

## 실규모 구획화재의 연소가스에 대한 혼합분율 분석 Mixture Fraction Analysis on the Combustion Gases of the Full-Scale Compartment Fires

고권현<sup>†</sup> · 황철홍\*

Gwon Hyun Ko<sup>†</sup> · Cheol-Hong Hwang\*

동양대학교 건축소방행정학과, \*대전대학교 소방방재학과  
(2010. 8. 17. 접수/2010. 10. 8. 채택)

### 요 약

본 연구에서는 구획화재로부터 발생하는 화학종의 특성을 파악하기 위해서 혼합분율분석을 수행하였다. 메탄, 헵탄 그리고 톨루엔과 같은 탄화수소 연료들을 사용한 화재 실험이 ISO 9705 표준 화재실에서 수행되었으며 상층부의 두 지점에서 가스종 농도와 그을음(soot) 분율 등을 측정하였다. 미연탄화수소(UHC), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 산소(O<sub>2</sub>) 그리고 그을음 등의 측정된 화학종에 대한 질량분율을 혼합분율의 함수로 나타내었고, 탄화수소 연료의 이상적인 반응식에 기초한 상태 관계식과 비교 분석하였다. 혼합분율 분석은 다양한 화재 조건 및 측정 위치에서 얻은 수많은 측정데이터를 하나의 일관된 파라미터, 즉 혼합분율의 함으로 분류할 수 있게 하였다. 해석 결과를 통해 혼합분율 계산에 그을음을 고려하는 것이, 특히 헵탄이나 톨루엔과 같이 그을음 발생이 큰 연료의 경우 분석의 정확성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### ABSTRACT

In this study, a mixture fraction analysis was performed to investigate the characteristics of chemical species production in compartment fires burning hydrocarbon fuels such as methane, heptane, and toluene. A series of fire experiments was conducted in the ISO 9705 standard room, and gas species concentration and soot fraction were measured at two locations in the upper layer of the compartment. The mass fractions of measured chemical species, such as unburned hydrocarbons (UHC), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), oxygen (O<sub>2</sub>), and soot were presented as a function of mixture fraction and compared with state relationships based on the idealized reaction of hydrocarbon fuels. The mixture fraction analysis made it possible to rearrange hundreds of species measurements, which were done under various fire conditions and at two locations of the upper layer, in term of the unified parameter, i.e. the mixture fraction. The results also showed that inclusion of soot in the mixture fraction calculation could improve the performance of analysis, especially for the sooty fuels such as heptane and toluene.

**Key words :** ISO 9705 room, Under-ventilated fires, Mixture fraction, Carbon monoxide, Soot

### 1. 서 론

건축물 실내에서의 화재는 환기 조건에 따라 화염 위치, 화재실 내부 온도 분포, 연소가스 성분 등과 같은 주요 특성이 결정된다. 구획 화재가 충분히 성장하여 외부로부터 유입되는 공기의 양이 열적 피드백(thermal feedback)으로 인한 연료 증기(fuel vapor) 생

성량에 비해 적어지면 불완전연소가 진행되는데 이러한 상태의 화재를 흔히 환기부족 화재(under-ventilated fires), 혹은 환기제배형 화재(ventilation-controlled fires)라고 표현한다. 환기부족 화재에서는 인체에 치명적인 일산화탄소(carbon monoxide, CO)를 포함하여 미연탄화수소(unburned hydrocarbon, UHC), 그을음(soot) 등이 대량으로 발생하여 심각한 인명피해를 야기할 수 있다.<sup>1,2)</sup> 따라서 환기부족조건에서의 실내 화재에서 발생하는 연소 가스의 성분특성을 이해하는 것은 화재에 의

<sup>†</sup> E-mail: kogh@dyu.ac.kr

한 인명 피해 방지 대책을 수립하는데 있어서 매우 중요하다.

Pitts<sup>3)</sup>는 기존에 보고된 실험 결과를 바탕으로 총괄 당량비(GER, global equivalence ratio)를 이용하여 환기 상태에 따른 화재실 내부의 CO 농도를 예측하고자 하였고 제한적인 경우에 있어서 CO 생성 메커니즘을 규명하였다. Blomqvist et al.<sup>4)</sup>은 ISO 9705 화재실의 환기부족 화재에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 국부당량비(local equivalence ratio)와 독성가스의 생성에 관한 상관관계 연구를 수행하였다. Gann et al.<sup>5)</sup>은 플래쉬오버 전후의 유독가스 생성에 관한 데이터를 축적하기 위해 다양한 가연물질을 이용한 실내화재 실험을 수행한 바 있다. 최근 미국의 NIST에서는 ISO 9705 표준실에서 다양한 연료를 이용하여 화재실험을 수행하고 환기부족조건에서 CO 및 soot 발생 특성을 비롯하여 광범위한 데이터를 제공한 바 있다.<sup>6)</sup>

한편 혼합분율(mixture fraction)의 개념은 구획화재에서의 연소특성을 분석하는데 유용하게 사용될 수 있다. 혼합분율은 측정된 화학종들을 분석하거나 혹은 발생하는 연소가스 성분을 예측하기 위한 일관성 있는 기준으로 사용될 수 있다. 혼합분율은 연료에 근거한 성분(또는 원소)의 질량 분율로 정의되며, 이렇게 정의되는 혼합분율과 연소반응에 관련된 화학종의 질량분율과의 상관관계를 통해 얻을 수 있다. 이러한 혼합분율에 근거한 연소모델은 FDS<sup>7)</sup>(Fire Dynamics Simulator)을 비롯하여 다양한 연소 및 화재 해석에서 널리 사용되고 있다.<sup>8,9)</sup> 혼합분율 개념을 이용한 화염해석은 초기 Bilger<sup>10)</sup>에 의해 제시되었으며, 이후 Peters<sup>11)</sup>에 의해 다양한 물리적 개념의 추가로 인한 모델의 성능이 크게 개선되었다. 초기에는 대항류 비예혼합 화염을 포함한 다양한 형상의 층류화염을 대상으로 혼합분율 모델의 예측성능에 대한 검증 및 활용이 시도되었다.<sup>12,13)</sup> 그러나 화재현상은 근본적으로 난류의 특성을 지니며 특히 구획화재의 경우 제한된 공간적 특성, 환기조건 등에 지배를 받는 매우 복잡한 특성을 지닌다. 그럼에도 불구하고 Floyd et al.<sup>14)</sup>과 Ko et al.<sup>15)</sup> 등은 혼합분율 개념이 화재의 전체적 구조에 대한 다양한 정보를 제공할 수 있음을 보였고 최근에 Zhou and Mahalingam<sup>16)</sup>은 목재의 열해리 가스-공기의 확산 화염을 분석하기 위한 혼합분율 파라미터를 새롭게 정의한 바 있다.

본 연구에서는 ISO 9705 표준화재실에 대한 화재 실험<sup>6)</sup>으로부터 측정된 고온 상층부의 연소가스 농도를 혼합분율 개념을 도입하여 분석함으로써 환기부족상태의 실내화재에서 발생하는 연소생성물의 특성을 파악하고자 한다. 상층부 두 지점에서 측정된 다양한 연소

가스 및 그을음 등의 성분 특성을 혼합분율의 함수로 나타내고 이상적인 반응에 근거한 상태관계식과 비교함으로써 혼합분율 모델을 평가한다. 본 연구를 통해 환기부족 구획화재의 연소가스 발생특성에 대한물리적 이해의 증진을 도모하고 그을음 농도가 혼합분율 분석 결과에 미치는 영향에 대해 살펴보고자 한다.

## 2. 실험 및 분석 방법

### 2.1 실험 조건 및 측정방법

실제 규모의 구획화재 실험을 위하여 Figure 1과 같이 2.4m × 2.4m × 3.6m의 크기를 갖는 ISO 9705 표준 화재실이 제작되었다. 연료로는 메탄(CH<sub>4</sub>), 헵탄(C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>), 그리고 톨루엔(C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>)이 사용되었다. 화원으로는 Figure 1에 보인 바와 같이 0.1m × 0.1m의 정사각형 팬(pan)이 사용되었다. 팬에 일정한 양의 연료를 채우고 점화시키는 방법과 팬 위에 연료 분사 장치를 설치하여 연료를 계속적으로 공급하는 두 가지 연료 공급 방식이 각각 사용되었다. 연료를 분사하는 방법을 사용할 경우 한 번의 실험에서 다양한 크기의 화재를 구현할 수 있다는 장점이 있었다. 또한 환기조건에 따른 화재특성의 변화를 관찰하기 위하여 두 가지 크기의 출입구를 채택하였다. 그림에 나타난 바와 같이 표준 출입구의 크기는 0.8m × 2.0m 인데, 낮은 발열량에서 환기부족조건을 얻기 위하여 1/4의 폭을 갖는 좁은 출입구(0.2 × 2.0m)도 사용되었다. Table 1에 실험 조건을 요약하였다.

발열량의 측정은 NIST의 화재 실험동에 설치되어 있는 6m × 6m 정사각 후드를 가진 산소소모 열량계를 이용하였다. Table 1에 제시한 발열량은 화염이 준정상

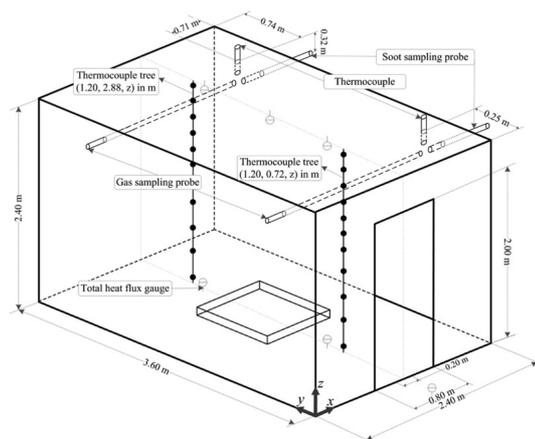


Figure 1. Perspective views of the ISO 9705 room and location of measurements (unit: m).

**Table 1.** Summary on Experimental Conditions

Test	Fuel	Fuel Feeding Method	Pan Size [m <sup>2</sup> ]	Door Size [m]	HRR* [kW]
1	Methane	Spraying on the Pan	0.28	0.2	507, 1087
2	Methane	Pool Pan	1.0	0.8	1074, 1866, 2382
3	Heptane	Pool Pan	1.0	0.8	1490
4	Heptane	Pool Pan	0.5	0.2	1460, 1510
5	Heptane	Spraying on the Pan	0.5	0.2	414, 581, 600, 923, 991, 1092, 1297, 1380, 1396, 1756, 1795, 2048
6	Toluene	Pool Pan	0.5	0.2	1207
7	Toluene	Spraying on the Pan	0.5	0.2	564, 1020, 1323, 1591

\*Nominal steady state heat release rate values from calorimetry measurements

상태(quasi-steady state)에 이른 후 측정된 값을 평균하여 얻은 것이다. Figure 1에 제시된 바와 같이 고온 상층부의 두 지점에 연소가스 및 그을음에 대한 샘플링 탐침(sampling probe)과 온도 측정을 위한 흡입식 열전대가 설치되었다. 채취된 연소가스에 대해서 산소 농도는 상자성 분석기(paramagnetic analyzer), 일산화탄소 및 이산화탄소의 농도는 NDIR(non-dispersive infrared) 분석기, 그리고 잔존 탄화수소연료의 농도는 FID(flame ionization detector)를 이용하여 분석하였다. 그을음의 경우 중량식 샘플링(gravimetric sampling) 방식을 사용하였다. 탐침을 통과하는 연소가스를 필터에 통과시켜 그을음을 채집한 후 질량을 측정하고 유입 유량과의 비고를 통해 질량 농도 및 몰 농도를 얻을 수 있다. 측정 방식의 특성으로 인해 그을음 농도의 경우에는 준정상 상태의 값만을 얻었다. 보다 자세한 사항에 대해서는 NIST의 실험 보고서<sup>9)</sup>에서 찾을 수 있다.

## 2.2 혼합분율분석(Mixture Fraction Analysis)

혼합분율은 공급되는 연료에 근거한 특정 성분(또는 성분조합)에 대한 무차원량을 말한다. 본 연구에서는 탄소를 포함하는 화학종에 대한 혼합분율을 사용하며 다음과 같이 정의된다.

$$Z = Y_F + Y_{CO} \frac{M_F}{xM_{CO}} + Y_{CO_2} \frac{M_F}{xM_{CO_2}} + Y_s \frac{M_F}{xM_s} \quad (1)$$

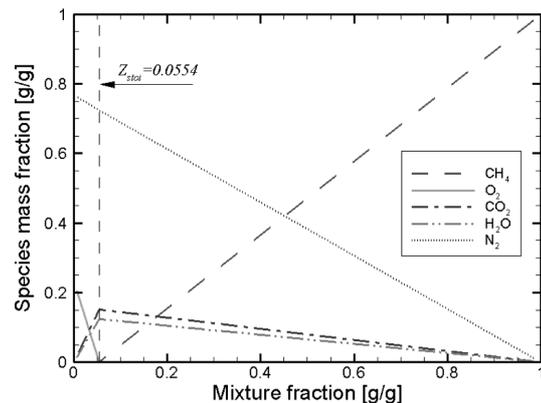
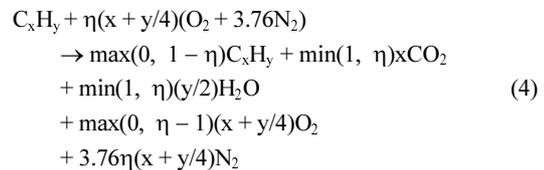
여기서  $Y_i$ 와  $M_i$ 는 각각  $i$  화학종의 분자량과 질량분율,  $x$ 는 탄화수소 연료( $C_xH_y$ )의 탄소 원자수를 의미하며  $M_F$ 는 연료의 분자량을 나타낸다. 또한 아래첨자  $s$ 는 그을음을 의미하며 그을음의 분자량은 탄소의 분자량과 같다고 가정한다. 혼합분율에 대한 구체적인 정의는 다양하지만 그 결과는 대체적으로 유사하게 나타나게 된다. 다만 혼합분율에 관련된 이전의 연구들에서

는 그을음을 포함하지 않았기 때문에 식(1)의 오른쪽 마지막 항이 무시되었다고 할 수 있다. 화학종  $i$ 의 질량분율  $Y_i$ 은 측정된 몰분율  $X_i$ 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$Y_i = X_i M_i / M_{tot} \quad (2)$$

$$M_{tot} = \sum_i X_i M_i \quad (3)$$

한편 탄화수소 연료의 이상적인 반응에서는 일산화탄소와 그을음이 고려되지 않으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.



**Figure 2.** Species mass fractions as a function of mixture fraction for ideal methane-air flame.

여기서  $\eta$ 는 당량비(equivalent ratio)의 역수, 즉  $\eta = 1/\phi$ 이다. Figure 2는 이상적인 메탄-공기 연소 반응에서 혼합분율과 각 화학종의 질량분율간의 상관관계에 대한 예시를 보여주고 있다. 혼합분율이 이론 공연비에서의 값( $Z_{st}$ )보다 작은 과환기조건에서 연료 증기의 농도는 영(zero)이 되며 혼합분율의 증가에 따라  $O_2$  발생이 감소하고  $CO_2$  발생이 증가한다. 연료/공기의 비가 이론 공연비보다 증가하여 환기부족조건에 이르면, 즉 혼합분율 값이  $Z_{st}$ 보다 커지면  $O_2$ 의 농도는 영이 되고 연료 증기 발생이 계속적으로 증가한다. 연료와 산소의 농도가 모두 영이 되는 이론 공연비 조건의 경우에는  $Y_F = Y_{CO} = Y_S = 0$ 이므로 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$Z_{st} = Y_{CO_2} \frac{M_F}{x M_{CO_2}} \quad (5)$$

본 연구에서 사용된 메탄, 헵탄, 톨루엔의 경우 이론 공연비 조건에서의 혼합분율( $Z_{st}$ )은 각각 0.0554, 0.0622, 0.0694이다.

### 3. 결과 및 분석

NIST의 ISO 9705 표준실에 대한 화재 실험의 결과 보고서<sup>6)</sup>에는 다양한 연료, 화원 위치, 출입구 조건에 따른 구획 내부의 열유동 특성에 대한 분석과 함께 온도, 연소가스 농도, 열유속 등에 대한 다양한 데이터가 수록되어 있다. 본 논문에서는 고온 상층부의 연소가스 농도 데이터를 연료별로 정리하여 혼합분율 개념을 바탕으로 분석함으로써 환기부족 구획화재의 연소생성물 특성을 살펴보고자 한다.

Figure 3은 시간 경과에 따라 측정된 가스 화학종 데이터와 이를 혼합분율의 함수로 변화시킨 결과를 보여준다. Figure 3(a)는 Test 1의 메탄연료 화재에 대해 화재실 내부 상층부 전면 지점(Figure 1 참조)에서 측정된 각종 연소가스 농도와 산소소모 열량계로부터 측정된 전체의 발열량(HRR)의 시간에 따른 변화를 함께 나타내고 있다. Test 1의 경우는 연료분사 노즐로의 유량을 조절함으로써 화재 크기를 조절할 수 있었는데 여기서는 507kW와 1087kW의 준정적 상태를 얻을 수 있었다. 그림에서 볼 수 있듯이 507kW의 경우 UHC와 CO는 거의 발생하지 않는 과환기조건에 해당하며 1087kW의 경우는 반대로  $O_2$ 가 검출되지 않는 대신 상당량의 CO와 UHC가 검출되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 시간 변화(transient) 데이터를 식(1)을 이용하여 혼합분율의 함수로 전환시키면 Figure 3(b)를 얻을 수 있다. 이와 같은 과정을 통해 다양한 화재조건

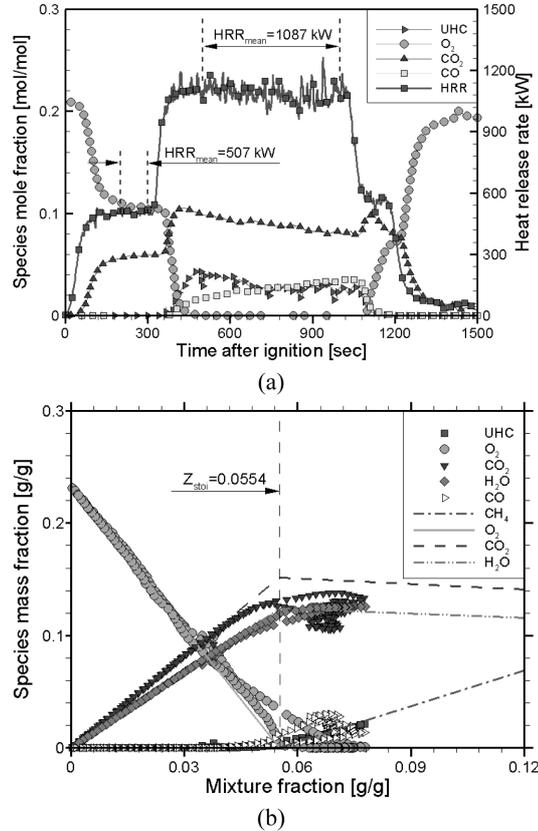
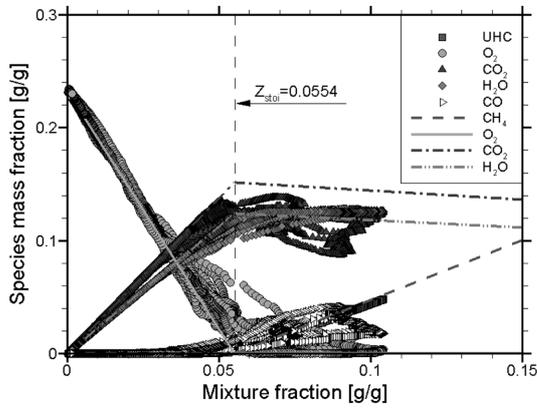


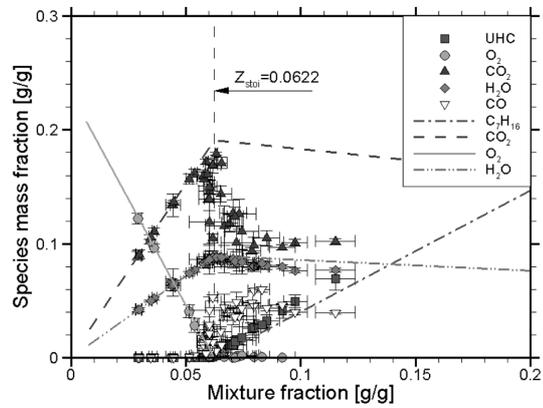
Figure 3. (a) The measured mole fractions of combustion gas species and heat release rate as a function of time after ignition and (b) the mass fractions as a function of mixture fraction at rear location for Test 1.

(즉, 발열량, 연료 공급 방식, 출입구 크기)에 대한 전체의 데이터를 혼합분율만의 함수로 전환하여 전체적으로 살펴볼 수 있다. Figure 3(b)와 이후의 Figures 4~6에 표시된 선은 탄화수소 연료-공기의 이상적인 반응식에 근거하여 계산된 혼합분율과 질량분율간의 상관관계를 나타낸다.

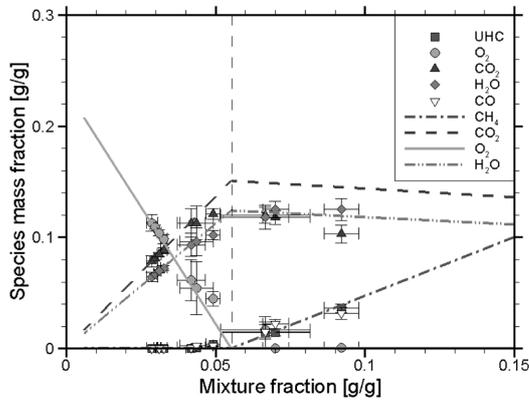
Figure 4(a)는 메탄 화재인 Tests 1과 2에 대하여 상층부 전면과 후면의 위치에서 측정된 시간에 따른 모든 측정 데이터를 혼합분율의 함수로 나타낸 것이다. 출입구 크기, 연료공급방식, 측정 위치에 관계없이 모든 데이터들이 이상적 반응에 근거한 예측 결과를 따라 배치되고 있음을 알 수 있다. 즉, 혼합분율이 증가함에 따라  $O_2$ 는 감소하여 영(zero)에 근접해가며 UHC와 CO는 과환기 조건( $Z < Z_{st}$ )에서는 발생되지 않다가 환기부족 상태( $Z > Z_{st}$ )에서는 점차 증가한다. 특히 과환기 조건에서는 이상적인 반응식에 근거한 이론 값이



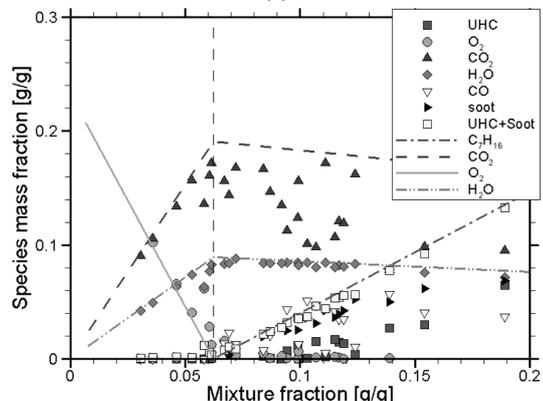
(a)



(a)



(b)



(b)

**Figure 4.** Mass fractions of front and rear compartment gas species as a function of mixture fraction for the natural gas fire Tests 1 and 2: (a) transient measurements and (b) averaged quasi-steady measurements.

**Figure 5.** Comparison between the averaged quasi-steady mass fractions of compartment gas species as a function of mixture fraction (a) without soot and (b) with soot for the heptane fire Tests 3, 4 and 5.

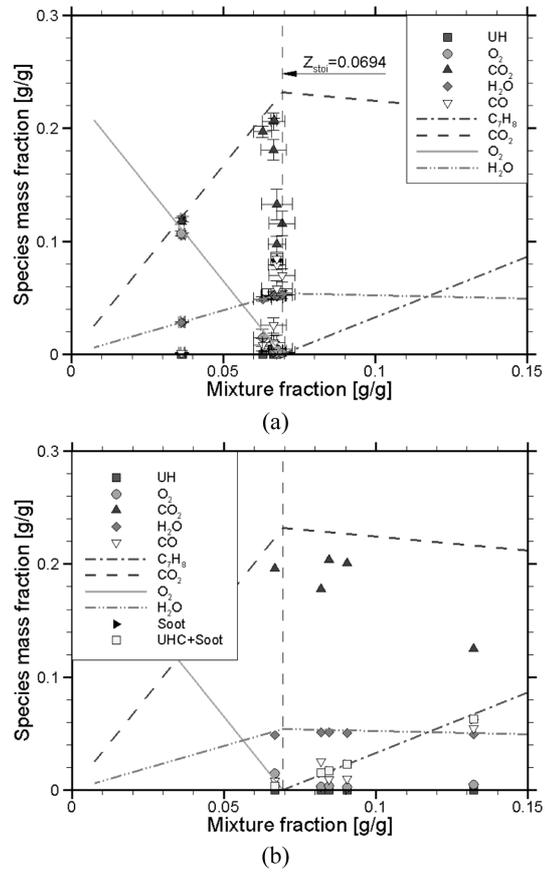
측정 결과를 매우 정확히 따라가고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 식(4)의 이상적인 반응식에서는 CO나 그 올음과 같은 성분의 발생을 고려할 수 없기 때문에 환기부족조건( $Z > Z_{st}$ )에서는 측정 값과의 오차가 증가하게 된다. 즉 이상적인 반응식은 모든 CO가 CO<sub>2</sub>로 환원된다고 가정하기 때문에 결과적으로 환기부족조건에서 CO<sub>2</sub>의 값을 과다 예측하게 되는 것이다. Figure 4(b)는 준정상(quasi-steady) 상태에 걸쳐 평균된 값을 표준편차와 함께 나타내고 있다. 여기서 준정상 상태란 Figure 3(a)에 보여지 바와 같이 발열량이 거의 일정한 상태를 말하는 것으로서 Table 1에 각각의 테스트에서 얻은 준정상 상태의 발열량을 나타내었다. 수평 및 수직 에러 바는 각각 혼합분율과 화학종 질량분율의 표준편차를 나타낸다. 환기부족 화재는 일반적으로 전실

화재(flashover) 조건에서 발생하는데 이때의 화재실 내부 상태는 매우 불안정해 진다. 이러한 이유로 혼합분율이 증가할수록 상대적으로 표준편차가 커지는 것으로 생각된다. Figure 4(b)에 보이는 준정상 상태의 결과는 Figure 4(a)의 경향을 보다 명확하게 보여준다. 즉 과환기 조건( $Z < Z_{st}$ )에서는 이론값이 실험 경향을 잘 반영하지만 환기부족 조건( $Z > Z_{st}$ )에서는 CO 발생을 예측하지 못하기 때문에 CO<sub>2</sub>의 생성을 과다 예측하고 있다.

Figure 5는 Tests 3-5의 헵탄 화재에 대한 준정상 상태의 연소가스 측정결과에 대한 혼합분율 해석에 있어서 그 올음 성분을 고려함에 따른 영향을 보여주고 있다. 먼저 Figure 5(a)를 보면 앞서 메탄 화재의 결과와 마찬가지로 다양한 화재조건에 대한 측정 결과가 일정

한 경향을 따라 분포됨을 알 수 있다. 즉,  $Z < Z_{st}$ 인 과 환기조건에서는 측정 결과가 이상적 상관관계식과 잘 일치하여 CO와 UHC의 발생이 거의 없고 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O에 대한 이론값이 측정 결과를 잘 반영하고 있다. 그러나 환기부족조건에서는 CO의 발생이 급격히 증가하고 이로 인해 CO<sub>2</sub>의 발생이 이론식에 비해 상당히 적은 것을 알 수 있다. 한편 Figure 5(b)는 측정된 그을음 질량 분율을 고려하여(식(1) 참조) 계산된 혼합분율과 화학종 질량분율의 관계를 보여주고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 혼합분율 해석과 관련된 대부분의 이전 연구에서는 그을음을 무시해 왔다. 그러나 Figure 5에서 볼 수 있듯이 그을음 발생량이 많은 헵탄 화재의 경우 그을음의 고려가 혼합분율 해석결과를 크게 변화시키고 있음을 알 수 있다. 먼저 혼합분율 값이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 그을음을 무시하여 계산된 Figure 5(a)에서는 최대 혼합분율 값이 약 0.115 정도인 반면에 그을음을 고려할 경우 약 0.190까지 증가하고 있다. 특히 이러한 증가의 경향은 혼합분율이 커질수록 증가하였다. 이로 인해  $Z_{st}$ 값 근처에 집중되던 측정 데이터들이 그을음을 고려함에 따라 넓은 혼합분율 범위로 분산되는 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 범위 증가는 CO<sub>2</sub>의 예측 오차를 상대적으로 감소하게 하는 경향도 보여준다. UHC의 경우 이론값에 비해 크게 감소하여 오차가 증가하는 것으로 보이지만 그을음의 질량분율을 함께 고려할 경우(UHC + soot) 이론 결과의 경향과 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이것은 Ko et al.<sup>15)</sup>에서 언급된 바와 같이 많은 양이 그을음이 발생하는 경우에는 미연연료 성분의 상당량이 탄화수소의 형태가 아닌 미연탄소, 즉 그을음의 형태로 존재함을 보여준다.

Figure 6은 Tests 6과 7의 톨루엔 화재에 대한 준정상 상태의 연소가스 측정결과에 대한 혼합분율 해석에 있어서 그을음 성분을 고려함에 따른 영향을 보여주고 있다. 톨루엔은 헵탄에 비해 그을음의 발생 경향이 더욱 큰 연료이다. Figure 6(a)에서 보이는 것과 같이 그을음을 고려하지 않을 경우 모든 측정위치에서 과환기 조건( $Z < Z_{st}$ )에 해당된다고 분석하게 될 것이다. 이것은 톨루엔 화재의 경우 UHC가 거의 측정되지 않았기 때문이다. 실제 실험에서 환기부족조건으로 판단된(화염이 화재실 외부로 분출되는) 화재의 경우에도 혼합분율 계산을 통해서 과환기 또는 이론 공연비 화재로 분석되는 것이다. 그러나 Figure 6(b)에서 볼 수 있듯이 그을음 성분을 고려하게 되면  $Z_{st}$  근처에 집중되어 있던 측정 결과가  $Z > Z_{st}$ 의 범위로 분산되어 실제로 이 경우들이 환기부족조건에 해당됨을 확인할 수



**Figure 6.** Comparison between the averaged quasi-steady mass fractions of compartment gas species as a function of mixture fraction; (a) without soot, and (b) with soot for the toluene fire Tests 6 and 7.

있게 해준다. 또한 헵탄 화재의 경우와 마찬가지로 미연연료 성분에 대한 이론값이 UHC와 그을음 측정값의 합과 일치하는 것을 보여준다.

Figure 7은 메탄, 헵탄, 톨루엔 화재의 준정상 상태 측정결과를 이용하여 계산된 혼합분율 값에 대하여 그을음의 고려 여부의 차이를 비교한 결과이다. 앞서 언급한 바와 같이 혼합분율이 작은 과환기 영역에서는 그을음의 고려가 혼합분율 값에 큰 차이를 주지 않고 있다. 또한 메탄과 같이 그을음 발생이 크지 않은 연료의 경우에는 큰 혼합분율 값을 갖는(환기부족조건에 해당하는) 경우에도 그을음의 영향이 크지 않다. 이것은 메탄 화염의 경우 혼합분율 해석에서 그을음을 무시하는 것이 유효함을 의미한다. 그러나 헵탄과 톨루엔과 같이 그을음 발생이 큰 연료의 경우, 환기부족조

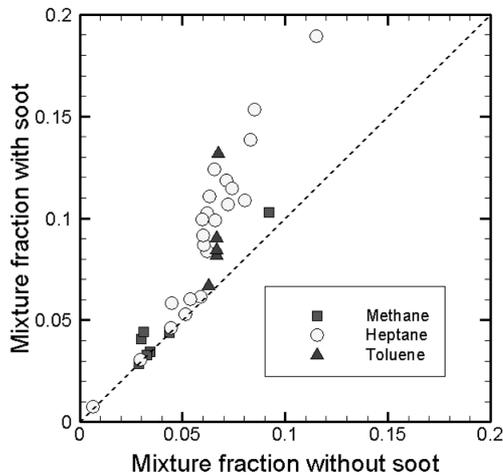


Figure 7. Comparison of mixture fractions calculated with and without soot using the time-averaged species measurements for methane, heptane, and toluene fire tests.

건에서 그을음을 고려 여부에 따라 혼합분율 값이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다. 특히 톨루엔 화재의 경우 그을음을 고려하지 않는 경우 혼합분율 값이 0.07 정도 이상으로 증가하지 않는 것을 볼 수 있다. 그러나 그을음을 고려할 경우 톨루엔 화재의 최대 혼합분율 값은 0.13 이상으로 증가한다. 앞서 살펴보았듯이, 이러한 결과는 불연 연료의 성분 중 대부분이 그을음의 형태로 존재하기 때문이다. 따라서 헵타나나 톨루엔과 같은 그을음 발생이 심한 화재의 혼합분율 해석에서 그을음의 고려는 필수적이라 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 ISO 9705 표준실에서의 화재 실험으로부터 측정된 고온 상층부의 연소가스 농도를 연료별로 정리하여 혼합분율 개념을 바탕으로 분석함으로써 환기부족 구획화재의 연소생성물 특성을 살펴보았다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1. 구획화재의 분석에 있어서 혼합분율의 개념은 매우 유용하여 다양한 조건의 화재에서 측정된 많은 연소가스 데이터를 하나의 기준으로 분류할 수 있게 하였다. 다양한 조건의 많은 데이터들이 혼합분율 값에 따라 일정한 경향을 갖고 분포됨을 확인할 수 있었다.

2. 이러한 경향은 이상적인 반응식에 근거한 혼합분율-종질량분율의 상관관계로 파악할 수 있었다. 혼합분율 모델을 과환기조건에서는 측정결과를 매우 정확히 예측하는 반면에 환기부족조건에서는  $CO_2$ 의 농도를 하

향 예측하는 경향을 보였다. 이것은 이상적인 반응식에 근거한 혼합분율 모델이  $CO$ 의 발생을 고려하지 않기 때문이다. 그럼에도 불구하고 전반적인 질량분율 변화의 경향에 대한 예측은 유효하다고 판단된다.

3. 혼합분율 계산에 있어서 그을음을 고려하는 것이 혼합분율 값을 크게 증가시켰다. 특히 헵타나나 톨루엔과 같이 그을음 발생이 큰 연료의 경우에는 그을음을 고려하는 것이 정확한 환기조건 판별에 영향을 미칠 수 있을 만큼 중요하다는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 혼합분율에 근거한 연소모델이 FDS<sup>7)</sup>를 포함한 대부분의 화재해석코드에서 사용되고 있다는 것을 언급하고자 한다. 본 연구에서 살펴본 바와 같이 혼합분율의 개념은 특히, 환기부족조건에서 상당한 오차를 발생시킬 수 있다. FDS는  $CO$ 나 그을음을 고려하기 위한 단순한 모델을 포함하고 있다. 그러나 이들의 예측 정확도 뿐만 아니라 다양한 화재조건에서  $CO$ 와 그을음의 생성특성에 관련된 복잡한 물리·화학적 특성을 적절히 모사할 수 있는지는 향후 보다 체계적으로 검토되어야 할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. J.G. Quintiere, W.J. Rinkinen and W.W. Jones, "The Effect of Room Opening on Fire Plume Entrainment", *Comb. Sci. Tech.*, Vol.26, pp.193-201(1981).
2. C.L. Beyler, "Major Species Production by Diffusion Flames in a Two-Layer Compartment Fire Environment", *Fire Safety Journal*, Vol.10, pp.47-56 (1986).
3. W.M. Pitts, "The Global Equivalence Ratio Concept and the Formation Mechanism of Carbon Monoxide in Enclosure Fire", *Prog. Ener. Comb. Sci.*, Vol.21, pp.197-237(1995).
4. P. Blomqvist and A. Lonnermark, "Characterization of the Combustion Products in Large-Scale Fire Tests; Comparison of Three Experimental Configurations", *Fire and Materials*, Vol.25, pp.71-81 (2001).
5. R.G. Gann, J.D. Averill, E.L. Johnsson, M.R. Nyden, and R.D. Peacock, "Smoke Compartment Yields from Room-Scale Fire Tests", NIST TN 1453, NIST, Maryland(2003).
6. A. Lock, M. Bundy, E.L. Johnsson, A. Hamins, G.H. Ko, and C.H. Hwang, "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, MD (2007).
7. K.B. McGrattan, S. Hostikka, J.E. Floyd, H.R.

- Baum, and R.G. Rehm, "Fire Dynamics Simulator (Version 5), Technical Reference Guide", NIST SP 1018-5, NIST, MD(2007).
8. K.B. McGrattan and A. Hamins, "Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire", *Fire Technology*, Vol.42, No.4, pp.273-281(2006).
  9. 고권현, 김성찬, A. Hamins, 유홍선, "환기부족 구획 화재에 대한 FDS 해석 및 검증", *한국화재소방학회 논문지*, Vol.23, No.5, pp.103-109(2009).
  10. R.W. Bilger, "Reaction Rates in Diffusion Flames", *Combust. Sci.*, Vol.30, pp.277-284(1977).
  11. N. Peters, "Laminar Diffusion Flamelet Models in Non-Premixed Turbulent Combustion", *Prog. Ener. Comb. Sci.*, Vol.10, pp.319-339(1984).
  12. Y.R. Sivathanu and G.M. Faeth, "Generalized State Relationships for Scalar Properties in Nonpremixed Hydrocarbon/Air Flames", *Comb. Flame*, Vol.82, pp.211-230(1990).
  13. A. Hamins and K. Seshadri, "The Structure of Diffusion Flames Burning Pure, Binary, and Ternary Solutions of Methanol, Heptane, and Toluene", *Comb. Flame*, Vol.68, pp.295-307(1987).
  14. J.E. Floyd, K.B. McGrattan, S. Hostikka, and H.R. Baum, "CFD Fire Simulation Using Mixture Fraction Combustion and Finite Volume Radiative Heat Transfer", *J. Fire Protection Eng.*, Vol.13, pp.11-36(2003).
  15. G.H. Ko, A. Hamins, M. Bundy, E.L. Johnsson, S.C. Kim, and D.B. Lenhart, "Mixture Fraction Analysis of Combustion Products in the Upper Layer of Reduced-Scale Compartment Fires", *Comb. Flame*, Vol.156, pp.467-476(2009).
  16. X. Zhou and S. Mahlingam, "A Suitable Mixture Fraction for Diffusion Flames of Wood Pyrolysis Gas", *Comb. Flame*, Vol.133, pp.197-199(2003).