

알루미늄 나노입자 첨가량에 따른 케로신 젤의 유변학적 특성 변화

김시진* · 한승주* · 김진곤** · 강태곤** · 문희장**†

Rheological Properties Investigation of Kerosene gels with Nano-Aluminum Particles

Sijin Kim* · Seongjoo Han* · Jinkon Kim** · Teagon Kang** · Heejang Moon**†

ABSTRACT

In this study, the rheological characteristics of kerosene based gel propellants were investigated. For the gelling agent, Thixatrol[®] has been used with 100 nm nano-sized aluminium particle addition. Three gellant contents of 2.5 wt%, 5 wt% and 7.5 wt% kerosene gels were first investigated where aluminium particles contents of 10 wt% and 20 wt% were added to 7.5 wt% gellant case. The viscosities of each sample measured by rotational rheometer show that the viscosity augments as gellant or aluminium content increases while the 20 wt% aluminum content resulted in failure of measurement due to the agglomerations of aluminum particles.

초 록

본 연구에서는 젤화제 Thixatrol[®] 및 100 nm 크기의 알루미늄 입자 첨가량에 따른 케로신 기반 젤 추진제를 제작하여 유변학적 특성을 파악하였다. 케로신 젤 추진제는 젤화제 첨가량 2.5 wt%, 5 wt%, 7.5 wt%의 세 가지 젤을 제작하였으며, 알루미늄이 첨가된 젤은 젤화제 7.5 wt%를 기반으로 입자 첨가량 10 wt%와 20 wt%의 두 가지 블렌딩 알루미늄 젤을 분석하였다. 회전형 rheometer를 이용하여 각 시료의 점도를 측정된 결과, 젤화제 첨가량 증가 및 알루미늄 입자 증가에 따라 점도 값이 정성적으로 증가하는 경향을 보였다. 그러나 20 wt%의 높은 금속입자 함유 젤의 경우, 입자간 응집, 고형화로 인해 낮은 전단변형을 구간에서 조차 측정 신뢰도가 낮아 회전형이 아닌 모세관 또는 다양한 방식의 점도계 활용이 요구된다.

Key Words: Gel Propellant(젤 추진제), Nano-sized Aluminum Particle(나노 알루미늄 입자), Kerosene(케로신), Rheological Characteristic(유변학적 특성)

1. 서 론

젤 추진제는 액체 추진제를 기반으로 젤화제를 첨가하여 제작된 젤리 형태의 추진제로서 가

해지는 전단력에 따라 점도 및 탄성이 변화하는 비선형 점탄성의 특성을 갖는다. 더불어 젤 추진제는 높은 점도로 인해 보관 시 낮은 유동성을 지닌다. 이러한 특성으로 인해 액체 연료에 비해 누설의 위험성이 낮다는 장점과 함께 독성이 낮으며 친환경적이고 추진제의 손상에 비교적 안전하다는 장점을 갖는다. 또한 용이한 유량조절 특성을 이용하여 램제트 엔진, 지능형 전략 미사일, 차세대 발사체 부스터, 수직 이착륙기, 1단계도 진입 비행체 등 다양한 추진 시스템에 적용할 수 있다[1, 2].

액체 추진제 및 슬러리와 같은 추진제는 알루미늄, 보론 등의 고 에너지를 지닌 금속 입자를 첨가하여 추진제의 성능을 크게 향상시킬 수 있다. 그러나 입자 첨가의 영향으로 슬러리 연료 등에서는 금속 입자의 침전, 복잡한 연소 메커니즘 및 상승된 가속도에 따른 불안정 등의 문제가 발생한다[3].

반면, 젤 추진제는 젤의 높은 점도 특성으로 금속 입자 첨가 및 분산이 용이하고 이를 통해 밀도비추력을 높이기 수월하다. 그러나 나노 및 마이크로 금속입자의 혼합으로 기존 뉴턴 유체의 열적 특성과는 전혀 다른 특성을 나타내며 분무 조건의 변화에 따라 점도가 변화하기 때문에 분무 및 액주의 분열에 관한 고유 특성을 파악해야 한다. 이에, 독일의 Bayern-Chemie, German Aerospace Center(DLR) 및 이스라엘의 Technion 등에서는 다양한 종류의 젤 추진제 내에 금속입자를 첨가하여 연소 효율 향상에 관한 연구를 활발하게 수행하고 있다[2-5].



Fig. 1 Hot firing Test using Gel Fuel[4].

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

현재 국내에서는 모사젤 추진제 내 입자 첨가에 따른 관내 유동, 유변학 및 분무 특성 등의 연구[6]와 함께 케로신 젤 추진제의 젤화제 첨가량에 따른 유변학적 특성 등이 연구되었다[7]. 그러나 실제 젤 추진제 내 금속입자 첨가에 따른 유변학, 분무특성 및 연소 특성에 관한 연구가 미비하다. 따라서 본 연구에서는 금속입자가 첨가된 실제 젤 추진제의 연소에 앞서 나노 알루미늄 입자 첨가에 따른 케로신 젤 추진제의 유변학적 변화를 파악하여 추후 진행 예정인 분무 및 연소 실험의 기초 데이터베이스 구축을 목표로 하였다.

2. 젤 추진제 제작

2.1 젤 추진제의 구성

본 연구에 사용된 젤 추진제는 기반 유체(base fluid)로 S-OIL사의 등유, 젤화제로는 Elementis사의 Thixatrol[®]을 이용하여 제작하였으며 첨가된 금속입자는 100 nm 크기의 알루미늄 입자를 사용하였다. 사용된 젤화제의 물성치는 Table 1 과 같다.

Table 1. Physical properties of gellant.

Composition	organically modified castor oil derivative
Color / Form	white / finely divided powder
Density	1.02 g/cm ³
Incorporation temperature	Aliphatic systems: 63~74 °C Aromatic systems: 38~54 °C

$$wt\% = \frac{m_{gellant \text{ or } particles}}{m_{fuel} + m_{gellant} (+ m_{particles})} \quad (1)$$

젤 추진제의 혼합 비율은 Eq. 1을 기초로 하여 기반 유체 질량 대비 2.5 wt%, 5 wt%, 7.5 wt%의 비율로 젤화제를 첨가하였고 알루미늄 입자는 7.5 wt%의 젤 추진제를 기반으로 10

wt%, 20 wt%의 비율로 첨가하여 젤 추진제를 교반 및 제작하였으며 시료별 함량을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Contents of kerosene gel propellant.

	wt%		
	Kerosene	Gellant	Aluminium
KS*2.5	97.5	2.5	-
KS5	95	5	-
KS7.5	92.5	7.5	-
KS7.5 Al**10	82.5	7.5	10
KS7.5 Al20	72.5	7.5	20

*Kerosene thixatrol ST **Aluminium particles

2.2 젤 추진제의 교반

젤 추진제의 교반은 젤화제의 반응 시간을 고려하여 60분간 진행하였으며 알루미늄 입자는 금속 입자와 케로신 간의 반응을 방지하기 위하여 인화점 아래의 온도에서 추가적으로 60분간 교반을 수행하였다. 제작된 젤 추진제는 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다.

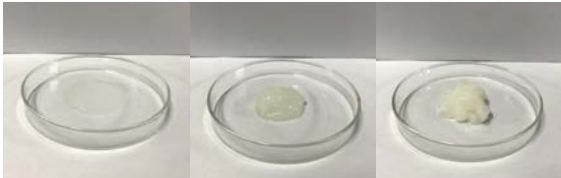


Fig. 2 Kerosene gel wrt gellant addition (left: 2.5 wt%, middle: 5 wt%, right: 7.5 wt%).



Fig. 3 Kerosene gel wrt metal particles addition (left: 10 wt%, right: 20 wt%).

3. 젤 추진제의 유변학적 특성

3.1 젤 추진제의 점도 모델 선정

비뉴턴 유체의 유변학적 특성을 갖는 젤 추진제는 전단변형률에 따라 점도의 값이 크게 달라진다. 비뉴턴 유체 개개의 유변학적 특성 상 여러 구성모델이 존재하며, 점도모델 중 젤 추진제에 일반적으로 사용되는 모델은 Power -Law 모델(PL 모델), Herschel-Bulkley 모델(HB 모델)이 있다. 이 때 PL 모델과 HB 모델의 차이는 유체의 항복응력의 존재 여부이다. PL 모델에 따른 점도 및 전단력의 식은 Eq. 2, 3과 같이 표현되며 HB 모델은 항복응력을 고려한 모델로써 Eq. 4, 5와 같이 나타낸다. 이 때 η 는 겔보기 점성계수(apparent viscosity), $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률(shear rate), K 는 컨시스턴시 상수(consistency index) 및 τ_0 는 항복응력(yield stress)을 나타내며 n 은 유동지수(flow number)를 의미한다.

$$\eta_{PL} = K \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} = K \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2)$$

$$\tau_{PL} = \eta_{PL} \frac{du}{dy} = \eta_{PL} \dot{\gamma} = K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

$$\eta_{HB} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (4)$$

$$\tau_{HB} = \eta_{HB} \dot{\gamma} = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (5)$$

3.2 점도 측정 방법

제작된 젤 추진제의 점도 측정은 한국고분자시험 연구소에 의뢰하여 진행되었다. 측정 장비는 TA instruments사의 Discovery HR-1를 이용하였다. 또한 케로신 젤 추진제의 경우 온도 변화에 따라 점도가 달라지며 본 연구에서는 상온 25°C에서 분석을 수행하였다[7].

3.3 측정 결과

본 연구에서 제작된 젤 추진제의 점도를 측정

하여 PL 모델과 HB 모델에 대하여 적합성을 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. 그래프에 따르면 제작된 젤에는 항복응력이 존재하지 않았고 따라서 PL 모델이 케로신 젤 추진제의 점도 모델로 적합하다고 볼 수 있다.

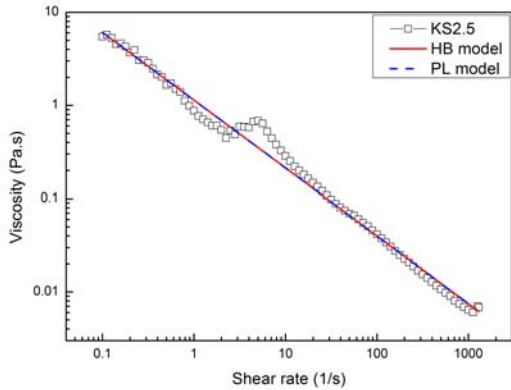


Fig. 4 Comparisons of constitutive non-newtonian models

Table 3. Viscosity index for PL model

	K	n
KS2.5	1.1378	0.2724
KS5	36.03849	0.13609
KS7.5	111.14113	0.18791
KS7.5_A110	346.58799	0.0157

적합성이 확인된 PL 모델을 기반으로 케로신 젤 추진제의 컨시스턴시 상수 및 유동지수를 계산하여 Table 3에 나타내었다. 또한 점도 측정 결과 젤화제 첨가량에 따른 점도의 변화 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

상온에서 케로신 젤 추진제는 전단변형을 증가에 따라 점도가 감소하는 전단박화 현상이 나타나며 젤화제의 함량 증가는 추진제의 점도를 점차 증가시킨다. 또한 실험 결과의 전단변형을 1~10 [1/s] 구간에서 모든 시료의 점도가 급격히 변화하는 것을 볼 수 있다. 변화의 원인은 실험 중 플레이트 사이에서 젤의 응집이 발생하여 순간적인 점도의 변화를 일으키는 것으로 판단되었으며 변화의 폭은 젤화제 첨가량 증가에 따라

점차 감소하는 것으로 확인되었다.

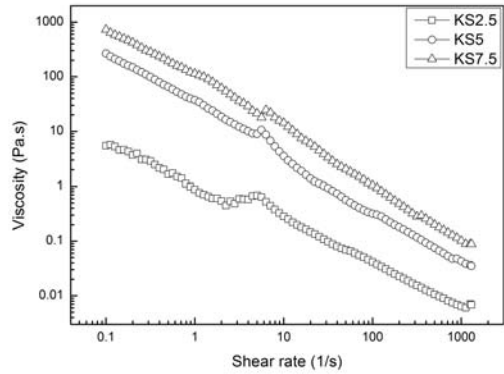


Fig. 5 Apparent viscosity variation wrt gellant contents

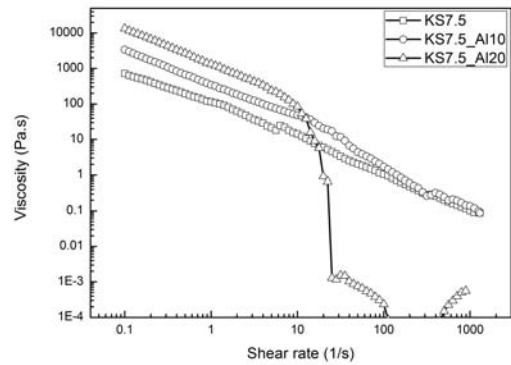


Fig. 6 Apparent viscosity variation for non-metal and metal additions

Fig. 6은 금속 입자 첨가에 따른 케로신 젤 추진제의 점도 변화를 나타내는 그래프이다. 금속 입자의 첨가로 1~10 [1/s] 구간에서의 급격한 점도 변화는 사라졌으며 낮은 전단변형을 구간에서 점도의 증가가 측정되었다. 반면, 20 wt% 입자를 첨가한 젤 추진제의 실험 결과는 10 [1/s] 이후의 구간에서 점도의 비정상적인 경향이 측정되었다. 측정 오류의 원인은 시료의 높은 점탄성 특징과 고형화로 측정 중 시료의 비산이 생겼거나 시료 내 금속입자의 응집에 의한 것으로 판단된다. 추후 다양한 방식의 점도 측정을 통해 20 wt% 및 5 wt%를 포함하여 보다 높은 함량

의 금속 입자 첨가에 대한 유변학적 기초 데이터를 확보할 예정이다.

4. 결 론

본 연구에서는 회전형 rheometer를 이용하여 케로신 기반 젤 추진제에 대한 젤화제 및 알루미늄 나노입자 첨가량에 따른 점도의 변화를 측정하였다. 측정 결과 젤화제 함량 증가에 따라 점도가 증가하며 전단변형률의 전 범위에서 전단박화의 경향을 나타내었다. 또한 금속 입자 첨가량에 따라 전단변형률이 낮은 구간에서는 입자 함유량 별 절대 점성의 차이가 뚜렷했으나 변형률이 증가할수록 입자를 첨가하지 않은 젤의 점도값으로 수렴하는 경향이 관찰되었다. 20 wt%의 금속 입자를 첨가한 젤 추진제는 10 [1/s] 이후의 구간에서 점도 측정값의 비정상적인 감소가 나타났으며 높은 점탄성 특성 및 시료의 고형화로 인한 장비 내의 비산 등을 원인으로 판단하였다.

추후 금속 입자를 첨가한 케로신 젤 추진제의 분무 및 연소 시험에 활용 예정인 데이터베이스 구축을 위해서는 고 점도 시료에 적합한 측정 방식을 파악하기 위한 연구가 추가적으로 요구된다.

후 기

“본 논문은 미래창조과학부의 지원(2015R1D1A1A09060189)을 받아 수행된 연구로서 지원에 감사드립니다.”

참 고 문 헌

1. Han, S.G., “Disintegration and Atomization behavior of Gel Propellant using Shear Coaxial injector,” Korea aerospace

university a master’s thesis, 2015

2. Hwang, T.G. Lee, I.C. and Koo, J.Y. "Research Trends of Spray and Combustion Characteristics Using a Gelled Propellant," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 15, No. 5, pp. 96-106, 2011.

3. Kampen, J.V., Alberio, F. and Ciezki, H.K., "Spray and combustion characteristics of aluminized gelled fuels with an impinging jet injector," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 11, Issue. 1, pp. 77-83, jan. 2007.

4. Kuznetsov, A., Solomon, Y. and Natas, B., "Development of a Lab-Scale Gel Fuel Ramjet Combustor," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA pp. 22-28, July. 2010

5. Palaszewski, B., "Metallized gelled propellants: oxygen/RP-1/aluminium rocket engine calorimeter heat transfer measurements and analysis," NASA TM-107495, 33rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Seattle, Washington, U.S.A, July, 1997.

6. Oh, J.S. and Moon, H.J., "Flow Characteristics Investigation of Gel Propellant with Al₂O₃ Nano Particles in a Curved Duct Channel," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 3, pp. 47-55, June, 2013.

7. Kim, K.H., Han, S.J., Pack, Y.H., Ko, S.H., Kim, J.K., Moon. H.j., "Rheological Characteristics of Kerosene Based Gel Propellant with Organic Gellant Content," the Korean Society of Propulsion Engineers conference, vol. 11, pp. 103-107, 2015.