

알루미늄 입자 크기에 따른 파라핀 혼합연료의 연소 특성 연구

고수한* · 한승주* · 류성훈* · 김진곤** · 문희장**† · 김준형*** · 고승원***

A Study on Combustion Characteristics of Paraffin Blended Fuel on Aluminum Particle Size

Soohan Ko* · Seongjoo Han* · Sunghoon Ryu* · Jinkon Kim** · Heejang Moon**† · Junhyung Kim*** · Seungwon Ko***

ABSTRACT

In this study, the combustion characteristics of paraffin blended fuel on aluminum particle size were investigated. The combustion experiments were carried out using aluminum particles with an average particle size of 100 nm and 8 μm and microcrystalline paraffin wax (Sasol 0907). A series of comparison was conducted on the regression rate, the pressure curve and the characteristic velocity of pure paraffin and paraffin blended fuels with aluminum particles. It was found that the micro-sized particles enhance the regression rate as the oxidizer mass flux increased. However, the nano-sized particles decrease the regression rate as the oxidizer mass flux is increased.

초 록

본 연구에서는 알루미늄 입자 크기에 따른 파라핀 혼합연료의 연소 특성에 관한 실험을 수행하였다. 평균 입도 100 nm 및 8 μm 크기의 알루미늄 입자와 Sasol사의 마이크로크리스탈린 파라핀 왁스(Sasol 0907)를 이용하여 연소실험을 수행하였고 순수 파라핀과 알루미늄 입자 5 wt%를 첨가한 파라핀 혼합 연료의 후퇴율과 압력선도, 특성배기속도 등을 비교하였다. 마이크로 입자의 첨가는 산화제 유속이 증가할수록 후퇴율을 향상시켰으나 나노 입자의 첨가는 후퇴율이 감소하는 경향을 보였다.

Key Words: Paraffin(파라핀), Aluminum Particle(알루미늄 입자), Regression Rate(후퇴율), Characteristic Velocity(특성배기속도)

1. 서 론

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 국방과학연구소

† 교신저자, E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

하이브리드 추진기관에 사용되는 파라핀 연료는 용융점이 낮아 연소 과정에서 연료 표면에 액

막을 형성하고 액막에서 떨어져 나간 액적들이 고속의 산화제 유동으로 유입(entrainment)되어 높은 후퇴율을 갖는다. 그러나 이와 같이 유입된 연료 액적은 연소 과정 중 연소실 내부에서 미처 연소되지 못하고 배출되면서 연소 효율의 저하를 초래할 수 있다. 이에 파라핀 연료의 연소효율 향상 및 비추력 향상을 위하여 알루미늄 입자와 같은 고에너지 물질을 첨가하여 성능을 향상시키는 연구가 국내외에서는 다양하게 수행되고 있으나 [1,2] 국내에서는 대부분 순수 파라핀에 대한 연소 특성 연구가 수행되었으며, 알루미늄 입자를 첨가한 파라핀 연료에 대한 연구는 많이 진행되고 있지 않다.[3,4]

나노와 마이크로 크기의 알루미늄 입자는 연소가 진행되어가는 과정이 서로 상이하여 입자크기별 장단점을 갖고 있는 특성이 있다.[5] 나노 알루미늄의 경우 연소 시 발생하는 에너지가 작은 반면, 점화가 쉬운 장점이 있으며, 마이크로 알루미늄의 경우 점화가 어려운 단점은 존재하나 연소 중 발생하는 에너지가 커 전체적인 추진기관의 성능을 증가시킬 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 파라핀 연료의 복잡한 연소메커니즘으로 인해 첨가된 입자 크기에 따라 입자가 혼합된 파라핀 연료의 연소특성 변화를 예측하기는 쉽지 않으며 추진기관의 성능 향상을 위하여 첨가하는 알루미늄의 입자 크기를 결정하는 것은 매우 어렵다.

이에 본 연구에서는 평균 입도 100 nm와 8 μm의 두 가지의 알루미늄 입자 크기를 선정하여

동일한 함유량에 대하여, 첨가된 알루미늄의 입자 크기가 거시적인 연소 특성에 미치는 영향에 대해 비교·분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 하이브리드 연소 실험 장치는 Fig. 1과 같다. 전체 시스템은 산화제 공급 시스템, 점화 시스템, 데이터 획득 및 연소기 시스템으로 구성되어 있다. 산화제인 기체 산소의 공급 유량은 TFM(Turbine Flow Meter)을 이용하여 측정하였으며, 오리피스를 이용해 유량을 조절하였다. 점화장치는 KNSB(KNO₃-Sorbitol) 추진제를 예열 플러그를 이용해 점화하는 방식을 선정하였다. 전체 실험은 PLC(program logic control)로 제어하였으며, 각 센서로부터 획득한 데이터들은 DAQ(data acquisition) 보드를 이용하여 수집하였다. 연소기는 인젝터, 전방연소실, 연료 그레인, 후방연소실, 노즐로 구성하였으며, 전방연소실과 후방연소실에 각각 압력 센서를 장착하였고 노즐은 구리로 제작하여 펌프를 이용해 수냉각을 하였다.

본 연구에서는 Table 1과 같은 실험 조건으로 연소 실험을 수행하였다. 연료로 사용된 파라핀은 Sasol사의 마이크로크리스탈린 파라핀 왁스(microcrystalline wax-Sasol 0907)를 사용하였고 평균 입자 크기가 100 nm와 8 μm인 알루미늄 입자를 선정하여 5 wt% 비율로 파라핀과 교반하여 제작하였고 제조된 형상은 Fig. 2와 같다[6].

Table 1. Specifications of candidate propellants and fuel binder geometries

Oxidizer	Gaseous Oxygen			
	Fuel	Pure Paraffin	Paraffin (Pure/Micro Al 5 wt%)	Paraffin (Pure/Nano Al 5 wt%)
Fuel Density(kg/m ³)	920.3030	951.1436	955.4767	
Oxidizer Pressure(bar)	29.7	27.6	28.5	
Burning Time(sec)	5			
Fuel Configuration				
Initial Port Diameter (mm)	15			
Port number	1			
Outer Diameter (mm)	60			
Grain Length (mm)	200			

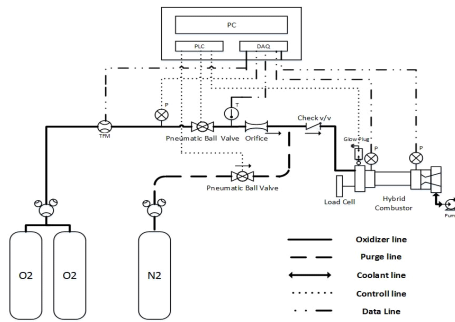


Fig. 1 Schematic of the experimental system

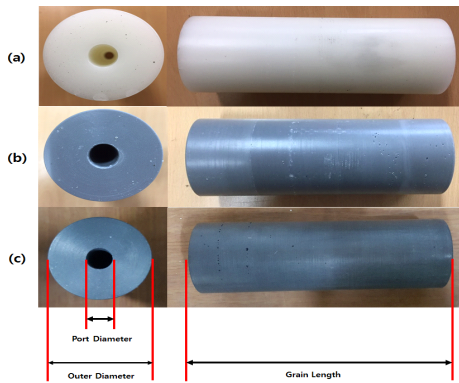


Fig. 2 Front and side views of the fuels - (a) Pure Paraffin, (b) Micro 5 wt% (c) Nano 5 wt % [6]

2.2 실험 결과

2.2.1 산화제 질량 유속에 따른 후퇴율

후퇴율은 연소 후와 연소 전의 포트 직경의 평균값을 총 연소시간으로 나누어 사용하는 시공간 평균화된 후퇴율을 사용하였고 그 계산식은 Eq. 1~2로 나타내었다. 또한 하이브리드 추진 시스템에서 후퇴율은 산화제 질량 유속의 함수로 Eq. 3과 같이 나타낼 수 있고 이로부터 계산된 값들은 Table 2에 정리하였다.

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho} = \pi L (r_f^2 - r_i^2) \quad (1)$$

$$r = \frac{r_f - r_i}{t} \quad (2)$$

$$\dot{r} = a G_{o,avg}^m \quad (3)$$

Table 2. Regression rate index on fuel type

Fuel type	a	n
Pure	0.2133	0.4575
Micro 5% wt.	0.2217	0.4528
Nano 5% wt.	0.2548	0.4121

Figure 3은 연료 종류별 산화제 유속에 따른 후퇴율을 나타내고 있다. 마이크로 입자를 첨가한 경우가 나노 입자를 첨가한 경우보다 유속이 증가함에 따라 후퇴율이 향상됨을 확인하였다.

이는 마이크로 알루미늄 입자의 경우 나노 입자보다 상대적으로 보유하고 있는 에너지가 높아 마이크로 입자를 첨가하였을 때의 후퇴율 증가폭이 상대적으로 클 수도 있다는 것을 암시한다.[5,7].

또한 마이크로 입자를 첨가한 경우 순수 파라핀에 비해 유속이 증가함에 따라 후퇴율이 증가하는 경향을 보였지만 나노 입자를 첨가한 경우에는 유속 40~50 kg/m²·sec 구간에서 순수 파라핀의 경우와 비교 시 그 증가폭이 마이크로 입자 대비 상대적으로 작으며, 산화제 유속이 증가함에 따라 오히려 순수 파라핀의 후퇴율에 비해 감소하는 경향을 보였다.

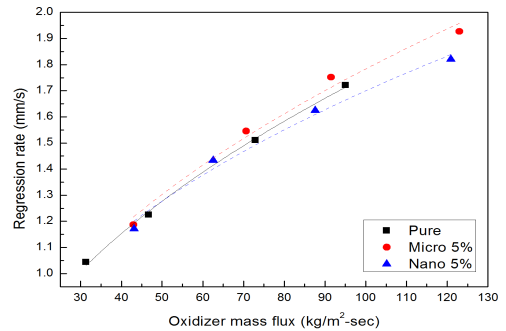


Fig. 3 Comparison of overall regression rate with oxidizer mass flux

Karabeyoglu[2]는 용융성 연료(liquefying fuel)에 대하여 후퇴율을 유입후퇴율(entrainment regression rate)과 기화후퇴율(vaporization regression rate)의 합으로 표현하여 Eq. 4와 같

은 모델을 제시하였다.

$$\dot{r} = \dot{r}_{ent} + \dot{r}_{vap} \quad (4)$$

또한 유입후퇴율에 영향을 미치는 유입액적량은 Eq. 5와 같은 관계를 가지며 연소실 동압(P_d)과 액막두께(h)에는 비례하고, 점도(μ_l)와 표면장력(σ)에는 반비례한다는 관계를 제안하였다.

$$\dot{m}_{ent} \propto \frac{P_d^\alpha h^\beta}{\mu_l^\gamma \sigma^\pi} \quad (5)$$

나노 입자의 첨가는 순수 파라핀에 비해 큰 폭의 점도상승을 야기 시킨다.[1] 따라서 순수 파라핀에 비해 나노입자를 첨가한 경우, 유입되는 액적의 양이 큰 폭으로 감소하며, 이는 전체 후퇴율의 감소를 가져오는 것으로 사료된다. 그러나 마이크로 입자를 첨가한 경우는 점도의 증가폭이 상대적으로 나노 알루미늄에 비해 작기에 유입액적량에 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되고 있다.[8]

2.2.2 첨가된 입자 크기에 따른 연소실 압력

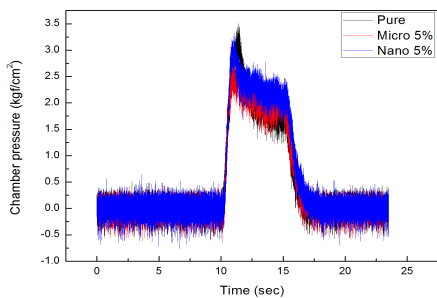


Fig. 4 Chamber pressure time trace of pure and blended fuels

Figure. 4는 시간에 따른 연소실 압력 변화를 나타내고 있다. 파라핀 연료의 경우 높은 후퇴율을 갖고 있어 연소가 진행됨에 따라 포트 직경 변화가 크기 때문에 연소실 압력이 점차 감소하는 형태로 나타났다. 이에 따라 첨가된 입자크기

에 따른 압력의 영향을 평균 연소실 압력을 이용하여 비교를 수행하였으며 그 결과는 Fig. 5와 같다.

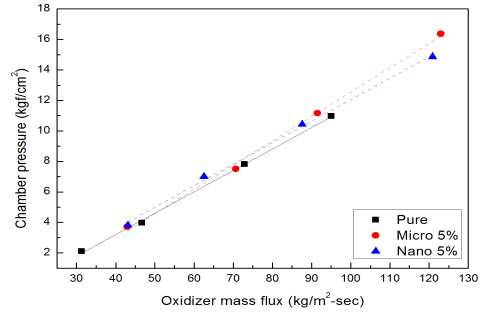


Fig. 5 Averaged chamber pressure vs. oxidizer mass flux

알루미늄 입자를 첨가한 경우에는 유속이 증가할수록 순수 파라핀 대비 높은 연소실 압력이 형성되었으며, 마이크로 알루미늄 입자를 첨가한 경우가 나노 입자를 첨가한 경우보다 일부 높은 압력이 형성되었으나 정량적으로 큰 차이를 보이지 않았다.

2.2.3 산화제 질량 유속 및 O/F에 따른 특성배기속도

Figure. 6의 기호(symbol)들은 O/F비에 따른 연료별 실험 특성배기속도(C^*)를 나타내고 있다. 실선으로 표현된 이론 특성배기속도는 CEA(Chemical Equilibrium with Application) code로부터 도출되었으며 실험 특성배기속도는 Eq. 6을 이용하여 계산하였다.

$$C^* = \frac{P_c A_t}{\dot{m}_p} \quad (6)$$

실험의 경우, 농후 연소 영역에서 연소가 이루어졌음을 확인하였으며, 순수 파라핀의 경우 특성배기속도가 60%, 나노 및 마이크로 알루미늄 입자를 첨가한 경우에는 60~70%의 효율을 보였다. 또한 O/F비 2 이하 구간에서는 마이크로 입자를 첨가한 경우가 나노 입자를 첨가한 경우보다 오히려 특성배기속도가 낮은 경향을 보였다.

이는 마이크로 입자를 첨가한 경우, 후퇴율 상승 폭 대비 연소실의 압력 상승폭이 크지 않아 유입후퇴율이 기화후퇴율의 영향에 비해 클 것으로 사료되며, 유입된 연료액적은 연소실에서 모두 반응하지 못하고 배출되어 특성배기속도 및 특성배기속도 효율이 나노입자를 첨가한 경우에 비해 낮은 것으로 판단된다. 그러나 O/F비가 2 이상이 되면서 마이크로 입자 첨가 특성배기속도가 나노 입자를 첨가한 경우보다 높은 값을 나타내기 시작하는데 이는 O/F비가 증가할수록 연소실 내에서 반응에 참여하는 마이크로 알루미늄의 양이 증가하여, 연소실 압력이 상승하고, 이에 따라 특성배기속도가 상승하기 시작한 것으로 판단된다.

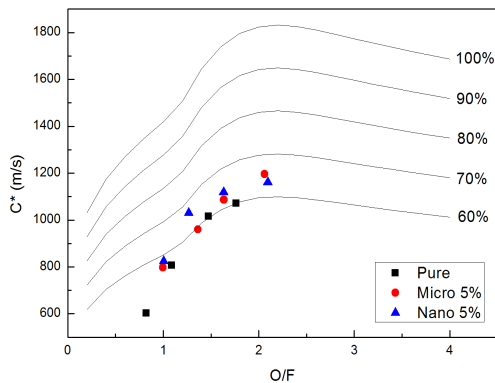


Fig. 6 Characteristic velocity with respect to O/F ratio

3. 결 론

본 연구에서는 파라핀 연료에 나노 및 마이크로 크기의 알루미늄 입자를 첨가하여 입자 크기별 연소특성을 비교하고 분석 하였다. 마이크로 입자를 첨가한 경우 산화제 질량유속이 증가할수록 순수 파라핀 또는 나노 입자를 첨가했을 경우에 비해 후퇴율이 증가하였다. 나노 입자를 첨가한 경우에는 순수 파라핀 연료에 비해 증가폭이 매우 작았으며, 특정유속 구간 이상에서는 오히려 후퇴율이 감소하였다. 이는 마이크로 입

자의 경우, 큰 유입후퇴율을 가짐에도 불구하고 임의의 산화제 유속값 이상에서는 많은 열량을 발생시켜 후퇴율이 증가한 것으로 판단된다. 반면, 높은 점도를 갖는 나노 입자 혼합연료의 경우, 일정 유속 이상의 구간에서는 순수 파라핀 연료 대비 유입액적 후퇴율을 감소시켜 전체적인 후퇴율을 감소시키는 경향이 나타나는 것으로 사료된다.

평균 연소실 압력, 특성배기속도 및 특성배기속도 효율은 나노 및 마이크로 입자를 첨가한 경우가 순수 파라핀 연료에 비해 높은 경향을 보였지만 그 차이는 미미하였다.

추후 마이크로 입자 혼합연료의 점도에 따른 후퇴율의 영향에 대한 연구와 유입액적후퇴율에 관한 연구를 수행하여 비교·분석할 예정이다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소의 지원 (과제 번호: UD150033GD)을 받아 수행된 연구로서 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Dermanci, Omer, and Arif M. Karabeyoglu. "Effect of Nano Particle Addition on the Regression Rate of Liquefying Fuels." 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2015
2. Karabeyoglu, M. A., Altman, D., & Cantwell, B. J. "Combustion of liquefying hybrid propellants: Part 1", general theory. Journal of Propulsion and Power, 18(3), 610-620, 2002
3. 김수중, 조정태, 이정표, 문희장, 성홍계, 김진곤. Paraffin wax/LDPE 혼합 연료의 연소 특성에 관한 연구. 한국추진공학회지, 14(2), 29-38, 2010
4. 김권호, 박현춘, 백승욱. 파라핀-왁스의 용융을 고려한 하이브리드 로켓의 연소 특성. 한

- 국항공우주학회 학술발표회 논문집, 689-692, 2009
5. Sundaram, D. S., V. Yang, and V. E. Zarko. "Combustion of nano aluminum particles (Review)." *Combustion, Explosion, and Shock Waves* 51.2 (2015): 173-196.
 6. 류성훈, 한승주, 김진곤, 문희장, 김준형, 고승원. "Tensile and Compression Strength Characteristics of Aluminized Paraffin Wax Fuel for Various Particle Size and Contents". *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 20(5), 70-76, 2016
 7. Beckstead, M. W. A summary of aluminum combustion. BRIGHAM YOUNG UNIV PROVO UT, 2004.
 8. Boiocchi, Matteo, et al. "Paraffin-based Fuels and Energetic Additives for Hybrid Rocket Propulsion." 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2015.