

[Research Paper]

## 축소 구획실에서 화원과 측벽의 거리에 따른 화재특성 변화

윤홍석 · 황철홍<sup>\*†</sup>

대전대학교 대학원 방재학과 대학원생, \*대전대학교 소방방재학과 교수

## Changes in Fire Characteristics according to the Distance Between the Fire Source and Sidewall in a Reduced-Scale Compartment

Hong-Seok Yun · Cheol-Hong Hwang<sup>\*†</sup>

Graduate Student, Dept. of Disaster Prevention, Daejeon University,

<sup>\*</sup>Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

(Received January 12, 2019; Revised January 24, 2019; Accepted January 24, 2019)

### 요 약

과환기 화재조건에서 화원과 측벽의 거리에 따른 화재특성에 관한 실험 및 수치해석 연구가 수행되었다. 1/3 축소된 ISO 9705 화재실이 제작되었으며, Spruce wood crib이 연료로 사용되었다. 구획 내부의 현상 이해를 위하여 Fire Dynamics Simulator (FDS)를 활용한 시뮬레이션이 수행되었다. 개방된 공간 화재에 비해 구획실 화재는 벽면의 열 피드백 효과로 인하여 질량 감소율과 열발생률이 증가됨이 확인되었다. 측벽과 화원의 거리가 감소됨에 따라 화염으로의 공기 유입 제한에도 불구하고 주요 화재특성인 최대 질량 감소율, 열발생률, 화재 성장률, 온도 및 열유속이 증가되었다. 특히 측벽과 화원이 접촉되었을 때 이들 물리량의 가장 큰 변화가 확인되었다. 추가로 화원과 측벽의 거리에 따른 구획 내부의 유동구조의 변화로 인하여 온도의 수직분포에 상당한 변화가 발생됨이 확인되었다.

### ABSTRACT

Experimental and numerical studies on the fire characteristics according to the distance between the fire source and sidewall under the over-ventilated fire conditions. A 1/3 reduced ISO 9705 room was constructed and spruce wood cribs were used as fuel. Fire Dynamics Simulator (FDS) was used for fire simulations to understand the phenomenon inside the compartment. As a result, the mass loss rate and heat release rate were increased due to the thermal feedback effect of the wall in the compartment fire compared to the open fire. As the distance between the fire source and sidewall was reduced, the major fire characteristics, such as maximum mass loss rate, heat release rate, fire growth rate, temperature, and heat flux, were increased despite the limitations of air entrainment into the flame. In particular, a significant change in these physical quantities was observed for the case of a fire source against the sidewall. In addition, the vertical distribution of temperature was changed considerably due to a change in the flow structure inside the compartment according to the distance between the fire source and sidewall.

**Keywords** : Compartment fire, Fire-wall interaction, Sidewall effect, Thermal feedback, Fire characteristics

### 1. 서 론

화재의 중요 물리량인 열발생률(Heat release rate), 화재 성장률(Fire growth rate), 상층부 온도 및 연층의 하강속도 등은 화재 안전성 평가에 가장 핵심이라 할 수 있다. 그러나 이들 물리량은 가연물의 종류, 양(면적)과 위치(분포),

구획실 내부의 형상 그리고 개구부의 크기 및 위치 등에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에, 특정 변수가 화재의 중요 물리량에 미치는 영향을 정량적으로 규명하기 위한 지속적인 연구가 수행되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 특히 가연물의 분포와 구획실 형상은 구획화재의 대표적 기하학적 변수로 분류될 수 있으며, 이들 조건에서 화원과 수직 벽면(측벽, Sidewall)

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [chehwang@dju.ac.kr](mailto:chehwang@dju.ac.kr), TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

의 거리 변화는 환기조건과 더불어 구획실 내부의 화재특성을 변화시키는 주요 원인으로 인식되고 있다<sup>(4,6)</sup>.

화원과 측벽의 거리 변화는 일차적으로 화원 근처의 제한된 공기 유입(Entrainment)을 가져오며, 이로 인한 화염길이, 연소효율, 열발생률, 연기의 질량유량 및 연층 온도 등의 변화를 가져올 수 있다. 동시에 화원 주위의 가열된 벽면으로부터 열 피드백(Thermal feedback)으로 인하여, 가연물의 기화 또는 열분해 속도가 증가되는 상호작용(Interaction)을 경험하게 된다. 이 외에도 화원과 측벽 사이의 온도 및 속도 경계층의 변화로 인하여, 화염 기술기의 발생 및 주요 열전달 메커니즘의 변화가 동반될 수 있다<sup>(7,8)</sup>.

화염과 측벽의 상호작용에 관한 초기 연구들은 주로, 개방된 공간과 측벽 또는 코너에 버너가 위치할 때 공기 유입 및 화염길이의 변화를 통해 야기되는 연기의 질량유량, 천장 온도 및 열발생률과의 상관식 도출에 많은 노력을 기울였다<sup>(9-11)</sup>. 화염과 측벽의 상호작용에 대한 보다 구체적인 최근의 연구들을 살펴보면, Jangi 등<sup>(8)</sup>은 수치해석을 통해 구획 내에서 화원과 측벽의 거리에 따른 풀 화재의 동적 거동을 검토하였다. 화원이 벽면으로부터 충분히 떨어진 조건에서 화염은 가로방향의 와동(Crosswise vortex)에 의해 측대칭 구조의 진동을 하며, 소염과 재점화 현상에 의한 간헐성(Intermittency)을 보인다. 반면에 화염이 벽면 근처에 위치하면, 유동과 벽면의 상호작용에 의한 수직 방향의 와동(Longitudinal vortex)에 의해 화염 진동이 발생됨이 확인되었다. Ji 등<sup>(12)</sup>은 터널 모형을 대상으로 화원과 측벽의 거리 변화가 최대 연층온도에 미치는 영향에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 화원과 측벽의 거리가 감소되더라도 특정 거리 이상에서는 연층의 최대 온도에는 큰 변화가 없으나, 이 이하에서 급격하게 증가됨을 확인하였다. 저자는 이를 측벽의 제한 효과(Restriction effect)라 언급하였다. Gao 등<sup>(13)</sup> 역시 동일한 터널 모형에서의 실험 결과를 통해 화원과 측벽의 거리, 열발생률, 최대 연층온도 및 유효 천장 높이와의 상관관계를 검토하였다. 마지막으로 Shintani 등<sup>(14)</sup>은 개방 및 수직 벽면이 존재할 때, 근접한 5개의 액체 풀 화재가 순차적으로 점화되는 화재확산 속도를 측정하였다. 개방된 공간에서의 화재를 기준으로, 화원이 벽면에 위치할 때는 가열된 벽면으로부터 화원으로의 열 피드백 증가로 인하여 화재 확산속도, 최대 열발생률, 화재 성장률이 증가됨을 확인하였다. 그러나 화원과 벽면의 거리가 증가될 때, 벽면 측으로 화염이 기울어지는 현상 때문에 화원으로의 열 피드백이 감소되며, 결과적으로 화재 확산속도가 감소된다는 결과를 확인하였다. 위의 연구들은 단순한 구조의 수직 벽면과 화원의 거리에 따른 화재현상 변화에 대한 유의한 결과를 제공하지만, 실제 다양한 인자의 영향이 고려되는 구획실 내부에서 벽면이 화원에 미치는 영향을 명확하게 논하기에는 한계가 있다. 또한 문헌<sup>(8)</sup>에서도 언급되듯이, 개구부가 존재하는 실제 구획실을 대상으로 화염과 벽면의 상호작용을 통해 열발생률, 구획실의 열 및 화학

적 특성 변화에 대하여 검토한 연구는 거의 없는 실정이다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 1/3 축소된 ISO 9705 표준 화재실 및 동일한 화재하중(Fire load)을 갖는 목재 화원을 이용하여, 측벽과 화원과의 거리에 따른 연료의 질량 감소율, 열발생률, 구획 내부의 온도, 열유속 및 주요 화학종의 농도와 같은 화재특성 변화가 검토되었다. 구체적으로 화원과 측벽의 거리 이외에 환기조건과 구획 내부의 유동구조의 변화를 최소화시키기 위하여, 개구부 반대측 벽면의 위치 변화를 통해 화원과의 거리가 조절되었다. 본 연구를 통해 측정된 주요 물리량은 향후 측벽의 효과가 포함될 상관식 검증 및 개선에 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

## 2. 실험조건 및 방법

과환기 화재조건에서 구획실 내의 측벽과 화원의 거리에 따른 화재특성 변화를 검토하기 위하여, Figure 1에 제시된 바와 같이 ISO 9705 표준 화재실의 1/3 길이 비로 축소된 모형이 제작되었다. 그 결과 구획 내부는 0.8 m(x) × 1.2 m(y) × 0.8 m(z)의 크기를 갖는다. 구획은 5 mm 두께의 스틸 플레이트(Steel plate)와 25 mm 두께의 내화 석고보드로 기본 형상을 이루고 있다. 구획실 벽면의 열적 경계조건을 보다 단순화시키기 위하여 25 mm 두께의 Cerakwool blanket 단열재가 내부에 설치되었다. 개구부도 동일한 1/3 축소비(표준 크기는 0.8 m × 2.0 m)를 갖는 0.27 m × 0.67 m의 크기로 제작되었다.

구획실 내부의 수직 온도분포를 측정하기 위하여 구획 폭의 중심선(x = 0.4 m)을 따라 구획실의 앞부분(y = 0.2 m)과 뒷부분(y = 1.0 m)에 열전대 트리(Thermocouple tree)가 설치되었다. 이때 바닥면으로부터 0.1 ~ 0.7 m 높이에 대해 0.1 m 간격으로 총 7개의 노출 비드형 열전대(K-type)가 각각 설치되었다. 구획실 내부의 열유속(Heat flux) 측정을 위하여, 천장과 바닥면의 앞과 뒷부분에 측정 정확도가 검증된 판형 열유속계(Plate thermometer)<sup>(15)</sup>가 설치되었다. 구획실 상층부에서 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, Unburned hydrocarbon (UHC)와 같은 주요 화학종을 측정하기 위하여, 2개의 흡입형 프로브(Inhalation probe)가 적용되었다. 이때 샘플링 과정에서 추가적인 산화반응을 억제시키기 위하여, 삼중 관으로 제작된 흡입형 프로브에 냉각수가 공급되었다. 프로브를 통해 포집된 샘플링 가스는 얼음으로 채워진 박스(Ice bath) 및 매연입자 필터(Soot filter)에 통과시켜 수증기 및 매연입자(Soot)의 전처리 과정을 거친 뒤에 연소가스 분석기(MEXA 554-JK by HORIBA)로 공급되었다.

구획실에서 화원과 측벽의 거리 변화는 고정된 화원의 위치에서 구획실의 체적을 변화시키거나, 고정된 구획실 체적에서 화원의 위치 변화를 통해 가능하다. 그러나 이 2가지 방법 모두 화원과 개구부의 상대거리에 대한 변화를 동반하게 되며, 이는 구획실 내부의 유동구조 및 열 및 농

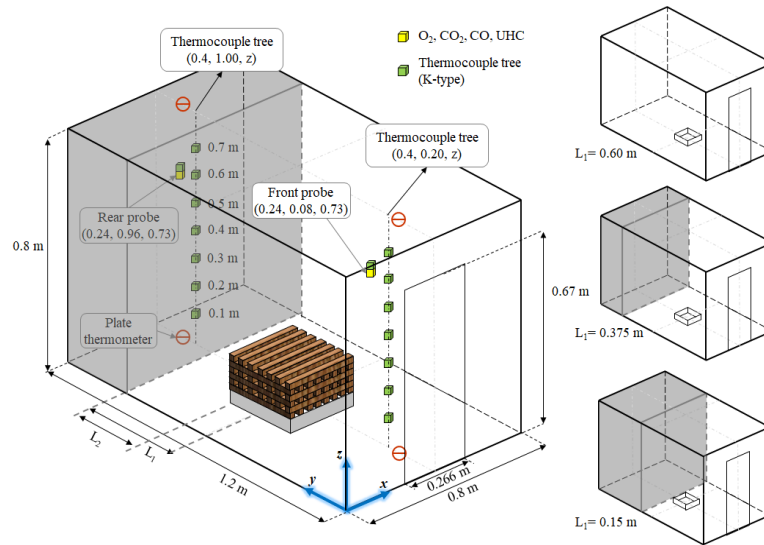


Figure 1. Schematic of 1/3 reduced-scale ISO 9705 room and location of measurement devices.

Table 1. Experimental Conditions in the Present Study

Case	$L_1$ (m)	$L_2$ (m)	Name
1	-	-	Fully Open Space
2	0.600	0.450	L600
3	0.375	0.225	L375
4	0.150	0.000	L150

도분포에 상당한 영향을 미치게 된다. Hwang 등<sup>(16)</sup>은 ISO 9705 구획실에서 화원 위치 변화에 따른 실험 및 수치해석 연구를 통해 개구부와 화원의 상대거리가 구획실 내부 화재특성에 큰 변화를 초래함을 확인하였다. 또한 Tran<sup>(17)</sup>은 개구부를 기준으로 화원을 중심선을 따라 뒤쪽으로 이동시키거나 코너에 위치시킬 때, 열발생률과 플래시오버의 발생시간에 차이가 발생된다는 결과를 보고한 바 있다. 이들 선행연구 결과를 고려하여 화원과 개구부의 상대거리를 고정한 상태에서 화원과 측벽의 거리변화가 시도되었다. 이를 위해 화원을 구획실 중앙에 배치하고, 개구부 반대편의 측벽을 화원 방향으로 이동시키면서 실험이 진행되었다. 즉, 화원 중심에서 개구부 반대측 측벽까지의 거리( $L_1$ )은 Figure 1의 우측에 도시된 바와 같이 0.60, 0.375 및 0.15 m로 변화되었다. 이해를 돕기 위해 이들 조건은 각각 L600, L375 그리고 L150으로 명명하였다. 참고로 L150( $L_1=0.15$  m)의 조건은 측벽이 화원 측벽과 직접 접촉되는  $L_2=0$  m에 해당된다. 측벽 또는 구획실 내부 벽면의 영향을 분석하기 위하여, 개방된 공간에서 동일 화원에 대한 실험이 추가되었다.

Figure 2는 본 연구에 적용된 버너와 목재 연료가 설치된 사진이다. 버너는 스테인레스 스틸(Stainless steel)로 제작되었으며, 0.30 m(x) × 0.30 m(y) × 0.06 m(z) 크기를 갖는다. 중심부는 목재 연료의 초기 점화를 위해 5 g의 헵탄( $C_7H_{16}$ )

연료가 점화 이전에 공급되었으며, 주위는 단열재로 처리되었다. 그리고 이 버너 상부에 0.03 m × 0.03 m × 0.30 m 크기의 가문비나무(Spruce wood) 우드 크립 45개가 설치되었다. 목재가 연료로 사용된 경우에 함수율(Moisture content)은 초기 점화, 화재성장 그리고 열발생률 등에 매우 큰 영향을 미치기 때문에<sup>(18)</sup>, 103 °C 이상의 고온 환경에서 24 h 이상의 건조를 통해 함수율이 0%가 된 이후 실험에 적용되었다<sup>(19)</sup>. 버너 하부에는 로드셀(Load cell)이 설치되어, 시간에 따른 질량 감소율이 측정되었다. 또한 산소소모법(Oxygen consumption method)이 적용된 100 kW 급의 칼로리미터(Calorimeter)를 통해 열발생률(Heat release rate)이 동시에 측정되었다.

### 3. 수치해석 조건 및 방법

목재 가연물이 적용된 구획화재를 모사하기 위하여 Fire Dynamics Simulator (FDS) version 6.5.2<sup>(20)</sup>가 사용되었다. 수치해석에서 화원의 형상은 Figure 2에 제시된 실험에서와 같이 다공 구조의 목재 가연물 배치를 고려하지 않고, 동일 바닥면적을 갖는 직육면체의 형상으로 단순화시켜 실제 가연물의 수직 높이(0.24 m)에 대한 1/2의 위치에 화원의 경계조건을 설정하였다. 이때 화원의 입력정보는 실험에서 측정된 시간에 따른 질량 감소율이 적용되었다. 참고로, 실험에서는 초기 점화를 위한 헵탄 5 g과 목재 가연물의 질량 감소율이 개별적으로 측정되지 않았기 때문에, 측정된 질량 감소율은 모두 목재에 의해 발생된 것으로 가정되었다. 이러한 접근은 고려된 헵탄 연료의 질량이 매우 작아서 초기 열발생률 및 온도 상승에 큰 기여를 하지 않는다는 실험 결과를 통해 충분히 합리적이라고 판단되었다.

FDS의 실행을 위해 요구되는 추가적인 물리적 입력인자<sup>(21)</sup>로서, 가문비나무의 연료 조성은  $CH_{3.584}O_{1.55}$ , 그리고 연소

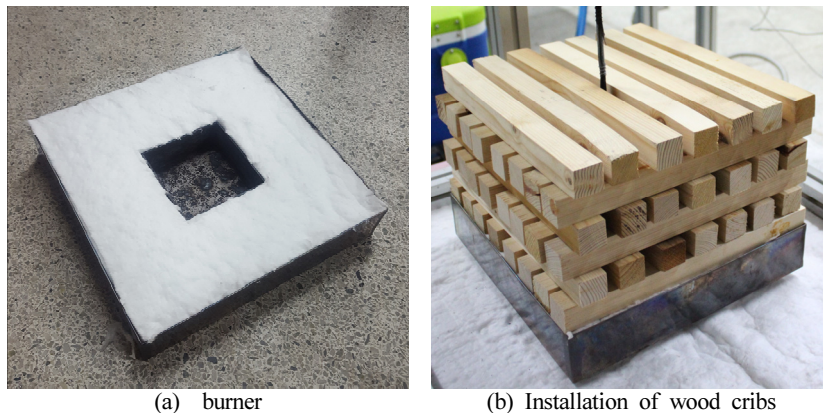


Figure 2. Photographs of burner and installation of combustibles.

열은 16,400 kJ/kg이 적용되었다. 추가적인 연소물성인 CO 및 매연입자 수율(Soot yields) 그리고 구획 내부에 설치된 단열재(Cerakwool blanket)의 열적 물성들은 Table 2에 제시되었다. 참고로 단열재의 방사율(Emissivity)은 벽면으로부터의 열 피드백을 고려하기 위해 중요한 변수이지만, 정확한 정보가 제공되지 않아 FDS의 기본값 0.9가 적용되었다. 실험과의 비교를 위한 구획실 내부의 온도, 열유속 및 화학종 농도의 측정위치는 Figure 1에 제시된 실험조건과 동일하게 설정되었다.

계산영역의 크기는 구획실과 개구부를 통해 유입 및 배출되는 열·유동을 포함하고, 개방된 경계조건(Open boundary condition)의 영향이 최소화 될 수 있도록 0.8 m(x) × 2.4 m(y) × 1.5 m(z)로 설정되었다. 대와동모사(Large eddy simulation)가 적용된 FDS의 활용 시에 격자의 크기는 직접수치모사(Direct numerical simulation)와 격자 내 규모(Sub-grid scale)의 난류 및 연소모델의 의존성을 결정하는 매우 중요한 수치적 인자이다. 일차적인 평균 격자크기( $\Delta$ )는 특성 화재직경(Characteristic fire diameter,  $D^*$ )에 10개( $\Delta = 0.03$  m) ~ 20개( $\Delta = 0.015$  m)의 격자가 포함되어야 한다는 선행연구<sup>(22)</sup> 결과에 따라 선정되었다. 그 결과  $D^*$ 에 15개의 격자가 포함된  $\Delta = 0.02$  m가 적용되었다. 또한 개구부 근처의 급격한 유동 및 온도변화를 고려하기 위하여, 개구부 근처는  $\Delta = 0.01$  m의 격자가 추가적으로 고려되었다. 적용된 총 격자수는 512,000개이며, 최종 격자 민감도 분석을 통해 주요 물리량의 예측 신뢰성을 확인하였다. 마지막으로 실제 목재 화재는 유연 연소의 종료 이후에 매우 긴 시간동안의 훈소(Smoldering combustion) 과정을 포함하고 있으나, 계산의 효율성을 고려하여 시뮬레이션 종료시간은 2,000 s로 결정되었다.

#### 4. 결과 및 검토

1/3 축소된 ISO 9705 표준 화재실에서 화원과 개구부 반대 측의 측벽과의 거리 변화에 따른 구획실 내부의 화재특성 변화가 검토되었다. Figure 3은 시간에 따른 질량 감소

Table 2. Values of Input Parameter for FDS Simulation

WOOD <sup>(21)</sup>	
Formula	CH <sub>3.584</sub> O <sub>1.55</sub>
Heat of Combustion (kJ/kg)	16,400
CO Yield	0.004
Soot Yield	0.015
Cerakwool Blanket	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	128.0
Specific Heat (kJ/kg·K)	1.0884
Thermal Conductivity (W/m·K)	0.058 @ T = 204 °C
	0.103 @ T = 427 °C
	0.170 @ T = 649 °C

율(Mass loss rate; MLR)과 산소 소모법에 의해 측정된 열발생률(Heat release rate; HRR)이 도시된 것이다. 개방된 공간에서의 실험결과는 구획에 의한 차이를 확인하기 위해 추가로 비교되었다. 먼저 Figure 3(a)의 MLR을 살펴보면, 모든 조건에서 초기 헵탄의 점화(0 s) 이후 큰 변화가 없으나, 약 400 s 이후 화재성장이 발생되고, 이후 2단계의 기울기를 보이며 최대값에 도달한다. 개방된 공간(Open fire)과 측벽의 위치가 변경되지 않은 L600의 질량 감소율을 비교하면(Figure 3(a)), 시간이 증가됨에 따라 MLR의 차이는 증가되며, L600의 조건이 개방된 공간 화재에 비하여 최대 MLR은 증가되고, 이에 도달하는 시간은 상당히 감소됨을 볼 수 있다. L600의 조건에서 연료의 최대 MLR과 개구부의 형상으로 산출되는 유입 공기의 질량유량을 통해 산출된 총괄 당량비(Global equivalence ratio,  $\phi_g$ )<sup>(23)</sup>가 0.226이다. 따라서 환기의 제한은 MLR에 큰 영향을 주지 않으며, 구획 벽면에 의한 열 피드백에 의해 목재 가연물의 MLR이 증가되었음을 예측할 수 있다. 측벽을 화원 방향으로 이동시킨 L375의 조건은 L600에 비하여 최대 MLR이 약간 증가되었으나, 시간에 따른 변화에는 큰 차이가 없다. 그러나 측벽과 화원에 직접 접촉된 L150은 가장 높은 MLR을 보이

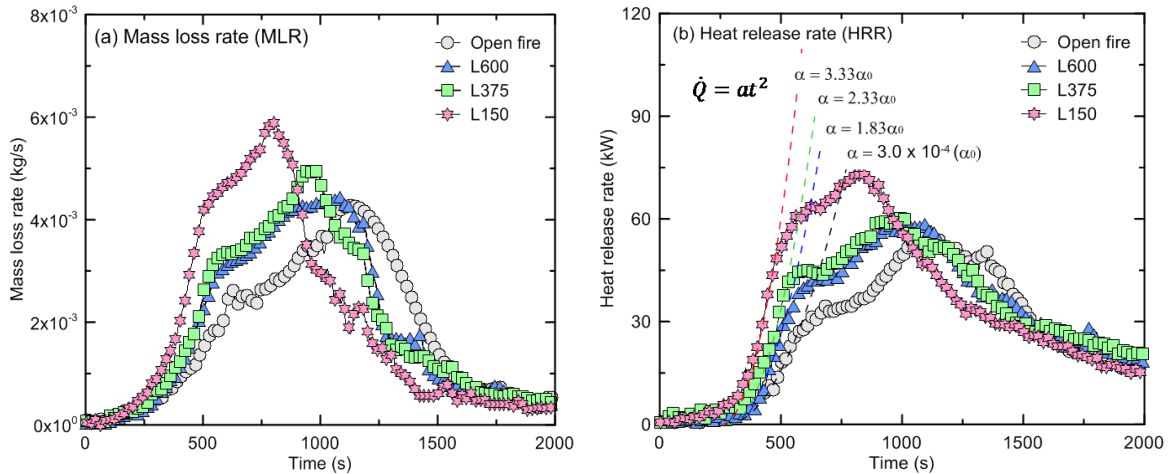


Figure 3. Comparisons of mass loss rate and heat release rates according to the distance between fire source and sidewall.

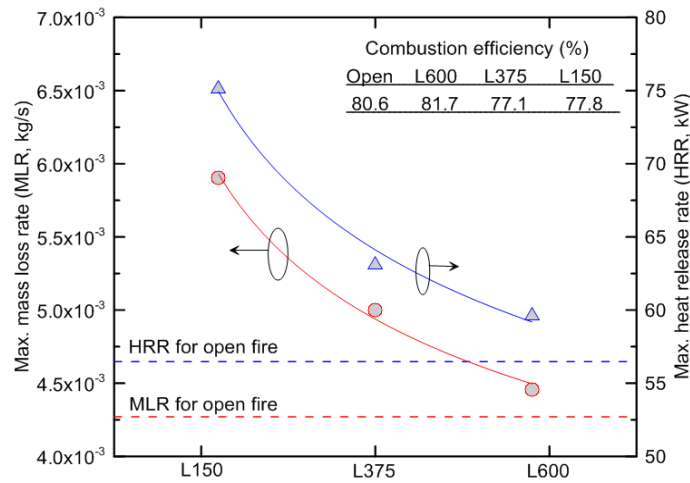


Figure 4. Comparisons of maximum MLR and HRR according to the distance between fire source and sidewall.

고 있다.

HRR 측정결과를 도시한 Figure 3(b)를 살펴보면, 연소효율에 따른 정량적 차이를 제외하고 각 조건별 MLR과 매우 유사한 경향을 나타내고 있다. 우선  $\dot{Q} = \alpha t^2$ 에 따른 초기 화재 성장률을 살펴보면, 개방된 공간 화재의 화재 성장계수 ( $\alpha$ )는  $3.0 \times 10^{-4} \text{ kW/s}^2$ 의 값을 갖으며, 이를  $\alpha_0$ 로 표현하였다. 측벽과 화원의 거리가 감소됨에 따라  $\alpha$ 는 점차적으로 증가됨을 볼 수 있으며, L600, L375 및 L150에 대하여 개방된 공간 화재의 1.83, 2.33 그리고 3.33배의 화재 성장계수를 갖게 된다. 즉, 위에서 언급되었듯이, 과환기화재 조건에서 구획실 벽면의 존재는 열 피드백 효과로 화재 성장률 및 최대 HRR을 증가시킨다. 측벽과 화원의 거리가 감소됨에 따라 이들 물리량 역시 증가되는 경향을 보이고 있으나, 측벽과 화원이 접촉된 조건에서 최대 HRR이 급격하게 증가되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 화염과 벽면의 열적 피드백이 크게 증가되는 특정 거리가 존재한다는 Ji 등<sup>(12)</sup>의 연구결과를 통해 재확인 될 수 있다. 참고로, 기존 화염

과 벽면의 상호작용에 관한 상관식 도출 연구들<sup>(11)</sup>은 주로 공기 유입의 제한에 따른 화염길이, 연기 발생량, 연층의 온도 등에 초점을 두고 있으며, 이를 위해 공급 유량이 제어된 기체연료가 적용되었다. 그 결과 이들 연구들은 벽면의 열 피드백에 의해 화재의 강도 변화가 동시에 동반되는 현상을 고려하는데 한계가 있다.

Figure 4는 화원과 측벽의 거리에 따른 화재특성을 보다 명확히 확인하기 위하여, Figure 3에 제시된 최대 MLR과 HRR을 재도시한 것이다. 개방된 공간에서의 결과로 표기되었다. 최대 MLR의 경우, 개방된 공간 조건에 비해 L600은 약 4% 증가되었으며, 화원으로 점차 가까워지는 L375와 L150은 각각 약 17% 그리고 38% 증가된 결과를 보이고 있다. 최대 HRR 역시 MLR과 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 개방 조건을 기준으로 L600, L375 및 L150에 대하여 각각 6%, 12% 그리고 33% 증가되고 있다. 최대 MLR과 HRR의 결과만을 고려할 때, 제한된 실험조건으로 Figure 3에서 논의된 화염과 벽면이 상호작용하는 특

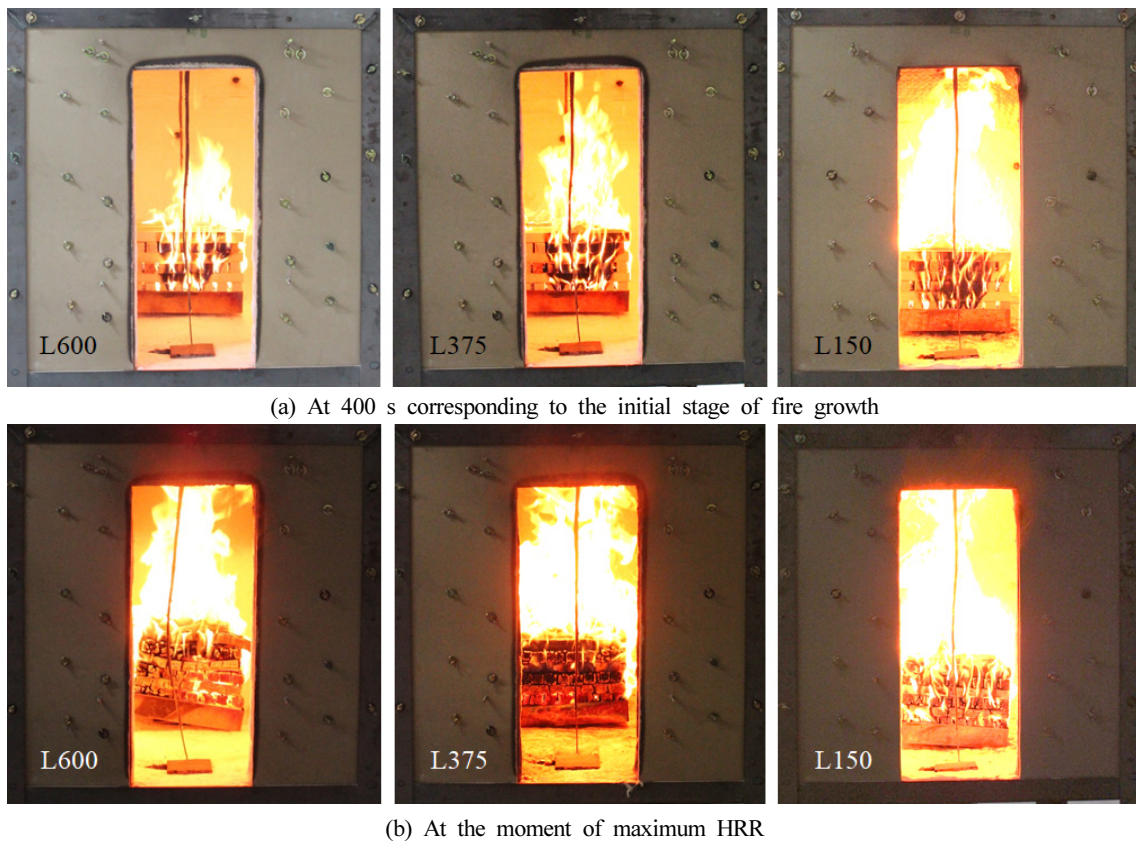


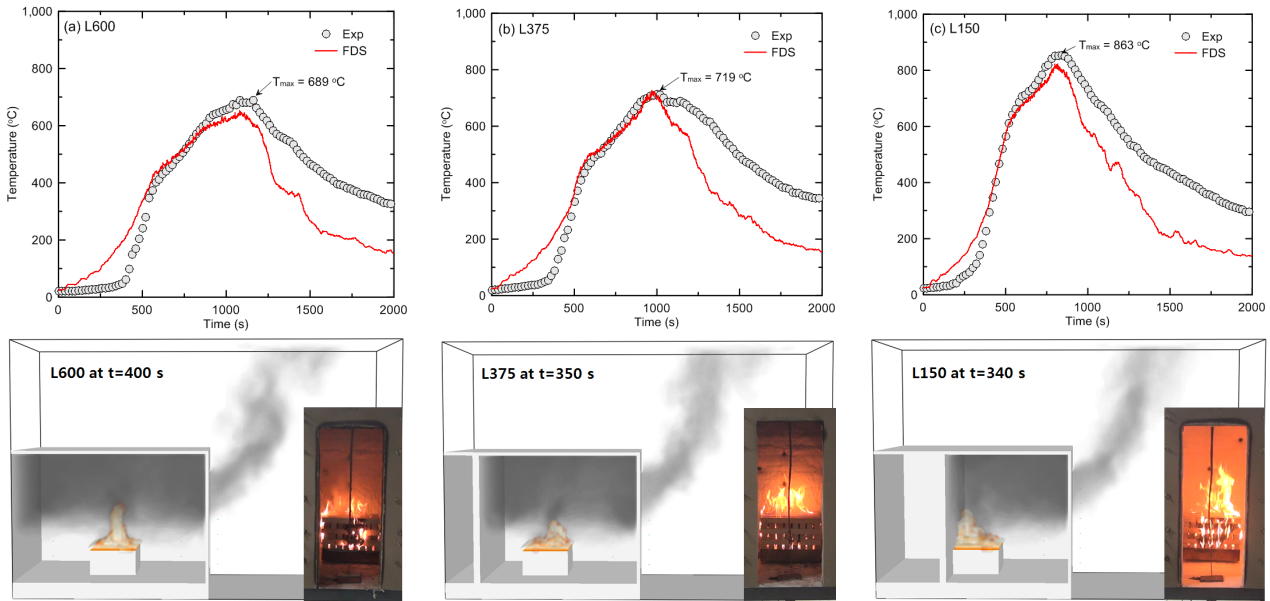
Figure 5. Instantaneous flame photos according to the distance between fire source and sidewall.

정 거리의 존재가 확인되기는 어렵지만, MLR과 HRR은 화원과 측벽의 거리에 반비례하는 경향이 충분히 확인될 수 있다. 추가로 과환기 조건에서 수행된 모든 구획실험에 대하여 연소효율(Combustion efficiency)가 그림에 삽입되었다. 연소효율은 MLR과 Table 2에 제시된 목재의 연소열을 곱한 이론 열발생률과 측정된 열발생률의 비로 산출되었다. 그 결과 개방된 화재(80.6%)와 유사하게 모든 구획화재 결과(평균 78.8%)는 화원과 측벽의 거리변화에 의한 뚜렷한 차이를 확인하기 어렵다.

Figure 5는 점화 이후 화재가 성장하는 400 s의 동일한 시점과 각 조건에서 최대 HRR이 발생하는 시점(Figure 3 참조)에 개구부 측에서 촬영된 사진을 비교한 것이다. 비록 본 논문에는 제시되지 않았으나, 초기 점화를 위해 목재 하부 중앙에 공급된 5g의 헵탄은 약 300 s 이내에 연소가 종료되었으며, 이는 급격히 증가된 CO와 UHC를 통해 재확인 되었다. 즉, Figure 5(a)에 제시된 400 s의 순간에는 목재의 화재확산이 이루어지고 있는 초기 단계라 할 수 있다. 사진에서 측벽이 화원으로 이동함에 따라 화염 높이가 점차적으로 증가됨을 볼 수 있다. 최성기에 해당되는 Figure 5(b)를 살펴보면, 모든 조건에서 화염이 천장에 닿아 화염 길이에 대한 직접적인 비교는 불가능하지만, 화원과 벽면의 거리가 감소함에 따라 목재 가연물의 연소면적이 증가된다. 결과적으로 L150의 조건에서 최대 MLR과 HRR이 가장 높

게 측정되었음을 직접적으로 확인할 수 있다. 이러한 결과의 원인은 화원 근처의 벽면으로 화원 근처의 공기 유입량이 제한되어 결과적으로 화염길이가 증가된 것으로 판단된다. 또한 고온 벽면으로부터의 열 피드백으로 인한 가연성 기체의 공급량 증가가 복합적으로 작용된 것으로 판단된다.

Figure 6은 구획 앞부분(개구부 측)의 천장 근처에서 측정된 기체온도를 도시한 것이며, FDS의 예측성능을 평가하기 위하여 동시에 비교되었다. 또한 이해를 돕기 위하여 온도가 급격히 증가되기 시작하는 화재성장 초기 단계의 실험 사진과 시뮬레이션 결과가 제시되었다. 먼저 실험결과를 살펴보면, 측벽과 화원의 거리가 감소됨에 따라 최대 온도는 점차적으로 증가된다. 특히 측벽이 화원과 접촉된 L150의 최대 온도는 L600과 L375에 비해 각각 174 °C와 144 °C의 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 결과는 Figures 3-5에서 논의된 바와 같이, 특정 거리 이내에서 급격히 증가되는 화염과 벽면의 상호작용으로 인한 화염길이와 MLR의 증가로 설명될 수 있다. FDS의 결과를 살펴보면, 최대 온도는 실험결과를 상당히 정확하게 예측하고 있다. 그러나 초기 화재성장 단계 그리고 최성기 이후의 감쇠기 단계에서 실험결과에 비해 각각 과대 및 과소 예측결과를 보이고 있다. 이러한 차이는 FDS 입력조건의 설정 및 온도의 측정오차를 통해 설명될 수 있다. 첫째, 초기 화재성장 단계에서 FDS의 과대 예측은 부적절한 화원의 입력정보에 의해 발생한 것이



**Figure 6.** Measured gas temperatures at the front of upper layer, and instantaneous images at the initial stage of fire growth (numerical results were also included with solid lines).

다. 시뮬레이션에서는 측정된 MLR이 FDS의 화원 정보로 제공되면, 점화 이후 바로 화염이 생성되고 MLR에 비례하여 열량이 방출된다. 그러나 실제 실험에서는 초기 헵탄에 의한 파일럿 플레임(Pilot flame)에 의해 목재의 열분해가 발생되며, 가연범위가 형성되기 전까지 화재성장이 지연되는 현상이 발생하게 된다. 그 결과 점화 이후 화재성장 단계에서 FDS는 실험에서의 온도를 과대 예측하는 것이다. 둘째, 감쇠기 단계에서 FDS의 과소 예측은 부정확한 실험 결과에 의해 야기된 것이다. Han 등<sup>(24)</sup>에 의해 보고된 바와 같이 노출 비드형 열전대는 복사열이 존재하는 공간에서는 실제 비드 주위의 기체 온도보다 매우 높은 측정값을 제공한다. 유연 연소가 종료되더라도 본 연구에 적용된 목재 화재에는 매우 오랜 시간의 훈소가 발생되기 때문에, 높은 복사열이 열전대 비드에 직접적으로 전달된다. 이러한 실험의 측정오차로 인하여 FDS의 결과와 차이를 보이게 된다. 위 결과로부터 FDS의 예측 결과는 초기 화재확산 및 감쇠기 단계를 제외하고 실험결과를 상당히 정확하게 예측하고 있으며, FDS의 예측 결과는 화염과 벽면의 상호작용을 이해하는데 충분히 활용될 수 있음을 알 수 있다.

Figure 7(a)는 개구부 측에 설치된 열전대 트리에서 측정된 온도의 수직분포를 나타낸 것으로, 최대 HRR 시점을 기준으로  $\pm 50$  s 동안의 시간 평균값을 수직 높이에 따라 도시한 것이다. 평균을 위한 시간 구간동안의 온도변화에 대한 표준편차는 수평 에러 바(Error bar)로 표현되었다. 모든 조건에서 수직 높이의 증가에 따라 온도가 증가되는 경향을 보이고 있으며, 비교적 화원으로부터 측벽의 거리가 큰 L600과 L375의 온도 차이는 크지 않음을 볼 수 있다. 반면에, L150은 수직 높이 0.2 m에서 약 600 °C로 급격하게 온도 상승이 발생되었으며, 이후 다른 조건과 유사한 기울기

를 갖는 온도 상승을 나타내고 있다. 참고로, L375의 경우 수직 높이 0.1 m에서 비교적 높은 온도가 측정되었으나, 이는 실험 중에 목재 크립 일부가 낙하되어 야기된 결과이다. Figure 7(b)는 천장 및 바닥에 설치된 관형 열유속계를 통해 측정된 값을 시간에 따라 도시한 것이다. 천장에서의 열유속은 측벽이 화원에 가까워짐에 따라 점차적으로 증가되는 경향을 보이고 있으며, 최대 열유속 또한 상당한 차이를 보이고 있다. 바닥면의 경우, L600과 L375는 매우 유사한 열유속 변화를 갖지만, L150은 상대적으로 높은 값이 측정되었다. 위 결과로부터 벽면의 열 피드백으로 인한 화염 강도의 증가로 인하여, 벽면과 화원의 거리가 감소함에 따라 더 높은 온도 분포가 발생됨을 볼 수 있다. 특히 측벽과 화원이 접촉된 L150은 증가된 화염길이에 의한 현상과 가연물 주위(가연물 최대 적재 높이 0.24 m)의 높은 열유속에 의해 급격한 온도 상승이 발생된 것으로 추측된다. 그러나 L600과 L375의 구획 내부 온도 및 열유속의 분포는 비교적 유사하며, 이들 조건에서는 화염과 벽면의 상호작용이 크지 않음을 알 수 있다.

Figure 8은 FDS를 통해 예측된 측벽의 수직 높이에 따른 시간 평균된 벽면온도 및 열유속을 도시한 것이다. 화원과 측벽의 거리에 따른 각 조건에서 Figure 3(b)에 제시된 최대 HRR의 시점을 기준으로  $\pm 50$  s의 평균 및 표준편차가 적용되었다. 실험을 통한 이들 물리량의 측정이 되지 않았으나, Figure 6에서와 같이 최성기 근처에서 FDS의 열적 특성 예측능이 확인되었기에, 수치해석 결과의 활용은 충분한 타당성을 갖는 것으로 판단된다. 각 물리량 측정을 위한 Device의 위치는 구획 폭의 중심선( $x = 0.4$  m)을 기준으로 측벽의 0.2 m에서 0.6 m 높이까지 0.05 m 간격으로 설정되었다. Figure 8(a)에 제시된 벽면온도를 살펴보면, 화원으로

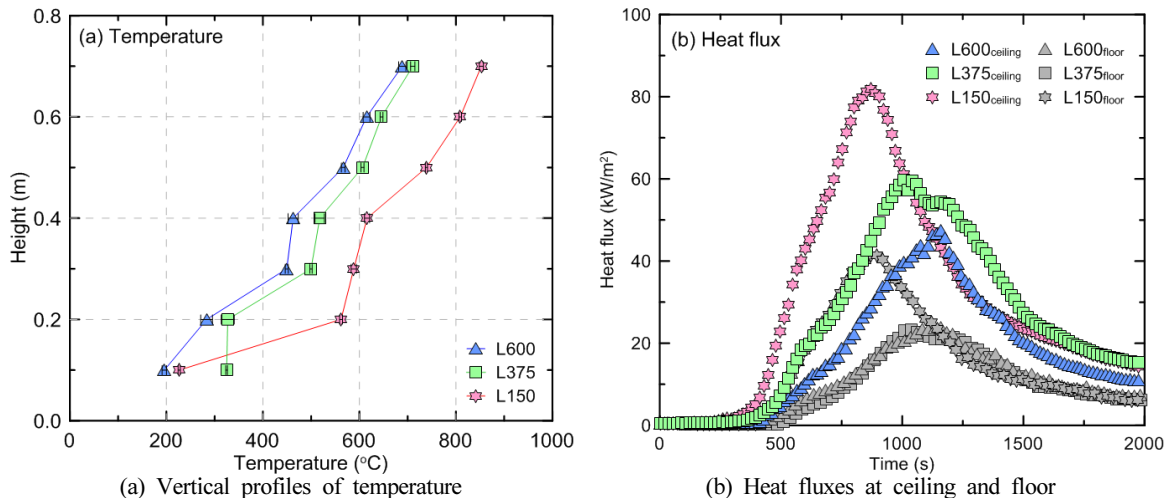


Figure 7. Comparison of vertical profile of mean temperatures and heat fluxes at ceiling and floor as a function of time.

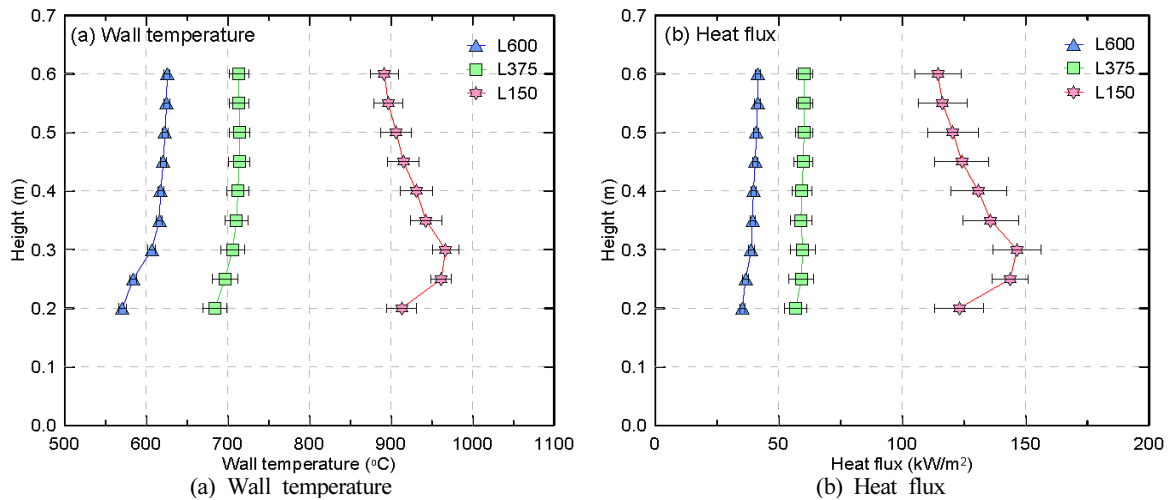


Figure 8. Comparison of wall temperature and heat flux at rear wall predicted by FDS.

부터 가장 먼 거리에 측벽이 존재하는 L600의 경우, 목재 가연물의 최대 높이(0.24 m) 이상에서는 상당히 균일한 온도분포를 보이고 있다. L375의 조건 역시 약 100 °C의 온도 상승이 발생되었으나, 온도의 수직 분포는 매우 유사하다. L600과 L375의 열발생률 차이가 크지 않음을 고려할 때, 벽면온도 차이의 원인은 화원과 거리 변화로 인한 복사 열전달량에 의해 설명될 수 있다. 또한 수직 높이에 따른 온도의 균일성은 화원과 측벽 사이에서 천장에 충돌한 고온 연소생성물이 화원과 측벽 사이로 하강 또는 재순환 유동 구조<sup>(3)</sup>를 갖기 때문이다. L150의 조건은 다른 조건에 비해 매우 큰 온도 상승을 보이고 있으며, 수직 높이 0.3 m에서 가장 높은 벽면온도가 예측되었다. 이러한 온도 상승은 화염과 벽면의 열적 피드백으로 인한 MLR과 HRR의 증가에서 일차적인 원인을 찾아볼 수 있다. 또한 목재가 적재된 최대 높이 근처에서 화염과 벽면의 접촉으로 인하여 0.3 m의 높이에서 가장 높은 온도가 예측된 것이다. 추가적으로

다른 조건과는 다르게 측벽과 화원 사이의 거리가 0인 L150은 벽면을 따라 상승하는 단순한 유동구조를 갖기 때문에, 벽면으로의 열손실로 인하여 상부로 갈수록 온도가 감소되고 있음을 알 수 있다. Figure 8(b)에 제시된 열유속 역시 측벽의 거리에 따른 영향 그리고 수직 방향의 분포가 벽면온도와 매우 유사함을 볼 수 있다. 일반적으로 복사 열유속은 화원으로부터의 거리 제곱에 반비례한다고 알려져 있으나, 거리 함수에 따른 정확한 관계는 확인되지 않았다. 이는 화원과 측벽의 거리가 매우 가까우며, 화염과 벽면의 상호작용으로 화재의 강도가 동시에 변화되기 때문으로 사료된다.

측벽과 화원의 거리에 따른 화학적 특성을 검토하기 위하여, Figure 9는 구획 상층부의 앞부분(개구부 측)에서 측정된 O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. CO와 UHC가 추가적으로 측정되었으나, 목재의 화재성장 이전(300 s 이내)에 초기 점화를 위해 적용된 헵탄의 연소로



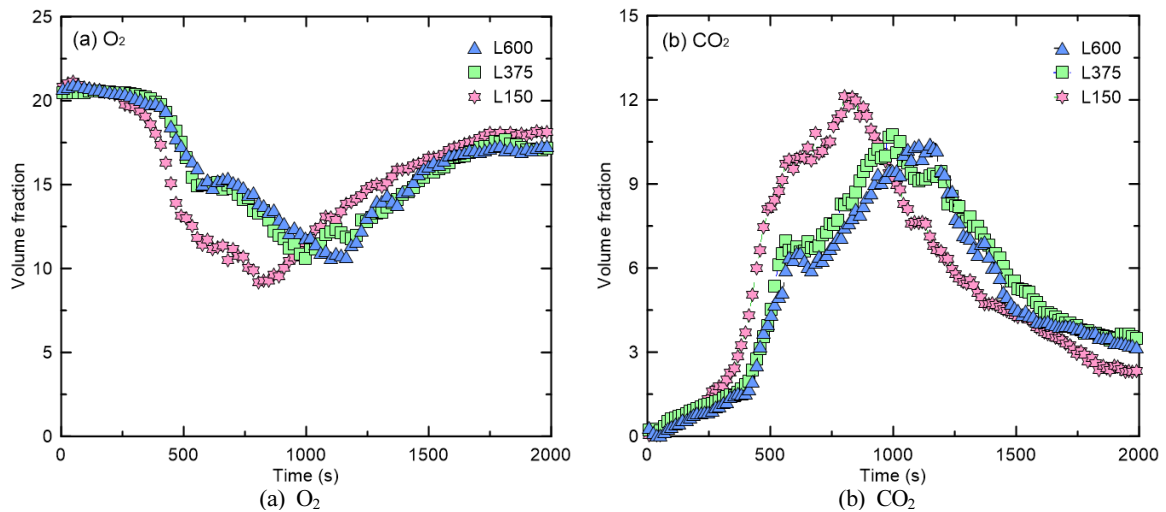


Figure 9. Comparison of O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> volume fractions measured at front upper layer inside the compartment.

인하여 매우 많은 양이 CO와 UHC가 발생되었다. 그 결과 목재의 성장과정에서 측벽 거리에 따른 영향을 확인하기 어려워 본 논문에서는 제외되었다. O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub> 모두 L600과 L375는 큰 차이가 없으며, HRR, 기체온도 및 벽면온도와 유사하게 L375이 L600에 비해 다소 증가된 정량적 값을 확인할 수 있다. 반면에 L150은 다른 조건에 비해 O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 변화율 그리고 각각의 최소 및 최대값의 상당한 차이를 확인할 수 있다. 위 결과로부터 화염과 벽면의 상호작용으로 인한 화재특성의 큰 변화가 발생하는 특정 거리가 존재한다는 기존 연구결과<sup>(12)</sup>를 재확인할 수 있다. 또한 실험 및 시뮬레이션 결과를 통해 측벽과 화원의 거리에 따른 주요 연소물성(MLR, HRR, 기체 및 벽면온도, 열유속 그리고 화학종 농도)의 거시적인 변화는 충분히 논리적으로 설명되었다. 그러나 복잡한 인자의 영향을 받는 구획화재에서 측벽에 의한 화재특성 변화의 정량적 원인의 설명을 위해서는 추가적인 연구가 요구된다. 마지막으로 본 연구결과는 기존에 단순 형상 및 고정된 화재 강도를 통해 제시된 벽면 효과에 의한 화재특성의 상관식을 검증 및 개선하는데 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 5. 결론

과환기 화재조건에서 화원과 측벽의 거리에 따른 화재특성의 변화를 검토하기 위하여, 1/3 축소된 ISO 9705 표준 화재실을 대상으로 목재 화원에 대한 실험 및 FDS를 이용한 수치해석이 수행되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

개방된 공간 화재에 비해 구획실 화재는 벽면의 열 피드백 효과로 인하여 가연물의 질량 감소율과 열발생률이 증가됨을 확인하였다. 측벽과 화원의 거리가 감소됨에 따라 화원 근처의 공기유입의 제한에도 불구하고 최대 질량 감소율, 열발생률 및 화재성장률은 점차적으로 증가되며, 측

벽이 화원에 접촉된 조건에서 이들 물리량의 가장 높은 값이 확인되었다. 이러한 원인은 고려된 조건들의 연소효율에 큰 변화가 없음을 고려하여 화염과 벽면의 열적 상호작용을 통해 설명되었다.

화원과 측벽의 거리가 감소 또는 접촉됨에 따라 벽면 근처의 유동의 변화로 인하여, 수직방향의 온도분포의 상당한 차이를 갖게 된다. 또한 측벽에 의한 열 피드백으로 열발생률, 온도 및 열유속의 급격한 변화가 존재하는 특정거리가 존재할 수 있음을 예측할 수 있다. 화학종의 농도 역시 화학반응을 통해 발생하는 열적 특성과 동일한 현상에 의해 설명될 수 있음을 확인하였다.

FDS의 예측성능은 질량 감소율이 고려된 화원정보 그리고 열전대의 측정오차로 인하여 초기 화재확산 및 감쇠기 단계에서의 오차를 보이고 있으나, 최성기 근처의 온도를 매우 정확히 예측하고 있다. 이를 통해 화원과 측벽의 거리에 따른 벽면 온도 및 열유속의 차이는 화염과 벽면의 상호작용을 이해하기 위한 중요한 정보로 활용되었다. 본 연구결과는 기존에 단순 형상 및 고정된 화재 강도를 통해 제시된 벽면 효과에 의한 화재특성의 상관식 검증을 위해 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 2015학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

## References

1. J. G. Quintiere, "Fire Behavior in Building Compartments", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 29, pp. 181-193 (2003).

2. E. H. Yui, A. H. Buchanan and C. M. Fleischmann, "Simulating the Effects of Fuel Type and Geometry on Post-flashover Fire Temperature", *Fire Safety Journal*, Vol. 41, pp. 62-75 (2006).
3. C. H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson and G. H. Ko, "Studies on Fire Characteristics in Over- and Underventilated Full-scale Compartments", *Journal of Fire Sciences*, Vol. 28, pp. 459-486 (2010).
4. I. R., Thomas, K. A. Moinuddin and I. D. Bennetts, "The Effect of Quantity and Location on Small Enclosure Fires", *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol. 17, pp. 85-102 (2007).
5. A. Yu. Snegirev, G. M. Makhviladze, V. A. Talalov and A. V. Shamshin, "Turbulent Diffusion Combustion under Conditions of Limited Ventilation: Flame Projection Through an Opening", *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 39, No. 1, pp. 1-10 (2003).
6. A. A. Stec, T. R. Hull, J. A. Purse and D. A. Purser, "Comparison of toxic product yields from bench-scale to ISO room", *Fire Safety Journal*, Vol. 44, pp. 62-70 (2009).
7. J. G. Quintiere and T. G. Cleary, "Heat Flux from Flames to Vertical Surfaces", *Fire Technology*, Vol. 30, pp. 209-231 (1994).
8. M. Jangi, B. Z. Dlugogorski, "On Wall Fire Interaction in a Small Pool Fire: A Large-eddy Simulation Study", *Fire Safety Journal*, Vol. 92, pp. 199-209 (2017).
9. R. I. Alpert, "Calculation of Response Time of Ceiling-mounted Fire Detectors", *Fire Technology*, Vol. 8, pp. 181-195 (1972).
10. M. Poreh and G. Garrad, "A Study of Wall and Corner Fire Plumes", *Fire Safety Journal*, Vol. 34, pp. 81-89 (2000).
11. Y. Hasemi and T. Tokunaga, "Some Experimental Aspects of Turbulent Diffusion Flames and Buoyant Plumes from Fire Sources Against Wall and in a Corner of Walls", *Combustion Science and Technology*, Vol. 40, pp. 1-17 (1984).
12. J. Ji, C. G. Fan, W. Zhong, X. B. Shen and J. H. Sun, "Experimental Investigation on Influence of Different Transverse Fire Locations on Maximum Smoke Temperature under the Tunnel Ceiling", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 4817-4826 (2012).
13. Z. H. Gao, J. Ji, C. G. Fan, J. H. Sun and J. P. Zhu, "Influence of Sidewall Restriction on the Maximum Ceiling Gas Temperature of Buoyancy-driven Thermal Flow", *Energy and Buildings*, Vol. 84, pp. 13-20 (2014).
14. Y. Shintani, Y. Aramaki, K. Harada, N. Kakae, T. Tsuchihashi and Y. Tanaka, "The Effects of Building Elements and Smoke Layer on Fire Spread between Combustible Materials", 7th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (AOSFST 7) (2007).
15. H. S. Yun, S. Y. Mun and C. H. Hwang, "An Experimental Study on the Applicability of Plate Thermometer in Steady and Unsteady-State Fire Conditions", *Fire Science and Engineering*, Vol. 29, No. 5, pp. 34-41 (2015).
16. C. H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson and G. H. Ko, "Effects of Fuel Location and Distribution on Full-Scale Under-ventilated Compartment Fires", *Journal of Fire Science*, Vol. 29, pp. 21-52 (2011).
17. H. C. Tran, "Experimental Aspects of Validating a Compartment Wall Fire Model", *Proceedings of 5th International Fire Conference*, pp. 13-24 (1990).
18. D. Madrzykowski, "Impact of a Residential Sprinkler on the Heat Release Rate of a Christmas Tree Fire", NISTIR 7506, National Institute of Standards and Technology (2008).
19. J. C. Walker, "Primary Wood Processing : Principles and Practice", Springer & Business Media (2006).
20. K. B. McGrattan, J. Floyd, G. P. Forney, H. R. Baum and S. Hostikka, "Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model", *Fire Safety Science* Vol. 7, pp. 827-838 (2003).
21. P. J. DiNenno, D. Drysdale, C. L. Beyler, W. D. Walton, L. P. Richard, J. R. Hall and J. M. Watts, "SFPE Hand Book of Fire Protection Engineering (Third Edition)", National Fire Protection Association, Society of Fire Protection Engineers (2002).
22. K. B. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator (Version 6): Technical Reference Guide", NIST SP 1018-1 6th edition, National Institute of Standards and Technology (2016).
23. G. H. Ko, C. H. Park, C. H. Hwang and S. H. Park, "A Study of the Combustion Efficiency Concept in Under-ventilated Compartment Fires", *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 145-152 (2010).
24. H. S. Han, B. J. Kim and C. H. Hwang, "A Numerical Study on Temperature Prediction Bias using FDS in Simulated Thermal Environments of Fire", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 32, No. 2, pp. 14-20 (2017).