

## 분위기 조건이 Decane 액적의 Soot 생성에 미치는 영향

임영찬\* · 서현규†

### Effect of Ambient Conditions on the Soot Generation of Decane Fuel Droplet

Young Chan Lim and Hyun Kyu Suh

**Key Words:** Ambient pressure(분위기 압력), Droplet combustion(액적 연소), Oxygen concentration(산소 농도), Single fuel droplet(단일 연료 액적), Soot volume fraction(매연 체적 분율)

#### Abstract

The main purpose of this study is to provide basic information of droplet soot generation of decane fuel. To achieve this, this paper presents the experimental results on the decane droplet combustion conducted under various ambient pressure( $P_{amb}$ ), and oxygen concentration( $O_2$ ) conditions. At the same time, the experimental study was conducted in terms of soot volume fraction( $f_v$ ) and its maximum value. Also, visualization of single fuel droplet was conducted by high resolution CCD camera and ambient pressure( $P_{amb}$ ) and oxygen concentration( $O_2$ ) was changed by control system. It was revealed that higher ambient pressure( $P_{amb}$ ), and oxygen concentration( $O_2$ ) enhanced the soot generation and improved the maximum soot volume fraction( $f_v$ ).

#### 1. 서 론

Soot은 연소기관 내에서 연료와 공기가 혼합되어 폭발할 때 불충분한 혼합으로 인해 연료가 완전히 연소되지 않아 남은 그을음으로 연소기관의 효율을 감소시키며 모든 주변의 자연 환경 및 인체에 나쁜 영향을 미친다. 이러한 영향을 개선하기 위해 연소기관에 첨가물을 넣거나 또는 매연 저감장치를 사용하는 등의 많은 연구가 있었다.

먼저, 매연 생성이 연소기관의 효율 감소에 미치는 영향을 연구하고자 배 등은<sup>(1)</sup> 고온고압의 정적연소장치에서 연소기관의 매연생성과정을 모델링 하였고, 박 등은<sup>(2)</sup> 디젤-에탄올 혼합연료의 에탄올 함량이 미세 그을음

(Soot) 입자 배출특성에 미치는 영향을 연구하였다. 또한, Soot 저감에 관한 연구로 배 등은<sup>(3)</sup> 디젤기관 배출가스의 Soot 및 NO<sub>x</sub> 동시 저감 기술을 연구하였고, 안은<sup>(4)</sup> 경유자동차 매연 저감 방향을 보고하였다. 이 외에 매연 저감장치 성능에 미치는 디젤연료첨가제의 영향을 연구<sup>(5)</sup>하는 등 여러 분야에서 매연을 감소하고자 하는 연구는 활발하게 이루어졌다.

Soot의 생성 및 발달특성의 관한 연구는 연소 화학반응이 복잡하고, 각각의 연소 조건에 따라 Soot의 생성 및 발달특성이 달라짐으로 쉽게 예측 할 수 없어서 그동안 Soot의 생성과 발달을 포함한 단일 연료 액적(Single fuel droplet)의 연소특성의 관한 연구는 활발하지 않았다. 하지만 Soot이 연소기관 및 인체에 미치는 영향을 고려하면 Soot의 생성 및 발달특성에 관한 연구는 반드시 수행되어야한다.

이러한 Soot의 영향을 연구하고자 Law는<sup>(6-7)</sup> 액적 증발 및 연소특성 연구와 액적 가열을 통한 비정상 액적 연소특성에 대한 연구를 통해 액적 증발 연소를 지배하는 기본 메커니즘을 연구였다. 또한, 서는<sup>(8-9)</sup> Methanol

Received: 03 Nov 2014, Received in revised form: 16 Dec 2014, Accepted: 17 Dec 2014)

\*국립공주대학교 기계자동차공학부 기계설계전공  
†책임저자, 회원, 국립공주대학교 기계자동차공학부  
E-mail : hksuh@kongju.ac.kr  
TEL : (041)521-9264 FAX : (041)555-9123

연료 액적의 연소 특성에 관한 연구와 초기 직경이 *n*-heptane 액적 연소 특성에 미치는 영향을 연구하여 단일 연료 액적의 연소특성을 연구하였다. 또한, 단일 액적의 미립화 특성을 연구하기 위해 음향 부양장(Acoustic levitation field)에서 초음파 주파수에 따른 실험을 하였다<sup>(10)</sup>. 이 외에 이 등은<sup>(11)</sup> 층류 예혼합 화염에서 Soot 입자의 생성 특성을 알아보기 위해 Soot 입자의 크기 분포에 대한 연구를 수행하였고, 초기온도 및 압력에 따라 C/O 값이 변할 때 입자의 크기 분포에 대한 민감도를 연구하였다. 또한, 김 등은<sup>(12)</sup> 직접 적분 모델 트법을 이용한  $C_2H_4/Air$  비예혼합 난류연소의 매연 생성 모델링 연구를 통해 비예혼합 난류 화염장의 매연 입자 생성을 예측하였다. 하지만, 복잡하고 불규칙한 Soot의 거동과 데이터를 얻기에는 한계가 있으므로 각각의 물리 모델을 보조할 수 있는 해석 모델의 연구가 필요한 시점이다.

따라서 본 연구에서는 단일 액적 연소 해석 모델의 데이터베이스 구축을 위한 선행 연구로서 Decane 연료를 적용하여 분위기 압력( $P_{amb}$ ), 산소 농도( $O_2$ )에 따라 실험적인 연구를 수행하였다. 또한, 연구 결과를 매연 체적 분율(Soot volume fraction,  $f_v$ )의 결과로 정리하여 Soot의 해석 모델을 개발하기 위한 기초 데이터로 제시하고자 하였다. 이러한 연구는 단일 연료 액적의 Soot 발생을 예측하고 거동을 파악하는 간단한 실험으로 Soot 해석 모델의 정확도를 높이는 데 기여할 것으로 사료된다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치의 구성

본 연구에서는 분위기 압력( $P_{amb}$ ), 산소 농도( $O_2$ )에 따른 실험 조건의 제어가 가능하고, 연소 실험 후 발생하는 배기가스의 배출이 가능한 배출구가 설치된 연소 챔버(Combustion chamber)를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연소 챔버에는 Decane 연료 액적의 연소 특성 및 화염 거동 특성을 가시화 할 수 있는 가시화창과 챔버 내의 분위기 압력을 조절 및 유지할 수 있는 레귤레이터, 온도 측정을 위한 열전대를 설치하여 분위기 압력 및 분위기 온도를 실시간으로 모니터링하며 실험을 하였다. 또한, 연료 공급 장치와 연료 분배 장치를 설치하여 Decane 연료 액적을 챔버 내부에 형성시킨 후 집화장치

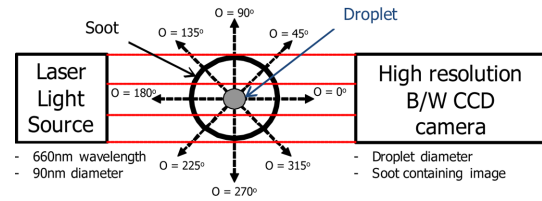


Fig. 1 Schematics of droplet combustion visualization system and direction of decane droplet soot analysis

를 사용하여 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 설치하여 실험을 수행하였다. 광원은 충분한 사이즈( $D=90$  mm)로 펼쳐 촬영을 수행하였고, intensity profile을 감안하여 연구를 수행하였다. 또한, 고해상도 Black/White CCD 카메라를 통해 Decane 연료 액적의 직경 변화와 Soot 생성 및 발달을 가시화 하였다. 또한, Decane 연료 단일 액적의 매연 체적 분율은 Fig. 1에 나타난 것과 같이  $0^\circ$  부터  $315^\circ$  까지  $45^\circ$  간격으로 총 8 방향을 측정 하였다. Fig. 1은 Decane 연료 액적의 연소 가시화 실험 장치의 개략도이다.

### 2.2 실험 영향 인자들의 선정

본 실험에서는 선행연구들<sup>(6-9)</sup>을 참고해서 Soot 생성 및 발달의 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려진 분위기 압력( $P_{amb}$ )과 산소 농도( $O_2$ )의 영향을 고려하여 연구하였다.

단일 연료 액적의 매연 체적 분율은 분위기 압력( $P_{amb}$ ) 변화에 영향을 받는다<sup>(11)</sup>. 이러한 특성은 분위기 압력( $P_{amb}$ ) 변화에 따른 Methanol 연료 액적의 연소특성에 관한 선행 연구<sup>(8)</sup>에서도 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 Decane 연료 액적 연소시 분위기 압력이 1.0 atm과 1.5 atm 일 때 매연 체적 분율에 미치는 영향을 파악하였다.

또한, Decane 연료 액적 연소시 연소실 내부의 산소 농도( $O_2$ )에 따른 매연 체적 분율의 영향을 파악하기 위해 17%~25% 범위의 산소 농도( $O_2$ ) 조건을 적용하였고, 동일한 분위기 압력( $P_{amb}$ )과 초기 액적 직경 크기로 실험 후 연구 분석 하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Fuel	Decane
Ambient pressure (P <sub>amb</sub> )	1.0 atm, 1.5 atm
Oxygen concentration(O <sub>2</sub> )	17%~25%

2.3 실험 연구 결과 분석 방법

Decane 연료 단일 액적의 연소 특성을 비교하기 위해 연소 조건에 따라 변화하는 매연 체적 분율을 측정하여 비교 분석하였다. Decane 연료 액적의 매연 체적 분율 측정은 가시화 장치와 고해상도 B/W CCD 카메라로 촬영한 액적의 Back-lighted droplet diameter 이미지를 분석 후 시간에 따라 실시간 액적의 반경 및 초기 액적의 반경비로 정의되는 r/r<sub>i</sub> 값에 해당하는 매연 체적 분율을 측정 하여 비교 분석하였다. 액적의 r/r<sub>i</sub> 값은 정확한 측정을 위해 Laser back-lighted image를 기준 이미지 배경과 비교 후 모든 측정 방향으로 매연 체적 분율이 측정 가능한 Threshold level을 적용하여 연구 분석하였다.

본 연구에서는 분위기 압력(P<sub>amb</sub>), 산소 농도(O<sub>2</sub>)에 따른 Decane 연료 단일 액적의 매연 체적 분율 변화를 비교하여 검출한 데이터로 단일 액적 연소 실험의 데이터 베이스를 확보하고자 하였다.

3. 매연 체적 분율의 분석

매연 체적 분율 분포의 측정은 다양한 분위기 조건에서 Sootshell의 위치 및 Soot의 생성량을 결정하는데 사용된다. 본 연구에서는 광소멸법을 이용한 측정 기법과 토모그래피 기법<sup>(13-14)</sup>을 적용하여 연구를 수행하였다. 액적 점화 이전의 배경 이미지에 강도(Intensity)와 점화 이후 Soot을 포함하고 있는 이미지의 강도를 비교하여 강도 비율(I/I<sub>0</sub>)을 측정하였다. 강도 비율(I/I<sub>0</sub>)의 분포는 그레이 레벨(G) 분석 선을 따라 두 개의 이미지에 대한 비율을 계산함으로써 얻을 수 있다.

Figure 2에서 검은 원과 빨간색 삼각형은 각각 배경 이미지(G<sub>0</sub>)와 Soot을 포함하고 있는 이미지(G)에 대한 그레이 레벨(G/G<sub>0</sub>) 분석 선을 나타낸다. 이와 같은 과정을 통해 얻은 강도 비율(I/I<sub>0</sub>) 분포는 Fig. 2에 청색 직사각형으로 표시된다. 본 연구에서는 화염이 구형이기 때문에 2D 광소멸법을 적용한 Deconvolution 기법을 사용하여 매연 체적 분율을 식 (1)과 같이 결정하였다.

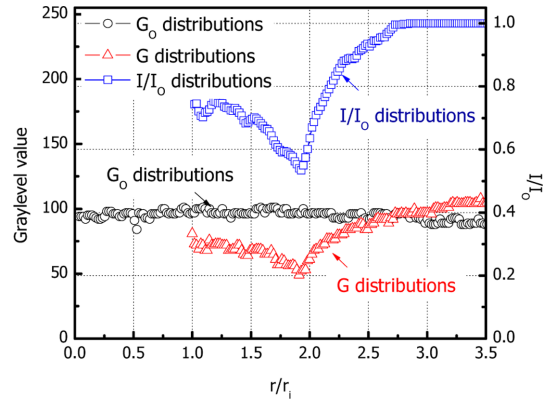


Fig. 2 The graylevel distributions of the background(G<sub>0</sub>) and soot containing(G) image and intensity ratio(I/I<sub>0</sub>) distributions along the line of analysis

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

여기서,

- I : transmitted intensity
- I<sub>0</sub> : laser intensity
- K<sub>e</sub> : extinction constant of soot
- f<sub>v</sub> : soot volume fraction
- L : path length of the laser light
- λ : wavelength of the light source

또한, 광소멸법을 통해 얻은 정보는 Soot의 대칭분포에 따라 투영된 데이터의 누적 값으로 변환된다.

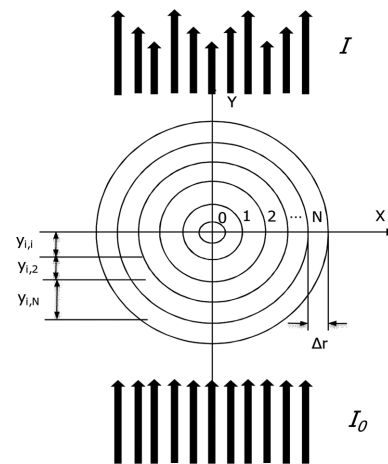


Fig. 3 Discretization of the sooting region for application of full-field light extinction measurement of soot concentration

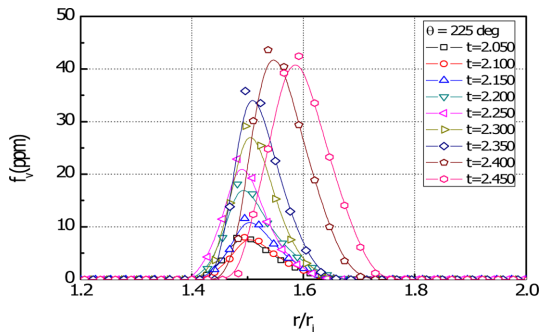


Fig. 4 Analysis of on the temporal soot volume fraction( $f_v$ ) of decane droplet

Figure 3에서 볼 수 있듯이, 이 방법은 식 (2)에서 표현한 것처럼 동심원에서 매연 체적 분율( $f_v$ )로 계산이 가능하다.

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

이와 같은 방법으로 Fig. 4와 같이 매연 체적 분율을 측정하였고, 그 결과값을 이용하여 분위기 압력( $P_{amb}$ )과 산소 농도( $O_2$ )에 따른 Soot의 생성 특성을 비교 연구하였다.

### 4. 연구 결과 및 고찰

#### 4.1 분위기 입력( $P_{amb}$ )의 영향

가시화 실험 결과에서 확인한 바와 같이 Decane 연료 액적 연소시 분위기 압력( $P_{amb}$ )이 커질수록 Soot의 발생

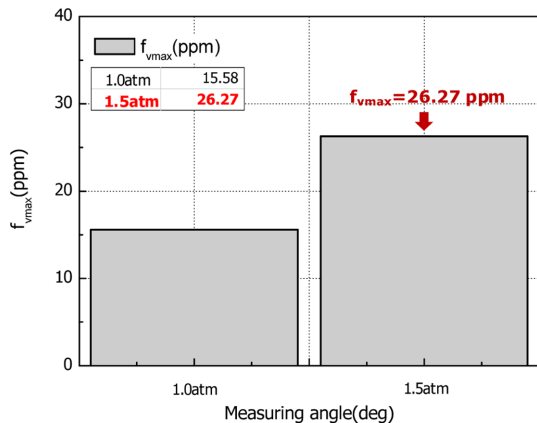


Fig. 5 Effect of ambient pressure( $P_{amb}$ ) on the maximum soot volume fraction( $f_v$ ) of decane droplet

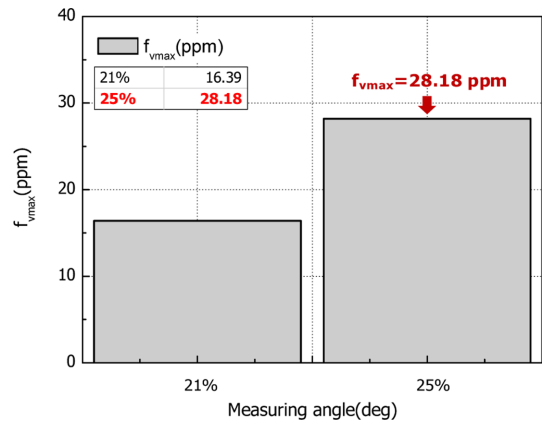


Fig. 6 Effect of oxygen concentration( $O_2$ ) on the maximum soot volume fraction( $f_v$ ) of decane droplet

이 활발하게 진행되는 것을 확인하였다.

Figure 5는 모든 측정 방향에서 매연 체적 분율의 최대값을 비교한 것이다. Decane 연료 액적 연소시 분위기 압력( $P_{amb}$ ) 증가하면 Soot이 더 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 챔버내의 분위기 압력( $P_{amb}$ )이 높을수록 Decane 연료 액적 연소 후 생성되는 Soot의 확산을 방해하는 Thermophoretic flux가 증가하기 때문에 매연 체적 분율이 높게 측정되는 것으로 판단된다. 이러한 연구 결과는 층류 예혼합 화염에서 Soot 입자의 크기 분포에 대한 연구를 통해 연소실의 압력이 증가할 때 Soot 입자가 증가 한다는 선행 연구결과<sup>(11)</sup>와 일치하였다.

#### 4.2 산소 농도( $O_2$ )의 영향

가시화 결과를 통해 Decane 연료 액적 연소시 산소 농도( $O_2$ )가 높아짐에 따라 시간에 따른 매연 체적 분율의 값이 증가하는 것을 확인하였다.

Figure 6은 모든 측정 방향에서 매연 체적 분율의 최대값을 비교한 것이다. 이를 통해 산소 농도( $O_2$ )의 변화가 Decane 연료 액적 연소에 미치는 영향을 비교 분석하였으며, 산소 농도( $O_2$ )가 높았을 때 최대값 또한 가장 높게 측정되었다. 이는 연소실 내부의 산소 농도( $O_2$ )가 높을수록 Decane 연료 액적 연소시 화염 온도( $T_f$ )가 높아지고, 화염온도의 직접적인 영향을 받는 Thermophoretic flux가 증가하여 매연 체적 분율이 높게 측정된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 다른 연료를 이용한 선행연구<sup>(9)</sup>를 통해서도 파악할 수 있었다. 또한, 산소 농도가 17%의 경우 동일 연소 조건에서 Soot이 발생하지 않

는 것을 확인하였다. 이러한 결과로부터 Soot의 생성을 억제하는 산소 농도(O<sub>2</sub>)의 조건은 17%~21%로 결정하고 이에 대한 추가 연구를 수행중이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 분위기 조건에 따른 Decane 액적의 연소 특성이 Soot 거동에 미치는 영향을 분석한 후 연구 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 분위기 압력(P<sub>amb</sub>)이 증가할수록 Soot이 더 많이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 챔버내의 분위기 압력(P<sub>amb</sub>)이 높을수록 Decane 연료 액적 연소 후 생성되는 Soot의 확산을 방해하는 Thermophoretic flux가 증가하기 때문에 매연 체적 분율이 높게 측정되는 것으로 판단된다.

2) 연소실 내부의 산소 농도(O<sub>2</sub>)가 높을수록 매연 체적 분율이 높게 측정되었다. Decane 연료 액적 연소시 화염 온도(T<sub>f</sub>)가 높아짐에 따라 화염온도의 직접적인 영향을 받는 Thermophoretic flux가 증가하여 매연 체적 분율이 높게 측정된 것으로 판단된다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) M. W. Bae and S. K. Lee, "A Study on the Performance of a High Temperature and High Pressure Constant-Volume Combustion Chamber for Modelling of Soot Formation Processes in Combustion Engines", *Journal of KSAE*, Vol. 7, No. 1, 1991, 20~30.
- (2) S. H. Park, J. P. Cha, S. J. Kwon, S. W. Park, and C. S. Lee, "Effect of Ethanol Content on Fine Soot Particle Emission from a Diesel-Ethanol Blended Fuel Diesel Engine", *Transactions of KSME B*, Vol. 35, No. 12, 2011, 1359~1365.
- (3) S. H. Bae and S. C. Hong, "Simultaneous Removal of Soot and NOx from Diesel Engine Exhaust Gas", *The 2007 Environmental Societies Joint Conference*, 2007, 1772~1776.
- (4) M. S. Ahn, "The Strategy of Soot Reduction for Diesel Vehicle", *Bulletin of Korea environmental preservation association*, Vol. 13, No. 6, 1991, pp. 46~50.
- (5) Y. H. Yoon, J. D. Jo, Y. H. Jung, Y. H. You, J. H. Kang, and G. W. Jeong, "A Effect of Diesel Fuel Additive on the Performance of Diesel Particulate Filter", *Proceeding of KSAE*, 2011, 685~690.
- (6) C. K. Law, "Recent Advances in droplet vaporization and combustion", *Progress in Energy and Combustion Science*, 8, 171~201, 1982.
- (7) C. K. Law, "Unsteady droplet combustion with droplet heating", *Combustion and Flame*, 26, 17~22, 1976.
- (8) H. K. Suh, "Study on the Combustion Characteristics of Methanol Fuel Droplet", *Journal of ILASS-KOREA*, Vol. 19, No. 3, 2014, pp. 109.
- (9) 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.
- (10) 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.
- (11) J. S. Lee, K. Y. Huh, "Prediction of soot particle size distribution in laminar premixed flames", *Journal of The 40th KOSCO Symposium*, 2009, 257~263.
- (12) T. H. Kim, M. O. Woo, Y. M. Kim, "Numerical modeling of soot formation in C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/Air turbulent non-premixed flames using Direct Quadrature Method of Moments", *Proceeding of The 40th KOSCO Symposium*, 2010, 125~128.
- (13) C. J. Dasch, "One-dimensional tomography : A comparison of Abel, onion-peeling, and filtered back projection methods", *Applied Optics*, Vol. 31, pp. 1146~1152, 1992.
- (14) M. Y. Choi, G. W. Mulholland, A. Hamins, T. Kashiwagi, "Comparison of optical and gravimetric soot volume fraction", *Combustion and Flame*, Vol. 102, pp. 161~169, 1995.