

## 작은 풀화재에서의 화염 및 연소생성물

의의주, 안찬솔, 신현준, 오광철\*, 이은도\*  
한국건설기술연구원 \*한국과학기술원 기계공학과

### Flames and combustion products of a small scale pool fire

Eui-Ju Lee, Chan-Sol Ahn, Hyun-Joon Shin, Kwang-Chul Oh\*, Eun-Do Lee\*

*Korea Institute of Construction Technology(KICT)*

*Korea Advanced Institute of Science and Technology(KAIST)\**

#### 1. 서론

풀화재는 오랫동안 화재연구를 위한 기본 화염시나리오들 중의 하나이었으며, 이를 이해 하기 위해 수많은 연구들이 수행되어 오고 있다.<sup>1)-5)</sup> 풀화재는 직접적으로는 땅에 옆질러진 액체연료의 연소현상의 규명 뿐 아니라 간단한 형상의 축소 화염 실험에 대한 화염원으로 적용될 수 있다. 화염모델들의 특성들을 결정하는 규칙이 없기 때문에 실험도 실험은 최근 들어 식물화재를 정확히 모델링 하는데 흔히 사용된다. 그렇지만, 작은 스케일 역시 연소를 연구하는데 필요하며, 가끔은 터널화재 연구와 같이 막대한 실험비용이 예상되는 상황에서는 유일한 방법이 되기도 한다.<sup>6)</sup> 그러므로 화염역학 연구와 더불어 축소모델의 중요인자를 검증하는데 풀화재 연구의 중요성은 나타난다고 할 수 있다. 필요하다. 이것은 보다 진보된 축소모델을 개발하는데 기여할 것이다.

풀화재의 연소생성물인 연기에 대한 몇 가지의 정의가 있지만, 연소 시 발생하는 가스 와 매연과 같은 입자들도 포함하였다. 매연 입자는 화석연료가 under-ventilated 상태에서 완전 성장한 화염의 에너지원으로 사용될 때에 불가피하게 발생된다. 화재 상황에서 독성 가스를 흡입하게 되는 사고의 수를 줄이고 연소실을 보다 환경 친화적으로 만들기 위해서는, 그을음의 형성에 대한 연구에 많은 노력이 집중되어야 한다. 그을음이 연료로부터 발생하는 과정은 연료의 열분해, 다중고리 방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbon, PAH), 초기입자, 응집, 표면성장, 탄화, 응고, 그리고 산화와 같은 복잡한 화학적·물리적 단계로 구성되어 있다.<sup>7),8)</sup> 고체연소의 경우 독성가스는 HCL과 CO로 대표되지만, 풀화재의 경우 CO의 농도는 가장 중요한 사항이 된다.

이 연구에서는 등유 풀화재의 화염 구조와 연기의 특성에 대해 조사하였다. 주요 가스의 농도는 연소상태를 평가하고 인간의 행동에 미치는 영향을 고찰하기 위해 측정되었다. 광소멸법(laser extinction method)은 연기의 밀도와 매연의 양을 측정하기 위해 도입되었다. TEM 이미지를 이용한 그을음의 탄화를 평가하기 위해 열영동(thermophoretic sampling) 포

집이 수행되었다.

## 2. 실험방법

버너는 그림1과 같이 액체연료와 물을 담기 위한 동심원을 이루는 팬들(pans)로 구성되어 있다. 액체연료를 위한 팬 지름은 열방출율(heat release rates)을 변화시키기 위해서 15, 30, 45, 60mm 로 설치하였다. 팬은 가장자리 효과를 최소화 하기위해 테이퍼 가공하였다. 연료로는 가정용 보일러를 위해 판매되고 있는 일반적인 등유가 사용되었다. 두개의 연료 및 물 저장통은 팬에 담긴 연료와 물의 수위를 일정하게 유지하기 위해 사용되었다.

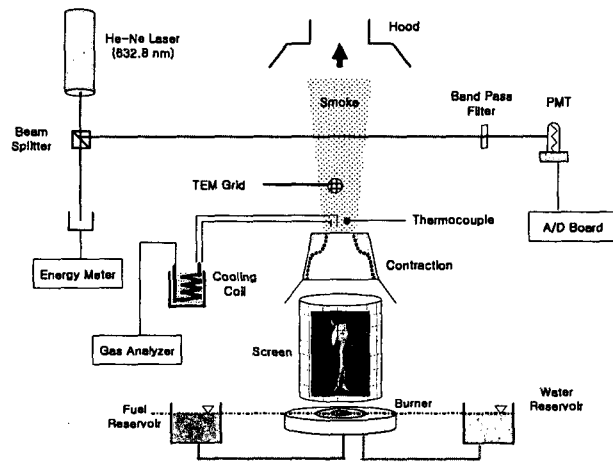


Fig. 1. Schematic diagram of the experiments.

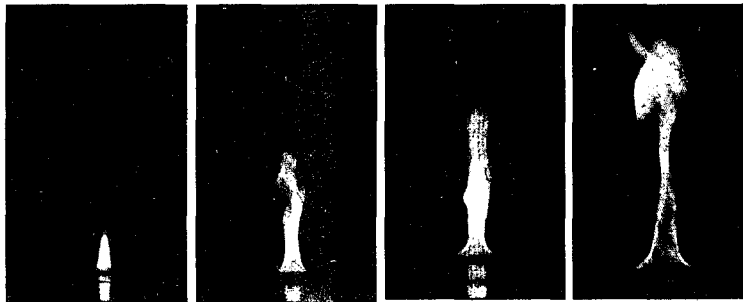
주위공기의 유입은 연기의 생성에 크게 영향을 미치므로, 실험에서는 자연 연소상태로 실행되었고, 주변으로부터 공기가 원활히 유입되고 그 흐름에 저항을 최소한으로 줄이기 위해 철망으로 제작된 스크린을 화염 주위에 설치하였다. plug flow와 같은 균일한 연기의 흐름을 얻고자 large contraction을 팬으로부터 1m 상부에 위치시켰고, 생성된 가스와 연기는 contraction의 바로 위에서 지름 80mm의 관으로 추출되었다.

또한, 그림 1에는 연소생성물에 대한 측정방법이 간략히 도시되었다. 먼저 광소멸법을 이용한 매연농도와 연기밀도 등을 측정하기 위해 He-Ne 레이저(632nm)와 광전자 증배관(photo multiplier tube)을 이용하였고, 화염에서 발생하는 빛에 의한 background noise를 최소화 하고 검출기의 앞에서 분산되는 빛을 제거하기 위해서 band pass filter (630nm)를 PMT의 앞부분에 설치하였다. 그리고 TEM grid를 이용하여 열영동 포집을 하여 morphology를 관찰하였다. 이때, 공압 피스톤을 이용하여 그리드를 연기 내에 1초 이하로 체류시켰고, 피스톤 속도는 1m/s로 하였다. 전자현미경은 측정범위 22K-1,350K의 STEM(Scanning Transmission Electron Microscope, Philips Tech. F20)을 사용하였다. 화재 시 인간이 행동하는 습성이 중요한 것과 같이 연소효율을 규정하기 위해 연기를 구성하는

여러 가스의 농도를 조사하는 것 또한 중요하다. 생성된 가스는 quartz sampling probe로 포집하였고, 가스분석기(Horiba, PC250)를 사용하여 CO, O<sub>2</sub>와 CO<sub>2</sub>의 농도를 분석하였다.

### 3. 결과 및 토의

팬의 지름에 따른 등유 풀화재 형상을 그림 2에 나타내었다. 풀화재의 경우, 주요 작용력은 부력이며 이로 인해 화염의 구조는 매우 복잡해지고 제트화염에 비해 외부의 교란에 쉽게 영향을 받는다. 작은 크기의 화염은 그림 2(a)에 보이는 바와 같이 기본적으로 층류이지만, 팬의 지름이 커질수록 난류로 변화한다. 4가지 지름에서 화염을 조사한 결과에 의하면 천이는 15-30mm 사이에서 발생하였다. 일단 난류가 발생하게 되면, 그림 2(b)-(d)에서와 같이 large eddy 운동이 활발해 진다.



(a) D=15mm      (b) D=30mm      (c) D=45mm      (d) D=60mm

Fig. 2. Direct pictures of kerosene pool fires: D is pan diameter.

화염의 길어짐 및 flickering과 같은 풀화재의 전반적인 성질은 두 가지의 열전달 작용에 기인한다. 첫 번째는 팬의 둘레를 감싸고 있는 물과의 열 전도현상이다. 실험에서는 연료와 물을 담은 두 팬의 깊이를 동일하게 2cm로 설계하였다. 팬의 수위가 2cm에 가까워짐에 따라 물과의 열교환이 많아지고 이로 인한 연료의 증발량은 감소하였다. 다른 작용은 연료의 양이다. 연료의 양이 적어지면 스테인레스 팬으로 대량의 열전달이 발생하게 되므로 팬 근처에 있는 연료의 온도는 낮아진다. 이번 연구에서는 냉각수에 의한 전도 현상 보다 풀 크기에 의한 영향이 훨씬 지배적이라는 사실을 관찰하였고, 연료의 양을 최대한 유지시켜 줌으로써 이런 영향을 최소한 줄일 수 있었다. 그러나, 위 두 가지 열전달 작용은 풀화재를 특징지우는 중요한 현상이므로 향후 보다 효과적인 제어방법이 연구되어야 할 것이다.

그림 3은 실험을 통해 측정된 화염의 높이를 평균한 값과 이론<sup>3)</sup>에 근거하여 예측한 화염의 높이를 나타낸다. 부력이 지배적인 화염에서는 식(1)로부터 화염의 평균 높이를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{L}{D} = -1.02 + 3.7Q^{2/15} Q^* = \frac{Q}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g D D^2}}, \quad (1)$$

평균 화염의 높이는 연소반응이 완료되고 풀름이 발달되기 시작할 때 화염의 상태를 표시하는 중요한 척도이다. 그림 3은 화염 높이가 열방출율  $Q^*$ 에 비례하여 증가함을 보이고 있다. 예외적인 경우로, 열방출율이 가장 많은 경우에서의 화염높이가 맞지 않는 것은 이 구간에서의 화염이 층류이기 때문에 부력을 갖는 난류 구간에서 사용되는 관계식 (2)에 적용될 수 없기 때문이다. Heskestad 관계식은 비록 풀화염의 높이 변화율을 이론적으로 잘 일치시키고 있지만 그 값은 모두 초과예측하고 있다. 실험과 이론 간의 차이는 화염 높이에 대한 정의와 등유의 연소율 계산에서 발생하는 것으로 보인다. 등유의 연소율  $Q^*$ 를 계산하기 위해 상수(= 43.2MJ/kg)가 사용되었다. radiative regime에서, 대부분의 유기성 액체연료의 단위면적당 연소율은 두개의 실험적 상수값(extinction-absorption coefficient와 mean beam length corrector)과 비교적 잘 일치한다. 따라서 연소율이 팬 지름에 영향을 받지 않고 일정한 값을 갖는 연료를 사용할 것을 가장 추천한다.1) 그렇지만, 부피에 대한 지름비가 큰 팬의 경우 열 전도율이 더 높기 때문에, 작은 크기의 풀은 연소율이 보다 작아지도록 영향을 미칠 것이다.

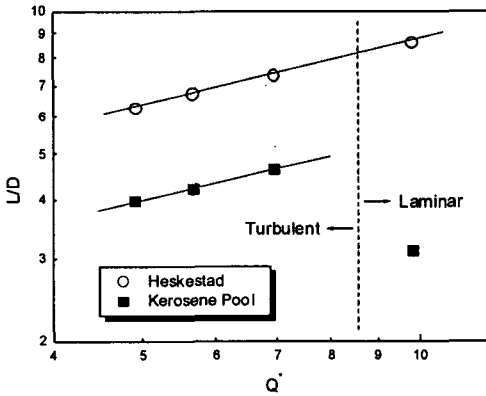


Fig.3 Averaged flame heights measured from digital camera and predicted from Heskestad correlation.

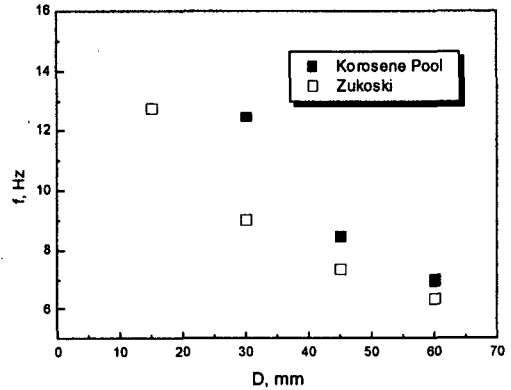


Fig.4 Mean flickering frequencies measured and predicted with Zukoski formulation.

부력확산성 난류화염은 주기적으로 반복되는 간헐(intermittency)현상을 보인다. 이러한 flickering 주기는 팬의 지름이 30mm 에서 60mm로 증가할때 12.5-7 Hz의 범위로 측정되었다. Zukoski9)는 식(2)를 제안하였으며 실험으로 얻어진 값은 계산값 보다 약간 높은 주기를 나타내었고, 팬의 지름이 작아질수록 그 차이는 증가하였다.

$$f(\text{Hz}) = (0.50 \pm 0.04)(g/D)^{1/2} \quad (2)$$

화재 대피와 연소 현상에 유용한 정보가 되는 가스의 농도를 얻기 위해 연소 생성물을 포집하였다. 주요 성분으로 CO, CO<sub>2</sub> 그리고 O<sub>2</sub>의 3가지 가스가 조사되었으며 측정된 결과

는 표 1과 같다. 이때 NO<sub>x</sub>의 경우 발생량이 매우 미미하여 측정이 불가능 했으므로 제외 하였다.

Table 1. Selected gas concentrations of pool fires and corresponding temperature.

Dia. (mm)	Q (KJ/m <sup>2</sup> s)	O <sub>2</sub> (%)	CO <sub>2</sub> (%)	CO (ppm)	Temp. (°C)
15	0.29	20.79	0.25	0.1	42.6
30	1.19	20.58	0.38	5	59.6
45	2.67	20.40	0.52	10	99.8
60	4.76	20.08	0.74	12	102.4

측정된 CO의 농도는 팬의 지름이 커짐에 따라 증가하였고, 화염이 층류에서 난류로 전이하는 과정에서 극적으로 변화하였다. 하지만, 화염과 풀름을 따라 공기가 자유롭게 유입되는 자유 연소상태에서 연소 생성물의 양적 농도는 인간을 죽음에 이르게 하는 주요 원인이 되지 못한다. 또한 CO<sub>2</sub> 농도는 모든 경우에 대해 1% 이하로 측정되었고, 총 열방출을 보다 오히려 팬의 지름에 비례하였다. 연료의 과공급 상태에서는 연료의 탄소성분이 CO를 발생하는데 소모되어 CO<sub>2</sub>의 농도는 적어졌다. 따라서, CO/CO<sub>2</sub> 비율은 반응 완료의 지표로 사용될 수 있다. 반면, 연소과정에서 소모된 산소는 대기에서 공급된다. 실험결과는 20-21% 사이의 농도가 측정되었으므로, 연소와 더불어 농도가 감소하지만 그만큼 주위공기에서 유입됨을 알 수 있다.

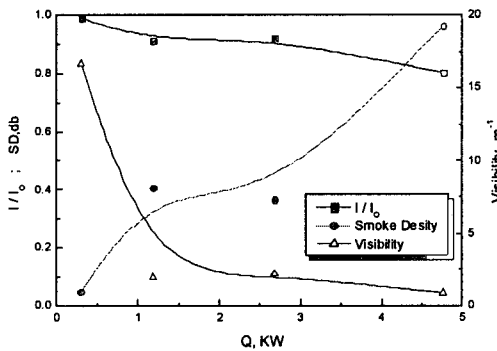


Fig. 5 Smoke density and visibility based on the reduction ratio of laser intensity.

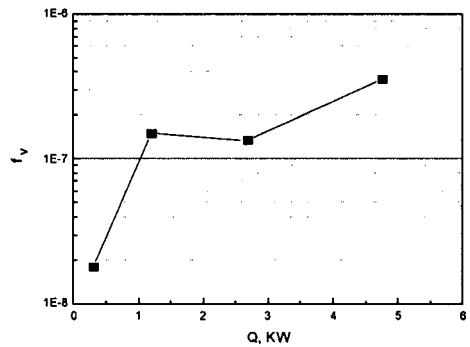


Fig. 6 Soot volume fractions with different heat release rates.

실제상황에서 화재안전의 가장 중요한 사항 중 하나는 화염의 발전에 따른 연기의 특성을 예측하는 것이다. 그렇지 않으면 탈출과 소화체제는 적절히 계획될 수 없기 때문이다. 일반적으로 화염에서 발생하는 가시적인 연기의 양을 광학밀도(optical density)로 평가한다. 두 지점 사이에 존재하는 연기의 광학 밀도는 두 지점의 거리 L과 연기의 특성인 소멸지수(extinction coefficient) K<sub>ext</sub>의 값과 상관된다. 이 값들은 다음식 Bouguer-Lambert-Beer Law와 관계 있으며,

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-K_{ext}L) \quad (3)$$

여기서  $I/I_0$ 는 빛이 연기를 통과 하면서 발생하는 광강도(light intensity)의 감소율이다. 그렇다면, 광학밀도는 다음식과 같이 정의된다<sup>4)</sup>

$$D = -10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (4)$$

그림 5는 광강도, 광학밀도, 가시도의 감소율을 나타낸다. 물체에 반사된 빛의 가시도(visibility)는 단위길이당 광학밀도에 역수에 비례하고 비례상수는 약 10 이다. 부력을 받는 화염의 경우, 비교적 적은 열방출율에서 연기밀도는 거의 일정하다. 하지만 60mm 지름의 풀화염에서는 극적으로 증가하였다. 가시도 역시 열방출율이 증가함에 따라 감소하였다. 위 가시도에 관한 정의는 빛을 반사하는 물질에 대해서만 유효한데, 탈출표지판과 같이 빛을 발산한다면 가시도는 약 2.5배 증가된다.<sup>4)</sup> 그림 6은 열방출율의 증가에 따른 매연입자의 부피분율을 나타내며, 그 차수는 역확산 제트화염과 유사하다.<sup>10)</sup>

그림 7은 2m 높이에서 수집된 매연입자의 TEM 이미지를 나타내고 있으며, 표 1에서와 같이 온도와 상관관계가 있음을 보이고 있다. TEM 이미지 (a)는 15mm 풀화염에서 얻은 것으로 30mm에서 얻은 (b)보다 더 무정형적(amorphous)이고 매연의 입자는 선구물질(precursor soot)에 가깝다. 큰 풀의 경우인, 그림 7(c)와 그림 7(d)는 그림 7(b)의 것과 유사하다. 이 사실은 풀화염의 post flame region에서는 매연의 성장이 이미 이루어졌다는 것을 의미한다. 이 이미지와 제트 화염과 비교하면, 매연의 입자가 일반적인 확산 화염보다 전기 빛에 더 투명하고 역확산 화염에서 배출된 그을음과 유사한 것은 매우 흥미로운 사실이다. 또한 입자의 크기는 팬의 지름이 증가함에 따라 약간씩 증가하였다. 이러한 그을음 입자의 성장은 그림 2에서와 같이 길어진 화염의 높이가 매연이 성장하도록 체류시간(residence time)을 증가시키기 때문으로 판단된다.

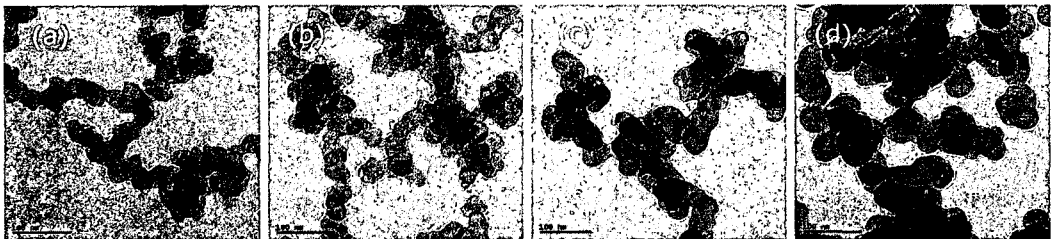


Fig.7 TEM images of soot sampled from exhaust of pool fires. (a) D=15mm, (b) D=30mm, (c) D=45mm and (d) D=60mm.

#### 4. 결론

1. 실험적으로 풀화염 높이는 이론적 상관관계 증가율은 잘 일치하지만, 정량적으로는 과대예측되었다. 실험과 이론의 차이는 등유의 연소율에 주요 원인이 있을 것으로

- 추측되며, 작은 크기의 풀화염은 적은 연소율이 적용 되어야 한다.
2. 이산화탄소의 발생과 산소의 소모는 풀화염의 열방출율에 비례하지만, 일산화탄소의 발생에 대한 경향성은 없다.
  3. 보다 정확한 연기의 광학농도를 측정하기 위하여 광소멸법을 도입하였으며, 정확도를 증가시키기 위해 단색광을 사용하였고 산란광을 제거하였다.
  4. TEM 을 이용하여 매연의 형상을 관찰하였으며, 등유 풀화염에서 발생한 매연입자들은 자연 연소조건임에도 불구하고 역확산 화염의 매연과 유사함을 관찰하였다.

## 참고문헌

1. Babrauskas, V. (2002) Heat Release Rates, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA.
2. McCaffrey, B. (1995) Flame Height, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA.
3. Heskestad, G. (1983) Fire Safety Journal, 5, 103.
4. Drysdale, D. (1985) An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Sons Ltd.
5. Karlsson, B. and Quintiee, J. G. (2000) Enclosure Fire Dynamics, CRC Press Ltd.
6. PIARC Committee on Road Tunnels (1999) Fire and Smoke Control in Road Tunnels.
7. Bockhorn, H. (1994) Soot formation in Combustion, Mechanism and Models. Spring Verlag, Berlin.
8. Glassman, I. (1988) Soot Formation in Combustion Process, Proc. Comb. Inst., 22, 295-311.
9. Zukoski, E. E. (1995) Properties of Fire Plume, in Combustion Fundamentals of Fire (ed. Cox, G.), Academic Press, London, 101-219.
10. Lee, E. J., Oh, K. C. and Shin, H. D. (2005) Soot Formation in Inverse Diffusion Flames of Diluted Ethene, FUEL, 84, 543-550.