

Pool fire에서의 화염의 높이 계산에 관한 실험식의 비교연구

황운기*, 권창희**

*한세대학교 대학원 경찰학과 재난안전학전공

Comparative study of experimental equations on measurement of fire height on pool fire

Woon-Gi Hwang* , Chang-Hee Kwon**

*Department of Police and Disaster Safety Graduate school of Hansei University

Abstract

In this study, the height of the flame required to estimate the heat flow path and flame spread in pool fire has been applied by the empirical formula, but it is calculated without applying the pressure and temperature parameters of the fire room.

Until now, the height of the flame applied to pool fire was $l_F = 0.235Q^{2/5} - 1.02D$ in the Heskestad empirical formula, but accurate temperature calculation was not possible due to the temperature and pressure which are not influenced by the flame height. Therefore, applying the temperature and pressure around it can calculate the exact flame height, which can be applied to fire investigation and fire dynamics.

The structure of the flame is divided into a continuous flame, an intermittent flame, and a buoyancy flame, but it is assumed that the flame height is calculated from the visual aspect to the intermittent flame region, and the temperature of the buoyancy flame is very low.

The effect of heat of vaporization on the height of flame was investigated. The results showed that flame height was different according to the pressure and temperature around the fire room.

Keywords: Pool fire, Flame height, Fire plume, Intermittent flame.

1. 서론

화재성장과 열흐름에 관하여는 이미 1950년 FMRC(Factory Mutual Research Corporation) 영국 Brench에서 Fire Gas의 온도와 흐름(Temperature, Velocities)의 현상을 관찰하고 이를 NIST(National Institute of Standards and Technology)에 검토를 의뢰하게 되어 NIST의 Alpert와 Zabetakis등의 학자에 의해 1972년~1975년에 각각 3개의 실험결과를 발표하였다. 당시의 실험으로는 구획화재 위주의 실험을 하였으나 구획화재에서는 복합적인 고체가연물이므로

로 화염의 높이를 예측하는 것은 다소 어려움이 있었다. 그 후 Pool fire의 높이를 측정하는 시험으로 진행되었으며 전형적인 유출 액체 화재에서의 화염을 Pool fire라고 하며 모든 화염에서와 마찬가지로 흐름형태는 불의 성장을 지배하고 공급되는 공기는 가열되어 밀도 차이에 의해 부력이 발생되고 이어 계속되는 공기의 유입되는 과정을 Entrainment라 한다. 따라서 층류 화염을 제외하고는 인입되는 공기의 소용돌이에 의해 와류(vortex)가 생성되며 화염의 높이에 지대한 영향을 미친다.

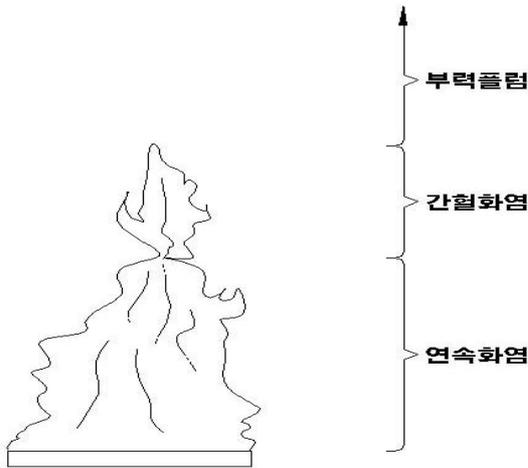
화염의 상승 높이는 부력이 0이 되는 지점까지이며

†Corresponding Author : Chang-Hee Kwon, Hansei University, 30, Hansei-ro, Gunpo-city, Gyeonggi-do, Korea

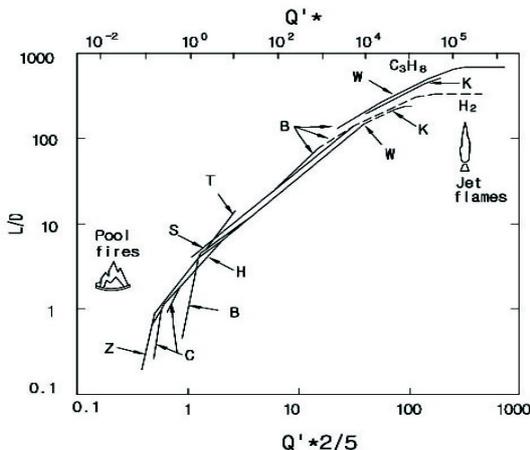
실제로 우리 눈에 보이지 않는 부분이며 이 부분을 부력화염이라 한다. 즉, 육안으로 관찰이 가능한 부분을 화염이라 하며 화염의 구분은 연속화염, 간헐화염, 부력화염으로 구분된다.

이러한 화염의 구조는 McCaffrey에 의해 0.3m의 정방형 버너위에서 형성되는 화재 플럼은 3단계의 구분 영역이 있음을 보여주었다.

화염의 구분은 액면화재의 바로 위 부분으로 지속적인 화염의 존재와 연소가스의 흐름을 가속시키는 곳으로서 연속화염 영역이며 화염 내부 온도는 800~1000°C가 되며 중간부분은 간헐적으로 화염의 존재와 소멸이 반복되는 영역으로 공기의 인입으로 화염의 온도는 낮아지고 불완전한 화염이 형성되어 비교적 온도가 낮은 화염영역으로 320°C정도이며 이 부분을 간헐화염 영역이라고 하며 간헐화염의 위 부분은 부력화염이라고 하며 높이에 따라 유속과 온도가 감소되어 밀도가 작은 유체는 유체의 점성력에 저항을 받게 되어 부력의 힘이 0이 되는 지점까지 상승된다.



[Figure 1] Flame Structure According to Height



[Figure 2] flame height correlations compiled by

$$McCaffrey \left(\frac{L_F}{D} : Q_c^{2/5} \right)$$

[Figure 1-2]는 화염 높이의 상관관계로서 McCaffrey의 시험결과를 나타낸 것이며 아래첨자가 없는 대문자는 학자를 의미하며(B : Becker 및 Liang, C : Cox 및 Chitty, H : Heskestad, K : Kalghatgi, S : Steward, T : Thomas, W : Hawthorne 연구팀, Z : Zukoski) 우측상부에는 Prude 수와 운동량이 큰 분출 화염 영역이 표시되었다. Heskestad가 제시한 부력화염 구간을 제외한 전체 발열량(Q) 범위를 다루고 있다.

2. Pool Fire의 높이 계산

이러한 화염의 높이를 결정하는 기본적인 변수는 자연 화재에 대한 수치해석을 적용하여 Heskestad, Thomas등에 의해 유도되었으며 관계식은 다음과 같다.

$$\frac{l_F}{D} = f \left(\frac{m}{\rho^2 g D^5 \beta \Delta T} \right) \dots \dots \dots (1)$$

여기서, l_F : 연료표면위의 화염높이

D : 연료층의 직경

m : 질량유속

ρ : 연료증기의 밀도

ΔT : 화염의 평균 초과 온도

g : 중력가속도

β : 공기의 팽창계수

$g\rho\Delta T$ 항은 부력과 관련되며 Grashof수의 분석에 이용되며 결국 식(1)은 열 방출속도가 $D^{2/5}$ 으로 Froude 모델링의 요소로 축소 환산되어야 한다.

위 식(1)로부터 Heskestad는 액면화재 관련 데이터를 이용하여 다음과 같이 정리하였다.

$$\frac{l_F}{D} = 15.6 N^{1/5} - 1.02 \dots \dots \dots (2)$$

여기서 무차원수 N은 수정된 Froude 수로 부터 유도되며 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$N = \left(\frac{c_p T_{\infty}}{g\rho^2 \alpha (\Delta H_c/r)^3} \right) \frac{Q_c^2}{D^5} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, C_p : 공기의 비열

$\rho\alpha$: 주변공기 밀도

T_{∞} : 주변공기 온도

ΔH_c : 연소열

r : 양론 혼합 공연비
 D : 액면 직경
 위의 식을 다시 정리하기 위한 변수는 기화열의 적용인테 기화열 [kj/Kg]이란 Lv로 나타내며 고체나 액

체 연료를 기화시키는데 필요한 복사열이 필요하고 기화열의 크기는 화염의 높이에 대한 중요한 변수로 작용한다. 물질별 기화열은 [Table 1-1]과 같다.

<Table 1> LV Material-specific value

fuel	Evaporation heat (Kj/Kg)	Remarks
Methanol	1230	Liquid combustibile : 1000Kj/Kg
Heptane	500	
Gasoline	330	
Wood	4000~6500	Male substance : 2000~6000Kj/Kg
Polyethylene	1800~3600	Thermoplastic : 1000~3000Kj/Kg

식(3)에서 $\frac{\Delta Hc}{r}$ 은 2,900~3,200Kj/Kg 범위를 유지하므로 3,000Kj/Kg으로 이를 다시 정리하면
 $l_f = 0.235Q^{2/5} - 1.02D \dots \dots \dots (4)$

에서의 실험식이므로 탄화수소계의 연소 주위온도와 압력에 따라서 적용할 수 있는 계산식이 필요하며 압력과 온도의 보정이 필요하다. 또한 [Table 1-2]와 같이 물질별 Lv 값은 각각 다르므로 일정한 값을 적용하지 않아야 한다.

3. 실험식의 특징

3.1 Heskestad 실험식

① Pool Fire에 대하여 화염의 높이를 실험하여 계산식을 수립하고 물질의 특성에 따라서 계수를 다르게 적용하여 일반적으로 사용할 수 있게 하였다. 계산식의 특징으로는 상온상압(NTP)상태(760mmHg, 293 ° K)

$$\textcircled{2} L_f = -1.02D + 0.235Q^{2/5}$$

여기서, D : 화염의 직경(m)

Q : 방출열량(Kw/m²)

0.235 : 계수로써 물질에 따라 다르게 계산되나, 일반적으로 0.235(Coefficient값)를 이용하므로 계산 시 보정이 필요하다.

<Table 2> Coefficient of hydrocarbon-based

Material name	Coefficient	Remarks
Acetylene	0.24 ~ 0.226	
Methyl alcohol	0.223	
Hydrogen compound	0.211	Applied to general material of hydrocarbon
Gasoline	0.2	

3.2 Moorhouse 실험식

LNG, LPG, Kerosene, 가솔린, 아세톤 등의 Pool fire에 대한 실험을 수차례 행하여 실험식을 수립하였으며 주로 대규모의 Pool fire로서 10m 높이에서 풍

속을 측정하여 시험한다.

$$\frac{H}{D} = 6.2 \left[\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.254} U_{10} \dots \dots \dots (5)$$

여기서, U_{10} : 10m 높이에서 측정된 풍속을 감안

한 무차원 수

- D : 화염의 직경
- H : 화염의 높이
- ρ : 공기밀도
- m : 단위면적당 질량 연소속도
- g : 중력가속도

3.3 Thomas 실험식

바람의 영향으로 고체물질의 연소 시 화염의 가시거리가 변화하게 되는데 바람이 없는 상황에서의 Turbulent Diffusion에 대한 실험을 Wood Crip을 이용하여 화염의 높이를 측정하여 실험하였으며 목재의 종류에 따라서 높이가 다르게 된다.

$$\frac{H}{D} = 55 \left[\frac{m}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.67} U \dots \dots \dots (6)$$

- 여기서, U : 무차원의 풍속
- D : 화염의 직경
- H : 화염의 높이
- ρ : 공기밀도
- m : 단위면적당 질량 연소속도
- g : 중력가속도

4. Heskestad 실험식을 이용한 불꽃의 높이 계산

4.1 조건

- ① Q = 500KW/m²
- ② D = 1.5m
- ③ 압력 : 760mmHg, 온도 : 293 °K K

4.2 압력 : 760mmHg, 온도 : 293 °K일 때의 높이 계산(NTP상태)

$$\begin{aligned} L_f &= -1.02D + 0.235Q^{2/5} \\ &= (-1.02 \times 1.5) + 0.235 \times 884^{2/5} \\ &= 1.83m \end{aligned}$$

4.3 압력 : 630mmHg, 온도 : 310 °K일 때의 높이 계산

-계수의 재계산

$$\begin{aligned} &(760/630)^{2/5} \times (310/293)^{3/5} \times 0.235 = 0.249 \\ &\text{따라서 화염의 높이를 재계산하면} \\ L_f &= -1.02D + 0.235Q^{2/5} \\ &= (-1.02 \times 1.5) + 0.249 \times 884^{2/5} \\ &= 2.23m \end{aligned}$$

5. 결론

모든 화재에서 격계 되는 화재의 성장은 발화시점에서 시작하여 연소가 확대되는 과정을 살펴보면 화염의 높이가 중요한 변수임을 알 수 있다. 이번 연구에서 열 전달에 의한 화염의 전파는 고려하지 않았으며 부력화염은 온도가 낮은 상태이므로 직접적인 화염 상부의 재 점화는 고려치 않는다고 가정할 때 Pool fire에 대한 Heskestad 실험식을 이용하여 실제 화염의 높이를 계산하는데 물질별 연소열 값이 다르게 적용됨을 알 수 있었다.

다만 혼합 가연성 액체는 기화열에 대한 Data가 없는 실정이므로 화재조사 등에 필요한 Data base의 구축이 필요하다.

우리가 지금까지 사용되어온 계산식은 온도나 압력이 보정되지 않은 상태이므로 정확한 화염의 높이를 알 수 없었다. 따라서 온도와 압력을 고려한 새로운 계산식을 통하여 계산되어야 하며 화재조사 및 화염의 확대과정을 이해하는데 많은 도움이 될 것으로 안다. 따라서 본 연구에서 “계산 예”를 통하여 다음과 같이 화염의 높이를 계산하였다.

NTP((Normal temperature and pressure) 조건에서 Q : 500KW/m², D : 1.5m, 압력 : 760mmHg, 온도 : 293 °K 일때 화염의 높이는 1.83m 이고 여기에 화재실의 압력 : 630mmHg, 온도 : 310 °K일 때의 높이를 재 계산한 결과 2.23m가 되었다.

6. References

- [1] SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition, 2-1~5
- [2] Publisher of CYBER (2009), "Combustion and fire dynamics" pp1-3, 10-96
- [3] G. H. Oh et al "Principle of fire Behavior" Book publishing of DongHwagiyeon pp150~151(2004)
- [4] C. U. Lee "New Fire Protection Engineering"

- Book publishing of Uije. pp1-175~ 177, 4-13
- [5] D. H. Hwang. Fire Protection Engineering Book publishing 119 Magazine, pp207~219
- [6] Heskestad, G. (1999). Turbulent jet diffusion flames: Consolidation of flame height data. Combustion and Flame, 118(1-2), 51-60.
- [7] Heskestad, G., & Dobson, P. H. (1997). Pool fires of transformer oil sinking into a rock bed. Fire Safety Journal, 28(1), 33-46.

저 자 소 개

황 윤 기



경기대학교 건설산업대학원 소방
도시방재학 공학석사 취득. 현재
한세대학교 일반대학원. 경찰학과
재난안전학전공 박사과정 중.
관심분야 : 압축공기포, 소방,
재난, 방재 등

권 창 희



동경도립대학교 도시과학 박사
취득. 현재 경기도정보화위원회
위원. 국민안전처 중앙평가단, 컨설
턴트. 한세대학교 안전재난연구소
소장. 한세대학교(학과장) 교수재
직 중.
관심분야 : 재난, U-Safety 등