

[Research Paper]

CFAST를 이용한 구획실 가스화재의 디자인 화재곡선 평가

백빛나 · 오창보[†] · 황철홍^{**}

부경대학교 안전공학과 대학원생, [†]부경대학교 안전공학과 교수, ^{**}대전대학교 소방방재학과 교수

Evaluation of Design Fire Curves for Gas Fires in a Compartment Using CFAST

Bitna Baek · Chang Bo Oh[†] · Cheol-Hong Hwang^{**}

Postgraduate student, Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University

[†]Professor, Dept. of Safety Engineering, Pukyong National University

^{**}Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received August 8, 2018; Revised August 8, 2018; Accepted August 17, 2018)

요 약

본 연구에서는 CFAST를 이용하여 구획실 가스연료 화재실험에 대한 디자인 화재곡선(Design fire curves, DF)의 예측성능을 평가하였다. 평가된 디자인 화재곡선은 이전의 연구에서 제안된 2-stage DF, Ingason이 제안한 Quadratic DF와 Exponential DF이며, 예측성능 평가를 위해 각 디자인 화재곡선을 CFAST의 입력조건으로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션결과와 실험결과의 비교를 통해 구획실 내부의 공간평균온도와 O₂, CO₂ 농도에 대해 전반적으로 2-stage DF > Quadratic DF > Exponential DF 순으로 실험결과를 합리적으로 예측하는 것을 확인하였다. CFAST 시뮬레이션 결과를 통해서도 실험에서 보이는 구획실 내 개구부측과 내측에서의 온도와 O₂ 및 CO₂ 농도 차이를 예측할 수 없음을 명확히 확인하였다. 또한 CFAST는 구획실 가스연료 화재의 CO 농도와 하층부의 공간평균온도에 대한 예측에 한계가 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, the prediction performance of design fire curves (DF) was evaluated for gas fires in a compartment by using CFAST. The CFAST simulations adopted the 2-stage DF suggested by the previous study and the Quadratic and Exponential DF suggested by Ingason. It was found by comparing the simulation and experimental results that the overall prediction performance of the design fire curves for the spatially-averaged temperature and concentrations of O₂ and CO₂ was, from the most reasonable to the most inaccurate, 2-stage DF > Quadratic DF > Exponential DF. The CFAST simulation could not predict for the difference in the spatially-averaged temperature and concentrations of O₂ and CO₂ at door and inner side locations in a compartment. The CFAST simulations also showed a limitation in the prediction of the spatially-averaged temperature at lower layer and the concentration of CO.

Keywords : Design fire curve, Consolidated model of fire growth and smoke transport (CFAST), Compartment fire, Gas fuel fire

1. 서 론

국내에서만 매년 약 40,000여건의 화재사고와 이로 인한 약 300여명의 사망자가 발생하고 있다. 화재피해를 줄이기 위해서 국내에서도 다양한 연구와 시도가 이루어지고 있는데, 건물의 화재안전설계를 위하여 2011년부터 본격적으로

도입된 성능위주설계(Performance-based design, PBD)도 그러한 시도 중의 하나이다. PBD는 건물의 설계단계에서부터 화재에 대한 안전성능을 검토하고 확보하는 것을 핵심으로 하고 있고 이를 위해서 실험 및 화재 시뮬레이션을 적용할 수 있다. 그러나 화재실험은 공간, 비용적인 어려움과 위험성이 있는데 반해 화재 시뮬레이션은 실험보다 적

[†] Corresponding Author, E-Mail: cboh@pknu.ac.kr, TEL: +82-51-629-6472, FAX: +82-51-629-6463

© 2018 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

은 비용으로 다양한 시나리오의 화재 위험성을 신속하게 분석할 수 있어 현실적으로 PBD에서 화재 안전성평가는 대부분 화재 시뮬레이션을 이용하여 이루어지고 있다.

화재 시뮬레이션에서는 예상되는 화재 시나리오의 입력 조건을 기반으로 얻어진 결과를 통해 화재안전성능을 검토하게 된다. 여기서 입력조건은 건물의 재료와 구조, 적재 가연물 등의 다양한 조건에 따라 달라지기 때문에 발생할 수 있는 화재의 복합적인 상황이 잘 반영된 화재 시나리오 선택이 필수적이다. 이 화재 시나리오를 기술할 수 있는 입력조건을 디자인 화재곡선(Design fire curve, DF)⁽¹⁾이라하며 일반적으로는 화재의 거동을 잘 나타내는 열발생률(Heat Release Rate, HRR)의 시간에 대한 변화로 표현한다.

현재까지 일부 연구자들에 의해 몇 가지 디자인 화재곡선들이 제안된 바 있는데, Kim 등⁽²⁾은 주거용 가연물에 대한 디자인 화재곡선을 제안하였고 Ingason⁽³⁾은 터널화재의 가연물들에 대한 디자인 화재곡선을 제안하였다. 그러나 이렇게 제안된 화재곡선들은 화재 시뮬레이션에서 얼마나 유용한 예측성능을 보이는지에 대해서는 검토가 이루어지는 못하였다.

최근 본 연구그룹에서는 Kim 등과 Ingason이 제안한 디자인 화재곡선을 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 이용한 터널화재 시뮬레이션에 적용하여 디자인 화재곡선의 유용성을 검토한 바 있다⁽⁴⁾. 이 연구에서는 Kim 등이 제안한 디자인 화재곡선이 Ingason이 제안한 디자인 화재곡선보다 실험에서 측정된 초기의 화재 전파속도를 잘 예측하며 터널 내의 연기거동을 합리적으로 예측하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Kim 등이 제안한 디자인 화재곡선은 디자인 화재곡선 작성 방법적 측면에서 초기 화재 점화시간이 명확하지 않거나 최대 열발생률이 작은 가연물들에 대해서는 디자인 화재곡선 작성이 어려운 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위해서 본 연구그룹에서는 기존의 디자인 화재곡선을 기본으로 더 일반적으로 적용할 수 있는 새로운 디자인 화재곡선(Revised Design Fire curve, RDF)을 제안하였다⁽⁵⁾. 이 연구에서는 새롭게 제안된 디자인 화재곡선의 예측성능을 평가하기 위해 Ingason이 제안한 디자인 화재곡선과 함께 구획실 내 액체 풀화재에 대해 FDS를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 검토결과 본 연구그룹이 제안한 디자인 화재곡선이 Ingason이 제안한 디자인 화재곡선보다 합리적으로 화재거동을 전체적으로 잘 예측하는 것을 확인하였다. 이후 본 연구그룹이 제안한 기존 디자인 화재곡선의 예측성능을 향상시키기 위해 화재성장 초기단계를 2단계로 모사한 2-stage 디자인 화재곡선을 추가로 제안하였다⁽⁶⁾. 이 연구에서는 FDS와 Consolidated model of Fire growth And Smoke Transport (CFAST)를 이용하여 액체 풀화재에 대해 기존의 디자인 화재곡선들과 수정된 디자인 화재곡선의 예측성능을 비교 검토하였다. 이를 통해 수정된 디자인 화재곡선은 실험의 화재 성장단계를 좀 더 정확하게 표현하게 되어 화재 초기거동을 기존

디자인 화재곡선들 보다 더 합리적으로 예측할 수 있음을 확인하였다. 또한 존 모델(Zone model)인 CFAST를 이용한 시뮬레이션의 유효성을 확인하여 경우에 따라서는 구획실 화재에 CFAST를 효과적으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

현재까지 본 연구그룹에서는 새로 제안한 디자인 화재곡선은 액체 풀화재에 대해서만 예측성능이 검토되었다. 하지만 실제 화재에 대한 디자인 화재곡선의 유용성을 확인하기 위해서는 다양한 가연물들에서 볼 수 있는 좀 더 특이한 HRR 변화특성을 보이는 화재에 대한 예측성능 검토도 필요하다.

따라서 본 연구에서는 좀 더 다양한 HRR 변화특성을 보이는 연료의 화재에 대한 디자인 화재 유용성 검토하고자 한다. 이를 위해 구획실 내부의 화재성상을 예측하는 데 여전히 충분한 장점이 있는 CFAST를 화재 시뮬레이션에 활용하였다. 우선 현 단계에서는 구획실 내에서 유량이 제어되어 특이한 형태의 HRR 변화를 보이도록 조정된 가스연료 화재를 대상으로 Ingason이 제안한 디자인 화재곡선과 RDF의 예측성능을 평가하고 그 유용성을 검토하여 향후 추가적인 연구의 기초자료를 제공하고자 하였다.

2. 디자인 화재곡선

디자인 화재곡선은 화재 시뮬레이션을 이용한 PBD의 신뢰성에 직결되기 때문에 화재의 성상을 충분히 반영해야 한다. 특히 화재진압 및 피난과정에서 중요한 초기의 화재 거동에 대한 예측성능은 화재의 안전성과 연관되기 때문에 더욱 중요하다.

일반적으로 화재곡선의 초기성장을 $\dot{Q} = at^2$ 의 형태로 표현하지만 화재에 대한 예측성능을 향상시키기 위해 연구에 따라 다른 표현이 사용된다. 그 중에서 Ingason은 at^2 의 형태와 유사한 2차곡선의 디자인 화재곡선 뿐만 아니라 지수 함수곡선 형태의 디자인 화재곡선을 제안하였다⁽³⁾. 그리고 본 연구그룹에서는 화재 성장구간에 대한 예측성능을 높이기 위해 화재 성장구간을 두 개의 at^2 형태의 기울기로 피팅하는 곡선을 제안하였다⁽⁶⁾. 여기서 Ingason과 본 연구그룹이 제안한 디자인 화재곡선들은 실험에서 발생한 총 열발생률과 동일하도록 피팅된다. Ingason과 본 연구그룹이 제안한 디자인 화재곡선들의 피팅방법은 Table 1에 기술되어 있으며, 좀 더 자세한 방법은 기존의 문헌^(3,6)을 참고하기 바란다.

본 연구에서 검토할 유량이 제어된 가스연료 화재의 HRR 형태를 결정하기 위하여 기존의 실험연구에서 얻어진 다양한 가연물에 대한 HRR 형상을 분석하였다. 주택 내부의 다양한 가연물에 대한 기존 실험^(7,8)의 HRR을 검토하여 썩크대와 책상을 대상 선정하였으며 Figure 1에 보이는 바와 같이 실험에서 얻어진 HRR (심볼)을 간략한 형태(실선)로 단순화하였다. 프로판(C_3H_8) 가스연료를 이용한 화재 실험에서 Figure 1의 단순화된 형태의 HRR을 얻기 위해서

Table 1. Mathematical Description of Different Method to Describe a Complete Design Fire Curve by PKNU (2-stage DF) and Ingason (Quadratic DF, Exponential DF)

Curve Identity Method	HRR (kW) as a Function of Time (s)
2-stage Design Fire Curve (2-stage DF) ⁽⁶⁾ Quadratic Growth and Decay	$\dot{Q}(t) = \alpha_{g,1st}(t - t_{0,1st})^2$ (1 st Growth Stage)
	$\dot{Q}(t) = \alpha_{g,2nd}(t - t_{0,2nd})^2$ (2 nd Growth Stage)
	$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max,av}$
	$\dot{Q}(t) = \alpha_d(t - t_f)^2$ (Decay Stage)
Quadratic Curve (Quadratic DF) ⁽³⁾ Quadratic Growth and Exponential Decay	$\dot{Q}(t) = \alpha_g t^2$ (Growth Stage)
	$\dot{Q}(t) = \alpha_g t_{max}^2 = \dot{Q}_{max}$
	$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max} e^{-\alpha_d(t - t_d)}$ (Decay Stage)
Exponential Curve (Exponential DF) ⁽³⁾ Exponential Growth and Decay	$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t} \cdot (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1}$ <p>where, $n = 0.74294e^{(2.9 \dot{Q}_{max} / E_{tot})}$</p> $r = (1 - \frac{1}{n})^{1-n}$ $k = \frac{\dot{Q}_{max}}{E_{tot}} \cdot r$ <p>E_{tot}: Total Quantity of Heat Release</p>

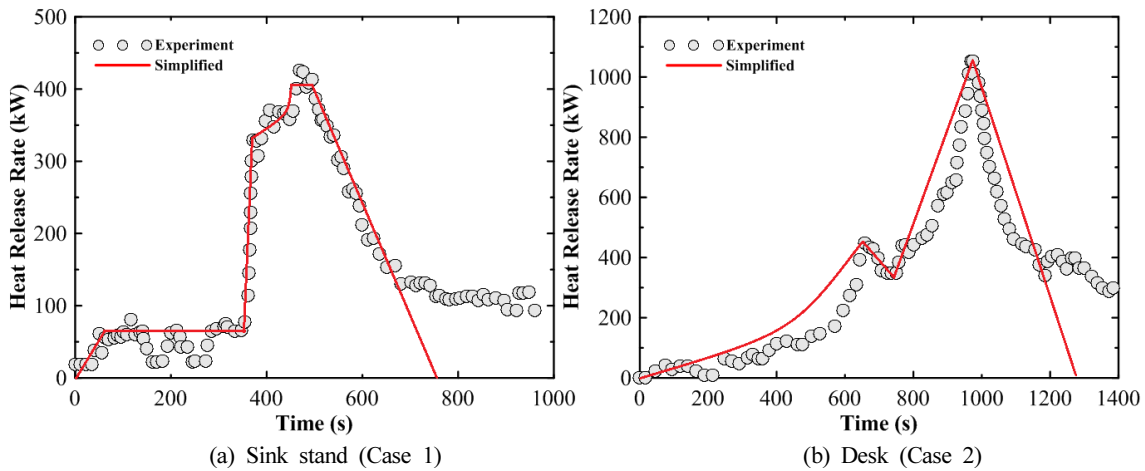


Figure 1. Experimental data from residential combustibles and simplified heat release rate based on experimental data^(7,8).

질량유량계를 이용하여 연료유량을 제어하였고 산소소모법을 이용하여 HRR을 측정하였다.

Figure 2에는 유량을 제어한 가스연료 화재실험에서 얻어진 2가지 HRR 변화곡선과 이 실험결과에 대해 Ingason의 DF와 RDF로 피팅하여 얻어진 디자인 화재곡선들을 도시하였다. 이 그림에서 얻어진 디자인 화재곡선들은 Table 1의 수식에 따라 얻어진 것으로서 각 디자인 화재곡선의 구하는데 필요한 변수들은 Table 2에 기술되어 있다. 디자인 화재곡선을 구하는 자세한 계산방법은 다른 문헌⁽⁹⁾을 참고하기 바란다.

Case 1에 대해서는 실험에서 측정된 HRR과 디자인 화재

곡선을 비교해보면 RDF가 최대 HRR에 대해서는 다른 디자인 화재곡선이나 실험보다 약간 낮게 나타나고 있다. 그러나 Case 2에 대해서는 실험과 가장 유사하게 화재 성장 구간과 감소구간을 모사하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 Quadratic DF와 Exponential DF는 실험과 최대 HRR이 유사하지만 초기 화재성장 단계에서 Quadratic DF는 너무 느리게 모사하고 있으며 Exponential DF는 점화순간이 많이 지연되어 위치하고 점화된 후에는 너무 과도하게 빠르게 화재가 성장하는 것으로 모사하고 있음을 알 수 있다. 이러한 디자인 화재곡선들의 특성이 화재 시뮬레이션에서 예측 성능에 미치는 영향에 대해서는 이후 자세히 논의하겠다.

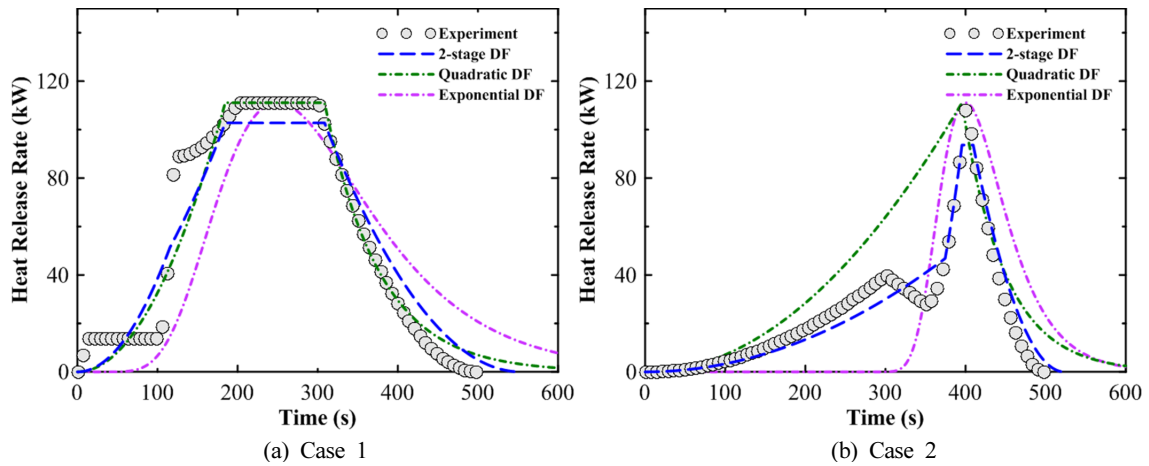


Figure 2. Heat release rate of experimental data and design fire curves of gas fires in a compartment.

Table 2. Parameters for the Calculations of Design Fire Curves PKNU (2-stage DF) and Ingason (Quadratic DF, Exponential DF)

2-stage DF	$\dot{Q}_{max,av}$	$t_{0,1st}$	$t_{0,2nd}$	t_i	t_d	t_f	$\alpha_{g,1st}$	$\alpha_{g,2nd}$	α_d
Case 1	72.06	0.0	-0.44	81.5	311.5	500.5	0.0109	0.0107	0.0020
Case 2	93.64	0.0	323.8	395.5	409.5	523.5	0.0003	0.0182	0.0072
Quadratic DF	\dot{Q}_{max}	t_o	t_i	t_d	t_{max}	α_g	α_d		
Case 1	111.11	0.0	81.5	311.5		0.0167	0.0202		
Case 2	111.11	0.0			395.5	0.0007	0.0187		
Exponential DF	\dot{Q}_{max}	t_o	t_{max}	n	r	k			
Case 1	111.11	0.0	101.0	3.044	2.2571	0.0109			
Case 2	111.11	0.0	401.0	20466.3	2.7182	0.0248			

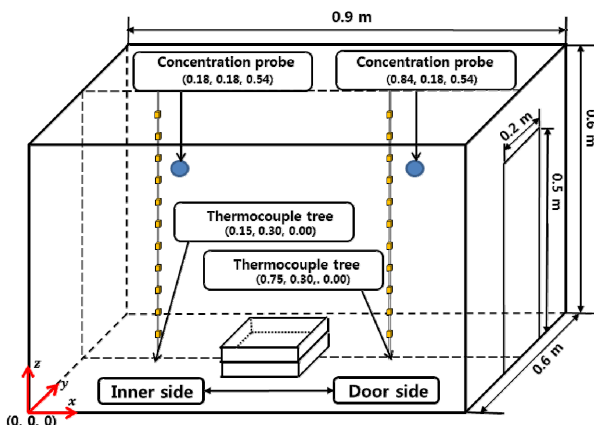


Figure 3. Measuring positions of thermocouples trees and concentration probes and compartment size of experiment and CFAST simulation.

3. 수치계산 조건

본 연구에서는 디자인 화재곡선의 예측성능을 검토하기 위해 존 모델의 대표적인 시뮬레이션 코드인 CFAST를 이용하였다. 계산영역은 Figure 3과 같이 실험과 동일한 구획

실 사이즈인 가로 × 세로 × 높이 = 0.9 m × 0.6 m × 0.6 m 로 하였다. 구획실 오른쪽 측면에는 0.2 m × 0.5 m 크기를 가진 개구부를 지정하였으며 구획실 중앙에 가로 × 세로 × 높이 = 0.14 m × 0.14 m × 0.04 m 크기를 가진 사각 연료팬 형태의 버너를 위치시켰다. 버너에는 유리구슬을 채워 프로판 가스 연료가 골고루 분산되어 공급되도록 하였다. CO 농도의 예측을 위해서는 CO yield값을 문헌⁽¹⁰⁾에서 얻어진 0.005로 지정하였으며 프로판 연료의 연소열은 46,000 kJ/kg으로 하였다. 그리고 각 Case에 대해 실험에서 측정된 HRR과 Figure 2에서 설명한 3가지 디자인 화재곡선의 HRR을 시뮬레이션의 입력조건으로 사용하여 수치계산을 수행하였다.

실험에서 O₂, CO₂, CO 농도는 Figure 3에 명시된 구획실 내측(Concentration probe at inner side)과 개구부측(Concentration probe at door side)에서 측정되었다. 또한 온도결과도 구획실 내측(Thermocouple tree at inner side)과 개구부측(Thermocouple tree at door side)에서 측정되었으며, 각 위치의 높이 0.05 m 지점부터 0.55 m 지점까지 각각 총 11개의 열전대를 통해 얻어졌다. 하지만 CFAST는 존 모델을 적용하기 때문에 수치계산에서는 상층부와 하층부의 공간평균온도만 계산된

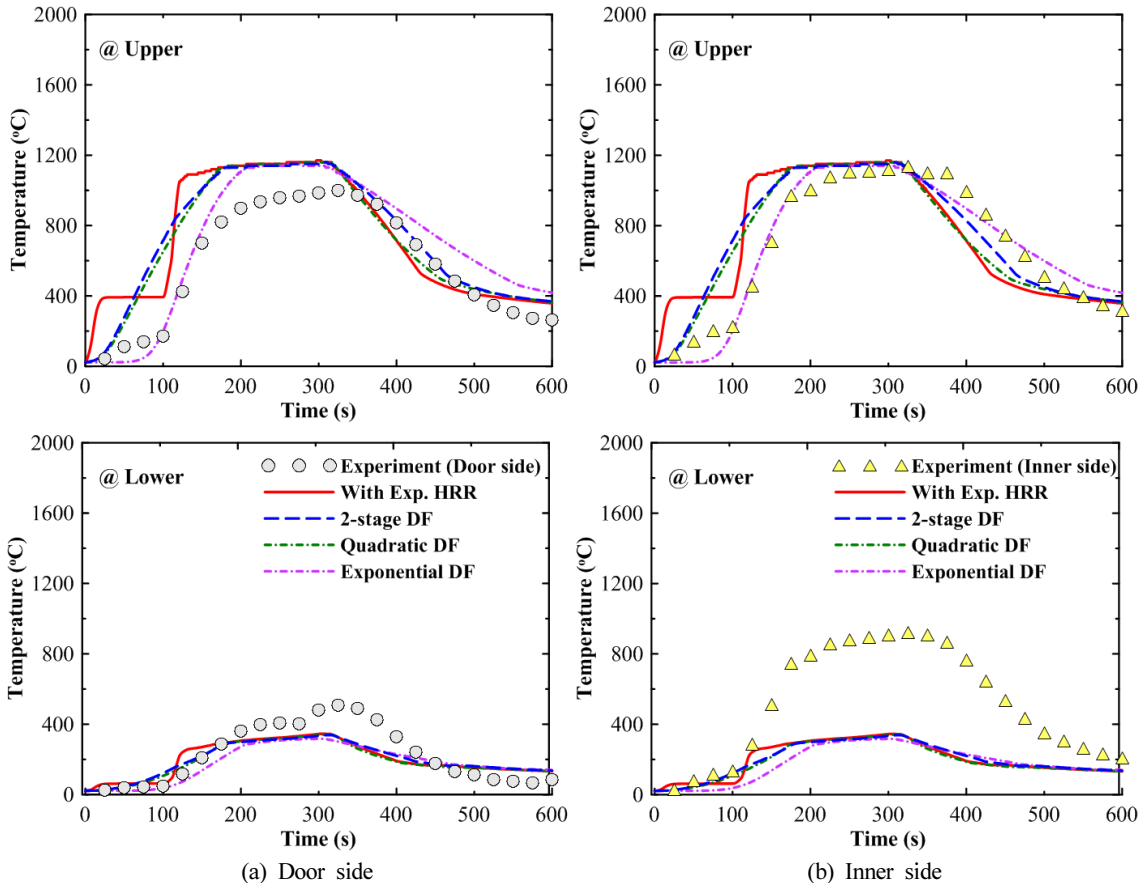


Figure 4. Temporal variation of spatially-averaged temperature for Case 1 at door and inner side locations obtained by experiment and simulations with design fire curves.

다. 따라서 실험결과와 수치계산결과의 비교를 위해 실험에서 측정된 온도분포와 아래의 수식 (1)과 (2)를 이용하여 상층부와 하층부 영역의 공간평균온도를 계산하였다⁽¹¹⁾.

$$T_U = \frac{1}{(H-Z_i)} \int_{Z_i}^H T(z) dz \tag{1}$$

$$T_L = \frac{1}{Z_i} \int_0^{Z_i} T(z) dz \tag{2}$$

여기서 T_U 와 T_L 은 각각 상층부와 하층부의 공간평균온도를 의미하며 H 는 구획실 내부의 높이, $T(z)$ 는 높이(z)에서 측정된 온도를 나타낸다. 그리고 Z_i 는 구획실 내 상층부와 하층부의 경계면 높이를 나타내며 아래의 수식 (3) ~ (5)를 통해 계산된다.

$$Z_i = \frac{T_L(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_L^2 - 2T_L H} \tag{3}$$

$$I_1 = \int_0^H T(z) dz \tag{4}$$

$$I_2 = \int_0^H \frac{1}{T(z)} dz \tag{5}$$

식 (3)의 T_L 은 구획실 내부의 주어진 위치의 수직선상에서 바닥을 제외한 가장 낮은 위치에서 얻어진 온도인 T_1 으로 대체하면 경계면 높이를 계산할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

Figures 4와 5는 Case 1과 Case 2의 HRR 조건에 대해 실험과 CFAST 계산을 통해 얻어진 공간평균온도를 비교 도시한 것이다. 실험의 경우에는 개구부측(Door side)과 내측(Inner side)에서 측정된 온도를 이용하여 공간평균온도를 계산하였기 때문에 개구부측과 내측의 공간평균온도 변화가 약간은 다르게 나타나고 있다. CFAST 결과의 경우에는 구획실 상층부와 하층부에 대한 온도차이만 존재하기 때문에 개구부측과 내측에 대한 공간평균온도는 동일한 결과를 나타내고 있다. 공간평균온도에 대한 실험과 CFAST 결과를 비교하였을 때 전체적으로 상층부의 실험결과에 대해서는 CFAST가 비교적 합리적으로 예측하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 하층부에 대해서는 상층부보다 예측 정확도가

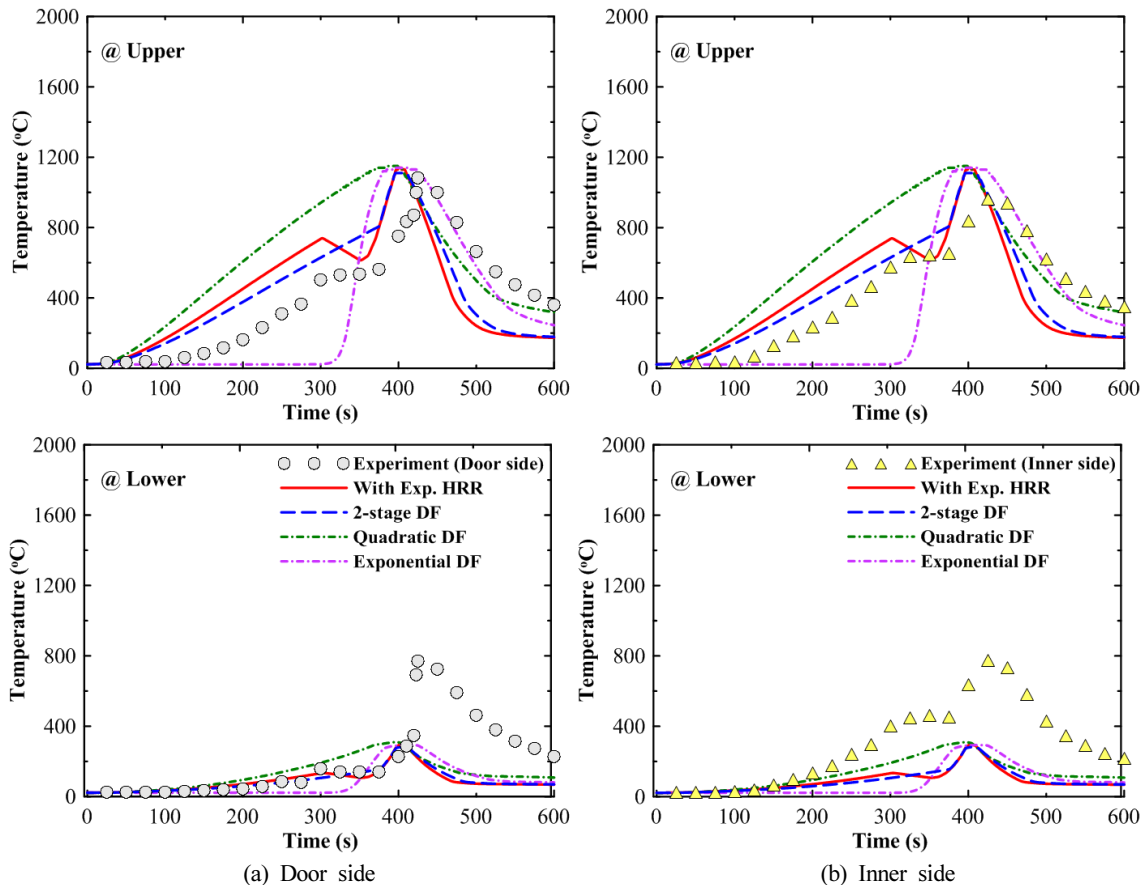


Figure 5. Temporal variation of spatially-averaged temperature for Case 2 at door and inner side locations obtained by experiment and simulations with design fire curves.

다소 낮게 나타나고 있는데, 개구부측에 대해서는 CFAST 결과가 실험을 비교적 추종하고 있지만 내측에서는 실험과 CFAST의 차이가 크게 나타나고 있다. 이러한 경향은 CFAST에서는 구획실 내부를 연기가 존재하는 상층부와 화재플럼으로 공기가 공급되는 하층부의 2개의 영역으로 구별하여 계산하지만 실제 구획실 내부의 화재성상을 너무 단순화하여 모사하기 때문이다. 특히 실험과 CFAST 결과 차이는 공기의 유입이 없는 내측의 하층부에서 실험과 온도차이를 크게 보이고 있음에 주의할 필요가 있다.

디자인 화재곡선에 따른 결과를 검토하기 위해 Figure 4의 Case 1을 먼저 살펴보면, 서로 다른 디자인 화재곡선이나 실험에서 얻어진 HRR 곡선을 적용하더라도 상층부의 최고온도에 대해서는 유사하게 예측하는 것을 알 수 있다. 그리고 상층부 최고온도에 대해서는 개구부측보다는 내측에 대한 예측 정확도가 조금은 더 높게 나타나고 있다. 디자인 화재곡선별 상층부의 온도에 대한 예측성능을 보면 Exponential DF > 2-stage DF > Quadratic DF > 실험 HRR을 이용한 순으로 실험을 잘 예측하는 것으로 나타나고 있다. 특이한 점은 실험에서 얻어진 HRR값을 입력으로 하더라도 디자인 화재곡선을 이용한 경우보다 상층부의 공간평균 온도의 변화경향을 잘 추종하지 못하는 것을 알 수 있으며,

특히 화재 초기단계에서 더욱 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 하층부의 최고온도에 대해서는 모든 입력조건에 예측 정확도가 다소 낮게 나타나고 있으며, 디자인 화재별 예측성능 차이도 그다지 크지 않다. 특히 하층부의 내측에서는 모든 디자인 화재곡선과 실험 HRR 입력조건에 대해서 실험에서 얻어진 온도보다 매우 낮게 예측하고 있어 CFAST 예측의 한계를 확인할 수 있다.

Figure 5의 Case 2에 대한 각 디자인 화재곡선들의 예측 성능도 대략 Case 1과 유사한 경향을 보이고 있다. 다만 Exponential DF의 경우에는 점화시점이 늦고 점화된 후 급격히 증가되는 특성을 가지고 있기 때문에 얻어진 온도결과도 그러한 경향을 보이고 있지만 실험에서 얻어진 온도변화 경향을 거의 추종하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 특히 화재 성장단계인 초기에 실험과의 차이가 매우 크다. 다만 최고온도에 대해서는 다른 디자인 화재곡선들과 유사하다. Case 2에 대해서 각 디자인 화재곡선의 예측 정확도를 보면 2-stage DF > 실험 HRR > Quadratic DF > Exponential DF 순으로 나타나고 있다. 공간평균온도의 변화경향에서 초기에 온도가 증가하다가 거의 증가되지 않다가 다시 증가되는 경향은 2-stage DF와 실험 HRR만이 보이고 있다. 하층부에 대한 예측성능은 Case 1에서 설명한 바와 큰 차이가 없어

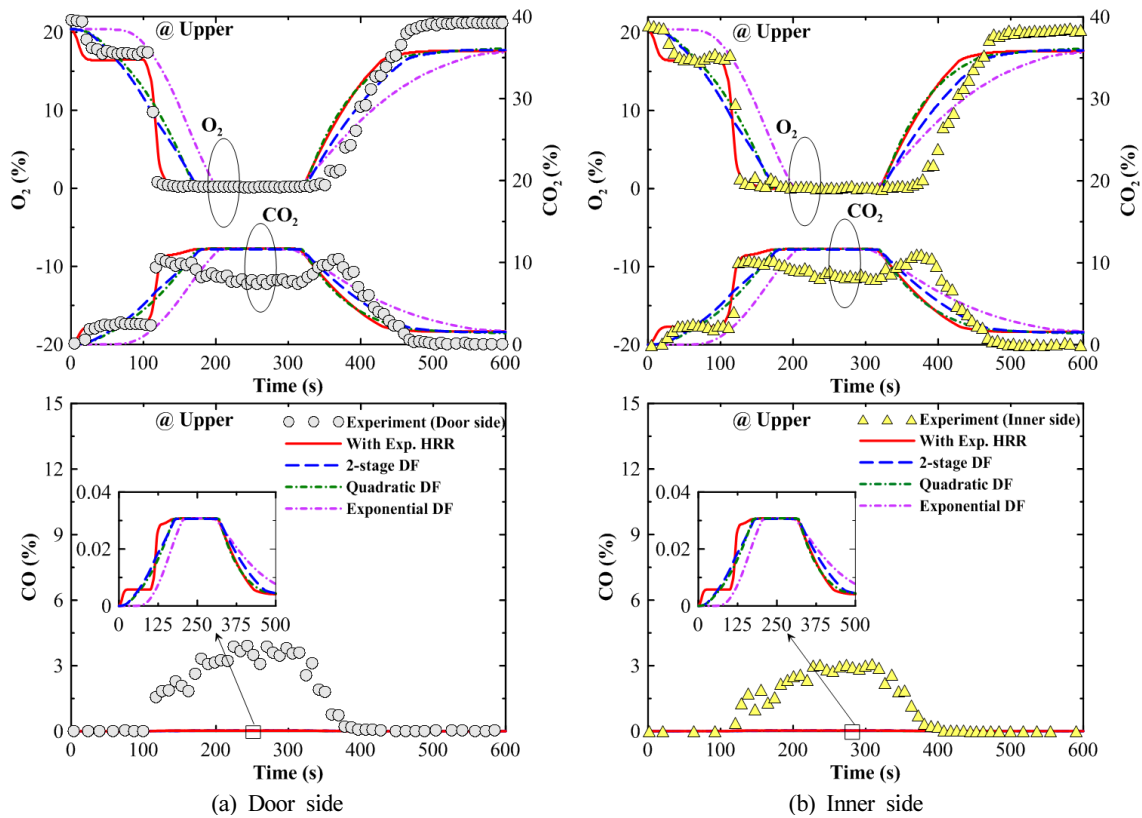


Figure 6. Temporal variation of concentrations (O_2 , CO_2 , CO) for Case 1 at door and inner side locations obtained by experiment and simulations with design fire curves.

보인다. Case 1과 2에 대해 공간평균온도에 대한 예측성능을 기반으로 판단한다면 2-stage DF가 디자인 화재곡선들 중에서는 가장 합리적으로 예측하는 것을 알 수 있다.

Figures 6과 7은 각각 Case 1과 Case 2에 대해 실험과 CFAST 계산에서 얻어진 화학종 농도변화를 비교 도시한 것이다. 실험에서 측정된 화학종 농도는 구획실의 개구부 측과 내측의 천장 부근에서 측정되었기 때문에 CFAST 계산결과는 상층부 영역에서의 농도를 이용하여 비교하였다. 결과를 보면 Case 1과 2에서 O_2 와 CO_2 농도에 대해서는 CFAST 결과가 실험결과를 비교적 유사하게 예측하는 것을 볼 수 있다. 그러나 CO 농도에 대해서는 실험결과에 비해 현저히 낮게 예측하는 것을 확인할 수 있다. CO 농도는 화재 시 인체에 미치는 독성 때문에 피난시간 선정에도 직결되는 중요한 인자이지만 CFAST의 경우 CO 농도를 현저히 낮게 예측하기 때문에 피난설계 등에 사용할 때는 검토가 필요할 것으로 보인다. 다음으로 디자인 화재곡선에 따른 예측성능을 비교하면 먼저 Case 1의 경우에는 초기 화재성장 단계에서는 실험 HRR이 가장 O_2 와 CO_2 농도변화 경향을 잘 추종하고 있다. 화재 성장기에서는 실험 $HRR > 2\text{-stage DF} \geq \text{Quadratic DF} > \text{Exponential DF}$ 순으로 실험결과를 잘 예측하는 것으로 보인다. O_2 의 최저농도와 CO_2 의 최고농도 예측에 대해서는 모든 디자인 화재곡선이 유사하지만 화재 감쇠기에서는 모든 계산결과에서 좀 더 빨리 농

도증가(O_2) 또는 농도감소(CO_2)가 시작되는 것으로 나타나고 있다. 감쇠기에서도 농도변화 기울기에 대한 그 예측정도는 실험 $HRR \geq \text{Quadratic DF} > 2\text{-stage DF} > \text{Exponential DF}$ 순으로 나타나고 있다.

Figure 7의 Case 2에 대해서도 각 디자인 화재들의 예측성능은 Figure 6의 Case 1과 큰 정도의 차이는 없는 것으로 나타나고 있다. 다만 Case 2에서는 Quadratic DF가 화재 성장기에서의 농도 변곡점을 잘 예측하지 못하고 있어서 Case 1보다는 2-stage DF와 Quadratic DF 간의 예측성능 차이가 좀 더 확연히 나타나고 있다.

Figures 8과 9에는 실험과 CFAST 계산을 통해 얻어진 구획실 내부의 상부층과 하부층의 경계면 높이를 비교 도시하였다. 실험에서의 경계면 높이는 측정된 온도와 식 (3)~(5)를 이용하여 계산하였다. 존 모델에서는 경계면 높이에 따라 상층부와 하층부의 온도와 화학종 농도 등의 상태량이 결정되기 때문에 경계면의 높이에 대한 예측성능이 중요하다. 실험결과와 CFAST 계산결과를 비교해보면, 전체적으로 개구부측보다는 구획실 내측에서 좀 더 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 실험결과를 좀 더 잘 예측하고 있는 구획실 내측에 대해 디자인 화재곡선의 예측성능을 검토해보면 Case 1에 대해서는 2-stage DF와 Quadratic DF가 Exponential DF와 달리 실험결과와 유사하게 화재초기에 급격하게 떨어지는 경계면 높이를 잘 예측하는 것을 볼 수

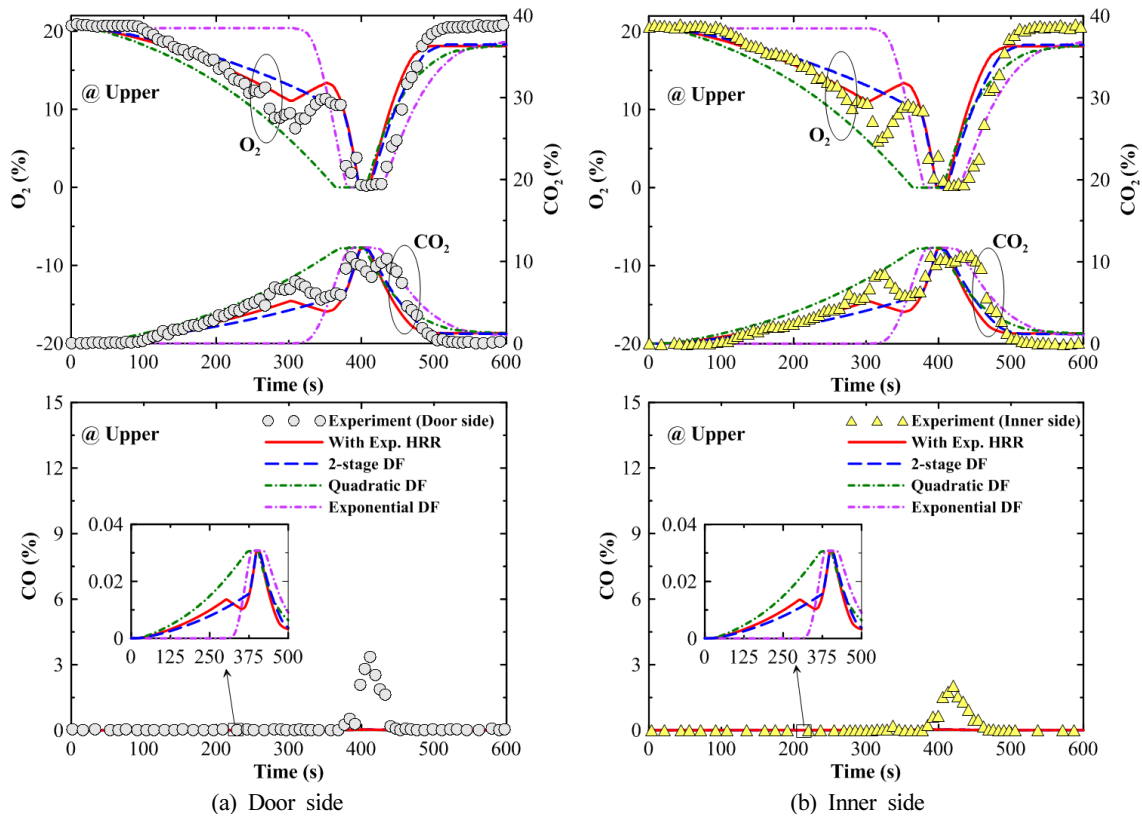


Figure 7. Temporal variation of concentrations (O_2 , CO_2 , CO) for Case 2 at door and inner side locations obtained by experiment and simulations with design fire curves.

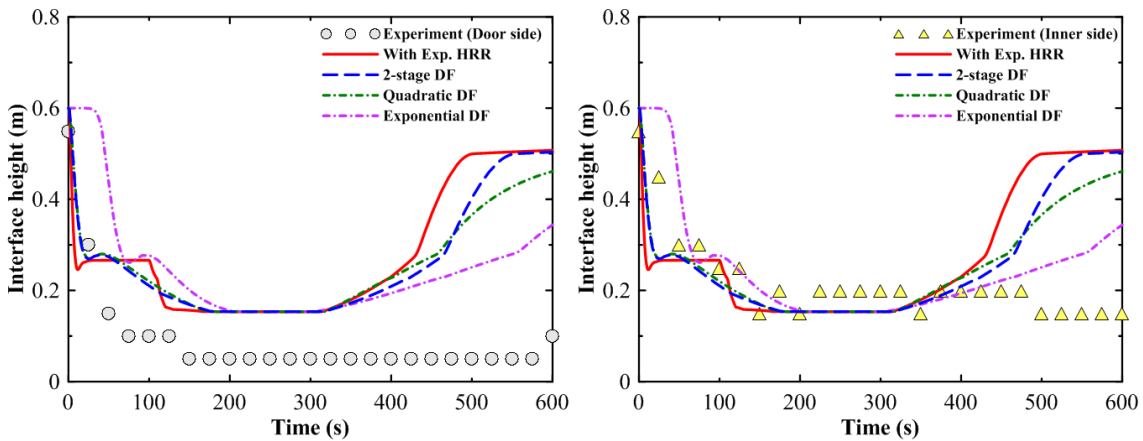


Figure 8. Temporal variation of interface height for Case 1 obtained by experiment and simulations with design fire curves.

있다. 하지만 화재 감쇠기에서 경계면 높이가 거의 일정하게 계산된 실험결과와는 다르게 디자인 화재곡선의 경우 모두 경계면 높이가 상승하는 것으로 예측하고 있어 실험과 차이가 있는 것을 확인할 수 있다.

Case 2에서는 Exponential DF가 실험에서 얻어진 경계면 높이의 변화경향을 전혀 합리적으로 예측하지 못하고 있다. Exponential DF는 Case 1의 화재 성장기에서는 줄어드는 경향정도는 예측을 하고 있지만 Case 2에 대해서는 경

계면 높이의 감소경향을 전혀 예측하고 있지 못한 점은 주의가 기울일 필요가 있다. Case 2에 대해서도 구획실 내측의 화재 성장기 구간에서는 2-stage DF와 Quadratic DF는 실험결과를 비교적 유사하게 예측하고 있지만 화재 감쇠기 구간에서는 실험결과보다는 CFAST 결과가 더 높게 예측하고 있다. 이러한 경향은 실험 HRR을 이용한 CFAST 결과에서도 유사하게 나타나고 있기 때문에 디자인 화재곡선의 성능에 의한 것이 아니라 CFAST의 예측성능 한계 또는

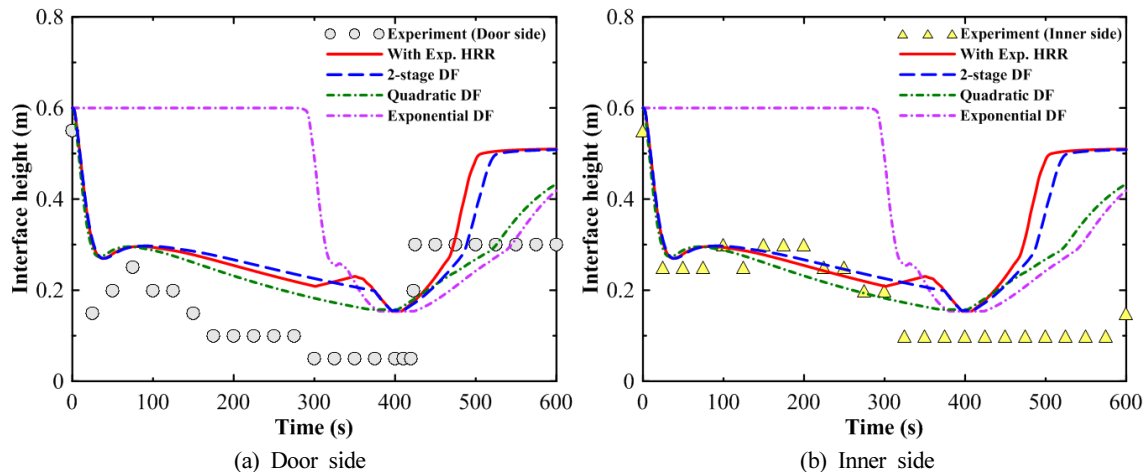


Figure 9. Temporal variation of interface height for Case 2 obtained by experiment and simulations with design fire curves.

식 (3)~(5)를 통해 얻어진 실험결과의 불확실도에 기인하는 것으로 추정된다. 전체적으로 보면 디자인 화재곡선들 중에서는 2-stage DF와 Quadratic DF가 유사한 정도로 실험 결과를 좀 더 유사하게 예측하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과를 통해 CFAST를 이용할 경우 짧은 계산을 통해 화재에 대해 전반적으로 예측할 수 있었지만 실험결과에 대한 예측이 어려운 부분이 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 2-stage DF가 구획실 내 가스화재에 대해 예측성능이 우수한 것을 확인할 수 있었으며 이전의 연구와 본 연구를 통해 구획실 내 액체연료 및 가스연료 화재에 대해 2-stage DF가 적합하다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 화재는 단순한 구획실이 아닌 복잡한 건물에서 대부분 고체 가연물에 의해 화재가 발생되기 때문에 PBD에서의 활용성을 높이기 위해 건물화재에 대한 2-stage DF의 적합성 검토가 추가적으로 진행될 필요가 있다.

5. 결론

본 연구에서는 두 가지 열발생률 변화거동을 갖는 구획실 가스연료 화재실험을 대상으로 기존에 알려진 디자인 화재곡선들을 적용한 CFAST 수치계산을 수행하고 각 디자인 화재곡선들의 예측성능을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

CFAST를 이용한 수치계산은 구획실 내부의 상층부와 하층부 영역에 대한 정보만 알 수 있기 때문에 구획실 내부의 개구부측과 내측 위치에 따른 온도변화 경향은 예측하는데 한계가 있음을 알 수 있었다. 또한 CFAST를 이용할 경우 상층부에서의 CO 농도와 하층부에서의 공간평균 온도에 대한 예측도 한계가 있음을 확인하였다.

CFAST에 적용된 디자인 화재곡선들의 예측성능을 비교한 결과 2-stage DF가 전반적으로 공간평균온도, O₂와 CO₂ 화학종 농도 및 상층부와 하층부 경계면 높이의 변화를 가

장 합리적으로 예측하는 것을 알 수 있었다. 또한 2개의 열발생률 조건인 Case 1과 2에 대해서 2-stage DF > Quadratic DF > Exponential DF 순으로 실험결과를 합리적으로 예측하는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해서도 기존 연구⁽⁶⁾와 마찬가지로 2-stage DF가 화재 시뮬레이션에 가장 적합한 디자인 화재곡선으로 확인되었다. 향후 연구를 통해서 좀 더 복잡한 기하학적 형상과 실제 건물화재를 대상으로 디자인 화재곡선의 예측성능을 평가해 본다면 화재 시뮬레이션 연구자들에게 유용한 결과를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2017년도 소방청의 현장중심형 소방활동지원 기술개발사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

References

1. G. E. Gorbett and J. L. Pharr, "Fire Dynamics", Pearson Education (2011).
2. H. J. Kim and D. G. Lilley, "Heat Release Rates of Burning Items in Fires", 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA 2000-0722, pp. 1-25 (2000).
3. H. Ingason, "Design Fire Curves for Tunnels", Fire Safety Journal, Vol. 44, No. 2, pp. 259-265 (2009).
4. M. Dinesh, C. B. Oh and E. J. Lee, "Computational Study of Tunnel Fire with Design Fire Curves", Proceedings of 2017 KIFSE Annual Autumn Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 129-130 (2017).
5. B. Baek, C. B. Oh, E. J. Lee and D. G. Nam, "Application Study of Design Fire Curves for Liquid Pool Fires in a

- Compartment”, Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 43-51 (2017).
6. B. Baek, C. B. Oh and C. Y. Lee, “Evaluation of Modified Design Fire Curves for Liquid Pool Fires Using the FDS and CFAST”, Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 2, pp. 7-16 (2018).
 7. J. S. Choi, B. I. Choi, Y. J. Jang, Y. S. Han and M. B. Kim, “Heat Release Rates of Principal Fire Sources in Living Space”, Proceedings of 2004 KIFSE Annual autumn Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 37-42 (2004).
 8. B. I. Choi, Y. S. Han, C. B. Oh, M. B. Kim and J. S. Choi, “Heat Release Rate Measurements of Residential combustibles using Oxygen Consumption Method”, Proceedings of 2007 KIFSE Annual Spring Conference, Korean Institute of Fire Science and Engineering, pp. 123-127 (2007).
 9. H. Ingason, Y. Z. Li and A. Lönnemark “Tunnel Fire Dynamics”, Springer (2015).
 10. NFPA, “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, NFPA, 2nd Edition (1995).
 11. R. D. Peacock, G. P. Forney and P. A. Reneke “CFAST-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7) Volume 3: Verification and Validation Guide”, NIST Technical Note 1889v3 (2016).