

급속압축장치에서 탄소 나노입자가 첨가된 연료 액적의 증발 및 연소 특성에 관한 실험적 연구

안형진* · B.V.S. Jyoti* · 백승욱**

*한국과학기술원

Experimental Study on Evaporation and Combustion Characteristics of Fuel Droplet with Carbon Nano-Particles in RCM

Hyeongjin Ahn*, Botchu Vara Siva Jyoti* and Seung Wook Baik**

*Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received 22 February 2016, Received in revised form 4 April 2016, Accepted 4 April 2016)

ABSTRACT

Evaporation and combustion characteristics of fuel droplet with carbon nanoparticle were investigated in a rapid compression machine(RCM). RCM is an experimental equipment to simulate one compression stroke of reciprocating engine. Nitrogen was charged into reaction chamber for evaporation experiment, while oxygen was charged for combustion experiment. N990 carbon black and n-heptane were used to synthesize the carbon nanofluids. Surfactant, span80, was used to make synthesis easier. The droplet pictures were taken using a high speed camera with 500 frames per second. Thermocouple, of which tip is 50 μm , was used not only to measure transient bulk temperature, but also to suspend the droplet. Reaction chamber temperature was calculated from pressure data. The evaporation rate of nanofluids was improved compared to pure fuel. The ignition delay was promoted due to the nanoparticle, but the burning rate was decreased.

Key Words : Rapid compression machine (RCM), Carbon nanoparticle, Nanofluids, Evaporation rate, Burning rate

기 호 설 명

T_{am} : 액적 주위 온도	D_0 : 초기 액적 직경
T : 액적 온도	$D_{ignition}$: 점화 시 액적 직경
P : 급속압축기 내부 압력	$D_{burnout}$: 비드의 직경
K_e : 증발율 상수	t : 시간
$K_{b,avg}$: 평균 연소율 상수	t_{ig} : 점화지연시간

1. 서론

나노유체는 새로운 학문 분야로써 최근 많은 연구자들에 의해 각광을 받고 있다. 나노유체에 대한 연구가 활성화 된 이유에는 상업적으로 나노 입자 시장

이 활성화 되어있어 사용자가 원하는 나노 입자를 쉽게 구매할 수 있기 때문이다. 또 다른 이유로는 다양한 분야에 적용이 가능하기 때문이다. 나노유체의 응용분야는 의학, 연소, 열전달, 광학 등으로 다양하다.

연소분야에서의 나노유체 합성 목표는 고효율, 고에너지 연료를 개발하는데 있다. 주로 금속 나노 입자가 나노유체 연료를 만드는데 이용된다. 금속 나노입자는 발열량이 크고, 일부 금속은 촉매효과를 가지고 있어 화학 반응을 촉진시키기도 한다. 하지만, 연소 후 발생하는 금속 산화물은 인체에 잠재적으로 어떤 피해를 주는지 알려진 것이 없거나 혹은

† Corresponding Author, swbaek@kaist.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해로운 것으로 보고되고 있다.

이러한 점을 보완하기 위해 탄소 나노유체를 연소에 적용하고자 하는 시도가 이루어지고 있다[1]. 그동안 탄소나노유체 연구는 열전달 측면에서 많이 이루어졌으나, 흡수율이 향상된다[2]는 보고와 함께 내연기관과 같은 고온 환경에서 복사 열전달 효과를 이용해보자 연료로써 탄소나노유체가 연구되고 있다. 디젤 엔진의 경우 복사에 의한 열전달량은 20~30%이다.

이번 연구는 디젤엔진과 같은 비정상상태에서 탄소나노유체 연료가 어떤 거동을 보이는지를 파악하기 위해 수행되었다. 비정상상태를 모사하기 위해 급속압축장치가 이용되었고, 이 안에서 탄소나노유체 연료의 단일액적을 매달고 증발 실험과 연소 실험을 수행하였다. 급속압축장치는 스프레이 실험을 통해서는 파악하기 힘든 단일액적의 연소 특징을 파악하게 해주고, 배기가스와 잔열 등을 제거한 상태에서 실험을 수행하는 이점이 있다[3].

본 연구에서 사용된 기저연료(base fuel)는 n-heptane이다. 탄소나노입자로는 N990 카본 블랙을 이용하였다. 연료와 나노입자가 잘 섞이도록 계면활성제인 Span80을 이용하였다.

2. 실험장치 및 구성

2.1. 실험장치

Fig. 1은 실험장치의 전체적인 구성을 보여준다. 실험 장치는 크게 급속압축장치, reaction chamber의

온도와 압력을 측정하는 센서, 액적의 모습을 촬영하는 초고속 카메라, reaction chamber의 온도를 일정하게 유지시켜주는 heating jacket, 마지막으로 데이터를 저장하는 컴퓨터로 이루어져 있다.

2.1.1. 급속압축장치

Fig. 1에는 급속압축장치의 내부단면도가 있다. 내부에는 3개의 chamber가 존재한다. Reaction chamber에서는 액적의 증발과 연소가 일어나며 동시에 압력과 온도를 측정한다. 또한 석영 유리창이 뚫려있어, 초고속 카메라를 통해 액적의 모습을 촬영할 수 있다.

Fixing chamber는 피스톤을 고정시키는 역할을 하고, driving chamber는 피스톤을 구동하는 역할을 한다. Fixing chamber에는 솔레노이드 밸브가 연결되어 있어, trigger 역할을 한다. 피스톤 구동 방법은 공압식이다. 솔레노이드 밸브에 의해 fixing chamber 압력이 밖으로 토출되고, driving chamber의 압력에 의해 피스톤이 작동되는 원리이다. Table 1은 급속압축장치의 주요제원이다. Adjust wheel을 이용하여 압축비를 13~18까지 조절이 가능하다.

Table 1. Specification of RCM

Clearance at TDC	0.01 m
Clearance at BDC (variable)	0.13~0.18 m
Compression ratio	13~18
Driving chamber pressure range	1~30 bar
Piston diameter	0.05 m

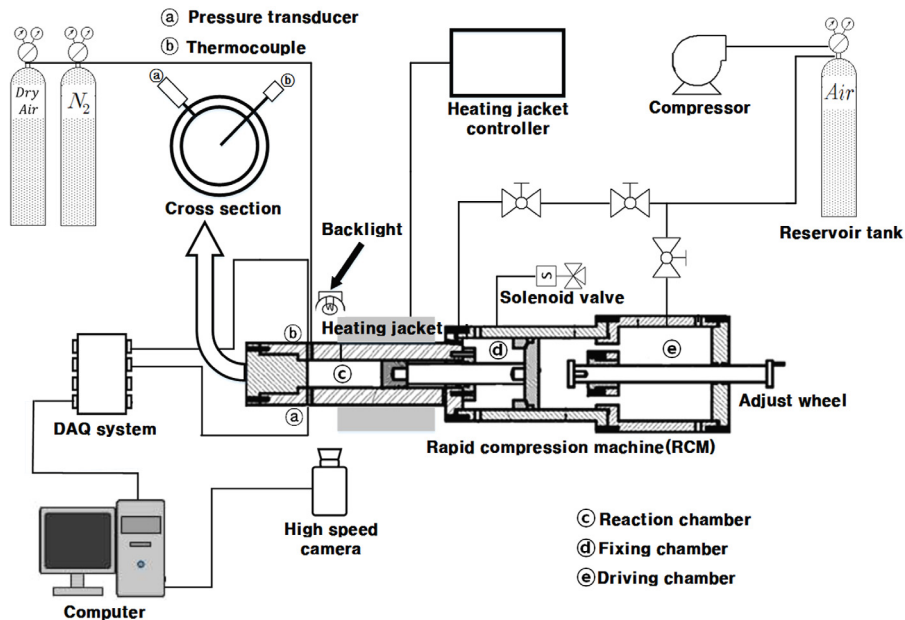


Fig. 1. Schematic of the experimental apparatus.

2.1.2. 온도 및 압력 측정 장치

열전대(thermocouple)는 Omega 사의 $\phi 0.25$, Ch-Al, K-type(Sheathed)형이다. 선행 연구들에서는 액적을 매달기 위해 석영 섬유(Quartz fiber)나 열전대를 이용하였다[4-6]. 본 연구에서는 열전대 끝에 액적을 매달고, 실험을 수행하였다. 본 실험의 유효성 검사는 논문[7]에 자세히 설명되어 있다.

Reaction chamber에 설치된 압력 센서는 Sensys 사의 전압 계측식 압력측정 장치이다. 압력 데이터는 온도 데이터와 함께 PersonalDaq 3005 모델을 통해서 매초마다 1,000개씩 획득하였다. 압력 데이터는 RCM 내부의 온도를 추정하기 위하여 사용되었다. 즉, 열전대로는 액적의 내부 온도를 측정하였고, 압력센서로는 다음과 같은 식 (1)을 이용하여 액적 주위 온도인 T_{am} 을 추정하였다[8]. 단, 추정된 온도 T_{am} 의 유효한 범위는 상사점까지이다. γ 는 비열비이다.

$$\int_{T_0}^T \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{dT}{T} = \ln \left[\frac{P(t)}{P_0} \right] \quad (1)$$

위 식은 급속압축장치 내부에서 벽면과의 상호작용이 일어나지 않는 코어부가 존재하며, 이 부분은 단열상태의 공식을 이용하여 나타낼 수 있다는 가정이 있다.

2.1.3. 이미지 데이터 및 이미지 처리장치

Fig. 2는 Intergrated Design Tools 사의 초고속 카메라를 통해 얻은 이미지 데이터이다.

획득된 이미지는 Qasim의 논문[9]에서 사용된 프로그램을 이용하여 액적의 직경을 확인하는데 이용하였다. 이 프로그램은 액적이 검은 색으로 나온다는 것을 이용한다. 검은 부분을 액적의 경계로 인식시키고, 그 사이의 넓이를 픽셀을 이용하여 직경을 계산하는 방식이다.

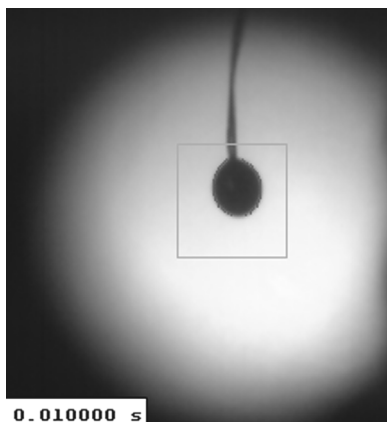


Fig. 2. Image data from the high speed camera.

2.2. 나노유체 연료

Table 2는 본 실험에서 사용된 기저연료인 n-heptane의 주요 열역학적 특성이다. n-heptane은 엔진 연소에 중요한 영향을 미치는 성분 중 하나로, 자발화 특성이 강하여 옥탄가를 결정하기 위한 표준연료로 이용된다. 본 연구에서는 디젤 엔진 환경에서 하에서 액체 연료의 자발화 특성을 살펴보고자 n-heptane을 이용하였다.

Table 3은 Span80의 주요특징이다. 본 연구에서는 나노유체연료의 분산을 위하여 계면활성제인 Span80을 이용하였다. Span80은 탄화 수소계열의 무극성 용매에 잘 녹고, 나노유체의 현탁액(suspension)을 유지하는데 주로 이용된다[10,11]. 이것을 통해 입체적 안정화(steric stabilization) 효과를 얻을 수 있다[12].

Table 4는 본 연구에서 사용된 Carbon black N990으로 Cancarb사의 제품이다. N990은 미국 재료시험학회인 ASTM에서 국제적으로 표준화하였다. N990의 모양은 구체이며 n-heptane보다 열전도도가 큰 값을 갖는다. N990을 이용한 이유는 입자가 상대적으로 잘 뭉치지 않아 nanofluids 합성에 용이하기 때문이다.

나노유체 연료 합성은 다음과 같다. Span80이 표준상태에서 액체 상태이기 때문에 N990과 5:5의 질량비로 섞고, 볼밀링에 의한 습식 분쇄로 반죽(paste) 상태로 만든다. 볼밀링은 Restech 사의 PM 100을 500 rpm으로 두 시간 작동시킨다. 이 반죽을 기저 연료에

Table 2. Thermalphysical properties of base fuel at standard atmosphere[10]

	n-heptane
Density (g/mL)	0.680
Boiling point (°C)	98
Specific heat (J/K·mol)	224.64
Heat of vaporization (kJ/kg)	31698
Autoignition temperature (°C)	223
Thermal conductivity (W/m·K)	0.129

Table 3. Property of non-ionic surfactants Span80

Phase	Liquid
HLB	4.3
Viscosity [mPa·s]	1200-2000 (20°C)

Table 4. Property of carbon black N990

Shape	Sphere
Thermal conductivity (W/m·K)	0.375
Diameter (nm)	225 - 280

넣고 초음파 분쇄기를 10분간 작동시켜 얻어졌다. 이 방법은 Two-step에 의한 합성 방법으로 많은 연구자들이 이용하는 방법이다[13].

2.3. 실험조건 및 방법

본 실험에서는 급속압축기의 압축비는 18, fixing chamber와 driving chamber의 압력은 각각 14 bar와 12 bar의 압력을 채워, 구동시간을 190 ± 5 ms로 유지하였다. 또한, heating jacket을 이용하여 reaction chamber의 초기온도를 $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지시켰다. 배기는 증발 실험 시 질소를 이용하고, 연소 실험 시 건조 공기를 이용했다. 이를 통해 잔여물을 제거함으로써 실험적 오차를 줄였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Reaction chamber 환경

Fig. 3은 reaction chamber의 압력과 식 (1)과 압력 데이터로부터 얻은 액적 주위 온도 T_{am} 를 나타낸 그래프이다. T_{am} 의 유효한 범위는 급속압축장치 구동 시작점부터 상사점까지이고, 이후에는 벽면으로의 열 손실로 인하여 유효하지 않다. 70 ms 이후에는 T_{am} 이 기저연료의 자발화 온도보다 높아졌다.

3.2. 증발실험

3.2.1. 액적내부온도

Fig. 4는 시간에 따른 액적의 내부온도 변화를 나타낸 그래프이다. 액적의 크기가 작을 때 최고온도가 증가하고, 상사점(TDC) 이전 부근에서도 온도 상승률이 증가했다. 이 결과는 같은 실험 장치를 이용하여 증발 실험을 수행했던 선행 실험과 일치한다[14].

탄소나노입자를 포함하였을 때, 비슷한 액적 크기에 대하여 최고온도는 증가했고, 상사점 이전 부근에서 온도 상승률이 컸다. 이 결과의 원인은 탄소나노입자의 열전도도(thermal conductivity)와 관련 있다. 액체에 나노 입자를 첨가하면 열전도도가 상승한다[15]. 압축행정 시 액적은 주위온도 T_{am} 로부터 열을 공급받는다. 열전도도의 증가는 액적 경계로 유입되는 열유속(heat flux)의 양을 증가시키고, 액적 바깥쪽의 열을 안쪽으로 잘 전달시키기 때문에 다음과 같은 결과가 나온 것으로 판단된다.

3.1.2. 증발율

Fig. 5는 시간에 따른 액적 직경의 제곱을 값을 나타낸 그래프이다. 이 그래프에서 순간 점선 기울기는 액적의 증발율을 나타낸다. 액적의 증발율은 Fig. 6에서 액적 내부온도와 같이 나타냈다.

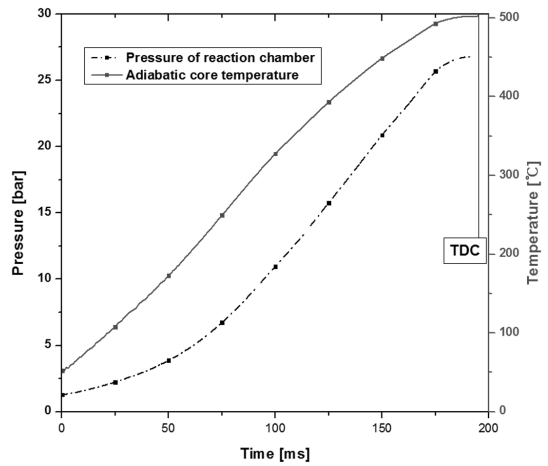


Fig. 3. Pressure and adiabatic core temperature.

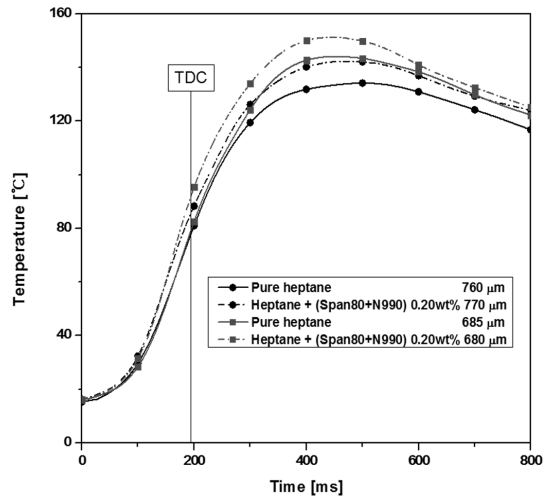


Fig. 4. Droplet temperature during evaporation.

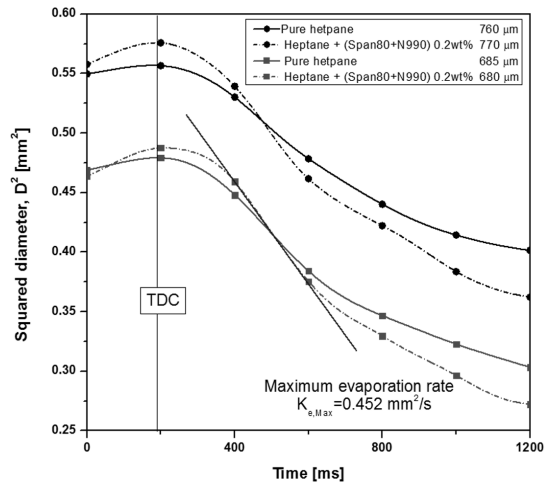


Fig. 5. Variation of squared diameter with time.

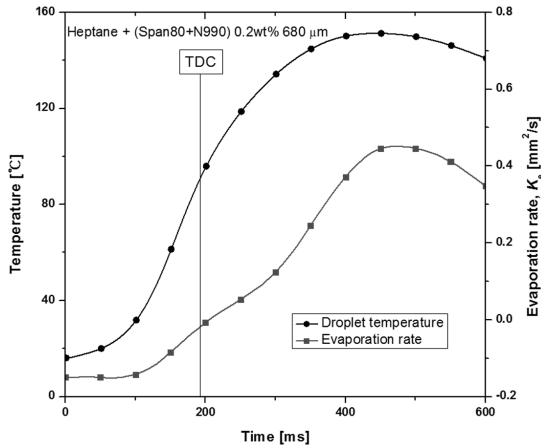


Fig. 6. Evaporation rate with droplet temperature.

액적의 직경 증가는 상사점 이전에서 증가하는데, 이것은 열팽창(thermal expansion)에 의한 것이다 [10,14].

증발율은 다음 식 (2)와 같다.

$$K_e = -\frac{d(D^2)}{dt} \quad (2)$$

최대 증발율은 액적 내부온도가 최고점에 달하는 400~500 ms 사이에서 일어난다. 위 그래프를 통해 액적의 증발율은 액적의 온도와 관련이 있음을 확인했다.

탄소나노입자의 효과를 살펴보면 다음과 같다. 액적의 팽창정도가 커지고, 최대 증발율이 증가한다. 열팽창이 더 크게 나타나는 것은 같은 시간동안 주위로부터 더 많은 열을 공급받기 때문인 것으로 생각된다. 최대 증발율이 상승하는 것은 나노입자 첨가로 인해 최대온도가 상승하기 때문이다.

3.2. 연소실험

Fig. 7은 2.1.3에서 설명한 초고속카메라를 이용하여 다음과 같이 액적의 모습을 촬영하였다. 본 연구에서는 Fig. 7의 (a)시점에서부터 (b)시점까지 걸린 시간을 점화지연시간(ignition delay time)으로 정의하였고, (b)시점에서부터 (d)시점까지 걸린 시간을 액적 수명시간(life time)으로 정의하였다. 다음과 같은 정의는 선행 액적 연구를 참고하였다[16].

3.2.1. 점화지연

Fig. 8은 액적의 점화지연 시간을 나타낸다. 일반적인 거동은 초기 액적의 크기가 커질수록 점화지연 시간이 증가한다. 이 실험 결과는 선행 연구 결과들과 일치한다[8,14,16].

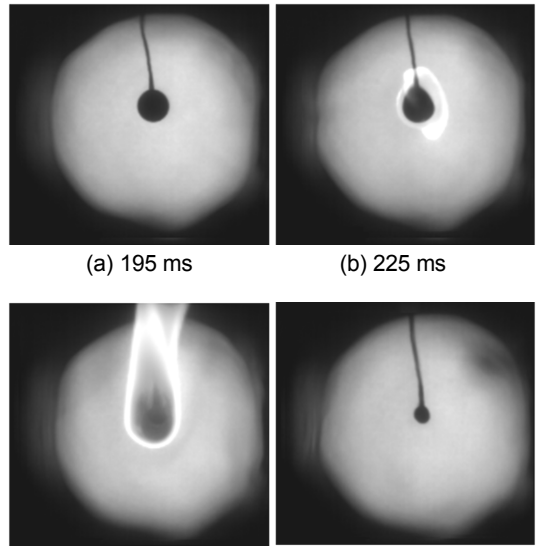


Fig. 7. Image data from TDC to burn out. (a) TDC, (b) Ignition, (c) Combustion, (d) Burn out.

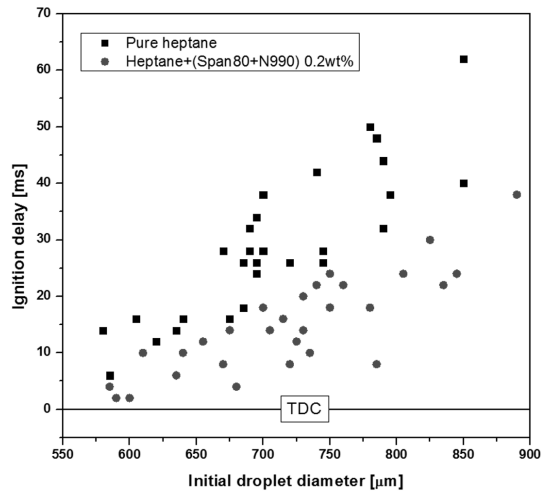


Fig. 8. Ignition delay of droplets.

탄소나노입자를 연료에 첨가하였을 때, 점화지연 시간이 줄어드는 것을 확인했다. 이 결과는 증발실험 결과를 통해 설명된다. 액적이 자발화(auto ignition) 하기 위해서는 액적 주위에 혼합기를 형성해야한다. 이를 위해서는 액적 자체 온도가 높아야 한다. 앞서 증발 실험에서는 탄소나노입자를 첨가하였을 때, 상사점 이전부터 액적의 온도가 더 높은 것이 확인되었다. 즉, 탄소나노입자를 연료에 첨가하면 액적의 열전도도가 향상되어 주위로부터 받는 열유량이 증가하고, 압축 행정 시 액적 온도가 더 빨리 상승한다. 액적의 온도 상승은 액적 주위에 혼합기를 형성하는데 도움을 주고, 점화를 촉진시킨다.

3.2.2. 평균 연소율

Fig. 9는 연소 시 시간에 따른 액적 내부온도이다. 액적의 초기직경이 클수록 초기 온도 상승률이 감소하고, 점화지연시간이 길어진다. 이것의 이유는 초기 직경이 클수록 액적의 열용량이 커지기 때문이다. 이 결과는 같은 실험 장치를 이용하여 연소 실험을 수행 했던 선행 실험과 일치한다[14]. 탄소나노입자를 첨가하였을 경우 초기 온도 상승률이 높았고, 점화시기가 앞당겨 졌다. 이것의 이유는 ‘3.2.1 점화지연’에서와 같다.

Fig. 10은 화염의 수명시간을 나타낸다. 초기 액적의 직경이 증가할수록 수명시간이 대체로 선형적으로 증가하였다. 이것은 초기 직경이 증가할수록 연소 반응물이 많아지기 때문이다. 탄소나노입자를 첨가 하였을 경우 화염의 수명시간이 증가했다. 이것은 탄소나노입자도 반응물이기 때문에 수명시간이

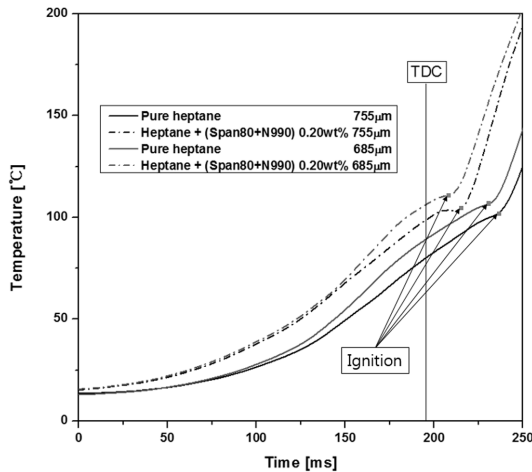


Fig. 9. Droplet temperature during combustion.

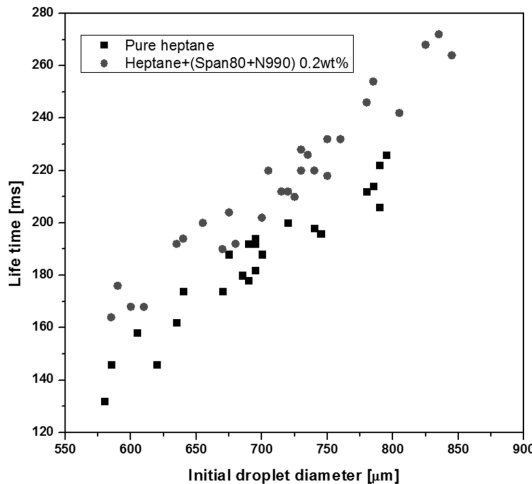


Fig. 10. Life time of droplets.

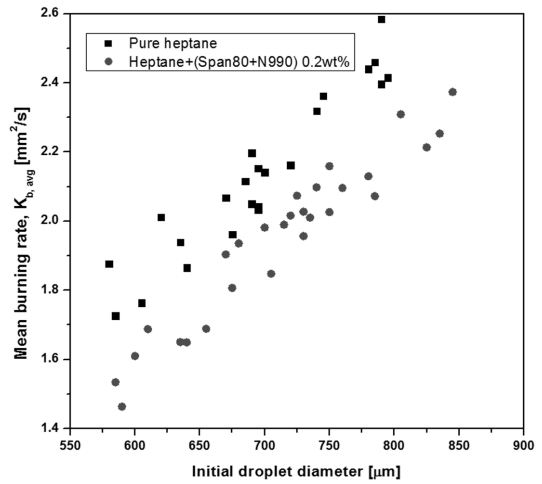


Fig. 11. Mean burning rate of droplets.

증가한 것으로 보인다.

Fig. 11은 액적의 크기에 따른 액적의 평균연소율을 나타내었다. 연소 중인 액적의 경계는 프로그램으로 파악할 수 없기 때문에 평균연소율상수를 도입하였다. 식 (3)은 선행연구[17]를 참고하여 계산한 평균 연소율 상수(averaged burning rate constant, $K_{b,avg}$)이다.

$$K_{b,avg} = -\frac{D_{burnout}^2 - D_{ignition}^2}{t_{burnout} - t_{ignition}} \quad (3)$$

평균연소율 상수는 초기 액적의 크기에 따라 증가한다. 이것은 초기 액적의 크기가 증가하면 화염 규모(flame scale)가 증가하기 때문이다. 화염 규모의 증가는 복사 열전달(radiation heat transfer)의 양을 증가시키는 역할을 한다[18]. 이에 따라 연소율이 증가하게 된다.

탄소나노입자를 첨가하였을 경우, 평균연소율은 감소했고, 이미지 데이터에서 soot이 관찰되었다. 선행연구[18]에 따르면 soot은 화염에서 발생하는 열의 싱크(sink) 역할과 열전달 장벽(heat/mass transfer barrier) 역할을 한다. 이것은 soot의 흡수율과 관련되

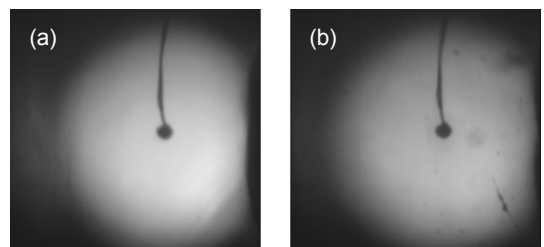


Fig. 12. After 200ms of burn out. (a) Pure heptane, (b) Heptane+(Span80+N990) 0.2 wt%.

어 있다. 또한, Soot 발생을 위한 다른 화학 반응이 관여하게 되어 완전연소의 경우보다 연소효율이 낮아진다. Fig. 12는 burn out 이후 200ms가 지난 후의 이미지 데이터이다. 나노입자하였을 때 더 많은 soot 이 관찰되었다. 본 실험에서 화염의 수명시간이 증가하고, 평균 연소율 상수가 감소하는 것은 탄소나노입자 첨가로 인한 soot 발생 때문인 것으로 보인다.

4. 결론

급속압축장치를 이용하여 비정상상태에서 나노유체 연료의 증발 및 연소 특성을 살펴보았다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 나노유체연료의 증발 실험 시, TDC 이전에서 액적 내부의 온도 상승률이 더 컸다. 또한, 최대온도도 더 상승하였다. 이것은 탄소나노입자 첨가로 인한 연료의 열전도도의 향상으로 주위로부터 받는 열량이 증가하기 때문이다.

(2) 압축 시에 나노유체연료의 열팽창이 더 크게 나타났다. 초기 낮은 주위온도 T_{∞} 으로 인해 증발이 약하지만, 향상된 온도 상승률로 인해 급격한 열팽창이 일어난다.

(3) 비정상상태에서 증발율은 온도의 역할이 지배적인 것이 확인되었다.

(4) 나노유체연료의 연소 실험 시, 점화가 촉진되는 것을 확인하였다. 열전도도의 향상이 증발을 촉진하여, 액적 주위에 혼합기 형성을 용이하게 만들기 때문이다.

(5) 평균연소율은 액적의 최대온도 저하로 인해 감소되었다. 나노유체연료의 연소 시 soot이 상대적으로 많이 관찰되었다. 이 soot들이 열 싱크, 열전달 장벽 역할을 하고, 비평형 화학반응에 관여하게 되어 연소 시 온도를 낮추고, 길어진 화염 수명시간을 발생 시킨다.

본 실험을 통해 비정상상태에서 나노유체 연료의 증발 및 연소 특성을 확인했다. 열전달 증가로 점화를 촉진시켰지만, 연소율이 감소하는 것을 확인했다. 하지만, 고온의 엔진 환경과 본 실험의 환경에는 초기온도 차이가 있다. 향후 실험에서는 고온 환경에서 실험을 진행하는 것이 필요해 보인다.

후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014R1A2A2A01007347, NRF-2015H1D3A1061637).

References

- [1] A.T. Leonid, G.D. Ashok, H. Zachary, L. Michael, Potential explosion hazard of carbonaceous nanoparticles: Explosion parameters of selected materials, *Journal of Hazardous Materials* 295 (2015) 97-103
- [2] G. Yanan, L. Qiao, Optical Properties and Radiation-Enhanced Evaporation of Nanofluid Fuels Containing Carbon-Based Nanostructures, *Energy Fuels*, 26 (2012) 4224-4230
- [3] O.T. Lim, "An Investigation of a Stratified Charge Mixture's HCCI Combustion Processes Using a Rapid Compression Machine", *Transactions of KSAE*, 18(5), (2010) 1-8
- [4] H. Ghassemi, S.W. Beak, Q. Khan, Experimental Study on Binary Droplet Combustion at elevated Pressures and Temperature, *Combust. Sci. and Tech.*, 178 (2006) 1031-1053
- [5] D. Segawa, T. Kajikawa, T. Kadoka, Transcritical Phenomena of Autoignited Fuel Droplet at High Pressures under Microgravity, *Microgravity sci. technol* 17(3) 2005
- [6] T. Harada, H. Watanabe, Y. Suzuki, H. Kamata, Y. Matsushita, A numerical investigation of evaporation characteristics of a fuel droplet suspended from a thermocouple, *International Journal of Heat and Mass and Transfer*, 54 (2011) 649-655
- [7] H.M. Kim, S.W. Baek, A single n-heptane droplet behavior in rapid compression machine, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 69 2014 247-255
- [8] H.M. Kim, S.W. Baek, Auto-Ignition Characteristics of Single n-Heptane Droplet in a Rapid Compression Machine, *Combust. Sci. Technol.*, 186 (2014) 912-927,
- [9] Q. Khan, An experimental study about the vaporization, ignition and burning of multicomponent fuel droplets at elevated pressures and temperatures, Ph.D Thesis Korea Advanced Institute of Science and Technology., (2010) 20-40
- [10] I. Javed, S.W. Baek, K. Waheed., Autoignition and combustion characteristics of heptane droplets with the addition of aluminium nanoparticles at elevated temperatures, *Combustion and Flame*, 162 (2015) pp.191-206
- [11] C. Zhang, B. Lei, Z. Li, Preparation and Magnetic Properties of Nanosize Fe-Co-Ni Alloy and Composite Particles by Water-in-Oil Microemul-

- sions, *Nanotechnology and Precision Engineering*, 10 (2012) 36-45
- [12] W. Yu, H. Xie, A review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications, *Journal of nanomaterials*, 2012 (2012) 1-17
- [13] Y.J. Hwang, J.K. Lee, Y.M. Jeong, S.I. Cheong, Y.C. Ahn, S.H. Kim, Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids, *Power Technology* 186 (2008) 145-153
- [14] Kim HM, Evaporation and Combustion Characteristics of a Single Droplet According to the Operating Conditions of the RCM, Ms.D Thesis Korea Advanced Insitute of Science and Technology., (2012) 16-19
- [15] M. Shaker, E. Birgersson, A.S. Mujumdar, Extended Maxwell model for the thermal conductivity of nanofluids that accounts for nonlocal heat transfer, *International Journal of Thermal Sciences* 84 (2014) 260-266
- [16] M.S. Jeong, K.H. Lee, Combustion Characteristics of Single Droplet of Diesel with Bio-diesel for Their Mixing Ratios and Sizes, *Journal of Energy Engineering*, 18(2) (2009) 101-107
- [17] G. Xu, M. Ikegami, S. Honma, K. Ikeda, X. Ma, H. Nagaishi, D.L. Dietrich, P.M. Struk, Inverse influence of initial diameter on droplet burning rate in cold and hot ambiances: a thermal action of flame in balance with heat loss, *Heat and Mass Transfer* 46 (2003) 1155-1169
- [18] G.S. Jackson, C.T. Avedisian, J.C. Yang, Observations of soot during droplet combustion at low gravity: heptane and heptane/monochloro alkane mixtures, *Int. J. Heat Mass Transfer* 35 (1992) 2017-2033.