

화재분석모델을 이용한 이중격실화재 검증분석

김 봉 현, 배 용 범[†], 류 수 현, 이 공 희, 김 윤 일, 문 찬 기, 박 종 석
한국원자력안전기술원

Simulation of Pool Fire with Two Rooms Using FDS Model

Bong Hyun Kim, Yong Bum Bae[†], Su Hyun Ryu, Gong Hee Lee, Yun Il Kim,
Chan Ki Moon, Jong Seok Park

Korea Institute of Nuclear Safety, 19 Guseong Yuseong Daejeon 305-338, Korea

ABSTRACT: Fire model shall be verified and validated to reliably predict the consequences of fires within its limitations. This study aims to predict pool fire with two rooms using FDS and to compare FDS simulation results with PRISME experimental data which can be applicable to the fire of nuclear power plant facility. Four different sizes of grid (0.08m, 0.1m, 0.125m, 0.2m) are used in the simulation and the simulated results of specific quantities such as temperature, chemical composition, heat flux and heat release rate are compared to the experimental data. From this study, the FDS simulation results with the finer grid resolution show better similarity and trend with pool fire experimental data. The sensitivity analysis and the selection of the proper size grid are essential to predict the consequences of pool fire with two rooms reliably.

Key words: Fire Dynamics Simulator(FDS), Validation & Verification(검증 및 확인), Pool Fire(수조 화재), Room Fire(격실화재)

기 호 설 명

D_t : 확산계수, [m²/s]
 f : 외부 힘 [N]
 h : 엔탈피 [J]
 k : 열전도계수 [W/mK]
 P : 압력 [N/m²]
 q^r : 복사열 [kW/m²]
 T : 온도 [K]
 t : 시간 [s]
 u : 속도 [m/s]
 w : 반응속도 [kg/m³·s]
 Y : 질량분율

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m³]
 τ : viscous stress tensor

상첨자

- : Filtered 변수
 \sim : Favre-filtered 변수

하첨자

i, j, k : three direction in coordinates

1. 서 론

화재분석모델은 보존법칙 및 실험데이터를 기반으로 화재로 인한 구조물, 계통 및 기기에 대한 영향, 화재성장 등을 수학적으로 예측하는 방법이다. 원자력발전소에서는 화재로 인한 안전에 중요한 기기 및 안전관련 케이블들의 손상을 분석하기 위해 화재분석모델⁽¹⁾을 사용하고 있다.

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-868-0799; fax: +82-42-861-2535
 E-mail address: baeyb@kins.re.kr

화재분석모델의 사용은 검증 및 확인된 화재상황으로 제한된다.⁽²⁾ 따라서 화재분석모델의 적용대상을 확대하기 위하여 다양한 화재상황에 대한 화재분석모델의 검증 및 확인 과정이 필요하다. 이와 관련하여 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)에서는 원자력발전소의 주 제어실, 스위치기어실 및 다중 격실 등에서 발생 가능한 12개 화재상황에 대하여 화재분석모델을 검증 및 확인하였다.⁽²⁾ 반면에 국내에서는 원전화재에 대한 화재분석모델의 검증 및 확인 연구가 미흡한 실정이다.

이에 본 논문에서는 국제공동연구(PRISME Project)⁽³⁻⁶⁾를 통해 수행된 이중 격실화재를 화재분석모델 중의 하나인 Fire Dynamics Simulator(FDS)⁽⁷⁻⁸⁾로 검증 및 확인하였다.

2. 실험장치 및 실험조건

2.1 실험장치

본 논문에서 모사된 실험 장치는 Fig. 1과 같이 이중 격실로 구성되어 있으며, 각 격실 상부에 환기용 개구부가 2개씩 설치되어 있다. 격실 간 문은 개방된 상태이다. 격실 1의 중앙에는 50 mm 두께의 단열재로 둘러싸인 원형 연료 Pan이 있으며, 실험에 사용된 연료는 Tetra-Propylene Hydrogenated (TPH)이다. 본 화재실험에 사용된 측정계기는 열전대, 화학종 농도측정기 및 열유속 측정기이며, 각 계기별 위치는 Table 1에서 Table 3까지와 같다.

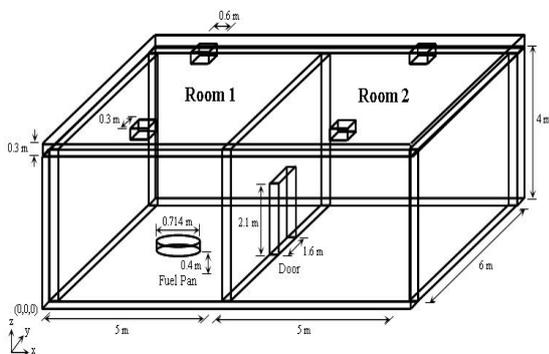


Fig. 1 Schematic Diagram of the Experimental Facilities

Table 1 List of Temperature Measurement Points inside the Facility

| 격실1 [m] | | | 격실2 [m] | | |
|---------|------|------|---------|------|------|
| x | y | z | x | y | z |
| 4.05 | 4.80 | 3.90 | 8.10 | 3.30 | 3.90 |
| 4.05 | 4.80 | 3.55 | 8.10 | 3.30 | 3.55 |
| 4.05 | 4.80 | 3.30 | 8.10 | 3.30 | 3.30 |
| 4.05 | 4.80 | 2.80 | 8.10 | 3.30 | 2.80 |
| 4.05 | 4.80 | 2.30 | 8.10 | 3.30 | 2.30 |
| 4.05 | 4.80 | 2.05 | 8.10 | 3.30 | 2.05 |

Table 2 List of Gas Concentration Measurement Points inside the Facility

| CO ₂ , CO, O ₂ 농도측정기 위치[m] | | |
|--|------|------|
| x | y | z |
| 4.05 | 4.80 | 3.30 |

Table 3 List of Heat Flux Measurement Points inside the Facility

| 열유속 측정기 1 | | | 열유속 측정기 2 | | |
|-----------|------|------|-----------|------|------|
| [m] | | | [m] | | |
| x | y | z | x | y | z |
| 4.30 | 3.30 | 3.99 | 5.29 | 3.30 | 2.55 |

2.2 실험조건

실험에 사용된 연료(TPH)의 물성치는 Table 4와 같다. 환기가 충분한 조건에서 액체 연료(TPH) 연소시 질량손실률 및 연소생성물은 Table 5와 같다.

Table 4 Properties of Hydrogenated Tetra-Propylene

| | | | |
|------|---------------------------------|----------|-----------|
| 화학조성 | C ₁₂ H ₂₆ | 인화점 | 51~61℃ |
| 끓는점 | 188℃ | 밀도 (20℃) | 0.76 g/ml |
| 분자량 | 170 | 질량 | 16.266 kg |

Table 5 TPH Combustion Products and Radiative Fraction

| TPH(Tetra-Propylene Hydrogenated) | |
|-----------------------------------|-----------|
| 질량손실률 | 13.6 g/s |
| CO 생성률 | 0.013 g/g |
| Soot 생성률 | 0.056 g/g |

화재실험에서 환기는 각각의 격실에 있는 두 개의 개구부를 통해서 이루어진다. 격실1과 격실2의 공기유입 및 유출 속도는 각각 570m³/h, 560 m³/h 이며, 각각의 격실은 -100 Pa의 압력으로 유지된다. 따라서 화재로 인한 격실 내 압력증가로 공기의 유입이나 유출이 영향을 받지 않고 일정하게 유지된다.

3. 화재 시뮬레이션

3.1 수치해석모델

FDS에서 적용하고 있는 질량, 에너지, 운동량 보존식은 식(1)~식(4)와 같으며, 난류 모델은 Smagorinsky의 Large Eddy Simulation(LES) 모델을 사용하였다⁽⁹⁾

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \bar{\rho} g + f_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_l)}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_l)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} u_j \tilde{Y}_l - \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{Y}_l) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} D_l \frac{\partial \tilde{Y}_l}{\partial x_j}) + \bar{w}_l \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{h})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{h})}{\partial x_j} = \frac{D \bar{p}}{Dt} - \frac{\partial q_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \right) + \sum_l \frac{\partial}{\partial x_j} \left(- \bar{\rho} D_l \tilde{h}_l \frac{\partial \tilde{Y}_l}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

3.2 격자 구성

본 연구에 사용된 정육면체 형태의 격자 크기

Table 6 Grid Size and the Number of Grid in FDS Simulation

| | 격자 크기 | 총 격자수 | x, y, z 격자수 |
|---|---------|-----------|-------------|
| 1 | 0.2 m | 72,000 | 60×40×30 |
| 2 | 0.125 m | 294,912 | 96×64×48 |
| 3 | 0.1 m | 576,000 | 120×80×60 |
| 4 | 0.08 m | 1,125,000 | 150×100×75 |

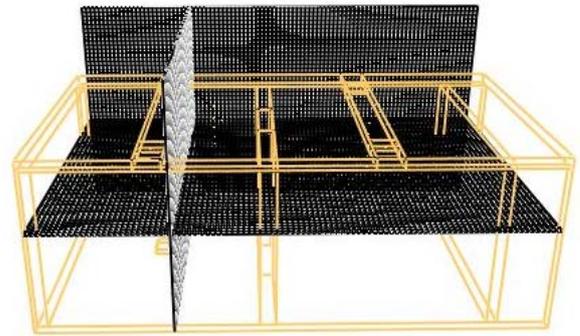


Fig. 2 Geometry of 0.125 m Grid in FDS Simulation

및 총 격자수는 Table 6과 같으며, 격자 형태는 Fig. 2와 같다.

3.3 초기 및 경계조건

액체연료인 TPH와 구조물의 초기온도는 25℃이다. 연료 1 mol 당 산소 소모량은 18.3 mol이고, 연소로 인해 생성되는 H₂O와 CO₂는 각각 13.0 및 11.7 mol이다. CO와 Soot의 생성률은 Table 5와 같이 각각 0.013 g/g와 0.056 g/g이다. 벽, 지붕, 바닥을 구성하는 콘크리트는 일반적인 물성치(k=1.2 W/m/℃, c_p=0.46 kJ/kg/℃, ρ=2,200 kg/m³)를 사용한다. 원형 Pan에 대한 경계조건으로 화재 표면을 제외한 Pan의 바닥과 벽면은 단열조건을 적용한다. 환기조건은 공기 유입 및 유출에 따라 ±0.158 m³/sec이다.

3.4 열방출율

화재의 열방출율(Heat Release Rate, HRR)은 액체 표면으로부터 열분해 된 연료물질의 질량손실률을 이용한다. 단위질량당 연소열(Heat of

Table 7 Heat Release Rate Estimation from MLR and Heat of Combustion

| time [sec] | MLR [kg/s] | ΔH_c [kJ/kg] | HRR [kW] | HRRPUA [kW/m ²] |
|---------------|---------------|-------------------------|-------------|--------------------------------|
| 0 | 0.0000 | 46,000 | 0 | 0 |
| 60 | 0.0000 | 46,000 | 0 | 0 |
| 69 | 0.0030 | 46,000 | 138 | 345 |
| 114 | 0.0065 | 46,000 | 299 | 747 |
| 176 | 0.0090 | 46,000 | 414 | 1035 |
| 264 | 0.0115 | 46,000 | 529 | 1322 |
| 382 | 0.0135 | 46,000 | 621 | 1552 |
| 500 | 0.0114 | 46,000 | 524 | 1311 |
| 646 | 0.0090 | 46,000 | 414 | 1035 |
| 764 | 0.0084 | 46,000 | 386 | 966 |
| 940 | 0.0080 | 46,000 | 368 | 920 |
| 1382 | 0.0080 | 46,000 | 368 | 920 |
| 1676 | 0.0085 | 46,000 | 391 | 977 |
| 1793 | 0.0080 | 46,000 | 368 | 920 |
| 1911 | 0.0060 | 46,000 | 276 | 690 |
| 1970 | 0.0040 | 46,000 | 184 | 460 |
| 1990 | 0.0000 | 46,000 | 0 | 0 |

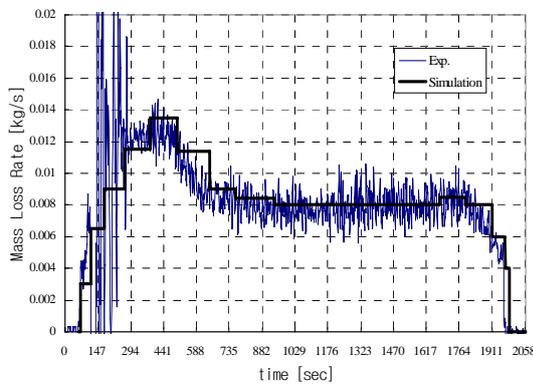


Fig. 3 Mass Loss Rate from Experiment

Combustion)은 $\Delta H_c = 46,000$ kJ/kg을 이용하였다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾ 화재실험을 통해 측정된 질량손실률 및 화재분석코드에 입력된 질량손실률은 Fig. 3과 같다. 화재실험으로부터 계산한 액체 단위면적당 열방출률은 Table 7에 나타내었다.⁽³⁾

4. 결과

4.1 온도비교

Fig. 4에서 Fig. 6은 격실 1에서 수조(pool)화재

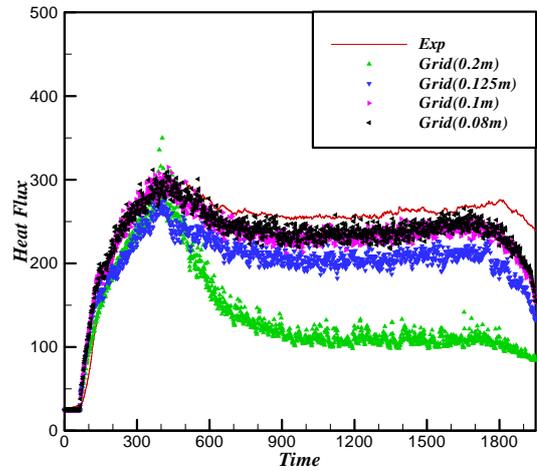


Fig. 4 Temperature Comparison at 3.90 m

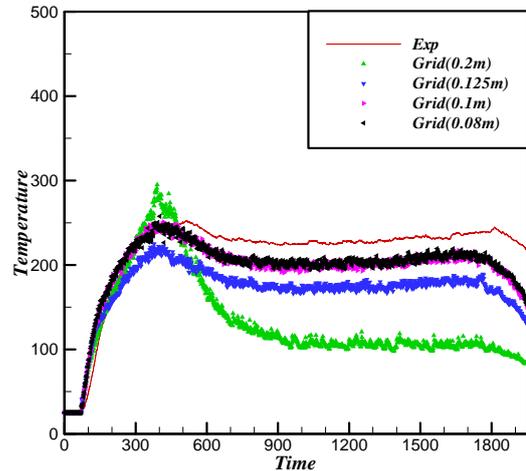


Fig. 5 Temperature Comparison at 3.30 m

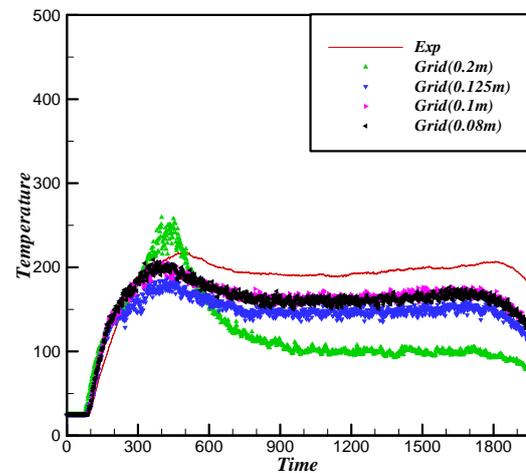


Fig. 6 Temperature Comparison at 2.05 m

로 인한 위치별 온도 변화를 나타낸다. 격자크

기가 0.2 m인 경우, 모든 온도 측정지점에 대해서 해석결과와 실험치가 큰 차이를 나타내었으며, 격자크기가 조밀할수록 실험치에 근접하였다. 또한 격실의 위치별로 최고온도 역시 격자크기가 조밀할수록 실험치에 근사해 졌으며, 최고온도 도달시점은 격자크기와 상관없이 비슷한 결과를 나타내었다. 원자력발전소에서 안전관련 주요기기 및 케이블의 화재영향 평가시 최고 온도의 정확한 예측이 주요 평가변수이므로, 수치해석시 적절한 격자크기의 선택이 화재예측의 정확성을 판단하는데 주요한 근거가 됨을 보여준다.

4.2 연소 물질 비교

Fig. 7과 Fig. 8은 격실 1(4.05, 4.8, 3.3m 지점)에서 수조화재로 인한 산소 농도와 이산화탄소 농도 변화를 나타낸다. 격자크기가 0.08m, 0.01m인 조밀한 경우에만 실험치의 산소소모량과 이산화탄소 농도값이 유사한 분석결과를 보였다. 이는 격자크기가 조밀할수록 연소특성을 실제화재와 비슷하게 모사할 수 있음을 보여준다.

4.3 열유속 비교

열유속 결과는 화재 발생시 특정 지역으로 화재의 전파를 예측하는데 유용한 평가변수이다. Fig. 9는 수조화재로부터 일정거리 떨어진 부분(5.29, 3.30, 2.55 m 지점)에서 받는 열유속을 나타낸다. 온도비교와 유사하게 0.2m 격자크기에 대한 열유속 곡선은 실험치의 열유속 곡선과 상이하였으며, 최고 열유속 값은 실험치보다 높았다. 나머지 0.125m, 0.1m, 0.08m 격자크기의 열유속은 실험치와 유사한 결과를 보였으며, 격자크기가 조밀해질수록 실험치에 근접하였고, 최고 열유속 도달시점 역시 실험치와 유사하였다.

4.4 열방출율 비교

Fig. 10은 열분해 된 연료물질의 질량손실인 열방출율을 실험치와 비교한 결과이다. 수조화재로부터의 열방출율은 격자크기가 가장 큰 0.2 m를 제외하고 실험치의 열방출율 곡선과 유사한

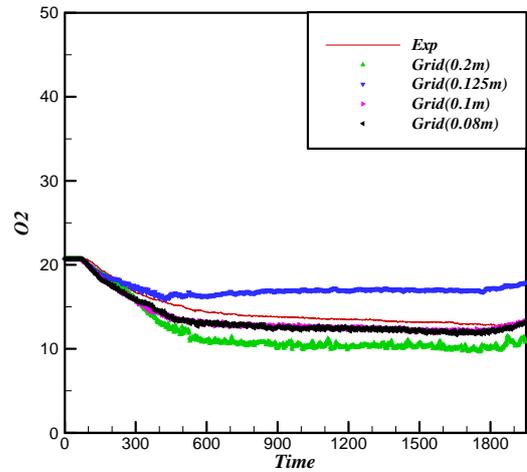


Fig. 7 O₂ Comparison of Experimental data with Simulation Results

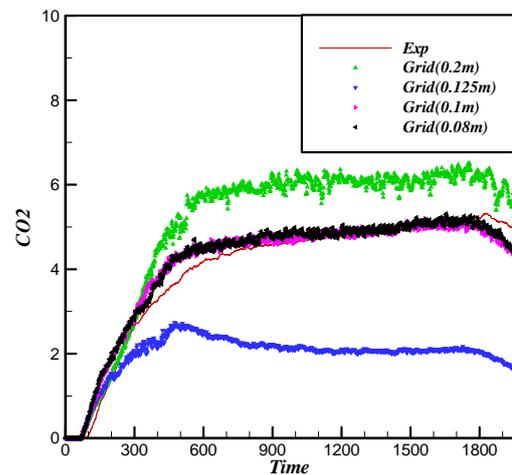


Fig. 8 CO₂ Comparison of Experimental data with Simulation Results

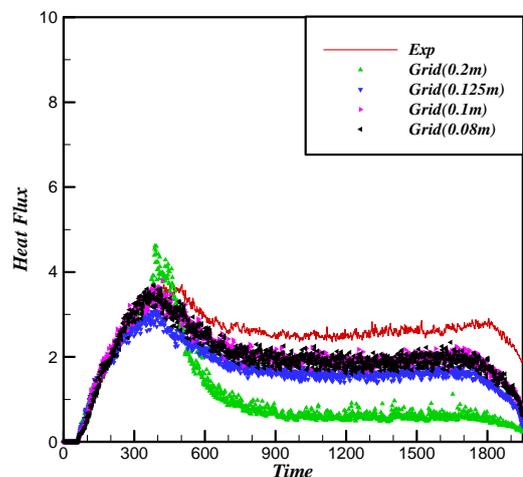


Fig. 9 Heat Flux Comparison

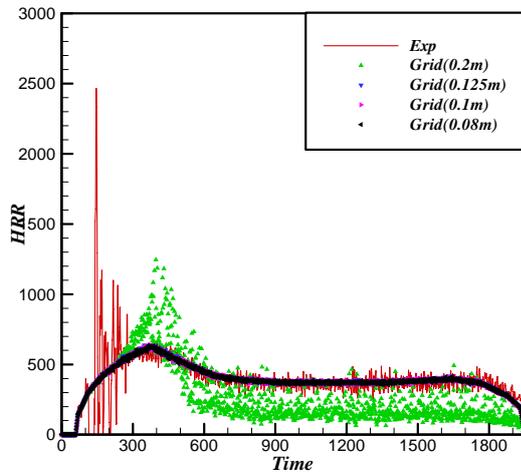


Fig. 10 Heat Release Rate Comparison

분석결과를 보였다. 열방출율을 비교함으로써 실제 연료소모시 발생하는 열량을 확인할 수 있다. 따라서 실험치와 유사한 수치해석결과는 실험조건을 적절하게 모사하고 있음을 보여준다.

6. 결론

본 논문에서는 국제공동연구(PRISME Project)를 통해 수행된 이중 격실 수조화재를 화재분석 모델인 FDS를 이용하여 검증 및 확인과정을 수행하였다. FDS를 이용하여 계산된 위치별 온도 변화, 일정지점에서 열유속, 연소생성물 및 산소 농도와 열방출률은 격자크기가 조밀해질수록 실험치에 근접하는 경향을 보였다. 따라서 화재분석 모델 적용시 격자 민감도 분석은 필수적이며, 적절한 격자를 사용할 경우 FDS는 격실내의 수조화재를 신뢰할 수 있는 수준으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. NFPA 805, "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants" National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2001.
2. NUREG-1824, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", U.S. Nuclear Regulatory

- Commission, Washington, DC, Jan. 2006.
3. Pretrel H., "PRISME-SOURCE Program - Analysis Report SEREA-2007-116-PRISEM 23", 2007
4. Le Saux W., "Description of the DIVA facility, DPAM/SEREA-2006-157, PRISME-008", 2006
5. Le Saux W., "PRISME DOOR programme-PRS D3 test report, DPAM/SEREA-2006-34 2, PRISME-014", 2006
6. Pretrel H., "PRISME-SOURCE BIS-Test Report DPAM/SEREA-2007-107-PRISME22", 2007
7. McGrattan, K., "Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, August, 2005.
8. McGrattan, K. and Forney, G., "Fire Dynamics Simulator (Version 4) User's Guide", NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, August, 2005
9. J. X. Wen, et al., "Validation of FDS for the prediction of medium-scale pool fires", Fire Safety Journal 42, 2007
10. Guttuk, D.T. and White, D. A., "Liquid Fuel fires," Section 2-15, The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition.
11. Tewarson, A., "Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires", Section 3-4, The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition.
12. Standard Guide for Evaluating the Predictive Capability of Deterministic Fire Models, ASTM E1355-05a, ASTM, West Conshohocken, PA, 2005