

[Research Paper]

구획실 내 액체 풀화재에 대한 디자인 화재곡선 적용 연구

백빛나 · 오창보[†] · 이의주 · 남동군^{*}

부경대학교 안전공학과, ^{*}한국소방산업기술원 소방기술연구소

Application Study of Design Fire Curves for Liquid Pool Fires in a Compartment

Bitna Baek · Chang Bo Oh[†] · Eui Ju Lee · Dong-Gun Nam^{*}

Department of Safety Engineering, Pukyong National University

^{*}R&D Laboratory, Korea Fire Institute

(Received August 16, 2017; Revised August 21, 2017; Accepted August 21, 2017)

요 약

본 연구에서는 화재 수치계산에 사용하기 위한 새로운 디자인 화재곡선을 제안하였다. ISO 9705 구획실 내 형성된 옥탄과 헵탄연료 풀화재에 대해 기존에 제안된 2차곡선과 지수함수 형태의 디자인 화재곡선과 새롭게 제안된 디자인 화재곡선을 적용한 Fire Dynamics Simulator (FDS) 수치계산을 수행하였다. 여기서 얻어진 수치계산 결과와 실험에서 측정된 온도와 O₂, CO₂ 변화와 비교하여 디자인 화재곡선의 예측성능을 평가하였다. FDS 계산과 실험결과의 비교를 통해 2차곡선과 지수함수 형태의 디자인 화재곡선을 적용했을 때는 측정된 온도보다도 훨씬 완만하게 증가하고 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 새로 제안한 2가지 디자인 화재곡선은 기존 디자인 화재곡선보다는 급격히 상승하여 실험결과에 좀 더 유사하게 나타나는 것으로 확인되어 실용적 관점에서 수치계산에 활용될 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this study, new design fire curves were suggested for the utilization in fire simulations. Numerical simulations with the Fire Dynamics Simulator (FDS) were performed for the n-octane and n-heptane pool fires in the ISO 9705 compartment to evaluate the prediction performance of the previous quadratic, exponential design fire curves and newly suggested ones. The numerical results were compared with the experimental temperature and concentrations of O₂ and CO₂. The numerical results with the previous quadratic and exponential curves showed slow increase and decrease trend than experiments. However, the numerical results with the newly suggested 2 design fire curves showed more similar variation trend in temperature, O₂ and CO₂ concentrations than the quadratic and exponential curves. It was found that the newly suggested design fire curves can be possibly used in the numerical simulation of fires in a practical respect.

Keywords : Design Fire Curve, Fire Dynamics Simulator (FDS), Compartment Fire, Liquid Fuel Fire, Heptane, Octane

1. 서 론

화재로 인한 인명과 재산피해는 이를 줄이기 위한 많은 노력에도 불구하고 여전히 많은 관심과 연구를 필요로 하고 있다. 화재피해를 줄이기 위해서는 화재 안전관리 측면뿐만 아니라 건물의 설계, 시공에서부터 화재를 예방하고 화재 사고 시에도 안전한 피난과 효과적인 화재진압을 달성할 수 있는 화재 안전설계를 통한 공학적인 대응도 중요하다. 화재피해를 줄이기 위한 화재 안전설계 단계에서는 발생할 수 있는 다양한 화재 시나리오에 효과적으로 대응할 수 있

도록 구조물에 대한 건축 및 소방공학적 설계를 진행하게 된다. 이 때 발생 가능한 현실적인 화재 시나리오에 대해 충분히 검토되었는지는 화재안전성능을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 특히 근래에는 화재 안전성능을 확보하기 위해 성능위주 소방설계(Performance-based design) 개념이 도입되어 건축물 화재 안전성 평가에 많이 활용되고 있다. 이러한 성능위주 소방설계에는 신뢰할만한 전산 시뮬레이션 코드를 활용하게 되는데 이 때 중요한 것은 화재의 특징을 충분히 반영할 수 있는 “디자인 화재(Design fire)”를 적절히 선택하는 것이다. 일반적으로 이 디자인 화재의 특성은

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

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

디자인 화재곡선(Design fire curve)으로 표현된다.

SFPE Engineering Guide⁽¹⁾에서는 검토하는 화재 시나리오 중에서 시도하는 화재안전설계의 결과를 결정하는 주요 요소들의 조건 집합을 디자인 화재 시나리오(Design fire scenario)로 정의하고 있으며, 디자인 화재 시나리오에 사용하기 위한 시간에 따른 열발생률(Heat release rate, HRR) 변화의 공학적인 표현을 디자인 화재곡선으로 정의하고 있다. 경우에 따라서는 시간에 따른 온도변화를 디자인 화재곡선으로 사용하기도 하지만 열발생률은 화재의 크기와 가장 직접적으로 연관되어 있으며, 화재를 특징짓는 중요한 인자이기 때문에 디자인 화재곡선은 열발생률로 정의되는 경우가 많고 이러한 이유로 디자인 열발생률곡선(Design heat release rate curve)이라고 불리기도 한다.

디자인 화재곡선은 화재안전설계에서 화재피해를 예측할 수 있는 화재 시뮬레이션 코드의 입력조건으로 주로 사용되는데, 일반적으로 다양한 가연물에 대한 실험을 통해 얻어진 HRR 값을 좀 더 단순화하여 사용하고 있다. 가장 단순한 화재곡선으로는 삼각형과 사각형 형태의 HRR 곡선도 있지만⁽²⁾ 화재의 초기 성장단계에서는 많은 경우 HRR이 t^2 곡선과 유사한 형태로 나타나기 때문에 αt^2 로 근사하여 사용하기도 한다. 또한 근래에는 실험에서 얻어진 HRR 곡선을 해석적 방법이나 물리적 개념을 도입한 다양한 형태의 근사식으로 디자인 화재곡선을 만드는 방법들이 일부 제시되어 있다.⁽³⁻⁵⁾

이러한 연구들 중에서 Ingason은 터널화재의 가연물들에 대해 디자인 화재곡선들을 제시하였는데, 화원의 HRR을 선형, 2차곡선, 지수함수곡선 모양으로 디자인 화재곡선을 만드는 방법을 제안하고 각 디자인 화재곡선의 장점과 단점을 비교한 바 있다.^(6,7) 또한 Kim 등은 건물 내의 일반적인 가연물 화재에 대해 t^2 곡선 형태로 화재가 성장, 감쇄하는 것으로 단순화한 디자인 화재곡선을 제안하였다. 이 연구에서는 이러한 방법론에 기반을 두고 기존 실험에서 얻어진 다양한 가연물 화재에 대한 디자인 화재곡선 데이터 베이스를 제시한 바 있다.⁽⁸⁾ 그러나 이 방법은 화재 초기성장이 급격한 경우에는 점화개시 시점이 음의 값을 갖는 문제점이 있다. Zehfuss는 화재역학을 통해 얻어진 화재에 대한 단순한 경험식을 이용하여 해석적인 방법으로 건물화재에 대한 디자인 화재곡선을 모델링하는 방법을 제시하였다.⁽⁹⁾ Hietaniemi와 Mikkola는 사무실에 있는 가연물들을 대상으로 t^2 형태의 화재성장 곡선과 지수함수 형태의 화재감쇄 곡선으로 결합한 디자인 화재곡선을 제안하였고 그 타당성을 검토한 바 있다.⁽¹⁰⁾

이들 연구 외에도 일부 연구기관에서는 각종 실험 결과들을 이용하여 디자인 화재곡선을 데이터 베이스화하여 제공하고 있지만 제안한 디자인 화재곡선이 실제로 원래의 가연물의 화재특성을 얼마나 합리적으로 반영하고 있는 지에 대해서는 충분히 검토되어 있지 않은 상태이며, 특정 가연물에 적합한 디자인 화재곡선 모델링 방법은 다른 가연

물의 HRR 곡선에 적용하기 어려운 문제들이 남아 있다. 따라서 다양한 가연물들에 대해서 좀 더 일반적으로 적용할 수 있으면서도 비교적 단순한 디자인 화재곡선이 필요하고 이러한 화재곡선이 원래의 실제 화재특성을 충분히 반영하고 있는 지에 대해서 검토해 본다면 화재안전설계에 필요한 데이터를 제공한다는 측면에서 매우 유용할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 화재 안전설계의 시뮬레이션에 사용하기 적합하도록 단순하면서도 다양한 가연물에 적용할 수 있는 새로운 디자인 화재곡선을 제안하였다. 우선은 비교적 연소특성이 단순한 액체 폴화재를 대상으로 새롭게 제안한 디자인 화재곡선을 FDS에 적용하여 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 여기서 얻어진 결과를 실험결과와 비교하여 제안된 디자인 화재곡선이 실험의 화재특성을 충분히 반영할 수 있는 지에 대해서 검토하였다.

2. 새로운 디자인 화재곡선의 제안

디자인 화재곡선은 HRR 곡선을 단순화하여 나타낸 것으로 일반적으로 화재의 초기 성장단계에서는 $Q = \alpha t^2$ 의 형태로 근사하지만 제안된 방법에 따라서는 조금씩 그 표현이 상이하다. 본 연구에서는 최근 Ingason 등에 의해서 제안된 2차곡선(Quadratic curve)과 지수함수곡선(Exponential curve)의 2가지 디자인 화재곡선^(6,7)과 여기서 새롭게 제안하는 2가지 형태의 디자인 화재곡선에 대한 성능평가를 실험결과와 비교 검토 하였다. 참고로 Ingason 등의 디자인 화재곡선이나 여기서 새롭게 제안된 디자인 화재곡선에서는 총 열발생량이 실험과 동일하게 되기 때문에 전체 화재의 크기가 동일하다는 물리적 의미를 갖고 있다.

Ingason 등^(6,7)이 제안한 2차곡선과 지수함수곡선 형태의 디자인 화재곡선에 대한 수식은 Table 1에 기술되어 있다. 기본적으로 Ingason의 디자인 화재곡선은 터널화재를 대상

Table 1. Mathematical Description of Different Method to Describe a Complete Design Fire Curve for Tunnel by Ingason⁽⁶⁾

Curve identity method	HRR (kW) as a function of time (s)
Quadratic curve	$\dot{Q}(t) = \alpha_y t^2$ (growth stage)
Quadratic growth and Exponential decay	$\dot{Q}(t) = \alpha_y t_{max}^2 = \dot{Q}_{max}$ $\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max} e^{-\alpha_d(t-t_d)}$ (decay stage)
Exponential curve Exponential growth and decay	$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{max} \cdot n \cdot r \cdot e^{-k \cdot t} \cdot (1 - e^{-k \cdot t})^{n-1}$ where, $n = 0.74294 e^{(2.9 \dot{Q}_{max} / E_{tot})}$ $r = (1 - \frac{1}{n})^{1-n}$ $k = \frac{\dot{Q}_{max}}{E_{tot}} \cdot r$ E_{tot} : Total quantity of heat release

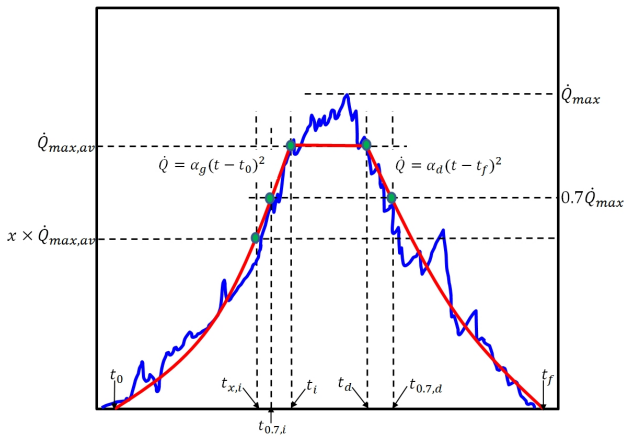


Figure 1. A schematic diagram for the modeling of newly suggested design fire curve (blue line: experimental HRR, red line: design fire curve).

으로 하고 있지만 그 방법을 일반적인 가연물에 대해 적용하여 평가해 볼 필요가 있기 때문에 본 연구에서 검토하게 되었다.

Figure 1은 실험에서 얻어진 HRR 값을 이용하여 본 연구에서 새롭게 고안한 디자인 화재곡선 생성을 위한 주요 인자들과 디자인 화재곡선 추출방법에 대한 개요를 보여주고 있다. 디자인 화재곡선 추출방법에 대한 자세한 내용은 아래의 I-X에 기술된 바와 같다.

- I. 실험에서 얻어진 HRR 결과에서 최대 HRR 값을 \dot{Q}_{max} 로 설정한다.
- II. $0.7 \times \dot{Q}_{max}$ 를 구하고 이 값과 만나는 실험 HRR 값에 해당되는 2군데의 시간을 찾아 최초의 점을 $t_{0.7,i}$, 최후의 점을 $t_{0.7,d}$ 로 각각 설정한다.
- III. 실험 HRR 값을 이용하여 $t_{0.7,i}$ 과 $t_{0.7,d}$ 구간 사이의 HRR 값을 적분하여 면적($A_{0.7}$)을 계산한다.
- IV. 아래의 식 (1)을 이용하여 $\dot{Q}_{max,av}$ 를 계산하고 $\dot{Q}_{max,av}$ 값과 실험 HRR이 만나는 2군데의 시간을

찾아 최초, 최후의 점을 각각 t_i 와 t_d 로 설정한다.

$$\dot{Q}_{max,av} = \frac{A_{0.7}}{t_{0.7,d} - t_{0.7,i}} \quad (1)$$

- V. $t_{0.7,i}$ 점의 HRR 값과 t_i 점의 HRR 값을 t^2 곡선으로 피팅(Fitting)하여 가로축과 만나는 점을 점화개시 시간인 t_0 로 설정한다. 여기서, t_0 는 아래 식 (2)를 통해 얻어지게 되는데, 만약 t_0 가 음수인 경우에는 점화개시 시간인 t_0 를 0s로 설정한다. 참고로 이 단계에서는 α_g 값은 모르더라도 t_0 를 구하는 데에는 문제가 없다.

$$\frac{0.7 \times \dot{Q}_{max,av}}{\dot{Q}_{max,av}} = \frac{\alpha_g(t_{0.7,i} - t_0)^2}{\alpha_g(t_i - t_0)^2} \quad (2)$$

- VI. $\dot{Q}_{max,av}$ 의 $x\%$ 인 HRR에 해당하는 시간을 $t_{x,i}$ 로 지정한다.
- VII. $\dot{Q}_{max,av} \times x\% = \alpha_g(t_{x,i} - t_0)^2$ 을 통해 화재성장률 기인 α_g 값을 계산한다.
- VIII. 초기 화재성장 곡선인 $\dot{Q} = \alpha_g(t_{x,i} - t_0)^2$ 는 $\dot{Q}_{max,av}$ 가 일정한 선과 만나도록 한다.
- IX. 실험 HRR 곡선을 시간에 대해 적분하여 화재에서 발생한 총 열발생량(E_{tot})을 계산한다.
- X. $t_{0.7,d}$ 점의 HRR 값과 t_d 점의 HRR 값을 t^2 곡선으로 피팅하여 가로축과 만나는 점을 화재 종료시간인 t_f 로 설정한다. 여기서, t_f 는 아래 식 (3)을 통해 얻어지며 디자인 화재곡선이 완성된다. 만약 이 때 디자인 화재곡선을 이용하여 시간에 대해 적분한 전체 면적이 E_{tot} 가 다르다면 t_f 를 미세하게 변화시키고 조정된 t_f 값에 따라 α_d 도 다시 계산하게 된다. 이러한 과정은 디자인 화재곡선의 시간에 대한 적분면적이 E_{tot} 값과 5% 이내의 오차범위에서 같은

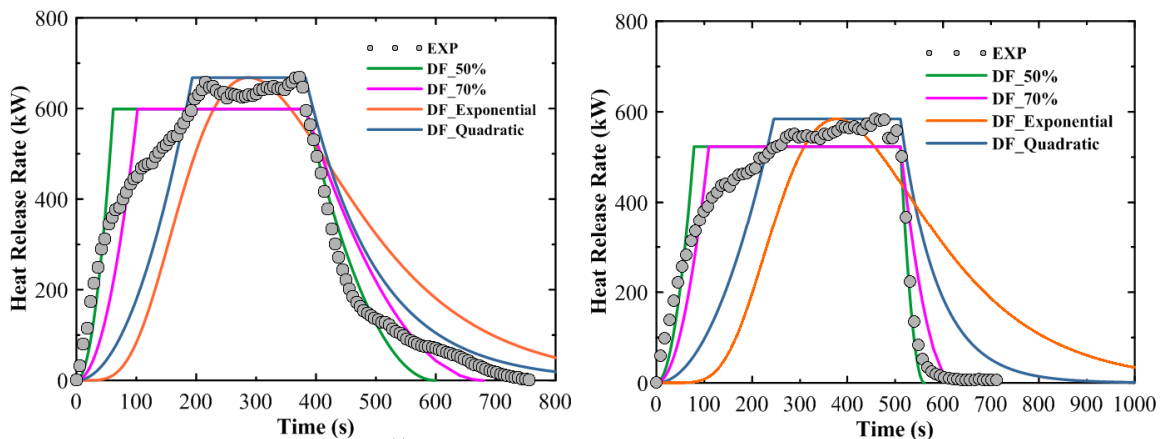


Figure 2. Design fire curves for the experimental HRRs of liquid octan(left) and heptane(right) pool fires.

Table 2. Parameters for the Calculations of Design Fire Curves (DF_50%: x=50, DF_70%: x=70, DF_Quadratic: Ingason's Quadratic Curve, DF_Exponential: Ingason's Exponential Curve)

N-Octane	$\dot{Q}_{max,av}$ (kW)	t_o (s)	t_i (s)	t_d (s)	t_f (s)	t_{max} (s)	α_g	α_d	n	r	k
DF_50%	598.69	0.0	61.5	382.5	599.5	·	0.1582	0.0127	·	·	·
DF_70%	598.69	0.0	102.2	382.5	680.0	·	0.0573	0.0068	·	·	·
DF_Quadratic	668.21	0.0	193.5	382.5	2000.0	·	0.0178	0.0085	·	·	·
DF_Exponential	668.21	0.0	·	·	·	288.0	·	·	7.0643	2.5234	0.0068
N-Heptane	$\dot{Q}_{max,av}$ (kW)	t_o (s)	t_i (s)	t_d (s)	t_f (s)	t_{max} (s)	α_g	α_d	n	r	k
DF_50%	522.98	0.0	78.5	211.0	561.0	·	0.0849	0.2091	·	·	·
DF_70%	522.98	0.0	109.4	475.0	622.0	·	0.0437	0.0424	·	·	·
DF_Quadratic	584.17	0.0	245.0	511.0	1200.0	·	0.0097	0.0128	·	·	·
DF_Exponential	584.17	0.0	·	·	·	78.0	·	·	9.7632	2.5778	0.0061

상태가 될 때까지 반복되어 최종적으로 t_f 와 α_d 를 구하게 된다.

$$\frac{0.7 \times \dot{Q}_{max,av}}{\dot{Q}_{max,av}} = \frac{\alpha_d(t_{0.7,d} - t_f)^2}{\alpha_d(t_d - t_f)^2} \quad (3)$$

본 연구에서는 좀 더 적합한 디자인 화재곡선을 얻기 위하여 x값을 50과 70으로 정한 두 가지 디자인 화재곡선에 대하여 검토를 수행하였다.

Figure 2는 ISO 9705 구획실내에서 액체연료인 옥탄(C8H18)과 헵탄(C7H16)을 연소시켰을 경우 측정된 HRR 변화와 이 실험결과에 대해 Ingason 등의 두 가지 디자인 화재곡선(DF_Exponential과 DF_Quadratic)^(6,7)과 본 연구에서 제안한 디자인 화재곡선 식에 x%를 50%와 70%로 해서 얻어진 결과(DF_50%와 DF_70%)들을 보여주고 있다. 이 그림에서 각 디자인 화재곡선을 구성하는 변수값들은 Table 2에 자세히 기술되어 있다. 얻어진 디자인 화재곡선에서 실험에서 얻은 두 액체연료의 HRR값은 초반에 매우 급격하게 상승하고 있지만 Ingason 등의 두 디자인 화재곡선은 실험보다는 완만하게 상승하는 것으로 나타나지만 HRR 최고값의 순간은 차이가 있지만 그 크기에 있어서는 잘 모델링 하고 있는 것으로 보인다. 반면 본 연구에서 제안한 두 디자인 화재곡선은 초반의 급격한 화재성장은 비교적 잘 추종하고 있지만 HRR 최고값은 낮게 모델링되고 있다. 이러한 디자인 화재곡선의 차이는 화재특성과 관련된 물리량들의 예측에도 차이를 가져올 수 있는데 이러한 내용에 대해서는 뒤에서 자세히 검토하겠다.

3. 실험방법

본 연구에서는 구획실 내부에서 액체연료인 옥탄과 헵탄 풀화재를 형성시키기 위해서 ISO 9705 화재실 시험기를

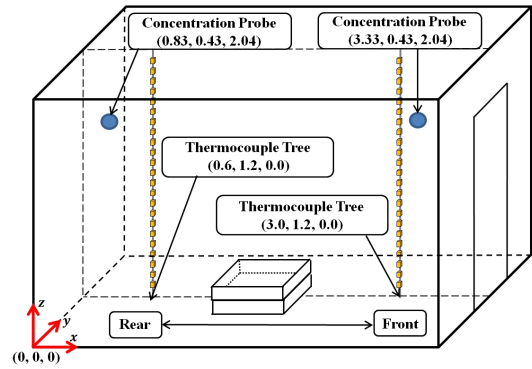


Figure 4. Measurement positions of thermocouples trees and concentration probes.

이용하여 실험을 수행 하였다. 실험에서는 집연 후드 아래에 가연물을 놓고 점화하여 연소 중에 발생하는 연소가스 성분인 CO₂와 O₂를 측정하였으며, 산소 소모법에 의해 열 방출률을 산출하였다. 또한 구획실 내부의 온도는 K-type 열전대를 이용하여 측정하였다.

액체연료 팬의 크기는 가로×세로×높이=0.5 m×0.5 m×0.15 m로서 구획실 중앙에 위치하게 하였다. 액체연료로는 옥탄과 헵탄이 사용되었으며 각각 10 L씩 연소시켰다.

Figure 4는 실험에서 온도와 농도의 측정위치를 보여주고 있다. 온도측정을 위해 구획실 개구부 부근(전면, Front)과 구획실 안쪽(후면, Rear)에 수직 열전대 Tree를 설치하여 바닥면 높이 0.1 m에서부터 0.1 m 간격으로 23개씩 열전대를 설치하였다. 수치계산과의 비교는 z=1.0 m, 1.6 m, 2.2 m의 세 군데에 대해서만 수행하였다. 그 외 실험에 대한 자세한 내용은 문헌⁽¹¹⁾을 참고하기 바란다.

4. 수치계산법

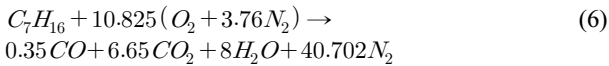
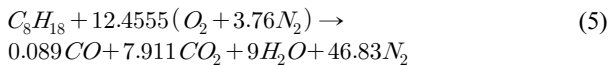
본 연구에서는 디자인 화재곡선의 예측성능을 평가하기 위해서 NIST에서 개발된 FDS v6.3.2⁽¹²⁾를 이용하여 구획실

화재에 대한 계산을 수행하였다. 난류 해석기법으로는 Large Eddy Simulation (LES)와 연소모델로는 Eddy Dissipation Concept (EDC) 모델을 적용하였다.

EDC 모델은 연료가 초기에는 산화제와 혼합되지 않은 상태에 있다가 혼합이 되는 순간 연소된다는 가정을 도입하여 아래의 식 (4)를 이용하여 연료의 연소반응에 의한 소모율(\dot{m}_F''')을 계산하게 된다.⁽¹³⁾

$$\dot{m}_F''' = -\rho \frac{\min(Z_F, Z_A/s)}{\tau_{mix}} \quad (4)$$

여기서, Z_F 와 Z_A 는 각각 연료와 공기의 질량분율, ρ 는 밀도, s 는 질량 이론혼합비 계수, τ_{mix} 는 연료와 공기가 혼합되는 시간을 의미하며 연료의 소모율은 혼합시간에 의존하게 된다. FDS v6.3.2에서는 열방출률을 초기 입력조건으로 할 경우에는 화학반응모델이 제약되기 때문에 식 (5)-(6)에 주어진 1-step simple 화학반응모델이 사용된다.



본 연구에서는 실험과 동일한 조건인 ISO 9705 구획실에서 연소되는 옥탄과 헵탄 폴화재를 대상으로 수치계산을 진행하였다. Figure 3에는 계산영역과 ISO 9705 구획실의 형상과 치수를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 ISO 9705의 크기는 가로×세로×높이=3.6 m×2.4 m×2.4 m 규격을 따르고 측면부분에 0.8 m×2.0 m 크기의 세로형상 개구부가 위치하게 된다. 실험과 동일하게 구획실 내부 중앙에는 가로×세로×높이=0.5 m×0.5 m×0.15 m 액체연료 팬이 위치하게 된다. 구획실 벽면은 두께 0.2209 m의 단열재로 처리하였다.

계산에 적합한 격자크기(Δx)를 결정하기 위해서 기준에 많이 사용되는 아래 식 (7)⁽¹³⁾을 이용하였다.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (7)$$

여기서, D^* 는 특성 화재직경을 의미하고, \dot{Q} 는 최대 발열량, ρ_{∞} , C_p , T_{∞} 는 각각 주변 공기의 밀도, 비열 및 온도를 의미하며 g 는 중력가속도를 의미한다.

기존 문헌⁽¹³⁾에 의하면 식 (7)에서 얻어진 직경을 격자크기(Δx)로 나눈 값인 무차원 화재직경($D^*/\Delta x$)이 10-20일 경우에 해당되는 격자크기가 화재해석에 적합하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 무차원 화재직경 값이 제안된 범위에 들어가는 격자크기를 이용한 수치계산을 수행하고 실험 결과와의 비교 검토를 수행한 후에 적합한 격자크기의 균

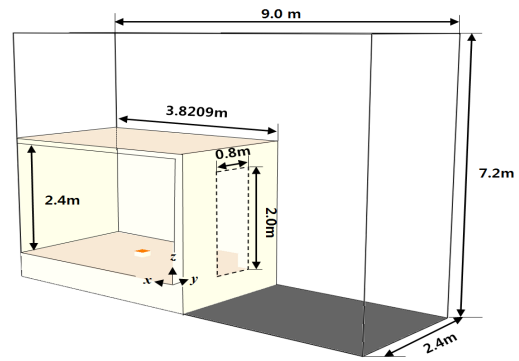


Figure 3. A schematic geometry of the 3D computational domain and ISO 9705 compartment.

Table 3. Property of Octane and Heptane Liquid Fuels.⁽¹⁴⁾

	Formula	Density	Heat of Combustion	CO Yield
Octane	C_8H_{18}	738 kg/m ³	44500 kJ/kg	0.022
Heptane	C_7H_{16}	684 kg/m ³	44630 kJ/kg	0.010

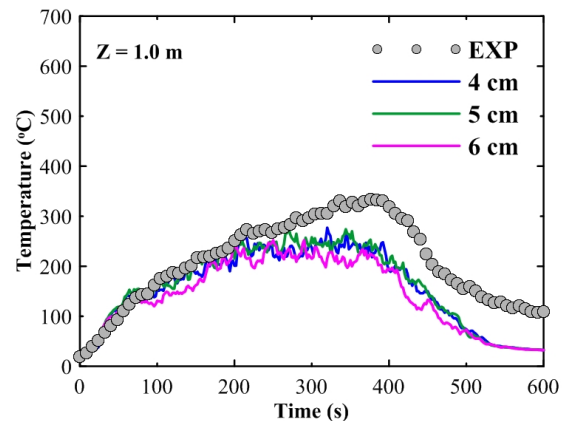


Figure 5. Temperature dependency on the grid size at z=1.0 m of rear side thermocouple tree.

일 격자계를 최종 구성하였다.

수치계산에서도 실험과 동일하게 옥탄과 헵탄 연료의 양은 각각 10 L로 하였다. Table 3은 계산에 사용된 옥탄과 헵탄의 물성치는 문헌의 자료⁽¹⁴⁾를 이용하였다.

수치계산에는 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v3 2.40GHz를 갖는 PC-Cluster를 이용하였으며, 12개의 Core를 이용한 Message Passing Interface (MPI) 병렬계산을 수행하였다. 계산시간은 대상 실험의 조건과 고려되는 디자인 화재곡선에 따라 조금씩 달라지는데 각 조건에 대해서 대략 20-23시간 정도의 물리적 시간이 소요되었다.

5. 결과 및 고찰

Figure 5는 수치계산에 적합한 격자크기를 결정하기 위

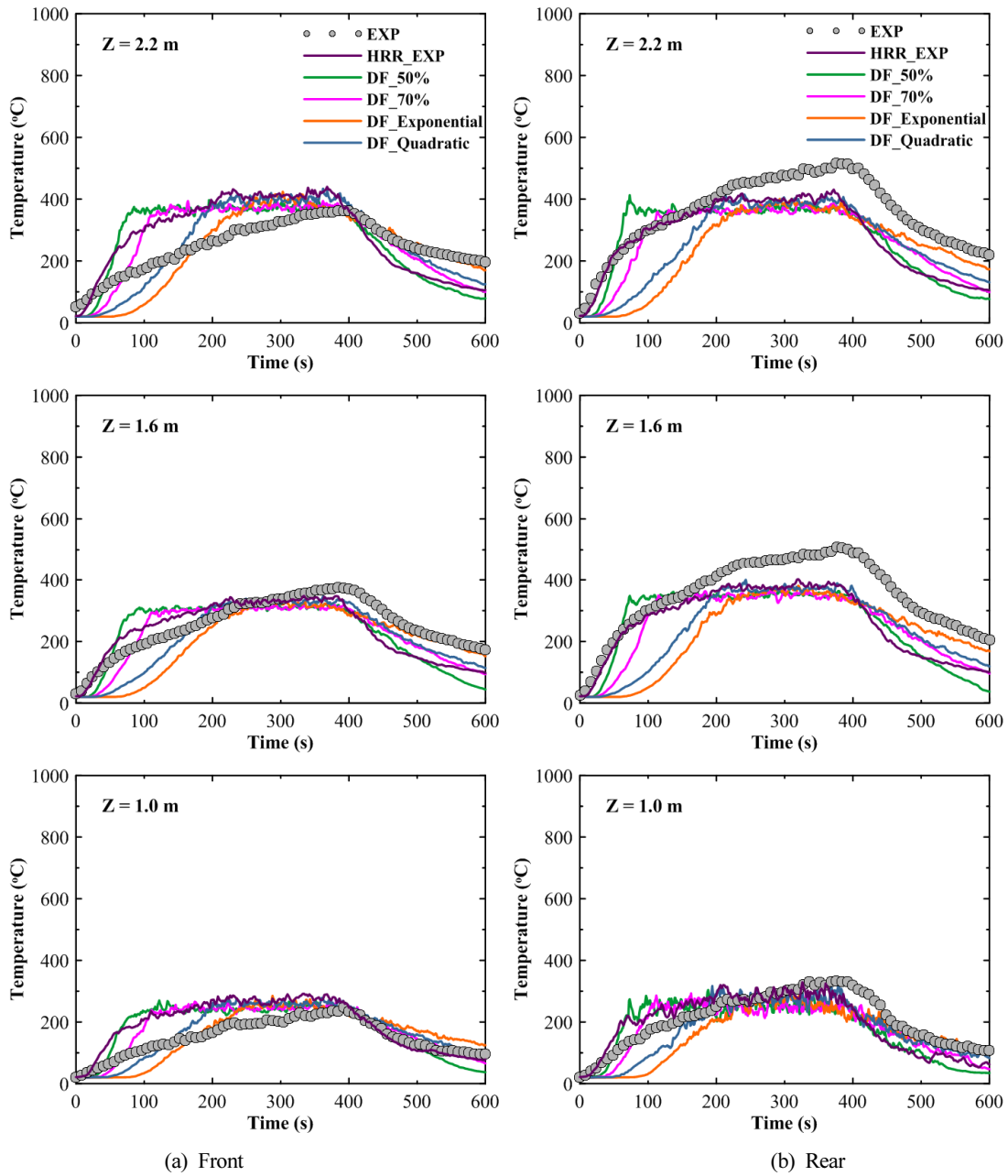


Figure 6. Temporal variation of temperature of octane pool fire obtained by experiment and simulation with the various design fire curves.

해서 실험에서 얻은 구획실 내부의 온도에 대해 격자크기 Δx 를 4 cm, 5 cm 및 6 cm로 변화시키면서 수행한 FDS 계산결과를 비교한 것이다. 세 가지 격자크기는 식 (7)을 이용하여 계산한 $D^*/\Delta x$ 가 각각 13.6, 16.3, 20.4로서 적합한 격자선정 조건인 10-20 범위에 대략 포함된다. FDS 결과는 실험결과와 그 값의 크기에 있어서는 약간 차이는 있지만 온도 증감의 경향성은 비교적 잘 추종하고 있다. 이러한 온도 예측경향은 세 가지 격자크기를 이용한 결과에서 비슷하지만 5 cm 이하의 격자를 이용한 결과에서는 그 온도크기에 대한 예측성능도 유사한 것을 알 수 있다. 따라서 격

자크기 5 cm는 본 연구에서 다루고 있는 구획실 내부 액체 연료 풀화재의 계산에 적합하다고 판단되며 이후 모든 FDS 계산은 이 격자크기로 수행하여 결과를 얻었다.

Figure 6은 구획실 내부 옥탄 풀화재의 경우에 대해서 실험과 4가지 디자인 화재곡선을 적용한 FDS 수치계산을 통해 얻어진 온도결과를 보여주고 있다. 또한 비교를 위해서 실험에서 얻어진 HRR 곡선을 그대로 입력값을 사용한 FDS 결과도 포함되어 있다. 온도는 Figure 4에서 보는 바와 같이 구획실의 전방과 후방 두 곳의 높이(z)가 1.0 m, 1.6 m, 2.2 m인 곳에서 얻어졌다. 우선 FDS 계산결과는 실험에

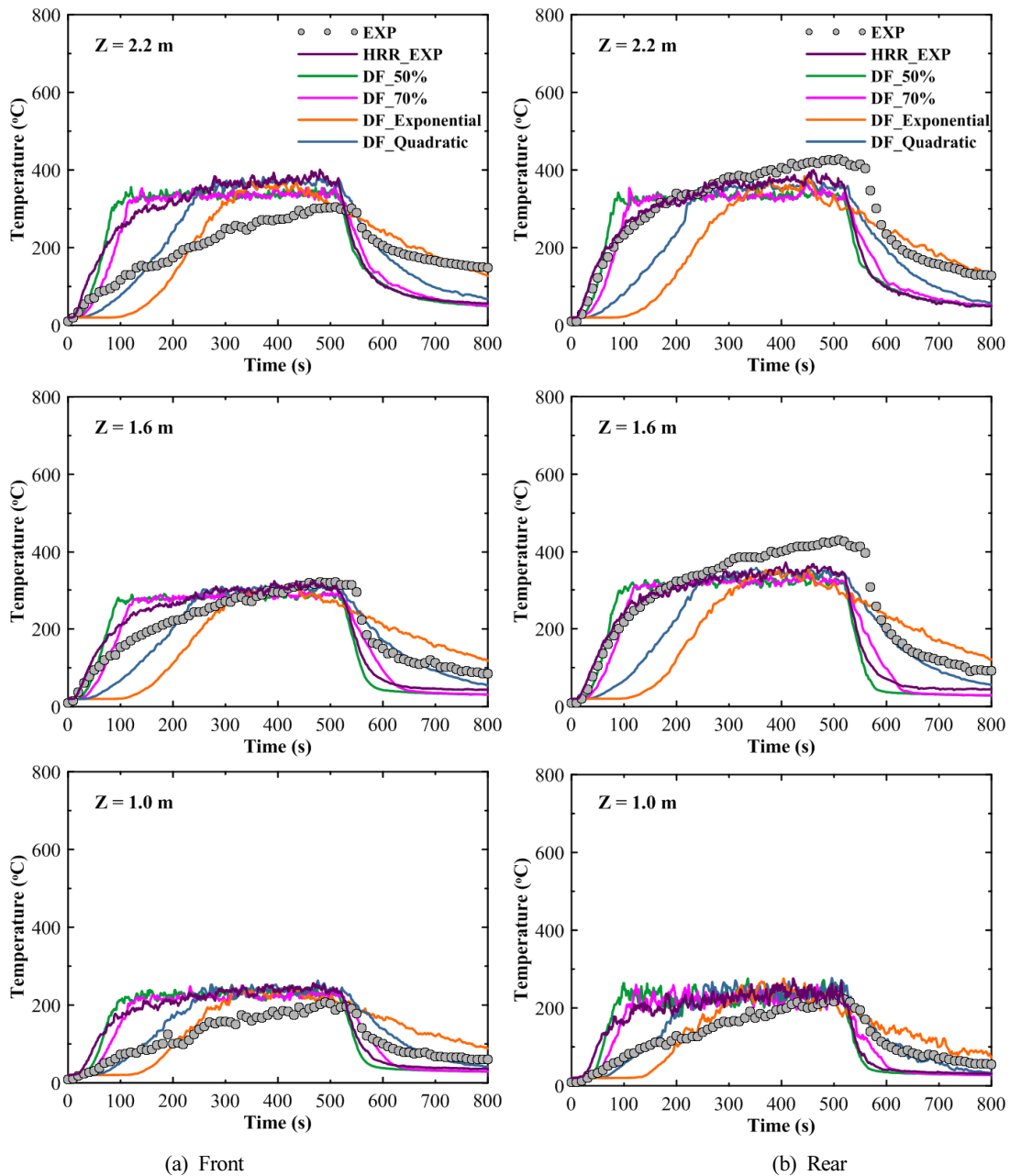


Figure 7. Temporal variation of temperature of heptane pool fire obtained by experiment and simulation with the various design fire curves.

서얼어진 온도변화의 경향을 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 전체적으로 FDS 결과들은 개구부 근처인 전방 측에 대한 예측정도가 조금은 좋아 보이며 높이를 기준으로 할 때는 낮은 위치에서의 온도 예측성능이 조금은 더 좋아 보인다. 각 위치에서의 온도변화 경향은 실험에서 얻어진 HRR 곡선을 입력조건으로 사용한 경우가 가장 잘 예측하는 것으로 보인다. Ingason 등의 2가지 디자인 화재곡선^(6,7)을 적용한 결과는 측정된 온도보다도 훨씬 서서히 증가하고 가장 서서히 감소하는 것으로 나타나고 있다. 본 연구에서 제안한 2가지 디자인 화재곡선을 적용한 결과는 초

기에 Ingason 등의 2차곡선이나 지수함수곡선 결과보다 급격히 상승하는 것으로 나타나고 있다. 또한 온도가 증가된 후 대략 큰 변화가 없는 구간은 본 연구에서 제안한 2개의 디자인 화재곡선이 더 넓게 나타나고 있다. 이러한 경향은 입력조건으로 사용된 디자인 화재곡선(Figure 2)의 특성을 온도 예측에서도 그대로 잘 반영하고 있는 것으로 보인다. Figure 7은 헵탄 화재에 대해 실험과 FDS 계산으로 얻어진 온도변화를 보여주고 있다. 전체적인 예측경향은 옥탄 화재와 유사한 수준임을 알 수 있다. 마찬가지로 실험에서 얻어진 HRR 곡선을 입력조건으로 사용한 경우가 측정

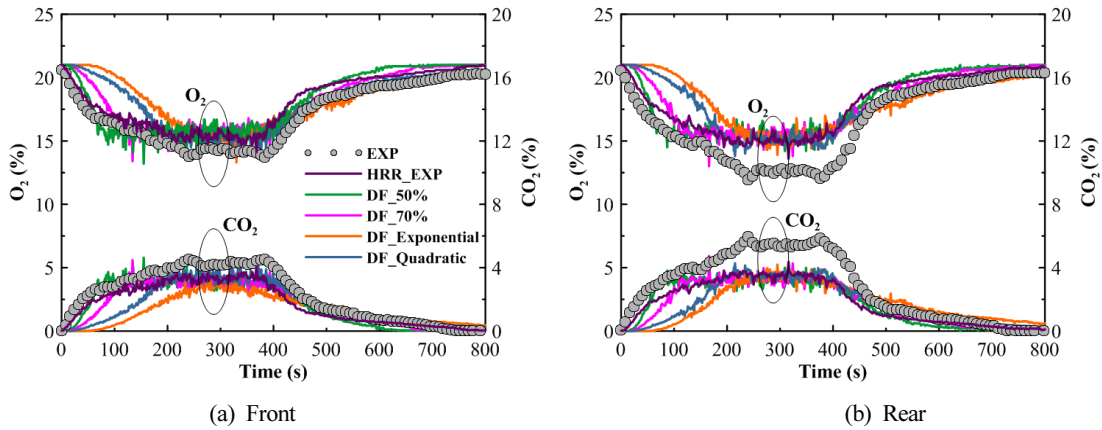


Figure 8. Temporal variation of O₂ and CO₂ concentration of octane pool fire obtained by experiment and simulation with the various design fire curves.

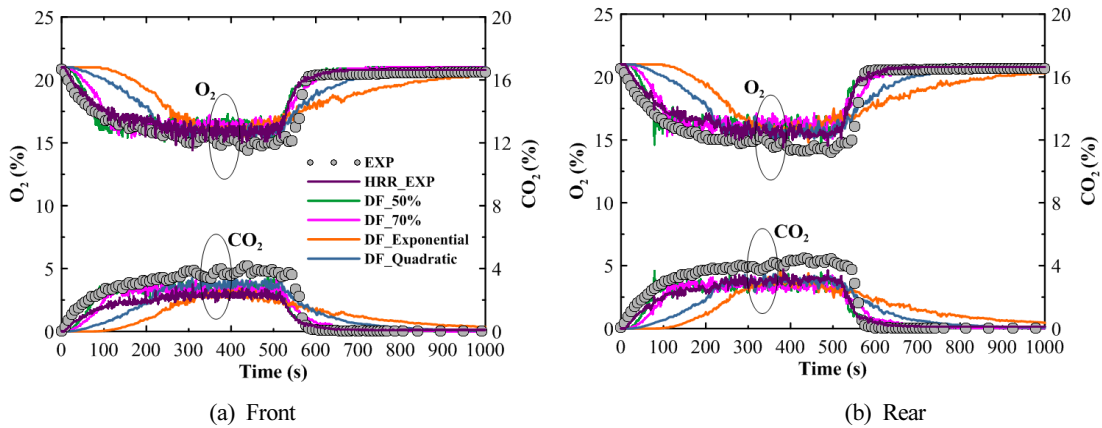


Figure 9. Temporal variation of O₂ and CO₂ concentration of heptane pool fire obtained by experiment and simulation with the various design fire curves.

온도를 가장 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 화재발생 초기의 온도상승 경향은 $z=1.0$ m의 낮은 위치를 제외하면 본 연구에서 제안한 디자인 화재곡선의 경우가 좀 더 잘 예측하는 것으로 보인다. 앞의 결과처럼 2차곡선과 지수함수곡선으로 근사된 디자인 화재곡선은 화재발생 초기단계에서의 온도를 너무 낮게 예측하고 온도증가 경향도 너무 완만하게 예측하는 것을 알 수 있다.

Figure 8은 옥탄 풀화재에 대해서 구획실 내부의 전방과 후방에서 측정된 O₂와 CO₂ 농도변화를 보여주고 있다. FDS 계산에서 입력조건으로 사용된 디자인 화재곡선들은 앞의 온도에 대한 결과에서와 동일하다. O₂와 CO₂에 대한 FDS 예측성능은 구획실 전방에 대한 결과가 후방보다는 조금 더 나은 것을 알 수 있다. 온도예측에 대한 결과와 마찬가지로 실험에서 얻어진 HRR 곡선을 이용한 FDS 결과가 측정된 O₂와 CO₂ 농도를 가장 잘 예측하고 있다. 디자인 화재곡선을 이용한 FDS 결과 중에서는 2차곡선과 지수함수곡선을 이용한 경우가 역시 농도값도 감소(O₂에 대해서) 혹은 증가(CO₂에 대해서) 정도를 가장 완만하게 예측

하고 있다. 그러나 본 연구에서 제안한 2가지 디자인 화재곡선을 이용한 경우에는 측정된 O₂나 CO₂를 비교적 합리적으로 예측하는 것을 알 수 있다.

Figure 9는 헵탄 풀화재에 대한 O₂와 CO₂ 농도변화를 보여주고 있다. O₂와 CO₂에 대한 FDS 예측성능은 옥탄 풀화재와는 달리 구획실 전방과 후방에 대해서 대략 비슷한 정도임을 확인할 수 있다. 지금까지의 결과와 마찬가지로 실험에서 얻어진 HRR 곡선을 이용한 FDS 결과가 측정된 O₂와 CO₂ 농도를 가장 잘 예측하고 있다. 또한 디자인 화재곡선을 이용한 FDS 결과 중에서는 2차곡선과 지수함수곡선을 이용한 경우가 농도 증감 정도를 가장 완만하게 예측하여 화재발생 초기에는 측정된 값보다 O₂는 너무 서서히 줄어드는 것으로 예측하고 있으며 CO₂는 너무 완만히 발생하는 것으로 예측하는 것을 알 수 있다. 반면에 새롭게 제안된 2가지 디자인 화재곡선을 이용한 경우에는 2차곡선이나 지수함수곡선보다는 측정 농도값을 더 합리적으로 예측하는 것을 알 수 있다. 특히 화재발생 초기에는 새로 제안된 디자인 화재곡선이 기존 2차곡선이나 지수함수곡선

보다 더 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 그리고 새롭게 제안된 2개의 디자인 화재곡선 중에서는 $x=50\%$ 로 한 경우가 조금은 더 실험결과와 유사한 것으로 보인다. 그러나 x 차이에 따르는 실험 예측성능 차이는 화재발생 초기단계에서의 HRR 기울에 따라 약간씩 달라질 것으로 판단된다. 따라서 x 에 따른 디자인 화재곡선 성능차이에 대해서는 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

구획실 내부의 온도변화나 주요 화학종 농도변화에 대한 수치계산 결과를 종합적으로 검토해 볼 때, 본 연구에서 새롭게 제안된 디자인 화재곡선은 기존의 2차곡선이나 지수함수곡선으로 근사된 디자인 화재곡선과 유사하거나 좀 더 나은 예측성능을 보이고 있어 실제 화재에 대한 수치계산에 활용될 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다. 현재에는 단순한 액체연료 풀화재를 대상으로 디자인 화재곡선의 예측성능을 검토하였지만 향후 추가적인 일련의 연구를 통해서 다양한 가연물 화재들에 대한 예측성능 평가를 수행하여 새롭게 제안된 디자인 화재곡선의 유용성을 검증할 예정이다.

6. 결 론

본 연구에서는 화재 수치계산에 사용하기 위한 새로운 디자인 화재곡선을 제안하였다. 제안된 디자인 화재곡선의 예측성능을 평가하기 위하여 구획실 내 옥탄과 헵탄연료 풀화재에 대해 기존에 제안된 2차곡선과 지수함수 형태의 디자인 화재곡선과 새롭게 제안된 디자인 화재곡선을 적용한 FDS 수치계산을 수행하였다. 여기서 얻어진 수치계산 결과를 실험에서 측정된 온도와 O_2 , CO_2 변화와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

고려된 디자인 화재곡선들을 이용한 FDS 계산결과는 온도 크기에 있어서는 약간의 차이를 보이지만 전체적으로 측정된 온도변화의 경향을 비교적 잘 예측함을 확인하였다. 2차곡선과 지수함수 형태의 디자인 화재곡선을 적용했을 때는 측정된 온도보다도 훨씬 서서히 증가하고 가장 서서히 감소하는 것으로 나타났지만 본 연구에서 제안한 2가지 디자인 화재곡선은 기존 디자인 화재곡선보다는 급격히 상승하여 실험결과에 좀 더 유사하게 나타나는 것으로 확인되었다.

측정된 농도와 비교를 통해서도 2차곡선과 지수함수곡선을 이용한 경우가 농도 증감 정도를 가장 완만하게 예측하고 있지만 새롭게 제안된 2가지 디자인 화재곡선을 이용한 경우에는 2차곡선이나 지수함수곡선보다는 측정 농도값을 더 합리적으로 예측하는 것을 알 수 있다. 특히 농도를 통해서 고찰했을 때에는 화재발생 초기에는 새로 제안된 디자인 화재곡선의 예측성능이 좀 더 나은 것으로 판단된다.

그러나 새로 제안된 디자인 화재곡선의 활용성을 좀 더 정확하게 평가하기 위해서는 다양한 가연물 화재를 대상으로 한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국민안전처 소방안전 및 119 구조·구급기술 연구개발 사업(MPSS-소방안전-2015-66)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. NFPA and SFPE, "The SFPE Engineering Guide to Performance-based Fire Protection Analysis and Design of Buildings", National Fire Protection Association (2000).
2. G. E. Gorbett and J. L. Pharr, "Fire dynamics", Pearson Education (2011).
3. A. Bwalya, "An Overview of Design Fires for Building Compartments", Fire Technology, Vol. 44, No. 2, pp. 167-184 (2008).
4. Z. Chen, "Design Fires for Motels and Hotels", Carleton University, MA Thesis (2008).
5. F. Numajiri and K. Furukawa, "Mathematical Expression of Heat Release Rate Curve and Proposal of Burning Index", Fire and Materials, Vol. 22, No. 1, pp. 39-42 (1998).
6. H. Ingason, "Design Fire Curves for Tunnels", Fire Safety Journal, Vol. 44, No. 2, pp. 259-265 (2009).
7. H. Ingason, Y. Z. Li and A. Lönnemark, "Tunnel Fire Dynamics", Springer Science, New York, USA (2015).
8. 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).
9. J. Zehfuss and D. Hosser, "A Parametric Natural Fire Model for the Structural Fire Design of Multi-storey Buildings", Fire Safety Journal, Vol. 42, No. 2, pp. 115-126 (2007).
10. J. Hietaniemi and E. Mikkola, "Design Fires for Fire Safety Engineering", VTT Working papers 139, pp. 51-94 (2010).
11. S. Y. Mun, C. H. Park, C. H. Hwang, and S. H. Park, "Effects of the Geometry and Location of a Vertical Opening on the Fire Characteristics in the Under-Ventilated Compartment Fire", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 27, No. 3, pp. 20-29 (2013).
12. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST Special Publication 1019, 6th Edition (2013).
13. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide", NIST Special Publication 1018, 6th Edition (2015).
14. NFPA, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", NFPA, 2th Edition (1995).