D-7

구획화재에서 연소효율 개념에 대한 실험적 고찰

황철홍 · 박충화 · 고권현*· 박설현** · 김종현***
대전대학교 소방방재학과, 동양대학교 건축소방행정학과*
한국항공우주연구원 우주과학팀**, 한국승강기대학 승강기메카트로닉스과***

An Experimental Study on the Combustion Efficiency Concept in Compartment Fires

Cheol-Hong Hwang · Chung-Hwa Park · Gwon Hyun Ko*
Suel-Hyun Park** · Jong-Hyun Kim***
Dept. of Fire & Disaster Prevention, Daejeon University
Dept. of Architectural Fire Administration, Dongyang University*
Center for Space Application, KARI**
Lift Mechatronics Dept., Korea Lift College***

요 약

실제 규모 ISO 9705 표준 화재실에서 액체연료를 대상으로 연소효율 개념에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 특히 구획 외부에서 측정되는 총괄연소효율과 구획 내부의 고온 상층부에서 측정된 국부연소효율 개념을 비교·검토하였다. 주요 결과로서, 총괄연소효율은 총괄당량비 증가에 따라 비교적 선형적인 감소경향을 보였다. 반면에 국부연소효율은 총괄당량비가 증가함에 따라 2차 곡선의 형태로 크게 감소됨을 확인하였다. 위 결과를 통해 국부연소효율에 대한 정보는 구획 내부의 화재현상을 이해하는데 유용한 변수임을 알 수 있었다. 또한 국부연소효율은 구획화재의 상사과정에서 중요한 변수로 사용될 수 있음을 논의하였다.

1. 서 론

화재공학에서의 연소효율은 가연물이 갖는 화학적 에너지와 연소반응을 통해 발생시킬 수 있는 열에너지(발열량)의 비율로 표현될 수 있다. 화재의 발열량을 측정하는 방법으로서 대부분의 탄화수소계 연료가 연소될 때 소모된 산소량에 대하여 일정량의 열이 발생된다는 가정이 적용된 산소소모 열량계가 가장 널리 사용되고 있다(Hugget, 1980). 그 결과 화재에서의 연소효율은 이론 발열량 (또는 연소열)과 배기 후드에서 측정된 발열량의 비를 통해 산출될 수 있다. 이러한 총괄연소효율(global combustion efficiency)은 화재의 전반적인 특성을 예측할 수 있으며, 불완전 연소의 척도로서 화재의 위험성을 평가하는 중요한 인자로 인식되고 있다. 그러나 모든 연료가 구획 내부에서 연소되는 과환기화재와는 달리 환기부족화재에서는 반응의 상당부분이 구획 외부에서 이루어지기 때문에 총괄연소효율을 통해 구획 내부의 화재 위험성을 평가하는 데는 많은 한계점을 갖고 있다. 즉 외부로 배출되는 일부의 미연탄화수소는 배기 후드에 도달하기 이전에 급격한 산화반응을

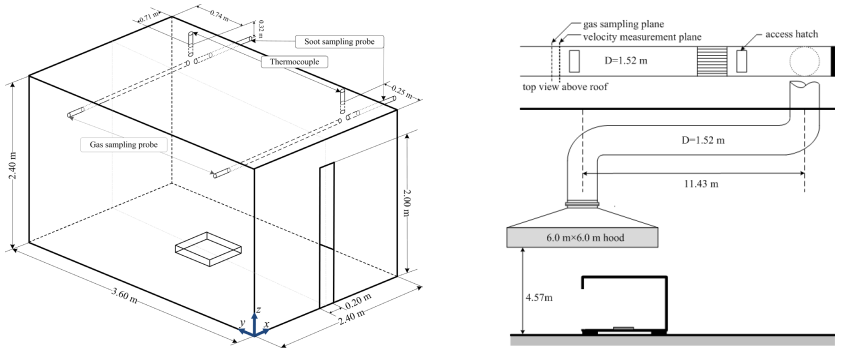
경험하게 된다. 그 결과 구획내부의 국부연소효율(local combustion efficiency)은 일반적인 총괄연소효율과 많은 차이를 보일 것으로 예상된다. 특히 선행연구를 통해 확인되었듯이 환기부족화재는 매우 복잡한 내부 유동구조를 갖고 있으며, 그 결과 산소 및 CO의 분포 역시 3차원적인 공간분포를 보이고 있다(Hwang et al., 2010). 따라서 구획 내부에서 측정된 국부연소효율은 환기부족화재의 내부구조를 이해하는데 매우 유용할 것으로 기대된다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 실제 규모의 ISO 9705 표준 화재실에서 넓은 범위의 이론 발열량을 갖는 액체연료를 대상으로 화재실험을 수행하였다. 이를 통해 화재의 전반적인 특성을 나타내는 총괄연소효율과 구획 내부에서 측정된 국부연소효율의 차이점을 확인하고, 국부연소효율이 갖는 물리적인 의미를 모색하고자 한다.

2. 실험 및 분석방법

실제 규모의 구획화재 실험을 위하여 그림 1(a)와 같이 0.2m×2.0m의 출입구를 갖는 ISO 9705 표준 화재실이 제작되었다. 연료는 다양한 연소열과 그을음 생성량을 갖도록 헵탄(C_7H_{16}), 톨루엔(C_7H_8) 그리고 이소프로판올(iso-propanol)의 3가지 액체연료가 사용되었다. 화원으로는 0.7m×0.7m의 정사각형 팬(pan)이 사용되었다. 발열량의 측정을 위하여 그림 1(b)와 같은 6m×6m 정사각형 후드를 가진 산소소모 열량계를 이용하였다(Bryant et al., 2004). 온도, 연소생성물 및 그을음의 농도는 그림 1(a)에서와 같이 고온 상층부의 두 지점에서 측정되었다. 보다 자세한 실험장치, 방법 및 각 측정에 대한 불확실도(uncertainty)는 NIST TN 1603 (Lock, et al., 2008)에서 확인될 수 있다.

일반적으로 연소효율은 완전 연소에서의 이론 발열량에 대한 화재에서의 실제 발열량의 비로서 $\triangle H_c/\triangle H_{c,ideal}$로 표현된다. 이때 ΔH_c는 실제 화학반응을 통해 배출되는 연소열이며, $\Delta H_{c,ideal}$은 완전 연소조건에서의 연소열이다. 총괄연소효율을 구하기 위하여 ΔH_c는 배기 후드의 산소소모열량계에 의해 측정된 실제 발열량으로 대체되었다. 또한 $\Delta H_{c,ideal}$는 단위 질량당 이론 연소열(kJ/kg)과 연료 소모율(kg/s)의 곱으로 표현되었다. 반면에 국부연소효율에 $\Delta H_{c,ideal}$은 양론화학반응식의 생성열을 통해 계산하였으며, ΔH_c는 구획 내부의 고온 상층부에서 측정된 각 화학종의 체적분율과 생성엔탈피를 통해 계산되었다.



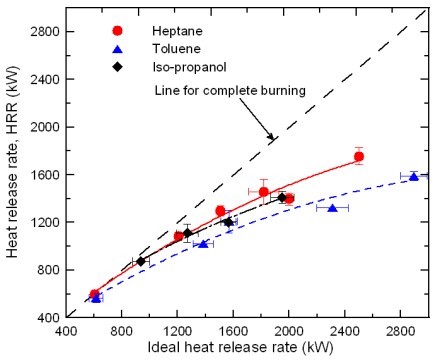
(a) ISO 9705 room (b) 6 m square hood and exhaust stack

그림 1. ISO 9705 표준 화재실과 배기 후드.

3. 결과 및 검토

그림 2는 이론 발열량과 산소소모 열량계에서 측정된 발열량을 비교한 것이다. 낮은 발열량 영역에서는 이론발열량과 측정발열량의 차이가 매우 작은 것을 볼 수 있다. 그러나 화재 크기가 증가함에 따라 두 발열량의 차이기 점차적으로 증가하고 있다.

그림 3은 이론발열량에 대한 실제발열량의 비로 정의되는 총괄연소효율을 총괄당량비의 함수로 나타낸 것이다. GER이 1.0보다 작은 과환기 조건에서 헵탄의 경우 거의 100 %의 연소효율을 보이고 있으며 이소프로판올의 경우도 약 93 %의 연소효율을 보여주고 있다. 그러나 모든 연료는 GER이 증가함에 따라 총괄연소효율은 거의 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다.



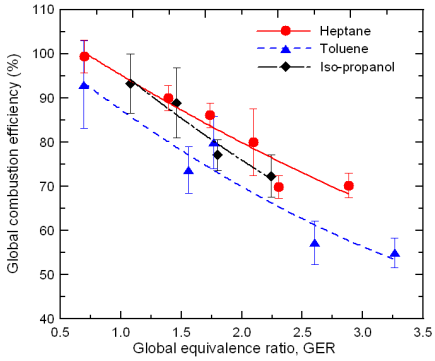


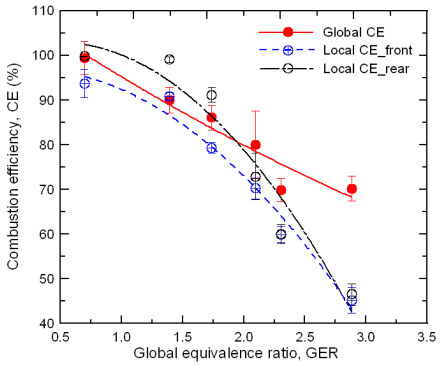
그림 2. 이론 발열량에 대한 측정 발열량. **그림 3. 총괄당량비에 대한 총괄연소효율.**

그림 4는 헵탄 화재에 대해 구획 내부의 고온 상층부에서 측정된 연소가스 농도를 바탕으로 계산된 국부연소효율을 총괄연소효율과 함께 나타내어 비교한 것이다. 국부연소효율도 총괄연소효율과 유사하게 GER이 1.0보다 작을 때는 100 %에 가까운 값을 보이다가 GER이 증가함에 따라 2차 함수의 형태로 급격히 감소하는 경향을 보여주고 있다. 즉, 국부연소효율이 구획 내부에서 이루어지고 있는 연소반응만을 반영하는 반면에 총괄연소효율은 구획 내·외부에서 진행되는 모든 연소반응에 의한 발열량을 고려하기 때문에 이러한 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

그림 5는 구획 내·외부에서 연소되는 양을 정량적으로 비교하기 위하여 전체의 발열량 중에서 구획 내부에서의 발열량의 비를 나타낸 구획 내부의 반응율을 나타낸 것이다. GER=2.0 이후부터 구획 내부 반응율의 비율이 급격히 감소하고 있는 것을 알 수 있으며 GER=2.8에서 65%의 값을 보이고 있다. 이것은 반응 연료의 35%가 구획 외부에서 연소하고 있다는 것을 의미한다. 위 결과로부터 국부연소효율과 총괄연소효율을 함께 분석함으로써 구획 내·외부의 연소특성에 대한 보다 구체적인 특성을 파악할 수 있다.

추가적으로 국부연소효율을 이용한 내부 반응비율은 구획화재의 상사(similarity) 과정에 매우 중요한 변수로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 구획화재의 상사는 구획 내부로의 공기 유입량과 총괄당량비를 기준으로 이루어지고 있다. 그러나 기존의 방법들은 환기부족화재에서 나타나는 내부와 외부에서의 반응 비율을

고려하지 못하기 때문에 구획 내부에서의 온도 및 CO의 생성량은 기존 상사방법으로는 예측되지 못하고 있다. 따라서 국부연소효율을 통한 내부 반응율의 추가적인 도입은 상사에 따른 구획화재 현상예측 정확도를 크게 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.



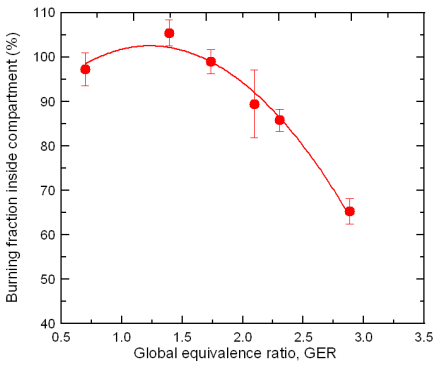


그림 4. 총괄당량비에 대한 국부연소효율. 그림 5. 총괄당량비에 대한 내부 반응비율.

4. 결 론

실규모 ISO 9705 표준 화재실에서 실험을 통해 총괄 연소효율과 구획 내부의 국부 연소효율 개념에 대한 비교 검토가 이루어졌다. 주요 결과는 다음과 같다.

모든 연료는 총괄당량비가 증가함에 따라 총괄연소효율은 선형적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 반면에 국부연소효율은 총괄당량비 증가에 따라 2차 함수의 곡선 형태로 급격하게 감소됨을 확인하였다. 이러한 차이는 국부연소효율은 구획 내부의 연소반응만을 고려하는 반면, 총괄연소효율은 구획 내·외부에서 진행되는 모든 연소반응을 고려하기 때문이다. 위 결과로 부터 국부연소효율을 통해 얻어진 구획 내부의 반응비율은 구획 내부의 연소특성을 보다 정확히 예측하는데 유용한 변수임을 확인하였다. 추가적으로 구획 내부에서의 온도 및 CO 등을 예측하기 위한 기존의 상사법의 문제점을 보완할 수 있는 중요한 변수가 될 수 있음을 논의하였다.

참고문헌

1. Huggett, C. (1980). "Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements" Fire Materials, Vol. 4, No. 2, pp. 61-65.
2. Hwang, C.H., Lock, A., Bundy, M., Johnsson, E., Ko, G.H. (2010). "Studies on Fire Characteristics in Over- and Underventilated Full-scale Compartments" J. Fire Sciences, Vol. 28, pp. 459-486.
3. Bryant R.A., Ohlemiller, T.J., Johnsson E.L., Hamins, A. Grove, B.S., Guthrie, W.F., Maranghides, A. Mulholland, G.W. (2004) "The NIST 3 Megawatt Quantitative Heat Release Rate Facility - Description and Procedure" NIST 7052, NIST.
4. Lock, A. Bundy, M. Johnsson, E.L. Hamins, A. Ko, G.H., Hwang, C.H., Fuss P. Harris, R. (2008). "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.