

## 초기 직경 변화가 Toluene 액적의 Soot 생성에 미치는 영향

임영찬\* · 서현규†

### Effect of Initial Diameter on the Soot Generation of Toluene Fuel Droplet

Young Chan Lim and Hyun Kyu Suh

**Key Words:** Droplet combustion(액적 연소), Initial diameter(초기 직경), Single fuel droplet(단일 연료 액적), Soot standoff ratio(매연 교착 비율), Soot volume fraction(매연 체적 분율)

#### Abstract

The main purpose of this study is to provide the information of soot generation of toluene fuel droplet. To achieve this, this paper provides the experimental results on the different initial diameter of toluene droplet combustion characteristics conducted under equivalent ambient pressure ( $P_{amb}$ ) and oxygen concentration ( $O_2$ ) conditions. Visualization of single fuel droplet was performed with high resolution CCD camera and visualization system. At the same time, ambient pressure ( $P_{amb}$ ) and oxygen concentration ( $O_2$ ) were maintained by ambient condition control system. Soot volume fraction ( $f_v$ ) was analyzed and compared on the basis of intensity ratio ( $I/I_0$ ) of background image. The result of soot generation was almost the same regardless of initial droplet diameter since thermophoretic flux is not much changed under the same ambient conditions. Soot standoff ratio (SSR) of 2 mm diameter showed unstable variation characteristics due to the short available measuring time.

#### 기호설명

- $I$  : transmitted intensity
- $I_0$  : laser intensity
- $K_e$  : extinction constant of soot
- $f_v$  : soot volume fraction
- $L$  : path length of the laser light
- $\lambda$  : wavelength of the light source
- $T$  : ambient temperature
- $\mu$  : coefficient of viscosity
- $\alpha$  : coefficient of heat transfer

#### 1. 서론

Soot은 연료와 공기가 혼합되어 연소가 이루어질 때 불충분한 혼합이나 연료의 혼합 비율이 높은 경우 불안정한 연소로 인하여 발생한다. 특히, 자동차 엔진 연소를 통해 발생한 Soot의 경우 입자크기가 매우 작은 것들도 포함되어 있기 때문에 자연 환경과 인체의 나쁜 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다<sup>(1,2)</sup>. 또한, Soot이 연소기관의 연소실 내부나 흡배기 포트에 흡착되어 쌓인다면 연소기관의 효율 저하도 고려해야한다. 이에 따라 여러 연구 기관에서는 Soot 뿐만 아니라 자연 환경과 인체에 해로운 배기 배출물을 저감하기 위해 전처리(Pre-process)방법과 후처리(After-treatment)방법을 적용한 많은 연구가 진행되어지고 있다<sup>(3-6)</sup>.

하지만, Soot 생성 및 거동 자체는 연소시 발생하는 화학반응 자체가 복잡하고, 각각의 연소 조건 상황을 고려해야한다. 따라서 쉽게 예측할 수 없는 난제들을 포함하고 있어 연소현상의 단순화와 분무의 기본 형태가 되

(Received: 15 Dec 2015, Received in revised form: 28 Dec 2015, Accepted: 29 Dec 2015)

\*국립공주대학교 기계공학과 대학원

†서현규, 회원, 공주대학교 기계자동차공학부

E-mail : hksuh@kongju.ac.kr

TEL : (041)521-9264 FAX : (041)555-9123

는 단일 액적 연소 연구로 진행되어왔다. 이에 Law<sup>(7,8)</sup>는 액적 증발 및 연소 특성 연구를 통해 연소 속도, 단일 액적의 미소 액적으로 분열 등 그동안 단일 액적 연소 이론에서 고려되지 않았던 부분들을 규명하였다. 이렇듯 단일 연료 액적 실험의 경우 연소기관에서 고려해야 할 조건들을 축소할 수 있기 때문에 실험 조건들의 단순화가 가능한 장점을 갖고 있다. 이에 따라 서는<sup>(9)</sup> 단일 액적의 미립화 특성을 음향 부양장(Acoustic levitation field)에서 초음파 주파수에 따라 실험적으로 비교 분석하였다. 또한, Methanol 연료 액적의 연소 특성에 관한 연구<sup>(10)</sup>와 초기 직경이 n-heptane 액적 연소 특성에 미치는 영향을 연구하여 단일 연료 액적의 최적 연소 조건 도출 및 수치 해석 모델 개발에 필요한 기초 데이터 정보를 제공하였다<sup>(11)</sup>. 이 등은<sup>(12)</sup> 정상 중력장내에서 시간에 따른 단일 액적 화염의 매연 발생 영역을 규명하며 매연 측정 기술의 유용성을 발전시켰다. 이 외에 송은<sup>(13)</sup> 고온벽면에서 액적 연료의 증발 및 착화에 관한 연구를 통해 n-heptane, n-hexadecane, ethylalcohol 연료들의 연소 특성을 파악하였다. 또한, 정 등은<sup>(14)</sup> 단일 연료 액적의 초기 직경과 분위기 조건 및 수분 함유량이 자발화와 미세 폭발 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 이렇듯 연소 실험의 간편화 장점을 갖는 단일 연료 액적 실험을 활용한다면 연료의 연소 특성이나 특히, Soot 생성을 예측하는데 큰 도움이 될 것으로 사료된다. 이러한 이유로 본 저자가 앞서 수행한 연구<sup>(15)</sup>에서는 분위기 압력( $P_{amb}$ ), 산소 농도( $O_2$ )가 Decane 액적의 Soot 생성에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험적인 연구를 수행하였고, Soot 해석 모델의 데이터베이스 구축을 목적으로 연구를 진행하고 있다.

따라서 본 연구에서는 단일 액적 연소 해석 모델의 데이터베이스 구축을 위한 후속 연구로 Toluene 연료를 적용하여 초기 직경( $d_0$ )의 크기 변화가 Soot 생성 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험 연구를 수행하였다. 또한, 연구 결과를 매연 체적 분율(Soot volume fraction,  $f_s$ )의 결과로 정리하여 Soot 해석 모델의 기초 데이터로 활용하고자 한다. 이러한 연구는 Soot 해석 모델 정확도를 높이는 데 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치의 구성

본 연구에서는 연소 실험 조건인 분위기 압력( $P_{amb}$ )과 산소 농도( $O_2$ )의 제어가 가능한 연소 챔버(Combustion

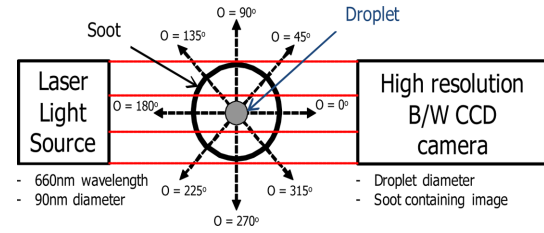


Fig. 1 Schematics of single droplet combustion visualization system and direction of toluene fuel single droplet soot analysis

chamber)를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연소 챔버에는 Toluene 단일 연료 액적의 연소 및 화염 거동 특성을 가시화할 수 있는 가시화창, 챔버 내의 분위기 압력을 조절 및 유지할 수 있는 레귤레이터, 온도 측정을 위한 열전대를 설치하여 실험 조건에 맞추어 실시간으로 분위기 압력 및 분위기 온도를 모니터링하며 연소 실험을 수행하였다.

연소 가시화 및 분석은 광계측 실험 장비에 660 nm의 파장(Wavelength)과 강도(Intensity) 조절이 가능한 최대 출력 6W의 Laser 장치를 광원(Light source)으로 설치하였다. 광원은 충분한 크기의 직경( $D=90$  mm)으로 펼쳐 intensity profile을 고려하여 한번에 촬영을 수행하였다. 또한, Toluene 단일 연료 액적의 직경 변화 및 Soot 생성 특성을 가시화하기 위해 고해상도 Black/White CCD 카메라를 사용하였다. 액적 연소 실험에 사용될 연료는 연료 공급 장치와 연료 분배 장치를 설치하여 Toluene 단일 연료 액적을 챔버 내부에 설치된 강선(Wire)에 소량의 에폭시(Epoxy)로 고정된 후 점화장치를 사용하여 연소 실험을 수행하였다.

매연 체적 분율의 경우 Toluene 단일 연료 액적을 중심으로  $0^\circ$  부터  $315^\circ$  까지  $45^\circ$  간격으로 총 8 방향을 측정 하였다. Fig. 1은 Toluene 단일 연료 액적의 연소 가시화 실험 장치 개략도이다.

### 2.2 실험 영향 인자들의 선정

본 실험 연구에서는 초기 직경 변화에 따른 Toluene 단일 연료 액적 연소시 생성되는 Soot의 특성을 파악하고자 초기 직경 2 mm, 4 mm, 5 mm로 크기를 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 Toluene 단일 연료 액적의 초기 직경( $d_0$ ) 변화를 중점으로 매연 체적 분율의 영향을 파악하기 위해 연소실 내부의 실험 조건을 각각 1.0 atm의 분위기 압력( $P_{amb}$ )과 21%의 산소 농도( $O_2$ )로 동일하

Table 1 Experimental conditions

Test Fuel	Toluene
Initial droplet diameter ( $d_0$ )	2 mm, 4 mm, 5 mm
Ambient pressure ( $P_{amb}$ )	1.0 atm
Oxygen concentration ( $O_2$ )	21%

계 실험을 수행한 후 얻어진 결과 값을 토대로 연구 분석 하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다.

### 2.3 실험 결과 분석 방법

Toluene 단일 연료 액적의 Soot 생성 특성을 파악하기 위해 액적의 초기 직경에 따라 변화하는 매연 체적 분율( $f_v$ )을 측정하여 비교 분석하였다. 매연 체적 분율의 측정은 고해상도 B/W CCD 카메라와 가시화 장치로부터 촬영된 액적의 Back-lighted droplet diameter 이미지를 참고하여 시간에 따라 액적의 반경 및 초기 액적의 반경 비인  $r/r_i$  값에 해당하는 매연 체적 분율에 대한 결과 값을 분석하였다. 또한, 액적의  $r/r_i$  값은 정확한 측정을 위해 Laser back-lighted image를 기준 이미지 배경과 비교 후 매연 체적 분율이 측정 가능한 동일 조건의 Threshold level을 적용하여 모든 방향에서 측정된 매연 체적 분율을 연구 분석하였다.

본 연구에서는 동일한 연소 조건인 분위기 압력 ( $P_{amb}=1.0$ )과 산소 농도( $O_2=21\%$ )일 때, 초기 직경 변화가 Toluene 단일 연료 액적의 Soot 생성 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 매연 체적 분율( $f_v$ )의 변화를 비교하여 검출한 데이터 결과 값을 통해 단일 액적 연소 실험의 데이터베이스를 구축하고자 하였다.

### 3. 매연 체적 분율의 분석

매연 체적 분율( $f_v$ ) 분포의 측정은 연소 이후 생성된 Soot을 포함하고 있는 Back-lighted droplet diameter 이미지 상에서 Sootshell의 위치 및 Soot 생성량을 결정하는데 사용된다. 또한, 본 연구에서는 광소멸법을 이용한 측정 기법과 토모그래피 기법<sup>(16,17)</sup>을 적용하여 Toluene 단일 연료 액적이 점화하지 않았을 때의 배경 이미지 강도(Intensity)와 점화 이후 Soot을 포함하고 있는 이미지 강도를 비교하여 강도 비율( $I/I_0$ )을 측정하였다.

Figure 2에서 확인 가능하듯이, 강도 비율( $I/I_0$ )의 분포는 배경 이미지( $G_0$ )와 Soot을 포함하고 있는 이미지( $G$ )

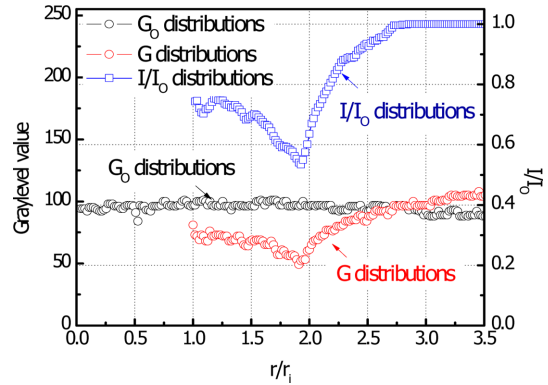


Fig. 2 The graylevel distributions of the background ( $G_0$ ) and soot containing ( $G$ ) image and intensity ratio ( $I/I_0$ ) distributions along the line of analysis

에 대한 그레이 레벨( $G/G_0$ ) 분석선을 이용하여 액적 점화 이전의 이미지와 액적 점화 이후 Soot을 포함하고 있는 이미지에 대한 비율을 계산함으로써 얻을 수 있다. 이와 같은 과정을 통해 측정된 강도 비율( $I/I_0$ )의 분포는 Fig. 2에 직사각형 모양의 분포로 나타낼 수 있다. 또한, 액적 연소시 발생하는 화염을 구형으로 가정하면, 2D 광소멸법을 적용한 Deconvolution 기법을 사용하여 매연 체적 분율( $f_v$ )을 식 (1)과 같이 결정할 수 있다.

$$\frac{I}{I_0} = \exp\left(-\frac{K_e f_v L}{\lambda}\right) \quad (1)$$

이렇듯, 광소멸법을 통해 얻은 정보는 Soot의 대칭분

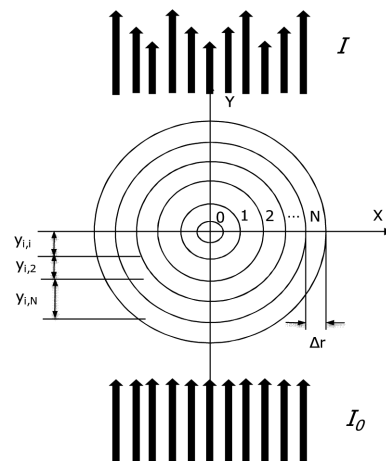


Fig. 3 Discretization of the sooting region for application of full-field light extinction measurement of soot concentration

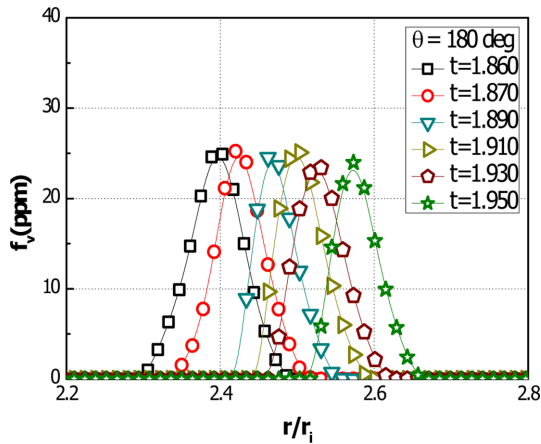


Fig. 4 Analysis on the temporal soot volume fraction ( $f_v$ ) of toluene fuel droplet ( $d_0=4$  mm,  $P_{amb}=1.0$  atm,  $O_2=21\%$ )

포에 따라 투영된 데이터의 누적 값으로 변환된다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 이 방법은 식 (2)에서 표현한 것처럼 동심원에서의 매연 체적 분율( $f_v$ )로 계산이 가능하다.

$$P_{f_v}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f_v(r) dy = -\frac{\lambda \ln(I/I_0)}{K_e} \quad (2)$$

이와 같은 방법으로 Fig. 4와 같이 모든 측정 방향에 대해 매연 체적 분율( $f_v$ )을 측정하였고, 초기 직경 2 mm, 4 mm, 5 mm에 대한 결과 값을 비교 분석하여 초기 직경이 Soot 생성 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

### 4. 연구 결과 및 고찰

#### 4.1 초기 직경 변화에 따른 매연 체적 분율( $f_v$ )

가시화 실험 결과를 분석하여 초기 직경 변화가 Toluene 단일 연료 액적 연소시 Soot 생성 특성에 미치는 영향을 비교 분석하여 다음과 같은 연구 결과들을 얻을 수 있었다. Fig. 5는 초기 직경의 변화에 따른 Toluene 단일 연료 액적의 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ )을 비교한 것이다. Toluene 단일 연료 액적의 경우 초기 직경 변화( $d_0$ )에 따라 생성되는 매연 체적 분율의 최댓값은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 액적 연소 이후 Soot 확산을 방해하는 Thermophoretic flux의 영향이 동일한 분위기 조건에서 크게 작용하지 않았기 때문에 초기 직경에 따른 매연 체적 분율의 최댓값은 큰 변화가 없는 것으로 판단된다<sup>(10,11)</sup>.

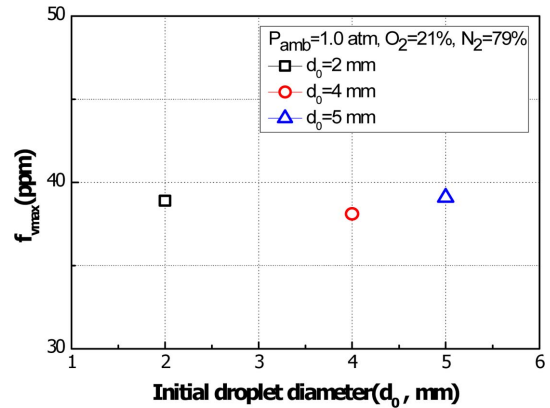


Fig. 5 Effect of initial droplet diameter ( $d_0$ ) on the maximum soot volume fraction ( $f_{vmax}$ ) of toluene fuel droplet ( $P_{amb}=1.0$  atm,  $O_2=21\%$ )

또한, Toluene 단일 연료 액적 연소시 점화 방향으로 Soot이 집중적으로 발생하여 생성되는 Soot tail로 인해 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ ) 측정에 있어 정확한 결과 비교를 할 수 없는 것으로 판단하였다. 따라서 Soot tail로 인해 매연 체적 분율 최댓값이 측정된 부분은 이를 고려하여 비교 분석하였다.

#### 4.2 Toluene, Heptane 매연 체적 분율( $f_v$ ) 비교

Figure 6은 Toluene 연료와 Heptane 연료를 적용하여 단일 연료 액적 연소 실험을 통해 측정된 매연 체적 분율의 최댓값( $f_{vmax}$ )을 비교한 그래프 이다. 초기 직경( $d_0$ ) 및 실험 조건에 관계없이 Toluene 연료가 Heptane 연료보다 많은 Soot 생성량을 보였다. 이를 통해 Soot 생성

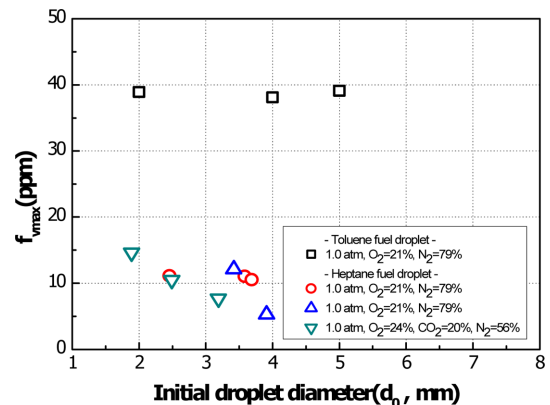


Fig. 6 Comparison of measured maximum soot volume fraction ( $f_{vmax}$ ) of toluene fuel droplet and heptane fuel droplet

량이 적은 Heptane 연료가 Soot을 저감하기 위한 적합한 연료로 판단된다. 또한, Heptane 연료의 경우 산소 농도( $O_2$ )가 24%인 연소 조건에서 매연 체적 분율 최댓값이 높은 결과를 확인할 수 있었다. 이는 산소 농도( $O_2$ )의 증가가 화염면의 성장을 도와 이에 온도 구배에 따라 외력으로 작용하는 Thermophoretic flux를 증진시켜 Soot 확산을 방해하기 때문에 Soot이 확산하지 못하고 축적되는 현상이 발생되어 매연 체적 분율 최댓값이 높게 측정된 것으로 사료된다. 이러한 매연 체적 분율( $f_v$ )의 결과 비교는 연료의 다양화를 통해 Soot 생성 특성 및 거동 예측을 할 수 있는 해석 모델의 정확성을 높이는데 기여할 것으로 사료된다.

4.3 측정 방향에 따른 매연 체적 분율( $f_v$ ) 비교

Figure 7은 앞서 언급한 매연 체적 분율의 최댓값( $f_{vmax}$ )을 모든 측정 방향에 대해 나타낸 그래프이다. 초기 직경이 4 mm, 5 mm일 때 매연 체적 분율( $f_v$ ) 측정 방향인 0° 부터 315° 까지 총 8 방향에 대한 매연 체적 분율 최댓값이 비슷하게 형성되는 것을 확인할 수 있었다.

하지만 2 mm의 경우 초기 직경이 4 mm, 5 mm일 때 보다 상대적으로 높은 매연 체적 분율의 결과를 보였다. 이는 2 mm의 경우 액적 크기가 작아 급격한 연소로 인해 상대적으로 많은 Soot particle이 생성되어 다소 높은 매연 체적 분율 결과를 보이는 것으로 사료된다. 이러한 결과는 앞서 언급하였듯이, 점화 방향으로 생성되는 Soot-tail의 위치가 액적 끝단 부분에서 시작되었기 때문

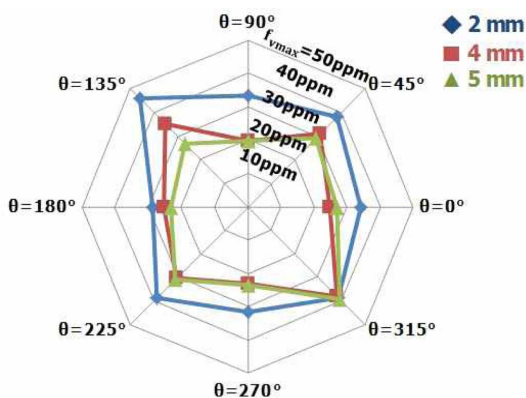


Fig. 7 Comparison analysis of initial droplet diameter ( $d_0$ ) effect on the maximum soot volume fraction ( $f_{vmax}$ ) of toluene fuel droplet in measurement at all directions ( $P_{amb}=1.0$  atm,  $O_2=21\%$ )

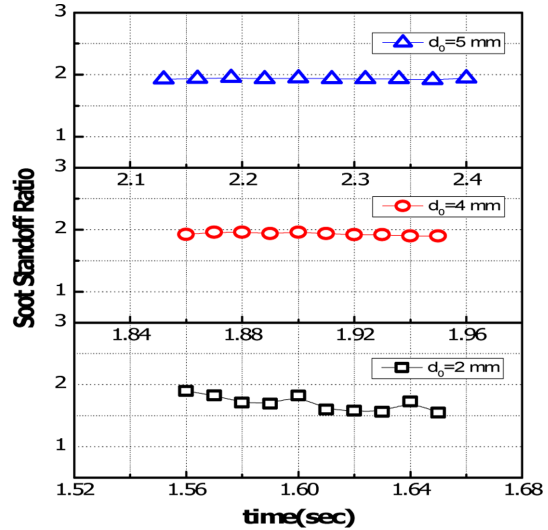


Fig. 8 Soot standoff ratio (SSR) of toluene fuel droplet ( $P_{amb}=1.0$  atm,  $O_2=21\%$ )

에 불완전한 연소를 보이는 것으로 판단된다. 또한, 연소 이후 Soot-tail 분포가 90° 방향으로 급격히 치우치는 현상이 발생하여 0° 부터 135° 까지 높은 매연 체적 분율 값이 측정되었다.

4.4 Toluene 액적의 Soot standoff ratio(SSR)

Figure 8은 초기 직경( $d_0$ ) 변화에 따라 Toluene 단일 연료 액적의 Soot standoff ratio(SSR) 변화를 나타낸 그래프이다. Soot standoff ratio(SSR)는 식 (3)에서 볼 수 있듯이, 액적 증발시 발생하는 Stefan flux와 온도 구배에 따라 외력으로 작용하는 Thermophoretic flux가 균형을 이루는 위치에 형성되는 Sootshell diameter의 위치 정보이다. 이러한 Soot standoff ratio(SSR)를 통해 Toluene 단일 연료 액적의 Soot 거동을 비교분석 하였다.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{-3\mu \frac{dT}{dr}}{4\pi r^2 \left(1 + \frac{\pi\alpha}{8}\right) T} \quad (3)$$

앞서 언급한 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ )의 결과에서 확인하였듯이, 초기 직경( $d_0$ )이 2 mm일 때 불완전한 연소 특성을 보였고, 연소 이후 Soot 분포가 90° 방향으로 급격히 치우치는 현상이 발생하여 불규칙한 수치 변화를 보이는 것으로 판단된다. 또한, 조건 변화에 관계없이 동일한 Threshold level을 적용 받는 구간이 한정적이기 때문에 매연 체적 분율( $f_v$ )의 측정 시간이 짧아지는

어려움이 있었다. 따라서 초기 직경 4-5 mm의 경우 일정한 수치 변화를 보였으나, 초기 직경이 2 mm일 때 불완전한 연소로 인하여 Soot 생성 및 거동이 불규칙한 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 초기 직경( $d_0$ ) 변화가 Toluene 단일 연료 액적의 Soot 생성 및 거동 특성에 미치는 영향을 분석한 후 연구 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Toluene 단일 연료 액적의 경우 동일한 분위기 조건에서 초기 직경의 변화( $d_0$ )에 따라 생성되는 Soot의 최댓값은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 분위기 조건이 동일한 경우, 액적 연소 이후 Soot 확산을 방해하는 Thermophoretic flux의 영향이 크게 작용하지 않았기 때문에 매연 체적 분율( $f_v$ ) 변화가 일정한 것으로 판단된다.

2. Toluene 연료가 Heptane 연료보다 많은 Soot 생성량을 보였다. 이를 통해 배기 배출물(Exhaust emission) 부분에서는 Toluene 연료 보다는 Heptane 연료가 Soot을 저감하기 위한 적합한 연료로 사료된다.

3. 초기 직경 2 mm의 경우 액적 크기가 매우 작아 불완전한 연소로 인해 상대적으로 많은 Soot particle이 생성되어 다소 높은 매연 체적 분율( $f_v$ )의 결과를 보이는 것으로 나타났다.

4. Soot standoff ratio(SSR) 변화는 초기 직경 4~5 mm일 때 일정한 수치 변화가 나타났다. 이는 조건 변화에 상관없이 동일한 Threshold level을 적용 받는 구간이 한정적이기 때문에 측정 시간이 짧아져 일정한 수치 변화를 나타내는 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2014R1A1A1005201).

## 참고문헌

- (1) J. C. Kim, "Diesel Vehicle Particulate Status", Auto Journal of KSAE, Vol. 34, No. 3, 2012, pp. 59-64.
- (2) Y. W. Kim, J. S. Min, "Regulation Trend and Reduction Technology of PM and NO<sub>x</sub> Emissions for Diesel Vehicles in Japan", Auto Journal of KSAE, Vol. 30, No. 1, 2008, pp. 75-80.
- (3) D. H. Kim, J. K. Ha, "The Technology Trend of Particulate Material Reducing System for Diesel Engine", Transactions of KSAE, Vol. 3, 2008, pp. 1428-1435.
- (4) S. H. Bae, S. C. Hong, "Simultaneous Removal of Soot and NO<sub>x</sub> from Diesel Engine Exhaust Gas" Proceeding of KOSAE, 2007, pp. 1772-1776.
- (5) C. H. Park, C. M. Park, T. K. Ha, J. H. Kim, B. D. Min, "A Study on Combustion and Emission Characteristics Using Multiple Injection Strategy in a DI Diesel Engine", Transactions of KSAE, 2008, pp. 322-327.
- (6) S. S. Moon, "Engine Research Trend in Japan : Diesel NO<sub>x</sub> After-treatment Technology", Auto Journal of KSAE, Vol. 36, No. 3, 2014, pp. 42-47.
- (7) C. K. Law, "Recent Advances in droplet vaporization and combustion", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 8, Issue 3, 1982, pp. 171-201.
- (8) C. K. Law, "Unsteady droplet combustion with droplet heating", Combustion and Flame, Vol. 26, 1976, pp. 17-22.
- (9) H. K. Suh, "Effect of Ultrasonic Frequency on the Atomization Characteristics of Single Water Droplet in an Acoustic Levitation Field", Journal of ILASS-KOREA, Vol. 18, No. 3, 2013, pp. 126-131.
- (10) H. K. Suh, "Influence of Initial Diameter on the Combustion Characteristics of n-heptane Droplet", Journal of ILASS-KOREA, Vol. 18, No. 2, 2013, pp. 94-99.
- (11) H. K. Suh, "Study on the Combustion Characteristics of Methanol Fuel Droplet", Journal of ILASS-KOREA, Vol. 19, No. 3, 2014, pp. 109-114.
- (12) K. O. Lee, C. E. Lee and S. C. Oh, "Measurements of Sooting in Single Droplet Combustion Under the Normal-Gravity Condition", Transactions of the KSME B, Vol. 22, No. 4, 1998, pp. 468-480.
- (13) K. K. Song, "A Study on the Evaporation and Ignition of Single Fuel Droplet on the Hot Surface" Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 26, No. 1, 2002, pp. 132-137.
- (14) I. C. Jeong, K. H. Lee, "Effect of Ambient Temperature and Droplet Size of a Single Emulsion Droplet on Auto-ignition and Micro-explosion" Transactions of KSAE, Vol. 15, No. 1, 2007, pp. 49-55.

(1) J. C. Kim, "Diesel Vehicle Particulate Status", Auto Jour-

- (15) Y. C. Lim, H. K. Suh, "Effect of Ambient Conditions on the Soot Generation of Decane Fuel Droplet" Journal of ILASS-KOREA, Vol. 19, No. 4, 2014, pp. 211-215.
- (16) C. J. Dasch, "One-dimensional tomography : a comparison of Abel, onion-peeling, and filtered back projection methods", Applied Optics, Vol. 31, Issue 8, 1992, pp. 1146-1152.
- (17) M. Y. Choi, G. W. Mulholland, A. Hamins, T. Kashiwagi, "Comparison of the Soot Volume Fraction Using Gravimetric and Light Extinction Techniques", Combustion and Flame, Vol. 102, Issues 1-2, 1995, pp. 161-169.