

환기부족 구획화재에서 연소가스의 혼합분율 분석

고권현[†] · 김성찬^{*}중앙대학교 기계공학부·경일대학교 소방방재학부^{*}

Mixture Fraction Analysis on the combustion gases in the Under-Ventilated Compartment Fires

Gwon Hyun Ko[†] · Sung Chan Kim^{*}School of Mechanical Engineering, ChungAng University[†]School of Fire and Disaster Prevention, Kyungil University^{*},

요 약

본 논문에서는 ISO-9705 공간의 2/5 스케일 축소모형에 대한 화재 실험에서 측정된 고온 상층부의 연소가스 농도를 혼합분율 개념을 도입하여 분석함으로써 환기부족 상태의 실내화재에서 발생하는 연소생성물의 특성을 파악하고자 한다. 화재실 내부 고온 상층부의 두 지점에서 측정된 잔존 탄화수소, 일산화탄소, 이산화탄소, 산소, 수트(soot) 등의 성분비를 혼합분율의 함수로 내어 분석하였다. 또한 탄화수소 연료의 이상적인 반응에 근거한 상태 관계식과 비교함으로써 환기부족 화재에서 혼합분율 모델의 적용성을 분석하였다. 혼합분율 분석을 이용함으로써 측정된 수많은 데이터들을 화재 크기나 측정 위치에 상관없이 하나의 파라미터에 대해서 정리하여 전체적으로 분석할 수 있었다. 또한 혼합분율 분석에서 수트를 고려하는 것이 분석의 정확성을 크게 향상시킴을 확인할 수 있었다.

Keyword : Compartment fires, Under-Ventilated fires, Mixture fraction, Soot

1. 서 론

혼합분율(Mixture fraction)의 개념은 구획화재에서 연소특성의 분석에 유용하게 사용될 수 있다. 혼합분율은 측정된 화학종들을 분석하기 위한 일관성있는 기준으로 사용될 수 있으며 연소시스템의 특성을 전체적으로 파악하는데 매우 유용하다. 혼합분율은 연료에 근거한 성분(또는 성분조합)의 질량 분율로 정의될 수 있는데 이렇게 정의되는 혼합분율과 연소반응에 관계된 모든 화학종 간의 질량분율에 대한 관계식을 유도할 수 있다. 이러한 혼합분율에 근거한 연소모델은 FDS¹⁾ (Fire Dynamics Simulator)을 비롯하여 다양한

연소 및 화재 해석에서 널리 사용되고 있다. 혼합분율에 근거한 연소모델은 연소가 혼합 지배적(mixing-controlled)이고 연료와 산소의 반응이 매우 얇은 화염면(flame sheet)에서 발생한다고 가정한다. 이러한 가정은 충분한 산소가 지속적으로 공급되는 상태인 희박연소(fuel lean combustion) 또는 과환기화재(over-ventilated fires)에서는 적절하지만 산소의 공급이 부족한 상태에서 진행되는 환기부족 화재(under-ventilated fires)의 경우에는 적절하지 못하다. 환기부족 화재에서는 불완전연소가 진행되어 일산화탄소(CO)나 수트(soot) 등과 같은 물질들이 대량으로 발생될 수 있다. 일산화탄소는 화재로 발생하는 인명 피해의 주요 원인이며 수트의 경우에도 화재 상황에서의 대피 및 소방관의 활동을 방해하는 연기(smoke)의 주성분 중 하나이다. 따라서 구획화재에서 (특히 환기부족조건에서) 연소 화학종의 특성을 이해하는 것은 화재해석의 성능을 향상시키고 개선된 방재 및 피난 대책을 수립하기 위해 매우 중요하다.

화염의 해석을 위해 혼합분율을 사용한 것은 Bilger²⁾에 의해 시작되었으며 이후 Peters³⁾에 의해 개선되었고 향류 및 대향류의 층류화염의 분석에서 널리 사용되어져 왔다^{4,5)}. 화재는 근본적으로 난류의 특성을 지니며 특히 구획화재의 경우 제한된 공간적 특성, 환기 조건 등에 지배를 받는 매우 복잡한 특성을 지닌다. 그럼에도 불구하고 Floyd et al.⁶⁾은 혼합분율 개념이 화재의 전체적 구조에 대한 다양한 정보를 제공할 수 있음을 보였고 최근에 Zhou and Mahalingam^{7,8)}은 목재 열해리 가스-공기의 확산 화염에서 사용하기 위한 혼합분율 파라미터를 새롭게 정의한 바 있다. 한편 환기부족 상태의 구획화재에서, 수트의 형태로 존재하는 연료의 양은 혼합분율의 값에 큰 영향을 미칠 수 있다. 그러나 대부분의 혼합분율과 상태관계식에 대한 연구에서는 수트를 고려하지 않았으며 이러한 점은 환기부족 상태에서의 혼합분율 해석의 정확도를 크게 떨어뜨릴 수 있다. 최근 발표된 FDS의 새로운 버전¹⁾에서도 수트의 발생은 과환기 상태(over ventilated condition)에서 측정된 자료에 근거하는 경험적인 방식을 사용하고 있다. 따라서 저배기 상태의 연소가스 및 수트의 발생 특성에 대한 데이터를 축적하고 혼합분율 개념을 이용하여 그 특성을 파악하는 것은 화재의 해석기법의 개선을 위해서, 더 나아가 화재 방재 및 피난 대책의 개선을 위해서 매우 중요하다.

본 연구에서는 ISO-9705 공간의 2/5 스케일 축소모형에 대한 화재 실험으로부터 측정된 고온 상층부의 연소가스 농도를 혼합분율 개념을 도입하여 분석함으로써 저배기 상태의 실내화재에서 발생하는 연소생성물의 특성을 파악하고자 한다. 상층부 두 지점에서 측정된 다양한 연소가스 및 수트(soot) 등의 질량분율을 혼합분율의 함수로 나타내고 이상적인 반응에 근거한 상태관계식과 비교하여 혼합분율 모델을 평가한다. 본 연구를 통해 환기부족 구획화재의 연소 특성에 대한 데이터를 축적하여 물리적 이해를 돕고 수트를 고려한 혼합분율 분석의 특성을 평가하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 화재실과 환원

그림 1에서 보는 바와 같이, 실험 대상 화재공간은 0.98 m × 0.98 × 1.46 m 로써 ISO-9705 화재실을 40 % 크기로 축소한 모형이다. 화재실을 지지하고 변형을 최소화하기

위하여 프레임은 강철로 제작되었으며 프레임내부는 단열 재료를 이용하여 화재공간을 제작하였다. 축소 모형에 대한 표준 출입구 크기는 폭 0.48 m, 높이 0.81 m이다. 본 연구에서는 가스 연료인 메탄(CH_4), 액체 연료인 헵탄(C_7H_{16}), 고체연료인 폴리스티렌(C_8H_8)에 대해 해석한다. 메탄 화재와 헵탄 화재에 대해서는 한 변의 길이가 25 cm 인 정사각형 버너가 사용되었다. 화원의 내부형상은 역 피라미드 형태로써 화원의 측면이 경사지게 제작되어 연료의 깊이에 따라 표면적이 변화하도록 설계되었다. 화원의 깊이방향으로 설치된 열전대는 연료표면의 위치를 파악하는데 이용되었으며 외부에서 연료를 공급하여 표면적과 풀의 깊이가 일정하게 유지되도록 하였다. 고체 화재는 직경이 각각 60 cm 인 원형 팬에 폴리스티렌 고형분(pellets)은 채운 후 파일럿 점화(pilot ignition)를 통해 초기 발화를 유도하였다. 표 1에 화재 조건을 정리하였다. 메탄 및 헵탄 화재의 경우 화원에 공급되는 연료의 질량유량을 조절함으로써 화원의 크기를 조절할 수 있으며 미리 선정된 화원 크기에 이르러 일정 시간동안 준 정상 상태를 유지한 후 다음의 화원 크기로 변화시켰다.

2.2 측정 방법

발열량의 측정은 NIST의 화재 실험동에 설치되어 있는 3 m × 3 m 정사각 후드를 가진 산소소모 열량계를 이용하였다. 이 열량계의 순간 최대 측정 발열량은 1 MW이며 측정 불확실성(measurement uncertainty)은 연료의 물성을 알고 있는 경우 약 14 %이며 연료의 물성이 알려지지 않은 경우 약 20 %이다. 발열량은 산소소모법(oxygen consumption principle)에 의해 산정되었다⁹⁾.

그림 2에 나타낸 바와 같이 고온 상층부의 두 지점에 가스 및 수트에 대한 샘플링 탐침(sampling probe)과 온도 측정을 위한 흡입식 열전대가 설치되었다. 채워진 연소 가스에 대해서 산소 농도는 상자성 분석기(paramagnetic analyzer), 일산화탄소 및 이산화탄소의 농도는 NDIR(non-dispersive infrared) 분석기, 그리고 잔존 탄화수소연료의 농도는

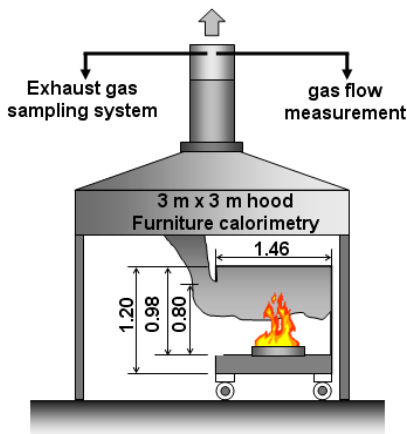


그림 1. 축소 모형과 산소소모 열량계 설치 개략도.

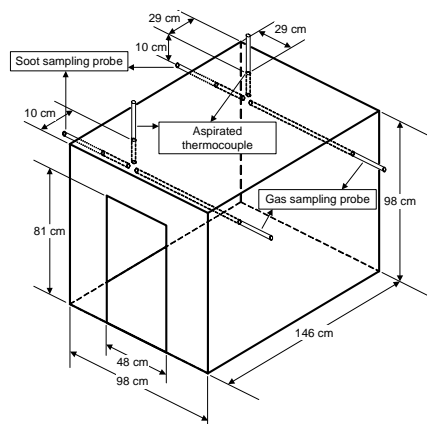


그림 2. 가스 샘플링 프루브 및 중량식 수트 샘플리 프루브, 흡입식 열전대를 포함한 축소모형의 투시도.

표 1. 테스트 케이스의 요약

No.	Fuel	Burner shape	Burner size	HRR* [kW]
1	methane	square	25 × 25 cm ²	75, 190, 75
2	methane	square	25 × 25 cm ²	265, 410, 180, 115, 75
3	heptane	square	25 × 25 cm ²	155, 270, 375
4	heptane	square	25 × 25 cm ²	150, 245, 340
5	polystyrene	circular	D = 60 cm	360, 310

* Nominal steady state heat release rate values from calorimetry measurements

FID(flame ionization detector)를 이용하여 분석하였다. 수트의 경우 중량식 샘플링 (gravimetric sampling) 방식을 사용하였다. 탐침을 통과하는 연소 가스를 필터에 통과시켜 수트를 채집하고 그 질량을 측정하고 샘플링 유량과의 비교를 통해 질량 농도 및 몰 농도를 얻을 수 있다. 측정 방식의 특성으로 인해 수트의 경우에는 Table 1에 나타난 준정상 상태의 값만을 얻었다. 보다 자세한 사항에 대해서는 참고문헌¹⁰⁾을 참조한다.

3. 혼합 분율 (Mixture Fraction)

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

$$Z = Y_F + Y_{CO} \frac{M_F}{x M_{CO}} + Y_{CO_2} \frac{M_F}{x M_{CO_2}} + Y_s \frac{M_F}{x M_s} \quad (1)$$

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 수트를 의미하며 수트의 분자량은 탄소의 분자량과 같다고 가정한다. 혼합분율에 대한 구체적인 정의는 다양하지만 그 결과는 대체적으로 유사하게 나타나게 된다. 다만 혼합분율에 관련된 이전의 연구들에서는 수트를 포함하지 않았기 때문에 식 (1)의 오른쪽 마지막 항이 무시되었다고 할 수 있다. 화학종 i 의 질량분율은 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 수트가 고려되지 않으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_x H_y + \eta(x + y/4)(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow \max(0, 1 - \eta)C_x H_y + \min(1, \eta)xCO_2 + \min(1, \eta)(y/2)H_2O + \max(0, \eta - 1)(x + y/4)O_2 + 3.76\eta(x + y/4)N_2 \quad (4)$$

여기서 η 는 당량비(equivalent ratio)의 역수, 즉 $\eta = 1/\phi$ 이다. 연료와 산소의 농도가 모두 영이 되는 화염면에서는 $Y_F = Y_{CO} = Y_S = 0$ 이므로 식 (1)은 다음과 같이 된다.

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

본 연구에서 사용된 메탄, 헵탄, 폴리스틸렌의 경우 stoichiometric 조건에서의 혼합분율은 각각 0.0554, 0.0622, 0.0705이다.

4. 결과 및 분석

그림 3은 시간 경과에 따라 측정되는 가스 화학종 농도 데이터를 혼합분율의 함수로 변환시키는 것을 보여준다. 그림 3(a)는 메탄 화재(test 1)의 상층부 후면의 측정 지점에서 O_2 , CO_2 , CO 및 UHC(unburned hydrocarbon)와 같은 연소 가스 화학종의 몰분율에 대한 측정 결과를 점화 후 시간에 따라 나타낸 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 화원에 공급되는 연료의 질량유량을 제어함으로써 화재의 크기를 조절하였다. 화재 크기에 따른 화학종 농도 특성을 살펴보는 데 있어서 비정상(transient) 변동의 영향을 최소로 줄이기 위해서 충분한 시간 동안 준정상상태를 유지하면서 측정을 수행하였다. 발열량(HRR)이 190 kW로 유지되는 동안만 UHC와 CO 가 발생되고 있으며 따라서 이때 화재실 내부가 환기부족(under-ventilated) 조건에 이르고 있음을 알 수 있다. 그림 3(b)는 측정 데이터를 식 (1)와

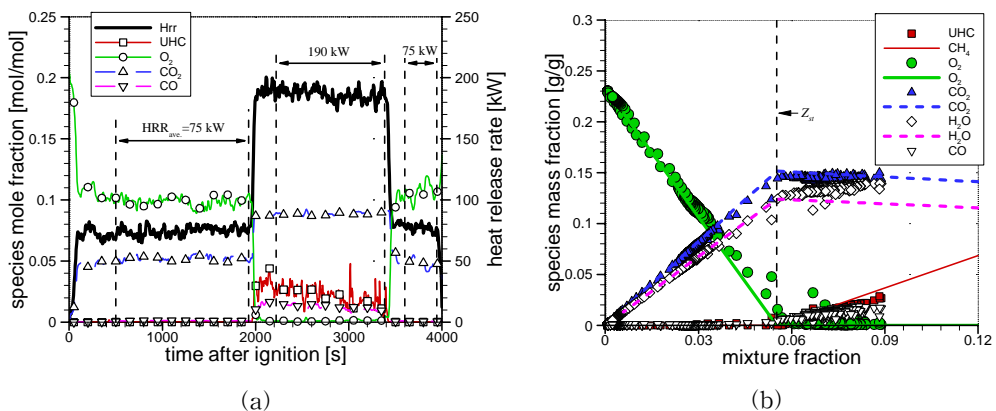


그림 3. Test 1에 대해 측정된 (a) 점화 후 경과된 시간에 따른 발열량(HRR) 및 가스 화학종의 몰농도 측정 결과와 (b) 측정 결과를 바탕으로 계산된 혼합 분율과 이에 따른 가스 화학종의 질량 농도 변화.

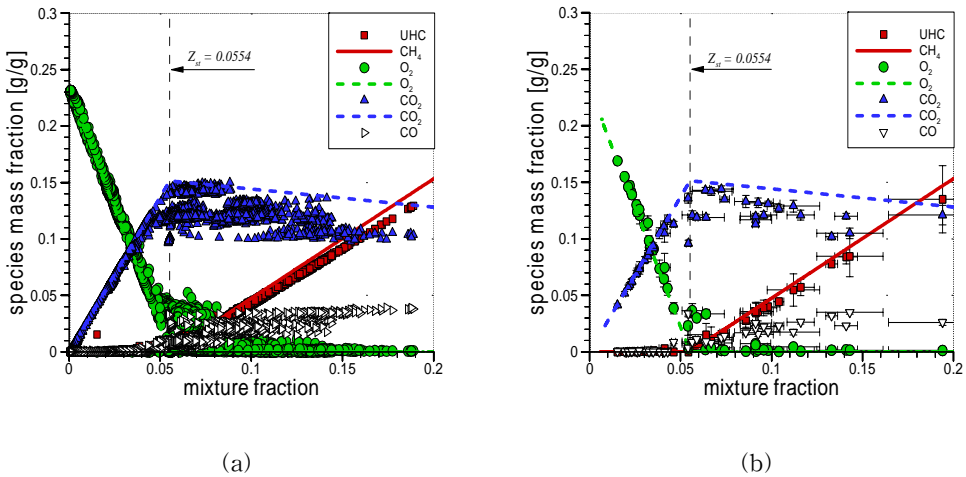
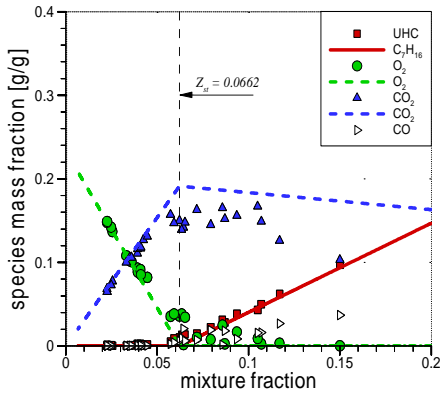


그림 4. Test 1과 2의 메탄 화재에 대해서 축소모형 상층부의 두 측정지점에서 측정된 혼합분율과 가스 화학종의 질량 분율: (a) 측정된 모든 데이터에 대한 결과, (b) 준정적 상태에 걸쳐 평균한 결과.

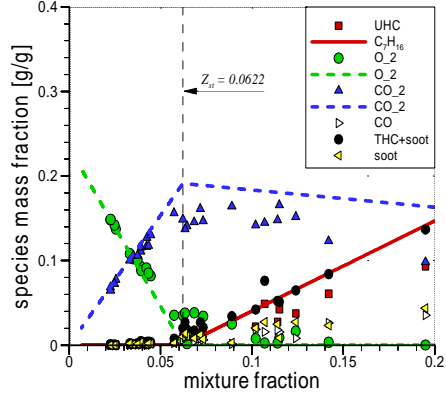
(2)를 이용하여 혼합분율에 대한 값으로 변환시킨 결과를 보여주고 있다. 이와 같은 변환을 통해 다양한 화재 크기(즉, 발열량)에 대한 연소 가스 농도 변화 특성을 혼합분율의 함수로 전체적으로 살펴볼 수 있다. 이후의 분석에서는 각 연료에 대해서 다양한 화재 크기 및 두 지점에서 측정된 모든 데이터를 혼합분율의 함수로 하나의 그래프로 나타내고 분석한다. 한편 그림 3(b)와 이후의 그림 4-6에 표시된 직선은 연료-공기의 이상적인 반응식에 근거하여 계산된 질량분율을 나타내고 있다.

그림 4(a)는 tests 1과 2의 메탄 화재에 대해서 측정된 모든 데이터 값을 혼합분율의 함수로 나타내고 있다. 다양한 화재 크기에 대해 상층부의 두 지점에서 측정된 수많은 데이터들이 몇 개의 선을 따라 배열되고 있음을 알 수 있다. 그림 4(a)에서 과환기 상태에서는 실험값이 이상적인 상관관계를 거의 정확히 따라가는 것을 확인할 수 있다. 그러나 혼합분율이 stoichiometric 값 이상으로 증가함에 따라, 즉 환기부족이 심화됨에 따라 측정된 질량분율과 이론값의 차이가 증가하고 있다. 이러한 환기부족 조건에서 특히 CO의 발생이 급격히 증가하고 있음을 확인할 수 있으며 그 값이 0.04 g/g에 이르고 이로 인해 CO₂가 이론값에 비해 20 %이상 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 4(b)는 준정적상태(그림 3(a)에 보여진 것과 같이 발열량이 일정한 상태)에 걸쳐 평균된 값을 표준편차와 함께 나타내고 있다. 수평 및 수직 에러 바는 각각 혼합분율과 질량분율의 표준편차를 나타낸다. 화재 크기가 커질수록 환기부족 조건이 심화되므로 혼합분율의 값이 커짐에 따라 오차가 증가하는 것은 화재 성장에 따른 불안정성에 의한 것으로 생각된다.

그림 5와 6은 각각 헵탄 및 폴리스틸렌 화재에 대해서 준정적상태의 질량분율을 혼합분율의 함수로 나타내는 데에 수트의 영향을 나타내고 있다. 수트를 고려하지 않았을 경우에 비해 전반적으로 혼합분율이 증가하며 특히 환기부족 조건에서 그 정도가 커지고 있다. 예를 들어 헵탄 화재의 경우 최대 혼합분율 값은 약 0.15 이지만 혼합분율을 고려하게 되면 0.2까지 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 폴리스틸렌 화재의 경우 수트를 고려하지 않은 그



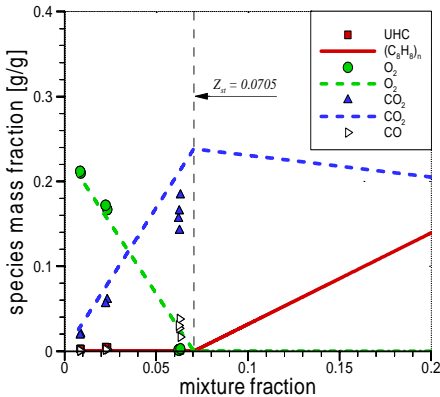
(a)



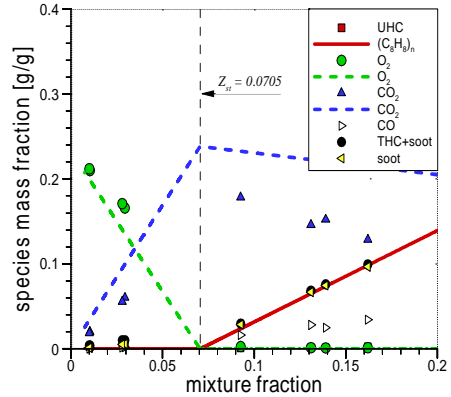
(b)

그림 5. Test 3과 4의 헵탄 화재의 경우 혼합분율에 대해 정리된 준정적 상태의 가스 화학종의 질량분율에 대해서 (a) 수트를 고려한 경우와 (b) 수트를 고려하지 않은 경우에 대한 비교.

림 6(a)만을 본다면 화재가 환기부족 상태에 이르지 않고 있다고 오관할 수 있게 된다. 그러나 그림 6(b)에서 확인할 수 있듯이 폴리스틸렌 화재는 환기부족 상태로 진행되었으며 최대 혼합분율의 값은 stoichiometric 값의 두 배 이상이다. 한편 그림 5(b)와 6(b)를 보면 잔존 탄화수소(UHC)의 값이 이론값에 비해 작으며 특히 폴리스틸렌 화재의 경우 거의 영에 가깝지만 UHC와 수트의 합은 이론값을 잘 따라가는 것을 볼 수 있다. 이것은 불연소 연료 성분의 상당량이 수트의 형태로 존재하며 폴리스틸렌 화재의 경우 대부분이 수트로 변환됨을 보여주는 것이다. 따라서 혼합분율 해석을 수행하거나 혼합분율에 근거한 연소모델을 이



(a)



(b)

그림 6. Test 5의 폴리스틸렌 화재의 경우 혼합분율에 대해 정리된 준정적 상태의 가스 화학종의 질량분율에 대해서 (a) 수트를 고려한 경우와 (b) 수트를 고려하지 않은 경우에 대한 비교.

용하여 화재해석을 수행하는 경우 수트가 혼합분율 값에 미치는 영향을 고려하는 것이 중요하며 특히 수트가 많이 발생하는 연료를 사용하거나 환기부족 조건에 이른 화재의 경우에는 수트를 적절히 고려하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 ISO-9705 공간의 2/5 스케일 축소모형에 대한 화재 실험으로부터 측정된 고온 상층부의 연소가스 농도를 혼합분율 개념을 도입하여 분석함으로써 저배기 상태의 실내화재에서 발생하는 연소생성물의 특성을 파악하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 혼합분율 개념을 활용함으로써 다양한 화재 크기에 대해 상층부의 두 지점에서 측정된 수많은 데이터들을 혼합분율의 함수로 전체적으로 파악하고 Stoichiometric 조건에서의 혼합분율 값을 기준으로 과환기 및 환기부족 조건을 구분할 수 있었다.

2. 환기부족 조건에서 메탄 화재의 경우 CO의 발생이 크게 증가하였으며 헵탄 및 폴리스틸렌 화재의 경우에는 CO와 함께 수트의 발생이 크기 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 특히 폴리스틸렌 화재의 경우 불연소 연료 성분의 대부분이 수트의 형태로 존재함을 알 수 있었다.

3. 수트를 고려함에 따라 혼합분율의 값이 증가하는 것을 알 수 있었으며 환기부족 조건의 판단을 변화시킬 수 있을 만큼 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 이를 통해 혼합분율 분석 또는 혼합분율에 근거한 연소모델을 활용함에 있어서 수트를 고려하는 것이 필수적이라는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. McGrattan K., Hostikka S., Floyd J., Baum H., Rehm R. (2007) NIST SP 1018-5, NIST, MD.
2. Bilger R.W. (1977) Combust Flame 30: 277-284.
3. Peters N. (1987) Prog Energy Combust Sci 10: 319-339.
4. Sivathanu Y.R., Faeth G.M. (1990) Combust Flame 30: 211-230.
5. Hamins A., Seshadri K. (1987) Combust Flame 68: 295-307.
6. Floyd J.E., Wiecek, C.J., Vandsburger, U. (2001) Simulation of the Virginia Tech Fire Research Laboratory Using Large Eddy-Simulation with Mixture Fraction Chemistry and Finite Volume Radiative Heat Transfer. 9th Int Interflam Conf.
7. Zhou X., Mahalingam S. (2001) Combust Sci Tech 171: 39-70.
8. Zhou X., Mahalingam S. (2003) Combust Flame 133: 197-199.
9. Parker, W.J. (1984) J Fire Sci 2: 380-395.
10. Bundy M., Hamins A., Johnsson E.L., Kim S.C., Ko G.H., Lenhart D.B. (2007) NIST TN 1483. NIST, MD.