

[Research Paper]

FDS 모델을 이용한 메탄올 풀 화재의 질량연소플럭스 예측

김성찬

경일대학교 소방방재학과

Predicting the Mass Burning Flux of Methanol Pool Fires by Using FDS Model

Sung-Chan Kim

Department of Fire Safety, Kyungil University

(Received August 25, 2017; Revised September 22, 2017; Accepted October 12, 2017)

요 약

본 연구는 FDS의 액체증발모델을 이용하여 메탄올 풀 화재의 질량연소플럭스를 예측하고 복사분율, 평균흡수계수와 같은 연료의 열적 물성값에 따른 영향을 평가하였다. 해석대상 풀의 직경은 5 cm에서 200 cm 사이이며 해석영역의 크기는 풀의 크기에 비례하여 구성하였다. 해석에 적용된 기준격자는 격자민감도 평가를 통해 결정되었으며 약 750,000개의 격자를 적용하였다. 메탄올 풀 화재에 대해 FDS 액체증발모델을 적용하여 계산된 질량연소플럭스는 해석대상 풀 직경에 따른 천이특성을 잘 나타냈으며 전체적으로 실험편차 내에서 기존 실험과 일치된 결과를 예측하였다. 질량연소플럭스는 복사분율 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며 풀의 직경이 작은 경우 평균흡수계수의 영향이 상대적으로 크게 나타났다.

ABSTRACT

The present study has been conducted to predict the mass burning flux of methanol pool fire using liquid vaporization model in FDS and examine the effect of thermal properties of liquid fuel such as radiative fraction and mean absorption coefficient. A series of calculation for the pool diameter of 5 cm to 200 cm were performed and the size of computational domain was determined by the scale of the pool diameter. The reference grid size was determined by the grid sensitivity analysis and the computational grids consisted of approximately 750,000 cells. For the methanol pool fire, the mass burning flux predicted by liquid vaporization model of FDS followed the trend of transient characteristics as a function of pool diameter and showed good agreement within measurement uncertainty range of previous studies. The mass burning flux increased with increasing the radiative fraction and the mean absorption coefficient greatly affected on relatively small pool diameter.

Keywords : Pool Fire, Burning Rate, CFD, Fire Model, Mass Burning Flux

1. 서 론

풀 화재(pool fire)는 화원 면적에 비례하여 화재크기가 결정되며 비교적 빠른 시간에 준정상상태의 화재를 형성할 수 있어 화재 실험에 널리 적용되어 왔으며 연료 증기의 생성 메커니즘이 상대적으로 간단하여 화원 근처의 열전달 특성을 이해하는데 활용된다.⁽¹⁻²⁾ 또한 액체연료 사고시 누출된 연료는 액체 풀 화재를 형성하는 경우가 많기 때문에 효과적인 화재대응을 위해서는 풀 화재의 연소율, 화염 높이, 화원으로부터의 복사열 등 다양한 화재거동에 대한 이

해를 필요로 한다. 자유연소(free burning) 상태에서의 메탄올 풀 화재는 그을음(soot)이나 일산화탄소의 생성이 거의 없기 때문에 풀 화재의 거동특성을 이해하는데 널리 적용된다. Blinov 등은 액체연료의 점화, 연소, 소화에 이르는 폭 넓은 연구를 수행하였으며 풀 화재의 화염형태 및 연소과정에 관한 기본적인 특성을 연구하였다.⁽³⁾ Hamins 등은 다양한 풀 화재의 구조적 특성뿐만 아니라 열 및 물질 전달 특성에 대한 연구를 수행하였으며⁽⁴⁻⁵⁾ 연료표면에서의 에너지 균형을 고려하여 풀 화재의 연소율을 예측하는 모델 및 풀 화재 표면으로의 열순환과 복사열전달 특성에 대

한 상세한 연구를 진행하였다.⁽⁶⁻⁷⁾

플 화재의 여러 가지 특성 가운데 질량연소플럭스(mass burning flux, kg/m²s)는 단위면적당의 연소율로 정의되며 연료의 증발열, 끓는점 등 연료자체의 물성과 연료표면에서의 열전달 특성에 의존하여 플 화재의 발열량을 추정하거나 연소시간을 평가하는데 중요한 인자로 인식된다. Burguss 등은 탄화수소계 액체연료에 대해 질량연소플럭스는 연료의 최대 질량연소플럭스와 화원직경 및 화염의 방사 특성의 함수로 경험식을 제시하였으며⁽⁸⁾ 실제 엔지니어링 분야에서 널리 적용되고 있다.⁽⁹⁾ Yang 등은 연료의 열적 물성과 액체연료 표면에서의 다양한 열전달 특성 해석을 통해 플 화재의 질량연소플럭스 예측을 위한 단순모델을 제시하였으며 기존의 실험결과와 비교하여 정성적인 경향은 비교적 잘 예측하였으나 연료에 따라 정량적인 오차가 상대적으로 크게 나타났다.⁽¹⁰⁾

그러나 많은 플 화재의 해석과정에서 화재로부터 증발되는 연료의 양을 직접 계산하기보다 측정된 연료의 질량감소율을 입구경계조건으로 고려하여 화재특성을 해석하는 경우가 많았다. FDS 모델에서는 Clausius-Clapeyron 관계식을 적용하여 온도/압력 등 조건에 따라 연료표면에 인접한 지점에서의 연료농도를 계산하여 액체연료의 증발을 직접 해석할 수 있는 모델이 포함되어 있다. 그러나 이 모델에서는 액체연료 내부의 대류열전달 영향을 고려하지 않고 단순 전도와 복사열전달의 영향만을 고려하기 때문에 실제 연소율과 차이가 있을 수 있다. 플 화재시 연료의 질량연소플럭스를 직접 해석하는 것은 플 화재로 인한 화원크기를 예측하고 화재위험을 평가하는데 크게 기여할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 자유연소상태에서 완전연소에 가깝게 연소되는 메탄올에 대해 FDS 모델의 연료증발모델을 적용하여 플 화재의 질량연소플럭스를 평가하고 화원근처에서의 열전달 특성을 파악하여 수치해석 모델을 이용한 액체연료증발 해석의 타당성을 검토하고 주요입력인자에 따른 영향을 파악하고자 한다.

2. 수치해석

2.1 플 화재 모델링

플 화재에서 연료의 증발율은 Figure 1에서 보는 바와 같이 화염이나 외부에서 연료표면으로 가해지는 열전달, 연료표면에서의 열손실, 연료의 물성의 따라 결정된다. 정상상태의 연료의 증발율은 연료표면에 가해지는 열순환(heat feedback)에 의존하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_f'' = \frac{\dot{q}_t''}{(h_v + C_{p,l}(T_s - T_o))} \quad (1)$$

\dot{m}_f'' 은 연료의 질량연소플럭스(kg/m²s), h_v 는 연료의 증발열(heat of vaporization, kJ/kg), $C_{p,l}$ 은 액체연료의 비열

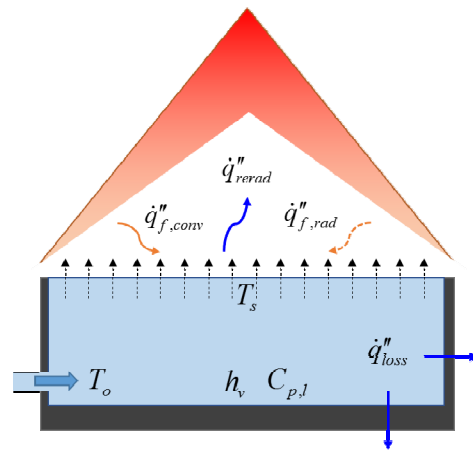


Figure 1. Schematic of energy balance of liquid pool fire.^(6,7)

(kJ/kgK), T_s 플 표면의 온도(K), T_o 는 공급되는 연료의 온도(K)를 의미한다. 플의 둘레(rim)를 통한 열전달을 고려하지 않을 경우 플 표면에서의 순열유속은 Figure 1에서 보는 바와 같이 화염으로부터의 대류 및 복사열전달과 연료표면에서의 재복사(re-radiation)와 열손실 기여분으로 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$\dot{q}_t'' = \dot{q}_{f,conv}'' + \dot{q}_{f,rad}'' - \dot{q}_{rad}'' - \dot{q}_{loss}'' \quad (2)$$

연소과정에서 증발되는 연료의 증발율은 플 표면위의 연료증기의 농도와 온도에 따라 결정된다. FDS 모델에서는 Clausius-Clapeyron식을 이용하여 연료표면근처에서 연료증기의 체적분율을 액체연료의 끓는점의 함수로 다음과 같이 나타낸다.⁽¹¹⁾

$$X_{F,l} = \exp\left[-\frac{h_v MW_F}{R}\left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_b}\right)\right] \quad (3)$$

여기서 MW_F 는 연료의 분자량(g/mol), T_b 는 연료의 끓는점(K)을 의미한다. 액체연료의 증발율은 Stefan 확산법칙에 따라 계산되며 상세내용은 FDS Technical Reference Guide를 참고한다.⁽¹²⁾ 실제 플 화재의 액체연료 내부에서는 온도차에 따른 대류유동이 발생하지만 FDS 해석에서는 액체연료 내부에서의 대류현상은 고려하지 않는다.

해석대상 연료는 메탄올(CH₃OH)로서 soot의 생성이 거의 없고 완전연소에 가깝게 연소되기 때문에 연소조건에 영향을 최소화할 수 있으며 복사물성을 평가하기 위해 RADCAL 데이터베이스가 FDS에 포함되어 화원근처에서 비교적 상세한 복사열전달 해석이 가능하다.

2.2 해석모델

Figure 2는 화원 직경(D)에 따른 해석영역의 스케일을 도시적으로 나타낸다. 자유연소상태의 메탄올 플 화재는 화원의 직경에 비해 화재발열량이 상대적으로 작아 무차원

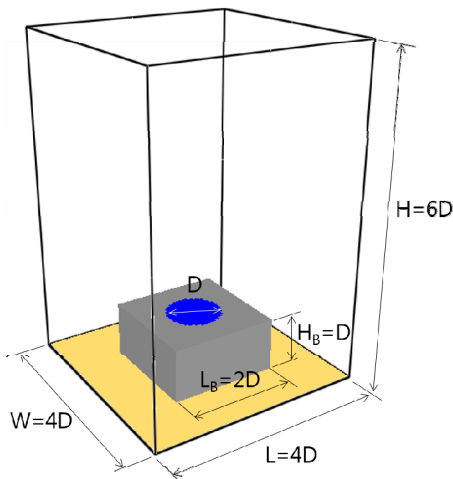


Figure 2. Schematic and scale of the computational domain of pool fire model.

발열량이 작은 화재에 속하며 화염의 길이가 상대적으로 짧은 편이기 때문에 해석영역의 폭과 높이는 화원직경의 4배와 6배를 적용하였다. 액체 풀의 표면은 폭이 2D, 높이가 1D인 장애물의 표면에 존재하는 것으로 가정하였다. 해석 대상 풀의 크기는 5~200 cm이다.

해석에 적용된 FDS는 버전 6.5이며 풀 화재 증발 해석에 필요한 액체연료의 물성은 Table 1과 같이 열전도계수 (W/mK), 비열(kJ/kgK), 밀도(kg/m³), 방사율, 증발잠열(kJ/kg), 흡수계수(1/m), 끓는점(°C), 복사분율 등이 요구된다. 이중 복사분율과 액체연료의 복사열 흡수계수는 연소 조건이나 물성값의 불확실도가 크기 때문에 본 해석에서는 민감도 평가를 통해 그 영향을 파악한다.

FDS에서는 액체연료 내부로의 복사열전달(in-depth radiation heat transfer)을 해석하기 위해 two flux 모델을 적용하고 있으며 복사강도가 반구방향으로 전방향(forward)과 후방향(backward)으로 일정하다고 가정 한다. 여기서 연료의 흡수계수(absorption coefficient)는 액체연료 내부로의 전방향 및 후방향 복사강도를 계산하는데 적용되며 상세한 내용은 이전 연구를 참고한다.^(12,13)

액체연료의 풀 화재는 액체표면에 인접한 기체영역의 열적 특성이 매우 중요하기 때문에 격자크기에 따라 해석 결과가 크게 영향을 받을 수 있다. 본 연구에서는 0.3 m 화원에 대해 화재해상도지수를 기초로 대상격자를 선정하고 격자민감도평가를 수행하여 최적 격자를 선정하였다. 풀 화재에서의 특성길이는 다음과 같이 계산된다.⁽¹⁵⁾

$$Q_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho C_p T_\infty \sqrt{g D} D^2} \quad (4)$$

여기서, \dot{Q} 는 화재 발열량(kW), ρ 는 공기의 밀도(kg/m³), C_p 는 공기의 비열(kJ/kgK), T_∞ 는 외기온도(K), D 는 화원의 직경(m)을 의미한다. 화재해상도지수(Fire Resolution Index, ϕ)는 무차원 특성길이에 대한 격자크기의 비로 다음과 같이 나타낸다.⁽¹⁵⁾

$$\phi = \frac{Q_D^*}{\Delta x} \quad (5)$$

Table 2는 격자민감도 시험에 적용된 해석대상 격자크기와 화재해상도지수, 격자수 등을 나타낸다. 최소화재해상도 지수는 4.3이며 최대 화재해상도지수는 43.4이다. Figure 3은 화재해상도 지수에 따른 0.3 m 풀 화재의 질량연소플럭스(mass burning flux, g/m²s)의 변화를 나타내고 오차막대는 준정상상태의 평균값에 대한 표준편차를 의미한다. 화

Table 2. Summary of Grid Sensitivity Analysis

Case	Δx	FRI	No. of Grids
1	0.100	4.3	2,592
2	0.040	10.9	40,500
3	0.020	21.7	324,000
4	0.015	29.0	768,000
5	0.010	43.4	2,592,000

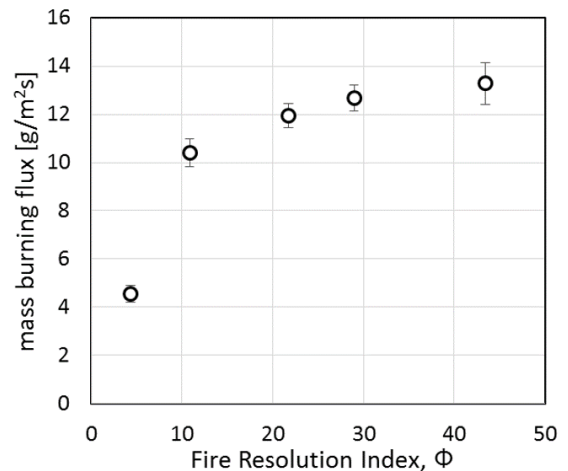


Figure 3. Grid sensitivity of mass burning flux of methanol pool fire.

Table 1. Thermo-physical Properties of Liquid Methanol⁽¹⁴⁾

Thermal Conductivity [W/mK]	Specific Heat [kJ/kgK]	Density [kg/m ³]	Boiling Point [°C]	Heat of Vaporization [kJ/kg]	Radiative Fraction	Absorption Coefficient [1/m]
0.2	2.48	796	64.8	1099	0.17	1140

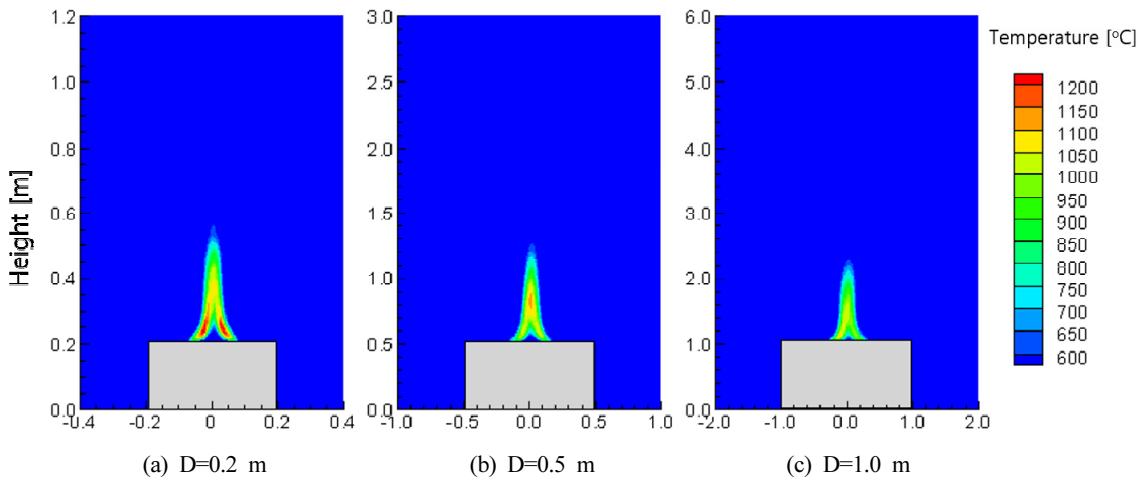


Figure 4. Calculated temperature field for different size of methanol pool fire.

재해상도지수가 12보다 작은 경우 최대 화재해상도 지수를 기준으로 질량연소플럭스의 예측값이 20% 이상 낮게 예측하였다. 화재해상도 지수가 25보다 큰 격자에서는 질량연소플럭스의 예측값이 5% 정도로 비교적 유사한 값을 나타냈다. 따라서 본 연구에서는 계산의 경제성과 격자 민감도를 고려하여 해석영역을 격자해상도지수가 29인 80×80×120개의 격자로 구성하여 화원직경변화에 따른 해석을 수행하였다. 빠른 계산을 위해 전체 계산영역을 8개의 다중 격자로 분할하여 리눅스 클러스터상에서 8개의 노드에 균등배분하여 병렬계산을 수행하였다.

3. 해석결과

Figure 4는 풀의 직경이 0.2 m, 0.5 m, 1.0 m 인 경우 계산된 고온부(600~1200 °C) 온도분포를 나타내며 이를 통해 화염 높이를 정성적으로 유추할 수 있다. 화염의 절대 높이는 풀의 직경이 증가함에 따라 증가하지만 화염의 상대 높이(L_f/D)는 풀의 직경 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 화염높이에 관한 이전 연구나 경험식과 일치된 경향을 보여주고 있는데 화염높이에 관한 Heskestad식은 화원의 직경과 발열량의 함수로 다음과 같이 나타낸다.⁽¹⁶⁾

$$\frac{L_f}{D} = 0.235 Q^{2/5} - 1.02 \quad (6)$$

메탄올의 경우 무차원 발열량이 작은 연료로서 화원의 직경 증가에 비해 발열량 증가가 상대적으로 작기 때문에 화염의 상대 높이는 화원직경 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는 것으로 파악된다.

Figure 5는 화원의 직경에 따른 질량 연소플럭스의 변화를 기준에 수행된 실험결과와 액체증발모델을 적용한 FDS 해석결과를 비교하여 나타낸다. 직경이 큰 풀 화재의 경우

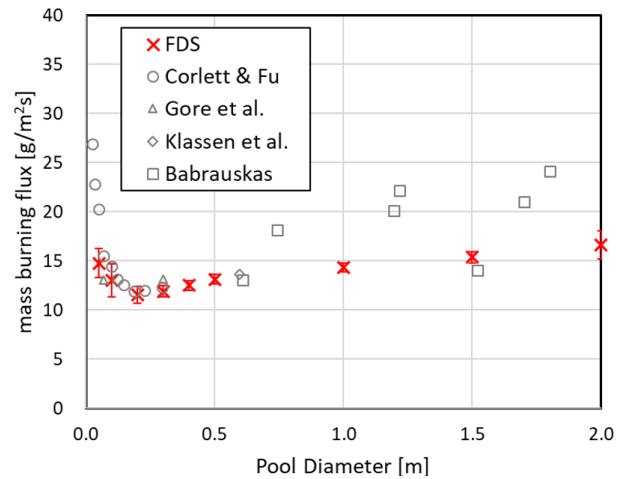


Figure 5. The predicted mass burning flux as a function of pool diameter comparing with experimental data.

($D > 1$ m), 완전 난류화염특성을 가지며 풀의 벽면으로부터의 전도열전달이나 연료표면에서의 대류열전달에 비해 화염으로부터의 복사열전달이 지배적이기 때문에 단위면적당 화원표면에 가해지는 복사열유속은 비교적 일정하며 이로 인해 특정 직경 이상에서는 비교적 일정한 질량연소플럭스를 가지게 된다. 직경이 매우 작은 풀 화재의 경우 ($D < 0.1$ m), 화염으로부터의 복사열에 비해 전도/대류열전달이 상대적으로 큰 비중을 차지하기 때문에 화원의 크기에 따른 영향이 상대적으로 크며 풀의 직경이 감소함에 따라 층류 화염특성을 보인다. Hottel 등에 따르면 연료에 따라 차이가 있으나 $0.1 \text{ m} < D < 1 \text{ m}$ 정도에서 천이특성(transient characteristics)을 보이며 이 구간에서 최소 질량연소플럭스를 나타내는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 연료의 질량연소플럭스는 동일화원에 대해서도 주변의 열적조건, 림높이(rim height), 풀의 냉각여부, 연료층의 깊이 등 실험조건에 따라 다소 차이가 있을 수 있다. 그러나 전체적으로 FDS 계산결

과는 앞서 언급한 풀 화재의 직경에 따른 특성을 비교적 잘 반영하고 있으며 정량적으로도 기존 연구의 실험결과와 비교해 큰 차이 없이 실험 편차 내에서 풀 화재의 질량연소플럭스를 예측하였다.

복사분율(radiative fraction)은 시간당 화염으로부터 방출되는 총 열에너지(\dot{Q}) 가운데 복사의 형태로 방사되는 에너지(\dot{Q}_r)의 비중을 나타내는 변수로서 화염 내 soot의 존재나 연소생성물의 양이나 종류나 따라 크게 영향을 받는다.

$$\chi_r = \frac{\dot{Q}_r}{\dot{Q}} \quad (7)$$

시간당 화염으로부터 방사되는 복사에너지는 반경이 R_0 이고 높이가 Z_0 인 원통 표면으로 방사되는 복사열유속을 적분하여 산정한다.

$$\dot{Q}_r = 2\pi \int_0^{R_0} q_{rad}(r, z=0) r dr + 2\pi R_0 \int_0^{Z_0} q_{rad}(R_0, z) dz \quad (8)$$

메탄올 풀 화재의 복사분율은 연구자에 따라 0.16~0.23 정도의 값이 이전연구에서 제시되고 있으며 화원의 크기나 측정방법에 따라 다소 차이가 있다.^(6,10,18)

본 연구에서는 메탄올의 복사분율이 0.12~0.25까지 변화한다고 가정하고 30 cm 크기의 화원에 대해 질량연소플럭스에 미치는 상대적인 영향을 평가하였다. Figure 6은 복사 분율변화에 따라 계산된 메탄올의 질량연소플럭스 변화를 나타낸다. 해석에 적용된 복사분율 범위에서 전체적으로 복사분율이 증가함에 따라 연료표면에 전달되는 복사에너지의 양이 증가하여 질량연소플럭스는 증가하는 경향을 보였으며 질량연소플럭스는 최대 40%까지 변화하였다.

화염으로부터 연료표면으로의 열순환(heat feedback)은 풀 화재의 질량연소플럭스를 평가하는데 매우 중요한 요소

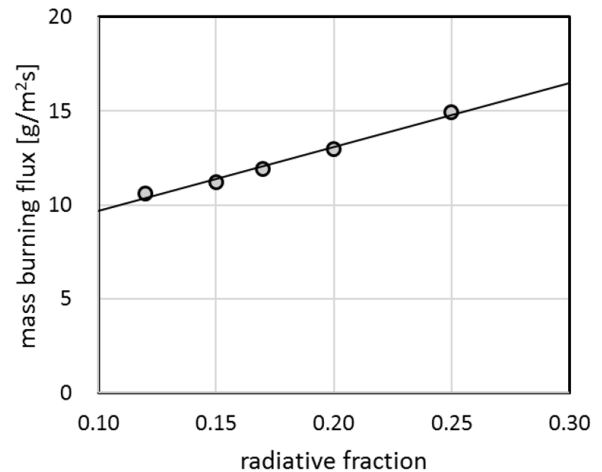


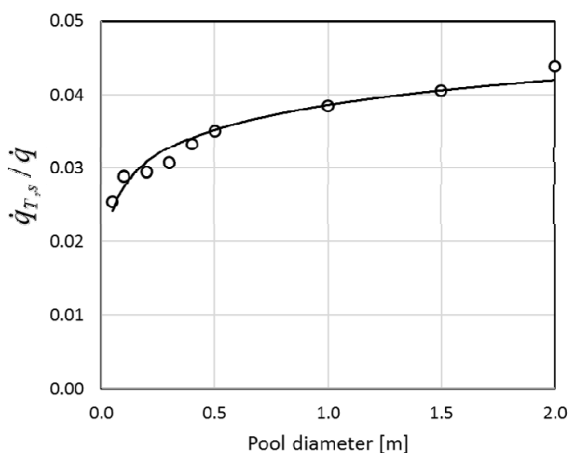
Figure 6. Effect of the radiative fraction on the mass burning flux of 30 cm diameter methanol pool fire.

이다. 표면으로 전달되는 전체 열유속(total heat flux)은 복사열유속(radiative heat flux)과 대류열유속(convective heat flux)의 합으로 나타낼 수 있으며 FDS 모델에서는 다음과 같이 계산된다.

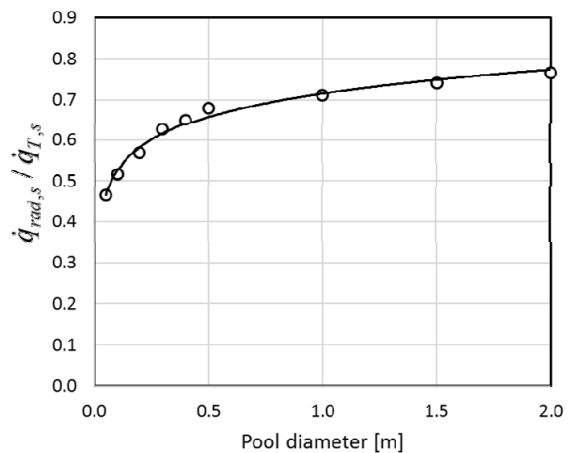
$$\dot{q}_{T,s}'' = \epsilon_s (\dot{q}_{rad}'' - \sigma T_s^4) + h(T_g - T_s) \quad (9)$$

우변의 첫 번째 항은 복사열유속, 두 번째 항은 대류열유속의 기여분을 나타낸다. 연료표면에 도달하는 에너지의 합은 열유속을 화원 면적에 대해 적분하여 계산되며 연료 표면으로 순환되는 전체 열전달량과 복사열전달량은 다음과 같이 각각 계산된다.

$$\dot{q}_{T,s} = \int_0^{R_0} \dot{q}_{T,s}'' dr, \quad \dot{q}_{rad} = \int_0^{R_0} \dot{q}_{rad}'' dr \quad (10)$$



(a) fraction of heat feedback to fuel surface



(b) radiative fraction of heat feedback to fuel surface

Figure 7. Calculated heat feedback to fuel surface as a function of pool diameter.

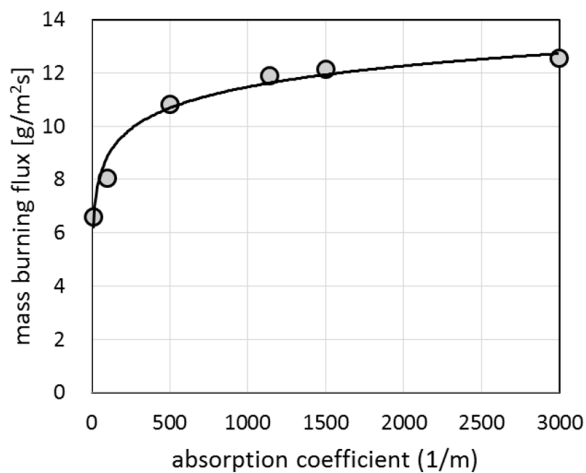


Figure 8. Effect of the absorption coefficient on the mass burning flux of a methanol pool fire (D=30 cm).

Figure 7(a)는 풀 화재의 크기별로 전체 발열량에 대한 연료표면으로 순환되는 열에너지의 비를 나타낸다. FDS 계산결과는 연소과정에서 발생된 총 발열량 가운데 약 2.5~4.5% 정도의 열에너지가 화염표면으로 전달되고 있으며 풀의 크기가 증가함에 따라 전체적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 화원의 직경증가에 따라 순환되는 열전달량의 증가율은 점차 감소한다. Figure 7(b)는 화염으로부터 연료표면으로 순환되는 열에너지 가운데 복사에너지의 비를 나타낸다. 풀의 표면으로 전달되는 전체 열전달량 가운데 약 50~80% 정도가 복사에너지의 기여분임을 보여주고 있으며 풀의 크기에 따라 큰 차이를 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 풀의 크기가 증가할수록 액체연료표면에서의 복사열전달의 기여분은 증가하고 풀의 크기가 작아질수록 대류의 영향이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Figure 8은 메탄올의 복사에너지 흡수계수(absorption coefficient)에 따른 질량연소플럭스의 변화를 나타낸다. 흡수계수는 물질이 복사에너지를 흡수하는 정도를 나타내는 척도로 특히 풀 화재 해석에서는 액체 연료표면에서 화염으로부터의 복사에너지를 흡수하는 정도를 계산하는데 있어서 중요한 인자가 된다. 동일 크기의 풀 화원에 대해 흡수계수가 작은 경우 질량연소플럭스 변화에 미치는 영향은 매우 크지만 흡수계수가 증가함에 따라 질량연소플럭스에 미치는 영향은 감소하여 거의 일정한 로그함수형태를 나타낸다. FDS 검증연구에는 평균흡수계수로 1,430 (1/m)이 적용되어 있으나⁽¹⁸⁾ 흡수계수는 액체 풀 근처의 열적 화학적 특성에 따라 변화하고 파장에 따른 영향이 크기 때문에 적용된 입력값의 불확실성이 상대적으로 크다. 특히 평균흡수계수가 매우 작은 경우 질량연소플럭스에 미치는 영향이 상대적으로 크기 때문에 타당한 입력값의 선택이 중요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 메탄올 액체연료 풀 화재의 특성을 파악하기 위해 FDS 모델의 연료증발모델을 적용하여 질량연소플럭스를 평가하였으며 화원근처에서의 열전달 특성 및 주요 입력인자의 영향을 파악하여 액체연료증발 모델의 타당성을 검토하였다. 액체증발모델을 고려한 FDS 계산결과는 메탄올 풀 화재의 직경에 따른 화재거동 특성을 비교적 잘 반영하고 있으며 질량연소플럭스 예측에 있어서 정량적으로 이전 실험결과와 비교하여 실험편차 범위에서 일치된 결과를 보였다. 복사분율과 평균흡수계수는 화염으로부터 연료표면으로의 열전달 특성에 매우 중요한 영향을 미치는 인자로서 복사분율과 평균흡수계수의 변화에 따른 질량연소플럭스 변화를 비교하였으며 메탄올 연료의 복사분율이 0.12~0.25까지 변화한다고 가정한 경우 30 cm 풀 화재에 대해 질량연소플럭스는 복사분율 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며 최대 40% 이상의 차이를 보였다. 흡수계수 증가에 따라 질량연소플럭스는 로그함수의 형태로 증가하는 경향을 보였으며 상대적으로 작은 흡수계수를 적용한 경우 질량연소플럭스를 매우 낮게 예측하였다.

FDS에서 액체연료증발을 효과적으로 고려하기 위해서는 실험적 정량화가 복잡한 복사분율이나 흡수계수 등 연료의 복사열물성에 대한 상세연구를 필요로 한다. 또한 화염의 soot이나 화학종에 따라 연료표면으로의 복사열전달 특성이 영향을 받기 때문에 다양한 연료에 대한 비교검증이 요구된다. 그러나 본 연구와 같이 검증연구가 확대되고 다양한 연료에 대한 물성을 확보할 경우 기존의 풀 화재의 연소율 산정에 대한 경험적인 접근방법에서 물리적으로 타당한 모델을 적용한 직접 접근방식으로 화재해석기법을 확대하여 해석결과의 신뢰성을 확보하는데 기여할 수 있다.

후 기

본 연구는 2017년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며 연구수행에 많은 조언과 도움을 준 A. Hamins 박사와 J. Yang 박사에게 감사드립니다.

References

1. W. J. You, D. G. Nam, M. C. Youm, S. C. Kim and H. S. Ryou, "Analysis of Heat Release Rate with Various Diameter of Heptane Pool Fire Using Large Scale Cone Calorimeter", Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 5, pp. 1-7 (2014).
2. K. H. Oh, S. J. La and S. E. Lee, "A Study on the Characteristics of Pool Fire", Fire Science and Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 39-44 (2004).

3. V. I. Blinov and G. N. Khudiakov, "Diffusive Burning of Liquids", US Army Translation, NTIS No. AD296762 (1961).
4. A. Hamins and A. Lock, "The Structure of Moderate Scale Methanol Pool Fire", NIST Technical Note 1928 (2016).
5. A. Hamins, T. Kashiwagi and R. R. Buch, "Characteristics of Pool Fire Burning", Fire Resistance of Industrial Fluids, ASTM STP 1284, American Society for Testing and Materials, Philadelphia (1995).
6. A. Hamins, S. J. Fischer, T. Kashiwagi, M. E. Klassen and J. P. Gore, "Heat Feedback to the Fuel Surface in Pool Fires", Combustion Science and Technology, Vol 97, No. 1-3, pp. 37-62 (1994).
7. A. Hamins, "Energetics of Small and Moderate Scale Gaseous Pool Fires", NIST Technical Note 1926 (2016).
8. M. G. Zabetakis and D. S. Burgess, "Research on the Hazards Associated with the Production and Handling of Liquid Hydrogen", Report BM-RI-5701, Bureau of Mines (1961).
9. U.S.NRC, "Fire Dynamics Tools(FDT) Quantitative Fire Hazard Analysis Methods or the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program", NUREG-1805, Supplement 1, Vol. 1 (2013).
10. A. Hamins, J. C. Yang and T. Kashiwagi, "A Global Model for Predicting the Burning Rates of Liquid Pool Fires", NISTIR 6381 (1999).
11. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST Special Publication 1019 Sixth Edition (2016).
12. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide, Volume1: Mathematical Model", NIST Special Publication 1018-1 Sixth Edition (2016).
13. T. Sikanen and S. Hostikka, "Modeling and Simulation of Liquid Pool Fires with In-Depth Radiation Absorption and Heat Transfer", Fire Safety Journal, Vol. 80, pp. 95-109 (2016).
14. NIST, "NIST Chemistry WebBook-Methanol", NIST Standard Reference Database 69 (2017).
15. A. Bounagui, N. Benichou, A. McCartney and A. Kashef, "Optimizing the Grid Size Used in CFD Simulations to Evaluate Fire Safety in Houses", Proceeding of 3rd NRC Symposium on CFD, HPC, and VR, Ottawa (2003).
16. G. Heskestad, "Luminous Height of Turbulent Diffusion Flames", Fire Safety Journal, Vol. 5, No. 2, pp. 103-108 (1983).
17. H. C. Hottel, "Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids", Fire Research Abstracts and Reviews, Vol. 1, pp. 41-44 (1959).
18. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator, Volume 3: Validation", NIST Special Publication 1018-3 Sixth Edition (2016).