

SiO₂ 젤화제를 첨가한 Jet A-1 젤 추진제의 특성 연구

김재우* · 전두성* · 문희장**†

Characteristics of Jet A-1 Gel Propellant with SiO₂ Gellants

Jaewoo Kim* · Doosung Jun* · Heejang Moon**†

ABSTRACT

This study investigates the rheological characteristics of SiO₂-Kerosene gel propellants with Aerosil® R972, Silica 230, Silica 530. Power-law rheological model is used to confirm whether or not gelification is achieved. It was found that the produced gel have shear-thinning effect, and that the viscosity of the gel propellants increases with increasing SiO₂ concentration. Among gellants used in this study, gel propellant with Aerosil® R972 fits most to the power law model as the shear rate increases. However, gels produced with Silica 230 and Silica 530 gellant deviate from the power law model when the shear rate regime is below 100 [1/s].

초 록

본 연구에서는 케로신 계열 액체 연료인 Jet A-1에 SiO₂계열의 젤화제인 Aerosil® R972, Silica 230, Silica 530을 첨가하여 젤 추진제를 제작하고 젤화 (gelification) 여부를 확인하기 위해 비 Newton 유체의 대표 모델인 power law model을 이용하였다. 본 연구에서 제작한 모든 젤 추진제는 전단박화 효과와 함께 젤화제의 함유량이 증가할수록 젤 추진제의 점도가 높게 형성됨을 확인하였다. Aerosil® R972를 첨가한 젤 추진제는 전단률 증가와 함께 점도가 power law model을 따르며 감소하는데 반해 Silica230과 Silica 530을 첨가한 젤 추진제는 전단률 100 [1/s] 이전 구간에 대해 power law model에 벗어남을 확인하였다.

Key Words: Gel Propellant(젤 추진제), Gellant(젤화제), Gelification(젤화), Power Law Model(멱법칙 모델), Shear Thinning effect(전단박화 효과)

1. 서 론

젤 추진제는 젤화제 첨가로 얻을 수 있는 액체와 고체의 중간 단계의 젤 형태의 연료 및 산화제이다. 젤 추진제는 액체 추진제의 고밀도 및 고

발열량의 장점과 함께 고체 추진제와 같이 높은 보관성을 지녀 고성능 추진 시스템에 활용될 수 있는 장점을 가지고 있다. 반면, 첨가되는 젤화제 양과 함께 증가되는 젤 추진제의 점도로 인한 유체 미립 분사의 문제점이 단점으로 존재한다.

젤 추진제 제작을 위해 첨가되는 젤화제는 탄소 성분의 유무에 따라 무기계 젤화제와 유기계 젤화제 2종류로 나뉜다. 본 연구에서 젤 추진제 제작을 위해 첨가한 SiO₂ 계열의 젤화제는 무기계 젤화제에 해당

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

되며, 젤 추진제의 에너지 밀도를 향상시키기 위해 알루미늄, 마그네슘과 같은 금속 첨가물을 젤 추진제에 첨가하여 제작하는 연구 등이 진행되고 있다[1].

젤 추진제 제작 관련 연구는 로켓 시스템에 사용되는 연료인 MMH(Monomethylhydrazine)와 산화제인 RFNA(Red Fuming Nitric Acid)와 같이 독성이 강한 추진제를 직접 젤로 제작하거나[2] 독성이 없고 취급이 용이한 물을 사용하여 실제 추진제와 유연학적 특성이 유사한 모사 젤 추진제를 제작하는 연구 등이 수행되어지고 있다[3].

젤 응용 관련 연구는 유체의 전단률이 증가함에 따라 점성이 감소하는 전단 박화 효과 (shear thinning effect)를 중점으로 이루어지고 있다 [2-5]. 복잡한 관과 다양한 오리피스 형상 및 수축 형상 인젝터를 통해 공급되는 젤 추진제의 액화 특성에 관한 수치해석적인 연구가 수행되고 있으며[6-7], 분무형 또는 충돌형 인젝터를 사용한 젤 추진제의 액적의 분열 및 미립화에 대한 실험적인 연구 또한 활발히 진행되고 있다[8].

최근에는 누설에 취약한 램제트 기관에 기밀성이 뛰어난 젤 추진제의 장점을 활용하기 위해 케로신 연료에 젤화제를 첨가하여 제작한 젤 추진제의 인젝터를 통한 공급 및 기초 연소 실험도 성공한 바 있다[9].

국내의 젤 추진제 관련 연구들은 대부분 모사 젤 추진제를 이용하였으며, 실제 케로신 연료를 사용한 국내 연구는 현재까지 알려진 바로는 미미하다. 따라서 본 연구에서는 케로신 계열의 항공용 연료인 Jet A-1에 SiO₂ 젤화제를 첨가하여 젤 추진제를 제작하였으며, 비 Newton 유체 여부를 판단하기 위해 측정된 유연학적 상태량을 기반으로 젤화 여부를 확인하였다.

2. 젤 추진제 제작 및 특성

2.1 Jet A-1/SiO₂ 젤 추진제의 제작

본 연구에서 젤 추진제 제작을 위해 첨가한 젤화제인 SiO₂의 입자 표면은 연료와 혼합 시 수소 결합을 형성하여 젤로 만들어 주는 역할을 한다. SiO₂가 첨가된 젤에 전단력을 가하게 되면 이 수소 결합이 약화되어 점성이 감소하게 된다. 동일 계열의 SiO₂는 제조 회사와 세부 특성에 따라 많은 종류가 있으나 본 연구에서는 Table 1의 3가지 젤화제를 사용하였다.

Table 1 Properties of Gellants










SiO ₂ Gelling Agent	Aerosil® R972	Silica 230	Silica 530
BET Surface area (m ² /g)	110 ± 20	310	230
tamped density (g/ml)	≈ 0.05	≈ 2.2	
pH	3.6~5.5	7.0	
Average particle length (m)	16×10 ⁻⁹	3.5×10 ⁻⁶	
Purity (% SiO ₂)	> 99.8	99.5	
Melting point (°C)	1710	> 1600	
Formula Weight	60.09		

Vortex mixer로 제작한 Jet A-1 젤 추진제의 유연학적 특성 연구를 위해 Eq. 1로 %wt를 계산하였으며, 본 연구에서 제작한 젤 추진제에 함유된 젤화제의 %wt는 2%, 5% 그리고 7% 이다.

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

Table 2는 본 연구를 위해 젤화제의 종류 및 %wt에 따라 제작된 젤 추진제를 나타내고 있다. 젤화제 Silica 530을 첨가한 젤 추진제가 다른 젤화제를 첨가한 젤 추진제에 비해 높은 점도를 가지는 것으로 확인하였으나, Silica 530 젤화제 7%wt를 첨가한 젤 추진제의 경우, 측정 범위를 벗어나는 높은 점도로 인해 본 연구에서 사용한 점도계로 측정이 불가하였다.

Table 2 Produced gel propellants

%wt	Aerosil® R972	Silica 230	Silica 530
2			
5			
7			

2.2 Jet A-1/SiO₂ 젤 추진제의 유연학적 특성

제작한 각각의 젤 추진제는 cone-plate 점도계

를 사용하여 물성치를 측정하였다. Figure 1, Fig. 2와 Fig. 3은 각각의 젤 추진제의 젤화 여부를 확인하기 위해 Newton 유체인 Jet A-1과 함께 전단률 범위 50~400 [1/s] 내에서 도식화한 유변학적 상태량 선도이다. 제작된 젤 추진제 모두 첨가된 젤화제의 함유량이 증가할수록 점도가 높게 나타났으며, 전단률이 증가할수록 점도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서 제작한 젤 추진제가 증가하는 변형률에 따라 겔보기 점성계수가 감소하는 전단 박화의 거동을 가지는 젤 고유의 특성을 따르는 것으로 판단된다.

Aerosil® R972를 첨가한 젤 추진제 (Fig. 1)는 전단률 증가와 함께 감소하는 점도가 power-law model을 따르는데 반해 Silica230 (Fig. 2)과 Silica 530 (Fig. 3)을 첨가한 젤 추진제는 전단률 100 [1/s] 이전 구간에 대해 power law model에 벗어나는 것을 볼 수 있다. 그러나 실제 인젝터의 작동범위가 전단율 10³ 이상의 구간임을 고려할 때, 전단율 100 [1/s] 이하의 데이터는 인젝터 작동범위를 벗어난다고 볼 수 있다. 따라서, 젤 추진제 점도 모델은 Ostwald and de Waele가 제시한 Eq. 2의 power law model을 이용하였으며, 겔보기 점성계수 η 는 Eq. 3을 따른다.

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (3)$$

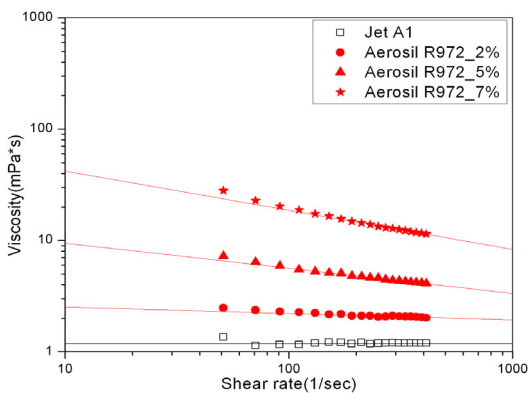


Fig. 1 Rheological data of Jet A-1 gel propellant with Aerosil® R972 gellants

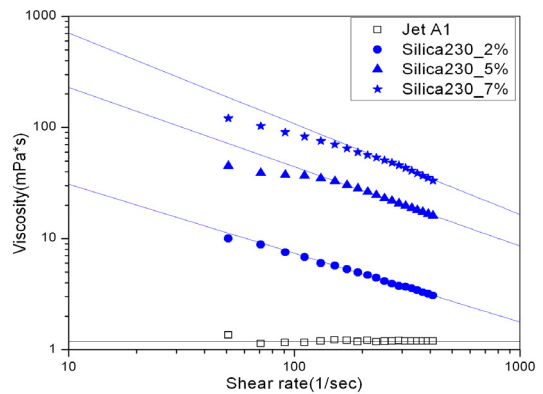


Fig. 2 Rheological data of Jet A-1 gel propellant with Silica 230 gellants

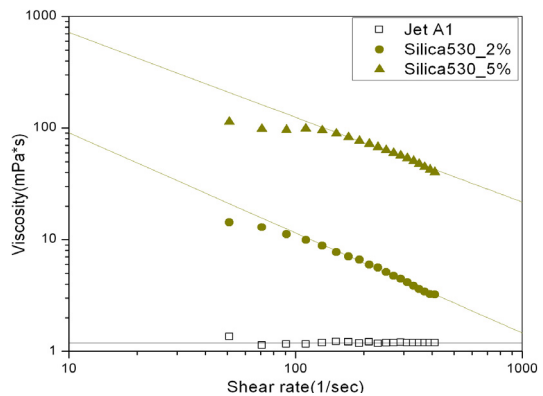


Fig. 3 Rheological data of Jet A-1 gel propellant with Silica 530 gellants

25°C 상에서 측정된 젤 추진제의 컨시스턴시 지수 K와 power law 지수 n을 정량화하기 위해 Silica 230과 Silica 530의 경우, 전단율 100[1/s] 이상 구간의 데이터를 이용하여 Table 3에 정리하

Table 3 Power law data of gel propellants

Gel Type	%wt	K	n
Jet A-1 /Aerosil® R972	2	2.8704	0.9429
	5	15.9021	0.7742
	7	93.8386	0.6492
Jet A-1 /Silica 230	2	128.2819	0.3802
	5	1187.3740	0.2861
	7	4619.8015	0.1841
Jet A-1 /Silica 530	2	715.9297	0.1028
	5	4129.0358	0.2402

였다. Aerosil® R972와 Silica 230을 첨가한 젤 추진제는 젤화제의 %wt가 증가할수록 power law 지수가 감소하였다. Silica530을 첨가한 경우, 동일 함유량에서 가장 높은 점도를 확인할 수 있었으나, power law 지수 n은 다른 경향을 보였다.

3. 결 론

본 연구에서는 SiO₂ 계열의 무기계 젤화제 3 종류를 Jet A-1에 첨가하여 젤 추진제를 제작하고 점도 측정을 통한 유변학적 특성을 분석하였다. 동일 SiO₂ 계열의 젤화제인 Aerosil® R972, Silica 230, Silica 530을 첨가하여 제작한 젤 추진제 모두 전단 박화의 성질을 가지는 비 Newton 유체임을 확인하였다. Silica 530의 경우를 제외하고는 젤화제의 %wt가 증가할수록 점도가 높게 나타나고, 전단박화 효과가 증가하는 것을 확인하였다.

Aerosil® R972를 첨가한 젤 추진제는 전단률 증가와 함께 점도가 power law model을 따르며 감소하는데 반해 Silica230과 Silica 530을 첨가한 젤 추진제의 경우 일부 구간에서 power law model에 벗어남을 확인하였다.

추후 Silica 230과 Silica 530을 첨가한 젤 추진제에 power law model이 아닌 Carreau-Yasuda 또는 Cross model의 적용 여부 확인 및 유기계 젤화제를 첨가한 젤 추진제 제작을 수행할 예정이다.

후 기

이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(10-0025263)

참 고 문 헌

1. Natan, B. and Rahimi, S., "The Status of Gel Propellants in Year 2000," in *Combustion of Energetic Materials*, 2001, pp.172-194
2. T. D. Kubal, R. Arnold, T. L. Pourpoint, O. H. Campanella, and W. E. Anderson,

- "Rheological Characterization of Hydroxypropylcellulose/Monomethylhydrazine and Silica/Red Fuming Nitric Acid Gels," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010
3. Mallory, J. A., Defini, S. J., Sojka, P. E., "Formulation of Gelled Propellant Simulants," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010
4. 오정수, 박지훈, 장석필, 문희장, "U-자형 덕트에서의 Al₂O₃ 나노 입자를 포함한 모사 Gel 추진제의 유동 특성 수치해석," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.377-382
5. 오정수, 전두성, 최상태, 김덕운, 최양호, 이정혁, 문희장, "인젝터 형상 변화에 따른 Gel 추진제의 유동 특성 연구," 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, 2010, pp.300-303
6. Yoon, C., Heister, S., Xia, G., and Merkle, C., "Numerical Simulations of Gel Propellant Flow through Orifice," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009
7. Rahimi, S., Natan, B., "Numerical Solution of the Flow of Power-Law Gel Propellants in Converging Injectors", *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 25, Issue 4, 2000, pp.203-212
8. Negri, M., Ciezki, H. K., "Atomization of non-Newtonian fluids with an impinging jet injector: influence of viscoelasticity on hindering droplets formation," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010
9. Kuznetsov, A., Solomon, Y., and Natan, B., "Development of a Lab-Scale Gel Fuel Ramjet Combustor," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010