

환기 조건에 따른 화재거동 연구

김 성 찬[†] · Anthony Hamins^{*}

(2007년 12월 24일 접수, 2008년 3월 5일 심사완료)

On the Fire Behavior Due to the Ventilation Condition in the Fire Compartment

Sung Chan Kim and Anthony Hamins

Key Words : Compartment Fire (구획화재), Fire Behavior(화재거동), Under Ventilated Fire (환기부족 화재), Heat Release Rate (발열량)

Abstract

A series of fire experiments has been conducted to provide an improved understanding of the fire structure of under-ventilated compartment fires. A comprehensive and quantitative assessment of gaseous species from the fire was made in the upper layer of fire in a 40 % reduced scale ISO 9705 fire compartment. The global equivalence ratio (GER) concept was used to characterize the fire behavior for various fire sizes, fuel types and ventilation conditions. The oxygen concentration in the upper layer reached to zero near the global equivalence ratio of 0.4~0.6 while the carbon monoxide concentration increases with increasing the global equivalence ratio. Classification parameters of ISO19706 were also compared with the reduced scale experimental data for under ventilation fire.

기호설명

A_o : 출입구 면적 [m²]
 H_o : 출입구 높이 [m]
 ΔH_c : 연소열 [kJ/kg]
 MW : 분자량 [g/mol]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/s]
 Q : 발열량 [kW]
 X : 체적분율 [mol/mol]
 α : 화학적 평창계수
 ϕ : 산소소모계수
 γ_{st} : stoichiometry 공기연료비

Φ : 총괄당량비
 f : 연료
 a : 공기

1. 서론

화재공간 내부의 화재거동은 주변 외기의 환기 상태에 따라 크게 영향을 받게 된다. 일반적으로 외부에서 유입되는 공기의 양은 화원특성에 관계 없이 개구부의 기하학 적인 형상에 의존하는 것으로 알려져 있다. Fig. 1(a)에서 보는 바와 같이, 상대적으로 화원의 크기가 작은 화재발생 초기단계의 경우 화재실 내부 및 외부로부터의 공기공급에 의해 증발된 연료가 거의 완전 연소가 되는 적정 환기 화재(well ventilated fire)가 된다. 그러나 화재실 내부의 열적 피드백(heat feedback)이 증가하여 화원의 발열량이 지속적으로 상승하는 경우 화재

[†] 책임저자, 회원, 경일대학교 소방방재학부
 E-mail : chanfire@naver.com
 TEL : (053)850-7592 FAX : (053)850-7584

^{*} Building and Fire Research Lab., NIST

실 내부는 Fig. 1(b)와 같이, 화원에서 발생한 연료를 완전 연소시키기에는 공기의 양이 부족한 환기 부족(under-ventilated)상태가 된다. 이때 화원으로부터 생성된 연료가스는 화재실 상층부에서 타지 않은 연료(unburned fuel) 형태로 존재하게 된다.

이러한 화재실 내부의 가연 가스 연료의 존재는 최성기 화재(flashover), 역화(backdraft), 화재폭발(fireball) 등과 같은 화염으로 인한 열적피해뿐만 아니라 불완전 연소과정 중에 발생하는 유독가스인 일산화탄소(CO), 염화수소(HCl), 시안화수소(HCN)등으로 인한 질식이나 다량의 매연(soot)으로 인하여 거주자들의 가시거리 감소를 유발하여 많은 인명피해를 야기하게 된다. 이러한 유독가스(toxic gases)에 대한 예측은 화재 위험도를 평가하는데 있어서 주요 변수로 인식되고 있으며 실제로 대부분의 화재 인명피해가 이러한 유독가스에 의한 질식과 관련이 있다.^(1,2) 대부분의 유독가스 생성은 타는 연료와 화재 조건, 즉 화재실내의 환기 조건에 의존하게 되는데 다른 유독가스에 비해 일산화탄소의 경우 화재실 내의 환기상태에 매우 민감한 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 일반적으로 화재실내의 환기상태에 대한 평가는 당량비(equivalence ratio)나 CO/CO₂ 비에 의해 적정환기상태(well ventilated)인지 환기부족(under-ventilated)상태인지의 여부를 파악하고 있다.⁽⁴⁾ 일반적으로 당량비가 1보다 크거나, CO/CO₂ 비가 0.1~0.4 정도인 경우 환기부족 화재단계로 정의하고 있으며 그 외에 화재실로부터 유출되는 산소의 농도가 5% 이하이거나 상층부의 온도는 600 °C 이상이면 환기부족화재로 구분하고 있다.⁽⁵⁾ 그러나 화재조건에 대한 정의는 다양한 실험적 검증이 부족한 상태이며 설정 값에 대한 애매모호함이 있고 실제 공간화재의 경우 화재의 결과와 다소 차이가 있다.⁽⁶⁾ 따라서 환기 조건에 따른, 특히 환기부족상태의 화재거동 및 연소가스 생성에 관한 이해는 화재시 인적피해를 최소화하는 최적의 배연시스템 설계뿐만 아니라 화재공간 내의 연소특성을 이해하는 기초적 연구로 매우 중요하다.

본 연구에서는 화재 공간 내에서 당량비에 따른 연소가스의 생성을 실험적으로 파악하여 환기부족화재에 대한 화재거동을 이해하고 환기적정화재와 환기부족화재를 구분하기 위한 설정 조건을 측정된 실험결과를 통하여 검토하고자 한다. 이러한 실험자료를 바탕으로 관련분야의 응용연구를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.



(a) Well ventilated fire

(b) Under ventilated fire

Fig. 1 Photographs of fire behavior for different ventilation condition in a compartment

2. 실험

2.1 화재실 및 화원

Fig. 2 는 실험에 사용된 화재실의 주요 치수 및 측정위치를 나타내고 있다. 화재 공간의 크기는 ISO-9705 표준화재실의 40% 축소 모형으로써 길이 1.46 m, 폭 0.98 m, 높이 0.98 m 이며 표준 출입구의 크기는 폭 0.48 m, 높이 0.81 m 이다. 본 연구에서는 외부에서 유입되는 외기의 영향을 파악하기 위하여 표준 출입구 폭을 절반으로 줄인 0.24 m 인 경우에 대한 추가적인 실험을 수행하였다. 환기 부족화재의 경우 화재실내부 온도가 최고 1000 °C 이상 유지되기 때문에 화재실을 지지하고 변형을 최소화 하기 위하여 강철 프레임을 제작하였으며 프레임 내부는 내화재료인 마그네슘 보드와 마리아이트(marinate) 보드를 혼용하였다.

화원은 화재의 크기에 상관없이 화재실의 중앙부에 위치하고 사용된 연료는 메탄(methane), 헵탄(heptane), 폴리스티렌(polystyrene) 고형분(pellets)을 이용하였다. 메탄과 헵탄 화재의 면적은 각 변의 길이가 25 cm 인 정사각형 버너와 풀(pool)을 각각 이용하였으며 헵탄 풀 화재의 경우 외부에서 지속적으로 연료를 공급하여 연료의 표면적과 깊이를 일정하게 유지하였다. 폴리스티렌 화재의 경우 직경이 22 cm, 40 cm, 60 cm 인 원형 팬에 폴리스티렌 고형분을 채운 후 파일럿 점화(pilot ignition)을 통해 초기 발화를 유도하였다.

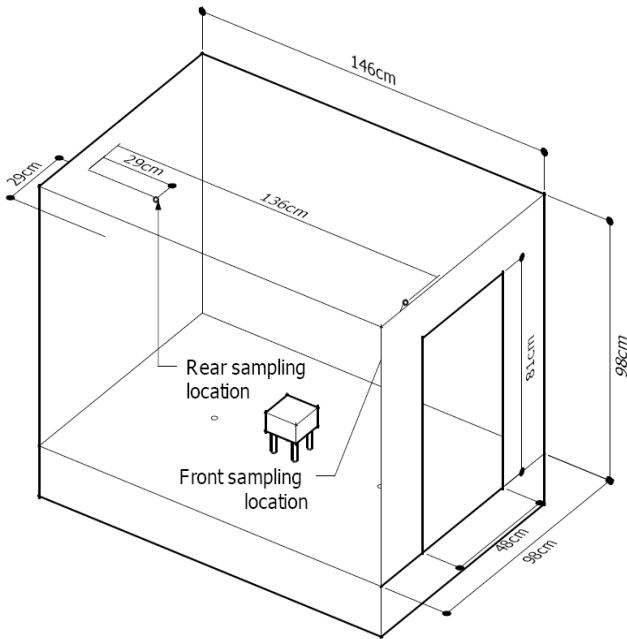


Fig. 2 Schematic of the reduced scale ISO 9705 fire compartment

2.2 화재 측정

환기 조건에 따른 연소생성물의 거동을 파악하기 위하여 화재실 상층부의 2 군데 위치에서 연소가스의 농도 및 온도를 측정하였다. 출입구에 인접한 전면부 측정위치는 출입구 벽에서 10 cm, 측면 벽에서 29 cm, 천정아래 10 cm 지점이고 후면부 측정위치는 뒤쪽 벽에서 29 cm, 측면 벽에서 29 cm, 천정아래 10 cm 지점의 가스 농도를 분석하였다. 산소 농도의 측정은 상자성 산소 분석기(para-magnetic oxygen analyzer)를 이용하였고 이산화탄소와 일산화탄소의 농도는 비분산 적외선 가스 분석기(NDIR gas analyzer)에 의해 측정된다. 측정위치에서의 수집된 연소가스는 1 단계로 드라이아이스와 유리비드, 2 단계로 열음용기와 유리섬유 필터를 통과하며 수분과 불순물을 제거하고 2.3 L/min의 유량으로 각각의 가스 분석기로 공급된다. 연소가스의 온도는 외부 복사열전달의 영향을 최소화하기 위해 이중 차폐관을 가진 흡입식 열전대(aspiration thermocouple)를 이용하였으며 흡입유량은 25 L/min이다.⁽⁷⁾

주어진 화원에 대한 발열량 측정은 한 변의 길이가 3 m인 정사각형 후드를 가진 산소소모 열량계에 의해 측정되며 측정가능 최대 발열량은 약 1 MW 정도이다. 발열량은 배기 덕트에서의 배기가스의 질량유량과 농도에 의해 산정되는 산소소모 법(oxygen consumption principle)에 의해 계산된다.⁽⁸⁾

Table 1 Summary of the fire source and doorway

Fuel	nominal heat release rate	doorway size
Methane	75, 180, 270, 400 kW	full doorway (w=0.48m)
Methane	75, 180, 270, 400 kW	half doorway (w=0.24m)
Heptane	150, 380 kW	full doorway (w=0.48m)
Heptane	140, 220 kW	half doorway (w=0.24m)
polystyrene	15, 70, 360 kW	full doorway (w=0.48m)

$$Q = (\Delta H_{C,O_2}) \phi \frac{\dot{m}_e}{1 + \phi(\alpha - 1)} (1 - X_{H_2O}^o) X_{O_2}^o \frac{MW_{O_2}}{MW_{air}} \quad (1)$$

여기서 $\Delta H_{C,O_2}$ 는 산소의 연소열, ϕ 는 산소소모 계수, \dot{m}_e 는 배기덕트의 질량유량, α 는 화학적 팽창계수, 하첨자 o는 외기상태를 각각 나타낸다. 배기덕트의 질량유량은 덕트내 평균유속과 평균온도를 측정하여 산정되고 산소소모 계수(oxygen depletion factor)는 다음과 같이 측정된 연소가스의 농도에 의해 계산된다.⁽⁹⁾

$$\phi = \frac{X_{O_2}^o \cdot (1 - X_{CO_2} - X_{CO}) - X_{O_2} \cdot (1 - X_{CO_2}^o)}{(1 - X_{O_2} - X_{CO_2} - X_{CO}) \cdot X_{O_2}^o} \quad (2)$$

측정 불확실성은 연료의 화학적, 열적 물성을 알고 있는 경우 약 14%, 목재나 복합 재료와 같이 연료의 물성을 정확하게 파악하기 힘든 경우 약 20% 정도의 측정 오차를 가지게 된다.⁽¹⁰⁾ 본 실험에서 사용된 연료는 화학적, 물리적 물성이 비교적 잘 알려져 있기 때문에 측정오차는 약 14% 정도이다. Table 1은 실험에 사용된 연료, 발열량 및 출입구 크기를 요약하여 나타낸다.

3. 결과

환기조건에 따른 화재거동 특성은 화재공간 내부의 산소농도에 의해 크게 영향을 받게 된다. 환기량이 충분한 경우 화재실의 상층부에는 연소생성물과 함께 일정량의 산소가 존재하게 된다. 그러나 화재실의 상층부에서 연소 반응이 진행 중이거나 화원에서 공급된 연료에 비해 환기량이 부족하여 불완전 연소반응 상태가 되면 상층부에 공급된 연료와 연소생성물의 농도증가로 인하여 산소 농도는 급격히 감소하게 된다.

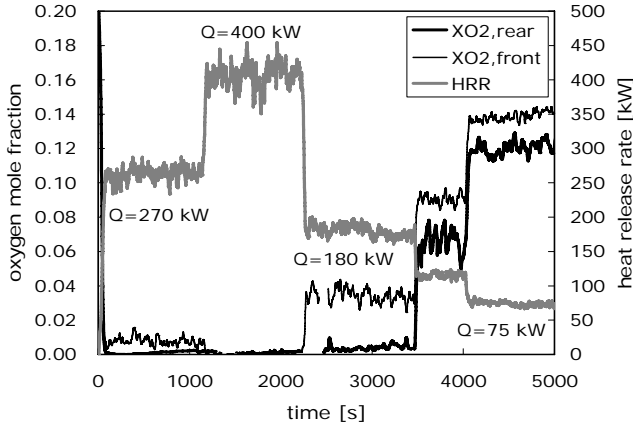


Fig. 3 Time history of oxygen mole fraction for methane gas fire at upper layer of the fire compartment

Fig. 3 은 출입구의 폭이 0.24 m 인 반쪽 출입구 조건에 대한 메탄 가스화재의 발열량 변화에 따른 화재실의 전면 및 후면부에서의 산소농도를 나타내고 있다. 후면 상층부에서는 180 kW 이상 화재에서 산소농도가 1 % 이하로 나타났으며 발열량이 125 kW 와 75 kW 에서 산소농도는 약 6 % 와 12 % 로써 발열량 감소에 따라 산소농도는 증가함을 보여준다. 전면부의 경우 산소농도는 270 kW 의 경우 약 1% 정도이고 발열량 감소함에 따라 상층부의 산소농도는 급격히 증가하여 75 kW 인 경우 약 14 % 정도를 나타낸다. 전체적으로 화재실의 후면 부에서의 산소농도가 전면부에 비해 상대적으로 낮게 나타난다. 이는 출입구를 통한 산소유입이 상대적으로 활발하기 때문인 것으로 판단된다.

일반적으로 화재실 내부의 연소상태는 화원의 크기, 연료의 종류, 출입구의 크기 등에 의해 직접적인 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 총괄당량비(GER, global equivalence ratio, Φ) 개념을 이용하여 화재실내에 연료와 공기의 비를 정의한다.⁽¹¹⁾

$$\Phi = \frac{(\dot{m}_f / \dot{m}_a)}{\gamma_{st,f}} \quad (3)$$

여기서 \dot{m}_f 는 연료의 연소량, \dot{m}_a 는 화재실로 유입되는 유입공기의 양, γ_{st} 는 stoichiometry 연료-공기 비를 나타낸다. 연료의 연소량과 유입공기의 양은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{m}_f = \frac{Q}{\Delta H_{C,f}} \quad (4)$$

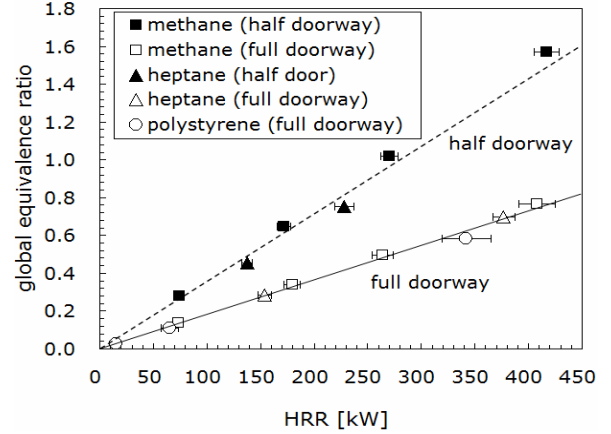


Fig. 4 Global equivalence ratio as a function of heat release rate for various fuels and ventilation conditions

$$\dot{m}_a = KA_o \sqrt{H_o} \quad (5)$$

여기서, Q 는 발열량, $\Delta H_{C,f}$ 는 연료의 연소열, A_o 는 출입구의 단면적, H_o 는 출입구의 높이를 나타낸다. K 는 경험상수로써 화재의 크기와 출입구의 기하학적인 형태에 따라 달라질 수 있으나 본 연구에서는 최대 유입공기량에 대한 0.52 를 이용하여 총괄당량비를 계산하였다.⁽¹¹⁾

Fig. 4 는 출입구의 크기 및 발열량 변화에 따른 화재실 내부의 총괄당량비를 나타낸다. 화재실 내부의 총괄당량비는 연료 종류에 크게 의존하지 않고 발열량 증가에 따라 선형적으로 증가하며 외부로부터의 환기조건, 즉 출입구의 기하학적 조건에 따라 크게 의존함을 보여준다. 이러한 경향을 수식적으로 파악해보면,

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \gamma_{st,a} = \frac{\dot{m}_f \gamma_{st,O_2}}{\dot{m}_a Y_{O_2,a}} \quad (6)$$

γ_{st,O_2} 와 $\gamma_{st,a}$ 는 stoichiometry 산소-연료 비와 공기-연료 비를 각각 나타내고 $Y_{O_2,a}$ 는 공기 중 산소의 질량분율이다. 연소반응 중 소모된 산소의 질량당 에너지 방출량(E)은 다음과 같이 정의된다.⁽¹²⁾

$$E = \frac{\Delta H_{C,f}}{\gamma_{st,O_2}} \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} \frac{\Delta H_{C,f}}{E \cdot Y_{O_2,a}} = \frac{Q}{\dot{m}_a \cdot E \cdot Y_{O_2,a}} \quad (8)$$

탄화수소계 연료에 대하여 E 는 약 13100 kJ/kg ^(8,11)의 값을 가지고 $Y_{O_2,a}$ 는 일정하기 때문에 총괄당량비는 발열량과 유입조건에 의해 결정됨을 알 수 있다.

Fig. 5 는 총괄당량비에 대한 화재실 상층부에서 준 정상상태에서의 평균산소농도를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 총괄당량비가 증가할수록 상층부 산소농도는 감소하고 연료에 따라 다소 차이가 있지만 총괄당량비가 약 0.4 ~ 0.6 사이에서 상층부의 산소 농도는 거의 0 이 된다. 환기량이 충분한 경우, 화재의 발열량이 증가함에 따라 화원에서 생성된 연소생성물이 상층부를 형성하기 때문에 상층부의 산소 농도는 지속적으로 감소한다.

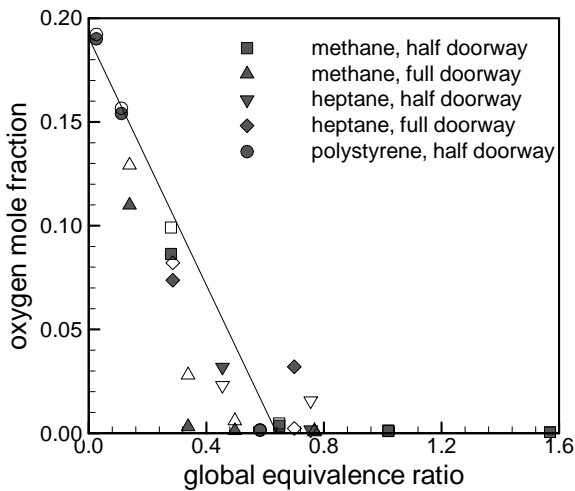


Fig. 5 Mean oxygen mole fraction of quasi-steady state for global equivalence ratio in the upper layer (solid symbols: rear, hollow symbols: front)

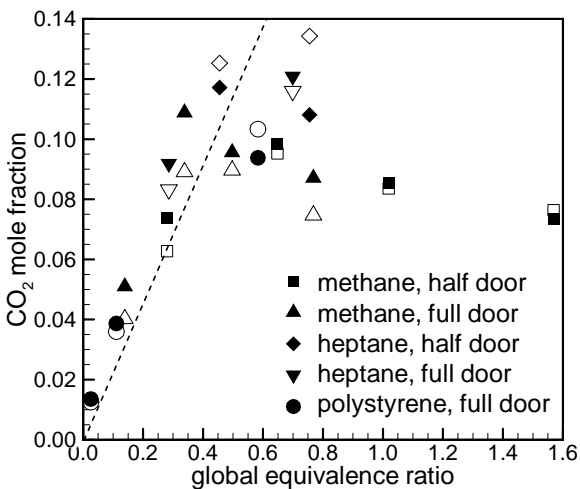


Fig. 6 Mean carbon dioxide mole fraction of quasi-steady state for global equivalence ratio in the upper layer (solid symbols: rear, hollow symbols: front)

발열량이 지속적으로 증가하여 환기부족상태가 되면 유입공기에 비해 연료의 공급이 과도하게 많아지게 되고 상층부에서 산소 부족으로 인한 불완전 연소반응이 발생하여 산소공급이 원활한 출입구 근처나 하층부의 경계에서 활발한 연소반응이 일어난다.

Fig. 6 은 총괄당량비에 따른 화재실 상층부에서의 평균 이산화탄소의 농도를 나타낸다. 총괄당량비가 약 0.4 이하에서는 총괄당량비가 증가함에 따라 상층부에서의 이산화탄소 농도는 선형적으로 증가한다. 그러나 총괄당량비가 0.4-0.6 이상에서는 기존의 다른 연구결과⁽⁶⁾와 마찬가지로 이산화탄소의 농도가 더 이상 증가하지 않고 일정하거나 오히려 감소하는 경향을 보인다. 이는 상층부에서 산소부족으로 인하여 연소반응이 활발하지 않기 때문에 이산화탄소의 생성이 제한적이고 오히려 발열량 증가에 따른 연료농도의 증가 및 불완전연소로 인한 일산화탄소의 증가로 인하여 이산화탄소의 상대적인 농도가 감소하는 것으로 판단된다.

Fig. 7 은 폴리스틸렌 화재에 대하여 측정된 발열량에 대한 상층부에서 일산화 탄소 농도와 관계를 나타낸다. 환기량이 충분한 경우 일산화 탄소의 농도는 발열량에 대해 거의 선형적인 관계로 증가하게 되는데 화원의 크기가 22 cm 인 경우 준 정상상태에서 상층부의 일산화 탄소 농도는 약 0.1 % 이하로 나타났다. 화원의 직경이 40 cm 인 경우 준 정상 상태에서의 일산화탄소 농도는 약 0.2 % 정도를 나타내고 발열량 증가에 따른 일산화탄소 생성물은 22 cm 화원과 유사한 경향을 나타냈다.

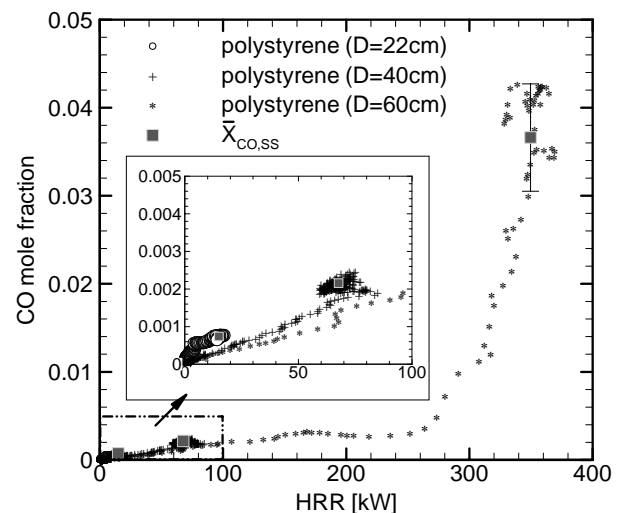


Fig. 7 Relation between CO mole fraction and HRR for polystyrene fires with full doorway

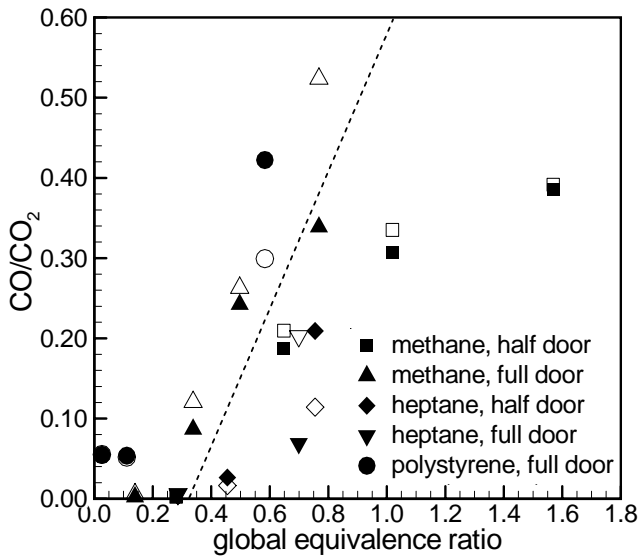


Fig. 8 Mean CO/CO₂ ratio of quasi-steady state for global equivalence ratio in the upper layer (solid symbols: rear, hollow symbols: front)

화원의 직경이 60 cm 인 경우 발열량이 약 160 kW 정도까지는 다른 크기의 화원과 마찬가지로 일산화탄소 농도가 선형적으로 증가하지만 이후 260 kW 정도까지는 0.4% 정도로 일정하게 유지된다. 발열량이 260 kW 혹은 총괄당량비가 0.4를 초과하면 일산화탄소의 생성량은 급격히 증가하고 준 정상상태인 360 kW 정도에서 일산화탄소의 농도는 약 4%까지 상승한다.

일반적으로 이산화 탄소에 대한 일산화 탄소의 비는 주어진 화재상태에 대하여 독성 가스의 생성을 나타내는 중요한 기준으로 사용된다. Fig. 8은 총괄 당량비에 따른 화재실 상층부의 준 정상상태에서의 CO/CO₂ 비를 나타낸다. 폴리스틸렌이나 PVC 등과 같은 물질은 환기량이 충분한 경우에도 높은 일산화탄소 생성률을 보이는 것으로 알려져 있는데⁽¹³⁾ 본 연구에서도 환기량이 충분한 경우에 있어서도 화재실의 상층부에서 CO/CO₂ 비가 약 5% 이상을 나타내고 있다. 전체적으로 연료의 종류에 관계없이 총괄당량비가 0.4 정도에서 10% 정도를 나타내고 발열량 증가에 따라 꾸준히 증가함을 보여준다. 총괄당량비 증가에 따른 CO/CO₂ 비는 가스계 연료인 메탄화재에서 상대적으로 낮고 헵탄과 폴리스틸렌 화재에서 상대적으로 높게 나타났다. 메탄 화재를 제외하고는 총괄당량비가 1보다 작은 값에서 CO/CO₂의 비가 0.4를 초과하였다. Figure 9는 준 정상상태에서의 출입구 방향의 상층부에서 측정된 평균온도를 나타낸다.

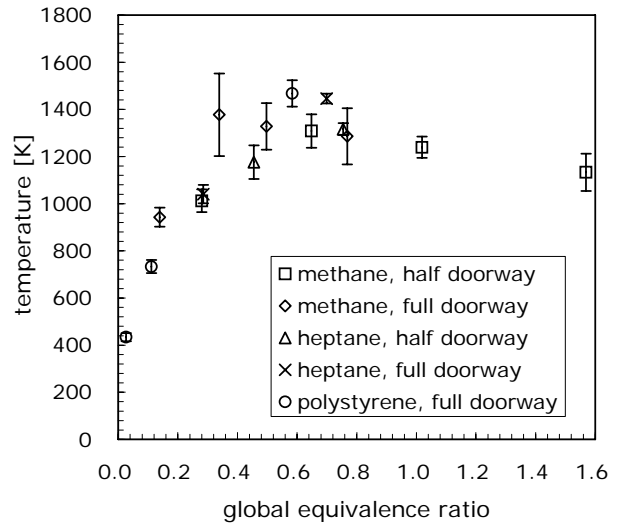


Fig. 9 Mean temperature of quasi-steady state for global equivalence ratio in the upper layer

총괄당량비가 약 0.4~0.6 사이에서 평균온도는 약 1400 K 정도에 도달하고 발열량이 증가하여 총괄당량비가 증가하면 오히려 상층부의 온도는 감소하는 경향을 보여준다. 높은 총괄당량비 상태에서는 산소의 농도가 상대적으로 낮고 연료가 과잉 공급된 상태이기 때문에 화재실의 상층부는 불완전 연소반응 상태가 되어 상층부에서의 온도는 감소하는 경향을 보인다.

본 연구결과를 요약하면 총괄당량비가 약 0.4~0.6 사이에서 상층부의 산소농도는 거의 0에 도달하고 이산화탄소의 생성 및 상층부 온도가 최대가 된다. 또한 CO/CO₂의 농도 비는 총괄당량비가 0.3~0.6 사이에서 급격히 증가하는 경향을 보인다. 따라서 환기부족 화재의 기준이 본 연구에서는 총괄당량비를 기준으로 0.4~0.6 이상에서 화재실 내부는 환기부족상태에 도달하게 됨을 파악할 수 있다. 이러한 결과를 ISO의 환기부족화재에 대한 분류 기준과 비교해보면 ISO 기준은 환기부족화재에 대해 CO/CO₂ 농도 비는 비교적 타당한 범위 값을 가지고 있으나 상층부의 온도는 지나치게 낮고 당량비는 과도하게 설정하고 있는 경향을 보인다.

4. 결 론

본 연구는 화재실 내부의 환기조건에 따른 연소가스 생성에 관한 물리적 이해를 도모하고 환기부족 화재에 대한 기준조건을 검토하기 위하여 모형 실험을 통해 화재실내부의 연소 특성을

분석하였다. 실험을 통해 얻은 결론은 아래와 같이 요약된다.

(1) 총괄당량비를 이용하여 화재실내부의 환기 상태를 파악하였으며 연료에 따라 다소 차이는 있지만 총괄 당량비가 0.4~0.6 정도에서 상층부 산소 농도는 거의 0 이 된다. 또한 상층부에서의 이산화탄소 농도는 총괄당량비가 약 0.4 이하에서는 총괄당량비의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하고 총괄당량비가 약 0.4~0.6 이상인 경우 화재실 내부는 불완전 연소상태가 되어 이산화탄소의 농도는 크게 증가하지 않고 일정하거나 오히려 감소하는 경향을 보인다.

(2) 화재실의 상층부 평균 온도는 총괄당량비가 약 0.4~0.6 정도에서 최대 약 1400 K 까지 상승하고 이후 당량비 증가에 따라 환기부족상태가 되면 화재실 상층부의 온도는 감소하는 경향을 보인다.

(3) 본 실험결과와 ISO 의 환기부족화재에 대한 분류 기준을 비교해보면 환기부족화재에 대해 ISO 기준은 CO/CO₂ 농도 비에 대해서는 비교적 타당한 기준 값을 제공하고 있으나 상층부의 온도나 당량비에 대해서는 다소 차이를 보이고 있다. 따라서 이러한 구획화재에 대한 많은 실험 자료를 기반으로 하여 환기부족화재에 대한 보다 타당한 설정 기준을 제공해야 할 것으로 판단된다.

본 축소 모형실험은 환기특성에 따른 제한된 공간 내에서 연소생성물의 특성을 파악하기 위한 연구로써 실제규모의 실험과의 비교검증을 통하여 상사관계를 파악할 필요가 있다. 이러한 연구를 통하여 환기조건에 따른 화재 특성을 이해하고 수치 해석이나 관련 연구를 위한 기초자료를 제공하고 자 한다.

참고문헌

- (1) Hull, T. R., Quinn, R. E., Areri I. G and Purser D. A. 2002., "Combustion Toxicity of Fire Retarded EVA," *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 77. No. 2, pp. 235~242.
- (2) Purser, D. A., 2002, "Toxicity Assessment of Combustion Products," SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition.
- (3) Hull, T. R., Lebek, K., Pezzani, M. and Messa, S., 2007. "Comparison of Toxic Product Yields of Burning Cables in Bench and Large-scale Experiments," *Fire Safety Journal*, In Press.
- (4) Hull, T. R. and Paul, K. T., 2007. "Bench-scale Assessment of Combustion Toxicity – A Critical Analysis of Current Protocols," *Fire Safety Journal*, Vol. 42, No. 5. pp. 340~365.
- (5) ISO TS 19706, 2004, Guidelines for Assessing the Fire Threat to People.
- (6) Pitts, W. M., 1995, "The Global Equivalence Ratio Concept and Formation Mechanisms of Carbon Monoxide in Enclosure Fires," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 21, No. 3, pp. 197~237.
- (7) Kim, S. C., Hamins, A., Bundy, M., Johnsson, E. R., and Ko, G. H., 2007, "Analysis of Thermocouple Behavior in Compartment Fire," Proceeding of 7th Aisa-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, AOSFST, Vol. 1.
- (8) Bryant, R. A., Ohlemiller, T. J., Johnsson, E. L., Hamins, A., Grove, B. S., Guthrie W. F., Maranghides, A. and Mulholland, G., 2003, "NIST 3Megawatt Quantitative Heat Release Rate Facility," NIST, SP 1007, Gaithersburg, MD.
- (9) Parker, W. J., 1984, "Calculations of the Heat Release Rate by Oxygen Consumption for Various Applications," *Journal of Fire Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 380~395.
- (10) Bundy, Matthew, Maranghides, A., Johnsson, R., Kim, S. C. and DeLauter, L., 2007, "Heat Release Uncertainty in the NIST Large Fire Facility," NIST Annual Fire Conference, Gaithersburg, MD.
- (11) Drysdale, D., 1998, "An Introduction to Fire Dynamics," 2nd Edition, Wiley, UK.
- (12) Gottuk, D. T. and Lattimer, B. Y., "Effect of Combustion Conditions on Species Production," SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition.
- (13) Andersson, P., Rossel, L., Simonson, M, and Emanuelsson, V., 2004, "Small and Large Scale Fire Experiments with Electric Cables Under Well-ventilated and Vitiated Conditions," *Fire Technology*, Vol. 40, pp. 247~62.