial y(\pm 0.075 \text{ m}, z) = \partial T / \partial y(\pm 0.075 \text{ m}, z) = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(x, y, 0) = 0, \quad T(x, y, 0) = 20^\circ\text{C} \quad (4)$$

여기서 \mathbf{u} 는 속도벡터, T 는 온도이다.

가연성 물질의 화학반응 관련 FDS의 입력 데이터에는 프로판 가스의 물질전달률 $3 \text{ g/m}^2\text{-s}$ 외에 연소열 $46,000 \text{ kJ/kg}$, 프로판 가스 단위질량당 연기발생율(soot yield) 0.024 g/g , 복사열손실율 0.272 등⁴⁾을 사용하였

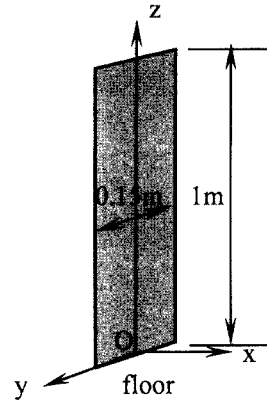


Figure 1. Propane burner and coordinate system.

다. FDS에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등⁴⁾에 기술되어 있다.

I의 자연대류에서는 격자크기 $\Delta x = 5 \text{ mm}$, $\Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$ 를 선정하였으나, 본 연구에서는 I보다 계산영역의 크기가 작으므로 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5 \text{ mm}$ 를 사용하였다. 이에 해당하는 격자수는 $60 \times 60 \times 200$ 이다. 계산시간은 I에서와 같이 50초로 하고, 실험과 같이 $z = 0.23 \text{ m}$, 0.47 m , 0.72 m 에서 평균 온도 및 속도의 분포를 구하였다. 평균 온도와 속도는 각각 30~50초 사이의 속도와 온도의 순시값으로부터 계산하였다.

FDS Source file의 벽 경계조건 부분을 일부 수정한 후 Fortran 90 컴파일러(compiler)로 컴파일 하여 사용하였다. 1회 계산의 소요시간은 Linux기반 PC에서 2 node, 4 processor의 병렬 컴퓨팅으로 14.6시간이다.

3. 결과 및 토의

FDS에 포함되어있는 매개변수 중 스마고린스키 상수 C_s 를 제외한 나머지는 모두 기본값(default)을 수정 없이 그대로 사용했을 때, $C_s = 0.1$ 과 0.2에 대한 온도와 z 방향 속도 w 및 x 방향 속도 u 의 분포를 Figure 2에 비교하였다. $C_s = 0.2$ 인 경우, 온도와 w 의 분포에서 경계층의 두께가 실험에 비해 지나치게 작아 오차가 대단히 크다. 특히 주위로부터 경계층 속으로 유입되는 공기의 x 방향의 속도를 나타내는 u 는 실험과 전혀 다르게 나타났다. 이에 비해 $C_s = 0.1$ 의 경우에는 온도와 속도 모두 실험과 잘 일치함을 알 수 있다. 이 결과로부터 I의 자연대류에서와 같이 실제 경계층은 난류지만 $C_s = 0.2$ 일 때 FDS 시뮬레이션 결과는 층류임을 알 수 있다.

$C_s = 0.2$ 일 때 FDS 시뮬레이션 결과가 층류 경계층

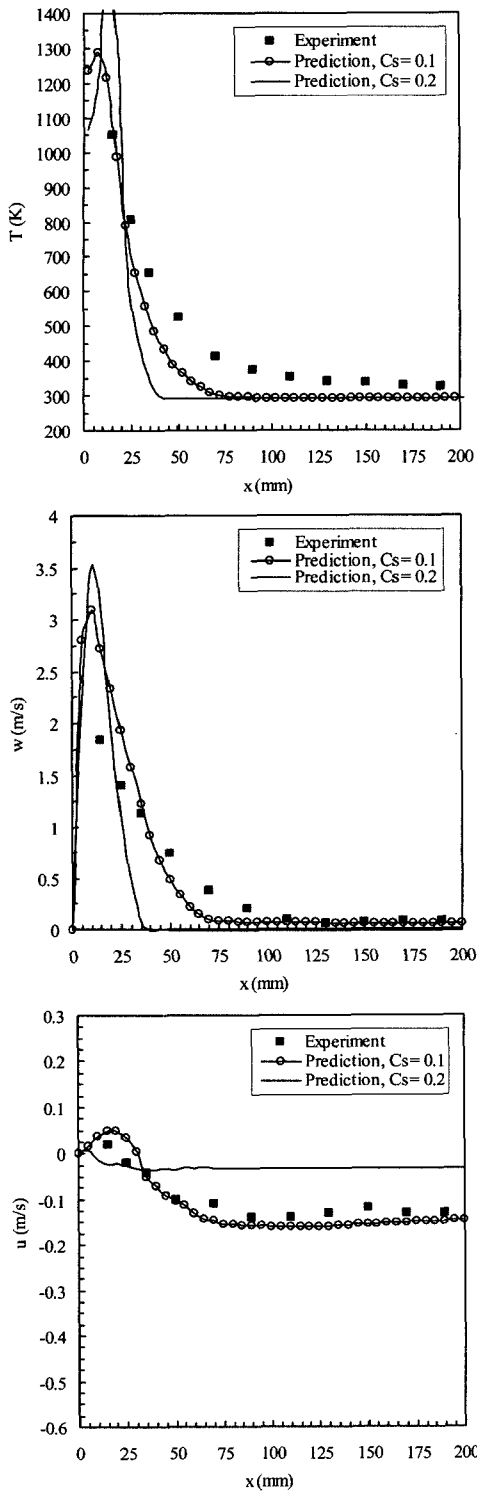


Figure 2. Comparison of mean temperature and velocity profiles at $z = 0.47$ m for $C_s = 0.1$ and 0.2 .

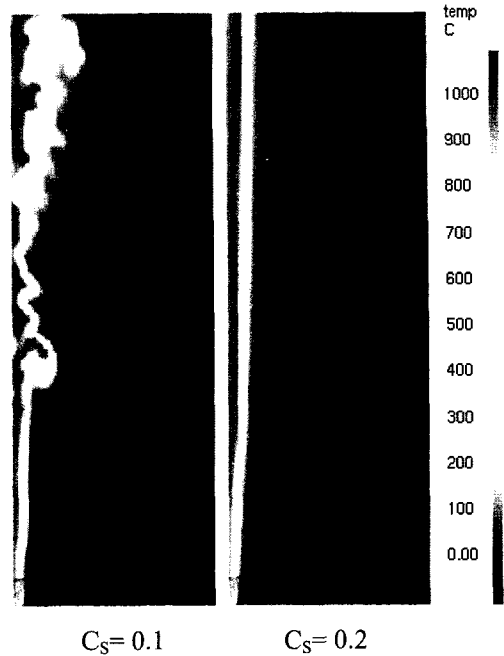


Figure 3. Comparison of temperature contours in the region of $z < 0.5$ m for $C_s = 0.1$ and 0.2 at $t = 50$ s.

임을 확인하기 위해 $C_s = 0.1$ 과 0.2 에 대한 $z < 0.5$ m 부분의 온도 분포(contour)를 Figure 3에 비교하였다. $C_s = 0.1$ 일 때는 선단에서부터 층류-천이-난류로 변하지만, $C_s = 0.2$ 에서는 모두 층류임을 알 수 있다. 그러므로 I^5 의 자연대류에서와 같이 FDS의 기본값을 그대로 사용할 경우, 즉, $C_s = 0.2$ 일 때 수직벽 화재의 시뮬레이션이 불가능하며, $C_s = 0.1$ 이 수직벽 화재의 수치모사에도 적합함을 확인할 수 있다.

격자크기 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5$ mm와 $C_s = 0.1$ 외에 나머지 매개변수는 기본값을 그대로 사용하여 계산한 결과를 실험¹⁾과 Wang 등²⁾의 시뮬레이션과 비교하였다. Figure 4는 각각 $z = 0.23$ m, 0.47 m, 0.72 m에서의 평균 온도분포를 비교한 그림이다. 본 연구의 결과와 Wang 등의 온도분포가 거의 같지만, 벽면에서의 온도는 Wang 등보다 낮다. 또 본 연구에서는 벽면에서 조금 떨어진 경계층 내에서 최고온도가 나타나는데 비해 Wang 등에서는 세 지점 모두 벽면의 온도가 가장 높다. 그러나 프로판 가스의 연소로 경계층이 형성되므로 경계층보다 벽면의 온도가 더 높게 상승할 수 없다.

본 연구와 Wang 등의 시뮬레이션 사이의 이러한 차이는 Figure 5의 z 방향 속도 w 의 분포에서 확인할 수 있는 바와 같이 비활조건(no slip condition)이 원인인 것으로 판단된다. 즉, Wang 등의 연구에서는 벽면에서

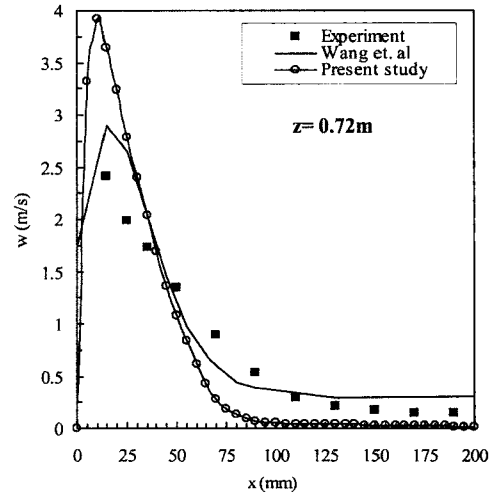
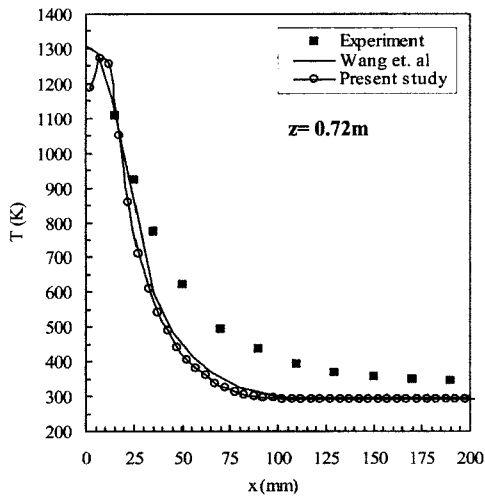
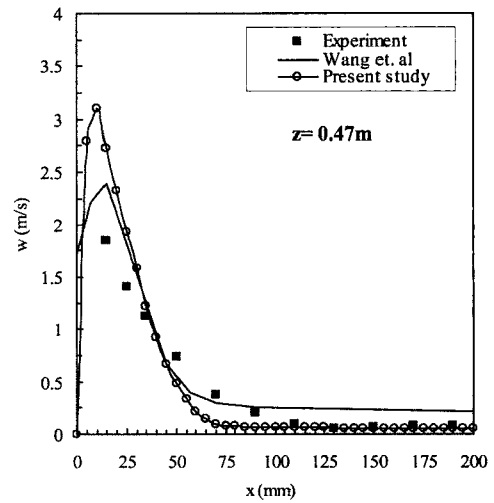
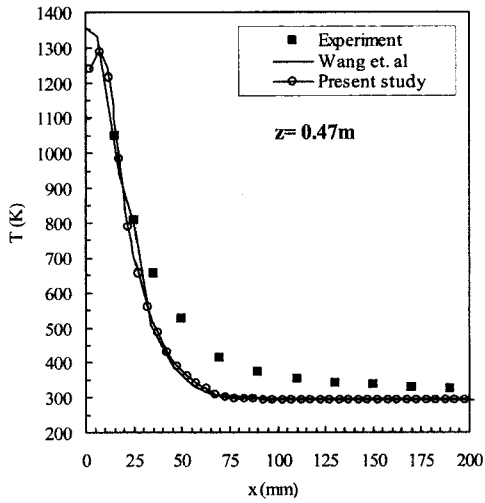
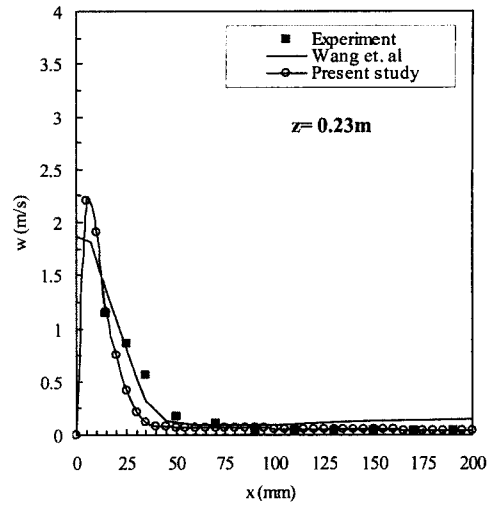
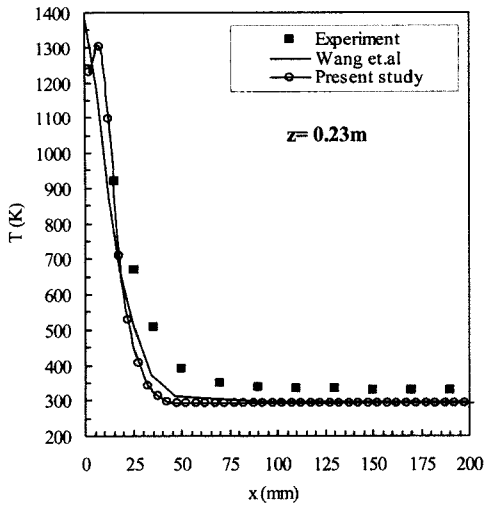


Figure 4. Comparison of mean temperature profiles.

Figure 5. Comparison of mean w-velocity profiles.

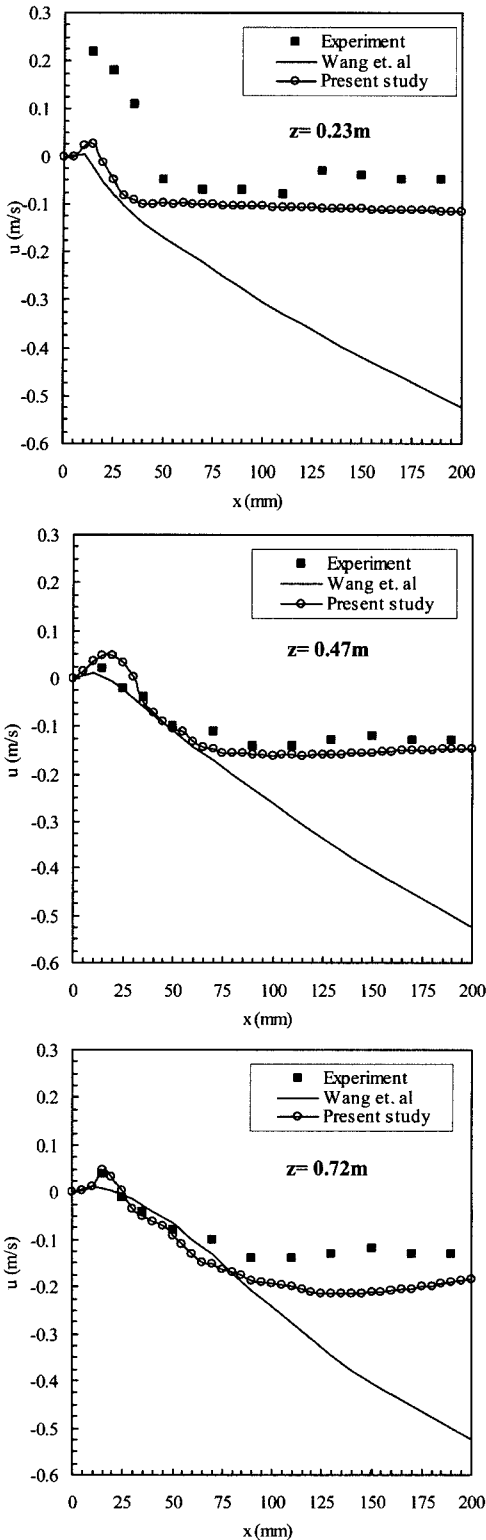


Figure 6. Comparison of mean u-velocity profiles.

의 속도가 0이 아니므로 속도의 경계조건인 비활조건을 만족하지 못하기 때문이다. 이에 비해 본 연구에서는 세 위치 $z = 0.23\text{ m}$, 0.47 m , 0.72 m 에서 모두 벽면에서 비활조건을 만족함을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서는 $x = 200\text{ mm}$ 부근에서 속도가 0으로 접근해 실험과 일치하지만, Wang 등의 시뮬레이션에서는 속도가 0에 접근하지 않거나 오히려 약간 증가하였다. 이것은 물리적으로 불가능하다. w의 분포는 실험과 대체로 일치하지만, I의 자연대류에서와 마찬가지로 난류혼합이 부족함을 확인할 수 있다.

한편, 경계층 밖에서 경계층 속으로 공기유입(air entrainment)이 일어남에 따라 x 방향 속도 u가 높이 z에 따라 다르게 된다. Figure 6의 u 분포에서는 본 연구의 결과가 실험과 잘 일치하므로, 공기유입을 잘 예측함을 의미한다. 그러나 Wang 등의 시뮬레이션에서는 수직벽면에서 거리가 멀어질수록 공기유입이 증가하는 것으로 나타나 물리적으로 타당하지 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

난류 자연대류에 대한 전산유체역학 시뮬레이터의 검증결과를 확인하고 이전의 수직벽 화재 시뮬레이션과 비교하기 위해 수직벽 프로판 가스 화재에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 자연대류와 마찬가지로 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)가 0.2일 때 난류 수직벽 화재의 시뮬레이션이 불가능함을 확인하였고, 0.1이 적정함을 확인하였다. 프로판 가스 수직벽 화재의 시뮬레이션 결과, 온도와 속도의 분포가 실험과 비교적 잘 일치하였다. 특히 이전의 시뮬레이션에서 오차가 컸던 경계층 밖으로부터의 공기유입(air entrainment)을 잘 예측함을 알 수 있었다. 자연대류에서와 같이 난류혼합이 부족한 것으로 나타나 시뮬레이터의 개선이 필요함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 부경대학교 연구년 교수 지원 사업에 의하여 연구되었음(과제번호 PS-2007-017).

참고문헌

1. M.O. Annarumma, J.M. Most and P. Joulain, "On the Numerical Modeling of Buoyancy-dominated Turbulent Vertical Diffusion Flames", *Combust. Flame*, Vol.85, pp.403-415(1991).

2. H.Y. Wang, P. Joulain and J.M. Most, "On the Numerical Modeling of Buoyancy-dominated Turbulent Diffusion Flames by Using Large-eddy Simulation and k-e Turbulence Model", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.176, pp.1007-1034(2004).
3. J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations I. The Basic Experiment", *Monthly Weather Review*, Vol.91, p.99 (1963).
4. K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum and R. Rehm, *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide*, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.(2007).
5. T. Tsuji and Y. Nagano, "Characteristics of a Turbulent Natural Convection Boundary Layer along a Vertical Flat Plate", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.31, No.8, pp.1723-1734(1988).
6. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd ed., p.311(2002).