

# 필드모델에서 연료소모에 기초한 화학적 화염높이 산정

김성찬

경일대학교 소방방재학과

## Estimation of Chemical Flame Height based on Fuel Consumption in a Fire Field Model

Sung-Chan Kim

Dept. of Fire Safety, Kyungil University

(Received March 18, 2016; Revised April 18, 2016; Accepted April 22, 2016)

### 요 약

본 연구는 필드모델에서 소모된 연료에 기초하여 화학적 화염높이를 산정하기 위한 방법을 검토하고자 한다. 높이 방향으로 HRRPUL의 누적값과 연료농도에 따른 계산 알고리즘을 FDS 해석결과에 적용하였으며 평균화학적 화염높이는 알고리즘을 적용한 순간화염높이의 시간평균을 통해 산정하였다. 연료농도에 기초한 평균화염높이는 HRRPUL의 누적값에 의해 계산된 화염높이와 10% 이내의 상향예측범위에서 일치된 결과를 보였다. 이러한 연구는 전산화재해석모델에서 정량적인 화염높이를 산정하고 보다 상세한 화재거동특성을 이해하는데 기여하고자 한다.

### ABSTRACT

The present study has been conducted to estimate the chemical flame height based on fuel consumption in fire field model. The calculation algorithms based on cumulative fraction of HRRPUL and fuel concentration along the z axis were applied to the results predicted by Fire Dynamics Simulator (FDS) version 6.3.2 and the mean chemical flame height was obtained by time averaging of instantaneous flame height with the algorithms. The mean flame height calculated by fuel concentration was quite well matched with that of cumulative value of HRRPUL within 10% over-prediction. This study contribute to a more detailed understanding of fire behavior and quantitative evaluation of flame height in the computational fire model.

**Keywords :** Flame height, Field model, Fire dynamics simulator, Heat release rate

## 1. 서 론

화재특성을 나타내는 주요 인자로 발열량(heat release rate, kW), 화재 플럼(fire plume)의 열유동장, 연소생성물의 종류 및 발생량, 화염 높이 등이 널리 알려져 있다. 그중에서 화염높이는 화원의 가시적인 거동 특성을 보여주는 대표적인 인자로 화재위험성 평가의 척도나 화재의 발달상태, 화재역학적 거동특성을 이해하는데 있어서 보편적으로 활용된다. 화염 높이를 평가하기 위한 다양한 방법이 시도되었으나 화염은 비정상적인(unsteady) 특성, 화염경계의 불명확함과 3차원 공간상에서의 기하학적 변형 등으로 인해 명확하게 정의하는 것이 쉬운 일은 아니며 화염높이 산정을 위한 표준화된 방법이 제시되고 있지 않아 연구자들마다 다양한 기준에 의해 화염높이를 산정하는 경향이 있다<sup>(1-3)</sup>.

화염높이는 화염의 경계를 정의하는 인자의 특성에 따라 가시화염높이(visible flame height), 열적화염높이(thermal flame height), 화학적 화염높이(chemical flame height) 등으로 구분되며 버너의 형태나 당량비 등에 따라 일정한 비율관계를 보이는 것으로 알려져 있다<sup>(3)</sup>.

화재분야에서 화염 높이에 관한 대부분의 연구는 화염의 가시적 조도(illuminance)를 영상장치로 촬영하여 임계값을 기준으로 화염높이를 산정하는 방법이 주로 사용되었다. 이러한 가시화염은 연료의 종류, 연소생성물의 조성, 화염의 강도, 주변광의 세기, 영상장치의 노출시간 등에 따라 영향을 받을 수 있다. Figure 1은 목재화재에 대해 임의시간에 촬영된 영상을 이진영상(binary image)으로 전환하여 화염높이를 평가하는 과정을 보여준다. 전체적으로 초기 촬영 영상과 이진영상은 유사한 형태를 보이고 있



Figure 1. Binary image processing to determine flame height for a wood crib fire.

나 국부적으로 이진영상을 얻는 과정에서 임계값의 설정 정도에 따라 국부적인 화염이 포함되지 않는 경우가 있어 산정된 화염높이는 차이가 날 수 있다.

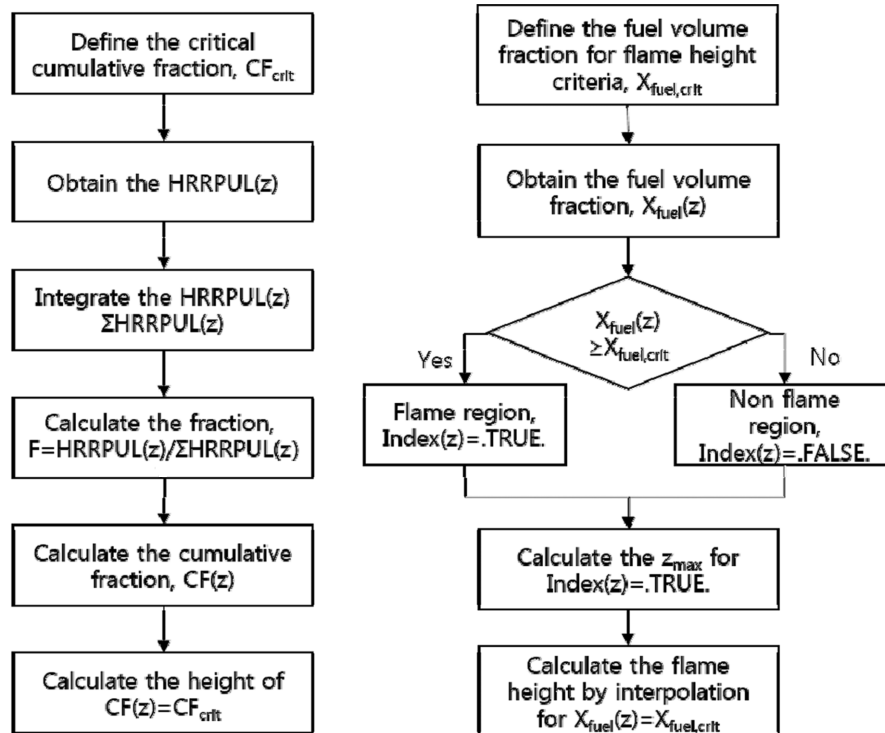
Zukoski 등은 가시영상의 높이에 따른 가시화염의 간헐도(intermittency)를 평가하여 화원으로부터 간헐도가 0.5 까지 감소하는 높이를 평균화염높이(mean flame height), 0.05까지 감소하는 높이를 최대화염높이로 간주하였다<sup>(4)</sup>. 즉, 임의시간에 촬영된 영상에 대해 대조비(contrast level)

에 따라 화염경계를 구분하고 주어진 시간동안 높이방향으로 화염이 존재하는 빈도를 계산하여 간헐도를 평가하게 된다. 화염높이에 관한 대표적인 경험식인 Heskestad 식은 이러한 가시화염의 평균화염높이에 기초하고 있다<sup>(5)</sup>.

$$h_f = -1.02D + 0.235\dot{Q}^{2/5} \quad (1)$$

그러나 필드모델과 같은 전산화재해석에서는 화염으로부터의 방사되는 가시광선 특성을 정량화 하는 과정이 용이하지 않기 때문에 화염높이를 평가하는데 어려움이 있으며 대안으로 해석결과의 물리량을 통해 화염높이를 유추하는 과정이 필요하다. 그중 화학적 화염높이는 공간상에 화학종의 분포로부터 화염높이를 산정할 수 있기 때문에 화염경계에 대한 정의가 명확한 경우 수치해석모델에서 적용이 용이한 장점이 있다.

화학적 화염높이는 주로 연료에 기초한 방법과 연소생성물에 기초한 방법으로 구분할 수 있는데 본 연구에서는 연료소모에 기초한 화학적 화염높이의 산정방법을 검토하여 계산알고리즘을 구성한다. 이를 바탕으로 FDS 모델을 이용하여 수치해석을 수행하고 계산알고리즘을 적용하여 평가된 화염높이를 비교하여 화학적 화염높이의 산정방법의 타당성을 평가하고자 한다. 이러한 연구를 통해 수치해석 모델에서 화염높이의 정량적인 평가를 도모하여 화재 위험성 인자로서의 활용도를 높이고 화재거동특성을 이해하는데 기여하고자 한다.



(a) flame height for 99% fuel burning

(b) flame height for  $X_{fuel}(z)=0.0005$

Figure 2. Algorithms of flame height calculation based on the concept of fuel consumption.

## 2. 화염높이의 산정

화염의 높이를 결정하기에 앞서 화염의 경계를 구분할 수 있는 변수의 선택과 임계값을 선정하는 것이 우선시 될 필요가 있다. 본 연구에서는 소모된 연료 양에 해당되는 발열량을 추적하는 방법과 화원으로부터 연료농도의 감소를 통하여 화학적 화염 높이를 산정하는 방식에 대해 논의하고자 한다.

### 2.1 연소된 연료량에 따른 화염높이

Hawthorne 등은 화원으로부터 방출된 연료의 99%가 연소하는 지점까지의 높이를 화염높이로 정의하였다<sup>(6)</sup>. Johansen<sup>(7)</sup>과 McDermott<sup>(8)</sup> 등은 평면 적분된 단위체적당의 발열량(HRRPUL)을 변수로 설정하고 높이 방향으로 적분된 HRRPUL에 대한 누적값을 통해 수치적으로 Hawthorne 등이 제시한 화염높이( $h_{f, HRR}$ )를 산정하였다.

$$HRRPUL = \int \dot{q}''' dx dy \quad (2)$$

$$\sum_{z=0}^{h_{f, HRR}} HRRPUL = 0.99 \cdot \sum_{z=0}^{\infty} HRRPUL \quad (3)$$

여기서  $\dot{q}'''$ 은 격자에서의 단위체적당 발열량( $\text{kW/m}^3$ ),  $dx dy$ 는 해당 격자의 미소 평면 면적( $\text{m}^2$ )을 나타내며 해석 영역의 크기는 화원에서 방출된 연료가 모두 연소될 수 있는 크기 이상으로 설정되어야 한다. Figure 2(a)는 임의시간에 대한  $h_{f, HRR}$ 의 계산 알고리즘을 정리하여 나타낸다.

### 2.2 연료농도에 따른 화염높이

Wade와 Gore 등은<sup>(9)</sup> 화원에서부터 화염의 중심축을 따라 연료농도가 0.05% 이하가 되는 위치까지를 화염높이로 정의하였으며 화염경계에 대한 연료 농도의 임계값은 실험에 사용된 계측장치의 최소 분해가능 측정값에 기초한 것으로 알려져 있다. Figure 2(b)는 연료의 체적분율에 기초한 화염높이( $h_{f, fuel}$ )를 계산하는 과정을 보여준다. 임의시간에 대한 비정상 화염은 부력과 유입유동의 상호작용에 의해 간헐성(intermittency)이 존재하는데 높이 방향으로 화원 위에 지속적으로 화염이 항상 존재하는 연속화염구간(continuous flame region)과 간헐화염(intermittent flame)이 존재하는 구간으로 구분할 수 있는데 본 연구에서는 연속화염부에서 화염편의 이탈이 발생하는 경우 임계값에 부합되는 최대높이를 화염높이로 간주하였다.

## 3. 화재 해석모델

필드모델에서 연소된 연료량과 연료농도에 따라 화염 높이를 산정하기 위해 Fire Dynamics Simulator (FDS) 6.3을 이용하여 수치해석을 수행하였다<sup>(10)</sup>. FDS 6.3의 기본 연소모델은 연료와 산화제의 반응과정이 무한히 빠르

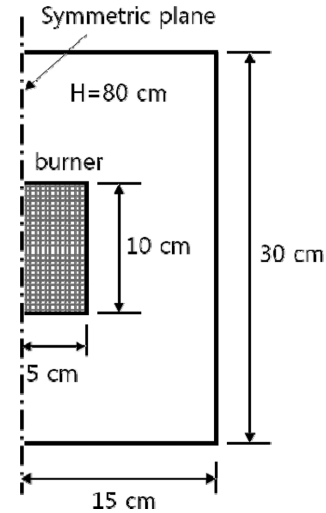
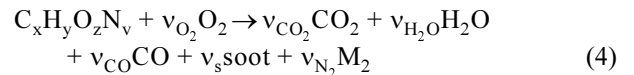


Figure 3. Schematic of computational domain.

게 일어나고 혼합과정에 의해서만 지배된다고 가정한 단순반응을 고려하고 있다. 단순반응모델(simple reaction model)에서의 연소반응식은 다음과 같다.



여기서  $v$ 는 화학종의 stoichiometric 상수를 의미하고, 연료의 화학식과 화염 후류(post-flame)에서의 CO 생성율, Soot 생성율 등을 적용하여 계산된다<sup>(11)</sup>. 반응하는 연료의 양은 주변조건에 따라 결정되기 때문에 공간상에서 소모된 연료의 양을 추적하여 화염높이를 산정하는 데는 큰 무리 없이 단순반응모델의 적용이 가능하다. Figure 3은 FDS 계산에 적용된 해석영역을 도식적으로 나타낸다. 화원은 한번의 길이가 10 cm인 프로판 버너로 가정하였으며 화원의 중앙단면에 대칭경계조건(symmetric boundary condition)을 적용하였다. 해석영역의 한 변은 30 cm, 높이는 80 cm 이고 측면과 윗면은 외기에 개방된 것으로 가정하였으며 바닥면은 벽 조건을 적용하였다.

일반적으로 화염의 높이는 식(1)에서 제시된 바와 같이 화원의 직경과 무차원 발열량의 함수로 알려져 있다. 본 연구에서는 화원의 물리적 크기는 고정하고 발열량 변화에 따른 화재거동을 해석하고 이에 대한 화염높이를 경험식과 비교하고자 한다. 화원에서 공급되는 연료의 양은 무차원 발열량을 적용하여 계산하였으며 화원의 직경과 발열량에 대한 무차원 발열량은 다음과 같이 계산된다<sup>(12)</sup>.

$$\dot{Q}_D^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}} \quad (5)$$

해석격자는 한 변의 길이가 5 mm인 정방형 격자를 적용하였으며 전체 해석영역에 대한 격자수는 약 700,000개 정도이다. 격자 해상도 지수는 화재의 특성길이( $L_c$ )를 분해하는 정도를 나타내며 다음과 같이 계산된다<sup>(13)</sup>.

**Table 1.** Fuel Mass Flow Rate with Non-dimensional Heat Release Rate for 10 cm C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> Burner and Mean Flame Height Calculated by Heskestad's Correlation

Case No.	$\dot{Q}_D^*$	$\dot{Q}$ [kW]	$\dot{m}_f''$ [kg/m <sup>2</sup> s]	$h_{f,(1)}/D$
1	1.00	3.51	0.0076	2.68
2	2.00	7.01	0.0151	3.86
3	3.00	10.52	0.0227	4.72
4	5.00	17.53	0.0379	6.02

$$\phi = \frac{L_c}{\Delta x} \tag{6}$$

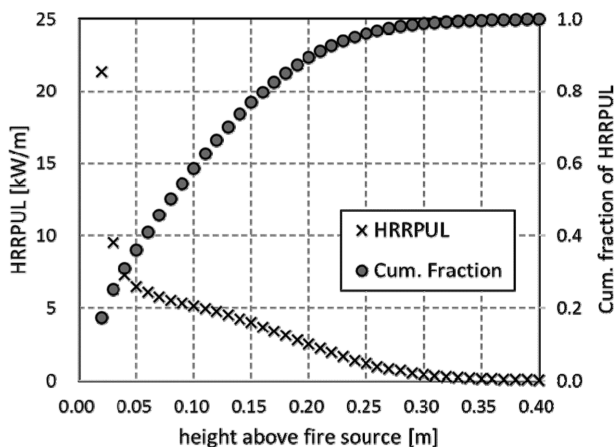
일반적으로 가장 널리 적용되는 특성길이는 화재 발열량에 대한 무차원 특성길이로 다음과 같다.

$$L^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \tag{7}$$

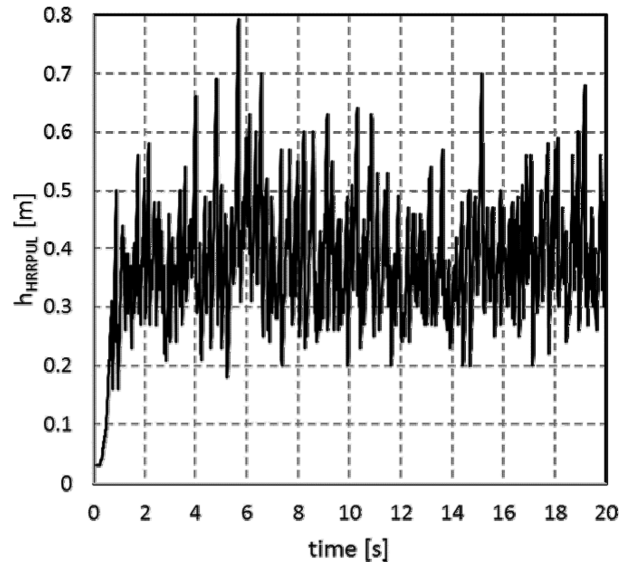
무차원 특성길이는 발열량에 따라 변화하기 때문에 해석에 적용된 격자가 5 mm인 경우 무차원 특성길이에 대한 격자해상도 지수는 20~45 정도이며 화원의 한 변의 길이를 특성 길이로 고려했을 경우 격자해상도지수는 20 정도이다. 외기에 개방된 프로판 화재의 경우 빠른 시간에 준정상상태에 도달하여 전체 계산시간은 30초로 설정하였다. Table 1은 해석대상에 대한 화원의 경계조건과 Heskestad 식에 의해 계산된 화염높이를 비교하여 나타낸다.

### 4. 해석결과

Figure 4는 화원의 면적이 0.01 m<sup>2</sup>이고  $\dot{Q}_D^*$ 가 1인 프로판 제트 화염에 대해 준정상상태 10초 동안 시간 평균된 높이 방향으로의 HRRPUL 값과 누적분율을 나타낸다. HRRPUL 값은 화원근처에서 매우 큰 값을 보였으며 높이 증가에 따라 감소하고 0.3 m 정도에서 거의 0에 도달하였다. 따라서



**Figure 4.** HRRPUL and cumulative fraction along the height for the case 1 ( $\dot{Q}_D^* = 1$ ).



**Figure 5.** Time history of the calculated flame height where the cumulative fraction of HRRPUL is 0.99 for the case 3 ( $\dot{Q}_D^* = 3$ ).

그 이상의 높이에서는 연료의 소진에 따라 연소반응이 존재하지 않음을 의미한다. HRRPUL을 적용한 방법은 비대칭적인 특성을 가지는 경우 화염의 기하학적 변형으로 인해 화염의 형상에 대한 정보가 없는 경우에도 해석영역의 평면에 대한 적분값을 통해 연소반응이 일어나고 있는 높이를 파악할 수 있는 장점이 있다. 그러나 화원에서 공급된 연료 중 불완전 연소에 의해 미연연료(unburned fuel)가 다수 존재하는 경우 화염높이 산정에 오류가 증가하는 문제가 있다.

Figure 5는  $\dot{Q}_D^* = 3$ 인 화원에 대해 앞서 제시된 HRRPUL의 누적분포가 99%인 지점을 기준으로 계산된 화염높이의 시간변화를 나타낸다. 화염 높이는 2초 이후 준정상상태를 보였으며 최대 약 0.8 m, 최소 0.2 m 정도의 큰 변동폭을 나타냈다. 전체적으로 평균 화염높이는 약 0.4 m 정도였으며 표준편차는 0.068 m 정도이다. 전체적으로 화원에서 공급되는 연료의 양이 증가함에 따라 이러한 섭동은 증가하는 경향을 보였으며 이는 간헐화염부에서 화염이탈에 따른 최대 높이가 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

Figure 6은  $\dot{Q}_D^*$ 가 각각 1과 3인 경우의 화원의 중심축 방향으로 연료농도를 비교하여 나타낸다. 중앙부 연료의 농도는 공급되는 연료의 양이 많을수록 높게 나타났다. 전체적으로 화원 상부의 연료 농도는 지수적으로 감소하는 경향을 보였다. 연료가 공급되는 화원 근처에서는 높이에 따른 연료 농도의 감소가 급격히 일어났으나 화원표면에서 멀어질수록 연료농도의 구배가 완만한 형태를 보였다. 화염높이 부근의 화염경계에서는 높이 변화에 따른 농도 변화가 상대적으로 작다는 것을 의미하고 이는 화염경계를 구분하는 임계값에 따라 화염높이의 계산이 상대적으로 크게 영향을 받을 수 있음을 의미한다.

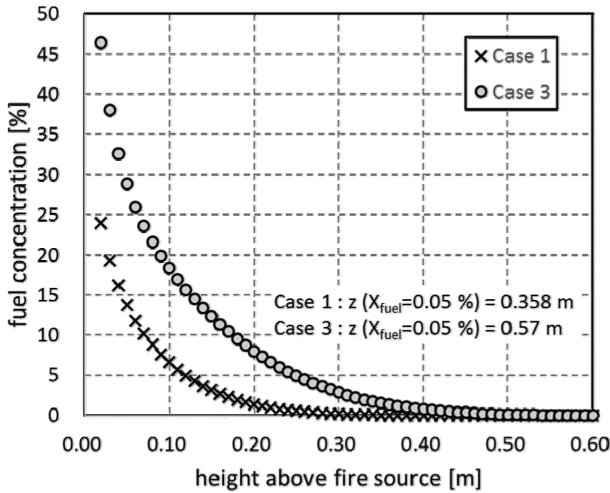


Figure 6. Fuel concentration along the height for the case 1 and 3 ( $Q_D^* = 1, 3$ ).

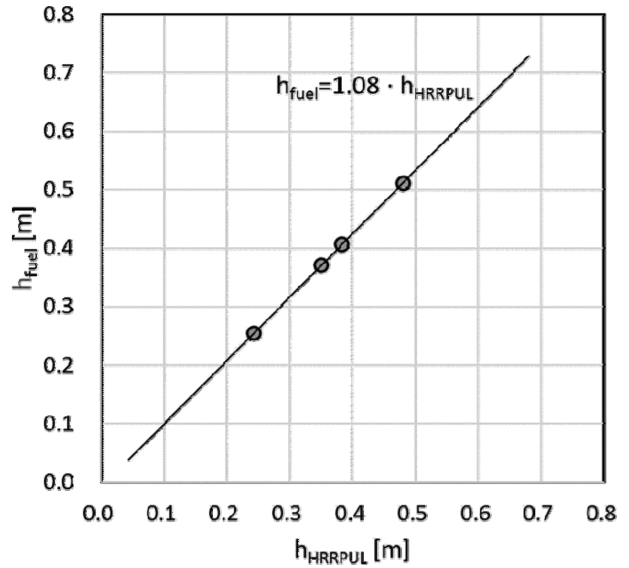


Figure 8. Correlation between flame height calculated by HRRPUL and fuel volume fraction.

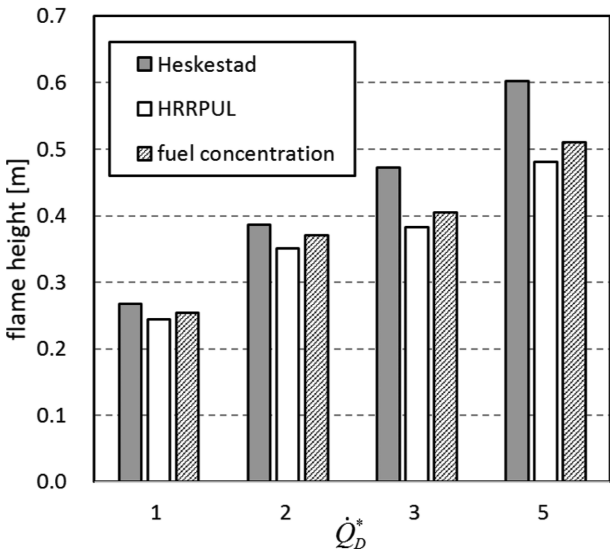


Figure 7. Comparison of flame height predicted by using Heskestad's formula, HRRPUL parameter and fuel concentration.

Figure 7은 HRRPUL과 연료농도 조건을 적용하여 계산된 평균 화염높이와 Heskestad식에 의한 화염높이를 무차원 발열량 변화에 따라 비교하여 나타낸다. Heskestad식에 의한 산정된 화염높이는 가시화염에 기초한 경험식으로 전체적으로 화학적 화염높이에 비해 높은 값을 예측하였다. 이러한 경향은 화염 높이가 가시화염, 열적화염, 화학적 화염 순으로 알려진 이전 연구결과와 잘 일치하고 있다<sup>(3)</sup>.

HRRPUL과 연료농도 조건을 적용한 화학적 화염높이는 무차원 발열량 변화에 따라 크게 변화 없이 5% 이내에서 거의 일정한 차이를 보인 반면에 Heskestad식에 대한 화학적 화염높이의 비는 무차원 발열량이 증가함에 따라 최대 20%까지 차이가 나는 것으로 나타났다.

Figure 8은 해석대상 조건에 대해 HRRPUL 조건에 의

해 계산된 화염높이와 연료농도조건에 의해 계산된 화염높이와의 관계를 나타낸다. 두 가지 방법에 의해 계산된 화염높이는 서로 잘 일치하고 있으며 연료농도에 의해 산정된 화염높이가 HRRPUL 조건을 적용하여 산정된 화염높이에 비해 평균적으로 8% 정도 높게 나타났다. 연료농도 기준(0.05%)은 임계값에 대한 근거가 명확한 근거가 없음에도 불구하고 HRRPUL 조건으로 계산된 화염높이와 비교적 잘 일치된 결과를 보여주었다. 또한 HRRPUL 조건을 적용한 화염높이 산정방법은 화염의 기하학적 변형에 대한 고려 없이 비교적 간단하게 화학적 화염높이를 산정할 수 있는 방법으로 필드모델에서 유용한 화염높이 산정방식이 될 수 있을 것으로 판단된다.

### 5. 결 론

본 연구는 화학적 화염높이에 대한 이해를 바탕으로 필드모델에서 정량적인 화염높이를 산정하기 위한 계산알고리즘을 구성하였으며 FDS 모델에 의해 계산된 결과를 후처리하여 화염높이를 평가하였다.

- 공급된 연료의 높이에 따른 소모량은 HRRPUL 변수를 통해 파악하였으며 누적값을 계산하여 99% 연료소모 화원 높이를 산정하였다. 임의 높이에서 발열량의 평면 적분값을 의미하는 HRRPUL 변수는 화염의 기하학적인 변형 정도에 관계없이 화염높이를 산정할 수 있는 유용한 변수로 활용될 수 있으나 공급된 연료 중 불완전 연소에 의해 미연연료(unburned fuel)가 다수 존재하는 경우 화염높이 산정에 오류가 증가할 수 있다.

- 연료농도값 기준( $X_{fuel} = 0.05\%$ )에 의한 화염높이 산정방법은 임계값에 대한 명확한 근거가 부족함에도 불구하고

하고 전체적으로 수용할 수 있을만한 결과를 보였으며 계산방법이 단순한 장점이 있으나 본 연구에 사용된 프로판 화염이외에 연료의 종류 및 연소조건에 따라 추가적으로 검토가 필요하다.

• HRRPUL에 의해 계산된 화염높이와 연료농도에 기초한 화염높이는 10% 이내에서 잘 일치하였으며 연료농도에 기초하여 계산된 화염높이가 다소 상향 예측된 결과를 제공하는 것으로 나타났다.

본 연구는 연료 소모 관점에서 화학적 화염높이를 평가한 연구로 향후 연소생성물에 기초한 추가적 연구를 수행하여 수치해석 모델에서 화염높이의 정량적인 평가를 도모하고 화재거동특성을 이해하는데 기여하고자 한다.

## 후 기

본 논문은 2015년도 국민안전처의 소방안전 및 119구조구급기술 연구개발사업의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다(2015-MPSS03-021)본 연구는 한국대학교의 지원을 받아 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

## References

1. B. J. Stratton, "Determining Flame Height and Flame Pulsation Frequency and Estimating Heat Release Rate From 3D Flame Reconstruction", MS Thesis, University of Canterbury (2005).
2. J. S. Newman and C. J. Wiecek, "Chemical Flame Heights", *Fire Safety Journal*, Vol. 39, pp. 375-382 (2004).
3. F. El-Mahallawy and S. El-Din Habik, "Fundamentals and Technology of Combustion", Elsevier Science Ltd., Oxford, UK (2002).
4. E. E. Zukoski, B. M. Ceegen and T. Kubota, "Visible Structure of Buoyant Diffusion Flames", *Proceeding of Combustion Institute*, Vol. 20. pp. 361-366 (1985).
5. G. Heskestad, "Luminous Heights of Turbulent Diffusion Flames", *Fire Safety Journal*, Vol. 5, pp. 103-108 (1983).
6. W. R. Hawthorne, D. S. Weddell and H. C. Hottel, "Mixing and Combustion in Turbulent Gas Jets", 3<sup>rd</sup> Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, Williams & Wilkins, pp. 266-288 (1949).
7. D. R. U. Johansen, "Implementation of Improved EDC Combustion Model in the Open LES Code FDS", Master's thesis in Process Safety, Univ. of Bergen (2011).
8. R. McDermott, K. McGrattan and J. Floyd, "A Simple Reaction Time Scale for Under-Resolved Fire Dynamics", *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Fire Safety Science*, pp. 809-820 (2011).
9. R. W. Wade and J. P. Gore, "Visible and Chemical Flame Height of Acetylene/Air Jet Diffusion", NIST IR 5904, National Institute of Standards and Technology (1996).
10. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Wenschenk and K. Overholt, "Fire Dynamics Simulator User's Guide", NIST Special Publication 1019, 6<sup>th</sup> Ed. (2014).
11. A. Tewarson, "Ch. 4, Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires", *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3<sup>rd</sup> Ed., pp. 3.82-3.161 (2002).
12. G. Cox, "Combustion Fundamentals of Fire", Academic Press Inc. (1995).
13. S. C. Kim, G. H. Ko and S. H. Lee, "On the Reliability of the Computational Fire Model Based on the Yield Rate Concept of Combustion Gases", *Journal of Korean Institute of Fire Science and Engineering*, Vol. 23, No. 4, pp. 130-136 (2009).