

## 작은 풀화재에서의 연기 특성 Smoke Characteristics of a Small Scale Pool Fire

이의주<sup>†</sup> · 안찬솔 · 신현준 · 오광철\* · 이은도\*

Eui-Ju Lee<sup>†</sup> · Chan-Sol Ahn · Hyun-Joon Shin · Kwang-Chul Oh\* · Uen-Do Lee\*

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부, \*한국과학기술원 기계공학과  
(2005. 7. 19. 접수/2005. 8. 23. 채택)

### 요 약

등유 풀화재의 화염과 연소에 의해 생성되는 연기의 특성에 대해서 조사하였다. 다양한 발열량을 위해 직경을 변하게 할 수 있는 팬버너를 제작하였다. 풀화재를 조사하기 위해 화염 높이와 떨림 주파수를 분석하였다. 실험적으로 풀화염 높이는 이론적 상관관계 증가율과 잘 일치하지만, 정량적으로는 등유의 연소율에 기인하여 과대평가된 값을 보인다. 연기의 특성을 조사하기 위해 세 가지의 실험방법을 사용하였다. 먼저 가스분석기를 이용하여 연소시 발생하는 주요 가스 농도를 측정하였는데, 이산화탄소의 생성과 산소의 소모율은 풀화염의 열방출율에 비례하지만, 일산화탄소의 발생에 대한 경향성은 발견할 수 없었다. 연기의 매연입자를 광검쇄법과 TEM 이미지를 이용하여 특성을 조사하였다. 연기밀도는 발열량의 증가에 따라 매우 급격히 증가하였고, 등유 풀화염에서 발생한 매연입자들은 자연적인 연소조건임에도 불구하고 역확산 제트화염에서 생성된 매연과 유사한 형태와 탄화정도를 보임이 관찰되었다.

### ABSTRACT

Experimental measurements of flames and the product properties were performed for small kerosene pool fires, which is widely used as a fire source of laboratory scale experiments with scaling modeling. The flame length and flickering frequency were investigated for the flame structures, and compared with the theory. Three measurement methods were introduced to clarify the smoke characteristics, i.e. various gas concentrations, smoke density and thermophoretic sampling with transmission electron microscopy (TEM). The yield of carbon dioxide and the consumption of oxygen were proportional to the heat release rate of pool fires, but there is no trend on carbon monoxide emission. Smoke density of turbulent flames was exponentially increased with the heat release rate. The morphology of the soot particle was investigated to address the degree of soot maturing. The results show that the similar smoke morphology between an inverse jet flame and a pool fire exists despite of different combustion controlling mechanisms.

**Keywords :** Pool fire, Smoke density, Flame height, Morphology

## 1. 서 론

풀화재는 오랫동안 화재연구를 위한 기본 화염 시나리오들 중의 하나이었으며, 이를 이해하기 위해 수많은 연구들이 수행되어 오고 있다<sup>1-5)</sup>. 풀화재는 직접적으로는 바닥에 엮질러진 액체연료의 연소현상의 모사뿐 아니라 간단한 형상의 축소 화염 실험에 대한 화염원으로 적용될 수 있다. 실물 화재 실험은 최근 들어

제한적으로 시도되고 있지만, 현재 작은 축소스케일 실험이 주된 연구방법이며 빌딩이나 터널화재 연구와 같이 막대한 실험비용이 예상되는 상황에서는 유일한 방법이 되기도 한다<sup>6)</sup>. 그러므로 화재역학 연구와 더불어 축소모델의 중요인자를 검증하는데 풀화재 연구의 중요성이 나타난다고 할 수 있다. 따라서, 풀화재 연구는 보다 진보된 축소모델을 개발하는데 기여할 수 있을 것이다.

풀화재는 다양한 연소생성물을 배출하지만 가장 중요하면서도 생성 메커니즘이 알려져 있지 않은 생성물

<sup>†</sup> E-mail: ejlee@kict.re.kr

은 연기 또는 매연이라 할 수 있다. 화재 연기에 대한 몇 가지의 정의가 있지만, 광의의 개념에서는 연소 시 발생하는 가스 및 매연과 같은 입자들도 모두 포함한다. 매연 입자는 화석연료가 연료과잉(under-ventilated) 상태에서 연소하는 경우에는 불가피하게 발생된다. 화재 상황에서 독성가스를 흡입하게 되는 사고의 수를 줄이고 연소실을 보다 환경 친화적으로 만들기 위해서는, 매연의 형성에 대한 연구에 많은 노력이 집중되어야 한다. 매연이 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 농도가 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. 광감쇄법(laser extinction method)은 연기의 밀도와 매연의 양을 측정하기 위해 도입하였고, TEM 이미지를 이용한 매연의 탄화 정도를 평가하기 위해 열영동(thermophoretic sampling) 포집이 수행되었다.

### 2. 실험방법

버너는 Fig. 1과 같이 액체연료와 물을 담기 위한 중심원을 이루는 팬들(pans)로 구성되어 있다. 액체연료를 위한 팬 지름은 열방출율(heat release rates)을 변화시키기 위해서 15, 30, 45, 60 mm로 설치하였고, 팬은 가

장자리 효과를 최소화하기 위해 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.

주위공기의 유입은 연기의 생성에 크게 영향을 미치므로, 주변으로부터 공기가 원활히 유입되고 그 흐름에 저항을 최소화하기 위해 철망으로 제작된 스크린을 화염 주위에 설치하였다. 플러그 유동(plug flow)과 같은 균일한 연기의 흐름을 얻기 위해 컨트랙션(contraction)을 팬으로부터 1 m 상부에 위치시켰고, 생성된 가스와 연기는 컨트랙션 바로 위에서 지름 8 mm의 관으로 포집하였다.

또한, Fig. 1에는 연소생성물에 대한 측정방법이 간략히 도시되었다. 먼저 광감쇄법을 이용한 매연농도와 연기밀도 등을 측정하기 위해 He-Ne 레이저(632 nm)와 광전자 증배관(photo multiplier tube)을 이용하였고, 화염에서 발생하는 빛에 의한 배경 잡음(background noise)을 최소화 하고 검출기의 앞에서 분산되는 빛을 제거하기 위해서 band pass filter(630 nm)를 PMT의 앞부분에 설치하였다. 그리고 TEM 그리드(grid)를 이용하여 열영동 포집을 하여 형상(morphology)을 관찰하였다. 이때, 공압 피스톤을 이용하여 그리드를 연기 내에 1초 이하로 체류시켰고, 피스톤 속도는 1 m/s로 하였다. 매연입자가 포집된 그리드는 측정범위 22K-1,350K의 STEM(Scanning Transmission Electron Microscope, Philips Tech. F20)을 사용하여 관찰하였다. 연기를 구성하는 여러 가스의 농도는 석영으로 제작된 포집관으로 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 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 풀화재의 경우, 주요 작용력은 부력이며 이로 인해 화염의 구조는 매우 복잡해지고 제트화염에 비해 외부의 교란에 쉽게 영향을 받는다. 작은 크기의 화염은 Fig. 2(a)와 같이 기본적으로 층류이지만, 팬의 지름이 커질수록 난류로 변화한다. 4가지 팬 지름에서 화염을 조사한 결과에 의하면 천이는 15~30 mm 사이에서 발생하였다. 일단 난류가 발생하게 되면, Fig. 2(b)~(d)와 같이 큰 에디(large eddy) 운동이 활발해진다.

화염의 길어짐 및 떨림(flickering)과 같은 풀화재의 일반적인 성질은 두 가지의 열전달 작용에 기인한다. 첫 번째는 팬의 둘레를 감싸고 있는 물로의 열전달 현

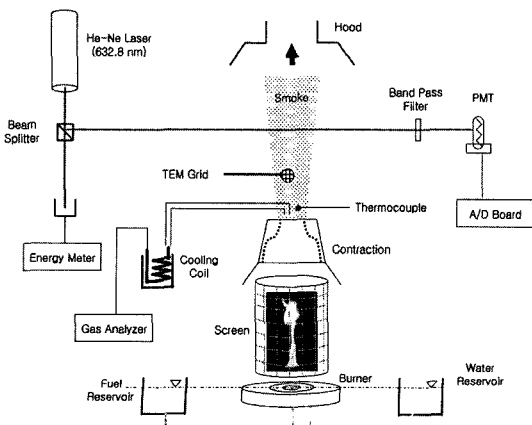


Fig. 1. Schematic diagram of the experiments.

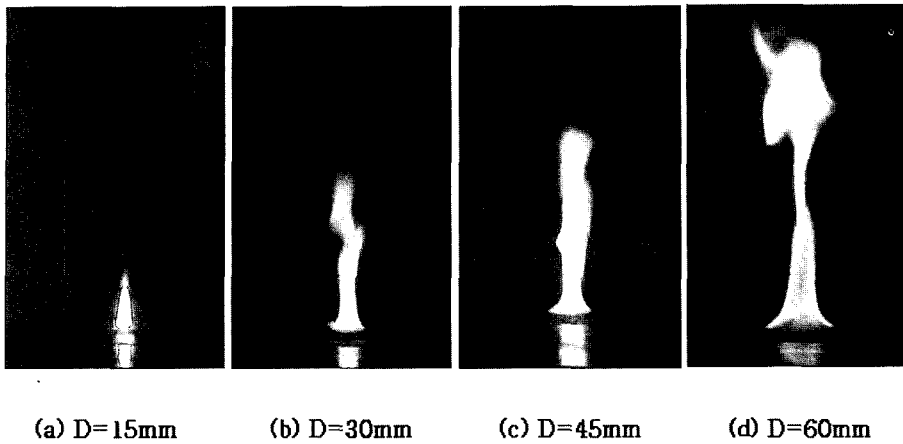


Fig. 2. Direct pictures of kerosene pool fires: D is pan diameter.

상이다. 실험에서는 연료와 물을 담은 두 팬의 깊이를 동일하게 2 cm로 설계하였다. 팬의 수위가 2 cm에 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 최대유지시켜 줌으로써 이런 영향을 최소화할 수 있었다. 그러나, 위 두 가지 열전달 작용은 풀화재를 정의할 수 있는 기초적 현상이므로 향후 보다 효과적인 제어방법이 연구되어야 할 것이다.

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

$$\frac{L}{D} = -1.02 + 3.7Q^{*2/5}, \text{ where } Q^* = \frac{Q}{\rho_{\infty} C_p T_{\infty} \sqrt{g D D^2}} \quad (1)$$

평균 화염의 높이는 연소반응이 완료되고 연기가 발달되기 시작할 때 화염의 상태를 표시하는 중요한 척도이다. Fig. 3은 화염 높이가 무차원 열방출율  $Q^*$ 에 비례하여 증가함을 보이고 있다. 예외적인 경우인 무차원화된 열방출율이 가장 큰 경우에서의 화염높이는 일반적인 경향성을 따르지 않는데, 이 구간에서의 화염이 층류이기 때문에 부력을 갖는 난류 구간에서 사용되는 관계식 (2)가 적용될 수 없기 때문이다. Heskestad 관계식은 비록 풀화염의 높이 변화율을 이론적으로 잘

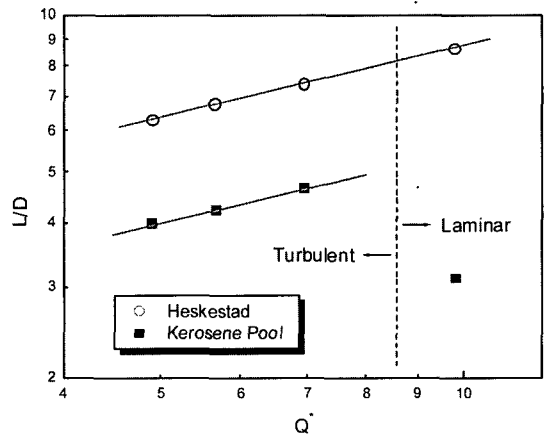


Fig. 3. Averaged flame heights measured from digital camera and predicted from Heskestad correlation.

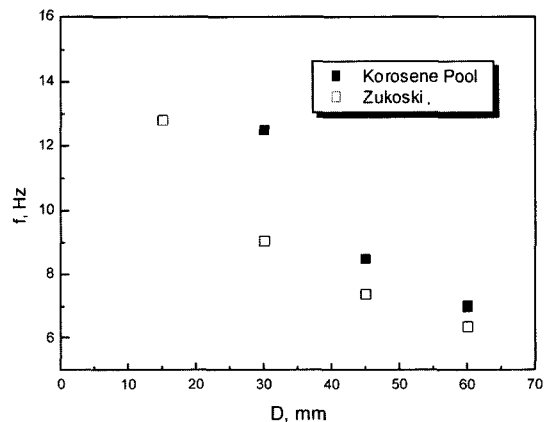


Fig. 4. Mean flickering frequencies measured and predicted with Zukoski formulation.

일치시키고 있지만 그 값은 모두 초과 예측하고 있다. 일반적으로 풀화염 높이 등의 예측식은 상대적으로 풀 직경이 큰 경우(>1 m)에 정의되므로, 본 연구와 같이 작은 풀 직경에서는 적용할 수 없다. 하지만, 실험과 이론 간의 차이는 화염 높이에 대한 정의와 등유의 연소율 계산에서 발생하는 것으로 판단된다. 등유의 연소율  $Q^*$ 를 계산하기 위해 상수(=43.2 MJ/kg)가 사용되었다. 복사 영역에서 대부분의 유기성 액체연료의 단위면적당 연소율은 두개의 실험적 상수값(extinction-absorption coefficient와 mean beam length corrector)으로 비교적 잘 묘사된다<sup>1)</sup>. 그렇지만, 부피에 대한 지름비가 큰 팬의 경우 열전달량이 더 크기 때문에, 작은 크기의 풀은 연소율이 보다 작아지도록 영향을 미칠 것이다.

부력확산성 난류화염은 주기적으로 반복되는 간헐(intermittency) 현상을 보인다. 이러한 떨림 주기는 팬의 지름이 30 mm에서 60 mm로 증가할 때 12.5~7 Hz의 범위로 측정되었다. Zukoski<sup>9)</sup>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 결과는 Table 1과 같다. 이때 NOx의 경우 발생량이 매우 미미하여 측정이 불가능 했으므로 제외하였다.

측정된 CO의 농도는 팬의 지름이 커짐에 따라 증가하였고, 화염이 층류에서 난류로 천이하는 과정에서 극적으로 변화하였다. 하지만, 화염과 연기를 따라 공기가 자유롭게 유입되는 연소상태에서 CO 농도는 사람에게 치명적인 농도에는 도달하지 않는다. 또한 CO<sub>2</sub> 농

도는 모든 경우에 대해 1% 이하로 측정되었고, 총 열 방출을 보다 오히려 팬의 지름에 비례하였다. 연료 과잉 연소 상태에서는 연료의 탄소성분이 CO를 발생하는데 소모되어 CO<sub>2</sub>의 농도는 적어지므로 CO/CO<sub>2</sub> 비율을 반응 완료정도의 지표로 향후 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 반면, 연소과정에서 소모된 산소는 대기에서 공급된다. 실험결과는 20~21% 사이의 농도가 측정되었으므로, 연소와 더불어 농도가 감소하지만 그만큼 주위공기에서 유입됨을 알 수 있다.

실제상황에서 화재안전의 가장 중요한 사항 중 하나는 화염의 발달에 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 감쇄지수(extinction coefficient),  $K_{ext}$ 의 값과 상관된다. 이 값들은 다음식 Bouguer-Lambert-Beer Law와 관계 있으며, 식 (3)으로 표현된다.

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

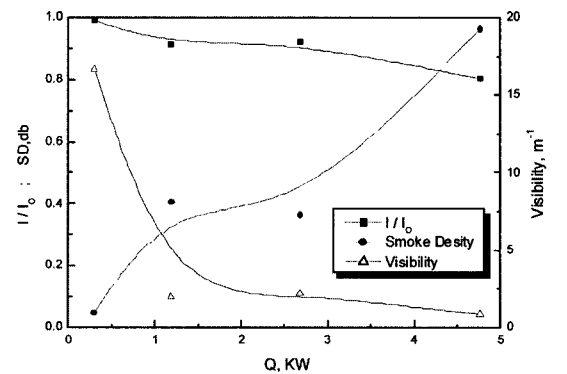
여기서  $I/I_0$ 는 빛이 연기를 통과 하면서 발생하는 광강도(light intensity)의 감소율이다. 또한, 광학밀도는 다음식과 같이 정의된다<sup>4)</sup>.

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

Fig. 5는 광강도, 광학밀도, 가시도의 감소율을 나타낸다. 물체에 반사된 빛의 가시도(visibility)는 단위길 이당 광학밀도에 역수에 비례하고 비례상수는 약 10

**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



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

이다. 부력을 받는 화염의 경우, 비교적 적은 열방출율에서 연기밀도는 거의 일정하다. 하지만 60 mm 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 2.5 배 증가된다<sup>4)</sup>.

광감쇄법을 이용하여 측정하는 연기밀도는 연소물질 중 주로 매연 입자가 주된 감쇄원인이다. 잘 알려진 다음의 식 (5)-(8)에서 매연 입자의 감쇄계수와 부피분율을 계산할 수 있다.

$$K_{ext} = \frac{\pi^2}{\lambda} E(\tilde{m}) N_p \int_0^\infty P(d_p) d_p^3 dd_p \quad (5)$$

$$\int_0^\infty P(d_p) d_p^3 dd_p = f_v \frac{6}{\pi N_p} \quad (6)$$

$$f_v = \frac{\lambda K_{ext}}{6\pi E(\tilde{m})} \quad (7)$$

$$E(\tilde{m}) = -\text{Im} \left( \frac{\tilde{m}^2 - 1}{\tilde{m}^2 + 2} \right) \quad (8)$$

매연 입자에 대한 복소수 굴절율(complex refraction index)은 많은 연구자들에 의해 조사되었는데 본 연구에서도 매연입자 부피분율을 계산하기 위하여 적용되었다<sup>10)</sup>.

Fig. 6은 열방출율의 증가에 따른 매연입자 부피분율을 나타내며, 그 차수는 연료과잉 확산화염(under-ventilated diffusion flames)의 제한적 경우인 역확산화염(inverse diffusion flames)과 유사하다<sup>11)</sup>. 또한 매연입자의 밀도를 1,800 kg/m<sup>3</sup>로 규정하면<sup>12)</sup>, 실험에서의 매연 질량분율(mass concentration)은 3.2×10<sup>-5</sup>-6.4×10<sup>-4</sup> kg/m<sup>3</sup>의 범위를 가지게 된다. 감쇄계수는 광범위하게

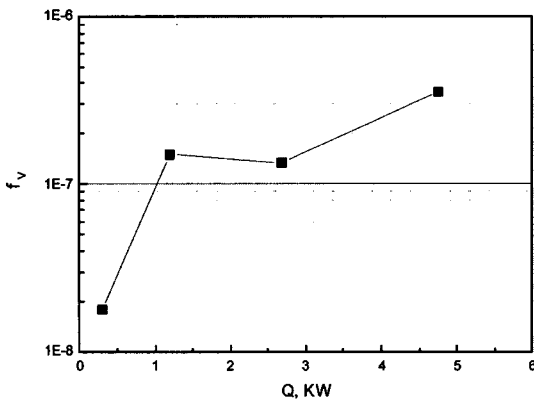


Fig. 6. Soot volume fractions with different heat release rates.

사용되는 대표적 연기특성으로, 기존의 자료에 의하면 재료 시편 실험에서 나무와 플라스틱이 연소되는 과정에서 발생한 연기로부터 7,600 m<sup>2</sup>/kg의 K<sub>ext</sub> 값을 얻었으며, 이 물질들이 열분해(pyrolysis) 하는 동안 발생한 연기로부터 4,400 m<sup>2</sup>/kg의 값을 얻었다<sup>13)</sup>. 본 연구의 결과 또한 K<sub>ext</sub>=4,300 m<sup>2</sup>/kg의 값이 측정되었는데, 위의 경우와 비교하면 비록 연료의 차이는 있지만 고체 연료의 열분해 값과 유사함을 알 수 있다.

Fig. 7은 2 m 높이에서 수집된 매연입자의 TEM 이미지를 나타내고 있으며, Table 1에서와 같이 온도와 상관관계가 있음을 보이고 있다. TEM 이미지 (a)는 15 mm 풀화염에서 얻은 것으로 30 mm에서 얻은 (b)보다 더 무정형적(amorphous)이고 매연의 입자는 선구물질(precursor soot)에 가깝다. 큰 풀의 경우인, Fig. 7(c)와 (d)는 Fig. 7(b)의 형상과 유사하다. 이 사실은 풀화염의 주 반응지역 이후(post flame region)에서는 매연의 성장이 이미 종결되었음을 의미한다. 이 이미지와 제트 화염과 비교하면<sup>11)</sup>, 매연의 입자가 일반적인 확산 화염보다 전자광에 투과성이 크고 역확산 화염에서 배출된 매연과 유사한 것은 매우 흥미로운 사실이다. 또한 입자의 크기는 팬의 지름이 증가함에 따라 약간 증가하였다. 이러한 매연 입자의 성장은 Fig. 2에서와 같이 길어진 화염의 높이가 매연이 성장하도록 체류시간(residence time)을 증가시키기 때문으로 판단된다.

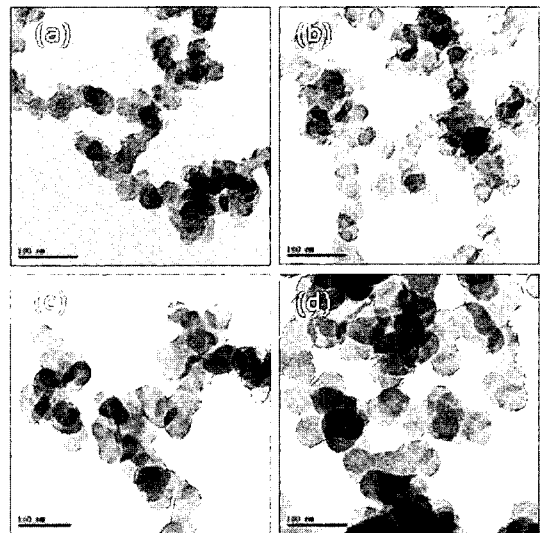


Fig. 7. TEM images of soot sampled from exhaust of pool fires. (a) D=15 mm, (b) D=30 mm, (c) D=45 mm and (d) D=60 mm.

## 4. 결 론

1. 실험적으로 풀화염 높이는 이론적 상관관계 증가율과 잘 일치하지만, 정량적으로는 과대예측되었다. 기존의 실험식과의 차이는 풀의 직경이 작아짐에 기인하고, 궁극적으로는 등유의 연소율에 주요 원인이 있을 것으로 추측되므로 작은 크기의 풀화염은 적은 연소율이 적용될 수 있도록 모델링이 요구된다.

2. 이산화탄소의 발생과 산소의 소모는 풀화염의 열 방출율에 비례하지만, 일산화탄소의 발생에 대한 경향성은 없다.

3. 보다 정확한 연기의 광학농도를 측정하기 위하여 광소멸법을 도입하였으며, 정확도를 증가시키기 위해 단색광을 사용하였고 산란광을 제거하였다.

4. TEM을 이용하여 매연의 형상을 관찰하였으며, 등유 풀화염에서 발생한 매연입자들은 공기유입이 자유로운 연소조건임에도 불구하고 역확산 화염의 매연과 유사한 형상을 보이는 것이 관찰된다.

## 참고문헌

1. V. Babrauskas, "Heat Release Rates", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA (2002).
2. B. McCaffrey, "Flame Height", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA(1995).
3. G. Heskestad, "Luminous Height of Turbulent Diffusion Flames", Fire Safety Journal, Vol. 5, pp103-108(1983).
4. D. Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, John Wiley & Sons Ltd.(1985).
5. B. Karlsson and J. G. Quintiee, Enclosure Fire Dynamics, CRC Press Ltd.(2000).
6. PIARC Committee on Road Tunnels, Fire and Smoke Control in Road Tunnels(1999).
7. H. Bockhorn, Soot formation in Combustion, Mechanism and Models. Springer Verlag, Berlin(1994).
8. I. Glassman, "Soot Formation in Combustion Process", Proc. Comb. Inst., Vol. 22, pp295-311(1988).
9. E. E. Zukoski, "Properties of Fire Plume", in Combustion Fundamentals of Fire (ed. Cox, G.), Academic Press, London, pp101-219(1995).
10. W. H. Dalzell and A. F. Sarofim, Trans. ASME J. Heat Transfer, 91, pp100-104(1969).
11. E. J. Lee, K. C. Oh, and H. D. Shin, "Soot Formation in Inverse Diffusion Flames of Diluted Ethene", Fuel, Vol. 84, pp543-550(2005).
12. K. C. Smyth and W. G. Mallard, "Laser-Induced Ionization and Mobility Measurements of Very Small Particles in Premixed Flames at the Sooting Limit", Comb. Sci. and Tech., Vol. 26, pp35-41 (1981).
13. G. W. Mulholland, "Smoke Production and Properties", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA(2002).