

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2018.22.2.011>

파라핀/알루미늄 연료의 알루미늄 입자크기 및 함유비 변화에 따른 유변학적 특성

류성훈^a · 한승주^a · 문희장^{b,*} · 김진곤^b · 김준형^c · 고승원^c

Rheological Investigation of Aluminized Paraffin Wax Fuel on Particle Size and Contents

Sunghoon Ryu^a · Seongjoo Han^a · Heejang Moon^{b,*} · Jinkon Kim^b ·
Junhyung Kim^c · Seungwon Ko^c

^a Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

^b School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

^c Agency for Defense Development, Korea

* Corresponding author. E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

ABSTRACT

Viscosity measurements were conducted to investigate the rheological characteristics of aluminized paraffin wax fuel. To identify the effect of size and contents of the aluminum particles on the variation of viscosity, samples of nano- and micro- sized aluminum particles with an average particle size of 100 nm and 8 μm were prepared and measured using a rheometer. The observed viscosity increment patterns of the nano- and micro-sized particles were very different, and particularly above 10 wt%, where a relatively low overall regression rate is expected for nano- content fuel. It is possible that this phenomenon could cause the reduced entrainment regression rate.

초 록

본 연구에서는 하이브리드 로켓용 파라핀/알루미늄 연료의 유변학적 특성 파악을 위한 점도 측정을 수행하였다. 혼합된 알루미늄 입자의 크기와 첨가량에 따른 유변학적 특성을 파악하기 위해 평균 입도 100 nm, 8 μm 의 나노 및 마이크로 크기 알루미늄 입자첨가 시료를 제작하였으며, 회전형 레오미터를 사용해 점도를 측정하였다. 나노 및 마이크로 입자 함유비에 따른 증가율 패턴은 대단히 상이하였으며 입자의 함유비 10 wt%를 경계로 점도 증가율이 구분되었고, 나노입자 첨가 시 연료의 유입 후퇴율 감소에 따른 총 후퇴율의 저하를 예상할 수 있었다.

Key Words: Entrainment Regression Rate(유입 후퇴율), Paraffin Wax(파라핀 왁스), Aluminum Particle(알루미늄 입자), Rheological Characteristics(유변학적 특성)

Received 20 November 2017 / Revised 12 January 2018 / Accepted 19 January 2018

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

Nomenclature

- \dot{r} : regression rate (m/s)
- $\dot{\rho}r$: vertical combustion rate (kg/m²·s)
- ρ : density (kg/m³)
- U : velocity (m/s)
- \dot{m} : mass transfer rate (kg/s)
- μ : viscosity (mPa·s)
- σ : surface tension (N/m)
- P_{dyn} : dynamic pressure of oxidizer (bar)
- o : oxidizer
- h : melting layer thickness
- v : vaporization
- e : entrainment
- t : total
- l : liquefying fuel

1. 서 론

하이브리드 추진시스템은 일반적으로 고체 연료와 액체 또는 기체 산화제를 분리하여 사용하며, 액체 추진시스템과 고체 추진시스템의 단점을 보완하고 장점을 극대화하고자 고안된 추진시스템이다. 하이브리드 추진시스템은 안전성 및 경제성 등을 비롯하여 다양한 장점이 있지만, 고체 추진시스템과 비교하면 낮은 후퇴율을 갖는 단점이 있다[1]. 고체 및 하이브리드 추진시스템에서 후퇴율(\dot{r})은 단위 면적 및 단위 시간당 연료가 수직으로 타들어 가는 연소율($\dot{\rho}r$)을 의미하며 후퇴율이 낮다는 것은 추진성능 또한 떨어진다는 것을 의미한다[2]. 이러한 문제점을 극복하기 위해 연소되는 연료의 표면적을 증가시키거나 연료로의 열전달량을 증가시키기 위한 추가적인 장치를 삽입하는 등 다양한 연구가 수행되었다[3,4]. 그러나 해당 연구들은 후퇴율 증가의 분명한 한계가 존재할 뿐 아니라 연료의 체적과 구조물 중량 증가 등의 단점이 있어 근본적인 해결책이 될 수 없다. 따라서 최근에는 직접적인 접근방법으로 고 후퇴율 연료 개발을 위한 연구가 수행되고 있다[5-8].

최근 가장 활발히 연구되고 있는 연료는 파라핀 기반 연료로, 동일 산화제 유속에서 고체 복합 추진제의 바인더(binder)로 종종 사용되는 HTPB (Hydroxyl Terminated Poly-Butadiene) 대비 3-4 배 높은 후퇴율을 가진다[7]. 또한, 소수성의 성질을 가지고 있어 알루미늄과 같이 연소 효율과 후퇴율을 증가시킬 수 있는 친수성 고에너지 입자의 첨가가 쉽다. 이에 파라핀 연료와 고에너지 입자의 장점을 극대화하기 위해 이들을 혼합한 신개념 연료에 관한 연구가 국외에서 활발히 수행되고 있다[9,10]. 첨가물이 함유된 파라핀 기반 연료의 후퇴율 특성에 관한 연구[11,12]는 종종 보고되고 있으나 파라핀 기반 연료의 점도에 관하여 수행된 연구[13,14]는 순수 파라핀 연료 및 카본블랙(carbon black)과 동종 계열 물질을 첨가한 연료에 국한되어 있으며 고에너지 물질이 첨가된 연료의 점도에 관한 연구는 극히 드문 편이다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 입자의 첨가가 파라핀/알루미늄 혼합연료의 유변학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 점도 측정시험을 수행하였다. 순수 파라핀과 나노 및 마이크로 알루미늄 입자를 첨가한 시료를 제작하여 알루미늄 입자 첨가로 인해 발생하는 유변학적 차이를 확인하였으며, 첨가된 입자의 크기와 함유비가 혼합 연료의 유변학적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

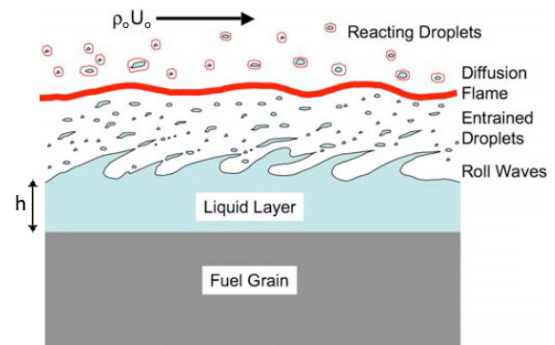


Fig. 1 Hybrid combustion mechanism of paraffin fuel[5].

2. 파라핀 연료의 하이브리드 연소 메커니즘

파라핀 기반 연료의 높은 후퇴율은 파라핀 고유의 연소 메커니즘에 기인한다. Fig. 1은 하이브리드 로켓 연소실 내 파라핀 연료의 연소 원리를 개략적으로 나타낸 것으로서, 연소 중 고체 연료 표면에 형성된 액막(liquid layer)이 고속의 산화제 유속($\rho_o U_o$)으로 인해 액적(droplet) 형태로 화염 및 산화제 유동 방향으로 유입(entrainment)되는 것을 확인할 수 있다[5].

HTPB, PP(Poly-Propylene), PE(Poly-Ethylene) 등 폴리머계 연료를 사용하는 일반적인 하이브리드 추진시스템의 연소는 열 분해된 연료의 물질 전달률(mass transfer rate)이 연료 표면의 기화 후퇴율에 전적으로 의존하는 반면, 파라핀 기반 연료는 표면에서 발생하는 기화 후퇴율과 더불어 액적의 비산에 의한 유입 후퇴율이 추가로 발생하게 된다.

이를 식으로 표현하면 Eq. 1과 같으며 \dot{m}_t 은 연소 중 연료 표면으로부터 반응(reactive) 영역으로 전달되는 연료의 총량을 나타내며 총 후퇴율(overall regression rate)과 연계된다. 또한, \dot{m}_v 와 \dot{m}_e 는 각각 기화 후퇴율과 유입 후퇴율에 의한 물질 전달률을 나타낸다[15].

$$\dot{m}_t = \dot{m}_v + \dot{m}_e \quad (1)$$

Karabeyoglu et al.[7]에 따르면 파라핀 연료의 액막에서 발생하는 액적 유입률 \dot{m}_e 는 상관관계식(empirical correlation)인 Eq. 2와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{m}_e \propto \frac{P_d^\alpha h^\beta}{\mu_l^\gamma \sigma^\pi} \quad (2)$$

식에서 P_d 와 h 는 각각 연소실의 동압과 연소 중 연료 표면의 파라핀 액막 두께를 의미하며 μ_l 와 σ 는 각각 액체상태 연료의 점도와 표면장력을 나타낸다. Eq. 2에서 지수 항인 $\alpha, \beta, \gamma, \pi$

Table 1. Empirical exponents for entrainment terms.

References	α	β	γ	π
Gater and L'Ecuyer[16]	1.5	2	1	1
Nigmatulin et al.[17]	1	1	-	-
Karabeyoglu[7]	1-1.5	-	$> \pi$	$< \gamma$

값을 통해 각 파라미터가 액적 유입량에 미치는 영향의 상관관계를 유추할 수 있다.

파라핀 기반 연료의 물질전달 특성을 이해하기 위해 Eq. 2 각 지수의 절대 및 상대 값을 도출하기 위한 연구들이 수행되었으며 수행된 연구 결과들을 정리하면 Table 1과 같다.

분자의 지수항인 α, β 는 1에서 2사이 값을 갖지만, 분모의 지수항인 γ 와 π 값은 비교적 작은 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 분자에 포함된 항들은 연소 중의 작동 변수로서 때에 따라 그 값이 상이한 반면, 분모에 포함된 항들은 연료의 물성이기 때문에 항상 일정한 값을 가진다. 따라서 연료의 점도와 표면장력은 연소 조건과 관계 없이 연료의 후퇴율 및 액적 유입량을 결정하는 중요한 변수라 할 수 있다.

또한, 선행 연구 결과[15]에 따르면 점도의 지수인 γ 가 표면장력의 지수항인 π 보다 항상 크거나 같은 값을 갖는 것으로 보고되고 있다. 이러한 사실을 바탕으로 점도가 연료의 액적 유입량에 미치는 영향이 표면장력의 그것에 비해 상대적으로 크다는 사실을 확인할 수 있다. 따라서 파라핀 기반 연료의 연구 및 개발에 있어 점도에 관한 연구는 필수적이며 이는 후퇴율에 직접 영향을 미치는 액적 유입 후퇴율의 예측에 직결된다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 점도 측정용 파라핀/알루미늄 시료

점도 측정용 시료에 첨가한 나노 및 마이크로 알루미늄 입자의 평균 입도 크기는 각각 100 nm, 8 μ m 였으며, 시료 제작용 파라핀 왁스로는 Sasol사의 Sasol 0907을 선정하였다. 첨가된

알루미늄 입자의 크기 변화와 함유비 변화에 따른 점도 변화를 관찰하기 위하여 순수파라핀 시료와 알루미늄 크기별로 함유비가 다른 시료를 제작하였다. 나노 알루미늄 첨가 시료는 순수파라핀 대비 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%의 입자 함유비를 갖도록 제작하였으며 마이크로 알루미늄 첨가 시료는 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%의 입자 함유비로 제작하였다. 나노 알루미늄 입자의 함유비는 선행 연구[9]를 바탕으로 결정하였으며 마이크로 알루미늄 입자는 경화 과정 중 침전을 고려하여 입자의 최대 함유비를 15 wt%로 제한하였다.

점도 측정용 시료는 일정한 온도로 가열하여 녹인 파라핀에 알루미늄 입자를 첨가 후 혼합하여 제작하였으며, 연소시험에 사용 예정인 고체 연료는 용융상태의 혼합물을 실리콘 몰드에 주입하여 경화하는 과정을 통해 제작하였다. 경화 과정 중, 입자의 침전을 최소화하기 위해 Sasol 0907의 용융점 부근인 80°C에서 교반을 수행하였으며, 더욱 균일한 혼합을 위해 임펠러(impeller)형 혼합기를 사용하여 충분한 시간 동안 교반하였다.

3.2 점도 측정 조건

제작된 파라핀/알루미늄 시료에 대한 유변학적 특성파악을 위한 점도 측정은 TA Instrument사의 회전형 레오미터인 DHR-1을 이용하여 110°C의 온도 조건에서 수행되었으며 높은 점도의 시료에 적합한 cone and plate 타입을 사용하였다. Fig. 2는 회전형 레오미터 종류를 나타내며 자세한 측정 조건은 Table 2와 같다.

4. 실험결과

나노 및 마이크로 알루미늄 입자가 첨가된 파라핀/알루미늄 시료의 최대 전단율 1000 /s에서의 점도 측정 시험 결과는 Table 3과 같다. 이는 고체 연료 표면 위의 액막에 가해지는 산화제 유속의 전단율을 대표하기 위한 차수(order of magnitude)로서 임의로 선정하였다. 순수 파라

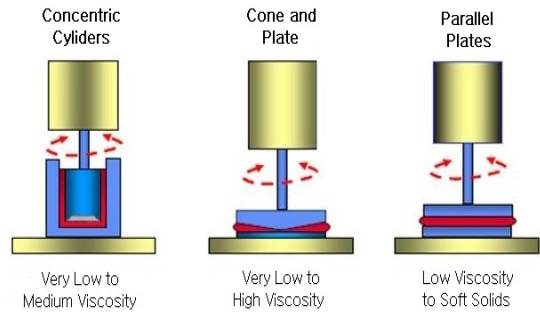


Fig. 2 Types of rotational rheometer[18].

Table 2. Viscosity measurement environment with rotational rheometer.

Measuring Temperature	110°C
Minimum Torque Vibration	10 nN·m
Maximum Torque	150 nN·m
Measuring Geometry	25 mm plate
Measuring Gap	1.0 mm
Shear rate	0.1~1300 /s

핀의 점도는 9.52 mPa·s로서 시료 중 가장 낮은 점도를 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 예상대로 알루미늄 입자 함유비가 증가할수록 점도가 증가하는 효과를 나타내었다.

나노 알루미늄 입자가 첨가된 시료는 입자 함유비가 10 wt%, 20 wt%, 30 wt%인 경우, 시료의 점도가 각각 12.04 mPa·s, 29.25 mPa·s, 72.03 mPa·s로 측정되어 순수파라핀 대비 점도가 약 30%, 216%, 682% 증가하였다.

반면, 앞서 언급한 바와 같이 마이크로 알루미늄 입자가 첨가된 시료는 입자 함유비가 5 wt%, 10 wt% 그리고 입자 침전이 발생하기 직전인 15 wt% 까지만 고려하였으며, 시료의 점도는 각각 10.88 mPa·s, 10.55 mPa·s, 13.99 mPa·s로 측정되어 순수파라핀 대비 약 17%, 13%, 51%의 점도증가만을 나타내었다.

Fig. 3은 나노 알루미늄 입자가 첨가된 시료의 점도 측정 결과로서 전단율 변화에 따른 점도의 변화를 나타내고 있다. 함유비 10 wt%의 경우

Table 3. Measured viscosities of samples at the maximum shear rate (1000 /s).

Specimen	Shear rate(/s)	Viscosity(mPa·s)
Pure Paraffin	1000.06	9.52
Nano 10 wt%	1000.05	12.04
Nano 20 wt%	999.84	29.25
Nano 30 wt%	1000.04	72.03
Micro 5 wt%	999.93	10.88
Micro 10 wt%	999.94	10.55
Micro 15 wt%	1000.07	13.99

순수파라핀과 마찬가지로 뉴턴유체의 거동을 보이나, 입자 함유비가 20 wt% 이상인 경우 전단율이 증가함에 따라 점도가 감소하는 전단박화 (shear thinning) 현상을 보이므로 일정량 이상의 나노 알루미늄 입자 첨가는 파라핀/알루미늄 혼합 연료의 비뉴턴 유체(non-newtonian fluid) 거동을 유발하는 것으로 사료된다.

Fig. 4는 마이크로 알루미늄 입자가 첨가된 시료들의 전단을 변화에 따른 점도 측정 결과를 나타내며 나노 알루미늄 입자 첨가 시료들과 마찬가지로 입자 함유비가 가장 큰 시료(15 wt%)가 가장 높은 점도 값을 나타내었으나 비뉴턴 유체의 경향은 발현되지 않았다.

나노 입자가 첨가된 시료와 달리 최대 점도 증가량이 50%(micro 15 wt%) 내외에 불과해 216%(nano 20 wt%) 또는 682%(nano 30 wt%) 점도 증가를 나타낸 나노 입자 첨가 연료 대비 상대적으로 크게 낮은 점도 상승률이 관찰되었다. 이는 참고문헌[19]과 유사한 패턴으로써, 본 실험의 측정치들이 검증되었음을 알 수 있었다.

시료에 첨가된 알루미늄 입자 크기 변화에 따른 점도 변화 특성을 알아보기 위해 순수파라핀 시료와 나노 및 마이크로 알루미늄 입자 함유비가 10 wt%로 같은 시료들의 점도 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다.

전단을 40 /s 이후 측정된 10 wt% 시료의 점도 값 차이가 본 연구의 전체 측정치 대비 대체로 유사한 값을 나타냄을 알 수 있었으며 이는 함유비 10 wt% 근방을 기준으로 점도가 입자크

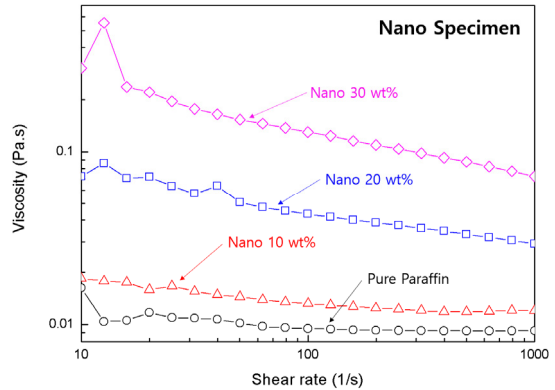


Fig. 3 Shear rate-viscosity graph of nano aluminized paraffin samples.

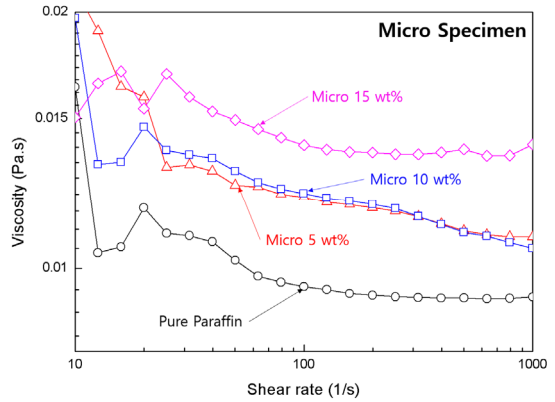


Fig. 4 Shear rate-viscosity graph of micro aluminized paraffin specimens.

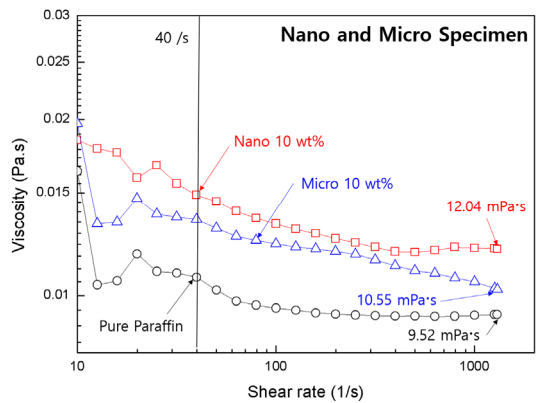


Fig. 5 Viscosity comparison of pure, nano 10 wt% and micro 10 wt% aluminized paraffin specimens.

기에 민감하게 반응하는 경계임을 암시한다. Table 3, Fig. 4, Fig. 5에 나타나 있는 나노 10 wt%, 마이크로 5 wt%, 마이크로 10 wt% 간의 변화폭이 14%(@ 1000 /s) 내외임을 통해 즉, 타 함유비 대비 변화폭이 상대적으로 작은 것을 통해 위와 같이 판단하였다.

Fig. 6은 보다 정량적인 평가를 위해 10 wt% 입자 함유비를 갖는 두 시료의 점도 차이를 나노 알루미늄 입자 시료 기준 백분율로 나타낸 것이다. 초기 측정구간에 해당되는 30 /s 이하의 전단율 구간을 제외하면 나노 알루미늄 첨가 시료의 점도가 마이크로 알루미늄 첨가 시료와 비교해 약 5%에서 15% 내외로 높은 값을 나타내는 것을 확인할 수 있으며 Table 3으로부터 도출된 14% 변화폭과 유사함을 알 수 있다. 이를 토대로 알루미늄 입자의 함유비 10 wt%를 경계로 점도 증가율 패턴이 구분되는 것으로 판단된다.

이는 입자가 첨가된 뉴턴 유체의 경우 유변학적 특성에 지배적인 영향을 미치는 것은 첨가된 입자의 부피의 비이며 입자의 크기가 미치는 영향은 상대적으로 미비하다는 기존 연구 내용과 부합한다[20]. 본 연구의 나노 및 마이크로 10 wt%에 해당하는 파라핀/알루미늄 혼합시료의 부피의 비는 $\phi = 0.038$ 로서 semi-dilute regime ($\phi \leq 0.25$)에 해당되는 뉴턴유체 경향과도 일치함을 알 수 있다.

Fig. 7은 연소실험을 통해 현재까지 확보된 나노 5 wt% 및 마이크로 5 wt% 파라핀/알루미늄 혼합 연료들의 총 후퇴율 변화를 산화제 유속에 대해 나타낸 결과이다. 높은 알루미늄 함유비 (15 wt% 이상)에 대한 연소실험 결과 부재로 인해 우선 5 wt% 결과만을 도식화하였다.

마이크로 크기 첨가 연료의 상대적으로 높은 (순수파라핀 연료 대비) 총 후퇴율은 마이크로 알루미늄에 의해 기화 후퇴율이 증가한 것으로 사료된다. 반면, 나노 첨가 연료의 총 후퇴율이 순수파라핀의 총 후퇴율 보다 낮은 것은 순수파라핀의 점도보다 나노 첨가 연료의 점도가 높기 때문에 순수파라핀의 유입 후퇴율 대비 나노 첨가 연료의 낮아진 유입 후퇴율에 기인한다고 판

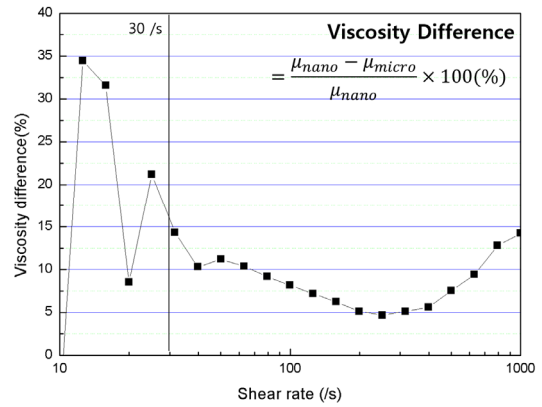


Fig. 6 Viscosity difference of nano and micro aluminized paraffin specimens.

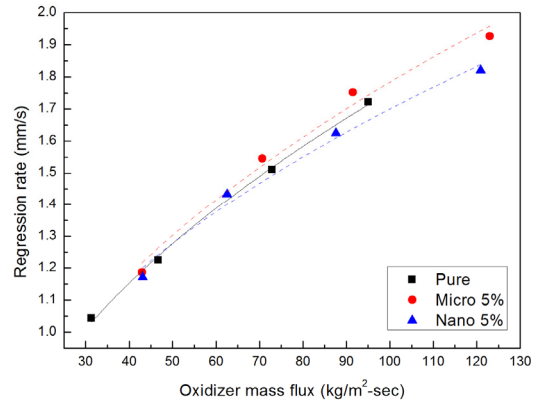


Fig. 7 Comparison of overall regression rate with oxidizer mass flux.

단된다. 나노 입자 연소가 일부 발현되었다 해도 나노 첨가 연료의 기화 후퇴율이 마이크로 첨가 연료 기화 후퇴율보다 낮기에 나노 입자 연소에 의한 영향은 미미한 것으로 사료된다. 이는 Fig. 3과 Fig. 4의 입자 함유비 10 wt% 이하 시료들의 점도값 차이가 크지 않아 나노 및 마이크로 입자 첨가시의 유입 후퇴율들 간 차이가 크지 않다고 가정을 했을 경우에 해당된다. 따라서 나노 크기 입자를 10 wt% 이상으로 과다하게 첨가할 경우 높은 점도로 인한 유입 후퇴율의 큰 감소를 유발시켜 총 후퇴율을 크게 저하시킬 수 있다. 이와 대비해 마이크로 크기 입자를 과다하게 첨가할 경우에는 마이크로 알루미늄에 의한 기화 후퇴율의 증가와 유입 후퇴율의 감소,

두 현상에 의해 총 후퇴율이 결정될 것으로 사료된다.

이 모든 각론에 대한 검증은 높은 알루미늄 함유비(15 wt% 이상) 연료에 대한 후퇴율 실험 진행 후 밝혀질 것으로 관측된다.

5. 결 론

본 연구에서는 하이브리드 추진시스템용 파라핀/알루미늄 혼합 연료의 알루미늄 입자 크기 변화 및 함유비 변화에 따른 유변학적 특성과 아울러 점도 측정 측정실험을 수행하였다.

나노 알루미늄 입자를 첨가한 시료는 입자의 함유비가 10 wt%, 20 wt%, 30wt%일 때 점도가 순수 파라핀 대비 30%, 216%, 682% 증가하여 나노 알루미늄 함유비 증가에 따른 점도 증가폭이 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한, 함유비가 20 wt% 이상인 경우 전단박화 현상이 발생함을 확인하였으며, 이를 토대로 나노 알루미늄이 일정량 이상 첨가된 경우 파라핀/알루미늄 혼합 연료를 비뉴턴 유체로 고려해야 할 것으로 판단된다. 마이크로 알루미늄 입자를 혼합한 시료는 입자의 함유비가 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%일 때 점도가 순수파라핀 대비 17%, 13%, 51% 정도 증가하여 나노 입자 첨가 대비 증가폭이 미미하였다. 또한, 10 wt%로 동일한 입자 함유비를 갖는 시료는 입자의 크기에 관계없이 유사한 값을 나타내었으며 10 wt%를 경계로 입자 첨가에 따른 점도 변화 패턴이 구분되는 것을 확인하였다. 이러한 점도측정 결과는 선행 연구들과 일치하는 양상을 보였으며 이를 통해 실험의 측정값이 신뢰할 수 있는 결과임을 알 수 있다.

알루미늄 입자 첨가에 의한 연료의 점도 변화가 연료의 유입 후퇴율 및 총 후퇴율에 미치는 영향을 파악하기 위해 기 수행된 연소시험 결과와 비교하였다. 점도 측정결과와 연소시험 결과의 연관성을 확인할 수 있었으나, 보다 분명한 결론 도출을 위해서는 15 wt% 이상의 높은 알루미늄 입자가 함유된 연료에 대한 연소시험 결과가 요구된다.

추후, 마이크로 알루미늄 입자 침전을 최소화할 수 있는 방안을 마련하여, 나노 알루미늄 첨가 시료와 동일한 함유비를 갖는 마이크로 알루미늄 첨가 시료를 제작하여 점도 측정을 통해 첨가된 입자의 크기에 따른 점도 변화를 명확히 파악할 계획이다. 더불어, 높은 입자 함유비를 갖는 연료에 대한 연소시험을 수행하여 알루미늄 입자 첨가가 연료의 유입 후퇴율 및 총 후퇴율에 미치는 영향을 분석할 예정이다.

후 기

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

References

1. Sutton, G.P., *Rocket Propulsion Elements*, 8th edition, John Wiley and Sons Inc., Hoboken, N.J., U.S.A., Ch. 16, 2010.
2. Humble, R.W. and Henry, W.L., *Space Propulsion Analysis and Design*, 1st edition, McGraw-Hill, Ashland, O.R., U.S.A., Ch. 7, 1995.
3. Kim, S.J., Lee, J.P., Moon, H.J., Kim, J.K., Sung, H.G. and Kwon, O.C., "Regression Characteristics of the Cylindrical Multiport Grain in Hybrid Rockets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 29, No. 3, pp. 573-581, 2013.
4. Ryu, S.H., Oh, J.S., Moon, K.H., Kim, H.C., Moon, H.J. and Kim, J.K., "Effect of Diaphragm Thickness on Regression Rate Improvement in Hybrid Rocket Motor," *The Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1-5, 2015.
5. Cantwell, B., Karabeyoglu, A. and Altman,

- D., "Recent Advances in Hybrid Propulsion," *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, Vol. 9, No. 4, pp. 305-326, 2010.
6. Lee, J.P., Kim, S.J., Kim, J.K. and Moon, H.J., "Mass Transfer Number Sensitivity on the Fuel Burning Rate in Hybrid Rockets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 4, pp. 1041-1050, 2015.
 7. Karabeyoglu, M.A., Altman, D. and Cantwell, B.J., "Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 3, pp. 610-620, 2002.
 8. Kim, S.J., Moon, H.J. and Kim, J.K., "Evaluation of Paraffin-Polyethylene Blends as Novel Solid Fuel for Hybrid Rockets," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 31, No. 6, pp. 1750-1760, 2015.
 9. Larson, D.B., "Formulation and Characterization of Paraffin-Based Solid Fuels Containing Novel Additives for Use in Hybrid Rocket Motors," Master's Dissertation, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Pennsylvania University, Philadelphia, P.A., U.S.A., 2012.
 10. Arnold, D.M., "Formulation and Characterization of Paraffin-Based Solid Fuels Containing Swirl Inducing Grain Geometry and/or Energetic Additives," Master's Dissertation, Department of Mechanical and Nuclear Engineering, Pennsylvania University, Philadelphia, P.A., U.S.A., 2012.
 11. Larson, B.D., Boyer, E., Wachs, T., Kuo, K. K., DeSain, J.D., Curtiss, T.J. and Brady, B.B., "Characterization of the Performance of Paraffin/ LiAlH_4 solid fuels in a Hybrid Rocket System," *Joint Propulsion Conferences, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, San Diego, C.A., U.S.A., AIAA 2011-5822, Jul. 2011.
 12. Booiocchi, M., Paravan, C., Dossi, S., Maggi, F., Colombo, G. and Galfetti, L., "Paraffin-based Fuels and Energetic Additives for Hybrid Rocket Propulsion," *AIAA Propulsion and Energy Forum, 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, Orlando, F.L., U.S.A., AIAA 2015-4042, 2015.
 13. Kim, S.J., Moon, H.J. and Kim, J.K., "Thermal Characterizations of The Paraffin Wax/Low Density Polyethylene Blends as a Solid Fuel," *Thermochimica Acta*, Vol. 613, No. 10, pp. 9-16, Aug. 2015.
 14. Galfetti, L., Merotto, L., Booiocchi, M., Maggi, F. and De Luca, L.T., "Ballistic and Rheological Characterization of Paraffin-Based Fuels for Hybrid Rocket Propulsion," *Joint Propulsion Conferences, 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, San Diego, C.A., U.S.A., AIAA 2011-5680, 2011.
 15. Kobald, M., Toson E., Ciezki H., Schlechtriem, S., Beatta, Coppola, S.M. and De Luca, L.T., "Rheological, Optical and Ballistic Investigations of Paraffin-Based Fuels for Hybrid Rocket Propulsion Using a 2D Slab-Burner," *Progress in Propulsion Physics*, Vol. 8, pp. 263-282, 2016
 16. Gater, R.A. and L'Ecuyer, M.R.L., "A Fundamental Investigation of the Phenomena that Characterize Liquid Film Cooling," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 13, No. 12, pp. 1925-1939, 1970.
 17. Nigmatulin, R., Nigmatulin, B., Khodzaev, Y.A. and Kroshilin, V., "Entrainment and Deposition Rates in a Dispersed-Film Flow," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 22, No. 1, pp. 19-30, 1996.
 18. "Cone and Plate Type Rotational Rheometer," retrieved 10 Nov. 2017 from

- <http://polymerinnovationblog.com/rheology-thermosets-part-2-rheometers>.
19. Dermanci, O. and Karabeyoglu, A., "Effect of Nano particle Addition on the Regression Rate of Liquefying Fuels," Propulsion and Energy Forum, *AIAA Propulsion and Energy Forum*, 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Orlando, F.L., U.S.A, AIAA 2015-4139, 2015.
20. Mueller, S., Llewelin, E.W. and Mader, H.M., "The Rheology of Suspensions of Solid Particles," *The Royal Society*, Vol. 466, No. 2116, pp. 1201-1228, 2010.