

# 수직벽화재의 수치 시뮬레이션

## I. 수직벽 난류자연대류

### Numerical Simulation of Vertical Wall Fires

#### I. Turbulent Natural Convection Along Vertical Wall

박외철<sup>†</sup> · 아노드 트루베\*

Woe-Chul Park<sup>†</sup> · Arnaud Trouve\*

<sup>†</sup>부경대학교 공과대학 안전공학부

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

#### 요 약

수직벽 화재의 연구에 사용할 전산유체역학 시뮬레이터를 검증하기 위해 수직벽 자연대류의 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 높이 4 m의 등온 수직벽에 형성된 난류 경계층에서의 속도 및 온도 분포의 계산치를 측정치와 비교하였다. 시뮬레이터에 포함된 매개변수의 기본값을 그대로 적용한 경우, 경계층 유동이 층류로 나타남에 따라 난류 자연대류를 예측하는데 실패하였다. 매개변수의 조사를 통해 격자크기  $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$ 와 대와동모사(large eddy simulation)의 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)  $C_s = 0.1$ 을 선정하였다. 난류혼합이 미흡하였지만, 벽면근처에서의 속도분포와 최대속도, 그리고 난류 경계층 내 온도분포가 실험과 잘 일치하였다.

#### ABSTRACT

Numerical simulation of natural convection along a vertical wall was carried out to evaluate the computational fluid dynamics simulator, which is to be utilized for study of vertical wall fires. The computed velocity and temperature profiles were compared with measurements over the turbulent boundary layer formed along the wall of 4 m high and constant temperature. It turned out that the simulator with default parameters failed to predict the turbulent natural convection showing the boundary layer flow laminar. The grid size  $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$  and Smagorinsky constant of the large eddy simulation  $C_s = 0.1$  were chosen through parametric investigations. Though turbulent mixing was not enough, the velocity distribution near wall, peak velocity, and temperature profile in the turbulent boundary layer agreed well with the measurements.

**Keywords :** Natural convection, Isothermal vertical wall, Turbulent boundary layer, Velocity profile, Temperature profile, Numerical simulation

## 1. 서 론

가연성물질의 수직벽이나 수직벽 표면의 가연성물질이 연소하면 부력으로 화염이 위로 상승하면서 천장이나 벽을 따라 화재가 급속히 확산된다. 수직벽 화재의 특성을 이해하고 화재에 의해 유발된 유동과 열전달에 관한 다양한 정보를 얻기 위해서 수치 시뮬레이션이 필요하다. 수직벽 화재는 풀(pool) 화재와 달리 점성의

영향으로 벽을 따라 경계층을 형성한다. 따라서 수직벽 화재에서 복잡한 과정의 연소를 제외하면 유동 구조가 자연대류와 유사하다.

본 연구는 수직벽 화재에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하기 위한 선행연구로서 수직벽 화재에 사용할 전산유체역학 화재 시뮬레이터인 Fire Dynamics Simulator (FDS)<sup>1)</sup>를 검증하는 것이다. FDS는 국내외에서 화재 시뮬레이션에 널리 사용되고 있고, 대와동모사(large eddy simulation, LES)<sup>2)</sup>를 기본 난류모델로 채택한 소프트웨어이다. 본 연구의 예비조사 결과, FDS의 매개변수 기

<sup>†</sup> E-mail: wcpark@pknu.ac.kr

본값(default)을 수정하지 않으면 수직벽 화재의 시뮬레이션이 불가능하였고, 그 원인이 난류점성계수의 계산에 있는 것으로 밝혀졌다. LES에서 난류점성계수는 격자크기와 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)의 제곱에 비례한다. 따라서 격자크기와 스마고린스키 상수에 대한 조사가 필요하다.

전산유체역학에서 일반적으로 격자크기가 작을수록 오차가 줄어들지만, 연산의 증가에 따른 반올림 오차(round-off error)는 오히려 증가한다. 그러나 격자크기가 작을수록 계산에 소요되는 시간이 급격히 증가한다. 이 때문에, 격자크기의 적정값, 즉, 격자크기가 달라도 계산결과에 영향이 크지 않은 범위 내에서 가장 큰 격자크기를 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 LES에서는 격자크기에 따라 난류점성계수가 달라지므로 격자크기에 무관한 결과를 얻을 수 없다.<sup>3)</sup> 그럼에도 불구하고 비교 가능한 실험결과에 가장 적합한 격자크기를 사용하는 것이 요구된다. Wang 등<sup>4)</sup>은 LES를 이용한 화재 시뮬레이션에서 격자크기를 벽 근처에서는 5 mm, 벽에서 멀리 떨어진 곳은 50 mm로 하였다. 한편, 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)로 0.1~0.2가 사용되어왔는데 Wang 등은 0.21을 사용하였고, FDS에는 0.2가 기본값으로 되어있다.

본 연구의 목적은 수직벽 화재의 연구에 사용할 FDS를 검증하는 것이다. 이를 위해 수직벽 화재와 유사하게 경계층을 형성하지만 연소모델을 필요로 하지 않는 자연대류에 대한 수치모사를 FDS로 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 경계층의 특성에 관한 연구보다는 FDS의 매개변수의 기본값으로 수치 시뮬레이션을 수행하여 FDS를 검증함과 동시에 주요 매개변수의 적정값을 찾는데 초점을 두었다. 비교대상으로 Tsuji와 Nagano<sup>5)</sup>의 난류 자연대류에 대한 실험을 선택하였다. 이 실험에서는 높이 4 m의 수직 동판을 60 °C로 일정하게 유지하여 수직벽에 형성된 난류경계층의 속도 및 온도분포 등을 측정하였다. 본 연구에서는 실험과 동일조건에서 수행한 수치 시뮬레이션의 결과로부터 시간평균 속도분포 및 온도분포를 구하여 측정치와 비교하였다.

## 2. 연구방법

본 연구의 지배방정식은 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식, 이상기체의 상태방정식으로 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h u_j}{\partial x_j} - \frac{Dp}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - q_r \right) + \frac{\partial u_i \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (3)$$

$$p = \rho RT \quad (4)$$

위 식에서  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $u$ 는 속도,  $t$ 는 시간,  $p$ 는 압력,  $g$ 는 중력가속도,  $\tau$ 는 전단응력,  $h$ 는 엔탈피(enthalpy),  $Dp/Dt$ 는 시간에 대한 압력의 물질도함수,  $\lambda$ 는 열전도계수,  $q_r$ 은 복사 열유속,  $T$ 는 온도,  $R$ 은 기체상수를 나타낸다. 엔탈피  $h$ 는

$$h = c_p T \quad (5)$$

로 정의되고  $c_p$ 는 정압비열이다.

대와동모사(large eddy simulation, LES)에서 난류동점성계수  $\nu_t$ 는

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 (2S_{ij}S_{ij})^{0.5} \quad (6)$$

로 계산된다. 이 식에서 격자크기  $\Delta$ 는

$$\Delta = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (7)$$

이고,  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 는 각각  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향 격자크기이다.  $C_s$ 는 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant), 변형율 텐서  $S_{ij}$ 는

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

이다. 식 (6)에서 난류 동점성계수는  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ 와  $C_s$ 의 값에 따라 달라짐을 알 수 있다. 위 식의 해를 구하기 위해 Fire Dynamics Simulator(FDS) v5.0.3를 사용하였다. 이에 관한 자세한 내용은 McGrattan 등<sup>1)</sup>에 기술되어 있다.

비교대상의 실험<sup>5)</sup>에서는 Figure 1과 같이 길이 4 m, 폭 0.5 m의 수직 동판을 일정온도로 유지하여 주위 공기와의 온도 차에 따른 자연대류가 일어나게 하였다. 이에 따라 계산영역의 크기를 높이 4 m,  $x$  방향 0.4 m로 하였다. 실험에서  $x$ ,  $z$ 방향의 2차원이 확보되었음을 고려하여  $y$ 방향 경계조건을 설정하였기 때문에  $y$ 방향의 폭을 0.5 m 대신에 0.2 m로 하였다.  $x$  방향 0.4 m와  $y$  방향 0.2 m는 계산영역의 크기에 대한 조사에서 이보다 훨씬 더 큰 계산영역에서도 결과가 동일함에 따라 선택한 값이다.

실험에서는 측정시간차로 인해 측정위치에 따라 벽 온도와 주위온도가 각각 59.97~60.42 °C, 16.36~16.69 °C로 약간 달랐지만 본 연구에서는 벽온도를 60 °C,

주위온도를 16.5 °C로 하였다. 속도와 온도의 경계조건은

$$u(0, y, z) = 0, T(0, y, z) = 60 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$u(\infty, y, z) = 0, T(\infty, y, z) = 16.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (10)$$

$$\partial u / \partial y(x, \pm 0.1\text{m}, z) = \partial T / \partial y(x, \pm 0.1\text{m}, z) = 0 \quad (11)$$

이다.

FDS에 포함돼있는 매개변수 중 주위온도와 수직벽의 방사율을 제외한 나머지는 기본값을 그대로 적용하여 실험과 비교하였다. 이 결과 기본 매개변수로는 난류 자연대류의 시뮬레이션이 불가능한 것으로 밝혀짐에 따라 난류점성계수의 계산에 직접적인 영향을 미치는 격자크기와  $C_s$ 에 대해 조사하였다. 이어 나머지 매개변수가 속도와 온도에 미치는 영향을 조사하였고, 이 과정에서 격자수  $40 \times 20 \times 400$ (격자크기 10 mm),  $C_s = 0.1$ 를 사용하였다. 온도가 높은 벽으로부터 저온의 주위로 전달되는 복사열을 고려하여 동판인 수직벽면의 방사율을 0.6으로 하였다. 계산 시작 후 20초에서 속도 및 온도의 변화가 준정상상태에 도달하므로 계산 종료 시간을 50초로 하였다. 비교대상의 실험에서는 동판의 하단에서부터 위로 0.8 m( $z = 0.8$  m)인 지점에서 경계층이 난류로 되었고,  $z = 1.44$  m, 2.54 m, 3.24 m에서 각각 시간평균 유속과 온도 분포를 측정하였다. 이에 따라 본 연구에서도  $z = 1.44$  m, 2.54 m, 3.24 m에서 30~50초 사이의 속도와 온도의 순시값으로부터 평균 속도 및 온도의 분포를 구하였다. 조사한 매개변수 중에서 속도와 온도에 대한 영향이 작은 것으로 나타난 난류

프란틀수(Prandtl number), 난류 슈미트수(Schmidt number), 벽면의 복사율 등에 관한 결과는 제외하고, 가장 영향이 큰 격자크기와 스마고린스키 상수에 대한 결과를 기술하였다.

### 3. 결과 및 토의

FDS에 포함되어있는 매개변수의 기본값을 그대로 사용하여 자연대류의 시뮬레이션을 수행하였다. Figure 2 에는  $z = 3.24$  m에서의  $z$  방향 속도  $w$ 와 온도 분포를 실험과 비교하였다. 속도분포에서 경계층의 두께가 실험에 비해 지나치게 작게 나타나 있다. 또 온도분포 역

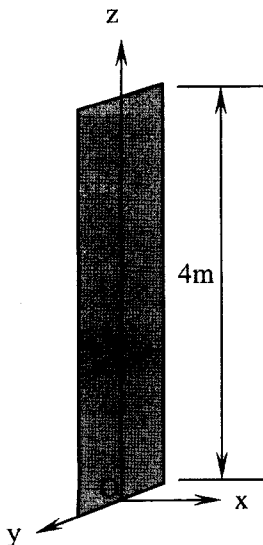
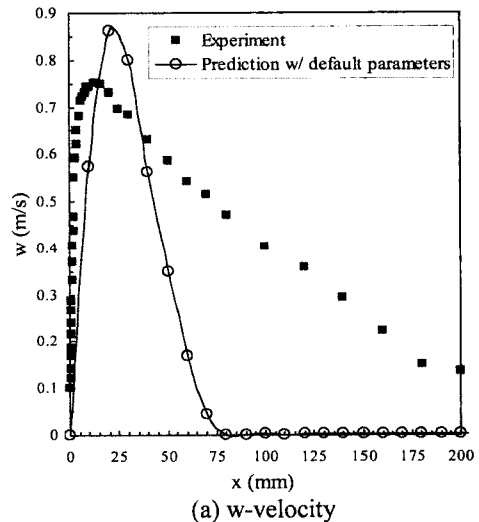
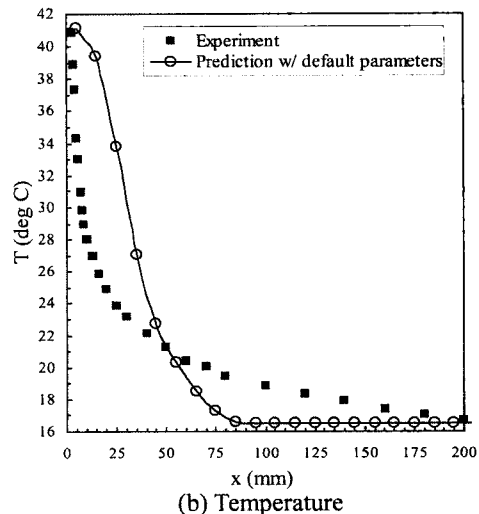


Figure 1. Vertical wall and coordinate system.



(a) w-velocity



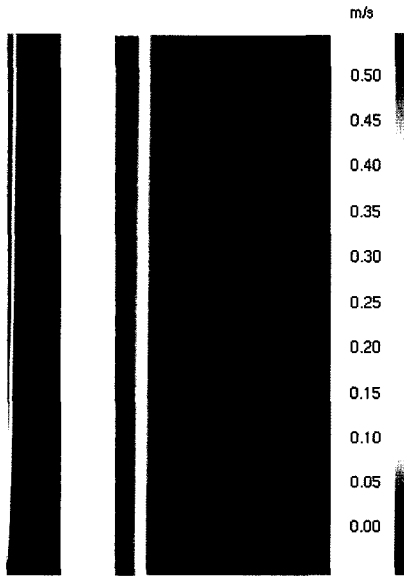
(b) Temperature

Figure 2. Mean velocity and temperature profiles at  $z = 3.24$  m (prediction with  $C_s = 0.2$ ).

시 실험과 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 실험에서의 경계층은 난류이었지만, FDS의 시뮬레이션 결과는 층류 경계층임을 짐작할 수 있다.

FDS의 결과가 층류 경계층임을 확인하기 위해 Figure 3에  $z$  방향 속도의 분포(contour)를 나타내었다. (a)는 계산영역 전체의 모습이고, (b)는  $z = 3\sim 4$  m의 부분을 확대한 것으로, 유체입자의 섞임이 없는 층류 경계층임을 명확하게 나타내고 있다. 비교대상의 실험에서는  $z > 0.8$  m의 경계층이 난류임에도 불구하고 FDS의 결과에서는 전체가 층류이다. 그러므로 FDS의 기본값을 그대로 사용할 경우, 난류 자연대류의 시뮬레이션이 불가능함을 의미하고, 따라서 난류 경계층을 형성하는 수직벽 화재의 시뮬레이션도 불가능할 것임을 암시한다.

이상과 같이 난류 경계층의 시뮬레이션에 실패함에 따라 FDS의 나머지 매개변수에 대해 조사하였다. 그 결과, 난류점성계수의 계산에 원인이 있음을 알 수 있었다. 앞의 식 (6)에 나타나 있는 바와 같이 난류점성계수의 크기는 격자크기와  $C_s$ , 변형율에 의해 결정되는데, 변형율은 시뮬레이터 자체에서 결정된다. 이에 따라 격자크기와  $C_s$ 의 적정값에 대해 조사하였다. 예비 조사를 통해 격자크기에 대한 조사에서는  $C_s = 0.1$ 을,  $C_s$ 에 대한 조사에서는  $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10$  mm을 사용하였다.

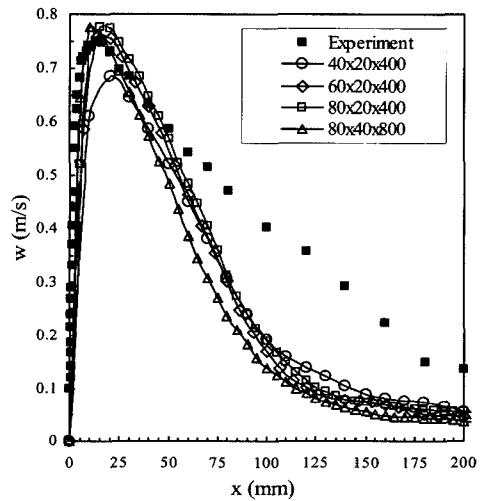


(a)  $z = 0\sim 4$  m (b) enlarged for  $z = 3\sim 4$  m

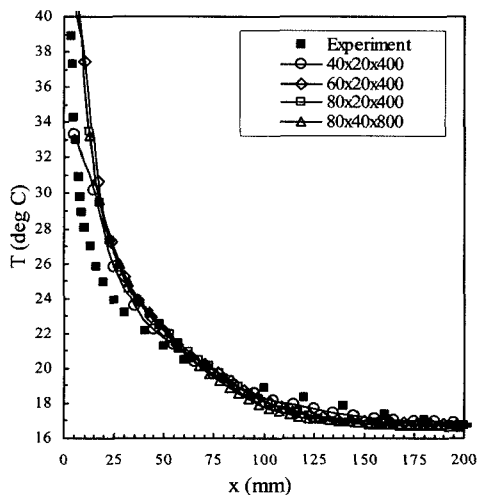
Figure 3. Contour of  $w$ -velocity computed with default parameters.

경계층의 두께는 수직벽의 선단인  $z = 0$ 에서부터  $z = 4$  m까지 위로 올라갈수록 증가하지만, 격자크기가 클수록 경계층 내에 존재하는 격자의 수가 줄어든다. 반면에, 격자크기가 5 mm보다 작은 경우에는 계산소요 시간이 지나치게 길었다. 이에 따라 5~10 mm 크기로 한정하여, 격자수  $40 \times 20 \times 400$  ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10$  mm),  $60 \times 20 \times 400$  ( $\Delta x = 6.67$  mm,  $\Delta y = \Delta z = 10$  mm),  $80 \times 20 \times 400$  ( $\Delta x = 5$  mm,  $\Delta y = \Delta z = 10$  mm),  $80 \times 40 \times 800$  ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5$  mm)의 4가지를 조사대상으로 하였다.

Figure 3은  $C_s = 0.1$ 일 때  $z = 3.24$  m에서 격자크기에 따른  $z$  방향 평균속도와 평균온도의 분포를 실험과 비



(a)  $w$ -velocity



(b) Temperature

Figure 4. Mean velocity and temperature profiles at  $z = 3.24$  m for different grid sizes.

교한 것이다. 격자수가 40×20×400인 경우에는 최고속도가 실험에 비해 낮지만, 이보다 많은 격자수에서는 실험과 잘 일치하고 있다. 또 모든 경우에 경계층의 바깥쪽은 경계층내의 유체와 경계층 밖 유체 사이의 혼합이 부족하여 속도분포에 오차가 크게 나타나있다. 한편, 격자크기가 가장 작아 계산시간이 많이 소요되는 80×40×800의 경우에는 오히려 오차가 크게 나타났다. 평균온도 분포는 속도분포의 오차에도 불구하고 4가지 격자크기 모두 실험과 잘 일치하였다. 이에 따라 격자크기  $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$ 을 적정값으로 선택하였다.

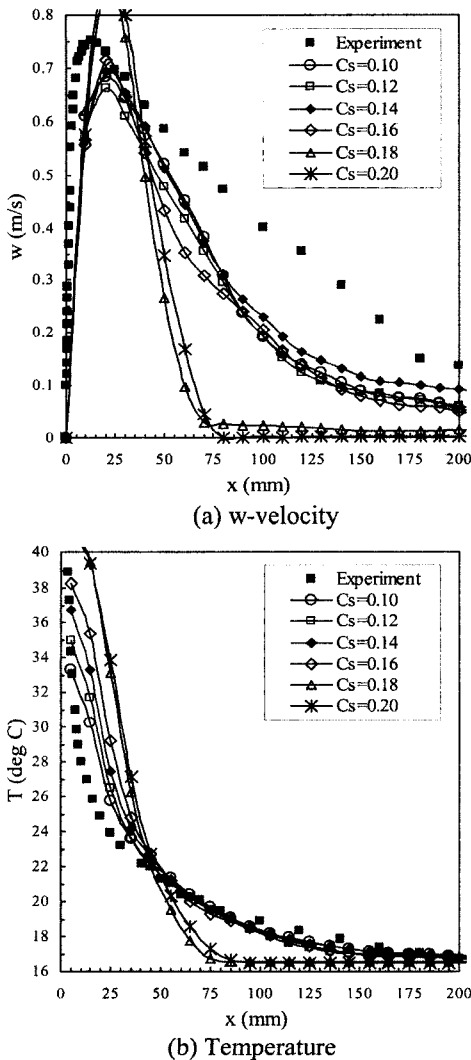
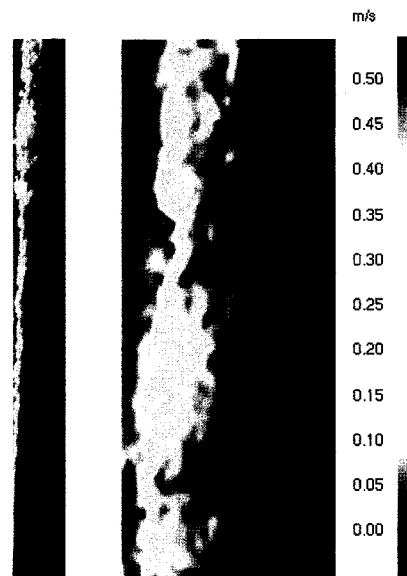


Figure 5. Mean velocity and temperature profiles at  $z = 3.24 \text{ m}$  for different values of Smagorinsky constant.

Figure 5에는  $C_s = 0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2$ 의 6가지의 값에 대해  $z = 3.24 \text{ m}$ 에서의 속도와 온도의 분포를 실험과 비교하였다. 사용한 격자수는 40×20×400 ( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$ )이다.  $C_s = 0.1 \sim 0.16$ 에서는 속도 분포의 차이가 크지 않지만  $C_s$ 의 값이 작을수록 온도 분포의 오차가 작음을 볼 수 있다. 그러나  $C_s = 0.18$ 일 때는  $C_s = 0.2$ 의 경우와 마찬가지로 속도와 온도분포 모두 층류 경계층임을 나타내고 있다. 비교대상의 실험<sup>5)</sup>에서 실제 흐름은 난류이므로,  $C_s$ 가 0.18 이상일 때 계산결과가 전혀 옳지 않음을 알 수 있다.

Figure 6은, Figure 5와 같은 격자크기( $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$ )에서,  $C_s$ 가 0.1일 때  $z$  방향 속도분포를 나타낸 그림이다. (a)는 계산영역 전체이고, (b)는 이 중  $z = 3 \sim 4 \text{ m}$  부분만 확대한 것이다. 이 그림에서 볼 수 있는 불규칙한 섞임과 소용돌이, 3차원으로 특징되는 난류 경계층이  $C_s = 0.2$ 일 때의 층류 경계층(Figure 3)과 확연히 구분된다. 이상의 결과로부터  $C_s = 0.1$ 을 선정하였다.

위에서 선정된  $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$ 와 스마고린스키 상수  $C_s = 0.1$ 를 사용하여 계산한 수직 등온벽 난류 자연대류의 속도와 온도를 실험<sup>5)</sup>과 비교하였다. 실험에서는 각각  $z = 1.44 \text{ m}, 1.92 \text{ m}, 2.54 \text{ m}, 3.24 \text{ m}$ 에서  $z$  방향 속도와 온도를 측정하였으나, 여기서는  $z = 1.44 \text{ m}, 2.54 \text{ m}, 3.24 \text{ m}$ 의 세 곳에서의 결과를 제시하였다.



(a)  $z = 0 \sim 4 \text{ m}$  (b) enlarged for  $z = 3 \sim 4 \text{ m}$

Figure 6. Contour of  $w$ -velocity computed with  $C_s = 0.1$ .

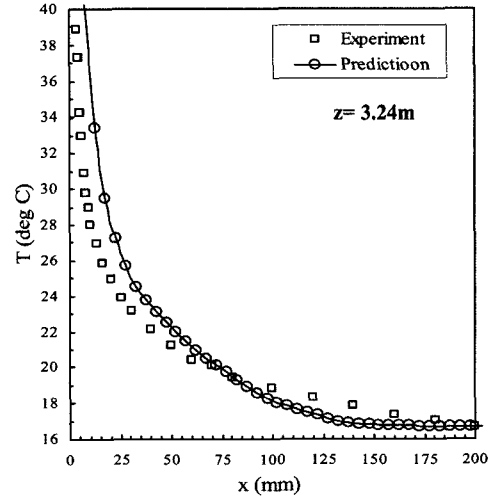
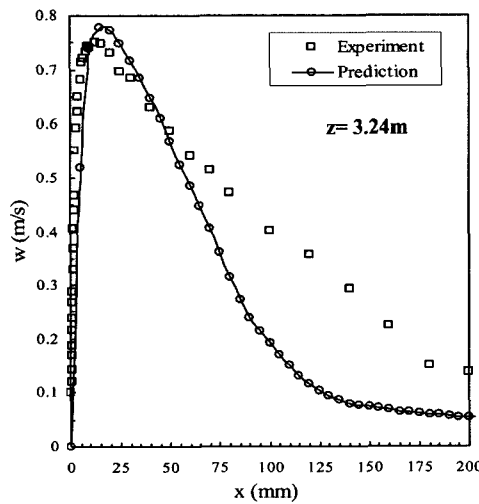
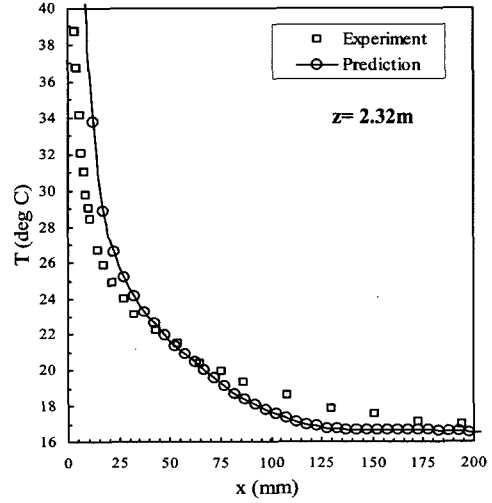
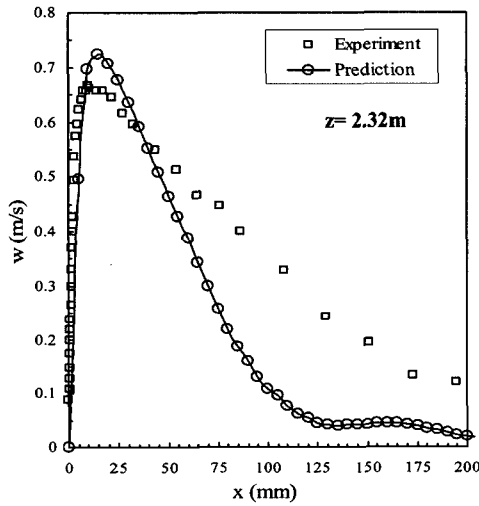
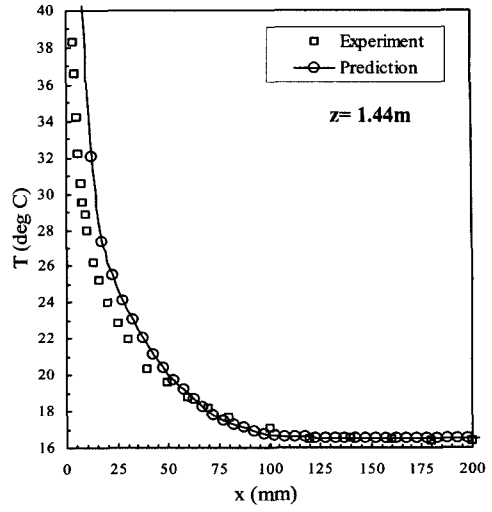
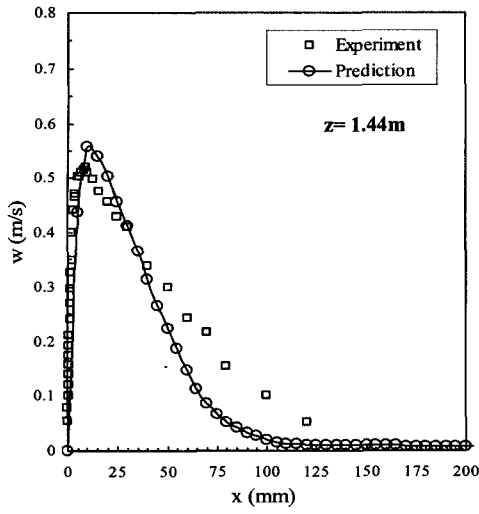


Figure 7. Comparison of mean velocity profiles.

Figure 8. Comparison of mean temperature profiles.

Figure 7은 z 방향 속도 w를 비교한 그림이다. 세 위치 모두 경계층의 벽 근처에서는 실험과 잘 일치하고 있다. 최대속도의 오차가 크지 않다. 이에 비해 경계층의 외측에서는 측정치에 비해 속도가 낮게 나타났다. 경계층 바깥쪽은 경계층내의 유체와 경계층 밖 유체 사이의 혼합이 미흡함을 의미한다.

Figure 8의 온도분포는 세 곳 모두 비록 경계층의 안쪽에서는 실험에 비해 높고 바깥쪽에서는 낮지만, 실험과 잘 일치함을 알 수 있다. 만일 경계층내의 유체와 경계층 밖의 유체 사이에 혼합이 더 증가한다면 온도분포도 개선될 것이다. 그러므로 앞으로 남은 과제는 경계층 두께가 더 증가하도록 혼합을 증대시키도록 개선하는 것이다.

격자크기와 스마고린스키 상수를 제외한 벽의 방사와 복사열전달 관련 매개변수, 난류 프란틀수(Prandtl number), 난류 슈미트수(Schmidt number) 등 나머지 매개변수의 영향은 크지 않음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

수직벽 화재의 수치모사에 사용할 사용할 시뮬레이터를 검증하기 위해 등은 수직벽의 자연대류에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 난류 경계층의 속도 및 온도분포를 실험과 비교한 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)  $C_S=0.2$ 를 포함한 시뮬레이터의 기본값으로는 자연대류의 시뮬레이션이 불가능하였다. 난류 점성계수의 계산에 실패함으로써 난류 경계층이 충류로 예측됨을 확인하였다.

2) 매개변수에 대한 조사를 통해 격자크기  $\Delta x = 5 \text{ mm}$ ,  $\Delta y = \Delta z = 10 \text{ mm}$ 와 스마고린스키 상수  $C_S=0.1$ 가 선정되었다.

3) 벽 근처에서 속도분포와 최고속도 및 온도분포가

실험과 잘 일치하였다.

4) 난류혼합이 부족한 것으로 나타나 이에 대한 개선이 필요함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. 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).
2. J. Smagorinsky, "General Circulation Experiments with the Primitive Equations I. The Basic Experiment", Monthly Weather Review, Vol.91, p.99 (1963).
3. D.G. Barhaghi, L. Davidson and R. Karlsson, "Large-eddy Simulation of Natural Convection Boundary Layer on a Vertical Cylinder", Int'l J. Heat. Fluid Flow, Vol.27, pp.811-820(2006).
4. H.Y. Wang, P. Joulain and J. 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)
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). Data sets are available at Data-Base on Turbulent Heat Transfer, <http://tmdb.ws.tn.tudelft.nl/database/>