

프로필렌 수직벽 화재의 수치적 연구 Numerical Study on Propylene Vertical Wall Fires

박외철

Woe-Chul Park

부경대학교 안전공학부
(2009. 8. 26. 접수/2009. 10. 9. 채택)

요 약

화재 시뮬레이션용 전산유체역학 모델인 Fire Dynamics Simulator(FDS)을 이용한 수직벽 화재 시뮬레이션의 정확성을 확인하기 위해 FDS를 프로필렌 수직벽 화재에 적용하였다. 단위면적당 연소율 7.0~29.29g/m²·s의 범위에서 버너중심에서의 경계층 내 온도분포를 실험결과와 비교하였다. 또 수직벽면 위 수직중심선을 따라 계산한 열유속(heat flux) 분포도 실험과 비교하였다. 경계층 내 온도분포는 비교적 잘 예측됨을 확인하였다. 그러나 벽면근처의 최고온도는 측정치보다 낮았고, 수직벽면의 열유속은 지나치게 높게 나타났다. 이에 따라 수직벽 화재의 시뮬레이션에 있어서 FDS를 개선할 필요가 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

The Fire Dynamics Simulator (FDS), a computational fluid dynamics model for fire simulation, was applied to propylene vertical wall fires, to confirm its accuracy in simulation of vertical wall fires. The temperature profiles at the center of the burner obtained for mass loss rates per unit area in the range of 7.0~29.29g/m²·s were compared with those of experiment. Comparisons of the heat flux distributions along the vertical centerline on the wall surface were made with the measurements. It was shown that the computed temperature profiles were in good agreement with the experiment. It was also noted that the peak temperature near the wall was underpredicted, the heat flux was too high compared with the measurements, and hence improvements are required for FDS in simulation of the vertical wall fires.

Key words : Wall fires, Numerical simulation, Fire Dynamics simulator, Propylene

1. 서 론

실내에서 수직벽 화재가 발생하면 부력에 의해 연기와 고온의 공기가 위로 올라가 천장을 따라 급속히 확산된다. 따라서 수직벽이 가연성물질로 구성되어있거나 가연성물질이 수직으로 적재되어있는 경우에는 수평배열에 비해 훨씬 더 위험하다. 박외철과 Trouve¹⁾는 수직벽 화재와 유사한 수직 등온벽 위의 난류 자연대류에 Fire Dynamics Simulator(FDS)²⁾를 적용하였다. 또 박외철과 Trouve³⁾는 FDS를 사용하여 프로판가스 수직벽 화재의 수치 시뮬레이션을 수행한 결과, Wang 등⁴⁾의 수치 시뮬레이션보다 훨씬 더 개선된 결과를 얻을 수 있었다. 수직벽 난류 자연대류와 수직벽 프로판 화

재의 연구에서 FDS의 난류점성계수의 계산에 사용되는 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)의 기본설정값 0.2를 그대로 사용하면 난류경계층이 층류경계층으로 인식됨을 확인하였다. 따라서 스마고린스키 상수의 기본 설정값 0.2 대신 0.1을 사용하는 것이 타당한 것으로 밝혀졌다. 한편, de Ris⁵⁾는 프로필렌 수직벽 화재에 대한 실험에서 프로필렌 가스의 단위면적당 연소율 7.0~29.29g/m²의 범위 내 총 8가지의 값에 대해 버너 중심에서 경계층 내 정상상태의 온도분포와 수직중심선을 따라 수직벽면의 열유속(heat flux)의 분포를 측정하였다.

본 연구의 목적은 FDS가 수직벽 화재의 온도와 열유속을 넓은 범위의 연소율에서 정확하게 예측하는가를 확인하는 것이다. 이를 위해 FDS로 정상상태의 온도와 열유속을 계산하여 실험결과와 비교하였다.

E-mail: wcpak@pknu.ac.kr

2. 연구방법

de Ris⁵⁾는 Figure 1과 같이 폭 380mm, 높이 400mm의 황동 수직평판의 표면에서 프로필렌(propylene, C₃H₆) 가스가 일정한 연소율로 연소하는 버너로 실험을 수행하였다. 프로필렌의 단위면적당 연소율 7.0, 10.8, 13.08, 16.33, 19.0, 21.95, 24.84, 29.29g/m²-s의 8가지의 값에 대하여 버너 중심(0, 0, 200mm)의 표면에서부터 경계층 내의 수직방향, 즉, x방향의 온도분포를 측정하였다. 또 버너의 수직평판 표면에서의 열유속은 z축을 따라 측정하였다. 버너의 표면온도를 일정하게 유지하기 위해 수직평판 내부에 온도의 냉각수가 순환하도록 하였다. de Ris는 측정한 열유속을 바탕으로 하여 열유속 모델을 도출하였다. 실험에서 경계층이 2차원을 유지하도록 하기위해 수직평판의 양쪽에 폭 150mm의 황동판을 부착하였고, 수직평판 위쪽에도 수직평판과 같은 평면을 이루도록 황동평판을 부착하였다.

그러나 시뮬레이션에서는 2차원 유동을 얻기 위한 평판은 필요하지 않고 대신에 경계조건으로 $\partial/\partial y = 0$ 을 적용하면 된다. 본 연구에서는 예비 시뮬레이션을 통해 계산영역의 크기를 150mm × 150mm × 600mm로 하였다. 또 $y = \pm 75$ mm에서 $\partial/\partial y = 0$ 이 되도록 FDS의 입력파일에 MIRROR로 설정하였다. z방향 계산영역을

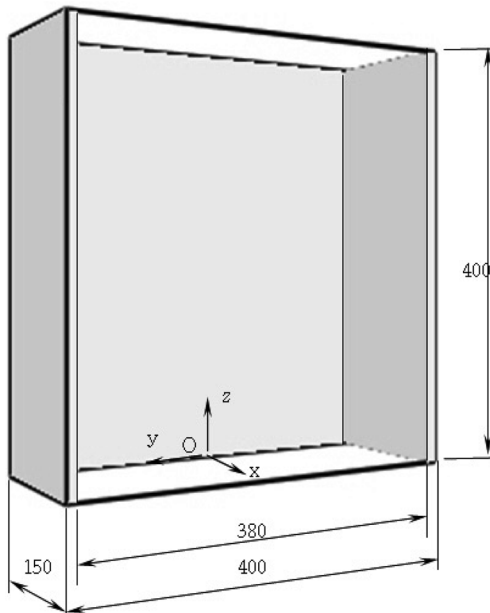


Figure 1. Schematic of burner configuration (dimensions in mm).

600mm로 한 것은 실험에서 버너의 길이가 400mm이고 그 위쪽에 위치한 평판의 길이가 200mm이기 때문이다. 벽면의 온도를 130°C, 벽 표면에서의 속도를 0으로 하였고, 이전 연구¹⁾의 결과에 따라 격자크기를 $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5$ mm, 스마고린스키 상수(Smagorinsky constant)를 0.1로 하였다. 복사 손실률(radiative loss fraction)을 0.3, 황동벽의 방사율(wall emissivity)을 0.95, 연기질량분율(soot yield)을 0.95로 설정하였다. 그 밖의 변수값은 FDS의 기본값을 그대로 사용하였다. 계산 시작 후 약 20초가 지나면 경계층 내 온도가 준정상상태에 도달함에 따라 총 시뮬레이션 시간을 50초로 하고, 정상상태의 온도는 30-50초 사이 온도의 시간평균값으로 계산하였다. 정상상태의 열유속도 30-50초 사이 열유속의 시간평균값으로 구하였다.

3. 결과 및 토의

프로필렌의 단위면적당 연소율이 7.0g/m²-s일 때 버너 중심에서의 온도분포를 실험⁵⁾과 비교한 결과가 Figure 2에 나타나 있다. 벽면 근처의 경계층에서는 실험과 잘 일치하지만, 벽면으로부터의 거리가 30mm를 넘는 영역에서는 실험에 비해 낮게 나타나 있다. 온도가 낮게 예측된 것은 이전의 연구¹⁾에서 지적된 바와 같이 시뮬레이션에서 난류혼합이 충분히 반영되지 못

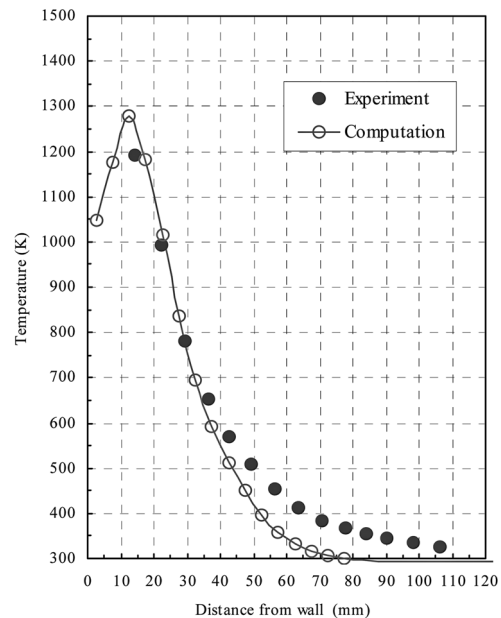


Figure 2. Comparison of temperature profiles at 7.0g/m²-s.

한 결과이다. 난류혼합은 속도분포를 실험과 비교하면 더 분명하게 나타나지만, 비교대상의 실험에서는 속도 분포를 측정하지 않아 본 연구의 결과와 비교할 수 없

기 때문에 속도분포를 여기에 제시하지 않았다.

Figure 3에는 연소율이 $10.8\text{g/m}^2\text{-s}$ 일 때 버너 중심에서의 온도분포를 실험과 비교하였다. 경계층 외부에서의 온도가 실험에 비해 크게 낮지 않아 Figure 2의 $7.0\text{g/m}^2\text{-s}$ 에 비해 더 좋은 결과가 나타나 있다.

Figure 4는 프로필렌의 단위면적당 연소율이 $13.08\text{g/m}^2\text{-s}$ 인 경우에 버너 중심의 경계층 내 온도분포를 실험과 비교한 그림이다. 벽면 근처를 제외하면 앞의 $10.08\text{g/m}^2\text{-s}$ 의 경우와 유사하다. 그러나 벽면 근처에서의 최고온도는 실험에 비해 크게 낮음을 알 수 있다.

실험에서 벽면 근처의 온도를 측정하는데 오차가 클 가능성이 있지만, Figure 4뿐만 아니라 Figure 5의 연소율 $16.33\text{g/m}^2\text{-s}$ 에서도 최고온도가 측정치에 비해 훨씬 낮게 나타났다. 따라서 FDS의 최고온도 예측의 정확도에 대해 더 많은 조사의 필요성이 제기되고 있다.

연소율이 $19.0\text{g/m}^2\text{-s}$ 일 때는 Figure 6에 나타나 있는 바와 같이 실험과 잘 일치한다. 최고온도는 벽면으로부터의 거리 $10\sim 20\text{mm}$ 사이에 위치하므로 이 사이에서 온도를 측정했다면 최고온도의 오차가 크게 나타났을 것으로 짐작할 수 있다.

최고온도가 낮게 예측되는 것은 Figure 7의 $21.95\text{g/m}^2\text{-s}$, Figure 8의 $24.84\text{g/m}^2\text{-s}$, Figure 9의 $29.29\text{g/m}^2\text{-s}$ 의 경우에서도 볼 수 있다. FDS를 이용하여 수직벽 화재의 온도분포를 계산할 때 최고온도가 실험에 비해 일

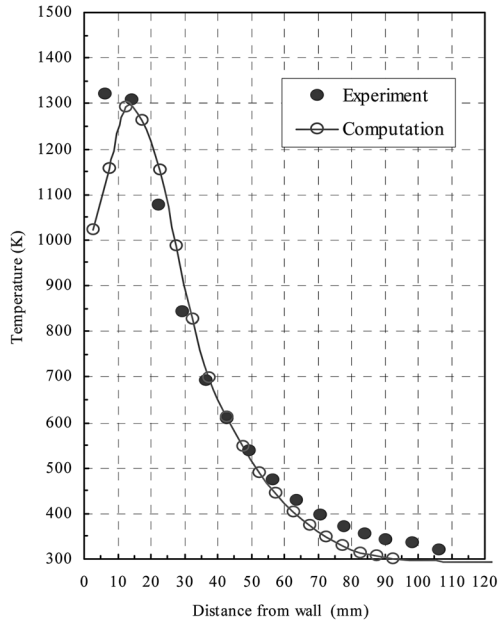


Figure 3. Comparison of temperature profiles at $10.08\text{g/m}^2\text{-s}$.

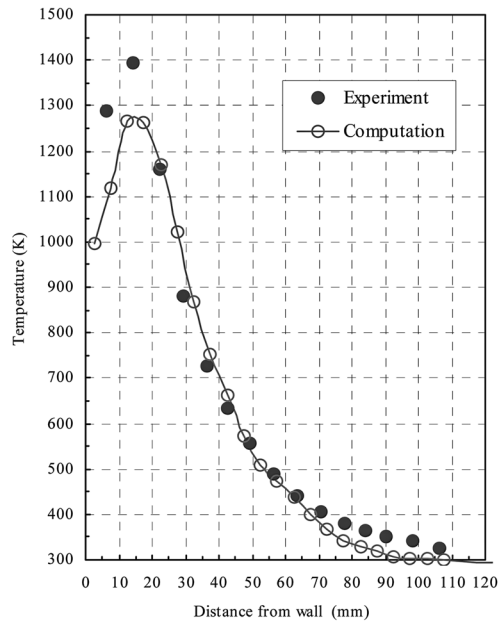


Figure 4. Comparison of temperature profiles at $13.08\text{g/m}^2\text{-s}$.

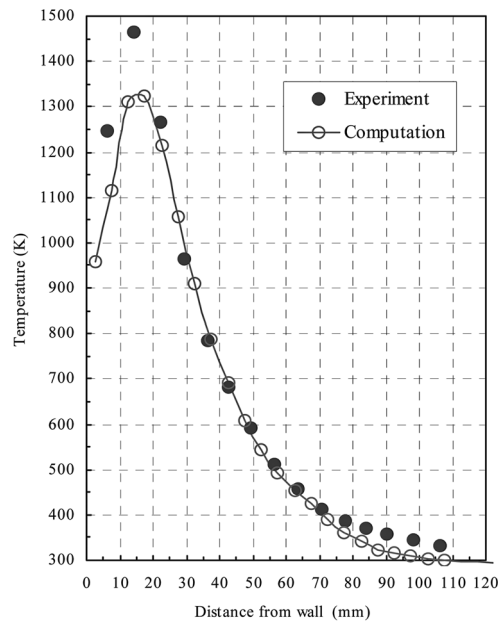


Figure 5. Comparison of temperature profiles at $16.33\text{g/m}^2\text{-s}$.

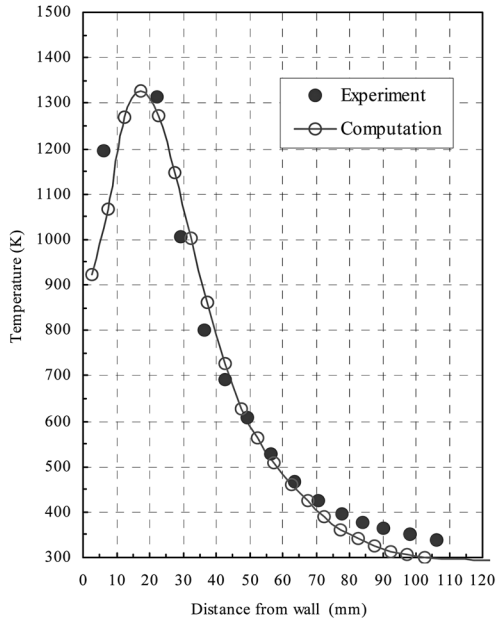


Figure 6. Comparison of temperature profiles at 19.0g/m²-s.

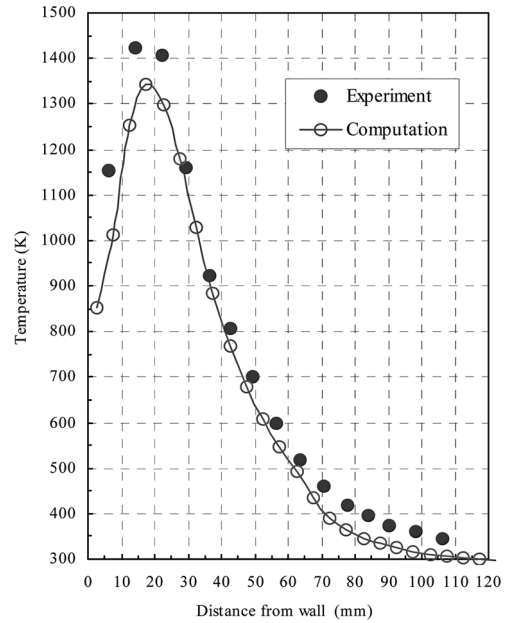


Figure 8. Comparison of temperature profiles at 24.84g/m²-s.

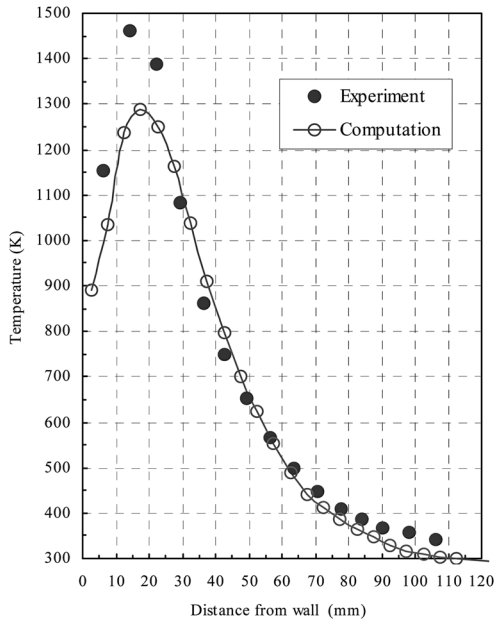


Figure 7. Comparison of temperature profiles at 21.95g/m²-s.

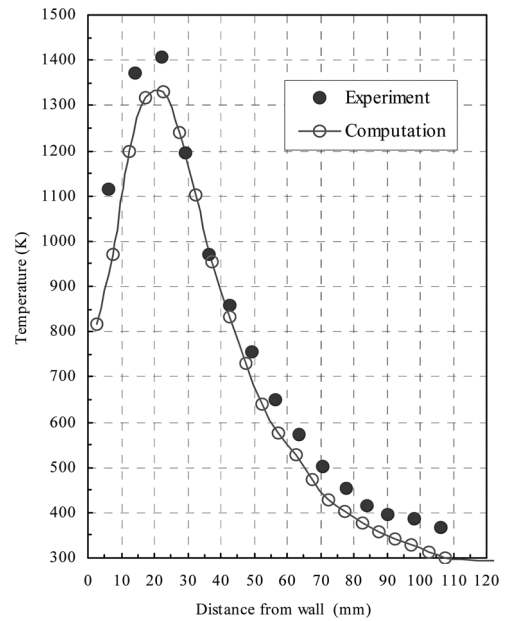


Figure 9. Comparison of temperature profiles at 29.29g/m²-s.

관되게 낮게 나타남을 알 수 있다.

한편, 비교대상의 실험에서도 단위면적당 연소율에 따라 최고온도의 측정치에 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 FDS의 최고온도 예측의 정확성을 개선하기 위해

서는 벽면 근처의 더 많은 측정점에서 정밀하게 측정 한 온도 데이터가 필요하다. 또 앞에서 언급한 난류혼 합을 더 명확하게 나타내는 속도 데이터도 필요하다.

단위면적당 연소율 10.08g/m²-s와 29.29g/m²-s에 대

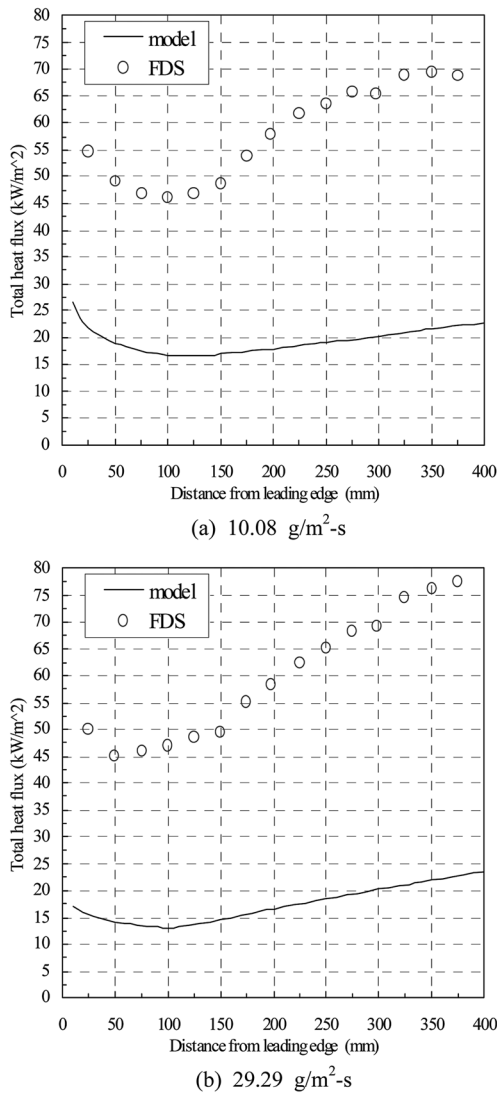


Figure 10. Comparison of heat fluxes on wall surface.

하여 계산한 수직벽면에서의 열유속과 측정치를 기본으로 하여 제시한 de Ris⁵⁾의 열유속 모델을 Figure 10에 비교하였다. 두 경우 모두 버너의 선단(z = 0, Figure 1 참조)에서부터 위쪽으로 이동함에 따라 열유속이 감소하다가 다시 증가하는 것은 유사하지만, FDS의 열유속이 실험모델에 비해 지나치게 높게 나타나 있다. 이 열유속에는 연소가스와 화염으로부터 벽면으로 전달되는 복사 열유속과 수직벽으로부터 주위로 방사되

는 복사 열유속, 그리고 공기와 벽면 사이의 대류 열유속이 모두 포함되어 있다. 이러한 열유속에 있어서의 큰 오차는 Figure 10의 10.08g/m²-s와 29.29g/m²-s 외의 다른 연소율에서도 유사하게 나타났다. 그러므로 경계층 내 온도는 실험과 비교적 잘 일치함에도 불구하고 FDS가 열유속을 정확하게 예측하지 못하는 데 대한 원인규명과 이를 개선하기 위한 연구가 필요하다.

4. 결 론

Fire Dynamics Simulator(FDS)을 사용한 수직벽 화재 시뮬레이션의 정확성을 확인하기 위해 단위면적당 연소율 7.0~29.29g/m²-s의 프로필렌 수직벽 화재에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 스마고린스키 상수를 0.1, 격자크기를 한 변이 5mm인 균일격자로 하였다. 버너 중심에서의 경계층 내 온도분포는 실험과 비교적 잘 일치하였다. 그러나 최고온도는 실험에 비해 낮게 예측되었고, 난류경계층에서의 혼합이 부족함을 확인하였다. 또한 벽면에서의 열유속은 실험에 비해 훨씬 더 높게 나타나 오차가 큼을 확인하였다. 이러한 FDS의 문제점을 개선하기 위해 벽면 근처에서 측정된 온도와 속도, 그리고 벽면에서의 열유속 데이터가 필요하며 FDS에 관한 더 많은 연구가 필요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 박외철, A. Trouve, “수직벽 화재의 수치 시뮬레이션 I. 수직벽 난류자연대류”, 한국화재소방학회논문지, 제 22권, 제3호, pp.181-187(2008).
2. K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum and R. Rehm, Fire Dynamics Simulator (V.5) Technical Reference Guide, NIST, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.(2009).
3. 박외철, A. Trouve, “수직벽 화재의 수치 시뮬레이션 II. 프로판 화재”, 한국화재소방학회논문지, 제22권, 제 3호, pp.188-193(2008).
4. H.Y. Yang, P. Joulain and J.M. Most, “On the Numerical Modeling of Buoyancy-dominated Turbulent Diffusion Flames by Using Large-eddy Simulation and k-ε Turbulence Model”, Combust. Sci. and Tech., Vol.176, pp.1007-1034(2004).
5. J.L de Ris, FM Global, Private communication (2008).