

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

안형진* · 원종한* · 백승욱*† · 김혜민**

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

Hyeongjin Ahn*, Jonghan Won*, Seungwook Beak*†, Hyemin Kim**

ABSTRACT

Evaporation characteristics of a single droplet of carbon nanofluids were investigated in a rapid compression machine(RCM). n-Heptane and carbon black N990 were used to synthesize the carbon nanofluids. RCM is an experimental set-up to simulate a single compression stroke of reciprocating engine. Temperature and pressure in a reaction chamber were measured during the compression stroke. After the piston reaches top dead center(TDC), temperature and pressure decreased due to the heat loss at wall. In that process, a single droplet of carbon nanofluids underwent unsteady condition. A single droplet was put at the center of reaction chamber. Thermocouple whose tip is 50 μm was used not only to measure transient bulk temperature, but also to suspend the droplet. The picture of single droplet was taken using high speed camera with a frame rate of 500 fps. From those pictures, the droplet diameter was measured by visual basic program.

Key Words : RCM, Droplet, Combustion, Binary fuel, Ignition delay, Burning rate constant

1. 서론

액체에 나노크기의 입자가 첨가된 것을 나노유체(nanofluids)라 부른다. 연료에 나노입자를 첨가하고, 분산을 위해 계면활성제를 넣어준다. 나노유체는 목적에 맞게 합성할 수 있다는 장점 덕분에 많은 연구가 이루어지고 있다. [1] 본 연구의 목적은 나노유체를 연소분야에 적용하였을 때, 그 특징을 살펴보는 데 있다. n-heptane에 탄소나노입자인 N990 carbon black을 첨가하였고, 계면활성제로는 Span80을 첨가하여 나노유체를 합성했다. 이 나노유체의 단일액적을 급속압축장치(RCM)에 설치한 뒤, 시간에 따른 액적의 증발율을 관찰하였다. 이를 통해 비정상상태에서의 나노유체의 증발 특성을 파악하였다.

2. 본론

2. 1 실험 장치

Fig. 1은 전체적인 실험장치의 도식도이다. 실험 장치는 크게 압축행정을 수행하는 RCM 장치,

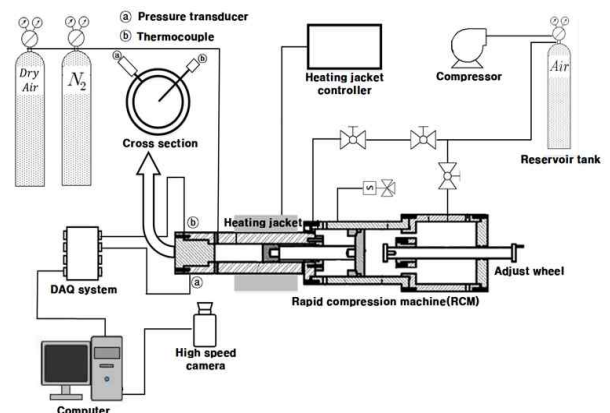


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

* 한국과학기술원 항공우주공학과

** 국방과학연구소 7본부 3부

† 백승욱, swbaek@kaist.ac.kr

TEL : (042)350-3714 FAX : (042)-350-3710

행정 시 reaction chamber의 압력을 측정하는 압력센서, 액적의 증발 모습을 촬영하는 초고속 카메라, 데이터를 수집하고 저장하는 DAQ 보드와 컴퓨터로 구성되어 있다. 부가적으로 Heating jacket을 이용하여 reaction chamber의 초기온도를 $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 유지 시켰다.

본 실험은 RCM의 구동시간을 190 ± 3 ms로 설정하고, reaction chamber 내부에 설치된 열전대 ($50 \mu\text{m}$) 끝부분에 단일액적을 설치한 후, 피스톤을 구동하는 방식으로 수행하였다. 이 때 액적은 연소실 중앙에 위치하도록 설치하였고, 액적이 설치된 열전대를 통하여 액적 내부 온도를 획득할 수 있도록 하였다. 이번 연구에서는 증발실험을 진행하기 위해 reaction chamber에 질소를 주입하였고, 매 실험마다 배가스의 영향을 없애기 위해, 한 번 실험이 끝나고 나서 진공 펌프와 질소 호스를 이용해 공기배기(purging)를 수행하였다.

2. 2 나노유체의 합성

Table 1은 이번 연구에 사용된 base fuel이다. n-heptane 단일성분 연료에 탄소나노입자의 첨가가 어떤 영향을 주는 지 알아보기 위해 사용되었다. 계면활성제로는 HLB(Hydrophile Lipophile Balance) 값이 낮아 친유성 성질을 띠는 Span80을 이용하였다. HLB값은 친유성과 친수성을 나타내는 척도로 값이 작으면 친유성, 크면 친수성 성질을 띤다. 이번 연구에 사용된 탄소나노입자는 미국재료시험학회인 ASTM에서 국제적으로 표준화한 N990 carbon black을 이용하였다. N990의 모양은 구체이며, 지름이 $225 \sim 280$ nm, 표면적이 $7.8 \sim 12$ m^2/g , 열전도도가 0.375 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 이다. N990은 입자끼리 서로 잘 뭉치지 않아 나노유체를 합성하는데 유리한 점이 있다. 이번 연구에서 사용된 나노유체는 Span80이 액체이기 때문에 N990과 1:1 무게 비율로 섞고 볼밀링에 의한 습식 분쇄를 통해 반죽 형태로 만든 뒤, n-heptane과 섞고 초음파 분쇄기를 10분간 작동 시켜 얻어졌다. 이 때, 나노 입자 반죽을 0.2wt%가 되도록 n-heptane에 첨가하였다.

Table 1 Thermalphysical Properties of Fuel[2]

Density(g/mL)	0.680
Boiling point($^\circ\text{C}$)	98
Specific heat (J/K · mol)	224.64
Heat of vaporization (J/mol)	31698
Autoignition temperature($^\circ\text{C}$)	223

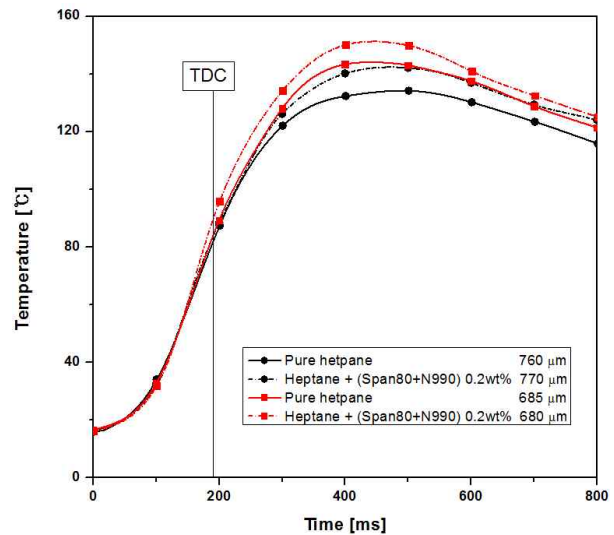


Fig. 2 Temperature inside droplet with time

2. 3 실험결과 및 해석

2. 3. 1 액적의 내부 온도

Fig. 2는 시간에 따른 액적의 내부 온도 그래프이다. RCM의 비정상상태에서 온도의 일반적인 거동을 살펴보면 상사점(TDC, Top Dead Center) 이전에 가장 급속한 온도 상승을 갖고, 상사점 이후에도 온도가 일정시간 동안 상승하다가 최고온도에 도달한 뒤 온도가 서서히 하강한다. 상사점 이전에 액적 내부의 온도가 급격히 상승하는 것은 피스톤이 압축행정을 수행함에 따라 액적 외부 온도와 액적 내부 온도가 가장 큰 온도 차이를 보여주기 때문이다. 상사점 이후 일정시간 동안 온도가 상승하는 것은 액적의 온도보다 액적 주위 온도가 높기 때문에 액적이 주위로부터 열을 공급받기 때문이다. 최대온도 이후에는 액적온도가 액적 주위의 온도보다 높기 때문에 온도가 하강하며, 주위로 열을 방출하는 열원(heat source) 역할을 한다.

나노입자의 첨가효과를 살펴보면 나노입자를 첨가하였을 경우 액적의 내부온도가 더 크게 상승되었음을 알 수 있다. 또한, 상사점 이전 단계에서 온도 상승률이 더 컸다. 압축행정 시 같은 열량을 받는 실험 장치에서 다음과 같은 결과가 나온 것은 액적의 열전도도 증가로 인해 액적의 표면의 열이 액적의 내부로 빠르게 전달되었기 때문인 것으로 판단된다. 한정된 열량에서 내부 온도가 더 크게 증가되었기 때문에 온도 구배가 좀 더 완만할 것으로 생각된다. 이것으로 인해 액적의 표면에서 연료가 증발하는 동안 액적 표면의 온도가 계속 상승할 것이다. 이로 인해 시간에 따른 증발율은 계속 커진 것으로 보인다.

2. 3. 2 액적의 증발

Fig. 3은 액적의 직경 제곱의 시간에 따른 변화를 나타내는 그래프이고, Fig. 4는 시간에 따른 액적의 모습을 보여주고 있다. 일반적인 거동을 살펴보면 상사점 부근에서 액적이 최대크기를 갖고, 최대온도를 갖는 400~500ms 사이에서 액적이 최대속도로 증발한다. 상사점 부근에서 액적이 최대크기를 갖는 것은 액적이 열팽창하기 때문이다. 상사점 이전에서는 액적의 온도가 충분히 낮아 증발이 활발히 일어나지 않고, 급격한 온도 상승으로 인해 열팽창 효과가 크기 때문에 액적의 크기가 커지는 것으로 판단된다.

이 그래프의 순간 접선 기울기는 액적의 증발율을 의미한다. 액적의 최대 증발율은 최대온도를 갖는 구간에서 일어난다. 온도와 증발율은 큰 관계가 있기 때문이다.

나노입자의 첨가 효과를 살펴보면 나노입자를 첨가하였을 때, 액적의 팽창이 더 크게 일어나고, 액적의 최대 증발율이 커졌다. 액적의 최대크기가 커지게 된 것은 나노입자 첨가로 열전도도가 증가하였기 때문인 것으로 보인다. 즉, 상사점 이전에서 액적 표면의 열이 내부로 잘 전달되어 표면의 증발율이 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 나노 입자를 첨가하였을 때, 최대 증발율이 증가한 Fig. 2에서 본 것과 같이 액적 내부온도가 더 높기 때문인 것으로 생각된다.

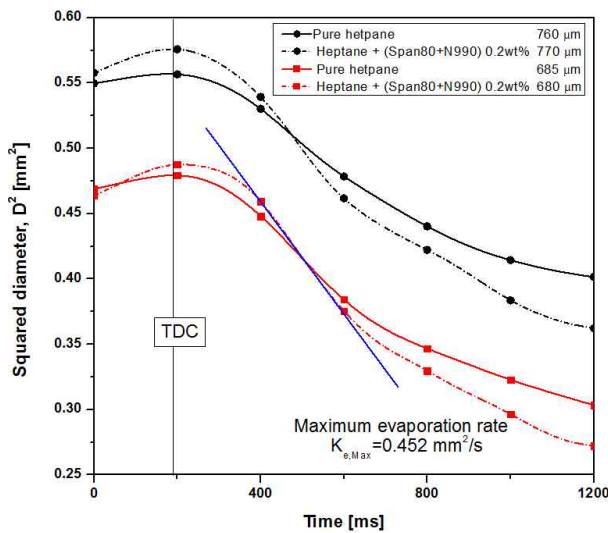


Fig. 3 Variation of squared diameter with time

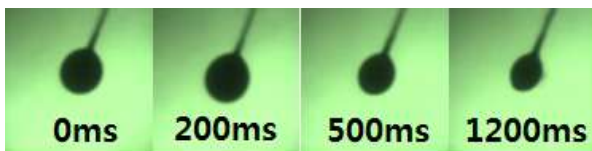


Fig. 4 Pictures of a single droplet

3. 결론

본 연구를 통해서 나노 입자 첨가 시 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 액적의 내부온도가 상승한다.
2. 열팽창 효과가 커진다.
3. 액적의 최대 증발율이 커진다.

후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A2A01007347).

참고 문헌

[1] Robert T., Sylvain C., Todd O., Patrick P., Andrey G., Wei L., Gary R., Ravi P., and Himanshu T., 2013, "Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids" Journal of applied physics, Vol. 113, 011301

[2] H.M. Kim, S.W. Baek, and S.H. Han, "Ignition of a Binary Component Fuel Droplet in a Rapid Compression Machine: Comparative Analysis", Combustion Science and Technology, 187(4) 2015 659-677