한국액체미립화학회지 제19권 제3호(2014)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2014.19.3.109

Methanol 연료 액적의 연소 특성에 관한 연구

서 현 규†

Study on the Combustion Characteristics of Methanol Fuel Droplet

Hyun Kyu Suh

Key Words: Burning rate(연소율), Droplet combustion(액적연소), Flame diameter(화염직경), Flame standoff ratio(화염전달비), Single fuel droplet(단일연료액적)

Abstract

The main purpose of this study is to provide basic information of droplet burning, extinction process and flame behavior of methanol fuel and improve the ability of theoretical prediction of these phenomena. For the improved understanding of these phenomena, this paper presents the experimental results on the methanol droplet combustion conducted under various initial droplet diameters (d_0), ambient pressure (P_{amb}), and oxygen concentration (O_2) conditions. To achieve this, the experimental study was conducted in terms of burning rate (K) with normalized droplet diameter (d/d_0), flame diameter (d_f) and flame standoff ratio (FSR) under the assumptions that the droplet combustion can be described by both the quasi-steady behavior for the region between the droplet surface and the flame interface and the transient behavior for the region between the flame interface and ambient surrounding.

1. 서 론

최근 발전용 및 자동차용 동력 기관으로부터 발생하는 배출물의 저감 기준 및 규제 강화로 인해 청정 연소가 가능한 대체 연료들에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히, 기존의 석유 연료와는 달리 Methanol은 천연 가스나 Biomass 와 같은 고갈의 염려가 없는 풍부한 자원으로부터 생산이 가능하며, Spark ignition(SI) 기관에서 Methanol의 사용은 Cold start 조건에서 생성되는 NO_X와 입자상 물질(Particulate Matter)의 실질적인 감소를 기대할 수 있는 것으로 알려져 있다[1-2].

기초적인 연구 부분에서는 Methanol은 액체 연료 중 가장 간단한 화학적 조성(CH_3OH)을 가진 연료 중 하나이다. 따라서, Methanol의 이러한 물리 화학적인 물성치는 세부 화학 반응을 포함한 액적 연소 모델(Droplet combustion model)의 수치해석적인 검증을 가능하게 한다. 특히, Methanol은 연소시에 CH_3 radical의 생성이 거의 없기 때문에 Soot 이 발생하지 않고, 이로 인한 실험 및 해석의 어려움이 적은 장점이 있어 다른 액체 연료의 연소 특성을 이해하는데 기초자료를 제공할 수 있다.

연료의 연소 특성을 연구하는 방법 중, 단일 액적 연소 이론(Single droplet combustion theory)은 연구에 고려해야 하는 조건의 단순화가 가능하고[3], 적용 범위가 매우 넓어 다양한 크기의 액적 (d_0), 분위기 압력(P_{amb}), 산소 농도(O_2)의 영향을 확인할 수 있는 장점이 있다[4]. 기본적으로 연소기관에서 발생하는 배출 가스의 저감을 위해서는 청정 연소 기술의 개발이 상당히 중요하다. 또한, 연료의 연소율 및 화염 전달 특성은 연소 특성 파악에 매우 중요한 인자들로[5-7], 이미 Methanol 연료 액적 연소의 특성을 파악하기 위하여 많은 선행 연구들이 수

Recieved: 02 Jun 2014, Recieved in revised form: 11 Sep 2014, Accepted: 11 Sep 2014)
†책임저자, 회원, 국립공주대학교 기계자동차공학부
E-mail : hksuh@kongju.ac.kr
TEL : (041)521-9264 FAX : (041)555-9123

행되었다. 하지만, 연소과정에서 열 및 물질 전달 특성의 파악이 어렵고, 화학적인 조성이 복잡하여 연구를 위한 물성치의 결정이 쉽지 않은 이유로 액적 연소에 관한 연구는 한계가 명확하였다[6-13].

따라서, 본 연구에서는 다양한 연소 조건에 따른 Methanol 연료의 연소 거동을 단일 액적 연소 이론(Single droplet combustion theory)을 적용하여 실험적으로 규명하고자 한다. 이를 위하여 Methanol 연료 액적의 연소율 및 화염 전달 특성 파악을 위한 실험적 연구를 다양한 액적의 초기 직경(d_0), 분위기 압력(P_{amb}), 산소 농도(O_2) 조건에서 수행하였다. 또한, 이 결과들을 비교 분석하여 차후 최적 연소 조건 도출 및 수치해석 모델 개발에 필요한 기초 데이터를 제시하는 것을 목표로 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 연소 실험 장치의 구성

본 연구에서는 실험 조건에 따라 분위기압력의 조성이 가능하고, 고온 연소 실험 및 실험 후 발생하는 배기가스의 배출이 가능한 배출구가 설치된 234 mm × 222 mm × 182 mm 크기의 연소 챔버(Combustion chamber)를 제작하여 실험을 수행하였다. 본 연소 챔버의 옆면에는 Methanol 액적의 연소 특성 및 화염 거동 특성을 가시화 할 수 있는 여러개의 가시화창(Visualization window)을 설치하였다. 동시에 챔버 내의 분위기압 조절 및 유지가 가능한 레귤레이터(Regulator)와 온도 측정이 가능한 열전대(Thermocouple)를 설치하여 실시간으로 압력 및 온도를 모니터링하며 실험을 수행하였다. 또한, 연소 챔버에 연료 공급 장치(Fuel syringe assembly)와 연료 분배 장치(Droplet deployment assembly)를 설치하여 Methanol 연료 액적을 챔버 내에 설치된 wire에 형성시켰으며, 점화장치(Ignitor)를 이용하여 연료의 연소 실험을 수행하였다.

연소 가시화 및 분석 장치는 광계측 실험 장비 및 기술을 수정 활용하였다. 먼저, 660 nm의 파장(Wavelength)과 강도(intensity) 조절이 가능한 최대 출력 6W의 Laser 장치를 광원(Light source)으로 설치하여 실험을 수행하였다. 또한, 고해상도 Black/White CCD 카메라를 이용하여 Methanol 액적의 직경 변화를 가시화 하였다. 동시에 Bandpass Filter를 설치한 고해상도 Color CCD 카메라를 이용하여 동일한 실험 조건에서 Methanol의 화염

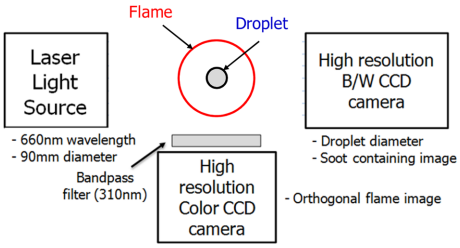


Fig. 1 Schematics of droplet combustion visualization system

거동을 가시화하였다. 각 카메라의 촬영은 24fps, 36pixel/1 mm의 해상도로 측정을 하였고, 가시화를 위한 연구 영역은 최소 50 mm × 50 mm를 유지하였다. Fig. 1은 Methanol 연료의 연소 가시화 실험 장치의 개략도이다.

2.2 실험 영향 인자들의 선정

2.2.1 초기 액적 직경의 영향 연구

Methanol 액적의 크기가 연소율(Burning rate, K) 및 화염전달비(Flame standoff ratio, FSR)에 미치는 영향을 명확히 이해하기 위해서는 초기 액적 직경(d_0)의 변화가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Methanol 연료의 초기 액적의 직경을 2 mm~4 mm까지 변화시켜가며 그 영향을 연구 정리하였다.

2.2.2 분위기 압력의 영향 연구

일반적으로 단일 액적 연소 이론에서 액적의 연소율(K)은 분위기 압력(P_{amb})의 변화에는 무관한 것으로 알려져 있다. 하지만, 분위기 압력이 낮아질 때 감소하는 화염 온도(Flame temperature)는 액적 연소율에 영향을 주는 것으로 알려져 있다[14]. 따라서, 1.0 atm과 1.5 atm의 분위기 압력 변화가 Methanol 연소특성에 미치는 영향을 파악하였다.

2.2.3 산소 농도의 영향 연구

연소시의 산소 농도(O_2)의 변화는 액적의 연소율 및 열전달 특성을 연구하는 효과적인 방법이다[15]. 특히, 산소 농도의 변화는 화염 온도에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다[16]. 따라서, 산소 농도의 변화에 따라 화염 온도도 변화할 것이고, 이는 Methanol 연료 액적의 연소율에 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서, 연소 챔버내의 산소 농도(O_2) 조건을 실험이 가능한 한계까지 변경하여 연구를 수행하였다. 자세한 실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Experimental conditions

Fuel	Methanol
Initial droplet diameter(d_0)	2 mm ~ 4 mm
Ambient pressure (P_{amb})	1.0 ~ 1.5 atm
Oxygen concentration (O_2)	16% ~ 20%

2.3 실험 연구 결과 분석 방법

연소 조건에 따른 Methanol 연료의 연소 특성을 비교하기 위하여 액체 연료가 일정 시간 동안 연소하는 비율로 정의되는 연소율(Burning rate, K)을 측정하여 비교 연구를 수행하였다. Methanol 액적의 연소율(Burning rate, K) 측정은 가시화 장치와 고해상도 B/W CCD 카메라로 촬영한 액적의 Back-lighted droplet diameter 이미지를 분석하였고, 시간에 따른 액적 직경의 제곱값의 변화가 만드는 직선의 기울기를 측정하여 연소율을 표시하는 대표적인 기법인 d^2-law[9,13]를 식 (1)과 같이 적용하여 비교 연구하였다. 액적 직경의 정확한 측정을 위하여 Laser back-lighted image를 기준 이미지 배경과 비교한 후 최적의 Threshold level을 적용하여 분석하였고, 액적 연소 초기의 불안정한 상태인 Transient heat-up 기간은 분석에서 제외하였다[17-18]. 이를 통하여 빛의 산란에 의해 액적 경계면에서 발생하는 경계의 불분명한 문제를 해결할 수 있었다. 본 연구에 선정된 실험 인자들의 변화에 따른 연소율의 변화를 상호 비교하였고, 이를 통해 기초 데이터를 확보하고자 하였다.

$$K = \frac{-d(d^2)}{dt} \quad (1)$$

Methanol의 화염 발달 특성을 분석하기 위하여화염 전달비(Flame standoff ratio)를 측정하여 비교 분석하였다. 화염 전달비(FSR)는 측정 시간에 대한 액적의 직경(d)과 화염 직경(d_f)의 실시간 변화율로 표현되며, 화염 전달비의 비교를 통하여 연소 조건에 따른 Methanol 화염의 형성 및 발달에 대한 비교 데이터를 검출하였다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1 Methanol 액적의 연소율 특성

3.1.1 초기 액적 직경의 영향

Fig. 2는 Methanol 의 초기 액적 직경 (d_0)의 변화가

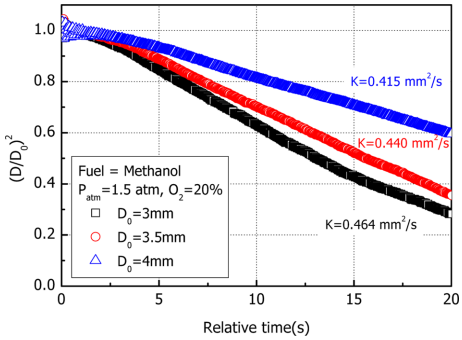


Fig. 2 Effect of initial droplet diameter(d_0) on the methanol droplet burning rate (K)

액적의 연소율(K)에 미치는 영향을 연구한 것이다. 본 연구에서는 액적 직경의 실시간 변화율로 정의되는 Normalized droplet diameter (d/d_0)를 측정하여 Methanol의 연소 특성을 측정 시간(t)에 따라 비교 연구하였다.

연구 결과에서 확인 가능한 바와 같이, Methanol의 초기 직경(d_0)이 작을수록, 연소로 인한 액적 직경의 감소는 빠르게 진행되었으며, 그 결과 액적의 전체 연소 시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 따라서, 액적의 초기 직경(d_0)은 연료의 연소율(K)에 크게 영향을 미치며, 충분한 미립화가 진행된 작은 직경의 연료 액적이 빠른 시간 안에 연소를 완료하는 것으로 판단된다.

3.1.2 분위기 압력의 영향

연소 과정 동안의 분위기 압력(P_{amb})이 Methanol 액적의 연소율(K)에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 동일한 연소 조건에서 분위기 압력이 증가할수록 연소율은 높아져 Methanol 액적의 연소가 빨리 진행되는 것으

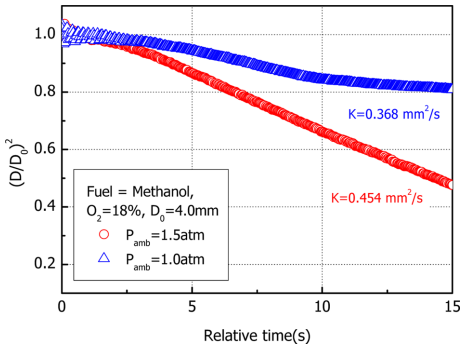
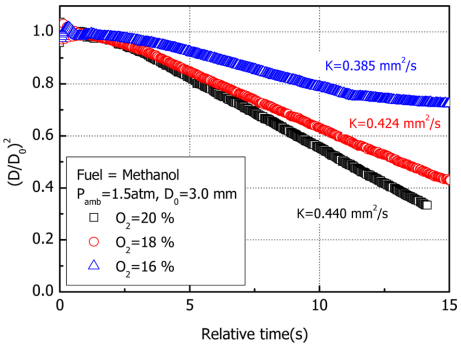


Fig. 3 Effect of ambient pressure (P_{amb}) on the methanol droplet burning rate (K)

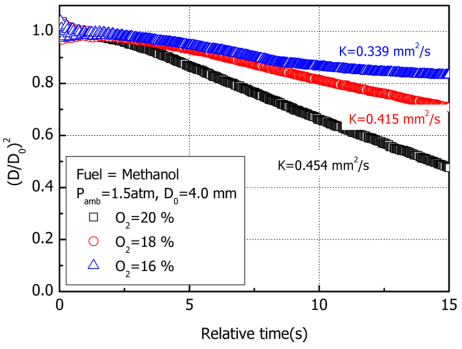
로 나타났다. 이러한 결과는 기본적으로 액적 연소시 분위기 압력이 증가할수록 복사열전달(Radiative heat transfer)량이 증가하고, 반면에 복사방출(Radiative emission)량이 감소하여 액적의 연소 특성이 개선되기 때문으로 판단된다. 그 결과, 높은 연소율(K) 특성을 보인다.

3.1.3 산소 농도의 영향

연소 챔버내의 산소 농도(O_2)의 변화에 따른 Methanol 액적의 연소율 특성을 Fig. 4에 나타내었다. 연구 결과, Methanol 연소시 챔버 내의 산소 농도의 증가는 액적의 연소율을 개선하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 산소 농도가 증가할수록 연소시 화염의 최대 온도(Maximum flame temperature)가 증가하고, 높은 화염의 온도는 액적의 표면(Droplet surface)과 화염면(Flame interface) 사이 영역에 존재하는 기상(Gas phase)의 Effective thermal-physical property를 활성화시켜 연소 특성을 향상시키는 것으로 판단된다. 따라서, 산소 농도가 증가할수록 화염 위치가 액적의 표면 쪽으로 가까워



(a) D_0=3.0mm



(b) D_0=4.0mm

Fig. 4 Effect of oxygen concentration(O_2) on the methanol droplet burning rate(K)

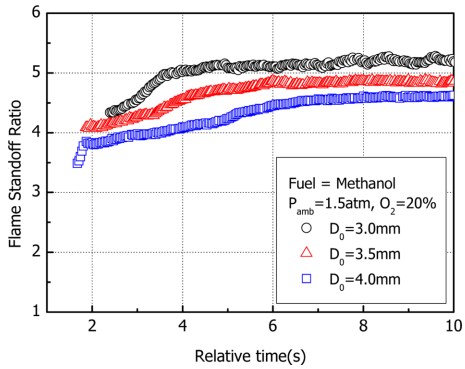


Fig. 5 Effect of initial droplet diameter (d_0) on the methanol flame standoff ratio (FSR)

지고, 그 결과 화염 직경에 감소할 것으로 예상된다. 한편, 산소농도가 16%인 경우에는 다른 연구 결과와 달리 시간이 10초 경과후의 액적크기의 변화가 다른 구배를 나타내고 있는데, 이는 연소 말기에 낮은 산소 농도로 인하여 연소가 더 이상 진행되지 않아 액적 지름의 크기가 줄어드는 속도가 늦어지고, 점차 화염 전파가 약해지기 때문에 연소율도 감소하는 것으로 사료된다.

3.2 Methanol 액적의 화염 전달 특성

3.2.1 초기 액적 직경의 영향

Methanol 연료의 화염 전달 특성을 분석하기 위하여 연소 과정에서 화염의 직경(d_f)과 액적의 직경(d)의 실시간 변화율로 정의되는 화염전달비(Flame standoff ratio, FSR)를 비교하여 연구 수행 하였다. Fig. 5는 초기 액적 직경의 크기에 따른 화염 전달비(FSR)의 변화를 비교한 것이다. 비교 결과, 모든 실험 조건에서 상당한 연소 기간 동안 안정적인 화염을 형성하는 것으로 나타났다. 또한, Methanol액적의 초기 직경(d_0)이 증가하면, Fig. 2에서 확인한 바와 같이 실시간 액적 직경의 변화율로 정의된 Normalized droplet diameter (d/d_0)가 천천히 감소하여, 화염 전달비(FSR)의 크기도 감소하는 것으로 나타났다.

3.2.2 분위기 압력의 영향

연소 챔버 내의 분위기 압력(P_{amb})에 따른 Methanol 연료의 화염전달비(FSR)를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 연구 결과, 분위기 압력이 높을수록 연소 초기에는 화염 전달비가 다소 낮은 것으로 나타났는데, 이는 액적 표면으로부터 외부 방향으로 향하는 화염 전파가 높은

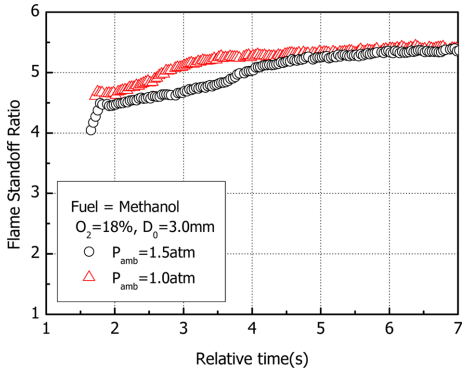


Fig. 6 Effect of ambient pressure (P_{amb}) on the methanol flame standoff ratio (FSR)

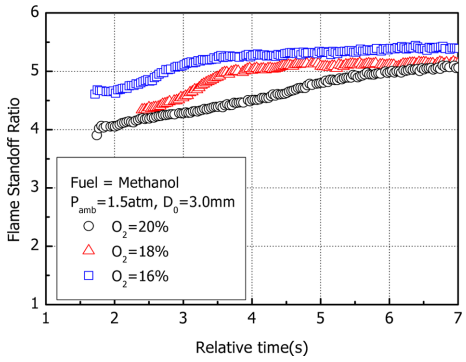


Fig. 7 Effect of oxygen concentration (O_2) on the methanol flame standoff ratio (FSR)

분위기 압력으로 인해 외부로부터 액적 표면으로 향하는 저항력(Drag force)의 방해를 받아 용이하지 않은 결과로 판단된다. 반면에, 일정 시간이 지난 후에는 분위기 압력에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터, 분위기 압력은 화염전달에 영향을 미치는 주요인자가 아님을 확인할 수 있었다[15-17].

3.2.3 산소 농도의 영향

Methanol 액적 연소시의 챔버 내의 산소 농도(O_2)의 변화에 따른 화염 전달비(FSR)의 비교 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 앞의 연구 결과에서 예상하였듯이, 산도 농도의 변화는 화염의 위치에 직접적인 영향을 미쳐 화염 직경 (d_f)의 크기를 변화시켰다. 비교 결과, 산소 농도(O_2)가 증가할수록 화염 직경(d_f)이 감소하는 것으로 나타났다. 높은 산소 농도 조건에서 화염 직경(d_f)가 감소하는 이유는 높은 화염 온도(Flame temperature)로 인해 화염으로부터 액적 표면으로의 열전도율(Heat conduction rate)이 증가하기 때문이다. 그 결과, 산소 농도가 증가할수록 액적의 연소율(K)과 화염의 최대 온도가 증가하여 화염 위치가 액적의 표면 쪽으로 가까워지고, 앞에서 예상한 바와 같이 화염 직경이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 산소 농도가 증가할수록, 화염 전달비(FSR)는 작은 값을 가진다.

4. 결 론

본 연구에서는 Methanol 연료의 연소 조건이 액적의 연소 특성 및 화염면 형성에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였고, 다음의 결론을 얻었다.

1. Methanol의 초기 직경(d_0)이 작을수록, 연소로 인한 액적 직경의 감소는 빠르게 진행되었고, 액적의 전체 연소 시간도 짧아지는 것으로 나타났다. 또한, Methanol액적의 초기 직경(d_0)이 증가하면, 화염 전달비(FSR)의 크기도 감소하였다.

2. 동일한 연소 조건에서 분위기 압력이 증가할수록 액적 연소시의 Radiative heat transfer가 증가하고, 그 결과 Radiative emission의 양이 감소하기 때문에 액적의 연소 특성이 개선되어 연소율이 증가하였다.

3. 분위기 압력이 높을수록 연소 초기에는 화염 전달비가 다소 낮은 것으로 나타났는데, 이는 액적 표면으로부터 외부 방향으로 향하는 화염 전파가 높은 분위기 압력으로 인해 외부로부터 액적 표면으로 향하는 저항력(Drag force)의 방해를 받아 용이하지 않은 결과로 판단된다.

4. 산소 농도가 증가할수록 연소시 화염의 최대 온도(Maximum flame temperature)도 증가하여 액적의 표면과 화염면 사이 영역에 존재하는 기상의 Effective thermal-physical property를 활성화시켜 연소 특성을 향상시키는 것으로 나타났다. 또한, 산도 농도가 증가할수록 화염 직경이 감소하는 것으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

(1) S. B. Han, S. S. Mun and S. Y. Lee, A study on the smoke reduction of methanol-diesel engine, Transactions of the KSME (B), 20, 2421-2429, 1996.

(2) S. H. Choi, C. H. Ha, C. H. Jeon and Y. J. Chang, An experimental study on the performance and characteristics of emission for an S.I. engine with methanol-reformulated fuel, Transactions of the KSME (B), 25, 1193-1200, 2001.

(3) T. I. Farouk and F. L. Dryer, On the extinction characteristics of alcohol droplet combustion under microgravity conditions – A numerical study, Combustion and Flame, 159, 3208-3223, 2012.

(4) G. M. Faeth, Current status of droplet and liquid combustion, Progress in Energy and Combustion Science, 3, 191-224, 1977.

(5) F. A. Williams, Droplet burning, in: T. H. Cochran (Eds.), Combustion Experiments in Zero-Gravity Laboratory, Progress in Astronautics and Aeronautics, 73, 31-48, 1981.

(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 and G. M. Faeth, Opportunities and challenges of combustion in microgravity, Progress in Energy and Combustion Science, 20, 65-113, 1994.

(8) A. J. Marchese, F. L. Dryer and V. Nayagam, Numerical modeling of isolated n-alkane droplet flames: initial comparisons with ground and space-based microgravity experiments, Combustion and flame, 116, 432-459, 1999.

(9) C. K. Law, Unsteady droplet combustion with droplet heating, Combustion and Flame, 26, 17-22, 1976.

(10) S.Y. Cho, R. A. Yetter and F. L. Dryer, A computer model for one-dimensional mass and energy transport in and around chemically reacting particles, including complex gas-phase chemistry, multicomponent molecular diffusion, surface evaporation, and heterogeneous reaction, Journal of Computational Physics, 102, 160-179, 1992.

(11) S. Y. Cho and F. L. Dryer, A numerical study of the unsteady burning behaviour of n-heptane droplets, Combustion Theory and Modelling, 3, 267-280, 1999.

(12) G. M. Faeth, Evaporation and combustion of sprays, Progress in Energy and Combustion Science, 9, 1-76, 1983.

(13) G. A. Godsave, Studies of the combustion of drops in a fuel spray-the burning of single drops of fuel, Proceedings of the Combustion Institute, 4, 818-830, 1953.

(14) S. Gordon, B. J. McBride, NASA SP-273, 1989.

(15) F. A. Williams and F. L. Dryer, Science Requirements Document for Droplet Combustion Experiment, NASA, 1994.

(16) V. Nayagam, J. B. Haggard, R. Colantonio, A. J. Marchese, B. J. Zhang and F. A. Williams, Microgravity n-Heptane Droplet Combustion in Oxygen-Helium Mixtures at Atmospheric Pressure, AIAA Journal, 26, 1369-1378, 1998.

(17) K. O. Lee, K. Jensen and M. Y. Choi, Investigation of sooting in normal-gravity droplet combustion using light extinction and gravimetric techniques, Proceeding of Combustion Institute, 26, 2397-2404, 1996.

(18) D. L. Dietrich, J. B. Haggard, F. L. Dryer, V. Nayagam, B. D. Shaw and F. A. Williams, Droplet combustion experiments in spacelab, Proceeding of Combustion Institute, 26, 1201-1207, 1996.