

반밀폐된 구획에서 발열량 변화에 따른 비정상 화재특성 Effects of Change in Heat Release Rate on Unsteady Fire Characteristics in a Semi-Closed Compartment

황철홍

Cheol-Hong Hwang

대전대학교 소방방재학과

(2012. 1. 19. 접수/2012. 4. 13. 수정/2012. 4. 13. 채택)

요 약

반밀폐된 구획에서 발열량 변화에 따른 환기부족화재의 비정상 열 및 화학적특성에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 이를 위해 실규모 ISO 9705 표준화재실의 출입구 폭이 0.1 m로 축소되었으며, 구획 중앙에 설치된 분사노즐을 통해 헵탄 연료의 유량은 선형적으로 증가되었다. 구획 내부의 온도, 열유속, 화학종 농도 그리고 발열량의 연속적 측정이 이루어졌으며, 비정상 열 및 화학적특성을 표현하기 위하여 총괄 당량비의 개념이 적용되었다. 주요 결과로서, 총괄 연소효율과 구획 내부의 국부 연소효율은 시간에 따라 매우 다른 결과를 보이며, 이론과 측정된 발열량을 통한 총괄 당량비 역시 큰 차이를 보이게 된다. 온도, 열유속 및 화학종 농도의 시간에 따른 변화는 총괄 당량비 개념을 통해 표현될 수 있었다. 구획 내부에서 CO의 농도는 총괄 당량비 2.0~3.0의 범위에서 최대값을 보이며, 보다 과농한 조건에서 점차적으로 감소되는 현상이 발견되었다. 추가로 본 실험을 통해 얻어진 반밀폐된 구획화재의 비정상 열 및 화학적 거동은 향후 현실적인 화재 모델링을 위한 검증 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

An experimental study was conducted to investigate the effects of change in heat release rate on unsteady fire characteristics of under-ventilated fire in a semi-closed compartment. A standard doorway width of the full-scale ISO 9705 room was modified to 0.1 m and the flow rate of heptane fuel was increased linearly with time using a spray nozzle located at the center of enclosure. Temperature, heat flux, species concentrations and heat release rate were continuously measured and then global equivalence ratio (GER) concept was adopted to represent the unsteady thermal and chemical characteristics inside the compartment. It was observed that there was a significant difference in unsteady behavior between global and local combustion efficiency, and the GERs predicted by ideal and measured heat release rate were also shown different results in time. The unsteady behaviors of temperature, heat flux and species concentrations were represented well using the GER concept. It was important to note that CO concentration was gradually decreased with the increase in GER after reaching its maximum value in the range of 2.0~3.0 of global equivalence ratio. In addition, the experimental data on unsteady thermal and chemical behaviors obtained in a semi-closed compartment will be usefully used to validate a realistic fire simulation.

Key words : Compartment fire, Unsteady fire characteristics, Under-ventilated fire, Semi-closed compartment

1. 서 론

건물 내의 화재사고는 일반적으로 방이나 구획 내의 단일 공간에서 시작되기 때문에 화재현상에 관한 연구

는 주로 단일 구획의 관점에서 출발한다. 그 결과 대부분의 화재실험은 0.8 m × 2.0 m의 출입구(환기부)를 갖는 ISO 9705 표준화재실을 대상으로 가연물의 양, 성분 및 분포 등에 따른 다양한 화재특성에 관한 연구가 진행되고 있다.^{1,2)} 이러한 구획화재의 성공적인 진압과 직접적으로 관련되는 플래시오버(전실화재)의 도

달시간은 가연물의 종류, 배치 및 공간의 크기뿐만 아니라 환기조건의 변화에도 큰 차이를 보인다. 특히 공간의 개방도가 큰 경우에는 플래시오버에 도달하는 시간이 길어지는 반면에 밀폐도가 증가된 공간에서는 보다 짧은 시간에 전실화재가 발생하는 큰 위험성에 노출된다. 결과적으로 반밀폐된(semi-closed) 구획에서는 보다 쉽게 환기부족화재(또는 환기지배형화재)로 성장될 수 있으며, 충분한 환기면적을 갖는 과환기화재(또는 연료지배형화재)에 비해 더욱 불규칙하고 복잡한 화재거동을 보이게 된다. 또한 인체에 치명적인 일산화탄소(CO)를 포함하며 미연탄화수소(UHC: unburned hydrocarbon), 그을음(soot) 등을 다량으로 발생시키기 때문에 심각한 인명피해를 초래할 수 있다.^{3,4)}

환기부족화재에 관한 연구는 환기부족조건을 조성하는 방법적 측면에서 두가지로 분류될 수 있다. 첫째, 동일한 환기부의 면적에서 연료 공급량 증가를 통해 산소 유입량의 상대적인 감소로 환기부족화재를 생성하는 것이다.⁵⁾ 둘째 연료 공급량이 고정된 상태에서 환기부의 면적을 감소시킴으로써, 산소 유입량의 절대적인 감소를 유도하여 환기부족화재를 생성하는 것이다.⁶⁻⁸⁾ 이러한 방법은 첫 번째 방법과 유사한 화재거동을 재현할 수 있으나, 환기부를 통한 연소생성물 및 공기의 유동(vent flows) 구조를 변화시켜 구획내부의 3차원적인 화재거동에 상당한 차이를 유발할 수 있다.⁹⁾ 그러나 환기부의 면적이 매우 작게 설정되었을 때는 위에서 언급된 반밀폐 구획화재의 특성을 확인할 수 있는 확장된 의미를 부여할 수 있다. 환기부의 면적변화를 통한 기존의 구획화재 연구들은 대부분 총괄 당량비의 관점에서 상대적인 화재특성의 차이를 논하고 있을 뿐, 실제 화재 위험도가 높은 반밀폐된 구획을 대상으로 검토되지 않고 있다.

화재의 지속적 성장과정 또는 플래시오버 이후에 발생하는 환기부족화재는 실제 상황에서 정상상태(steady-state)의 특성을 갖기 보다는 시간에 따라 구획내부의 화재특성이 크게 변화되는 비정상화재(unsteady fire)의 성격을 갖는다. 그러나 점화 이후에 발생하는 각 화재의 성장단계 그리고 다른 화재규모를 갖는 최성기의 특성을 파악하기 위하여 대부분의 실험 및 수치해석 연구들은 화재조건을 제어한 정상상태에서 넓은 범위의 발열량, 연료종류 및 환기조건에 따른 구획 내부의 화염거동, 온도 및 연소생성물에 대한 연구를 수행하고 있다.¹⁰⁾ 이러한 접근법은 다양한 조건에서 발생할 수 있는 복잡한 화재현상의 주요 변수 및 결과치들에 대한 정량적 평가가 가능하다는 장점을 갖고 있다. 또한 최근에는 화재모델링의 신뢰도 평가에 중요하게 활

용되고 있다.¹¹⁾ 그러나 발열량, 온도, 열유속 및 화학종 농도 등의 주요 결과에 대한 정상상태 구간의 평균값을 도출하는 과정에서 정상상태 구간의 설정에 따라 평균값은 매우 다양한 값을 갖게 되며, 결과적으로 연구자의 주관적 판단에 의해 결정되는 문제점을 갖고 있다. 추가로 정상상태 화재를 통한 정량적 수치들의 신뢰도를 확보하기 위하여 동일 조건에서 다수의 반복적 실험이 요구되며, 특정 물리량에 대해서는 화재현상의 본질적 특성으로 인하여 정상상태 구간에서 시간 평균에 따른 표준편차가 실험 측정법의 불확실도보다 클 수 있다는 한계를 갖고 있다.¹²⁾

구획화재의 비정상특성에 관한 선행연구로서 Senegirev 등¹³⁾은 환기부족화재에서 화원과 출입구의 거리변화를 통해 연료유량에 따른 출화(出火)시간을 측정하였으며, Makhviladze 등¹⁴⁾은 연료종류, 화원의 위치, 구획형상 및 환기면적 등 보다 다양한 조건에서 출화시간 및 비정상 화염거동을 검토하였다. Chen 등¹⁵⁾은 고온 상층부의 온도 상승율과 플래시오버 개시의 상관관계를 검토하였다. 이외의 많은 연구자들^{16,17)} 역시 중요시되는 비정상 화재특성으로서 출화되기까지의 화염거동과 플래시오버의 개시를 예측하기 위한 연구들을 수행하였다. 그러나 화재성장을 동반하는 환기부족화재에서 구획 내부의 열 및 화학적특성에 관한 비정상거동에 관한 연구는 거의 수행되지 않았다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 개방된 화재에 비해 보다 위험도가 높을 수 있는 반밀폐된 구획화재를 대상으로, 지속적 화재성장으로 인한 구획 내부의 비정상 열 및 화학적특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 출입구의 폭이 축소된 실규모 ISO 9705 표준화재실을 이용하여 발열량, 온도, 열유속 및 연소생성물의 농도에 대한 실시간 측정이 이루어졌으며, 총괄 당량비의 개념을 이용하여 구획 내부의 열 및 화학적특성을 분석하였다.

2. 실험 및 분석방법

2.1 실험방법 및 조건

실규모 구획화재 실험을 위하여 Figure 1과 같이 2.4 m × 2.4 m × 3.6 m의 크기를 갖는 ISO 9705 표준화재실이 제작되었다. 표준화재실의 출입구는 0.8 m(폭) × 2.0 m(높이)이지만, 반밀폐된 구획에서의 화재특성을 검토하기 위하여 출입구의 폭은 0.1 m로 수정되었다. 연료로는 연료특성이 잘 알려져 있고 적정량의 그을음이 발생하며 가솔린과 유사한 연소열을 갖는 헵탄(C₇H₁₆)이 선택되었다. 분무노즐(spray nozzle) 및 팬(pan)을 이용

하여 화원을 형성하였으며, 방출되는 연료의 양을 제어하여 화재 발열량을 조절하였다. 0.5 m²의 팬은 구획 바닥의 중앙에 위치되었으며, 90°의 분사각을 갖는 분무 노즐은 팬으로부터 0.25 m 위에 설치되었다.

발열량의 측정을 위하여 미국 표준기술연구소(NIST)의 화재 실험동에 설치된 6 m × 6 m 정사각형 후드를 가진 산소소모 열량계가 사용되었다. 구획 내부의 온도, 연소생성물의 농도를 측정하기 위하여 Figure 1에서와 같이 고온 상층부의 두 위치에서 0.5 mm의 비드 직경을 갖는 R-type 열전대와 샘플링 탐침(sampling probe)이 각각 설치되었다. 채취된 연소가스에 대하여 산소 농도는 상자성(paramagnetic) 분석기, 일산화탄소 및 이산화탄소의 농도는 NDIR(non-dispersive infrared) 분석기, 그리고 미연 탄화수소의 농도는 FID(flame ionization detector)를 이용하여 측정되었다. 모든 화학종의 농도는 수분이 제거된 건기준(dry-basis)에서 측정되었으며, 향후 수치계산과의 검증을 위하여 습기준(wet-basis)으로 변환되었다. 천정과 바닥에 각각 3개의 열유속계(total heat flux gauge)가 설치되었으며, 수직 방향의 온도분포를 확인하기 위하여 두 개의 K-type 열전대 tree가 사용되었다. 보다 자세한 실험장치, 방법 및 각 측정에 대한 불확실도(uncertainty)는 NIST TN 1603¹²⁾에서 확인될 수 있다.

2.2 총괄 당량비와 연소효율의 개념

총괄 당량비(Global equivalence ratio, GER)는 연료의 질량유량 \dot{m}_f 과 공기의 질량유량 \dot{m}_a 의 관계로부터 다음과 같이 표현된다.

$$GER = (r_s/Y_{O_2,a}) \times \dot{m}_f/\dot{m}_a \tag{1}$$

여기서 $r_s(\approx 3.52)$ 는 이론 산소-연료의 질량비이며, $Y_{O_2,a}$ 는 주위 공기류에 포함된 O₂의 질량분율(≈ 0.233)을 의미한다. 출입부를 통해 유입되는 \dot{m}_a 의 정확한 측정은 어렵기 때문에, 본 연구에서는 출입구의 형상에 근거하여 계산되는 최대 공기 유입량에 관한 경험식(2)를 통해 예측되었다.

$$\dot{m}_a = 0.52A_o\sqrt{h_o} \tag{2}$$

여기서 A_o 와 h_o 는 출입구의 면적과 높이를 의미한다. 유사한 화재조건의 모델링을 통해 식(2)의 타당성을 평가한 결과,¹⁾ 위 경험식은 과환기 및 환기부족화재에 대해 각각 약 4%와 2%의 과다예측을 보이며, 총괄 당량비의 정량적 산출에 큰 문제가 없음을 확인하였다.

구획 내의 비정상 총괄 당량비를 산출하기 위한 식(1)의 활용 시 \dot{m}_f 의 선정에는 다소 주의가 요구된다.

첫째, 분무노즐을 통해 공급된 연료의 질량유량은 MFM(mass flow meter)로부터 측정될 수 있으며, 이를 통해 이론적 당량비가 예측될 수 있다. 그러나 분무된 액체 연료가 순간적으로 기화되더라도 반응에 참여하지 못할 수 있어 구획 내부의 총괄 당량비는 실제보다 과다예측 될 수 있다. 둘째, 산소소모 열량계로부터 측정된 발열량과 연료 질량당 연소열의 관계로부터 실제 반응에 참여한 \dot{m}_f 를 얻을 수 있다. 이 두가지 방법의 차이는 결과부분에서 논의될 것이다.

연소효율(combustion efficiency, CE)은 완전 연소에서의 이론 발열량에 대한 화재에서의 실제 발열량의 비로서 다음과 같이 정의된다.

$$CE = \Delta H_c/\Delta H_{c,ideal} \tag{3}$$

여기서, ΔH_c 는 실제 화학반응을 통해 배출되는 연소열(heat of combustion)이며, $\Delta H_{c,ideal}$ 은 완전 연소조건에서 연소열을 의미한다. 총괄 연소효율을 구하기 위하여 ΔH_c 에는 산소소모열량계에 의해 측정된 발열량이 사용되었다.¹⁸⁾ 또한 $\Delta H_{c,ideal}$ 는 연료 질량당 이론연소열(kJ/kg)과 \dot{m}_f (kg/s)의 곱으로 표현되었다. 반면에 국부 연소효율에서 식(3)의 이론 연소열($\Delta H_{c,ideal}$)은 연료 C_xH_yO_z에 대해 다음 식을 통해 계산될 수 있다.

$$\Delta H_{c,ideal} = x\Delta_f H_{CO_2}^o + \frac{y}{2}\Delta_f H_{H_2O}^o - \Delta_f H_{fuel}^o \tag{4}$$

여기서 $\Delta_f H^o$ 는 표준상태(298.15 K, 1 atm)에서의 생성열(formation enthalpy)을 의미한다. 실제 연소열(ΔH_c)는 다음 식을 통해 계산되었다.

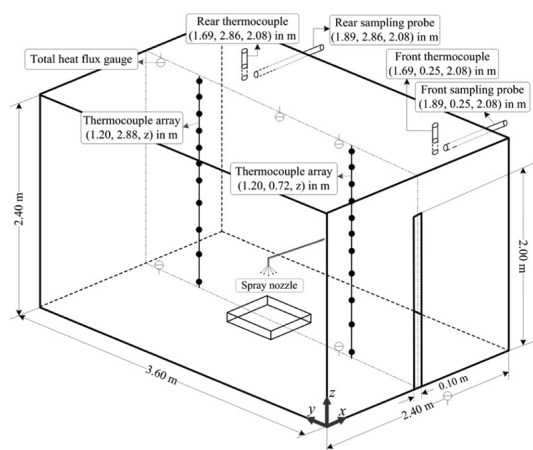


Figure 1. Perspective views of the ISO 9705 room and location of measurements.

$$\Delta H_c = b\Delta_f H_{CO_2}^0 + c\Delta_f H_{CO}^0 + d\Delta_f H_{CH_4}^0 + e\Delta_f H_{H_2O}^0 - \Delta_f H_{fuel}^0 \quad (5)$$

위 식에서 계수 b, c, d 및 e는 Figure 1에서와 같이 구획의 고온 상층부에서 측정된 연소생성물의 체적분율(X_i)의 값에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$b = xX_{CO_2}/(X_{CO_2} + X_{CO} + X_{UHC}) \quad (6)$$

$$c = xX_{CO}/(X_{CO_2} + X_{CO} + X_{UHC}) \quad (7)$$

$$d = xX_{UHC}/(X_{CO_2} + X_{CO} + X_{UHC}) \quad (8)$$

$$e = y/2 - 2d \quad (9)$$

여기서 미연탄화수소(UHC)는 측정과정에서 CH_4 로 환산되기 때문에 CH_4 의 값으로 대체되었다.

3. 결과 및 검토

발열량 변화에 따른 화재거동을 검토하기 위하여 Figure 2는 시간에 따른 연료유량, 이론 발열량 및 측정된 발열량을 도시한 결과이다. 펌프 및 유량계를 통해 제어된 연료유량은 약 2,200 s의 시간동안 선형적으로 증가되었으며, 이론 발열량을 기준으로 약 2.0 MW (측정 발열량 기준으로 약 1.5 MW)까지 증가되었다. 인위적인 화재성장을 모사하기 위한 위 조건은 NFPA (92B 또는 72)에서 분류되는 비정상 화재성장곡선($\dot{Q} = \alpha t^2$)을 통해 검토해보면, 매우 느린(slow) 성장을 갖는 화재로 분류된다. 화재성장속도에 따라 화재의 비정상 특성은 변화될 것으로 예측되지만, 화재 거동의 민감도에 비해 낮은 측정 반응도가 요구되는 구획 내부의 열 및 화학적특성을 검토하기 위한 위 조건의 선택은 적절한 것으로 판단된다. 그림에서 $t = 500$ s 이후 불완

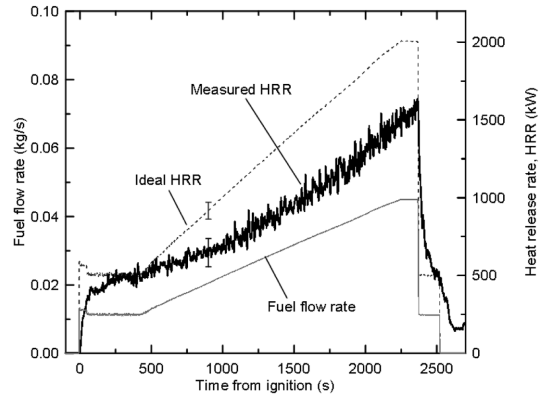


Figure 2. Fuel flow rate and heat release rate as a function of time.

전연소의 지속적인 증가로 인하여 이론과 측정 발열량의 차이는 점차적으로 증가되다가 약 $t = 1,300$ s 이후에는 차이의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있다. 위 결과는 가연 연료의 공급량이 시간에 따라 증가되더라도 특정 시간 이후에는 연소효율의 큰 변화가 없을 수 있음을 암시한다.

Figure 3은 구획 외부에서 촬영된 시간 증가에 따른 순간적인 화염사진을 나타낸 것이다. 초기 $t = 250$ s에서는 구획 내에서 모든 연소가 이루어지는 과환기화재에 해당되며, $t = 750$ s 근처에는 구획 내부의 산소부족으로 인하여 부분적인 반응이 구획 외부에서 이루어지고 있음을 볼 수 있다. $t = 1250$ s에서는 보다 많은 연료가 구획 외부에서 반응하는 뚜렷한 출화현상을 관찰할 수 있으며, 시간 증가에 따른 연료의 증가로 인하여 이후 시간에서는 외부 화염의 크기 및 발광도가 점차적으로 증가되는 현상을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 직접촬영 이미지로는 화재의 전반적인 특성뿐만

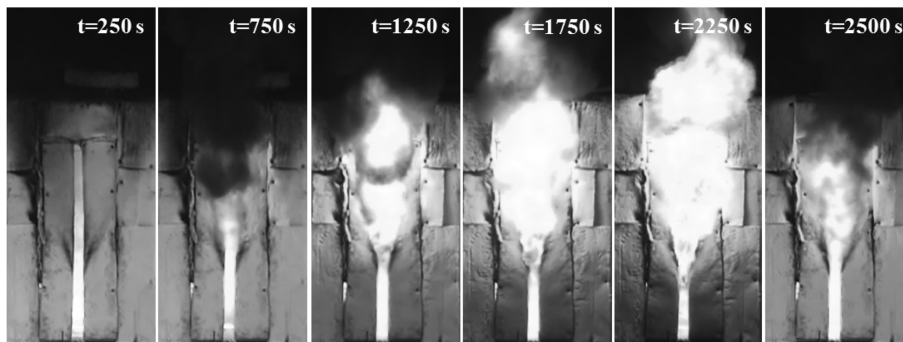


Figure 3. Temporal images of compartment fire (doorway width is 0.1 m).

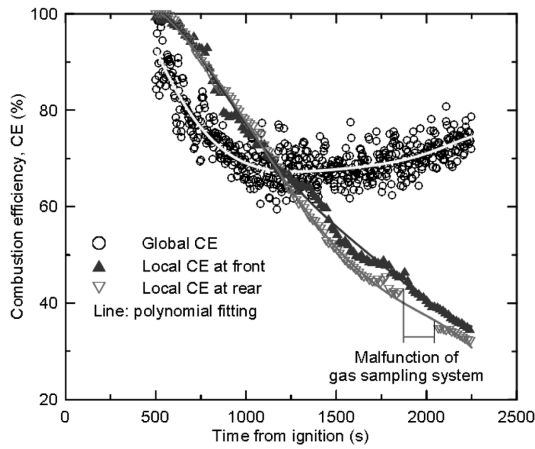


Figure 4. Global and local combustion efficiencies as a function of time.

아니라 구획 내부의 화재특성을 정량적으로 논하기에는 한계가 있다.

Figure 4는 시간에 따른 총괄 및 국부 연소효율을 도시한 것이다. 우선 총괄 연소효율은 점화 이후 점차적으로 감소하다가 약 $t = 1,250$ s 근처에서 큰 변화가 없음을 볼 수 있다. 반면에 고온 상층부 앞(출입구 근처) 및 뒷부분(구획 안쪽)에서 측정된 화학종의 농도를 통해 산출된 국부 연소효율은 Figure 2를 통해 확인되었듯이 이론 및 실제 발열량이 같아지는 $t = 500$ s에서 100%를 갖다가 시간에 따라 지속적으로 감소되어, $t = 2,200$ s에서는 약 30%의 연소효율을 갖게 된다. 발열량이 증가되는 조건에서 총괄 및 국부 연소효율의 매우 상이한 거동은 선행연구¹⁹⁾에서 확인되었듯이, 구획 외부에서 이루어지는 연소반응의 존재로부터 해석될 수 있다. 즉, 국부 연소효율은 구획 내부에서 이루어지는 연소반응만을 고려하는 반면에, 총괄 연소효율은 구획 내·외부에서 진행되는 모든 연소반응에 의한 발열량을 고려하기 때문이다. 결과적으로 시간에 따른 구획 내부의 당량비는 지속적으로 증가되어 연소효율은 감소되더라도 불완전 연료성분은 구획 외부에서 추가적으로 반응되기 때문에 Figure 2에서도 확인되었듯이 $t = 1,250$ s 이후에는 이론 및 측정 발열량의 차이에 큰 변화가 발생되지 않는다. 추가로 $t = 1,250$ s 이전에서는 국부 연소효율이 총괄 연소효율보다 높은 값을 갖는데 이에 대한 원인은 두가지로 추측될 수 있다. 첫째, 과산화화재에서 구획 내부의 열 및 화학종 농도의 불균일한 분포를 통해, 고온 상층부의 국부 위치에서 측정된 화학종의 농도는 구획 내부의 전체적인 반응특

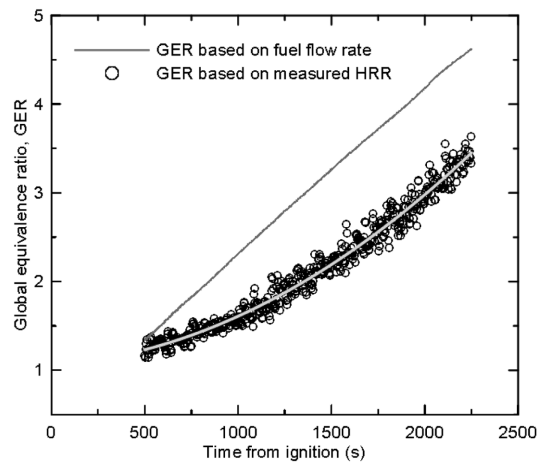


Figure 5. Global equivalence ratios based on fuel flow rate and measured HRR as a function of time.

성을 대표할 수 없다. 둘째, 실제 국부 발열량의 측정에 사용되는 CO 및 미연탄화수소의 농도는 과산화조건에서는 매우 작은 값으로, 본 측정기의 측정범위에서 감지되지 못할 가능성이 있다. 그 결과 실제현상보다 완전연소에 가까운 결과를 갖게 되어 총괄 연소효율보다 높은 값을 갖게 된다. 이들에 대한 보다 명확한 원인은 보다 정밀한 측정을 통해 향후 검토되어야 할 것으로 판단된다.

연소효율과 더불어 구획 내부의 전반적 화재거동을 나타내는 총괄 당량비는 Figure 5에 도시되었다. 실험 방법에서 언급되었듯이, 총괄 당량비의 산출과정에서 적용되는 연료의 질량유량은 공급된 유량과 실제 반응에 참여한 유량(산소소모열량계에서 측정된 발열량 기준)으로 분리되어 표현되었다. 그 결과 연료유량을 기준으로 산출된 총괄 당량비는 시간에 따라 선형적으로 증가하지만, 측정 발열량을 기준으로 산출된 총괄 당량비는 Figure 2의 실제 발열량과 유사한 형태의 비정상특성을 갖게 된다. 또한 Figures 2와 4에서 언급되었듯이 $t = 1,250$ s 근처에서 두 총괄 당량비들의 차이는 큰 변화가 존재하지 않는다.

구획 내부의 열적특성을 논하기 이전에, 발열량 증가에 따른 연소생성물 농도를 살펴보기 위하여, Figure 6은 시간 증가에 따라 고온 상층부 앞부분에서 측정된 화학종의 몰분율을 도시한 것이다. 그림에서 심볼은 각 화학종의 측정농도의 신뢰도를 검증하기 위하여, 간헐적으로 GC(gas chromatograph)을 이용한 동시 측정 결과이다. 점화 이후 약 $t = 600$ s까지 O_2 는 점차적으로 감소되며, CO_2 는 증가된다. 그러나 $t = 600$ s 이후 구획

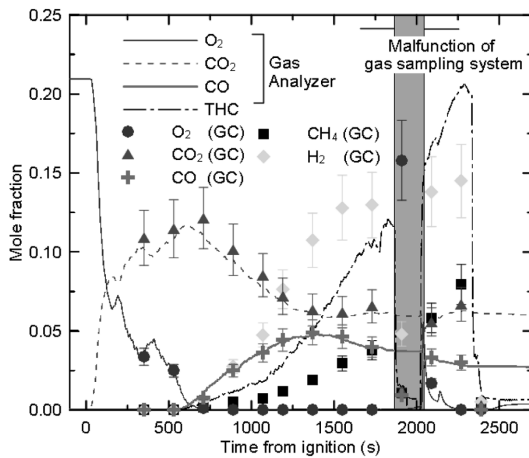


Figure 6. Mole fractions of major species measured at the front sampling probe location as a function of time.

내의 산소부족으로 인하여 CO_2 는 감소되며 동시에 CO , H_2 및 미연탄화수소(THC)의 생성이 개시되고 있음을 알 수 있다. 즉, 약 $t=600$ s를 기준으로 과환기화재에서 환기부족화재로 전환되고 있음을 짐작할 수 있다. 약 $t=1,250$ s 이후에 CO_2 의 농도는 비교적 균일한 반면에, CO 의 농도는 오히려 감소되는 결과를 볼 수 있다. 반면에 H_2 및 THC 와 같은 불완전연소 생성물은 시간에 따라 지속적으로 증가된다. 구획화재의 인명안전 측면에서 가장 중요하게 인식되는 CO 의 농도는 일반적으로 불완전연소에 의해 발생 및 증가된다고 인식되고 있다. 그러나 그림에서 확인되듯이 연료가 매우 과농한(fuel-rich) 조건에서는 CO 의 농도는 오히려 감소하게 된다. 이러한 결과는 H_2 및 THC 와는 달리 CO 의 복잡한 생성특성과 관련된 것으로 판단되며, CO 의 생성개시, 증가 및 최대 그리고 감소와 같은 정성적 및 정량적 판단을 위한 조건 도출은 화재안전 측면에서 매우 중요하다.

반밀폐된 구획화재의 화학적특성을 검토하기 위하여 Figure 7은 Figure 6의 결과를 이용하여 총괄 당량비에 따른 주요 연소생성물의 물분율을 도시한 것이다. x축에 적용되는 총괄 당량비는 연료유량(이론적 발열량)을 기준으로 하는 총괄 당량비와 측정 발열량을 기준으로 하는 총괄 당량비의 개념으로 구분되어 표현되었다. 이론적 개념의 총괄 당량비를 이용한 Figure 7(a)를 살펴보면, 당량비 2.0 근처에서 O_2 는 모두 소모되었으며, 당량비 3.0을 이하에서는 당량비 증가에 따라 CO_2 는 감소하며 CO , H_2 및 CH_4 는 증가됨을 알 수 있다. 그러나 당량비 3.0 이상에서 CO_2 의 변화는 크기

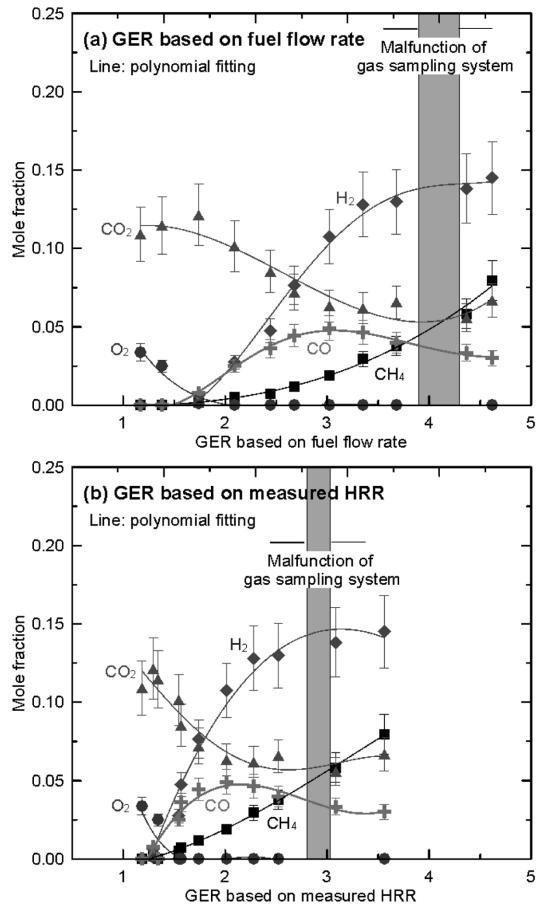


Figure 7. Mole fractions of major species measured at the front sampling probe location as a function of GER based on fuel flow rate and measured HRR.

않으며, CO 는 점차적으로 감소됨을 알 수 있다. 반면에 실제 발열량을 기준으로 예측된 총괄 당량비가 적용된 Figure 7(b)를 살펴보면, O_2 는 당량비 1.5 근처에서 모두 소모되었으며, CO 의 최대값은 당량비 2.0에서 발생되고 있음을 볼 수 있다. 즉 이론과 실제 발열량을 기준으로 산출된 총괄 당량비는 CO 최대 발생기준으로 볼 때 당량비 3.0과 2.0의 큰 차이를 보이고 있다. 엄밀한 의미에서 이론 당량비는 구획 내부의 실제 총괄 당량비보다 과다 예측된 값이며, 구획 외부에서의 반응까지 포함된 측정 발열량을 통해 예측된 총괄 당량비는 실제 총괄 당량비를 과소 예측된 값이다. 그 결과 반밀폐된 구획화재에서 CO 의 최대값이 발생하는 조건은 총괄 당량비 2.0~3.0 사이에 존재함을 짐작할 수 있다.

반밀폐된 구획화재에서 H_2 및 CH_4 와는 달리 CO의 생성은 단순한 불완전연소에 의해 증가되는 것이 아니며, CO가 생성 및 전달되는 과정에서 다양한 조건들의 영향을 받게 된다. 즉, 온도, 연료/공기/연소생성물의 상대적 농도, 압력 그리고 체류시간을 포함한 난류 유동조건 등이 CO 생성에 중요한 인자라 할 수 있다. 헵탄 연료의 산화과정을 모사할 수 있는 상세반응기구(detailed reaction mechanism) 및 PSR(Perfectly Stirred Reactor)²⁰를 이용하여 넓은 범위의 반응기의 온도, 농도, 체류시간 및 외부로의 열손실 등에 따른 CO의 생성특성을 살펴보면, 당량비 2.0~3.0의 범위에서 CO는 최대값을 보이게 된다. 이들에 관한 연구결과는 향후 보고될 것이다.

반밀폐된 구획화재의 열적특성을 검토하기 위하여 Figures 8과 9는 구획 내부의 온도와 열유속을 도시한

것이다. 먼저 Figure 8은 측정된 발열량을 기준으로 예측된 총괄 당량비에 따른 구획 내부의 열전대 tree(Figure 1 참조)에서의 측정된 온도를 나타낸 것이다. 그림에서 TF 및 TR은 각각 앞부분 및 뒷부분 열전대를 의미하며, 이후에 따라오는 숫자는 바닥면으로부터의 높이(cm)를 나타낸다. 구획 내 앞부분의 수직 온도분포를 나타내는 Figure 8(a)를 살펴보면, 높이 0.3 m 이상에서는 온도가 거의 동일함을 볼 수 있다. 총괄 당량비 1.5까지는 완만하게 증가되다가 최대값을 갖은 후에 총괄 당량비 2.0 이후에서는 점차적으로 감소되는 경향을 확인할 수 있다. 반면에 높이 0.03 m 근처의 바닥에서는 총괄 당량비(전형적인 발열량 증가의 조건에서는 시간의 개념과 동일)의 증가에 따라 점차적으로 온도가 상승하며, 화재가 종료되는 시점(총괄 당량비 3.5)에는 상부의 온도와 유사한 값을 갖게 된다. 화재모델링을 통

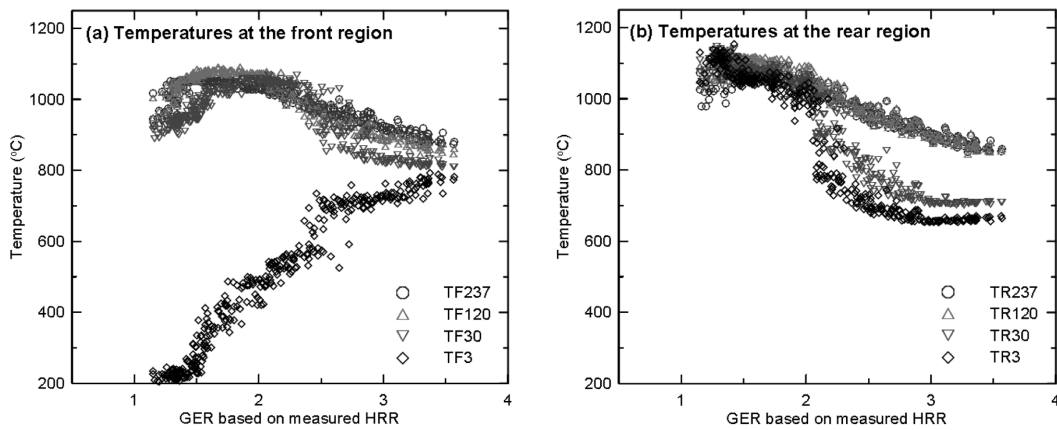


Figure 8. Temperatures measured at front and rear thermocouple arrays as a function of GER based on measured HRR.

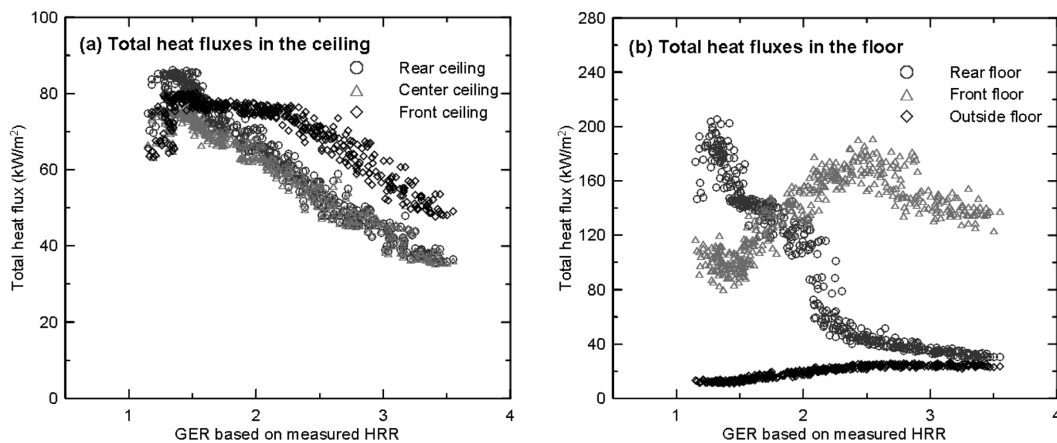


Figure 9. Total heat fluxes measured in the ceiling and floor as a function of GER based on measured HRR.

한 환기부족화재의 다차원 거동해석⁹⁾에서 확인되었듯이, 반밀폐된 구획에서 발생하는 환기부족화재의 경우에는 화원과 출입구간의 바닥면을 제외하고는 대부분 유사한 온도분포를 갖게 된다. 그러나 시간이 증가되어 구획 내부의 연소조건이 반응을 유지하지 못할 정도의 높은 당량비에 도달하게 되면, 출입구 근처 바닥면에서 위치하던 부분적인 반응대도 구획 외부로 이동한다. 결과적으로 출입구 근처의 부분적인 반응에 의해 생성된 고온 생성물이 구획 내부로의 재순환을 통해 구획 내부는 모두 유사한 온도분포를 갖게 된다.

구획 바닥의 중앙에 위치한 화원과 뒷부분 벽면 사이에 위치한 열전대의 수직 온도분포를 살펴보면(Figure 8(b)), 모든 위치에서 시간에 따른 유사한 온도변화를 보인다. 그러나 상부(1.2 m 이상)와 하부(0.30 m 이하)는 정량적으로 큰 차이를 갖는다. 이는 선행연구⁹⁾에서 확인되었듯이, 환기부족화재의 발생은 구획 내부의 반시계방향의 재순환영역을 생성시키며, 출입구의 고온 생성물이 천정을 지나 구획 뒷면에서 바닥면으로 향하게 된다. 이러한 과정에서 발생하는 외부로의 열손실로 인하여 구획 뒷부분에서 하부의 온도는 상부에 비해 다소 낮은 값을 갖게 된다. 이러한 온도 차이는 CO의 최대값이 발생하는 총괄 당량비 2.0(Figure 7(b) 참조)에서 보다 큰 차이를 보이게 된다.

Figure 9는 구획 천정 및 바닥면에서의 열유속 값을 도시한 것이다. 측정된 열유속은 대류 및 복사에 의해 유입되는 모든 열유속의 합(total heat flux)을 나타낸다. 천정에서의 열유속 분포(Figure 9(a))를 살펴보면, 앞부분의 약간 높은 열유속을 제외하고 총괄 당량비의 증가에 따라 모든 위치에서 점차적으로 감소되는 결과를 확인할 수 있다. 시간에 따라 단조로운 감소경향을 보이는 천정에서와는 달리 부분적인 반응대가 존재하며 새로운 공기의 유입이 존재하는 바닥면에서는 보다 복잡한 열유속 변화가 예상된다. Figure 9(b)에서 볼 수 있듯이, 구획 뒷부분의 바닥면에서는 시간에 따라 열유속이 점차적으로 감소된다. 그러나 앞부분에서의 열유속은 총괄 당량비 2.5까지 증가하다가 이후에 감소되는 다른 현상을 보이고 있다. 이러한 결과는 발열량이 증가되는 조건에서 화재의 비정상거동을 통해 해석될 수 있다. 즉, 시간(총괄 당량비)의 증가에 따라 구획 내부로 유입되는 공기와 외부로 배출되는 배기가스의 경계층은 점차 바닥면으로 이동하게 된다. 그 결과 버너의 앞부분에서 시작되는 화염면의 위치가 점차적으로 아래방향을 향하게 되어 바닥면에서 전달되는 열유속은 증가하게 된다. 그러나 총괄 당량비 2.5 이상에서는 감소된 공기량으로 인하여 버너 앞부분에서 화염

의 기점(base)이 안정화되지 못하고 출입구 쪽으로 이동하게 되어 열유속계가 설치된 위치에서 화염면은 출입구 쪽으로 점점 멀어짐을 예측할 수 있다. 마지막으로 구획 외부 바닥면에서의 열유속을 살펴보면, 시간에 따라 점차적으로 증가되지만 그 절대값은 구획 내부에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 즉 시간 증가에 따라 외부로 배출되는 화염면으로부터의 복사열전달은 증가되더라도, 측정 위치가 구획 내부로 유입되는 공기 유동 내에 있음을 고려할 때, 대류 열손실이 매우 크게 작용되고 있음을 예측할 수 있다.

위 결과로부터 반밀폐된 구획에서 지속적 화재성장을 갖는 비정상 화재거동은 총괄 당량비 개념의 도입을 통해, 구획 내의 열 및 화학적특성이 물리적으로 명료하게 설명될 수 있음을 확인하였다. 또한 정상상태의 화재에서 발견되지 않은 구획 내의 열 및 화학적특성을 확인할 수 있었으며, 이는 실질적 화재현상의 물리적 해석을 위한 중요한 판단 기준으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

플래시오버의 도달시간 단축을 감소시킬 수 있는 반밀폐된 구획화재를 대상으로 지속적 화재성장으로 인한 구획 내부의 비정상 열 및 화학적특성에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 이를 위해 출입구의 폭이 0.1 m로 수정된 실규모 ISO 9705 표준화재실과 연료량 제어를 위한 분무노즐이 사용되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 2 MW까지의 지속적인 연료 공급량 증가를 통한 화재성장의 조건에서, 총괄 연소효율과 구획 내부의 국부 연소효율은 매우 상이한 결과를 보인다. 또한 총괄 당량비의 예측을 위한 이론 발열량과 측정 발열량의 적용에 따른 환기부족 화재의 특성 차이점을 비교 검토하였다.

(2) 이론 발열량(연료량) 및 측정된 발열량을 통해 예측된 각각의 총괄 당량비는 구획화재의 화학적 특성에 대한 정량적 및 정성적 판단기준의 상·하 경계를 제공한다. 또한 총괄 당량비의 개념을 통해 구획 내부의 온도 및 열유속과 같은 비정상 열적특성이 정량적 및 정성적으로 표현될 수 있었다.

(3) 구획 내부의 CO의 농도는 총괄 당량비 2.0~3.0의 범위에서 최대값을 보이며, 보다 과농한 조건에서 점차적으로 감소되는 현상을 발견하였다. 대표적 불완전 연소생성물인 H₂, CH₄와는 다른 생성특성을 보이며, CO의 생성에 영향을 줄 수 있는 다양한 인자들에

대한 상세한 해석은 향후 보고될 예정이다.

(4) 마지막으로 본 연구를 통해 얻어진 반 밀폐된 실 규모 구획화재의 비정상적 실험 데이터는 성능위주소 방설계를 포함한 실질적 화재안전에 유용한 화재모델링의 검증 데이터로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. C.H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson, and G.H. Ko, "Effects of Fuel Location and Distribution on Full-scale Underventilated Compartment Fires", *J. Fire Sci.*, Vol.29, pp.21-52(2011).
2. I.R. Thomas, K.A. Moinuddin, and I.D. Bennetts, "The Effect of Quantity and Location on Small Enclosure Fires", *J. Fire Protect. Eng.*, Vol.17, pp.85-102(2007).
3. R. Kumar and M. Naveen, "An Experimental Fire in Compartment with Dual Vent on Opposite Walls", *Combust. Sci. and Tech.*, Vol.179, pp.1527-1547(2007).
4. J.Q. Quintiere, W.J. Rinkinen, and W.W. Jones, "The Effect of Room Opening on Fire Plume Entrainment", *Comb. Sci. Technol.*, Vol.26, pp.193-201(1981).
5. H.Y. Wang, "Numerical Study of Underventilated Fires in Medium-scale Enclosure", *Building and Environment*, Vol.44, pp.1215-1227(2009).
6. Y. Utiskul, J.G. Quintiere, A.S. Rangwala, B.A. Ringwelski, K. Wakatsuki, and T. Naruse, "Compartment Fire Phenomena Under Limited Ventilation", *Fire Safety J.*, Vol.40, pp.367-390(2005).
7. C.H. Hwang, C.H. Park, G.H. Ko, and A. Lock, "Effects of Ventilation Condition on the Fire Characteristics in Compartment Fires (Part I: Performance Estimation of FDS)", *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol.24, No.3, pp.131-138(2010).
8. C.H. Hwang, C.H. Park, G.H. Ko, and A. Lock, "An Experimental Study on Relationship Between Global Equivalence Ratio and Fire Characteristics in Full-Scale Compartment Fires", *J. of Korean Society of Combust.*, Vol.15, No.3, pp.32-39(2010).
9. J.H. Kim, G.H. Ko, C.H. Park, and C.H. Hwang, "Effects of Ventilation Condition on the Fire Characteristics in Compartment Fires (Part II: Multi-dimensional Fire Dynamics)", *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol.24, No.5, pp.32-38(2010).
10. M. Bundy, A. Hamins, E.L. Johnsson, S.C. Kim, G.H. Ko, and D. Lenhert, "Measurement of Heat and Combustion Products in Reduced-scale Ventilation-limited Compartment Fires", NIST Technical Note 1483, NIST, Gaithersburg, MD(2007).
11. J.E. Floyd and K.B. McGrattan, "Extending the Mixture Fraction Concept to Address Underventilated Fires", *Fire Safety J.*, Vol.44, pp.291-300(2009).
12. A. Lock, M. Bundy, E.L. Johnsson, A. Hamins, G.H. Ko, C.H. Hwang, P. Fuss, and R. Harris, "Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Distribution, and Vent Size on Full-scale Underventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room", NIST TN 1603, NIST, Gaithersburg, MD (2008).
13. A.Y. Snegirev, G.M. Makhviladze, V.A. Talalov, and A.V. Shamshin, "Turbulent Diffusion Combustion Under Conditions of Limited Ventilation: Flame Projection through an Opening", *Combust. Expl. & Shock Waves*, Vol.39, No.1, pp.1-10(2003).
14. M. Makhviladze, A.V. Shamshin, S.E. Yakush, and A.P. Zykov, "Experimental and Numerical Study of Transient Compartment Fires", *Combust. Expl. & Shock Waves*, Vol.42, No.6, pp.723-730 (2006).
15. A. Chen, J. Francis, X. Dong, and W. Chen, "An Experimental Study of the Rate of Gas Temperature Rise in Enclosure Fires", *Fire Safety J.*, Vol.46, pp.397-405(2011).
16. V. Novozhilov, "Nonlinear Dynamical Model of Compartment Fire Flashover", *J. Eng. Math.*, Vol.67, pp.387-400(2010).
17. S.R. Bishop and D.D. Drysdale, "Fires in Compartments: The Phenomenon of Flashover", *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol.356, pp.2855-2872 (1998).
18. R.A. Bryant, T.J. Ohlemiller, E.L. Johnsson, A. Hamins, B.S. Grove, W.F. Guthrie, A. Maranghides, and G.W. Mulholland, "The NIST 3 Megawatt Quantitative Heat Release Rate Facility - Description and Procedure", NIST 7052, NIST, Gaithersburg, MD(2004).
19. G.H. Ko, C.H. Park, C.H. Hwang, and S.H. Park, "A Study on the Combustion Efficiency Concept in Under-ventilated Compartment Fires", *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol.24, No.6, pp.145-152(2010).
20. P. Glarborg, R.J. Kee, J.F. Grear, and J.A. Miller, "PSR: A Fortran Program for Modelling Well-stirred Reactors", Sandia Report No. SAND86-8209, Sandia National Laboratories, NM, Albuquerque(1986).