

SiO₂계열 젤화제 입자크기에 따른 니트로메탄 젤 추진제의 유변학적 특성 연구

장진우* · 김시진* · 한승주* · 김진곤** · 문희장**†

Rheological Characteristics of Nitromethane Gel Fuel with Nano/Micro Size of SiO₂ Gellant

Jinwu Jang* · Sijin Kim* · Seongjoo Han* · Jinkon Kim** · Heejang Moon**†

ABSTRACT

In this study, the rheological properties of nitromethane gel propellants on nano/micron sized gelling agent are investigated. Silicon dioxide is used as the gellant with 5 wt%, 6.5 wt% and 8 wt% concentration, respectively, where the measurements are conducted under steady-state shear flow conditions using a rotational rheometer. The nitromethane/silicon dioxide gel showed non-Newtonian flow behavior for the entire experimental shear rate ranges. The gel fuels with nano-sized gellant had a slightly higher viscosity than the gel fuels with micron-sized one for low shear rate range. Additionally, it was found that Herschel-Bulkley model can hardly describe the rheological behavior of nitromethane gel propellant, but the NM model(by Teipel and Forter-Barth) is better suited to explain the rheological behavior of nitromethane gel propellant.

초 록

본 연구에서는 이산화규소를 젤화제로 사용한 니트로메탄 젤 추진제의 유변학적 특성을 분석하였다. 니트로메탄 젤은 나노 또는 마이크로 입자 크기의 젤화제를 각각 5 wt%, 6.5 wt%, 8 wt% 함량으로 첨가하여 제작되었으며 점도 측정 실험은 회전형 점도계를 이용하여 측정을 수행하였다. 제작된 젤 추진제는 항복응력이 존재함을 확인하였고 측정 범위 전 구간에서 전단박화 거동을 보이며 나노 크기의 젤화제를 첨가한 젤 추진제의 경우 마이크로 크기 대비 낮은 전단속도(1 ~ 100 1/s) 영역에서 높은 점도를 보였다. 또한 니트로메탄 젤 추진제의 경우, Herschel-Bulkley 모델 보다는 Teipel과 Forter-Barth가 제시한 모델을 사용하는 것이 적합함을 확인하였다.

Key Words: Gel Fuel(젤 추진제), Nitromethane(니트로메탄), SiO₂(이산화규소), Shear Thinning Effect(전단박화 효과), non-Newtonian Fluid(비뉴턴 유체), Gel Monopropellant(단일 젤 추진제)

1. 서 론

젤 추진제는 액체 추진제의 장점과 고체 추진제의 장점을 동시에 가지고 있는 추진제으로써, 액체 추진제보다 저장이 용이하며 누설의 위험성이 현저히 낮다는 장점을 가지고 있다. 또한 금속입자 첨가를 통해 비추력 및 밀도비추력을 증가시키는 것이 용이하여 주어진 임무에 맞춰 연료의 비추력을 조절할 수 있는 장점을 가지고 있다. 한편, 고체 추진제와 비교할 경우, 높은 비추력을 갖고, 추진제의 유량제어를 통한 추력제어가 매우 용이하다는 장점을 갖는다[1].

젤 추진제에 관한 연구는 대부분 이원 젤 추진제에 대하여 진행되고 있다. 이러한 이원 젤 추진제는 연료와 산화제가 분리 되어 있어 안전성을 높일 수 있으나 시스템이 복잡해지며 구조중량이 증가한다는 단점을 가지고 있다. 또한 높은 점도로 인해 미립화의 어려움으로 연소율과 연소효율이 낮다는 단점을 갖고 있어 대부분의 이원 젤 추진제의 경우 하이퍼골릭(hypergolic)한 추진제 조합에 관한 연구가 수행 중이다. 그러나 이러한 하이퍼골릭한 추진제의 경우 매우 강한 독성과 폭발 위험성이 항상 대두되어 왔다.



Fig 1. The GRM demonstrator missile at launch[2].

최근 이런 단점을 극복하기 위하여 2009년 독

일에서는 단일 젤 추진제를 개발하였으며 이를 이용한 GRM(Gel Rocket Motor)을 성공적으로 발사하였다. 단일 젤 추진제는 산화제가 따로 필요하지 않기 때문에 시스템의 구조가 단순하므로 공급 장치의 대형화와 발사체 중량증가에 관한 문제점들을 방지할 수 있다. 이러한 장점 때문에 단일 젤 추진제를 이용한 젤 추진기관은 우주 발사체 상단부 및 군사용 미사일 발사체로 적용 가능하다. 또한 독일의 Bayern-Chemie사와 DLR은 자세제어 시스템 DACS(Divert & Attitude Control System)와 단일 젤 추진제를 접목시켜 G-DACS(Gel Propellant DACS)의 연구에 집중하고 있다.

니트로메탄 젤 추진제는 일반적인 젤 추진제와 같이 기반유체(연료 또는 산화제)에 젤화제가 감싸고 있는 구조를 갖고 있다. 이러한 구조로 인해 일반 젤 추진제는 화염으로부터 추진제로의 열전달량이 감소하여 점화의 어려움 및 연소효율이 감소하는 단점을 가지고 있다. 반면 니트로메탄의 경우 젤화제에 감싸져 있는 구조에도 불구하고 니트로메탄의 높은 화염온도가 열전달량을 증가시켜 연소효율 향상을 도모할 수 있으며 기존에 필요한 점화 촉매반응 역시 불필요하다.

이에 본 연구에서는 이산화규소 계열 젤화제를 선정하여 입자 크기에 따른 유변학적 특성을 파악함으로써 니트로메탄 젤 추진제의 제작에 적합한 젤화제를 선정하기 위한 연구를 수행하였다.

2. 젤 추진제의 제작

2.1 니트로메탄 젤 추진제의 제작

본 연구에 사용된 젤화제의 특징은 Table 1에 나타나 있으며 Aerosil과 SS-SIL 젤화제에 대하여 제작을 수행하였다.

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

Table 1. Physical properties of SS-SIL/Aerosil

	SS-SIL	Aerosil
size	Micro (3.5 μ m)	Nano (20~30nm)
Color/ Form	White/Finely divided powder	White/Finely divided powder

제작과정 중의 추진제와 젤화제의 혼합비율을 Eq. 1과 같이 질량기준으로 계산하였다. 젤화제의 첨가는 5 wt%, 6.5 wt%, 8 wt% 비율로 제작하였으며 연료와 젤화제의 균일한 교반을 위해 상온에서 3500 rpm에서 60분 동안 교반을 수행하였다.

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

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 Aerosil과 SS-SIL 함량이 5 wt%, 6.5 wt%, 8 wt%로 제작한 연료를 나타낸다. 또한 젤화제 함량이 5 wt%인 니트로메탄 젤 추진제는 육안으로 비교하였을 때 6.5 wt%에 비해 매우 낮은 점도를 갖는 것을 확인할 수 있었으며, 순수 니트로메탄에 비해 약간 높은 점도를 가졌다.



Fig. 2 Nitromethane gel propellant with Aerosil (left: 5 wt%, middle: 6.5 wt%, right: 8 wt%)



Fig. 3 Nitromethane gel propellant with SS-SIL (left: 5 wt%, middle: 6.5 wt%, right: 8 wt%)

3. 니트로메탄 젤 추진제의 유변학적 특성

3.1 젤 추진제의 유변학적 특성

젤 추진제는 전단박화 비뉴턴 유체로서 정상 상태 전단 흐름 하에서 전단률에 따라 점도의 값이 변하는 유변학적 특성을 가지고 있다. Power-law model(PL 모델)은 전단박화(pseudoplastic) 또는 전단경화(dilatant)와 같은 비뉴턴 유체의 유동 거동을 설명하며 항복응력이 존재하지 않을 경우에 사용한다. PL 모델은 Eq. 2와 Eq. 3과 같이 정의되며 η 는 겔보기 점성계수, $\dot{\gamma}$ 은 전단변형률, K는 컨시스턴시 지수(consistency index) 그리고 n은 유동거동지수(behavior index)를 나타낸다. n>1일 때는 전단경화 거동이 존재하고 n=1 일 때는 뉴턴 유체이며 n<1일 때는 전단박화 거동이 존재한다[3].

$$\eta_{PL} = K \dot{\gamma}^{(n-1)} \quad (2)$$

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

항복응력을 고려하는 Herschel-Bulkley model (HB 모델)은 Eq. 4와 Eq. 5와 같이 정의되며 τ_0 는 항복응력을 나타낸다.

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

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

3.2 측정방법 및 조건

제작된 젤 추진제의 점도 측정은 한국고분자시험 연구소에 의뢰하여 진행되었다. TA instruments사의 Discovery HR-1인 회전형 점도계를 이용하여 측정하였으며, 상온 25°C에서 전단속도 0.1 ~ 1000[1/s] 구간에 대하여 분석을 수행하였다.

3.3 니트로메탄 젤의 유변학적 특성 측정 결과

Aerosil/SS-SIL 젤화제의 함량이 5 wt%인 니트로메탄 젤 추진제의 경우, 점도가 높지 않아 액체 상태의 순수 니트로메탄과 비슷한 높은 휘

발성을 가졌으며, 이로 인해 용매의 휘발로 인한 피크의 흔들림 현상이 심해 유변학적 특성에 관한 측정이 불가능 하였다.

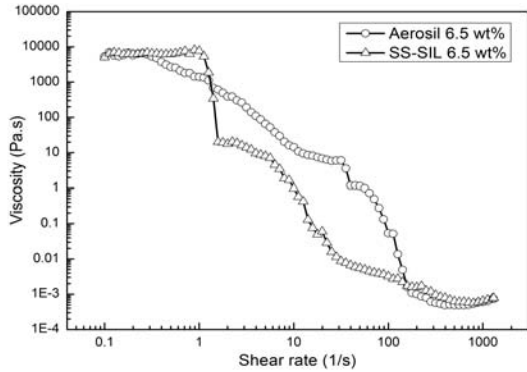


Fig. 6 Relative viscosity of nitromethane/silicon dioxide gels as a function of shear rate: Aerosil 6.5 wt% (circle), SS-SIL 6.5 wt% (triangle)

Fig. 6은 젤화제 함량이 6.5 wt%인 경우, 나노입자(Aerosil)와 마이크로입자(SS-SIL)의 젤화제를 사용한 젤의 점도변화를 나타내고 있다. Aerosil/SS-SIL를 첨가한 젤 추진제는 입자크기에 관계없이 전단속도 0.1 ~ 0.5[1/s]에서 항복응력이 존재함을 확인 할 수 있으며 항복응력 이후 전단속도 1 ~ 100[1/s]인 낮은 전단속도 영역에서는 전단속도에 따라 점도차이가 나지만 전단속도가 높은 100[1/s]이후의 영역에서는 점도차이가 미미하였다. 이는 낮은 전단속도 영역에서는 Aerosil를 첨가한 젤 추진제가 SS-SIL를 첨가한 젤 추진제보다 입자와 입자 사이의 물리적인 결합이 더 강해 점도가 상대적으로 높은 것으로 사료된다. 반면 높은 전단속도 영역에서는 입자와 입자간 물리적인 결합력에 의한 점도의 영향은 거의 나타나지 않고 뉴턴유체와 같은 성질을 가지므로 입자크기에 따른 점도차이는 보이지 않는 것으로 사료된다. 또한 전단속도가 1 ~ 50[1/s]인 영역에서 기울기의 감소율이 SS-SIL를 첨가한 젤 추진제가 Aerosil를 첨가한 젤 추진제보다 더 크다는 현상을 확인하였다. 기울기의 감소는 전단속도가 증가함에 따라 젤화제와 연료 사이의 물리적인 결합력이 약해지는 정도

를 나타내며 Aerosil과 연료 사이의 힘이 SS-SIL과 연료 사이의 힘에 비해 더 강한 물리적 결합력을 갖는 것으로 확인되었다. 또한 SS-SIL를 첨가한 젤 추진제가 Aerosil를 첨가한 젤 추진제보다 더 빠르게 전단박화 현상이 일어나는 것으로 확인되었다.

전단속도 0.5 ~ 1[1/s]의 구간에서 SS-SIL를 첨가한 젤 추진제가 더 높은 점도를 가지는데 이는 측정 시 용매의 휘발로 인하여 피크가 흔들리는 현상이 원인으로 사료된다.

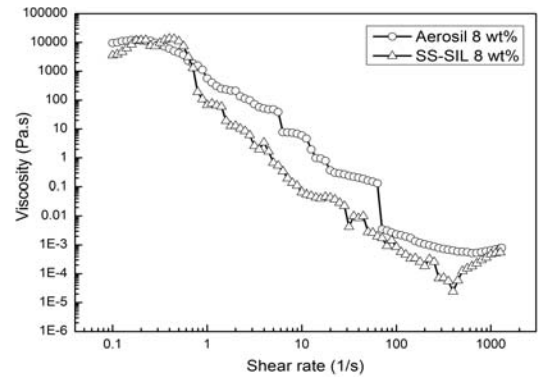


Fig. 7 Relative viscosity of nitromethane/silicon dioxide gels as a function of shear rate: Aerosil 8 wt% (circle), SS-SIL 8 wt% (triangle)

Fig. 7는 젤화제 함량 8 wt%의 점도 측정값을 나타낸다. 젤화제 함량 6.5 wt%의 경우와 유사하게 SS-SIL에 비해 Aerosil를 사용한 젤 추진제가 전구간에 걸쳐 높은 점도를 가지는 것으로 측정되었다. 전단속도 0.1 ~ 0.8[1/s]의 구간까지 항복응력이 존재함을 확인 할 수 있었으며 항복응력 이후에 전단박화 현상이 나타났다. 또한 1 ~ 100[1/s]의 전단속도 영역에서는 Aerosil를 첨가한 젤 추진제가 입자간 물리적 결합력에 의해 점도가 높다는 것을 확인하였다. 그러나, 높은 전단속도 영역에서는 점도의 영향보다 뉴턴유체와 같은 영향에 의해 입자크기에 따른 점도차이는 보이지 않는 것으로 사료된다. 반면 Fig. 6과 달리 항복응력 이후의 구간에서 Aerosil과 SS-SIL 젤화제를 첨가한 추진제 모두 유사한 기울기를 갖는 것을 확인하였다. 이에 따라 젤화제

함량 8 wt% 이상에서는 입자크기에 상관없이 전단속도가 증가함에 따라 젤화제와 연료 사이의 물리적인 결합이 약해지는 정도가 같다고 사료된다.

3.4 유변학적 모델 선정

니트로메탄 젤 추진제는 Fig. 6과 Fig. 7의 유변학적 결과를 통해 항복응력이 존재함을 확인하였다. 항복응력이 존재함에 따라 HB 모델을 사용하여 항복응력(τ_0), 컨시스턴시 상수(K), 유동거동지수(n)를 파악하였다.

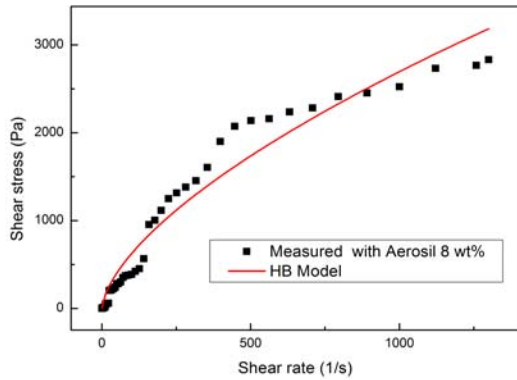


Fig. 8 Measured values and HB model for the shear stress of nitromethane/silicon dioxide gel

Fig. 8은 HB 모델을 사용하여 측정값과 모델값 간의 적합성을 나타내었다. HB 모델을 적용한 결과 정량-정식적으로 적합한지에 대한 판단을 내리기에는 불충분하였다. 이에 Teipel과 Forter-Barth는 니트로메탄 젤 추진제의 모델(이하 NM 모델)을 제시하였으며 전단응력과 전단속도의 관계는 Eq. 6과 같다[4].

$$\tau = \tau_0 - \eta_{\infty} \dot{\gamma} + \eta^* \dot{\gamma}^{\alpha} \quad (6)$$

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_{gel} \dot{\gamma}}{\eta_{nitromethane}} \quad (7)$$

NM 모델은 항복응력 τ_0 를 고려하며, η_{∞} 는 전

단속도가 $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ 으로 극한값을 취했을 때의 젤화제 농도별 상대점도이며 식은 Eq. 7과 같다. η^* 는 분산계(disperse system)와 관련된 구조화 특성을 결정하는 특성점도이고 α 는 분산계 내의 젤 추진제의 구조적 변화를 결정하는 지수이다. 본 연구의 실험데이터를 통해 얻은 각 상수 값인 τ_0 와 η_{∞} 는 Table 2와 같다.

Table 2. Relative viscosity of the nitromethane/silicon dioxide gels as a function of particle concentration

Gellant	weight	τ_0	η_{∞}
Aerosil	6.5 wt%	1.71×10^{-1}	6.05×10^{-4}
	8 wt%	2.10×10^{-1}	6.51×10^{-4}
SS-SIL	6.5 wt%	2.65×10^{-2}	6.01×10^{-4}
	8 wt%	1.96×10^{-1}	5.47×10^{-4}

Fig. 9는 Teipel의 NM 모델을 사용하여 본 실험데이터와의 적합성을 비교한 결과이다.

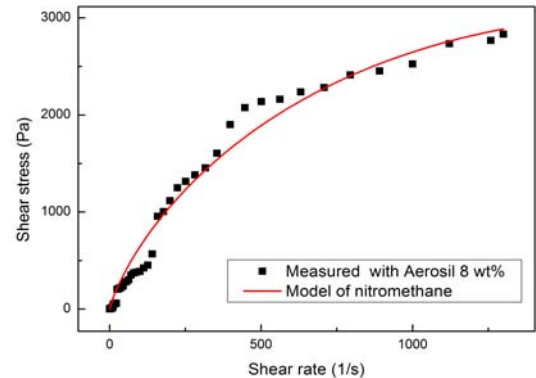


Fig. 9 Measured values and model of nitromethane for the shear stress of nitromethane/silicon dioxide gel

HB 모델과 달리 측정영역 전 구간에서 정량적인 적합성을 보였으며 NM 모델에 해당하는 특성점도(η^*)와 지수(α)값은 Table 3과 같다.

Table 3. Characteristic viscosity of the nitromethane/silicon dioxide gels as a function of particle concentration

Gellant	weight	η^*	α
Aerosil	6.5 wt%	1.01×10^2	1
	8 wt%	5.14×10^2	0.99
SS-SIL	6.5 wt%	1.03×10^2	1
	8 wt%	4.98×10^2	1

측정결과, 분산계와 관련된 구조화 특성을 결정하는 특성점도(η^*)는 젤화제 입자크기에 상관없이 함유량 변화에 따라서만 차이가 있음을 확인하였다. 또한 분산계 내의 젤 추진제의 구조적 변화를 결정하는 지수(α)는 1로 일정한 값을 나타내는 것을 확인하였으며, 이를 통해 젤화제 함유량과 입자크기에 따라 구조적인 변화는 없는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 니트로메탄 젤 추진제에 적합한 이산화규소 계열의 젤화제를 선정하기 위해 젤화제 입자 크기에 따른 유변학적 특성 변화에 대한 연구를 진행하였다. 회전형 점도계를 이용하여 정상 상태의 전단흐름 하에서 전단속도 1~1000[1/s]의 구간에 대해 측정을 수행하였다. 측정결과, 항복응력이 존재함을 확인하였고, 측정 범위 전 구간에서 전단박화 거동을 보임을 확인하였다. Aerosil를 첨가한 젤 추진제인 경우 SS-SIL를 첨가한 젤 추진제에 비해 낮은 전단속도 영역에서 높은 점도를 보였다. 이는 젤화제와 연료사이의 결합력이 젤화제 입자크기에 따라 달라지는 것으로 사료되나, 현재까지의 실험데이터를 바탕으로 분석하였을 때 그 효과는 크지

않은 것으로 판단된다. 이에 전단속도에 따른 점도의 변화만을 이용하여 니트로메탄 젤에 적합한 젤화제를 선정하는 것은 무리가 있다고 판단되며 추후 요변성 및 주파수에 따른 점탄성분석 등 다양한 분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한 니트로메탄 젤 추진제는 일반적으로 젤 추진제의 유변학 정보를 위해 많이 사용되는 HB 모델로는 전단속도에 따른 전단응력의 변화를 정확히 모사할 수 없음을 확인하였으며, Teipel과 Forter-Barth가 제시한 NM 모델을 사용하는 것이 적합함을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Natan B. and Rahimi S., "The Status of Gel Propellants in Year 2000" in: Combustion of Energetic Materials, pp. 172-194 (eds: K.K. Kuo and L.T. DeLuca), Begell House, USA, 2002.
2. Ciezki H.K., Naumann K.W., Weiser V., "Status of Gel Propulsion in the Year 2010 with a Special View on German Activities", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010, Hamburg., Germany, August 31 to September 2, 2010
3. 한승주, "Distintegration and Atomization behavior of Gel Propellant using Shear Coaxial injector", 한국항공대학교 석사학위논문, 2015
4. Teipel, U. and Forter-Barth, U., "Rheological Behavior of Nitromethane Gelled with Nanoparticles", Journal of Propulsion and Power, Vol.21, No. 1, pp. 40-43, 2005