

FDS를 사용한 수직벽 화재 시뮬레이션의 문제점

박외철

부경대학교 안전공학부

Shortcomings in Simulation of a Vertical Wall Fire by Using FDS

Park, Woe-Chul

Division of Safety Engineering, Pukyong National University

요 약

화재시뮬레이션용 소프트웨어인 FDS (Fire Dynamics Simulator)의 수직벽 화재 시뮬레이션에 있어서의 문제점을 파악하기 위해, 수직벽 프로필렌 화재에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 성능기반설계 등에 널리 사용되고 있는 이 전산유체역학 모델에 포함되어있는 주요 매개변수의 기본값을 사용한 경우, 수직벽 화재에서는 정확도가 매우 낮음을 확인하였다. 프로필렌 연소율 $10.08\text{g/m}^2\text{-s}$ 과 $29.29\text{g/m}^2\text{-s}$ 에 대한 주요 매개변수의 조사를 수행한 결과, 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)가 기본값인 0.2에서 수직벽에 형성된 경계층이 층류로 예측되었다. 스마고린스키 상수가 0.1일 때 온도분포가 실험과 비교적 잘 일치하였으나 벽면에서의 열유속에는 큰 오차가 있음을 확인하였다.

1. 서 론

부력에 의해 급속히 확산되는 수직벽 화재를 전산유체역학 모델로 모사하기 위해 FDS v5.0.3 (McGrattan et al., 2007)를 등은 수직평판 위 난류자연대류(박외철과 Trouve, 2008a)와 연소율 $3\text{g/m}^2\text{-s}$ 의 프로판 수직벽 화재(박외철과 Trouve, 2008b)에 적용하였다. 이 두 연구에서 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant) C_s 의 기본값인 0.2에서는 난류 경계층의 시뮬레이션이 불가능하였고, 그 원인이 난류점성계수의 계산에 있음을 확인하였다. 또한, $C_s = 0.1$ 일 때 속도와 온도분포가 실험과 잘 일치하였다.

이에 따라 더 넓은 범위의 연소율에서 이 문제점을 확인하고 유동방향 속도 및 온도뿐만 아니라 벽면에서의 열유속 예측에 대한 확인도 필요하다. 본 연구의 목적은 FDS를 이용한 수직벽 화재 시뮬레이션의 문제점을 파악하는 것이다. 이를 위해 두 가지 프로필렌 연소율 $10.08\text{g/m}^2\text{-s}$ 과 $29.29\text{g/m}^2\text{-s}$ 에 대한 시뮬레이션 결과를 실험(de Ris, 2008)과 비교하였다. 실험과 동일한 조건하에서 주요 매개변수의 값에 대한 시뮬레이션 결과를 실험에서 측정된 버너 중심에서의 온도분포와 수직방향의 열유속 분포와 비교하였다.

2. 연구방법

비교대상의 실험(de Ris, 2008)에서는 높이 400mm의 수직평판 버너(평판의 한쪽 표면)에서 각각 $10.08\text{g/m}^2\text{-s}$ 과 $29.29\text{g/m}^2\text{-s}$ 의 연소율로 프로필렌(propylene, C_3H_6)이 연소하여 2차원 난류경계층이 형성되었다. 온도분포는 수직평판 중앙에서 측정하였고, 수직 중심선을 따라 수직평판 표면에서의 대류 및 복사 열유속을 측정하여 열유속 모델을 제시하였다. 본 연구에서는 실험에서와 같은 조건에서 온도분포와 열유속을 구하였다. 계산영역의 크기는 계산영역 크기가 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 극소화 하기위해 예비 시뮬레이션을 통해 x방향(수직평판 표면에서부터의 수직거리) 150mm, y방향(수직평판 버너의 폭방향) 150mm, 높이 600mm(버너 400mm, 평판 200mm)로 하였다. 벽면의 온도를 75°C , 벽면표면에서의 속도를 0으로 하였다.

본 연구에서 조사한 주요 매개변수는 Table 1과 같이 격자크기와 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant) C_s , 복사손실율(radiative loss fraction) X_r , 벽의 방사율 e , 매연 질량분율(soot yield)이다. 이밖에 난류 프란틀수(Prandtl number)와 슈미트수(Schmidt number)도 조사하였으나 그 영향이 매우 작았다. 본 연구에서 특별히 언급하지 않는 한 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5\text{mm}$, $C_s = 0.1$, $X_r = 0.3$, $e = 0.95$, soot yield = 0.095를 사용하였다.

Table 1. Parameters tested

mass transfer rate, m''	$10.08\text{g/m}^2\text{-s}$, $29.29\text{g/m}^2\text{-s}$
grid size	$\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5\text{mm}$ $\Delta x = 2.5\text{mm}$, $\Delta y = \Delta z = 5\text{mm}$ $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 2.5\text{mm}$
Smagorinsky constant, C_s	0.1, 0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.2
radiative loss fraction, X_r	0.2, 0.25, 0.3, 0.35
wall emissivity, e	0.6, 0.8, 0.95
soot yield (= $m_{\text{soot}}/m_{\text{fuel}}$)	0.03, 0.06, 0.095
Unless otherwise indicated: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5\text{mm}$, $C_s = 0.1$, $X_r = 0.3$, $e = 0.95$, soot yield = 0.095	

시뮬레이션 시간은 50초로 하고, 온도와 열유속의 시간평균값은 각각 30~50초 사이의 순시값으로부터 계산하였다. FDS Source file을 일부 수정하여 Linux기반 PC에서 2 node, 4 processor의 병렬 컴퓨팅으로 계산하였다.

3. 결과 및 토의

세가지 격자크기에 대한 조사에서 Figure 1과 같이 격자가 작을 때 프로필렌의 연소율이 작은 $10.08\text{g/m}^2\text{-s}$ 의 경우 경계층이 층류로 나타났다. 반올림오차를 고려하지 않는다면

일반적으로 격자크기가 작을수록 해의 정확도가 높지만, 대와동모사(large eddy simulation)에서는 그렇지 않다. 이 결과로부터 격자크기를 5mm로 하였다.

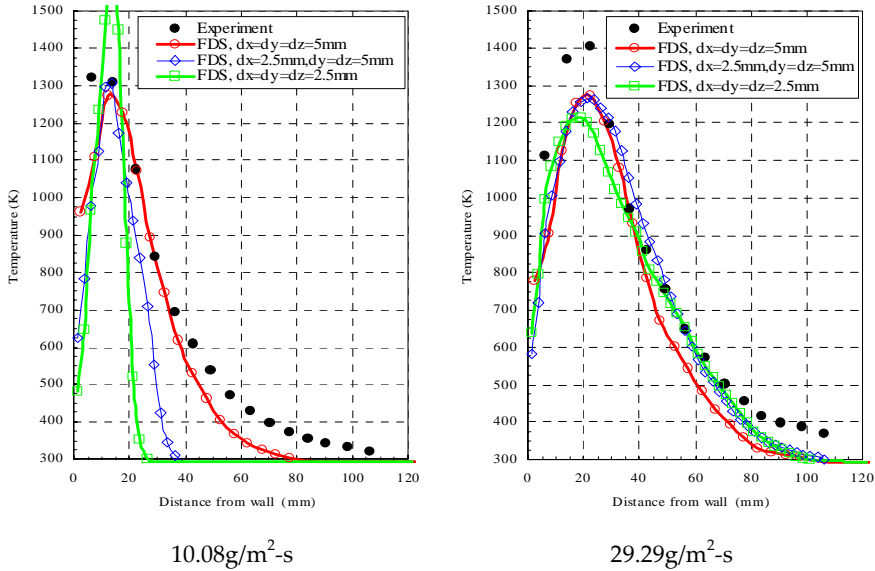


Figure 1. Comparison of temperature profiles for grid sizes.

Figure 2에는 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant) C_s 의 값에 따른 버너중심에서의 온도분포를 실험과 비교하였다. $C_s = 0.16$ 이상에서 FDS는 층류로 예측됨에 따라 온도 분포에 오차가 큰 것을 알 수 있다. $C_s = 0.1$ 의 경우에는 두 연소를 모두 실험과 비교적 잘 일치하였고, 이것은 이전의 연구결과와도 일치한다.

Figure 3은 복사손실율(radiative loss fraction) X_r 이 온도분포에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 복사손실율은 온도분포에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

한편, 벽면의 방사율에 대한 시뮬레이션 결과는 Figure 4와 5에 비교하였다. 방사율은 Figure 4에서와 같이 온도분포에는 큰 영향을 미치지 않았으나, Figure 5에 나타난 바와 같이 벽면의 열유속(total heat flux)에는 영향이 크게 나타났다. 벽면의 복사열유속이 방사율에 비례하므로 대류 열유속과 복사 열유속의 합인 열유속이 방사율에 민감하기 때문이다. 그러나 Figure 5에는 프로필렌 그을음에 덮힌 청동 벽면으로부터 열유속을 측정하여 구한 열유속모델(de Ris, 2008)에 비해 FDS의 열유속은 지나치게 높다.

Figure 6은 매연질량분율에 따른 온도분포를 비교한 그림으로, 두 연소에서 모두 그 영향이 작음을 알 수 있다.

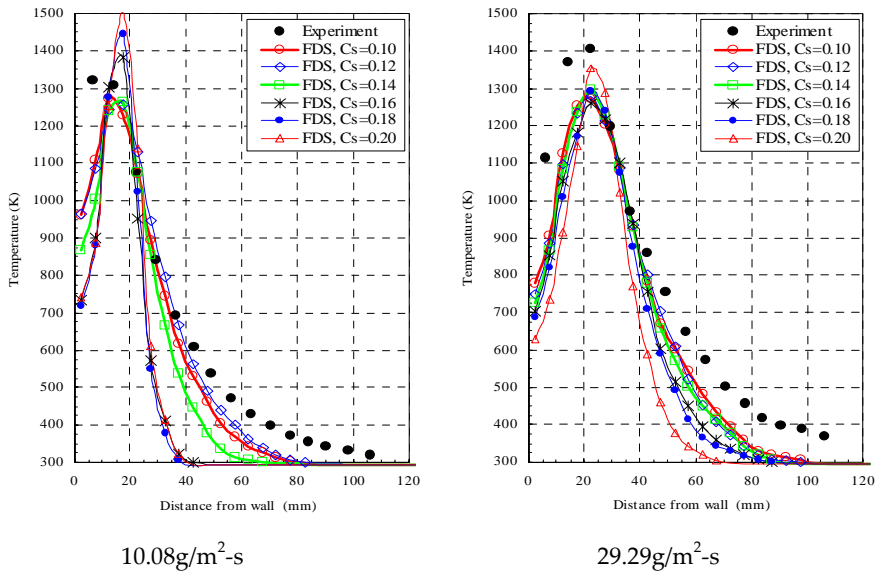


Figure 2. Comparison of temperature profiles for Cs values.

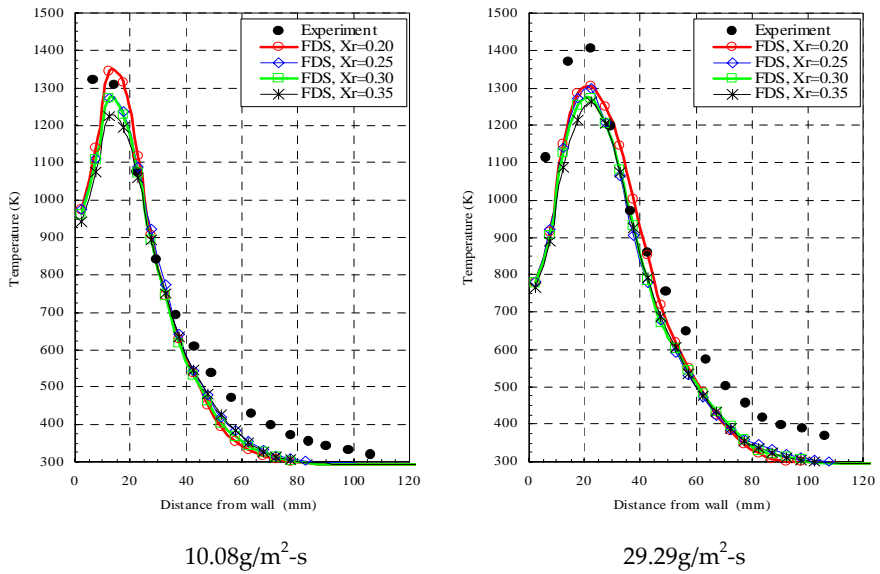


Figure 3. Comparison of temperature profiles for radiative loss fraction.

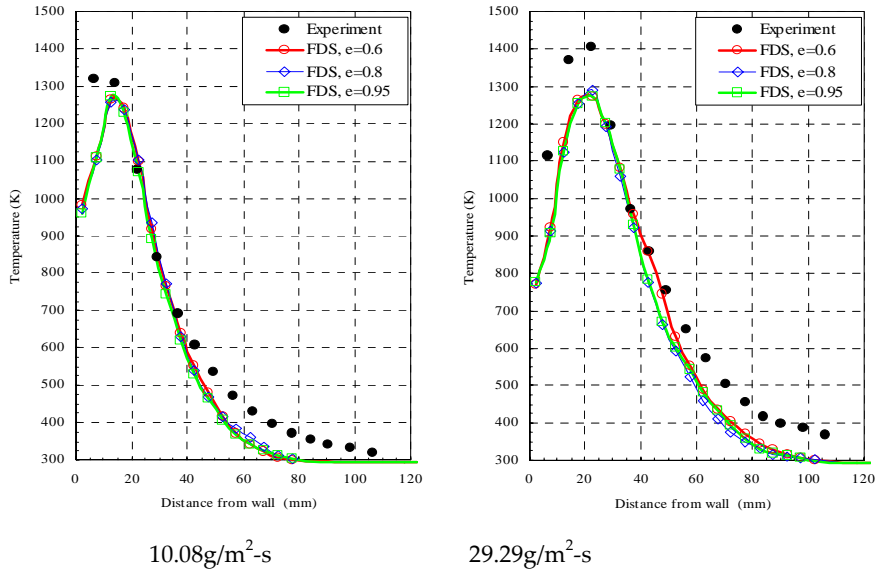


Figure 4. Comparison of temperature profiles for wall emissivity.

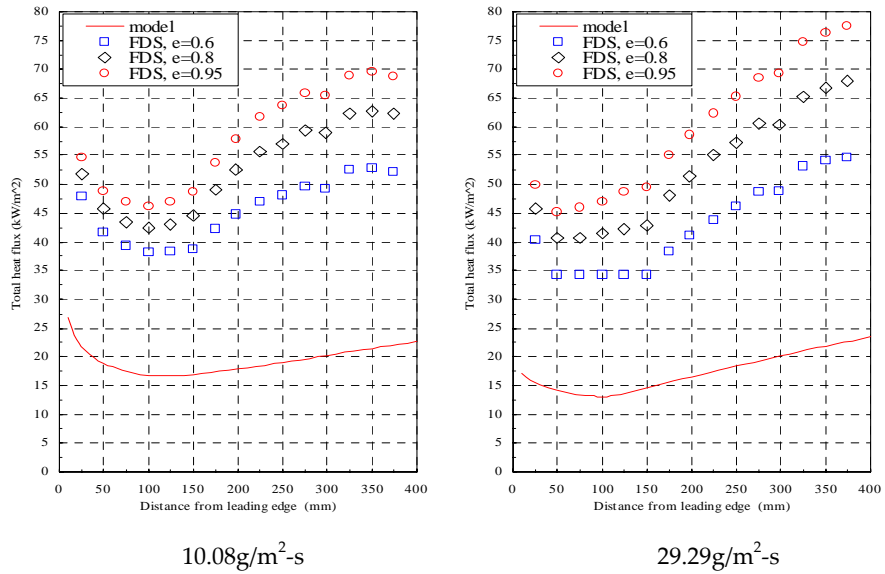


Figure 5. Comparison of total heat flux for wall emissivity.

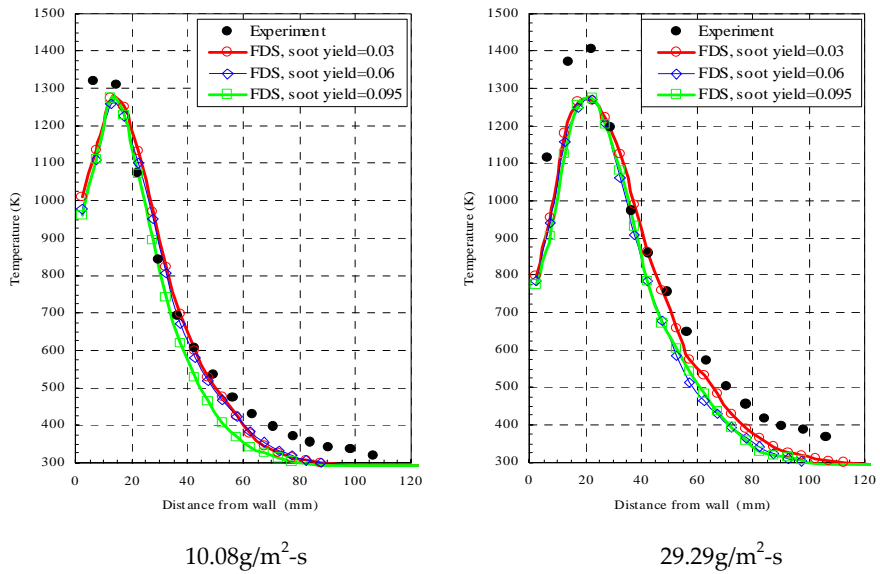


Figure 6. Comparison of temperature profiles for soot yield.

Figure 7은 격자크기 $\Delta x=\Delta y=\Delta z=5\text{mm}$, 스마고린스키 상수 $C_s=0.1$, 복사손실율 $X_r=0.3$, 벽의 방사율 $e=0.95$, 매연질량분율 soot yield=0.095을 사용하여 계산한 온도분포를 실험

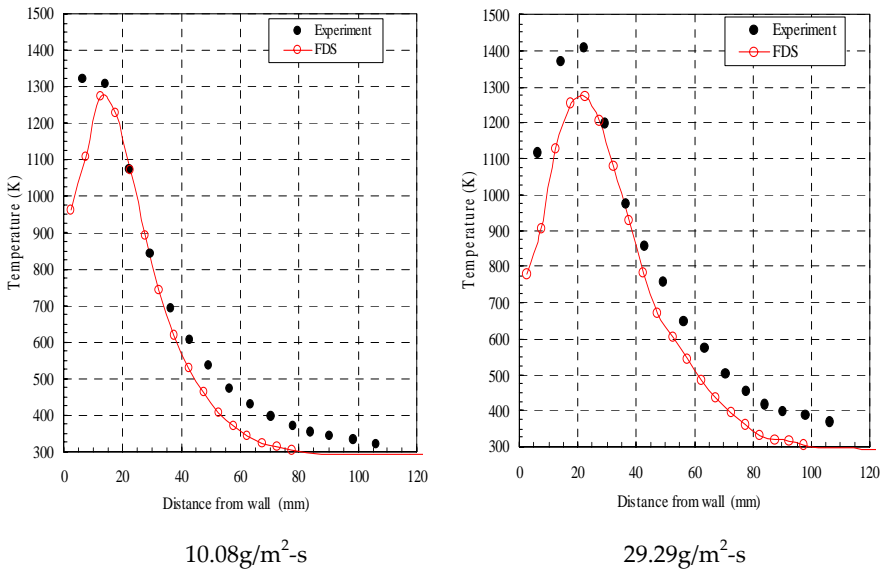


Figure 7. Comparison of temperature profiles

(de Ris, 2008)과 비교한 그림이다. 두 연소율에서 모두 온도분포가 실험과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

그러나 Figure 8의 열유속은 모델에 비해 훨씬 더 높다. 열유속에 대한 조사에서 복사 열유속의 오차가 큼을 확인하였다. 난류점성계수의 크기에 직접 관련되어있는 스마고린스키 상수의 값을 0.1로 선정함에 따라 온도분포가 비교적 잘 예측됨에도 불구하고 복사열 유속의 예측이 만족스럽지 못한 것은 FDS를 사용한 수직벽 화재 시뮬레이션에 있어 개선해야 할 또 하나의 문제점임을 알 수 있다.

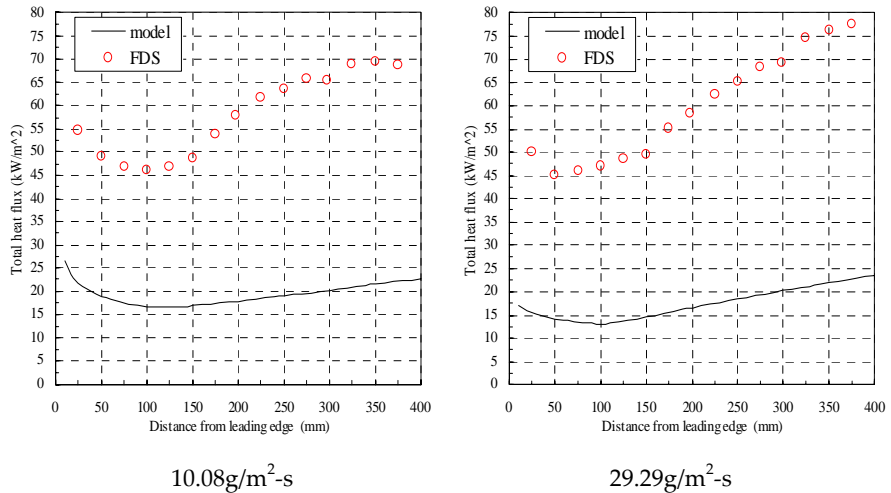


Figure 8. Comparison of heat flux on wall surface

4. 결 론

FDS (Fire Dynamics Simulator)를 사용한 수직벽화재 시뮬레이션에 있어서의 문제점을 파악하기 위해, 프로필렌 연소율 10.08g/m²-s과 29.29g/m²-s의 수직벽 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)가 기본값인 0.2일 때 수직벽에 형성된 경계층이 층류로 예측되어 온도분포에 오차가 컸고, 스마고린스키 상수가 0.1일 때 온도분포가 실험과 비교적 잘 일치하였다. 그러나 벽면에서의 열유속에는 두 연소율의 경우에 모두 큰 오차가 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H. and Rehm, R. (2007), Fire

Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.

2. 박외철, Trouve, A (2008a), "수직벽화재의 수치 시뮬레이션 I. 수직벽 난류자연대류", 한국화재소방학회 논문지, 제22권 제3호, pp.181-187.
3. 박외철, Trouve, A (2008b), "수직벽화재의 수치 시뮬레이션 II. 프로판 화재", 한국화재소방학회 논문지, 제22권, 제3호, pp.188-193.
4. de Ris, J.L (2008), FM Global, Personal communication.