

<학술논문>

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2017.41.6.389>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 정적 연소 조건에서 Octane 단일 연료 액적의 매연 생성 거동에 관한 연구

임 영 찬\* · 서 현 규\*\*†

\* 공주대학교 기계공학과 대학원, \*\* 공주대학교 기계자동차공학부

### Experimental Study on the Soot Formation Behavior of Octane Single Fuel Droplet Under the Constant Volume Combustion Conditions

Young Chan Lim\*, Hyun Kyu Suh\*\*†

\* Graduate School of Mechanical Engineering, Kongju Nat'l Univ.,

\*\* Div. of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju Nat'l Univ.

(Received October 20, 2016 ; Revised March 7, 2017 ; Accepted March 12, 2017)

**Key Words:** Droplet Combustion(액적 연소), Initial Droplet Diameter(초기 액적 직경), Single Fuel Droplet (단일 연료 액적), Soot Growth Rate(매연 성장률), Soot Volume Fraction(매연 체적 분율)

**초록:** 본 연구는 정적 연소 조건에서 Octane 단일 연료 액적의 매연 생성 거동에 관한 정보를 제공하기 위해 수행하였다. 이를 위해 동일한 분위기 압력( $P_{amb}$ ) 1.0 atm과 산소 농도( $O_2$ ) 21%, 질소 농도( $N_2$ ) 79% 조건에서 초기 액적 직경( $d_0$ ) 변화에 따른 Octane 액적의 매연 생성 특성 실험 결과를 제시하였다. Octane 액적 연소 가시화는 초고속 카메라를 사용하여 촬영하였고, 분위기 조건은 제어 시스템에 의해 동일한 조건을 유지하였다. Octane 액적 연소 결과, 매연 생성량은 동일한 분위기 조건에서 초기 액적 직경 변화의 영향이 크게 나타나지 않았다. 또한, 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ )은  $135^\circ \sim 315^\circ$  측정 방향에서 높은 결과를 보였다. 이는 액적 점화 이후 Igniter의 이동 과정에서 생성된 Soot-tail로 인해 매연 체적 분율 결과가 증가된 것으로 나타났다.

**Abstract:** This study was performed to provide the information of the soot formation behavior of octane single fuel droplet under the identical combustion conditions. To achieve this, this experimental study provide the results of the soot formation characteristics of octane droplet in accordance with different initial droplet diameter( $d_0$ ), at the same time, experiment was conducted under the same combustion conditions which are 1.0atm of ambient pressure( $P_{amb}$ ), 21% of oxygen concentration( $O_2$ ) and 79% of nitrogen concentration( $N_2$ ). Visualization of octane droplet combustion was performed by visualization system with high speed camera. The results of maximum soot volume fraction( $f_{vmax}$ ) was almost the same under the equivalent ambient conditions regardless of initial droplet diameter. Furthermore, maximum soot volume fraction was showed the higher value in the measuring direction between  $135^\circ$  and  $315^\circ$  since the soot-tail is generated during two opposing igniters movement process.

- 기호설명 -

$d_0$  : 초기 액적 직경  
 $f_v$  : 매연 체적 분율  
 $f_{vmax}$  : 매연 체적 분율 최댓값

$f_{vmax}/sec$  : Soot 성장률  
 $G$  : 점화 이후 이미지 배경  
 $G_0$  : 기준 이미지 배경  
 $I$  : 점화 이후 이미지 배경 반사 강도  
 $I_0$  : 기준 이미지 배경 반사 강도  
 $K_e$  : Soot 소멸 상수  
 $L$  : 레이저 경로 길이

† Corresponding Author, [hksuh@kongju.ac.kr](mailto:hksuh@kongju.ac.kr)

© 2017 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $P_{amb}$  : 분위기 압력  
 $r$  : 점화 이후 액적 반경  
 $r_i$  : 초기 액적 반경  
 $\lambda$  : 레이저 파장

## 1. 서론

내연기관의 연소과정에서 생성되는 매연은 연료와 공기의 불충분한 혼합과 연료의 혼합 비율이 높아 당량비(Equivalence ratio)가 농후(Rich)한 영역에서 불완전한 연소로 인하여 생성되는 배기 배출물이다. 특히, 매연 입자의 크기가  $2.5\mu\text{m}$  보다 작을 경우, 연소 이후 후처리(After-treatment) 방법으로 충분한 여과가 어렵기 때문에 미처 여과되지 못하고 배출되어 주변 환경과 인체에 치명적인 영향을 미치게 된다.<sup>(1,2)</sup> 또한, 내연기관의 연소실 내부에서 발생된 매연이 흡·배기 포트와 밸브, 피스톤 및 실린더 내부에 흡착되어 쌓인다면 연소실 체적 감소 현상과 엔진 작동의 불안정성으로 인한 연소기관의 효율 저하를 고려해야 한다. 이렇듯 여러 연구 기관에서는 내연기관의 연소과정을 통해 생성되는 매연이 주변 자연 환경 및 인체에까지 미치는 영향을 저감하고자 전처리(Pre-process) 및 후처리(After-treatment) 방법을 적용한 연구가 활발하게 진행되고 있다.<sup>(3,4)</sup>

하지만, 연소과정 중 발생하는 매연 생성 및 거동은 내연기관의 다양한 작동 범위에 해당하는 각각의 연소 조건과 연소 화학 반응을 고려해야 하는 어려움이 따른다. 따라서 연소 현상의 단순화가 가능한 장점을 갖는 단일 연료 액적(Single fuel droplet)을 적용한 액적 연소(Droplet combustion) 연구가 진행되어왔다.

특히, 액적 연소 연구는 Godsave,<sup>(5)</sup> Spalding<sup>(6)</sup> 등 선행 연구자들이 제안한 액적 연소 및 증발 이론인  $d^2$ -law를 기초로 하여 현재까지 활발한 연구가 수행중이다. Law<sup>(7,8)</sup>는 단일 연료 액적 연소 연구를 통해 액적 연소 이론에서 고려되지 않았던 부분들을 규명하며 액적 증발 및 연소 특성을 지배하는 기본 메커니즘을 연구하였다. 이러한 선행 연구들을 통해 밝혀진 액적 연소에 관한 연구를 기반으로 대부분의 내연기관에 사용되어지는 액체 연료의 분무 및 확산 특성은 매우 중요한 인자임을 알 수 있다. 이는 분사 장치를 통해 분사된 액체 연료의 미립화(Atomization) 정도에 따라 얻을 수 있는 출력과 배기 배출물 생성이

좌우되기 때문에 이와 관련된 액적 연구가 다양한 방면으로 보고되었다.<sup>(9-14)</sup>

또한, 이 등<sup>(15)</sup>은 대부분의 연소 장치에서 발생된 매연이 주변 장치의 수명 단축 및 환경오염을 야기하기 때문에 이와 관련된 매연 발생을 인위적으로 제어하고, 매연 생성 및 소멸 기구에 대한 이해를 얻기 위해 화염내의 매연 농도에 대한 정확한 측정의 필요성을 보고하였다. 이에 따라 미소중력장(Microgravity)내에서의 액적 연소에 대한 기초 연구를 수행하기 위해 정상중력장내에서 압력 변화에 따른 화염 구조 및 단일 화염 온도의 변화가 매연 발생 영역 구조에 미치는 영향을 연구 조사하였다. 선행 연구들을 통해 알 수 있듯이, 연소 실험의 간편화 장점을 갖는 단일 연료 액적 실험을 활용하여 비교 연구를 수행한다면 각각의 연료들이 갖는 연소 특성과 매연 생성 특성을 예측함에 있어 정확도를 향상시킬 것으로 사료된다. 이러한 이유로 본 저자가 앞서 수행한 연구<sup>(16,17)</sup>에서는 Decane과 Toluene 단일 연료 액적 연소시 분위기 압력( $P_{amb}$ ), 산소 농도( $O_2$ ), 초기 액적 직경( $d_0$ )의 변화가 매연 생성 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험적 연구를 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 동일한 분위기 조건에서 Octane 연료의 초기 액적 직경( $d_0$ ) 변화가 매연 생성 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험적 연구를 수행하였다. 또한, 앞서 수행된 선행 연구 결과<sup>(16,17)</sup>를 보강하고자 Decane, Isooctane, n-heptane, n-heptane+Isooctane 혼합 연료에 대한 각각의 실험 연구를 추가 수행하였고, 이러한 실험 결과들을 매연 체적 분율(Soot volume fraction,  $f_v$ ), 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ ), 매연 성장률(Soot growth rate,  $f_{vmax}/\text{sec}$ )의 결과로 정리하여 현재까지 수행된 연구 결과와 비교 분석하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치 구성

본 연구에서는 Fig. 1에서 확인 가능하듯이, 단일 연료 액적(Single fuel droplet) 연소 실험을 수행하기 위해 동일한 연소 실험 조건인 분위기 압력( $P_{amb}$ )과 산소 농도( $O_2$ )의 제어가 가능한 연소 챔버(Combustion chamber)를 사용하여 실험을 수행하였다. 본 연소 챔버에는 Octane 단일 연료 액적 연소과정을 가시화할 수 있는 가시화창, 챔버 내부의 분위기 압력 조절 및 유지가 가능한 레귤

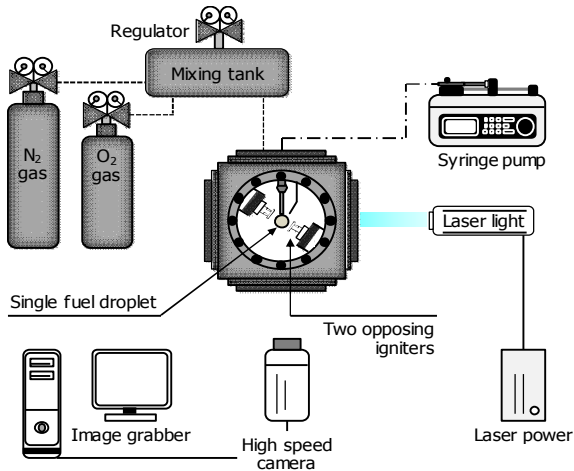


Fig. 1 Schematics diagram of visualization experimental apparatus for the single fuel droplet combustion

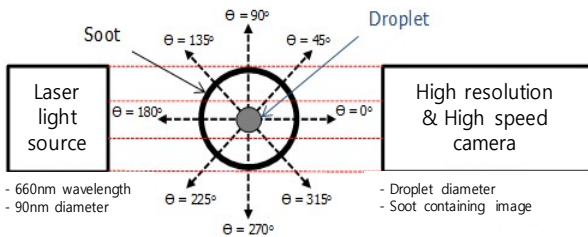


Fig. 2 Schematics of single droplet combustion visualization system and direction of soot analysis for octane single fuel droplet

레이터, 온도 측정을 위한 열전대를 설치하여 실험 조건인 분위기 압력과 분위기 온도를 실시간으로 모니터링하며 연소 실험을 수행하였다.

단일 연료 액적 연소 가시화 및 분석은 액적 연소시 생성되는 매연 거동 특성을 파악하기 위해 정확한 이미지 취득이 가능한 고해상도 초고속 카메라(High speed camera)를 사용하였다. 또한, 광계측 실험 장비에 660nm의 파장(Wavelength)과 강도(Intensity) 조절이 가능한 최대 출력 6W의 Laser 장치 광원(Light source)을 충분한 크기의 직경(D=90mm)으로 펼쳐 명암 측면도(Intensity profile)를 참고하여 촬영하였다. 액적 형성은 연료 공급 장치인 실린지 펌프(Syringe pump)를 사용하여 Octane 단일 연료를 챔버 내부에 설치된 강선(Wire)에 고정한 후 점화 장치를 사용하여 연소 실험을 수행하였다. 매연 체적 분율( $f_v$ )의 측정 및 비교 분석은 액적 연소과정에서 촬영된 실험 가시화 사진을 통해 Octane 단일 연료 액적의 중심으로부터 0°에서 315°까지 총 여덟 방향에 대한

Table 1 Experimental conditions

Test Fuel	Octane
Initial droplet diameter( $d_0$ )	2.0mm, 2.5mm, 3mm
Ambient pressure( $P_{amb}$ )	1.0atm
Oxygen concentration( $O_2$ )	21%

매연 체적 분율을 측정 후 비교 분석하였다. Fig. 2는 Octane 단일 연료 액적의 매연 체적 분율 측정 과정에 대한 개략도이다.

### 2.2 실험 인자 설정

본 실험 연구에서는 초기 직경( $d_0$ ) 변화가 Octane 단일 연료 액적 연소시 발생하는 매연 생성 특성을 파악하기 위해 초기 액적 직경을 각각 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm로 크기를 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 또한, Octane 단일 연료 액적의 초기 직경 변화에 대한 매연 체적 분율( $f_v$ )의 비교 분석을 위해 동일한 연소 실험 조건인 분위기 압력( $P_{amb}$ ) 1.0atm과 산소 농도( $O_2$ ) 21%를 조성하여 실험 수행 후 얻어진 결과 값을 토대로 연구 비교하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다.

### 2.3 실험 결과 분석 방법

초기 액적 직경( $d_0$ ) 변화에 따른 Octane 단일 연료 액적의 매연 생성 특성을 파악하기 위해 매연 체적 분율( $f_v$ )을 측정하여 비교 분석하였다. 매연 체적 분율의 측정은 고해상도 초고속 카메라와 가시화 시스템(Visualization system)을 통해 촬영된 액적의 투영 이미지를 참고하여 시간에 따라 변화하는 액적 반경과 초기 액적의 반경 비율인  $r/r_i$  값에 해당하는 매연 체적 분율에 대한 결과 값을 분석하였다. 여기서,  $r/r_i$  값을 정확히 측정하기 위해 실시간으로 변화하는 투영된 액적의 이미지를 기준 배경과 비교하여 모든 방향에서 측정 가능한 동일 조건의 임계값(Threshold level)을 적용한 후 측정된 매연 체적 분율을 연구 분석하였다.

### 3. 매연 체적 분율 분석 방법

매연 체적 분율( $f_v$ ) 계산 과정은 광소멸법 측정 기법<sup>(18)</sup>과 토모그래피 기법<sup>(19)</sup>을 적용하였다. 이는 액적 점화 이전의 기준 이미지 배경 강도( $I_0$ )와 점화 이후 매연을 포함하고 있는 이미지 배경 강

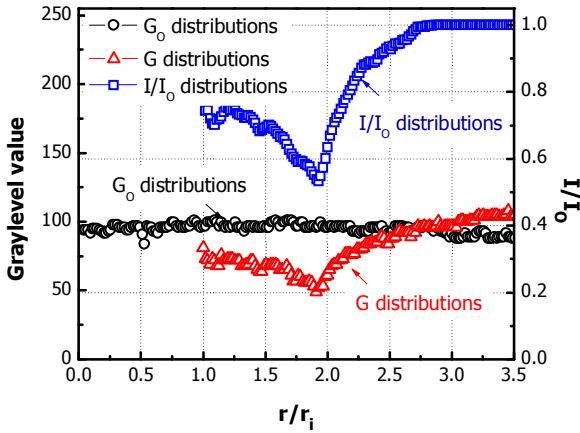


Fig. 3 The gray level distributions of the background ( $G_0$ ) and soot containing( $G$ ) image and intensity ratio( $I/I_0$ ) distributions along the line of analysis

도( $I$ )의 비율인  $I/I_0$ 의 분포를 그레이 레벨(Gray level) 분석선을 통해 두 개의 이미지에 대한 강도 비율을 계산함으로써 얻을 수 있다. 특히, 매연 체적 분율의 분포는 액적 연소 이후 매연을 포함하고 있는 투영된 액적의 이미지 상에서 Sootshell의 위치와 매연 생성량을 결정하는데 사용된다. Fig. 3은 측정하고자 하는 구간의 이미지( $G$ )와 기준 이미지( $G_0$ ) 배경, 이 때 두 이미지 배경이 갖는 강도 비율  $I/I_0$  값을 그레이 레벨 분석선을 따라 변환되어 나타낸 비교 그래프이다. 여기서,  $G$  &  $G_0$  분포 정보는 측정하고자 하는 구간의 이미지와 기준 이미지 배경을 의미하며, 이와 같은 과정을 통해 얻은 강도 비율의 분포는  $I/I_0$  분포로 변환된다. 또한, 액적 연소시 발생하는 화염이 구형 형태를 갖기 때문에 2D 광소멸법을 적용한 Deconvolution 기법을 사용하여 매연 체적 분율을 식 (1)과 같이 결정할 수 있다.

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

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

이러한 과정에서 광소멸법을 통해 얻은 정보는 매연의 대칭 분포 변화에 따라 광원에 투영된 데이터 누적 값을 알 수 있다. Fig. 4를 통해 확인 가능하듯이, 식 (2)를 이용하여 동심원에서의 매연 체적 분율로 계산 가능하다. 이와 같은 방법으로 Fig. 5와 같이 액적의 반경 방향으로 시간 변화에 따라 발생하는 매연 생성량을 매연 체적

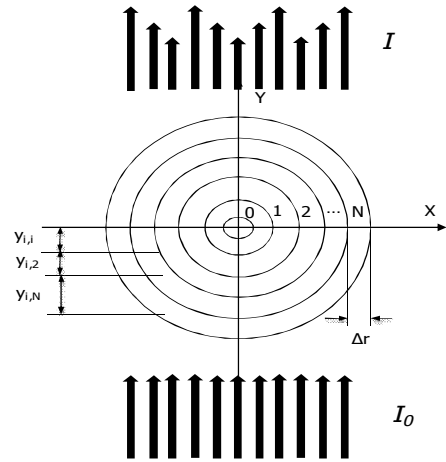


Fig. 4 Discretization of the sooting region for application of full-field light extinction measurement of soot concentration

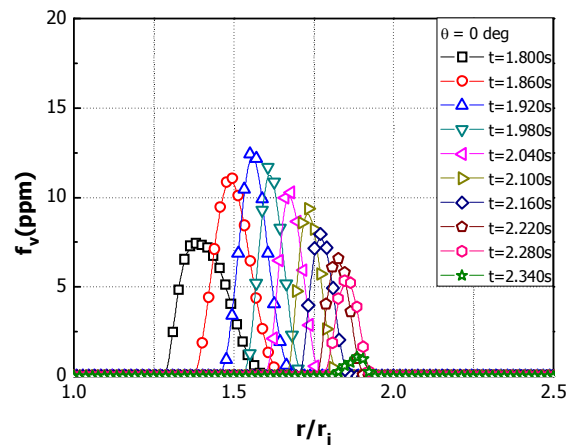


Fig. 5 Analysis on the temporal soot volume fraction( $f_v$ ) of octane single fuel droplet ( $d_0=3.0$  mm,  $P_{amb}=1.0$ atm,  $O_2=21\%$ )

분율 결과로 나타낼 수 있다. 이러한 과정을 통해 Octane 단일 연료 액적의 초기 직경 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm에 대한 매연 체적 분율을 측정하고, 결과 데이터 비교 분석을 통해 초기 액적 직경( $d_0$ ) 변화가 매연 생성 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

#### 4. 연구 결과 및 고찰

##### 4.1 액적 직경 변화에 따른 매연 체적 분율 분포

Fig. 6은 초기 액적 직경( $d_0$ ) 변화에 따른 Octane 단일 연료 액적의 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ ) 분포를 비교한 것이다. 매연 체적 분율( $f_v$ ) 결과를 통해 확인한 Octane 단일 연료 액적의 초기 직경 변화는 초기 액적 직경이 가장 작은

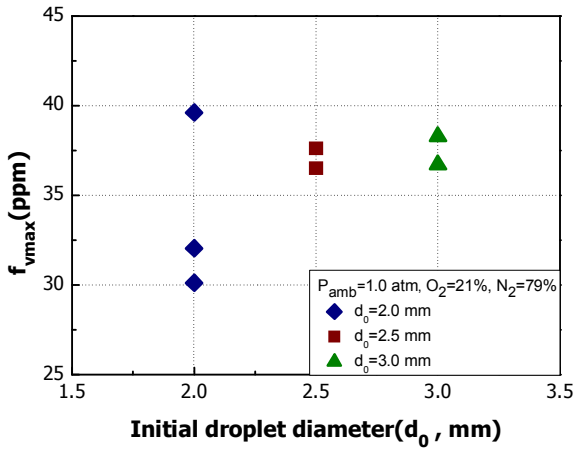


Fig. 6 Effect of initial droplet diameter( $d_0$ ) on the maximum soot volume fraction( $f_{vmax}$ ) of octane single fuel droplet

2.0mm일 때 매연 체적 분율이 평균 이하의 결과를 보이는 경우가 나타났으나, 액적 직경 변화에 따른 매연 체적 분율은 동일한 분위기 조건에서 큰 변화를 보이지 않았다. 이는 연소 이후 측정된 매연 체적 분율의 측정 구간이 짧고, 연소시 매연 확산을 방해하는 인자인 분위기 압력( $P_{amb}$ )과 산소 농도( $O_2$ )가 동일한 연소 조건으로 적용되었기 때문에 초기 액적 직경 변화가 매연 체적 분율 최댓값 결과에 미치는 영향이 크게 작용하지 않은 것으로 사료된다.<sup>(16,17)</sup>

4.2 측정 방향에 따른 매연 체적 분율 비교

매연 체적 분율( $f_v$ )은 실험 연구에 적용된 Octane 단일 연료 액적의 중심으로부터 45° 간격으로 0°에서 315°까지 총 8방향을 측정하였다. 이에 따라 매연 체적 분율 측정 방향이 Octane 단일 연료 액적의 매연 생성 특성에 미치는 영향을 파악하고자 매연 체적 분율 분포가 누락되지 않는 초기 액적 직경( $d_0$ )이 각각 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm인 3가지 경우에 대하여 측정 방향에 따른 매연 체적 분율 분포를 Fig. 7을 통해 비교 분석하였다.

Octane 액적의 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ )은 135°~315° 방향에서 측정 되었으며 모든 방향에서 측정된 매연 체적 분율의 결과가 135°~315° 방향 사이에서 평균적으로 높은 결과를 보였다. 이는 액적 연소를 위해 점화 장치로 사용된 이그나이터(Igniter)가 동등한 전류로 열원(Heat source)을 공급한 후 본 위치로 이동하는 과정에서 생성된 Soot-tail이 135°와 315° 방향에서 형

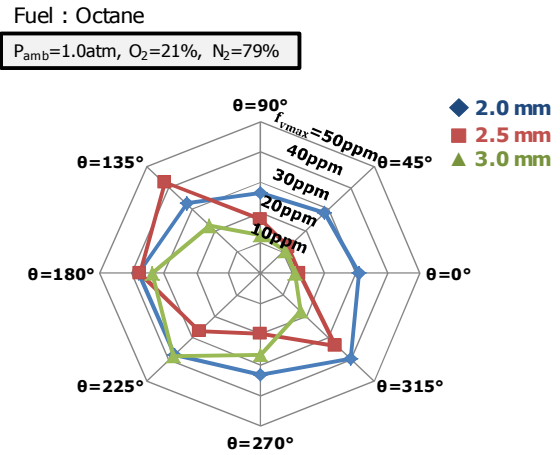


Fig. 7 Comparison of the effect of initial droplet diameter( $d_0$ ) on the maximum soot volume fraction( $f_{vmax}$ ) of octane single fuel droplet in all measuring directions

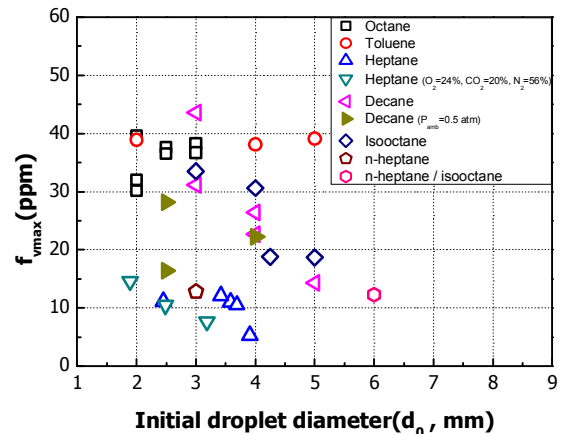


Fig. 8 Comparison of measured maximum soot volume fraction( $f_{vmax}$ ) of various single fuel droplets<sup>(16,17)</sup>( $P_{amb}=1.0atm, O_2=21%, N_2=79%$ )

성되고, 225° 방향으로 이동하면서 높은 매연 체적 분율 분포를 보인 것으로 판단된다. 하지만, 실험 연구에 적용된 모든 연료가 Octane 연료와 동일하게 135°와 315° 측정 방향에서 매연 생성량이 높은 결과를 보이는 것이 아니기 때문에 이와 같은 실험 현상의 편차를 줄이고자 추가 실험 연구를 수행하고 있다. 또한, 이러한 결과를 바탕으로 매연 생성량의 측정 오차를 줄이고자 측정된 최대 매연 체적 분율의 평균값을 사용하여 매연 생성량 발생 범위를 예측할 수 있는 분석 방법이 적용된 후속 연구가 수행중이다.

4.3 액적 종류별 최대 매연 체적 분율 비교

Fig. 8은 데이터베이스 구축을 위해 앞서 수행

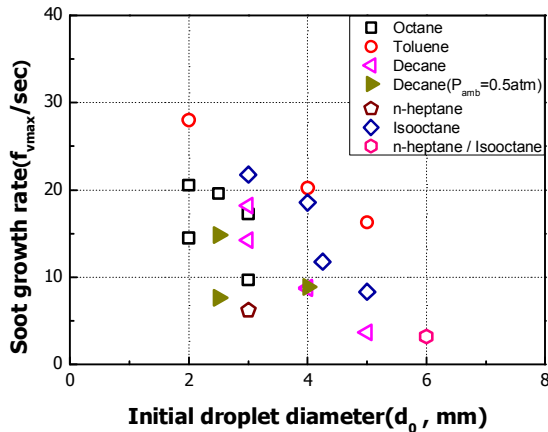


Fig. 9 Comparison analysis measured soot growth rate ( $f_{vmax}/sec$ ) of various single fuel droplets<sup>(16,17)</sup> ( $P_{amb}=1.0atm$ ,  $O_2=21%$ ,  $N_2=79%$ )

한 선행 연구들<sup>(16,17)</sup>의 실험 결과와 Octane 단일 연료 액적의 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ ) 결과를 비교 분석한 그래프이다. 실험 연구에 사용된 알케인(Alkane) 계열의 연료와 Toluene 연료의 매연 생성량을 비교 분석한 결과, Octane 연료와 Toluene 연료가 가장 많은 매연 생성으로 인해 높은 매연 체적 분율( $f_v$ ) 결과를 보이는 것으로 나타났다. 이는 선행 연구<sup>(20)</sup>를 통해 알케인 계열의 연료들이 일반적으로 탄소 사슬 구조가 긴 연료일수록 많은 매연 생성량을 보이는 결과와 일치하였다. 또한, Toluene 연료의 경우 매연 형성에 큰 영향을 끼치는 다환 방향족 탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons)의 초기 고리 형태인 벤젠( $C_6H_6$ ) 고리를 갖고 있기 때문에 매연 생성량이 많은 것으로 사료된다.<sup>(21)</sup>

또한, Decane 단일 연료 액적 연소 실험을 통해 확인 가능한 높은 분위기 압력( $P_{amb}$ )의 영향과 Heptane 단일 연료 액적 연소 실험에 적용된 높은 산소 농도( $O_2$ ) 조건이 매연 생성량의 변화 인자로서 가장 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이를 통해 높은 분위기 조건이 적용될 경우 매연 체적 분율 최댓값 및 평균 분포가 증가하는 경향을 초래하는 것으로 판단된다.

#### 4.4 액적 종류별 매연 성장률 비교 예측

Fig. 9는 다양한 종류의 단일 연료 액적 연소 실험을 통해 측정된 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ )을 단위 시간 결과로 확인하기 위해 매연 성장률을 비교 분석한 결과이다. 매연 성장률 결과는 액적 연소시 매연이 발생된 시점으로 부터 많은

축적량을 바탕으로 총 실험 구간에서 가장 높은 매연 생성량을 보이는 구간의 실험 결과이다. 이러한 연구 결과는 최대 매연 체적 분율 결과를 사용하여 각각의 연료에 대한 매연 생성량 결과로 일반화하기 어렵기 때문에 복합적으로 판단하고자 적용한 결과이다.

앞서 언급한바와 같이, 매연 성장률의 전체적인 경향은 Toluene과 Octane 단일 연료 액적이 가장 높은 Soot 성장률을 보였다. 특히, Toluene 액적은 Octane 액적과 비슷한 최대 매연 체적 분율( $f_{vmax}$ ) 결과를 보였다. 또한, 선행 연구 결과<sup>(17)</sup>에서 액적 크기가 감소할수록 급격한 연소로 인해 상대적으로 많은 매연 입자가 생성되어 다소 높은 매연 성장률을 보이는 경우가 일부 있었으나, 본 연구의 결과와 비교하면 이러한 결과를 일반화하기에 어려울 것으로 판단된다. 따라서 액적 직경( $d_0$ )이 매연 체적 분율에 미치는 영향에 대해 후속 연구를 수행하고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 초기 액적 직경( $d_0$ ) 변화가 Octane 단일 연료 액적의 매연 생성 특성에 미치는 영향을 매연 체적 분율( $f_v$ )과 관련된 다양한 결과로 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 분위기 조건에서 초기 액적 직경 변화가 Octane 단일 연료 액적 연소시 측정된 매연 체적 분율 결과에 미치는 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다. 이는, 동일한 분위기 조건이 매연 확산을 방해하는 외력으로 크게 작용하지 못한 것으로 사료된다.

(2) Octane 액적의 매연 체적 분율 최댓값( $f_{vmax}$ )은  $135^\circ \sim 315^\circ$  방향 사이의 측정 방향에서 평균적으로 높은 결과를 보였다. 이는 액적 점화 이후 이그나이터(Igniter)의 이동 과정에서 생성된 Soot-tail이  $225^\circ$  방향 쪽으로 이동하면서 높은 매연 체적 분율 분포를 보인 것으로 판단된다.

(3) 단일 연료 액적 연소 실험을 통해 Octane 연료가 갖는 긴 탄소 사슬 구조와 Toluene 연료의 벤젠( $C_6H_6$ )고리 영향으로 많은 양의 매연 생성을 야기하여 가장 높은 매연 체적 분율 결과를 보이는 것으로 사료된다.

(4) 매연 성장률(Soot growth rate) 결과는 Toluene 단일 연료 액적 연소시 초기 액적 직경이 감소할수록 급격한 연소로 인해 상대적으로 많은 매연

입자가 생성되어 다소 높은 매연 성장률을 보이는 것으로 나타났다.

## 후 기

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

## 참고문헌 (References)

- (1) Cha, J. Y., Son, J. B., Kim, J. I. and Hong, M. S., 2001, "Exhaust Gas Storage and Recombustion System for Zero Emission at Cold Start," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp. 62~72.
- (2) Kim, J. C., 2012, "Diesel Vehicle Particulate Status," *Auto Journal of KSAE*, Vol. 34, No. 3, pp. 59~64.
- (3) Kim, D. H. and Ha, J. K., 2008, "The Technology Trend of Particulate Material Reducing System for Diesel Engine," *Transactions of KSAE*, Vol. 3, pp. 1428~1435.
- (4) Kang, W. S. and Choi, B. C., 2015, "Characteristics of Simultaneous Removal of NO<sub>x</sub> and PM Over a Hybrid System of LNT/DPF + SCR/DPF in a Single Cylinder Diesel Engine," *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp. 172~173.
- (5) Godsave, G. A. E., 1953, "Studies of the Combustion of Drops in a Fuel Spray-the Burning of Single Drops of Fuel," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 4, No. 1, pp. 818~830.
- (6) Spalding, D. B., 1953, "The Combustion of Liquid Fuels," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 4, No. 1, pp. 847~864.
- (7) Law, C. K., 1976, "Unsteady Droplet Combustion with Droplet Heating," *Combustion and Flame*, Vol. 26, pp. 17~22.
- (8) Law, C. K., 1982, "Recent Advances in Droplet Vaporization and Combustion," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 8, No. 3, pp. 171~201.
- (9) Song, K. K., 2002, "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, pp. 132~137.
- (10) Lee, D. J., Kim, H. Y., Cho, C. P. and Yoon, S. G., 2007, "The Effects of Droplets Arrangement and Size Difference on the Vaporization and Combustion Characteristics of Liquid Fuel Droplets," *Journal of The 34th KOSCO SYMPOSIUM*, pp. 107~113.
- (11) Jeong, I. C. and Lee, K. H., 2007, "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, pp. 49~55.
- (12) Lee, H. C. and Baek, S. W., 2008, "Investigation of Droplet Vaporization Phenomena in High Pressure Environments," *J. Korean Soc. Combust.*, Vol. 13, No. 3, pp. 17~23.
- (13) Hafiz, L. R., Julien, W. and Patrice, S., 2016, "Effect of Heat Conduction on Droplet Life Time and Evaporation Rate under Forced Convection at Low Temperatures," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 72, pp. 59~66.
- (14) Suh, H. K., 2013, "Influence of Initial Diameter on the Combustion Characteristics of n-heptane Droplet," *Journal of ILASS-KOREA*, Vol. 18, No. 2, pp. 94~99.
- (15) Lee, K. O., Lee, C. E. and Oh, S. C., 1998, "Measurements of Sooting in Single Droplet Combustion Under the Normal-Gravity Condition," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 22, No. 4, pp. 468~480.
- (16) Lim, Y. C. and Suh, H. K., 2014, "Effect of Ambient Conditions on the Soot Generation of Decane Fuel Droplet," *Journal of ILASS-KOREA*, Vol. 19, No. 4, pp. 211~215.
- (17) Lim, Y. C. and Suh, H. K., 2015, "Effect of Initial Diameter on the Soot Generation of Toluene Fuel Droplet," *Journal of ILASS-KOREA*, Vol. 20, No. 4, pp. 261~267.
- (18) Choi, M. Y., Mulholland, G. W., Hamins, A. and Kashiwagi, T., 1995, "Comparison of the Soot Volume Fraction Using Gravimetric and Light Extinction Techniques," *Combustion and Flame*, Vol. 102, No. 1~2, pp. 161~169.
- (19) Dasch, C. J., 1992, "One-dimensional Tomography : a Comparison of Abel, Onion-peeling, and Filtered Backprojection Methods," *Applied Optics*, Vol. 31, No. 8, pp. 1146~1152.
- (20) Pan, K. L., Li, J. W., Chen, C. P. and Wang, C. H., 2009, "On Droplet Combustion of Biodiesel Fuel Mixed with Diesel/Alkanes in Microgravity Condition," *Combustion and Flame*, Vol. 156, No. 10, pp. 1926~1936.
- (21) Choi, J. H., Yoon, S. H. and Yoon, D. H., 2012, "Numerical Study on Soot Formation in Opposed-flow Nonpremixed Flame by Mixing Toluene," *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 18, No. 2, pp. 139~144.