한국분무공학회지 제26권 제3호(2021)
http://dx.doi.org/10.15435/JILASSKR.2021.26.3.120

상압조건에서 1-부탄올 젤 연료액적의 연소특성

남시욱* · 김혜민†

Combustion Characteristics of a 1-Butanol Gel Fuel Droplet in Atmospheric Pressure Condition

Siwook Nam and Hyemin Kim

Key Words: 1-Butanol(1-부탄올), Single droplet(단일액적), Micro-explosion(미소폭발), Gellant(젤화제), Ignition delay (점화지연), Effective burning rate(평균 연소율)

Abstract

Combustion characteristics of a 1-butanol gel fuel were studied in atmospheric pressure condition. The butanol gel fuel was manufactured by adding hydroxypropyl-methyl cellulose (HPMC) as a gellant and the effect of the gellant concentration was observed. The combustion process of a single butanol gel droplet was divided into 3 stages including droplet heating, micro-explosion, and gellant combustion. The flame was distorted compared to butanol + water mixture because of micro-explosion during the combustion. Increase of gellant concentration delayed the droplet ignition, but the combustion rate was improved due to the mass ejection during the micro-explosion.

기호설명

d : 액적 직경
K_{eff} : 평균 연소율
D_{ign} : 점화 시 액적 직경
D_{ext} : 소화 시 액적 직경
t_{com} : 연소 시간

1. 서 론

항공우주기술의 발전으로 인류는 본격적인 우주탐사 시대를 맞이하고 있다. 특히 최근 Space-X 사의 재사용 로켓 상용화로 인해 우주 탐사 비용을 획기적으로 낮출 수 있는 기반을 마련하였으며, 이에 따라 다양한 우주탐사 계획이 예정되어 있다. 이러한 원대한 우주탐사 계획에 비해 아직까지 인류가 사용하는 로켓은 수십 년째 액체 및 고체 연료를 사용하는 시스템에 머물러 있다. 액체 및 고체 로켓 시스템은 각각의 장점이 있지만 그 한계 또한 명확하므로, 저비용으로 고성능을 낼 수 있는 차세대 로켓 시스템의 개발이 절실하다[1].

젤 추진제는 액체 추진제에 젤화제를 첨가하여 기존의 액체 추진제에 비해 점성을 높인 추진제로 고체 추진제와 다르게 파이프를 통해 연료 이송 및 공급이 가능하면서도 액체 연료의 약점으로 꼽히는 연료 누출이 발생되더라도 상대적으로 안전하며, 저장 시 sloshing과 같은 현상이 없어 보관성이 우수한 특징이 있다. 또한 에너지 밀도가 높은 금속 입자를 첨가할 경우 높은 발열량을 갖는 연료의 제작이 가능하고 점도가 높은 젤 연료 특성상 콜로이드 상태를 오랫동안 유지할 수 있다

(Received: 24 Aug 2021, Received in revised form: 6 Sep 2021, Accepted: 7 Sep 2021)
*한국교통대학교 항공기계설계학과
†책임저자, 회원, 한국교통대학교 항공기계설계학과
E-mail : enok2695@ut.ac.kr
TEL : (043) 841-5838 FAX : (043) 841-5372

는 장점이 있는 등 기존의 추진제를 대체할 수 있을만한 특징들을 가지고 있다[2,3]. 하지만 젤 연료의 높은 점성으로 인해 미립화 및 분무 성능이 낮아지며, 이에 따라 연료의 연소 효율이 감소하는 등의 각종 문제점이 있다. 따라서 젤 연료의 상용화를 위해서 기존의 연구자들은 젤 추진제의 유변학적, 연소 특성을 파악하는 다양한 연구를 진행하였다.

Mishra 등[4]의 연구자들은 항공유의 한 종류인 Jet A-1에 thixotrol ST와 xylene을 첨가하여 제조한 젤 연료의 압력별 연소 특성을 관찰하였다. 실험 결과 젤 연료의 구성 성분 중 끓는 점이 낮은 성분인 xylene부터 증발하기 시작하여 상 분리가 일어나 젤층이 형성되는 것을 관찰하였고, 이러한 젤층으로 인해 미소폭발 현상이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 주위 압력이 증가함에 따라 불꽃의 높이 감소 및 연소율이 향상되는 결과를 보여주었다.

Arnold 등[5]의 연구자들은 탄화수소 계열의 JP-8 연료에 무기 젤화제의 한 종류인 silica를 첨가하여 제조한 젤 연료의 유변학적 특성 및 연소율 변화를 관찰하였다. 실험에서 젤 연료는 순수 연료와 다르게 전단 속도에 따라 점성이 변화하는 비 뉴턴 유체의 특성이 나타났으며 연소과정 후반부에 연료와 함께 연소되지 않고 잔여물을 형성하는 rigid shell의 존재를 관찰하였다. 또한 젤화제의 첨가량이 증가될수록 젤 연료의 점성 증가 및 평균 연소율이 감소되는 결과를 확인하였다.

Solomon 등[6]의 연구자들은 JP-8 연료를 기반으로 제작한 젤 연료의 금속 입자를 첨가하였을 경우 나타나는 젤 연료의 연소 특성 변화를 관찰하였다. 실험에서 젤 연료의 높은 점성으로 인해 액적 내부의 순환이 느려 균질성을 유지하지 못하고 상 분리가 일어나 젤층이 형성되는 것을 관찰하였다. 또한 액적의 연소가 진행될수록 액적내 젤화제 성분의 증가로 인해 젤층의 두께가 증가하여 액적의 팽창비가 증가되는 결과를 확인하였다.

이러한 기존 연구들을 통해 젤 연료의 유변학적 특징 및 연소 특성에 관한 이해도를 높일 수 있었다. 그러나 기존 연구들은 젤 연료의 자발화 관련 실험 연구가 진행된 사례가 부족하며, 연소 연구의 기초가 되는 점화지연 및 연소율 관련한 정량적 데이터가 부재한 실정이다. 특히 점화 지연의 경우 젤 연료의 높은 표면장력과 점성으로 인해 액적의 증발이 어려운 특성이 있어 기존의 액체 연료에 비해 크게 변화할 가능성이 있으므로 관련 연구를 통해 확인이 필요하다.

따라서 본 연구는 1-부탄올을 기본 연료로 제조한 젤 연료 액적의 연소 특성을 파악하고, 점화 지연 및 연소율을 정량적으로 측정하고자 한다. 1-부탄올의 경우 부식성이 낮고 탄화수소 계열 연료의 발열량 대비 80% 정도로 발열량이 우수할 뿐 아니라 알코올계열 특성상 연소시 오염물질 배출이 적어 기존 연료를 대체할 수 있는 가능성이 있다. 부탄올의 자세한 물성치는 Table 1을 통해 확인할 수 있다. 본 연구에서는 수용성의 젤화제를 용해시키기 위해 10 wt.% 증류수를 첨가한 부탄올 + 증류수 혼합 연료에 2.5, 3 wt.%의 젤화제를 각각 첨가해 젤 연료를 제작하였다. 제조된 연료를 상압 및 700°C 조건에 노출하여 젤 연료의 연소 특성을 확인하고 점화지연 및 연소율을 측정하였다.

Table 1 Thermophysical properties of 1-butanol

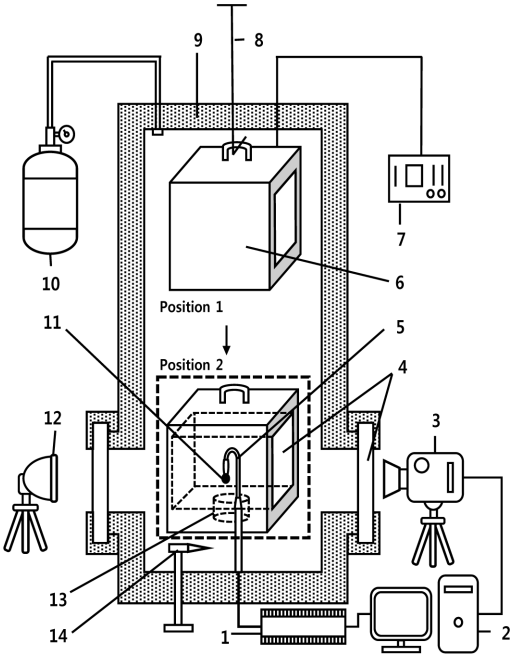
	1-butanol
Density (kg/L)	0.81
Boiling point (°C)	117
Specific heat (25°C) (J/mol·K)	177
Autoignition temperature (°C)	343

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험 장치

젤 연료 액적의 연소 실험을 위해 Fig. 1과 같은 단일 액적 연소 실험 장치를 구성하였다. 실험 장치는 연소 챔버, 액적의 연소환경을 만들어주는 전기로, 연소과정을 관찰 및 저장하는 초고속 카메라, 온도 및 각종 데이터를 수집하는 측정 장비 등으로 구성되어 있다.

실험은 고온의 전기로를 액적 위치로 이동시켜 액적이 자발화 할 수 있는 환경으로 만들고 액적의 자발화 및 연소 특성을 관찰하는 방식으로 진행하였다. 액적은 syringe needle을 통해 설치하였으며, 액적의 크기는 1000 ± 100 μm가 되도록 조절하였다. 액적은 직경 70 μm의 K-type 열전대의 끝부분에 설치하였다. 액적의 연소 과정은 초고속 카메라 (FASTCAM mini UX 100)를 통해 250 fps 로 촬영되었으며, 얻어진 액적의 광학적 이미지를 후처리하여 액적 점화, 소화 시간 및 직경 변화를 확인하였다. 액적의 직경 변화의 경우 Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 약 0.3 s 뒤에 관찰할 수 있다. 이는 전기로가 실험 위치로 이동되면서 일시적으로 액적



1. DAQ	8. Lever
2. Computer	9. Pressure vessel
3. High speed camera	10. Compressed air
4. Quartz window	11. Droplet
5. Thermocouple	12. Backlight
6. Electric Furnace	13. Furnace entrance
7. Furnace controller	14. Syringe

Fig. 1 Experimental setup

을 가리기 때문이다. 액적의 점화 및 소화는 영상의 붉은 색 계열 픽셀 개수를 확인하는 방법으로 결정하였으며, 점화 및 소화 사이의 시간을 연소 시간으로 하였다.

일반적으로 액적의 연소율은 액적 직경변화를 통해 확인하게 되나, 본 실험에서 액적 연소과정 동안 액적 주위의 화염에 의해 액적의 광학적 관찰이 어렵고 미소 폭발에 의한 직경의 변화가 심해 연소율 측정이 어려운 특징이 있다. 따라서 이전 연구자에[7] 의해 증명된 직경 변동이 심한 액적의 연소율을 정량적으로 측정하기 위한 평균 연소율을 도입하여 간접적으로 확인하였다. 액적의 평균 연소율 식은 아래와 같다.

$$k_{eff} = \frac{d_{Ign}^2 - d_{ext}^2}{t_{com}}$$

이때 d_{Ign}는 액적 점화 직경, d_{ext}는 액적 소화 직경, 그리고 t_{com}는 연소시간이다. 실제 실험 데이터에서 각 요

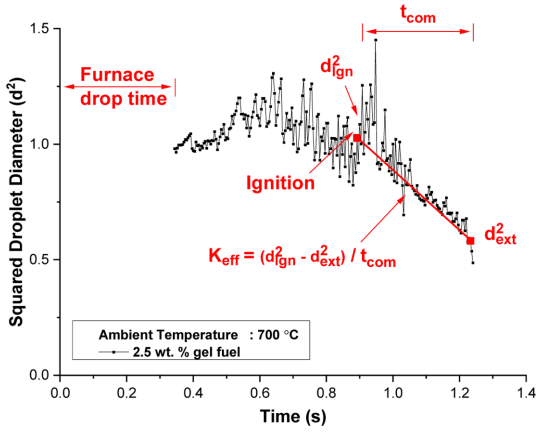


Fig. 2 Determination of D_{ign}, D_{ext} and t_{com} for measuring effective burning rate

소의 결정 방법을 Fig. 2에 표시하였다. 실험 데이터 처리 방법에 관한 더 자세한 사항은 저자의 이전 논문을 통해 확인 가능하다[8].

2.3 젤 연료 제조

1-부탄올은 채굴이 아니라 발효를 통해 얻을 수있는 지속 가능한 알코올 계열의 연료로, 젤화성능이 우수하며 오염물질 배출이 적은 특징이 있다. 본 연구는 1-부탄올을 기본 연료로 하고, 유기 젤화제의 종류 중 하나인 hydroxypropyl-methyl cellulose (HPMC)를 젤화제로 선정하였다. 연료 제조 방법은 먼저 수용성의 HPMC 용해를 위해 일정 질량비의 물을 부탄올에 첨가한 후 impeller를 통해 교반 하며 HPMC를 첨가하는 방식으로 제조하였다. HPMC의 첨가가 완료된 후 입자의 응집을 막기 위해 30분간 추가적으로 교반 하여 균질한 상태의 젤 연료를 제작하였으며, 제작 직후 발생하는 연료 내부의 기포를 없애기 위해 제조 후 24시간 정도 실온에 보관한 후 실험에 활용하였다.

3. 실험 조건

젤화제 첨가량에 따른 젤 연료 액적의 연소 특성을 연구하기 위해 상압 및 700°C 조건에서 실험을 진행하였다. 700°C 이하의 조건에서는 부탄올 액적의 자발화가 진행되지 않았으며,실험 장치의 한계상 더 높은 온도의 실험은 불가능하므로 온도 조건을 고정하였다. 실험은 젤화제 첨가량에 따른 젤 연료 액적의 연소 특성을

파악하기 위해 부탄올/물 혼합 연료를 기본 연료로 설정하고 2.5, 3 wt.% 젤화제를 첨가한 젤 연료 액적을 700°C 온도 조건에 노출시킨 후 액적의 연소율 및 자발화 특성을 관찰하였다. 실험의 일관성을 위해 실험 수행 시마다 발생한 연소 물질을 압축 공기로 환기하였으며, 동일한 조건에서 5회 반복 실험하여 실험 경향성을 도출하였다.

3. 실험 결과

3.1 젤 연료 액적의 주요 연소 거동

젤 연료의 연소 특성은 연료 및 첨가제의 종류, 실험 조건 등에 따라 매우 다른 것으로 알려져 있다[9]. 그럼에도 불구하고 젤 연료 액적이 나타내는 일반적인 현상들이 있으므로, 본 연구에서는 먼저 젤 연료 연소 시 발생하는 일반적인 거동을 관찰 하였다. Fig. 3은 2.5 wt.%의 젤 연료 액적이 700 °C 온도 조건에 노출되었을 때 시간에 따른 액적 직경 변화 및 연소 시점을 나타낸 그래프이다. 액적의 수명 시간 동안 주요 거동은 그래프에서 나타난 바와 같이 액적 가열, 미소 폭발, 젤화제 연소 구간으로 구분할 수 있었다. 실험 초기에는 액적이 주위의 고온 환경에 노출됨에 따라 액적이 가열되는 액적 가열 구간을 거쳤다. 이 단계에서는 액적이 주위로부터 열량을 공급받아 온도가 증가하게 되고, 이에 따라 열팽창이 발생하여 액적 직경이 다소 증가하였다. 하지만 액적 가열 단계는 실험 초기이므로 연료가 끓는점에 도달하지 못하였기 때문에 미소폭발 현상은 발생하지 않았다.

이후 액적의 온도가 지속적으로 상승하게 되면 젤 연료의 기본 연료인 부탄올이 끓는점에 도달하게 되고, 액적이 활발하게 증발하기 시작하여 직경이 감소하게 된다. 특히 이 구간에서는 활발한 미소폭발 현상이 관찰되어 미소폭발 구간으로 구분하였다. 이 구간에서는 기화한 부탄올이 젤화된 액적 표면층을 통과하지 못하고 액적 내부에 쌓이게 된다. 이에 따라 액적 직경은 Fig. 4(b)와 같이 증가하였다가 액적 내부에 충분한 증기가 형성되면 액적 표면을 뚫고 나와 폭발하는 미소폭발 현상이 발생하였고 Fig. 3과 같이 액적 직경이 반복적으로 변화하는 현상을 보여주었다.

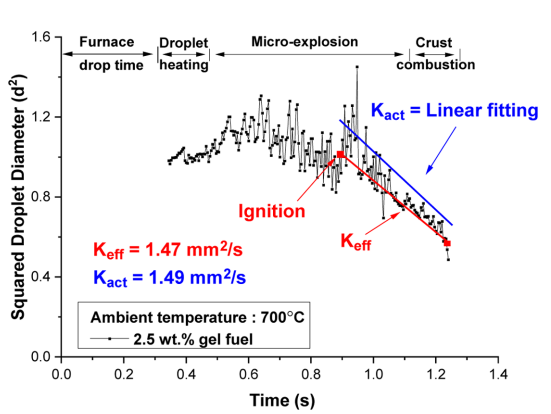


Fig. 3 Squared droplet diameter of 2.5 wt.% gel fuel droplet at 700°C

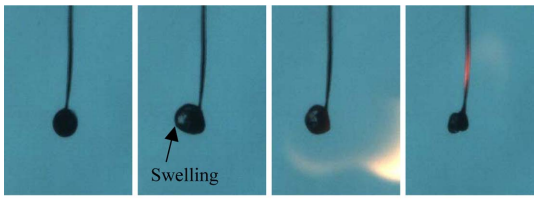


Fig. 4 Droplet combustion process at 700°C, (a) droplet heating, (b) micro-explosion, (c) droplet ignition, (d) crust combustion

이러한 미소폭발 현상은 액적 수명 시간 후반까지 활발하게 발생하였으나 액적 직경이 감소하고 내부의 부탄올 연료가 소진됨에 따라 그 강도가 점차 감소하였다. 이후 젤 액적은 미소폭발 도중 자발화가 발생하였는데 그 시점을 Fig. 3의 그래프에 표시하였다. 미소폭발 현상은 젤 액적 연소 시에도 지속적으로 발생하였다. 젤 연료 액적의 연소과정 동안 액적 주위 화염이 액적의 광학적 관찰을 어렵게 하여 직경 변화 확인이 대부분 불가능하였다. 하지만 Fig. 3은 연소 시에도 액적 직경을 확인할 수 있는 특별한 케이스로 연소 중 액적 직경 변화를 그래프와 같이 나타낼 수 있었다.

미소폭발 및 연소 후반에 이르면 액적 내부의 부탄올은 거의 소진되고 젤화제의 연소가 진행되었는데 이를 젤화제 연소 구간으로 분류하였다. 이 구간에서 연소는 미소폭발 구간과 달리 미소폭발이 감소하며 불꽃의 크기가 작아진 것을 Fig. 4(d)를 통해 확인할 수 있다. 이는 액적 내부의 부탄올이 소진되어 액적 증기의 확산이 감소하기 때문이다. 젤화제 연소 구간은 약 0.2초 정도 진행되었으며, 이후 액적이 소화되었다.

평균 연소율 계산의 유효성을 확인하기 위해 본 실험에서 액적 직경을 fitting 하여 얻은 실제 연소율과 액적

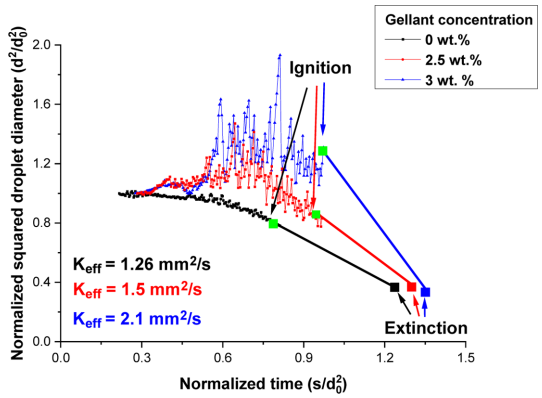


Fig. 5 Temporal change of a normalized droplet squared diameter for various gellant ratio

의 점화 시점 및 소화 시점을 통해 확인한 평균 연소율 값을 비교하였으며, 그 값은 각각 1.49 mm²/s과 1.47 mm²/s으로 나타났다. 이를 통해 평균 연소율은 연소 중 액적의 직경변화 특성을 적절히 반영하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 젤화제 농도에 따른 액적 연소 거동

젤화제 농도에 따른 액적 직경 변화 및 연소 특성을 확인하여 Fig. 5와 같이 나타내었다. 먼저 부탄올 + 물 혼합연료의 경우 액적의 직경 변화 거동이 단일 연료와 비슷하게 나타났다. 이는 상압에서 부탄올과 물의 끓는 점 차이가 적고 액적의 구성 성분 중 부탄올에 비해 물이 차지하는 비율이 10% 미만이기 때문에 물에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다. 점화 이후 화염으로부터의 열전달에 의해 약한 강도의 미소폭발이 발생하였으나, 이미 대부분의 연료 및 물이 증발 또는 연소한 상태이므로, 지속적으로 발생되지는 않았다.

반면 일정 질량비의 젤화제가 첨가된 젤 연료의 경우 전반적인 연소 과정에서 부탄올 + 물 혼합 연료와 다른 양상이 나타났다. 먼저 젤 연료의 액적 가열 구간에서 부탄올 + 물 연료에 비해 액적의 팽창이 더 뚜렷하게 발생하였다. 이 현상은 액적 가열 구간에서 약간의 미소폭발이 발생하는 것을 고려할 때, 액적의 열팽창이라기보다는 액적 내부에 갇힌 연료 증기에 의해 액적 직경이 실제보다 커져 보이는 것으로 생각된다.

액적 가열 구간의 후반으로 갈수록 액적 내부 온도 상승으로 인해 점차 액적이 팽창하면서 미소폭발 구간으로 전이되었다. 이 구간의 경우 앞서 3.1절에서 언급했던 바와 같이 액적 내부의 구성 성분들의 끓는 점 차

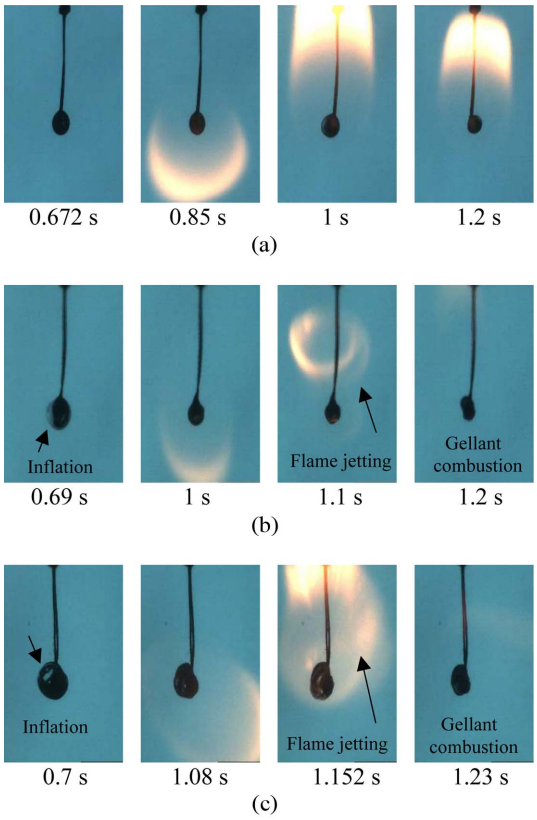


Fig. 6 The images of droplet for different gellant ratio, (a) 0 wt.%, (b) 2.5 wt.%, (c) 3 wt.%

이로 인해 Fig. 6(b), (c)과 같은 액적의 팽창 및 미소폭발 현상을 관찰할 수 있었다. 특히 젤화제의 농도가 증가할수록 전반적으로 액적 직경의 변화량이 커짐을 Fig. 5에서 확인 가능하다. 이는 젤화제 첨가량의 증가로 인해 젤 액적 표면에 더욱 견고한 젤 층이 형성되고, 높아진 표면 장력 및 점성으로 인해 액적 팽창 및 미소폭발의 강도가 강화되었기 때문이다. 미소폭발은 모든 경우에서 액적 점화 전부터 발생하였으며 액적 점화 이후에도 지속되었다.

액적의 점화 시점은 세 조건 모두 유사 하였으나 전반적으로 젤화제 함유량이 증가할수록 지연되는 현상을 보였다. 이에 대한 논의는 다음장에 자세하게 다루었다. Fig. 6(a)과 같이 부탄올 + 물 액적의 경우 연소 중 화염 형상이 안정되었으나, 젤 연료의 경우 점화 후 미소폭발에 의한 화염 형상의 왜곡이 주요하게 발생하였다. 특히 선행 연구자들이 발견한 연료 증기 분출에 의한 flame jetting 현상도 관찰되었다[10,11].

연소 후반 젤 연료는 Fig. 6(b), (c)에서 보이듯 화염의 크기가 감소하였는데 이는 연료가 대부분 연소된 후 HPMC가 연소하는 현상이다. 젤화제 연소까지 포함한 액적의 수명시간은 세 조건 모두 거의 유사하였으며, 연소 기간 동안의 액적 연소율은 젤화제의 농도가 높을수록 증가하였다. 이에 대한 자세한 사항은 다음 장에 다루었다.

3.3 젤 연료 액적의 점화지연 및 연소율

젤 연료 액적 연소현상에 관한 정량적인 값으로 젤화제 첨가량에 따른 점화지연과 연소율을 Fig. 7과 같이 나타내었다. 점화지연의 경우 젤화제 혼합비가 증가할수록 다소 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 이는 젤 연료의 주요한 특성으로 젤 연료의 경우 높은 표면 장력 및 점성을 가지고 있어 순수 액체 연료에 비해 증발이 힘들고 액적 표면에 형성된 젤 층이 미소폭발을 일으켜

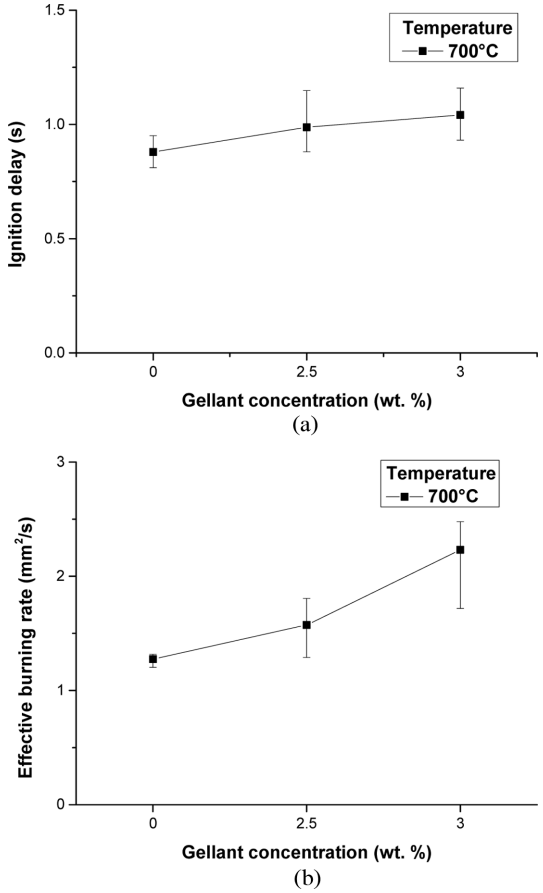


Fig. 7 (a) Ignition delay and (b) effective burning rate for gel droplet in different gellant ratio

액적 주위의 축 적된 혼합기를 소산 시키기 때문이다. 이동기 등[12]의 연구자들은 젤 연료 표면의 젤 층으로 인해 액적의 유효 증발이 감소되어 순수 에탄올에 비해 점화지연이 증가된다고 설명하였다. 다만 본 실험에서 젤화제의 혼합에 따른 점화지연 증가는 그 차이가 크지 않았으며, 다른 요인에 비해 상대적으로 제한적인 영향을 미치는 것으로 생각된다.

연소율의 경우 액적 표면의 젤 층에 의해 증발이 억제되어 연소율이 감소할 것으로 예측되었으나, 실험 결과 젤화제의 첨가량이 증가될수록 오히려 향상되는 결과가 나타났다. 젤연료의 연소율이 증가되는 가장 큰 이유는 액적 표면의 젤 층에 의한 미소폭발 때문이다. 젤 연료의 표면에서 발생하는 미소폭발은 액적 질량 중 일부를 토출시켜 연소율을 증가시키는데, 젤화제의 농도가 높을수록 표면의 젤 층이 견고해져 미소폭발의 강도가 증가한다. 이에 따라 질량 토출이 증가하고, 결론적으로 연소율이 증가하는 것으로 판단된다. 저자의 이전 연구에서도 미소폭발에 의한 연소율 증가 현상을 관찰하였는데, n-decane/water (W/O) 에멀젼 연료의 연소율이 액적의 팽창 및 미소폭발 현상으로 인해 과장된 것을 확인하였다[13]. 연소율의 경우 부탄올 + 물 혼합액적의 실험 오차에 비해 젤 연료 액적의 실험 오차가 상대적으로 증가하였는데, 미소폭발의 무질서한 거동을 인해 실험마다 편차가 큰 것으로 보인다.

상압에서 젤 연료는 부탄올 + 물 혼합연료에 비해 점화지연의 차이는 크게 발생하지 않으면서도 연소율은 상당히 증가하는 특징을 보여주었다. 이러한 특성은 기존 액체 연료와는 상이한 특징이지만 로켓 등의 연소시스템에 적용할 경우 유리한 특성이다. 향후 젤 연료를 이용한 연소장치를 설계하는 데 있어 이러한 측면이 반드시 고려되어야 할 사항이다.

4. 결 론

본 연구에서는 1-부탄올/HPMC 혼합 젤 연료의 연소 특성을 확인하기 위해 젤화제 첨가량 별 젤 연료의 연소 거동을 관찰하고 점화지연과 연소율 등의 정량적 데이터를 도출하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 젤 연료의 연소 과정은 액적 가열, 미소폭발, 젤화제 연소의 3단계로 구분되었으며 기존 부탄올 연료와는 상당한 연소 특성 차이를 나타내었다.

(2) 젤 연소의 가장 큰 특징으로 미소 폭발이 관찰되

었으며, 이는 부탄올 증기가 젤 표면층을 통과하지 못하다 일정 압력 이상이 되면 분출되어 발생하였다. 연소 중 미소폭발로 인해 화염 형상이 왜곡되었다.

(3) 젤화제의 첨가량이 증가될수록 견고해지는 액적 표면의 젤 층으로 인해 점화지연이 증가하였다. 연소율은 미소폭발과 이로 인한 액적 질량의 토출로 인해 젤 화제의 첨가량이 증가할 수록 상승하였다.

후 기

이 논문은 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1I1A306765612).

참고문헌

(1) S. Rahimi, A. Peretz and B. Natan, “Rheological matching of gel propellants”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 26, No. 2, 2010, pp. 376~379.

(2) Q. Cao, W. Liao, W. T. Wu and F. Feng, “Combustion characteristics of inorganic kerosene gel droplet with fumed silica as gellant”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 103, 2019, pp. 377~384.

(3) D. Yang, Z. Xia, L. Huang, L. Ma, Y. Feng and Y. Xiao, “Exprimental study on the evaporation characteristics of the kerosene gel droplet”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 93, 2018, pp. 171~177.

(4) D. P. Mishra and A. Patyal, “Effects of initial droplet diameter and pressure on burning of ATF gel propellant droplets”, Fuel, Vol. 95, 2012, pp. 226~233.

(5) R. Arnold and W. Anderson, “Droplet burning of JP-8/silica gels”, In 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010, pp. 421.

(6) Y. Solomon and B. Natan, “Experimental investigation of the combustion of organic-gellant-based gel fuel droplets”, Combustion Science and Technology, Vol. 178, No. 6, 2006, pp. 1185~1199.

(7) C. H. Wang and J. T. Chen, “An experimental investigation of the burning characteristics of water-oil emulsions”, International communications in heat and mass transfer, Vol. 23, No. 6, 1996, pp. 823~834.

(8) J. Choi, T. Yi and H. Kim, “Combustion of a dilute carbon black/ethanol nanofuel droplet in elevated pressure conditions”, Fuel, Vol. 292, 2021, pp. 120376.

(9) D. O. Glushkov, A. G. Nigay, V. A. Yanovsky and O. S. Yashutina, “Effects of the initial gel fuel temperature on the ignition mechanism and characteristics of oil-filled cryogel droplets in the high-temperature oxidizer medium”, Energy & Fuels, Vol. 33, No. 11, 2019, pp. 11812~11820.

(10) Wang, J., Qiao, X., Ju, D., Sun, C., & Wang, T. “Bubble nucleation, micro-explosion and residue formation in superheated jatropha oil droplet: The phenomena of vapor plume and vapor cloud.”, Fuel, Vol. 261, 2020, pp. 116431.

(11) S. Feng, B. He, H. He, L. Su, Z. Hou, W. Nie and X. Guo, “Experimental studies the burning process of gelled unsymmetrical dimethylhydrazine droplets under oxidant convective conditions”, Fuel, Vol. 111, 2013, pp. 367~373.

(12) D. Lee, J. Won, S. W. Baek and H. Kim, “Autoignition behavior of an ethanol-methylcellulose gel droplet in a hot environment”, Energies, Vol. 11, No. 8, 2018, pp. 2168.

(13) J. Won, S. W. Baek and H. Kim, “Autoignition and combustion behavior of emulsion droplet under elevated temperature and pressure conditions”, Energy, Vol. 163, 2018, pp. 800~810.