

실제 규모의 구획화재에서 총괄당량비와 화재특성의 상관관계에 관한 실험적 연구

황철홍** · 박충화* · 고권현** · Andrew Lock***

An Experimental Study on Relationship Between Global Equivalence Ratio and Fire Characteristics in Full-Scale Compartment Fires

Cheol-Hong Hwang, Chung-Hwa Park, Gwon Hyun Ko and Andrew Lock

ABSTRACT

An experimental study was conducted to investigate the relationship between global equivalence ratio(GER) and fire characteristics in an ISO 9705 room. Heptane fuel was burned with different fuel flow rates and doorway widths in order to force the room to be placed in different GER conditions. It was observed that after the onset of under-ventilated fire conditions, temperature and unburned fuel components such as CO and soot increased with increasing heat release rate (HRR), regardless of the doorway width. From the analysis of local mixture fraction, it was reconfirmed that the inclusion of soot production in the product composition was very important to predict accurately the chemical conditions inside the compartment, particularly for the under-ventilated fire conditions. In addition, the local equivalence ratio (LER) was directly proportional to the GER with a unit gradient regardless of doorway width when the soot production was included in the chemical products. This finding provided an important potential that the GER could be used to correlate the local thermal and chemical environment measured at the upper layer of a full-scale enclosure when soot was included.

Key Words : Compartment fire, Global equivalence ratio, Soot, Ventilation condition

1. 서론

구획화재에서 환기조건에 따른 화재의 특성은 화염의 위치, 건물 내부의 온도 및 독성물질 발생량에 매우 큰 차이를 보인다[1]. 환기조건은 일차적으로 출입구의 형상(또는 면적)과 가연물질의 양에 의해 지배되며, 부력효과에 의해 내부로 유입되는 공기량을 통해 정량적으로 분류될 수 있다. 가연 연료에 비해 산소의 양이 부족한 상태에서 발생하는 환기부족화재(환기지배형화재)의 특성은 일반적으로 환기부의 면적 및 위치에 큰 영향을 받는다[2]. 반면에 과환기화재(연료지배형화재)에서 연료의 소모율은 주로 노출된 연료의 표면적과 복사 열전달에 의해 크게 변화된다고 알려져 있다[3].

다양한 환기조건 변화에 따른 구획화재에 관한

선행연구를 살펴보면, Hu 등[4]은 환기부의 폭과 높이의 단계적인 변화를 통해 정상 과환기화재, 정상 환기부족화재, 부분 소염을 갖는 불안정한 화재, 소염 직전의 천이화재와 같은 4단계의 화재거동을 보고하였다. 또한 Yii 등[5]과 Kumar 등[6]은 환기부의 면적과 위치변화는 연료 소모율, 화재 지속시간, 온도분포, 발열량 및 내부의 유동패턴 등을 크게 변화시킴을 확인하였다. 이들 연구들은 연료와 공기의 제어가 용이한 실험실(lab scale) 규모와 축소된 모형에서 환기조건이 내부의 유동 및 온도에 매우 중요한 인자임을 잘 보여주고 있다. 그러나 화재현상에 대한 상사법칙(scaling law)이 정립되지 않은 현재의 상황에서, 축소모형에서의 결과는 실제규모의 화재현상을 예측하는데 직접적으로 활용하기에는 많은 어려움이 있다[7]. 그럼에도 불구하고 실제 규모의 구획화재에서 환기조건 변화가 건물 내부의 유동, 열 및 화학적 특성변화에 미치는 영향은 충분히 연구되지 않았다. 특히 환기부족화재에서 CO 및 그음의 생성특성 변화는 화재안전 설계의 관점에서 매

* 대전대학교 소방방재학과

** 동양대학교 건축소방행정학과

*** Building and Fire Research Lab., NIST

† 연락처, chehwang@dju.ac.kr

우 중요한 연구 분야로 인식되고 있다.

구획화재에서 CO 생성에 관한 대부분의 연구는 고온 상층부의 화재특성을 조사하기 위하여 연료 및 공기의 양을 제어할 수 있도록 배기후드(exhaust hood)에서 주로 수행되었다[8]. Pittz[9]는 다양한 실험결과를 바탕으로 총괄당량비(global equivalence ratio)를 이용하여 환기조건에 따른 CO 농도의 예측을 시도하였다. 그 결과 제한된 조건에서 CO의 발생량은 총괄당량비와 고온 상층부의 온도를 이용한 각 연료별 상관관계식을 통해 예측될 수 있었다[10]. 그러나 기존의 배기후드 실험에서와는 달리 구획화재에서는 상층부의 온도와 생성물의 농도분포가 균일하지 않으며, 벽면으로부터의 열적 피드백(thermal feedback)으로 인하여 내부의 온도는 배기후드 실험에서의 결과와 큰 차이를 보였다[11]. 결과적으로 구획화재에서는 기존 배기후드 실험을 통해 도출된 총괄당량비를 이용하여 예측된 값보다 많은 양의 CO가 발생되었다. 또한 구획화재와 배기후드에서의 유동특성과 온도분포의 차이는 CO 발생량의 큰 차이를 발생시킬 수 있다고 언급되었다[1].

과환기화재와는 다르게 환기부족화재에서는 총괄당량비를 이용하여 CO 생성량의 예측 정확도를 개선하기 위해서는 정확한 그을음 생성량에 관한 정보가 요구된다. Ko 등[12]은 환기부족화재에서 응축(condensed-phase) 탄화수소연료의 경우, 연료의 탄소성분 중 약 50% 이상이 그을음의 형태로 존재한다고 보고하였다. 또한 환기부족화재에서 화학종의 농도 측정 시에 그을음의 생성량이 고려될 때 고온 상층부의 주요 화학종의 농도는 국부혼합분율(local mixture fraction)을 통해 표현될 수 있음을 확인하였다. 국부혼합분율은 국부당량비로 직접 표현되기 때문에, 국부당량비와 총괄당량비와의 상관성에 대한 가능성 검토는 총괄당량비를 이용한 구획화재의 열 및 화학적특성에 대한 예측을 위해 매우 유용할 것으로 기대된다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 실제 규모의 구획화재에서 환기조건에 따른 구획 내부의 열 및 화학적 특성에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위해 연료량과 출입구의 면적(폭)을 변화시

켜 넓은 범위의 총괄당량비를 갖는 화재조건을 조성하였다. 또한 그을음 생성에 대한 고려여부를 통해 총괄당량비와 고온 상층부에서 측정된 열 및 화학적특성과의 상관식 도출 가능성에 관한 체계적인 검토를 수행하였다.

2. 실험 방법

실제 규모의 구획화재 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 2.4 m × 2.4 m × 3.6 m의 크기를 갖는 ISO 9705 표준 화재실이 제작되었다. 연료로는 연료특성이 잘 알려져 있고 적정량의 그을음이 발생하며 가솔린과 유사한 연소열을 갖는 헵탄(C₇H₁₆)이 사용되었다. 발열량의 제어 및 정상상태의 화재 생성을 위하여 분무(spray) 노즐과 팬(pan)으로 구성된 화재원이 사용되었다. 0.5 m²의 팬은 바닥 중앙에 위치되었으며, 90°의 분사각을 갖는 분무노즐은 팬으로부터 0.25 m 위에 설치되었다. 표준 출입구의 크기는 0.8 m(폭) × 2.0 m(높이)이지만, 과환기화재에서 환기부족화재까지의 넓은 총괄당량비 조건을 조성하기 위하여 연료 공급유량 뿐만 아니라 출입구의 폭도 동시에 변화되었다. Table 1에서와 같이 0.1 m, 0.2 m 및 0.4 m의 3가지 출입구 폭이 사용되었다. 이후의 모든 그림에서 위 조건들은 DW10, DW20 및 DW40으로 각각 표기되었다. 출입구 폭이 0.8 m의 조건에서는 최대 연료공급량에서 환기부족화재의 발생이 이루어지지 않아 본 논문에서는 제외되었다.

발열량의 측정을 위하여 미국 표준기술연구소(NIST)의 화재 실험동에 설치된 6 m × 6 m 정사각형 후드를 가진 산소소모 열량계가 사용되었다. 건물 내부의 온도, 연소생성물 및 그을음의 농도는 Fig. 1에서와 같이 고온 상층부의 두 지점에서 측정되었다. 온도측정에는 0.5 mm의 비드 직경을 갖는 R-type의

Table 1. List of test conditions

No	Doorway width (m)	HRR (kW)	ID
1	0.10	415, 580, 925	DW10
2	0.20	250, 600, 1085, 1300, 1400, 1750	DW20
3	0.40	300, 580, 990, 1380, 1760, 1780, 2080	DW40

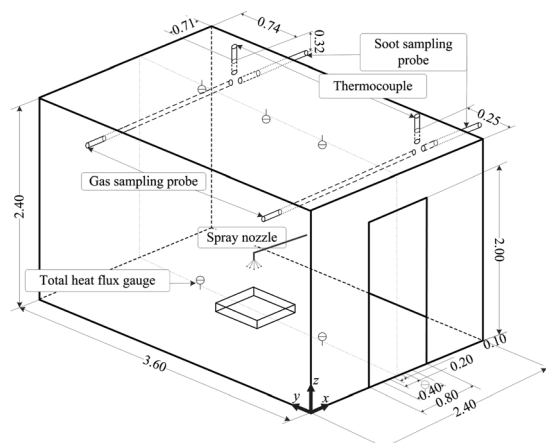


Fig. 1. Schematic of the ISO 9705 room and location of measurements (unit: m).

열전대가 사용되었다. 각 분석기에 의해 측정된 O_2 (paramagnetic analyzer), CO와 CO_2 (non-dispersive infrared analyzer) 및 THC(two flame ionization detector)에 대한 검증을 위하여 간헐적으로 GC(gas chromatograph)를 이용한 동시 측정이 이루어졌다. 그을음의 질량분율은 배기가스의 필터여과를 통한 중량 분석법을 통해 측정되었다. 천정과 바닥의 열적 분포를 비교하기 위하여 추가로 6개의 열유속계(total heat flux gauge)가 설치되었다. 모든 결과는 준 정상상태의 조건에서 시간 평균된 값이 이용되었다. 또한 모든 화학종에 대한 결과는 습기준(wet-basis)에 의해 보고되었다. 보다 자세한 실험장치, 방법 및 각 측정에 대한 불확실도(uncertainty)는 NIST TN 1603[13]에서 확인될 수 있다.

3. 결과 및 검토

3.1. 환기조건에 따른 열 및 화학적 특성

Fig. 2는 출입구 폭이 변화되었을 때, 화재 발열량이 $1,000 \pm 90$ kW로 유사한 조건에서 순간적인 화염사진을 나타낸 것이다. DW10, DW20 및 DW40의 조건에 대해 준 정상상태의 평균 발열량은 각각 925, 1085 및 990 kW이다. DW10의 경우, 건물 외부에서 화염이 형성되었음을 명확히 확인할 수 있다. 출입구의 폭이 증가함에 따라 외부에서 생성되는 화염은 점차 사라지며, DW40의 경우에는 과환기화재에서와 같이 대부분의 반응이 건물 내부에서 이루어짐을 알 수 있다. 위 결과는 유사한 발열량의 조건에서도 출입구 폭(면적)의 작은 변화는 건물 내부의 열 및 화학적 특성에 큰 변화를 초래할 수 있음을 간접적으로 알려준다.

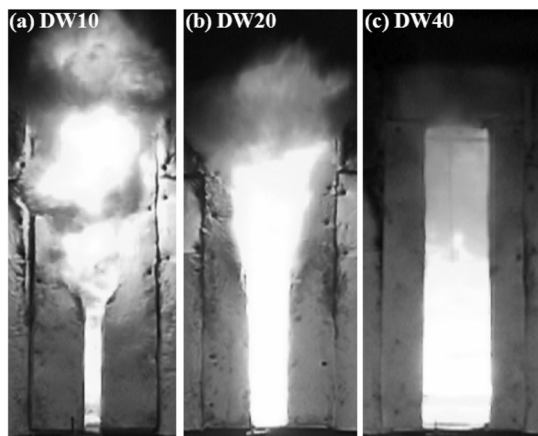


Fig. 2. Temporal images of compartment fire at approximately 1,000 kW for three cases with different doorway widths (DW).

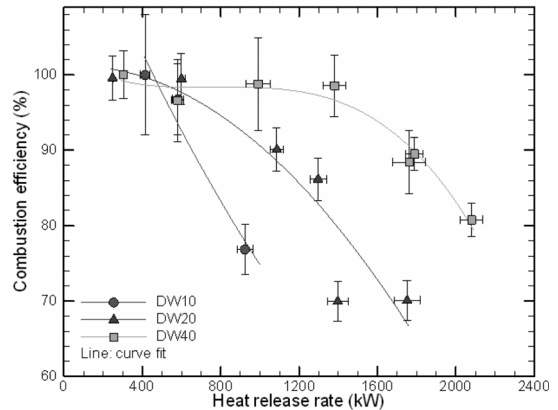


Fig. 3. Combustion efficiency as a function of heat release rate for three cases with different doorway widths.

Fig. 3은 3가지 출입구 폭의 조건에서 발열량에 따른 연소효율을 도시한 것이다. 여기서 연소효율은 측정된 연료 공급유량으로 부터 결정되는 이론 발열량과 실제 측정된 발열량의 비로 표현되었다. 그림에서 커브 피팅(curve fitting)은 물리적인 의미를 갖지 않으며, 단지 결과의 일반적인 경향에 대한 이해를 돕기 위해 삽입되었다. 또한 에러 바(error bar)는 시간 평균과정에서 발생하는 표준편차를 의미한다. 모든 경우에 대해서 발열량의 증가에 따라 연소효율은 감소하지만, 발열량에 대한 연소효율의 의존성은 출입구 폭의 변화에 의해 크게 달라짐을 알 수 있다. DW10의 경우에 연소효율은 발열량의 증가에 따라 급격하게 감소한다. 그러나 DW40의 경우는 발열량이 1,380 kW로 증가될 때까지 약 100%의 연소효율을 유지하고 있다. 1,000 kW의 발열량을 기준으로 살펴보면, DW10, DW20 및 DW40의 경우에 연소효율은 각각 75%, 90% 및 100%로 확인된다. 이들 값의 차이는 Fig. 2에서 언급된 출입구 폭의 변화에 의한 외부 화염발생 정도의 차이를 잘 설명해준다.

Fig. 4는 출입구 폭이 변화될 때 발열량에 따른 고온 상층부의 앞(출입구 근처)과 뒷부분에서 측정된 온도를 도시한 것이다. DW20의 경우에 발열량의 증가에 따라 고온 상층부의 온도는 증가하며, 최고점 이후에 다시 감소한다. 비록 실험 데이터가 충분하지 않지만, DW10과 DW40의 경우에도 유사한 온도 경향을 확인할 수 있다. 최고점 이후에 발생하는 온도 감소는 발열량 증가에 따라 CO, THC(total hydrocarbon) 및 그을음과 같은 다량의 불완전 연소 생성물 발생량이 점차적으로 증가하기 때문이다. 제한된 측정으로 인하여 최고 온도를 갖는 정확한 발열량을 예측할 수는 없지만, 완전연소를 통해 이루

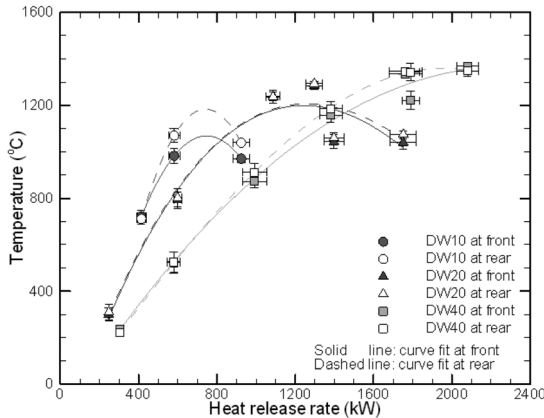


Fig. 4. Time-averaged temperatures at the front and rear sampling locations as a function of heat release rate.

어지는 최대 반응은 대략 DW10, DW20 및 DW40에 대해 580, 1,085, 1,760 kW에서 각각 발생되고 있음을 예측할 수 있다. 추가로 최고 온도는 출입구 폭이 0.1 m에서 0.4 m로 증가함에 따라 약 300°C 증가하고 있음을 알 수 있다. 건물 내부로 유입되는 공기량은 출입구의 면적에 비례하기 때문에, DW40의 경우에 환기부족화재는 더 높은 발열량에서 발생되며 결과적으로 더 높은 온도를 갖는다. 고온 상층부의 앞과 뒷부분의 온도차를 비교할 때 모든 조건에서 뒷부분의 온도가 더 높다. 그러나 최대 차이가 약 100°C이며, 본 실험에서 온도 측정에 대한 불확실도(total expanded uncertainty)가 ±6%임을 고려할 때 발열량과 출입구 폭에 상관없이 고온 상층부의 온도는 비교적 균일함을 알 수 있다. 비록 본 논문에서는 제시되지 않았지만, 천정 및 바닥부분에 측정된 열유속은 출입구 폭 및 발열량의 변화에 대해 온도와 유사한 경향을 갖고 있음을 확인하였다.

Fig. 5는 출입구 폭이 변화될 때 발열량에 따른 고온 상층부의 앞과 뒷부분에서 측정된 CO₂와 CO의 질량분율을 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 각 출입구 폭에 대해서 발열량의 변화에 따른 CO₂의 발생량은 온도 및 열유속과 매우 유사한 경향을 보인다. 즉 과환기조건에서 발열량이 증가함에 따라 CO₂의 질량분율은 증가하지만, 환기부족화재 발생 이후에서는 점차적으로 감소됨을 볼 수 있다. 비록 O₂ 측정결과는 제시되지 않았지만, CO₂의 변화는 O₂의 농도를 통해서 충분히 설명될 수 있다. 발열량이 증가함에 따라 O₂는 점차적으로 감소하며, DW10의 경우에 580 kW에서 O₂는 거의 0에 해당된다. CO₂ 역시 580 kW에서 최고점을 보이며, 이후 발열량 증가에 따라 점차적으로 감소되는 결과를 보여준다. Fig. 5(b)의 CO에 대해 살펴보면, O₂의 변화와 정

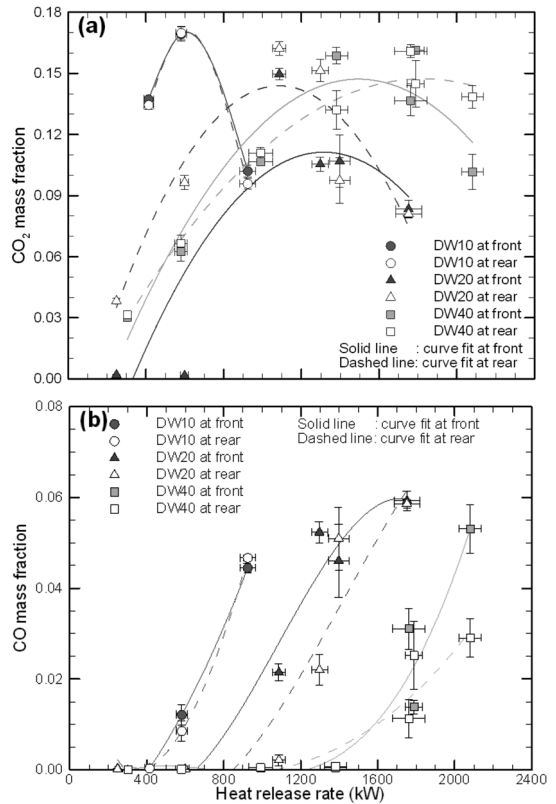


Fig. 5. Time-averaged mass fractions of CO₂ and CO at the front and rear sampling locations as a function of heat release rate.

확히 상반되는 현상을 보인다. DW10의 경우, CO는 415 kW에서는 거의 0이지만, 580 kW 이후에 환기부족화재로 인하여 발열량 증가에 따라 점차적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 THC의 측정결과를 통해서도 동일하게 확인할 수 있었다.

Fig. 6은 발열량 증가에 따라 고온 상층부 앞부분에서 측정된 그을음의 질량분율을 나타낸 것이다. 비록 그을음의 측정은 상층부 두 곳에서 이루어졌으나, 뒷부분에서의 측정 데이터는 장비의 오작동으로 인하여 본 논문에는 제시되지 않았다. 출입구 폭의 변화에 대한 그을음의 발생량은 발열량이 증가함에 따라 증가하며, 전반적으로 CO의 결과와 유사함을 확인할 수 있다. Fig. 4~6의 결과로부터 발열량 증가에 따른 환기부족화재의 개시는 온도, 열유속, CO₂의 감소 그리고 CO, THC 및 그을음과 같은 불완전 연소생성물의 증가에 의해 명확히 구분될 수 있음을 알 수 있다. 또한 환기부족화재가 개시되는 발열량은 출입구 폭의 변화에 대해 매우 큰 영향을 받고 있음을 확인하였다.

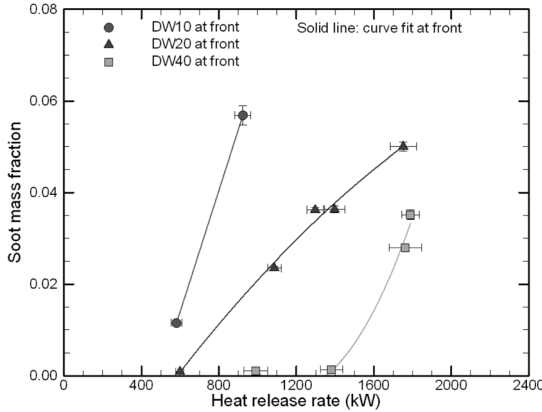


Fig. 6. Time-averaged soot mass fractions at the front sampling location as a function of heat release rate.

3.2. 총괄당량비를 통한 화재특성 예측

총괄당량비는 화재안전의 실용적 측면에서 CO 등의 독성물질 발생량을 예측할 수 있는 중요한 변수로서 인식되고 있다. 서론에서 언급되었듯이 기존의 총괄당량비의 개념 적용은 구획화재와는 유동패턴, 열 및 화학적특성이 다소 상이한 배기후드에서 검토되었다. 또한 총괄당량비는 구획 전체에 대한 거시적인 화재특성을 나타내는 반면, 온도 및 농도의 측정은 고온 상층부의 제한된 국부위치에서 주로 이루어진다. 따라서 구획화재에서 총괄당량비를 이용한 열 및 화학적특성에 대한 상관관계를 도출하기 위해서는 고온 상층부에서 국부당량비에 대한 정확한 측정이 선행되어야 하며, 동시에 국부당량비와 총괄당량비와의 상관관계에 대한 검토가 이루어져야 한다.

구획 내부에서 연료, 공기 및 생성물의 국부 혼합은 혼합분율(Z)에 의해 정량적으로 표현될 수 있으며, 그 식은 다음과 같다.

$$Z = Y_F + Y_{CO} \frac{MW_F}{xMW_{CO}} + Y_{CO_2} \frac{MW_F}{xMW_{CO_2}} + Y_{soot} \frac{MW_F}{xMW_{soot}} \quad (1)$$

여기서 MW_i 와 Y_i 는 각각 i 화합종의 분자량과 질량분율을 의미하며, 아래첨자 F 는 연료를 나타낸다. 또한 x 는 탄화수소연료의 탄소 원자수를 나타낸다. 이때 비예혼합 화염면에서의 이론 혼합분율(Z_{st})는 식 (2)와 같이 표현되며, 본 연구에 적용된 헵탄의 Z_{st} 는 0.0622이다.

$$Z_{st} = Y_{CO_2} \frac{MW_F}{xMW_{CO_2}} \quad (2)$$

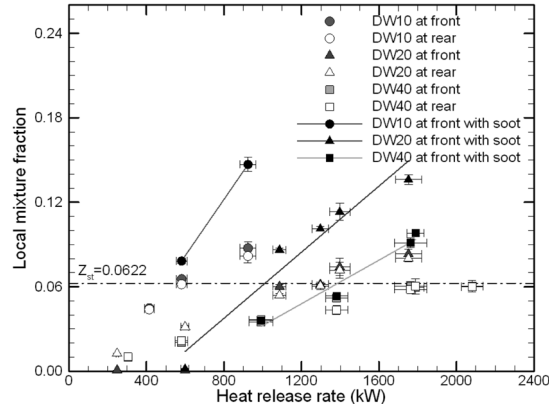


Fig. 7. Local mixture fractions at the front and rear sampling locations as a function of heat release rate.

Fig. 7은 발열량의 변화에 대하여 고온 상층부에서 측정된 국부혼합분율을 나타낸 것이다. 대부분의 화재연구에서는 국부혼합분율을 고려할 때 그을음 측정의 어려움으로 그을음의 생성량을 포함하지 않고 있다[14-16]. 따라서 식 (1)에서 그을음 생성량이 포함되지 않은 혼합분율을 도시하였다. 동시에 상층부 앞부분에서 측정된 그을음을 포함한 혼합분율을 나타내었다. 모든 출입구 폭에 대해서 국부혼합분율은 발열량이 증가됨에 따라 증가되는 결과를 보여준다. 그을음 생성이 고려되지 않은 경우에, 발열량에 대한 혼합분율의 증가율은 DW10이 가장 크며, 출입구 폭이 증가함에 따라 점차적으로 감소한다. 또한 DW 10, DW20 및 DW40의 경우에, 발열량이 각각 580, 1,085 및 1,780 kW일 때 혼합분율은 모두 Z_{st} 이하의 값으로서 과환기조건에 해당된다. 그러나 그을음의 정보가 포함되면, 위 발열량에서 혼합분율은 모두 Z_{st} 보다 크며 환기부족화재에 해당된다. Fig. 5~6에서 이미 확인되었듯이 위 발열량의 조건들은 많은 양의 불완전 연소생성물이 발생하는 환기부족화재에 해당된다. 즉 국부 혼합분율에서 그을음 정보의 포함은 구획 내부의 정확한 열 및 화학적특성을 예측하는데 매우 중요함을 확인할 수 있다 [12].

총괄당량비와 국부당량비의 관계를 확인하기 위하여 총괄당량비는 식 (3)에 의해 산정되었다.

$$\phi_g = (r_s / Y_{O_2,a}) \times (\dot{m}_f / \dot{m}_a) \quad (3)$$

위 식에서 r_s 는 이론반응식에 대한 산소와 연료의 질량비(≈ 3.52), $Y_{O_2,a}$ 는 외기 중 산소의 질량분율(≈ 0.233), \dot{m}_f 와 \dot{m}_a 는 각각 연료의 질량유량 및 내부로 유입되는 공기의 질량유량을 나타낸다. 본 실험에

서는 \dot{m}_a 의 측정이 이루어지지 않았기 때문에, 다음과 같은 경험식을 통해 고려되었다[17].

$$\dot{m}_a \approx 0.52A_o \sqrt{h_o} \quad (4)$$

여기서 A_o 와 h_o 는 출입구의 면적 및 높이를 의미한다. 위 경험식은 정상화재에서 최대로 유입될 수 있는 공기량을 의미하기 때문에, 다양한 범위의 발열량 조건에서 실제 유입된 공기량과는 큰 오차가 발생할 수 있다. 그러나 Fire Dynamic Simulator(FDS) [18]를 이용한 수치계산을 통해 각 발열량에 대한 \dot{m}_a 을 비교한 결과, 식 (4)에 의해 계산된 값은 과환기 및 환기부족조건에서 각각 최대 9.2%와 2.3%의 허용할만한 오차 범위에 존재함을 확인하였다[19]. 마지막으로 국부당량비는 국부혼합분율을 통해 직접 계산되었다.

Fig. 8은 모든 출입구 폭의 조건들에 대해 국부당량비의 계산 시 그을음 생성의 포함 여부를 따른 총괄당량비에 대한 국부당량비의 변화를 도시한 것이다. Fig. 8(a)에서 그을음 생성량이 포함되지 않은

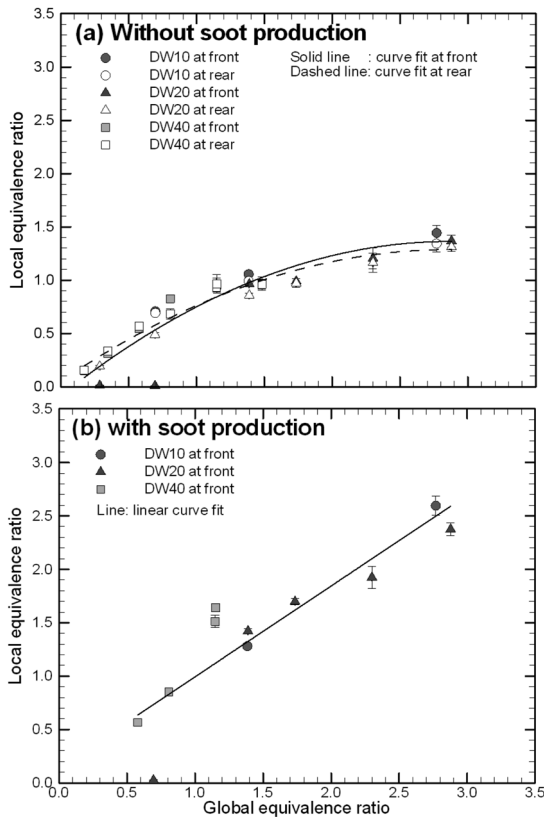


Fig. 8. Local equivalence ratios at the front and rear sampling locations as a function of global equivalence ratio.

경우에, 총괄당량비 증가에 따라 국부당량비의 증가 구배는 점차적으로 감소됨을 볼 수 있다. 반면에 Fig. 8(b)와 같이 그을음 생성량이 포함되면 총괄당량비가 증가함에 따라 국부당량비는 단위 기율기에 의해 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 위 결과는 그을음의 정보가 포함되었을 때 총괄당량비를 통해 고온 상층부의 국부적 열 및 화학적특성을 예측할 수 있다는 매우 중요한 결과를 암시하고 있다.

위 결과를 바탕으로 Fig. 9와 10은 넓은 범위의 환기조건에 대하여 총괄당량비에 따른 고온 상층부의 온도 및 화학종의 질량분율에 대한 상관관계를 도시한 결과이다. 이때 화학종의 질량분율은 그을음 생성량의 포함으로 인하여 Fig. 5의 값으로부터 재산정되었다. 그림에서 피팅 라인은 총괄당량비 1.15의 최고온도를 기준으로 과환기조건과 환기부족조건을 구분하여 도시되었다. 이러한 방법은 일반적으로 당량비 1.0 이상에서 감소되는 생성물의 열용량과 연소열에 의해 약간 과농한 조성에서 최대 온도가 발생되기 때문에 비교적 타당한 접근법으로 사료된다[20]. Fig. 9에서 총괄당량비가 1.0 미만의 과환기화재에서는 총괄당량비 증가에 따라 온도는 증가한다. 반면에 총괄당량비가 1.0 이상인 환기부족화재에서는 총괄당량비의 증가에 의한 불안전연소로 인하여 온도는 점차적으로 감소되는 현상을 잘 보여주고 있다. 또한 출입구의 폭 변화에 상관없이 온도는 과환기 및 환기부족조건에서 각각 총괄당량비에 의해 선형적인 상관식으로 표현될 수 있는 가능성을 확인할 수 있다. 다만 DW10의 경우에는 피팅 라인에서 상대적으로 큰 오차를 보이고 있는데, 이는 출입구 폭의 변화로 인한 내부 난류 유동구조의 변화[19], 연료와 공기의 혼합 및 열전달특성 변화에 의해 발생된 것으로 예측된다. 통계적인 관점에서 보다 다양한 실험조건 및 풍부한 실험결과를

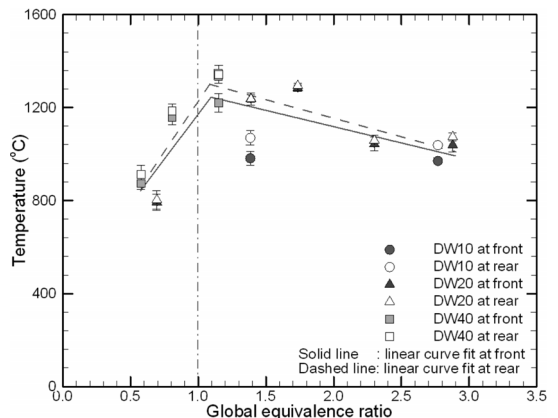


Fig. 9. Temperatures at the front and rear sampling locations as a function of global equivalence ratio.

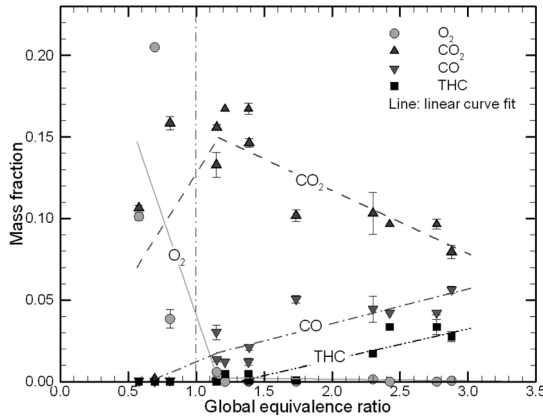


Fig. 10. Mass fractions of major species with the inclusion of soot production at the front sampling location as a function of global equivalence ratio.

바탕으로 이러한 문제점들은 부분적으로 개선될 수 있을 것으로 기대한다.

Fig. 10은 고온 상층부 앞부분에서 측정된 화학종의 질량분율에 대한 총괄당량비의 상관관계를 나타낸 결과이다. 총괄당량비 1.15를 기준으로 O₂, CO₂, CO, THC의 변화는 완전연소가 진행되는 과산화화재와 불완전연소를 갖는 환기부족화재의 특성을 잘 보여주고 있다. Fig. 8~10의 결과로부터 그을음 생성에 대한 정확한 정보가 고려될 때 총괄당량비와 고온 상층부의 국부당량비는 단위 기율기를 갖는 선형적 상관관계가 존재함을 알 수 있었다. 결과적으로 총괄당량비를 통해 넓은 범위의 환기조건에서 고온 상층부의 열 및 화학적특성에 대한 정량적 상관관계의 도출이 충분히 가능함을 확인할 수 있다.

4. 결론

실제 규모의 구획화재에서 총괄당량비와 열 및 화학적 화재특성과의 상관관계를 검토하기 위하여 넓은 범위의 환기조건에 대한 실험이 수행되었다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

유사한 발열량을 갖는 화재에서 출입구 폭의 변화는 화염면의 위치와 연소효율의 큰 변화를 초래하였다. 발열량 증가에 따른 환기부족화재의 개시는 출입구 폭에 상관없이 온도 및 열유속의 감소와 CO, THC 및 그을음과 같은 불완전 연소생성물의 증가를 동반하였다. 그러나 출입구 폭의 변화는 환기부족화재를 발생시키는 발열량값을 크게 변화시켰다.

고온 상층부의 국부혼합분율에 대한 정확한 예측을 위해서는 그을음 생성량에 대한 정보가 고려되어야 하며, 특히 환기부족화재에 그을음의 생성량은 구획 내부의 화학적특성에 큰 영향을 미친다. 또한

그을음 생성량에 대한 정보가 고려될 때 총괄당량비와 고온 상층부의 국부당량비는 단위 기율기를 갖는 선형적 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 위 결과를 바탕으로 고온 상층부의 국부적인 열 및 화학적특성은 연료유량 및 유입 공기유량에 의해 단순히 산출되는 총괄당량비에 의해 정량적으로 예측될 수 있음을 확인하였다. 향후 보다 다양한 화재조건 및 풍부한 실험데이터를 이용하여 실제 총괄당량비를 이용하여 구획 내부의 온도, CO 및 독성물질의 정량적 예측을 위한 상관식 도출에 관한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] N.P. Bryner, E.L. Johnsson and W.M. Pittz, "Carbon monoxide production in compartment fires - reduced-scale enclosure test facility", NISTIR 5568, NIST, Gaithersburg, MD., 2006
- [2] E.H. Yui, "Vent flows in fire compartments with large openings", J. Fire Protect. Eng., Vol. 17, 2007, pp. 211-237
- [3] J.G. Quintiere, B.J. McCaffrey and K. Den Braven, "Experimental and theoretical analysis of quasi-steady small-scale enclosure fires", Proc. Combust. Inst., Vol. 17, 1978, pp. 1125-1137
- [4] Z. Hu, Y. Utiskul, J.G. Quintiere and A. Trouve, "A comparison between observed and simulated flame structure in poorly ventilated compartment fires", Fire Safety Sci. - Proc. 8th Int. Symp., 2005, pp. 1193-1204
- [5] E.H. Yui, C.M. Fleischmann and A.H. Buchanan, "Experimental study of fire compartment with door opening and roof opening", Fire and Materials, Vol. 179, 2005, pp. 1527-1547
- [6] R. Kumar and M. Naveen, "An experimental fire in compartment with dual vent on opposite walls", Combust. Sci. Technol., Vol. 179, 2007, pp. 1527-1547
- [7] J.G. Quintiere, "Scaling applications in fire research", Fire Safety J., Vol. 15, 1989, pp. 3-29
- [8] C.L. Beyler, "Major species production by diffusion flames in a two layer compartment fire environment", Fire Safety J., Vol. 10, 1986, pp. 47-56
- [9] W.M. Pitts, "The global equivalence ratio concept and the formation mechanism of carbon monoxide in enclosure fire", Prog. Energy Comb. Sci., Vol. 21, 1995, pp. 197-237

- [10] D.T. Gottuk, R.J. Roby, M.J. Peatross and C.L. Beyler, "Carbon monoxide production in compartment fires", *J. Fire Protect. Eng.*, Vol. 4, 1992, pp. 133-150
- [11] 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, 2007, pp. 85-102
- [12] G.H. Ko, A. Hamins, M. Bundy, E.L. Johnsson, S.C. Kim and D.B. Lenhert, "Mixture fraction analysis of combustion products in the upper layer of reduced-scale compartment fires", *Combust. Flame*, Vol. 156, 2009, pp. 467-476
- [13] 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 under-ventilated compartment fires in an ISO 9705 room", NIST TN 1603, NIST, Gaithersburg, MD., 2008
- [14] W.M. Pittz, "The global equivalence ratio concept and the prediction of carbon monoxide formation in enclosure fires", NIST Monograph 179, NIST, Gaithersburg, MD., 1994
- [15] Z. Wang, F. Jia and E.R. Galea, "Predicting toxic gas concentrations resulting from enclosure fires using local equivalence ratio concept linked to fire field models", *Fire Materials*, Vol. 31, 2007, pp. 27-51
- [16] B. Andersson, F. Markert and G. Holmstedt, "Combustion products generated by hetero-organic fuels on four different fire test scales", *Fire Safety J.*, Vol. 40, 2005, pp. 439-465
- [17] D. Gross and A.F. Robertson, "Experimental fires in enclosures", *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 10, 1965, pp. 931-942
- [18] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, H. Baum, R. Rehm, W. Mell and R. McDermott, "Fire dynamics simulator (version 5) technical reference guide", NIST Special Publication 1018-5, NIST, Gaithersburg, MD., 2008
- [19] C.H. Hwang, A. Lock, M. Bundy, E. Johnsson and G.H. Ko, "Studies on fire characteristics in over- and under-ventilated full-scale compartments", *J. Fire Science*, Published online, 2010
- [20] S.R. Turns, "An introduction to combustion: concept and applications", 2nd Editions ed. Singapore: McGraw-Hill International Editions, 2000