

디젤/1-부탄올 혼합연료 단일액적의 자발화 현상

김 혜 민[†]

Autoignition Phenomena of a Single Diesel/1-Butanol Mixture Droplet

Hyemin Kim

Key Words: Diesel(디젤), 1-Butanol(1-부탄올), Droplet(액적), Autoignition(자발화), Ignition delay(점화지연)

Abstract

The goal of this study is to experimentally observe the autoignition phenomena of a diesel/1-butanol mixture droplet in ambient pressure and 700°C condition. A volume ratio of 1-butanol in the fuel was set to 25, 50 and 75%. A single droplet was installed at the tip of fine thermocouple, and the electric furnace dropped down to make elevated temperature condition. Droplet behavior during the experiment could be divided into 3 stages including droplet heating, puffing and autoignition/combustion. Puffing process intensively observed for the case of 1-butanol volume ratio of 25 and 50%, but did not occur at 75%. Increase of 1-butanol volume ratio hindered rise of the droplet temperature and delayed ignition. In addition, puffing process also affected on autoignition, so the ignition delay of 1-butanol volume ratio of 50% was became longer than that of 75% case.

기호설명

- d : 액적 직경
d₀ : 초기 액적 직경
d_{norm} : 무차원 액적 직경
t : 시간
t_{norm} : 무차원 시간

1. 서 론

디젤 연료는 높은 에너지 밀도 및 용이한 보관성 등 많은 장점으로 인해 다양한 열기관에서 오랫동안 사용되어 온 연료이다. 특히 디젤 연료를 사용하는 디젤 엔

진의 고 효율성 및 고 토크 특성으로 인해 디젤 엔진 및 디젤 연료는 대형 트럭, 선박 및 기차 등의 수송기관에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.

그러나 엔진 내부에서 연료가 자발화하는 디젤 엔진의 특성 상 작동 시 질소산화물(NOx) 및 PM (Particulate matter) 이 과다하게 발생하는 것은 오래 전부터 알려진 사실이다. 이러한 오염물질 배출을 억제하기 위해 1992 년 최초로 발효된 Euro 규제를 비롯한 각종 환경 규제들은 디젤 연료의 사용에 어려움을 주었다. 특히 최근 국내에서도 발효된 Euro 6 의 경우 이전의 Euro 5 기준 대비 NOx 의 경우 5배, PM 의 경우 2 배 저감하는 것을 강제하고 있어 엄격해진 환경 기준을 부합하기 매우 어려운 실정이다⁽¹⁾.

강화된 환경 규제 기준을 만족시키기 위해 엔진 설계 고도화, 배기 후처리 장치 및 엔진 연료 변경 등의 기술이 제시되거나 실제 적용되고 있다. 이 중 식물을 발효시켜 제조한 메탄올, 에탄올 및 부탄올 등 각종 알코올계통 연료를 디젤에 일정량 희석한 바이오 디젤이 친환경적이며 지속 가능한 연료로 각광받고 있다. 특히 부탄

(Received: 17 Apr 2018, Received in revised form: 28 May 2018, Accepted: 29 May 2018)

[†]책임저자, 회원, 한국교통대학교 (항공기계설계전공)

E-mail : enok2695@ut.ac.kr

TEL : (043)841-5838 FAX : (043)841-5370

올은 에탄올 및 메탄올에 비해 탄화수소계 연료에 잘 혼합되고, 연소시 금속을 부식시키는 알킬 성분이 발생하지 않다는 장점이 있다⁽²⁾.

디젤에 알코올 성분을 혼합하면 연소 시 PM 등의 오염물질이 저감되고 디젤의 소비량을 줄일 수 있다는 장점이 있다. 반면 바이오 디젤은 발열량이 일반 디젤에 비해 상대적으로 낮고, 과량을 혼합할 경우 연료의 점화 및 연소 특성이 크게 바뀌므로, 일반 디젤 차량에서 엔진의 개조 없이 연료를 적용하기 어려울 수도 있다는 단점이 존재한다. 따라서 이러한 바이오 디젤 연료의 장단점을 파악하고 연료를 상용화를 위해 다양한 연구자들에 의해 바이오 디젤 관련 연구가 진행되었다.

임 등⁽³⁾의 연구자들은 고온, 고압 분위기에서 조건 변화에 따른 n-부탄올의 연소 특성 변화를 수치해석적으로 관찰하였다. 연구 결과 분위기 온도 및 압력이 증가할수록 연소 온도가 증가하였으며, 점화지연이 감소하였다. 또한 부탄올과 n-헥탄을 혼합한 연료의 경우 기존 n-헥탄 연료에 비해 Soot 생성이 억제됨을 확인하였다.

Zhang 등⁽⁴⁾의 연구자들은 부탄올에 일정 수준의 헥사데칸을 혼합한 연료의 단일 액적 실험을 수행하였으며, 이를 통해 분위기 온도에 따른 미소폭발 현상을 실험적으로 관찰하였다. 실험 결과 액적의 증발 및 온도 변화는 여러 구간으로 나누어 짐을 밝혔으며, 미소폭발은 온도가 상승할수록 더욱 증가함을 확인하였다. 이 외에도 다양한 연구자들에 의해 부탄올 및 부탄올 혼합 연료에 대한 연소 특성이 연구되었다^(5,7).

본 연구에서는 디젤 연료에 일정 부피분율의 1-부탄올 (이하 부탄올) 을 혼합한 연료를 제조하고 상압환경 (1 atm), 700°C 환경 하에서 단일 액적 연료의 자발화 및 연소 특성을 관찰하고자 한다. 특히 디젤과 부탄올의 혼합 연료는 두 연료의 끓는점 차이가 커 강한 미소폭발 현상이 발생하므로 이에 관한 고찰도 진행하였다.

본 연구를 통해 부탄올을 혼합한 디젤 연료의 자발화 특성을 확인할 수 있을 것이며 연구 결과는 바이오 디젤의 열기관 적용을 위한 기초자료로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험 장치

본 연구에 사용된 실험장치는 단일 액적의 자발화 특성을 연구하기 위한 정적 액적 연소 장치이다. Fig. 1은

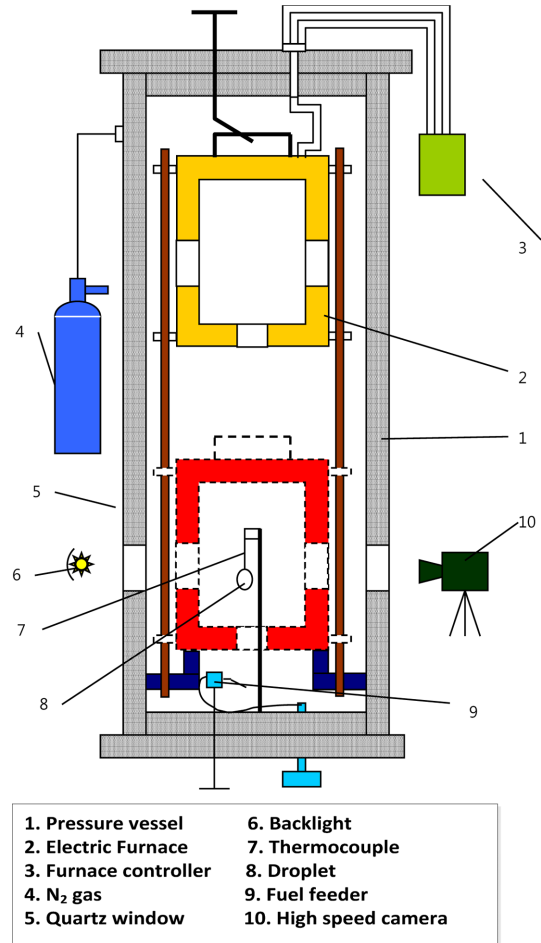


Fig. 1 Experimental setup

실험장치의 구성을 나타낸 그림이다. 실험장치는 크게 압력 용기, 전기로, 측정 장비로 구성되어 있다. 전기로의 경우 액적 주위에 고온의 분위기 온도를 만들어 액적이 자발화 할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 제조된 연료 액적이 자발화 가능한 700°C에서 실험을 수행하였다.

액적은 50 μm 직경을 가지는 K-type 열전대 끝부분에 설치되었으며, 이를 통해 실험 도중 액적의 온도변화를 측정하였다. 실험은 액적을 설치 한 후 Fig. 1과 같이 미리 예열된 전기로를 실험 위치로 이동시키면서 시작되게 된다. 실험 중 액적의 직경변화를 측정하기 위해 초고속 카메라 (X-stream 사) 사용하여 200 fps의 속도로 액적 이미지를 획득하였으며, 이미지 후처리 프로그램을 통해 액적 직경 변화 결과를 획득하였다. 액적 직경 분석 프로그램은 획득된 이미지에서 액적의 색깔이 어둡다는 점을 이용하여 이미지에서 열전대를 제외

Table 1 Thermophysical properties of diesel and 1-butanol

	디젤	1- 부탄올
밀도 (kg/L)	0.815~0.835	0.81
끓는점 (°C)	151~380	117
비열 (25°C) (J/mol·K)	340	177
자발화 온도 (°C)	260~	343

하고 어두운 부분의 픽셀 개수를 확인한다. 이를 미리 측정된 실제 스케일로 환산하여 이미지 상 액적의 실제 면적을 구한 후, 액적을 원으로 가정하여 액적 직경을 계산하였다. 실험 장치 및 실험 방법에 대한 더욱 자세한 사항은 참고 논문에서 확인 가능하다⁽⁶⁾.

2.2 디젤/1-부탄올 혼합연료

혼합 연료 제조를 위해 디젤 및 부탄올을 준비하였다. 디젤 연료는 SK 사의 디젤을 사용하였으며, 디젤에 전체 연료 부피비 기준 25%, 50% 및 75%의 분율로 부탄올을 혼합한 연료를 제조 하였다.

각 연료의 간략한 열역학적 물성치는 Table 1에 정리되어 있다. 디젤의 경우 혼합물이므로 물성치를 범위로 표기하였다. 부탄올은 디젤에 비해 끓는 점이 낮아 동일한 온도에서 증발이 더 활발하게 진행되나 자발화 온도가 높다. 부탄올은 탄화수소계 연료와의 혼합성이 좋으므로 연료 혼합 뒤 병을 흔들어 혼합하였다.

단일 액적 실험에서 고려해야 하는 사항 중 하나는 액적의 가열로 인한 표면장력 감소와, 이로 인한 액적의 형상 변화 및 떨어짐 현상이다. 그러나 이는 대부분 고압 환경에서 문제가 되는 사항이며, 본 연구가 수행된 상압 환경에서는 큰 문제 없이 실험 진행이 가능하였다.

2.3 실험조건

실험장치의 성능을 고려하여 전기로 내부 온도는 700°C로 고정하였다. 700°C 이하의 온도에서는 제조된 연료의 자발화가 거의 발생하지 않았으므로 실험 조건에서 제외하였다. 본 연구는 700°C 조건에서 서로 다른 부탄올의 부피비를 가지는 연료 액적의 자발화 및 연소특성을 열전대 및 카메라를 통해 관찰하는 방법으로 진행되었다.

연료액적의 크기는 $800 \pm 50 \mu\text{m}$ 로 하였으며, 이는 시험 수행 후 조건에 맞는 연료액적 결과를 선별하는 방법으로 하였다. 실험결과와 일관성을 확인하기 위해 각 조건 별로 동일한 실험을 최소 5번 이상 수행하였다. 실

험과정 동안 발생하는 연소 물질을 배출하기 위해 고압 공기를 이용하여 압력 용기 내부를 환기하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 액적의 일반적 거동

액적의 자발화 실험 결과는 연료의 조성에 따라 상이하나 모든 실험 조건에서 일반적으로 관찰할 수 있는 현상들을 먼저 고찰하고자 한다. Fig. 2는 부탄올 부피비 50%의 액적이 700°C 환경에 노출되었을 때 액적의 직경제곱 및 온도변화를 나타낸 그래프이다. 특징을 나타내는 구간을 그래프 위에 각각 표시하였고 이 때의 액적 이미지도 Fig. 3에 나타내었다. 액적의 자발화 과정에서 주요한 단계는 액적 가열, 미소폭발, 점화 및 연소로 나눌 수 있다.

액적 내부의 온도는 고온에 노출됨에 따라 지속적으로 상승하였으며 액적 온도가 부탄올의 끓는점인 117°C 근처에 이를 때까지 상승하였다. 이 때 액적의 직경은 약간의 열팽창 현상을 나타낸 후 부탄올의 활발한 증발로 인해 지속적으로 감소하게 된다. 액적의 온도가 부탄올의 끓는점에 이르지 않았기 때문에 액적 표면에서 미소폭발과 같은 변화는 관찰되지 않았다.

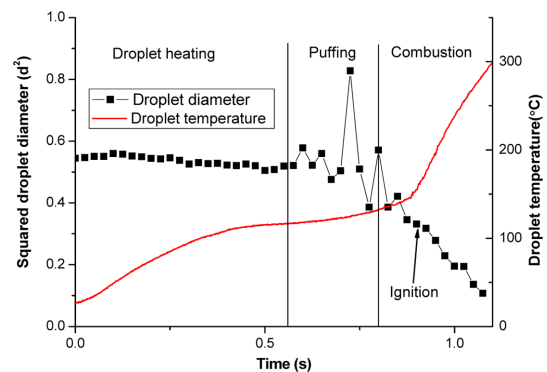


Fig. 2. Squared droplet diameter and droplet temperature change during experimental time

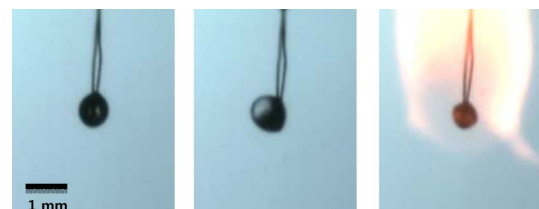


Fig. 3. Droplet at heating (left), Puffing (middle), Combustion (right) stage

이후 액적의 온도가 부탄올의 끓는점에 도달하면 Fig. 3에서 확인 가능하듯 액적의 표면에서 팽창 및 폭발이 발생하면서 액적의 형상이 크게 일그러지게 된다. 이는 전형적인 액적의 미소폭발 현상으로, 디젤에 비해 상대적으로 끓는점이 낮은 부탄올이 액적 내부에서 증발하고, 기화기가 내부에 축적되어 폭발하여 발생하게 된다. 폭발은 표면에서의 연료 이탈 및 연료의 표면장력으로 인해 액적이 풍선껍과 같이 부풀었다 터지는 팽창 현상을 동시에 반복적으로 보여주며, 이로 인해 Fig. 2의 액적 직경 그래프가 심하게 요동하는 결과를 나타냄을 확인할 수 있다 미소폭발 발생과정 동안 액적의 온도는 부탄올의 끓는점에 도달하였으므로 증발 잠열에 의해 상승이 억제되나, 액적의 직경이 점차 줄어들어 따라 액적 내부의 부탄올 파괴비가 줄어들어 액적의 온도가 점차 상승하게 된다.

부탄올의 자발화 온도가 약 350°C 정도임에도 불구하고 미소폭발 단계에서는 액적의 점화가 발생하지 않았다. 주요한 이유는 부탄올 증기의 빠른 확산에 의한 화학반응 지연과 미소폭발에 의한 혼합기 농도 희석을 들 수 있다. 부탄올은 디젤에 비해 상대적으로 낮은 끓는점과 높은 증발율을 가지므로 증발 시 액적 표면에서 강한 Stefan flow를 만들어 낸다. 이 경우 연료 증기가 반경 방향으로 빠르게 확산되어 화학반응시간보다 증기가 빠르게 소산되어 점화가 발생하지 않게 된다. Morie 등의⁽⁹⁾ 연구자는 높은 Stefan flow가 연료 증기의 소산을 촉진하여 연료의 점화를 방해하는 역할을 하게 된다고 설명하였다. 또한 액적 표면의 미소폭발은 액적 표면 주위에 유동을 형성하여 액적 주위에 연료 혼합기의 형성을 방해하여 점화를 지연시킨다. 미소폭발은 액적 내부의 부탄올 성분이 증발될 때까지 지속되었다. 실험 조건에 따라 미소폭발 구간 후반 또는 미소폭발 구간이 끝난 이후 액적의 자발화가 발생하였고, 액적 연 소가 시작되었다.

액적 연소 구간에서는 부탄올의 증발이 대부분 완료되어 강한 미소폭발은 나타나지 않았으나, Fig. 3과 같이 약한 미소폭발 현상이 관찰되었다. 이 구간에서 액적 직경은 단일 연료의 증발과 유사하게 거의 일정하게 감소하였다. 액적이 연소하는 동안 주위 화염으로부터의 열전달로 인해 액적 온도는 소멸시 까지 지속적으로 상승하였다.

3.2 연료 혼합비율에 따른 액적 직경 및 내부 온도 변화

액적 연료 중 부탄올의 혼합비율에 따른 직경 제곱 및 온도 변화를 Fig. 4와 같이 나타내었다. 또한 액적의

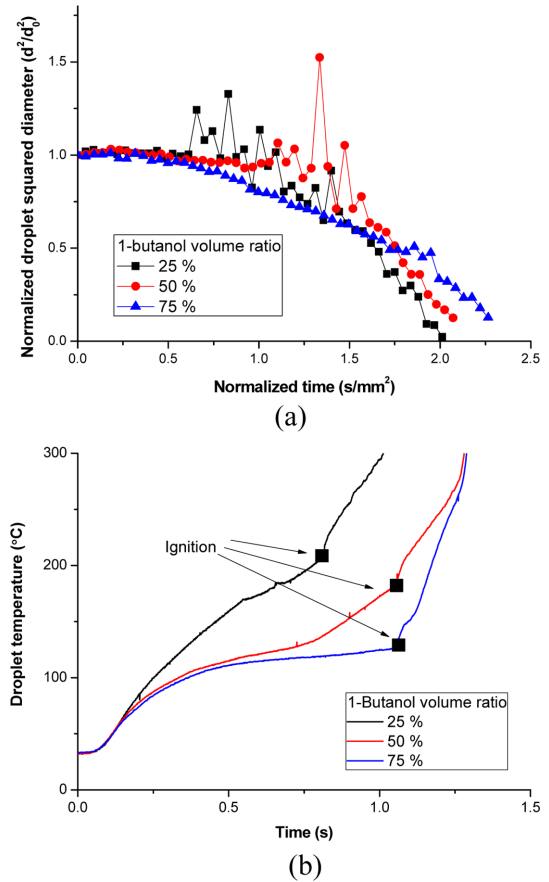


Fig. 4 Temporal change of Normalized droplet squared diameter (a), and droplet temperature (b) in different 1-butanol volume concentration

점화 전과 점화 후의 광학적 이미지는 Fig. 5에 나타나 있다. 초기 직경이 서로 다른 액적을 동일한 조건에서 비교하기 위해 시간 및 액적 직경을 각각의 초기 액적 직경으로 나누어 나누어 무차원화 하였다. 무차원 공식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d_{Norm}^2 = \frac{d^2}{d_0^2} \text{ and } t_{norm} = \frac{t}{d_0^2}$$

이때, d_0 는 액적 초기직경, 첨자 norm은 무차원 값을 의미한다.

Figure 4의 직경 변화를 살펴 보면 세 경우 모두 초기에 액적의 직경이 열팽창에 의해 약간 증가하였다가 이후 감소함을 확인할 수 있다. 이 때 액적의 온도는 부탄올의 끓는점 보다 낮은 상태로 미소폭발이 발생하지 않고 액적의 증발만 발생하고 있다.

이후 부탄올 부피비 25% 조건부터 미소폭발이 가장 먼저 발생하고, 이후 부피비 50%에서도 미소폭발이 관찰되었다. 이는 액적 온도 상승률 차이 때문이다. Fig. 4의 액적 온도 그래프를 통해 불 때 부탄올 증발 잠열의 영향으로 액적 내 부탄올의 부피비가 증가 할수록 액적의 온도 증가율이 감소하였다. 이러한 경우, 부탄올의 비율이 가장 작은 25% 조건에서 액적이 부탄올의 끓는 점에 가장 먼저 도달하여 미소폭발이 초기에 발생하게 되고, 이후 50% 액적도 액적 온도가 충분히 상승하여 미소폭발이 관찰되게 된다.

부탄올 부피비 75%의 경우 액적의 미소폭발이 관찰되지 않았으며 부탄올의 순수한 증발만 주요하게 관찰되었다. 이러한 실험 결과는 특정한 성분이 주요한 연료의 경우 미소폭발이 발생하지 않았던 이전 연구결과와 동일하다⁽¹⁰⁾. 미소폭발이 발생함에 따라 그래프 상 액적 직경은 매우 크게 변화하였으나 부피비 75%의 경우 순수증발이 발생하므로 액적의 직경은 일정하게 감소하였다. Fig. 5에서도 액적 직경변화를 광학적으로 확인 가능한데, 부피비 25, 50%의 경우 액적 팽창이 육안상으로도 관찰되나, 75%인 경우 별다른 차이를 보이지 않았다.

액적의 미소폭발 과정 동안 액적의 온도 상승률은 다소 감소하였는데, 이는 부탄올 연료의 증발 잠열 때문이다. 부탄올의 부피비가 증가할수록 액적의 온도상승률은 낮아져 미소폭발 단계에서 부피비 25% 일 때 온도 상승률이 최대, 75% 일 때 최소로 나타났다. 미소폭발 과정 동안 부탄올이 주요하게 증발하여 액적 내부에 부탄올의 비율이 점차 감소하였으며, 이에 따라 세 경우 모두 시간 경과에 따라 액적의 온도가 조금씩 상승하였다. 부탄올 비율 25%인 경우 부탄올의 비율이 처음부터 낮

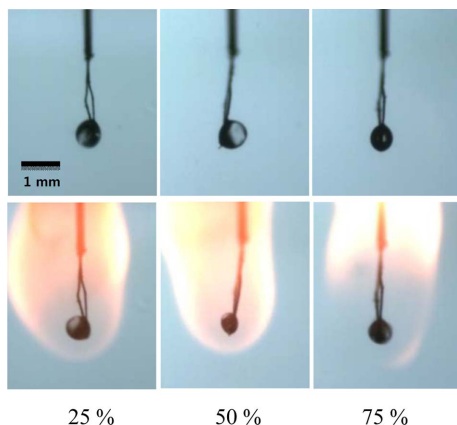


Fig. 5 Droplet images before ignition (up) and after ignition (down)

은 상태이므로 액적의 온도가 처음부터 지속적으로 상승하였고, 50%의 경우 부탄올에 의해 액적 온도 상승이 억제되다가 일정 시점 이후 상승하였다. 75%의 경우 점화 전까지 온도 상승률이 억제되어 있음을 확인할 수 있다.

액적의 자발화는 모든 경우에서 미소폭발 단계 후반에 대체로 발생하였으며, 이후 화염에 의한 열전달로 인해 액적의 온도가 모두 급격하게 상승하였다. Fig. 5는 액적 점화 직후 액적 화염 형상을 보여준다. 부탄올 부피비 25, 50%에서는 노란색 열염이 주요하게 관찰되었으며, 이를 통해 액적의 주요 성분이 디젤임을 정성적으로 확인할 수 있다. 반면 부탄올 부피비 75%인 경우 다른 부피비에 의해 화염의 노랑색 화염이 약하며 이를 통해 액적에 부탄올 성분이 상당량 남아 있는 것으로 파악할 수 있다. 액적의 연소 과정 동안 액적 온도가 상승함에 따라 세 경우 모두 미소폭발 현상을 보여주었다.

실험 결과는 부탄올의 부피비에 따라 바이오 디젤의 점화 특성 및 연소 시 액적 구성성분이 매우 변화하므로 연료의 혼합비가 열기관을 설계 할 경우 필수적으로 고려되어야 함을 나타낸다.

3.3 연료 혼합비율에 따른 점화지연

부탄올 부피비에 따른 연료의 점화지연을 Fig. 6의 그래프로 나타 내었다. 일반적으로 연료 내 부탄올의 부피비가 증가 할수록 점화지연이 증가하였으며, 그 이유는 부탄올의 자발화 온도가 디젤 에 비해 상대적으로 높기 때문이다. 연료 내 부탄올 비율이 늘어날 수록 낮은 끓는점으로 인해 액적의 증발은 활발해지나 높은 자발화 온도로 인해 액적의 자발화가 어려워진다. 이 경우 부탄올 증기는 디젤증기를 희석시켜 오히려 액적의 점화를 방해하는 역할을 하게 된다.

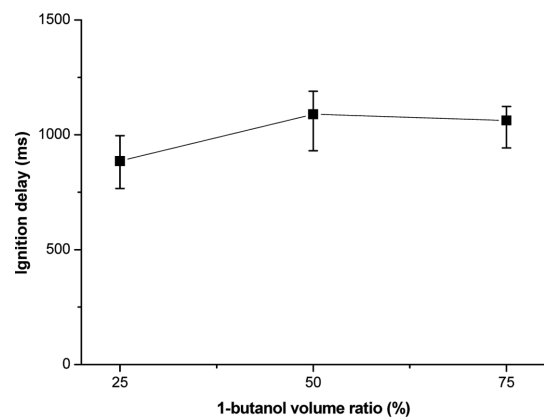


Fig. 6. Ignition delay for different 1-butanol volume ratio

주목할 만한 점은 부탄올 부피비가 50%인 경우와 75%인 조건에서 점화지연이 거의 유사하게 나타난다는 점이다. 실험 결과는 반복 실험을 통해 확인되었으며, 연료 제조 시 혼합 조성 오차에 따른 현상이 아님을 확인하였다. 이러한 결과의 주요한 원인은 미소폭발로 생각된다. 부탄올 부피비가 50%인 경우 강한 미소폭발 현상이 관측되었고, 액적 주위의 유동 발생으로 인해 상대적으로 디젤 부피비가 많음에도 점화가 지연 되었다. 반면 부탄올의 부피비가 75%인 경우 액적 표면에서 미소폭발이 발생하지 않았고 연료 증기가 액적 주위에서 안정적으로 형성될 수 있으므로 점화가 상대적으로 수월한 것으로 생각된다.

연구결과는 액적 미소폭발이 연소 과정에서 항상 긍정적인 영향을 끼친다고 할 수 없다는 점을 내포하고 있다. 미소폭발은 액적의 미립화를 통해 연소 효율 및 오염물질 배출을 줄여주지만, 연료 성분에 따라 액적의 점화지연을 늦춰 자발화 장치에서 점화 불안정성을 초래할 수 있기 때문이다.

4. 결 론

본 연구를 통해 디젤/1-부탄올 혼합 연료 액적의 상압/고온환경에서의 거동을 관찰하고 결과를 분석하였다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 액적이 상압/고온환경에 노출된 후 액적 가열, 미소폭발, 액적 점화 및 연소 과정을 나타내었으며, 각 과정의 지속시간 및 특성은 연료의 혼합비에 따라 상이하였다.
- (2) 부탄올 부피비 25, 50%에서는 활발한 미소폭발이 관찰되었고, 이후 자발화가 발생하였다. 반면 부탄올 부피비 75%인 경우 점화 전 미소폭발은 거의 관찰되지 않았다.
- (3) 디젤 연료의 낮은 자발화 온도로 인해 연료내 디젤 성분이 많을수록 점화지연이 짧아졌다. 그러나 미소폭발 영향으로 부탄올 부피비 50%에서의 액적 점화지연은 부탄올 부피비 75%인 경우와 거의 유사하였다.

후 기

이 성과는 2018년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2017R1C1B5016130).

참고문헌

- (1) Park, J., Park and J. Lee, "Estimating On-road NOx Emissions of Euro 6 Light-duty Diesel Vehicles", ILASS-KOREA, Vol 21, No 4, 2016, pp. 207-213.
- (2) S. J. M. Algayyim, A. P. Wandel, T. Yusaf and I. Hamawand, "Production and application of ABE as a biofuel", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, 2018, pp. 1195-1214.
- (3) Y. C. Lim, H. K. Suh, "Effect of High Temperature and Pressure Conditions on the Combustion Characteristics of n-butanol and n-heptane Fuel", ILASS-KOREA, Vol 21, No 1, 2016, pp. 29-36.
- (4) Y. Zhang, R. Huang, Y. Huang, S. Huang, Y. Ma, S. Xu and P. Zhou, "Effect of ambient temperature on the puffing characteristics of single butanol-hexadecane droplet", Energy, Vol. 145, 2018, pp. 430-441.
- (5) T. Gao, K. Xie, S. Yu, X. Han, M. Wang and M. Zheng, "Characterization of N-butanol high pressure injection from modern common rail injection system", ASME 2015 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, 2015.
- (6) M. Gülüm and A. Bilgin, "A comprehensive study on measurement and prediction of viscosity of biodiesel-diesel-alcohol ternary blends", Energy, Vol. 148, 2018, pp. 341-361.
- (7) R. Schoo, A. Hoxie and J. Braden, "Combustion characteristics of butanol-soybean oil blended droplets", ASME 2014 8th International Conference on Energy Sustainability, 2014.
- (8) I. Javed, S. W. Baek and K. Waheed, "Autoignition and combustion characteristics of kerosene droplets with dilute concentrations of aluminum nano-particles at elevated temperatures", Combustion and Flame, Vol. 162, No. 3, 2015, pp. 774-787.
- (9) O. Moriue, C. Eigenbrod, H.J. Rath, J. Sato, K. Okai, M. Tsue and M. Kono, "Effects of dilution by aromatic hydrocarbons on staged ignition behavior of n-decane droplets", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, No. 1, 2000, pp. 969-975.
- (10) S. Hou, F. M. Rizal, T. Lin, T. Yang and H. Wan, "Microexplosion and ignition of droplets of fuel oil/bio-oil (derived from lauan wood) blends", Fuel, Vol. 113, 2013, pp. 31-42.