

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2012.16.6.023>

SiO₂ 계열 젤화제에 따른 케로신 젤 연료의 유변학적 특성 연구

김재우* · 전두성* · 강태곤** · 장석필** · 구자예*** · 문희장***†

Rheological Characteristics of Kerosene Gel Fuel with SiO₂ Gellant Derivatives

Jaewoo Kim* · Doosung Jun* · Teagon Kang** · Seok pil Jang** ·
Jaye Koo*** · Heejang Moon***†

ABSTRACT

Present work deals three families of SiO₂ gelling agents which have been used to produce gel fuel based on Kerosene. Jet A-1 is chosen as fuel where power-law rheological model is used to confirm whether or not the gelification is achieved depending on the %wt of gellant. It was confirmed that the produced jelly-like substance have shear-thinning effect, and that its apparent viscosity increases as SiO₂ concentration increases. Compared to other gellants, gel with Aerosil® R972 fits most to the power-law model, while gels with Silica 230 and Silica 530 deviate from the power-law model. The rheological characteristics behaved differently depending on the mixing method(vortex mixing and manual mixing) when gellant concentration is increased.

초 록

본 연구에서는 SiO₂ 계열 젤화제로 알려진 Aerosil® R972, Silica 230, Silica 530을 사용하여 케로신 기반 젤 연료를 제작하였다. 케로신 계열 연료로는 Jet A-1을 사용하였으며 젤화(gelification) 여부를 확인하기 위한 전단박화(shear thinning) 현상은 멱법칙(power-law) 모델을 이용하여 검증하였고 제작된 모든 젤 연료는 전단박화 효과와 함께 SiO₂ 젤화제의 함유량이 증가할수록 젤의 점도가 높게 형성됨을 확인하였다. 본 연구에서 사용된 젤화제 중 Aerosil® R972를 첨가한 젤 연료의 점성계수가 전단률 전 영역에 걸쳐 멱법칙 모델을 따르는 것이 확인되었으며 상대적으로 Silica 230과 Silica 530을 첨가한 젤 연료는 전단률 150 [1/s] 근방 이하에서 멱법칙이 유효하지 않음을 알 수 있었다. 또한, 젤화제 함유량이 증가할수록 vortex 혼합법과 수동 혼합법 간의 유변학적 특성이 크게 차이 나는 것이 관찰되었다.

Key Words: Gel Fuel(젤 연료), Gellant(젤화제), SiO₂(이산화규소), Power-Law Model(멱법칙 모델), Shear Thinning Effect(전단박화 효과), non-Newtonian Fluid(비 뉴턴 유체)

접수일 2012. 10. 2, 수정완료일 2012. 11. 12, 게재확정일 2012. 11. 19

* 학생회원, 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 중신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

1. 서 론

젤(gel)은 액상의 기본 유체에 고체 상태의 젤화 작용제(gelling agent)를 첨가하여 얻을 수 있는 액체와 고체 중간 단계의 점탄성을 갖는 비뉴턴(non-Newtonian) 물질로서 유변학적(rheological) 특성이 젤화제에 따라 변할 수 있다. 젤 추진제는 전단박화(shear thinning) 성질을 갖는 젤 상태의 연료 및 산화제를 일컫는다. 젤 추진제는 액체 연료의 취약점인 누설 가능성과 휘발성을 배제시켜 고체 추진제와 유사하게 뛰어난 보관성을 지니고 있다. 또한, 고체 추진제의 단점으로 부각되는 추진제 표면의 크랙(crack) 발생을 최소화하고, 금속 입자 첨가 시 에너지 밀도를 증가시킬 수 있으며 운용 중 추력제어가 가능하여 고체 및 액체 추진제의 장점을 두루 살리는 차세대 추진제로서 1950년대부터 연구[1]가 시작되었다. 반면, 젤화 된 추진제를 만들기 위한 제작의 추가 공정으로 인해 추진제 단가가 높아질 수 있으며 젤화제 첨가로 높아진 점도는 연료 및 산화제의 미립 분사를 어렵게 하여 고압의 인젝터 공급압력이 요구된다는 단점이 존재한다[2].

젤 추진제 제작을 위해 추진제에 첨가되는 젤화제는 탄소 성분의 유무에 따라 무기계 젤화제와 유기계 젤화제로 구분되며 필요에 따라 Al, Mg, Boron[3]과 같은 첨가제(additives)를 추가하기도 한다. 케로신(kerosene) 기반 젤의 제작을 위해 종종 사용되는 SiO_2 (이산화규소, 이하 SiO_2) 계열의 무기계 젤화제는 연소 반응에 참여하지 않아 연소 후 젤화제가 남아있을 수 있는 반면, HPC(Hydroxypropylcellulose) 계열인 HEC, HAC와 같은 탄소 섬유소(cellulose)로 구성된 유기계 젤화제는 연료와 함께 연소 반응에 참여하는 특성을 갖고 있다[4]. 젤 연료 제작과 관련된 연구[5]는 일반적으로 하이드라진 계열인 MMH[6]와 UDMH, 수소 그리고 케로신 계열인 RP-1과 JP-10 등을 사용하며, 젤 산화제로는 질산 계열인 IRFNA(Inhibited Red Fuming Nitric Acid)와 RFNA[7] 그리고 과산화수소등을 사용한다. 근래에는 이들 젤화제와 첨가제 종류에 따른 젤 추진제의 유변학적 특성을 파악하는 연구[3]가 소개되고 있다. 젤 추진제의 분무 특성에

관해서는 일반적으로 실제 젤 대신 무독성이면서 취급이 용이한 물 기반 모사젤(simulant gel)을 사용하며 이들 모사젤은 실제 젤 추진제와 유변학적 특성이 정성적으로 유사하게 제작된다[8].

젤 추진제에 대한 응용 연구들은 유체의 전단률이 증가함에 따라 점성이 감소하는 전단박화 효과(shear thinning effect)를 중점으로 이루어지고 있다[4, 8-10]. 다양한 오리피스 형상 및 수축형상 인젝터를 통해 공급되는 젤 추진제의 액화 특성 및 유동 패턴에 관한 수치해석적인 연구[9-13]가 수행중에 있으며 모사젤을 이용하여 분무형 또는 충돌형 인젝터의 액적 분열 및 미립화에 대한 실험적인 연구[14-16] 또한 활발히 진행되고 있다.

최근에는 연료의 누설에 취약한 램제트 기관에 기밀성이 뛰어난 젤 추진제의 장점을 활용하여 케로신 기반 젤 연료의 인젝터 분사 특성과 기초 연소 실험을 Kuznetsov et al.[17]이 수행한 바 있다.

국내에서 수행중인 젤 추진제 관련 연구들은 대부분 모사젤 추진제를 이용한 분무 특성[14]과 인젝터 형상에 따른 유동특성[9, 10]에 집중되어 있는 실정이며 실제 젤 연료의 제작과 관련된 국내 연구는 현재까지 알려진 바로는 미미하다. 본 연구에서는 SiO_2 계열 젤화제로 알려진 Aerosil® R972, Silica 230, Silica 530을 사용하여 케로신 기반 젤 연료들을 제작하였으며 젤화제 종류에 따른 젤 연료의 유변학적 특성을 파악하고자 한다. 비 뉴턴 전단박화 유체 여부를 판단하기 위해 측정된 유변학적 상태량을 기반으로 젤화 여부를 확인하였으며 젤화제 함유량에 따른 vortex 혼합법과 수동 혼합법 간의 차이점을 고찰하여 젤 혼합법에 대한 기초 자료를 확보하고자 한다.

2. 젤 연료의 제작

2.1 SiO_2 젤화제의 특성

젤 연료 제작을 위해 첨가되는 무기계 젤화제

인 SiO₂의 입자 표면은 액체연료와 혼합 시 수소 결합을 형성하며 액화 상태의 물질을 젤(gel)로 만들어 주는 역할을 한다. SiO₂가 첨가된 젤 연료에 전단력을 가하게 되면 이 수소 결합이 약화되어 점성이 감소하게 된다[10]. 동일 계열의 SiO₂ 입에도 불구하고 제조회사별로 SiO₂의 성질들이 다르며 본 연구에서는 Table 1의 3가지 젤화제들을 사용하였다.

젤화제의 혼합비율은 Eq. 1과 같이 질량 기준으로 표현되며 전자저울로 계량한 2%wt, 5%wt 및 7%wt 비율의 젤화제를 Jet A-1 케로신 연료에 혼합하여 젤 연료를 제작하였다.

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

2.2 혼합 방법

SiO₂가 첨가된 케로신 젤 연료는 Fig. 1(a)의 Digital Vortex-GENIE® Agitator (RPM 500~2850)를 이용하여 제작되거나 Fig. 1(b)의 수동혼합법(manual method)으로부터 제작되었다. Vortex 혼합법의 경우 밀봉한 시약병을 vortex mixer에 장착하고 모터 회전속도 2000 rpm의 미세 진동을 가하여 혼합을 진행하였으며, 수동혼합법의 경우는 유리막대를 이용하여 60분 동안 물리적으로 혼합하였다. 여러 유형의 교반기가 존재하지만 젤 분무 및 젤 연소 기초 연구에

필요한 젤 연료의 제작에 요구되는 혼합방법에 대한 문헌은 제한적이다. 따라서 본 연구에서는 교반기가 작동매체에 물리적으로 접촉되는 방법과 접촉되지 않는 방법을 모두 사용하여 혼합방법에 따른 젤의 유변학적 특성을 보고자 하였다.

Figure 2와 Fig. 3은 본 연구에 사용된 3가지



(a) Vortex method (b) Manual method

Fig. 1 Mixing method used in this study

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

Fig. 2 Viscosity characteristics depending on %wt of several gellants (vortex method)

Table 1. Properties of SiO₂ gellants

SiO ₂ Gelling Agent	Aerosil® R972	Silica 230	Silica 530
BET Surface area (m ² /g)	110 ± 20	310	230
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		

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

Fig. 3 Viscosity characteristics depending on %wt of several gellants (manual method)

젤화제 및 젤화제 함유량에 따른 vortex 혼합법 및 수동 혼합법으로 제작된 젤 연료들을 각각 나타내고 있다. 젤 연료가 담긴 시약병을 일정 시간 동안 수평으로 유지한 후, 약 45도 각도로 기울여 젤 연료의 점도를 육안으로도 확인할 수 있었다.

본 연구의 모든 젤 연료는 제작 방법과 무관하게 젤화제의 함유량이 증가할수록 높은 점도를 보였으며 Silica 530을 첨가한 젤 연료의 경우 타 젤화제를 첨가한 연료에 비해 가장 높은 점도를 보였다. Fig. 2와 Fig. 3의 Silica 530 7%wt의 경우 높은 점도로 인해 시약병을 기울여도 오랜 시간 동안 고 점도가 유지됨을 확인할 수 있었다.

3. 케로신 젤 연료의 유변학적 특성

젤 연료는 뉴턴 유체의 성질을 갖는 일반 연료와 달리, 비 뉴턴 유체로써 점성계수가 전단률에 따라 변화하는 전단박화 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 겉보기 점성계수로 표현하기 위하여 power-law model[1]을 일반적으로 사용하며 항복응력 존재 시 Herschel-Bulkley 또는 Carreau-Yasuda model[13]을 적용하기도 한다. 1차원 유동에 대한 power-law model은 Eq. 2와 같으며 지수 n 은 유동 거동지수(behavior index), K 는 컨시스턴시 지수(consistency index)에 해당된다.

$$\tau_{yx} = K \left| \frac{du}{dy} \right|^{n-1} \frac{du}{dy} = \eta \frac{du}{dy} = \dot{\eta} \dot{\gamma} \quad (2)$$

항복응력 고려 시 사용되는 Herschel-Bulkley model과 Carreau-Yasuda model의 겉보기 점성계수는 각각 Eq. 3과 Eq. 4로 표현된다.

$$\eta = K \dot{\gamma}^{n-1} + \frac{\tau_{HB}}{\dot{\gamma}} + \eta_{\infty} \quad (3)$$

$$\eta = (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\dot{\gamma} \lambda)^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (4)$$

본 연구는 제작된 젤 연료들의 정성적인 젤화 여부를 판단하는데 초점을 맞춘 만큼, 젤 연료의 유변학 모델로서 간단하지만 폭넓은 전단률 범위에서 사용가능한 power-law model을 채택하기로 하였다.

제작된 젤 연료들의 젤화 여부를 판단하기 위해 전단률에 따른 점성계수는 Fig. 4의 Brookfield LVDV-III cone & plate 점도계(rheometer)를 이용하여 25℃ 상에서 측정되었으며 점도계의 작동 범위는 Table 2와 같다. Silica 530 젤화제를 7%wt 첨가한 젤 연료의 경우, 본 장비로는 점성 측정이 순조롭지 못하여 Silica 530의 결과는 2%wt와 5%wt 만을 고려하였다.

3.1 젤화제 종류에 따른 유변학적 특성

Figure 5, Fig. 6과 Fig. 7은 젤화제 함유량이 각각 2%wt, 5%wt 및 7%wt에 해당되는 결과로서 vortex 혼합법으로 혼합된 젤 추진제들의 전단률 대비 점도의 선도를 나타낸다. 본 연구에서는 cone & plate 점도계를 사용하는 관계로 높



Fig. 4 Brookfield LVDV-III ultra cone & plate rheometer

Table 2. Rheometer specifications

Model	Brookfield LVDV-III Ultra
Type	Cone & Plate
Viscosity range cP(mPa·s)	1 ~ 6×10 ⁶
RPM	0.01 ~ 250
Number of Increments	2600
Shear rate range (sec ⁻¹)	0.2 ~ 1875

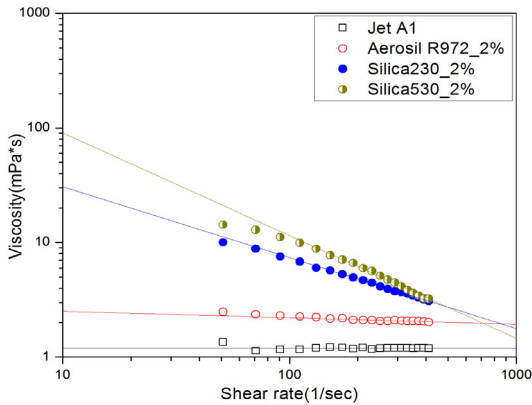


Fig. 5 Rheological data of Jet A-1/gellant (2%wt)

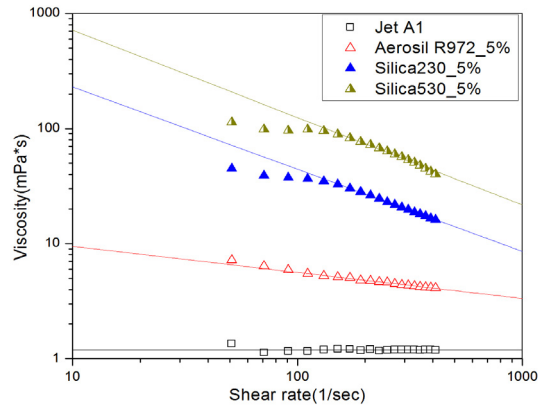


Fig. 6 Rheological data of Jet A-1/gellant (5%wt)

은 정확도와 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위해 다소 낮은 전단률 범위 50~430 [1/s] 내에서 점성이 측정되었다. 뉴튼 유체인 Jet A-1 연료는 전단률이 증가됨에 따라 점도가 일정하게 유지되는 반면, 모든 젤 연료들의 점도는 전단률이 증가함에 따라 점도가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 본 연구에서 제작된 젤 연료들이 변형률 증가에 따라 겔보기 점성계수가 감소하는 전단박화의 거동을 가지는 젤 고유의 특성을 따르는 것으로 판단된다.

Figure 5를 살펴보면 젤화제들의 동일한 함유량(2%wt)에 대해 3가지 젤 연료의 겔보기 점성계수는 Silica 530, Silica 230, Aerosil® R972의 순으로 높게 나타나는 것을 볼 수 있으며 5%wt와 7%wt에 해당되는 Fig. 6과 Fig. 7에서도 유사한 경향이 도출됨을 알 수 있다. 전단률 증가와 함께 감소하는 점성계수의 경향을 살펴보면 Aerosil® R972의 경우가 젤화제 함유량과 무관하게 모두 Ostwald and de Waele의 power-law model에 근접하는 것을 알 수 있다. 반면, Silica 230 및 Silica 530의 경우 5%wt 이상의 함유량(Fig. 6, Fig. 7)에서 전단률 100 [1/s] 근방 이하 영역의 점성계수가 power-law model에 벗어난다는 것을 볼 수 있다. 이 현상이 Aerosil® R972를 첨가한 젤 연료의 점도 보다 크게 높은 Silica 230과 Silica 530의 점도에 기인하는 것 인지, Silica 230과 Silica 530 젤화제의 고유 특성 인지 또는 낮은 전단률 범위에서 영점전단점도

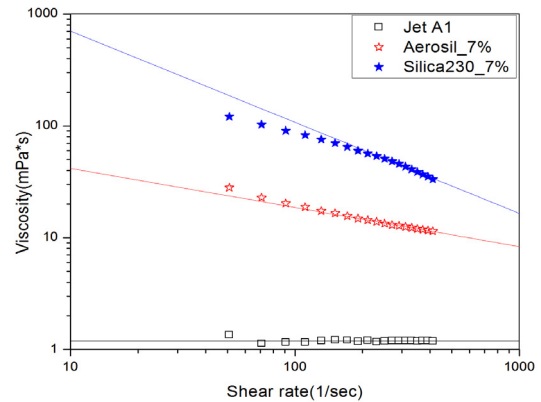


Fig. 7 Rheological data of Jet A-1/gellant (7%wt)

(zero-shear-rate viscosity)의 존재에 의한 것인지를 확인하기 위해서는 추후, 보다 넓은 전단률 범위의 점성계수 측정이 필요할 것으로 사료된다.

3.2 혼합방법 차이에 따른 유변학적 특성

Figure 8, Fig. 9와 Fig. 10은 각각 Aerosil® R972, Silica 230, Silica 530 젤화제에 해당되는 결과로서 혼합방법에 따른 젤 연료의 유변학적 차이점을 보고자 도시된 선도이다. 각 그림의 닫힌 표식은 vortex 혼합법으로 제작한 젤 연료를 나타내며 열린 표식은 장시간 수동 혼합법으로 제작한 젤 연료의 점성계수 변화를 나타내고 있다. 수동 혼합법으로 제작된 젤 연료들도 vortex 혼합법으로 제작된 젤 연료들과 마찬가지로 젤

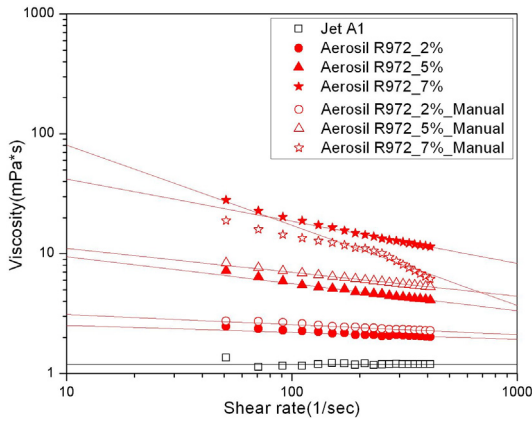


Fig. 8 Comparisons of viscosity with different mixing type (gel fuel with Aerosil® R972)

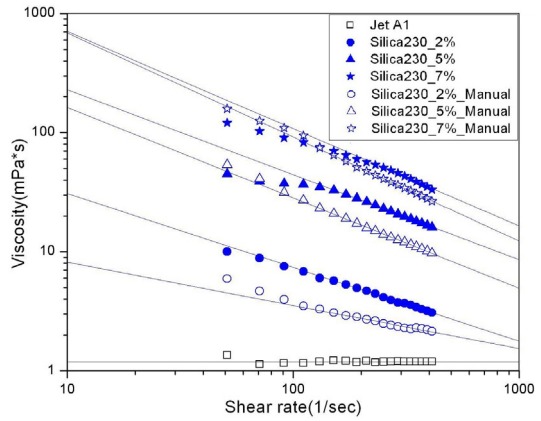


Fig. 9 Comparisons of viscosity with different mixing type (gel fuel with Silica 230)

화제 함유량이 증가할수록 점도가 높게 나타나며 낮은 젤화제 함유량(2%wt)에서는 세 젤화제 모두 power-law에 근접하는 것이 확인되었다. 그러나 젤화제 함유량이 증가할수록 점성계수는 power-law로 부터 벗어났으며 혼합방법에 따라서도 젤 연료의 유변학적 특성이 상이함을 알 수 있었다.

Aerosil® R972를 첨가한 젤 연료의 경우(Fig. 8), 젤화제 함유량 2%wt와 5%wt에서는 혼합법과 무관하게 점도 변화의 경향은 유사하였다. 상대적으로 높은 점성을 갖는 7%wt에서는 수동혼합법의 경우가 power-law로 부터 크게 벗어나고 기울기 또한 어느 순간 급변하는 것이 확인되는데 이는 높은 점성으로 인해 수동으로 혼합 시 충분한 혼합이 이루어지지 않았거나 측정 오차에 기인한다고 판단된다. 따라서 7%wt에서의 혼합방법간의 직접 비교는 무의미한 것으로 판단된다.

절대점성계수의 값이 Aerosil® R972 보다 상대적으로 높은 Silica 230을 첨가한 젤의 경우(Fig. 9)를 살펴보면 모든 젤화제 함유량(2%wt, 5%wt, 7%wt)에 대해 혼합 방법에 따른 점성계수의 변화가 뚜렷이 존재함을 알 수 있으며 Silica 530의 결과(Fig. 10) 또한 유사한 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서는 혼합방법에 따른 민감도를 살펴보기 위해 수동혼합법을 일부러 채택하였는데 Fig. 9와 Fig. 10의 결과를 살펴보

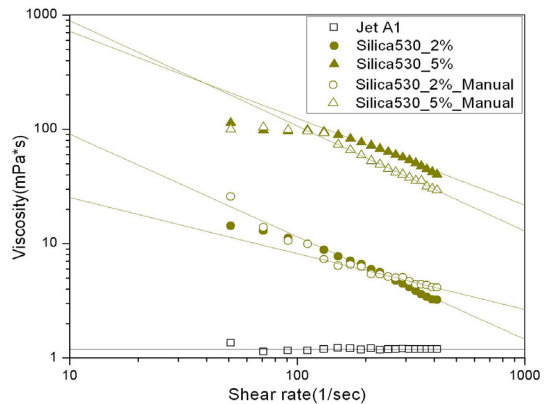


Fig. 10 Comparisons of viscosity with different mixing type (gel fuel with Silica 530)

면 혼합방법에 따라 젤 연료의 유변학적 특성이 크게 변할 수 있다는 사실을 암시하고 있다.

Figure 8의 Aerosil® R972 젤화제를 첨가한 경우와는 달리 Fig. 9의 Silica 230의 결과들이 혼합방법 변화에 민감하게 반응하는 것은 아래 두 가지 요인 중 하나에 의한 것으로 사료된다. 첫째, Table 1에 의하면 Aerosil의 경우 젤화제 입자 크기가 나노 크기 인 반면 Silica 230과 530 입자 크기는 마이크로 크기라는 사실이다. 즉, 마이크로 크기의 Silica 230 보다는 나노 크기의 Aerosil 젤화제가 보다 수월한 균질의 혼합을 가능하게 하여 그 유변학적 특성이 혼합방법에 영향을 덜 받는 반면, Silica 230과 530의 경우는

Table 3. Power law data (gel propellants by vortex mixer)

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

점성계수가 두 혼합법에 따라 크게 차이가 날 수 있다는 것이다. 둘째, 본 연구에서 사용한 점도계는 회전점도계(rotational viscometer)로서 넓은 범위의 전단률(shear rate)을 고려 할 수 없다는 것이다. 즉, 최대 및 최소 전단률 범위의 정밀한 점성계수를 측정하기 위해서는 고가의 모세관점도계(capillary viscometer)가 추후 필요할 것으로 판단된다.

두 혼합법에 의한 차이와 더불어 Silica 230과 Silica 530의 함유량 5%wt 이상에서는 전단률 150 [1/s] 이하의 영역에서 점성계수가 power-law model로부터 크게 벗어나는 것이 확인되었다(Fig. 9, 10). 그러나 실제 인젝터의 일반적인 작동범위가 전단률 103 [1/s] 이상인 것을 고려하면 전단률 150 [1/s] 이하의 데이터는 인젝터 작동범위를 벗어나는 값이라 그 중요도는 크지 않다고 볼 수 있다.

측정된 젤 연료의 컨시스턴시 지수 K와 power-law 지수 n을 정량화하기 위해 전단률 100[1/s] 이상 구간의 데이터들을 이용하여 Vortex 혼합법과 수동 혼합법의 K와 n값을 각각 Table 3과 Table 4에 정리하였다. Aerosil® R972와 Silica 230을 첨가한 젤 연료는 젤화제의 %wt가 증가할수록 power law 지수 n이 예상대로 감소하는 것을 볼 수 있다. Silica 530을 첨가한 경우, 동일 젤화제 %wt에서 가장 높은 점도를 갖는 것을 확인할 수 있었으나, vortex 혼합법의 지수 n은 젤화제 함유량이 증가함에도 n 값이 증가하였다. Silica 530을 첨가한 젤 연료의 경우, 높은 점성과 본 연구에서 사용된 점도계의

Table 4. Power law data (gel propellants by manual method)

Gel Type	%wt	K	n
Jet A-1 /Aerosil® R972	2	3.7745	0.9158
	5	17.4866	0.8011
	7	376.656	0.3309
Jet A-1 /Silica 230	2	18.7567	0.6381
	5	929.5918	0.2418
	7	5137.1696	0.1261
Jet A-1 /Silica 530	2	77.8603	0.5109
	5	7411.0290	0.0797

한계로 측정 에러 변동폭이 크게 나타나 데이터의 신뢰도가 떨어지는 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 SiO₂ 계열 무기계 젤화제로 알려져 있는 Aerosil® R972, Silica 230, Silica 530을 사용하여 케로신 기반 젤 연료들을 제작하였으며 젤화제 종류에 따른 젤 연료의 유변학적 특성을 살펴보았다. 비 뉴턴 전단박화 유체 여부를 판단하기 위해 power-law model을 기반으로 젤화 여부를 확인하였으며 젤화제 함유량 변화(2%wt, 5%wt, 7%wt)에 따른 전단박화 효과를 파악하였다. 젤의 제작 과정 중 요구되는 혼합방법으로는 진동을 유발하는 vortex 혼합법과 수동 혼합법을 이용하였으며 두 혼합방법 간의 유변학적 특성과 차이점이 확인되었다. 제작된 모든 젤 연료들은 젤화제의 함유량이 증가할수록 점도가 커지며 전단박화 효과가 증가되는 젤 고유의 특성을 따르는 것이 확인되었다. Aerosil® R972를 첨가한 젤 연료의 경우 전단률 증가와 함께 겔보기 점성계수가 power-law model을 따르는 반면, Silica 230과 Silica 530을 첨가한 젤 연료는 전단률 150 [1/s] 이하의 구간에서 점성계수가 power-law model로부터 크게 벗어나는 것이 확인되었다.

Aerosil® R972 젤화제를 첨가한 경우와는 달리 Silica 230과 Silica 530의 경우, 혼합방법에 따라 상이한 유변학적 특성이 관찰되었는데 이

는 Aerosil 젤화제의 입자 크기가 나노 크기 인 반면 Silica 230과 530의 입자 크기가 마이크로 크기이기에 혼합방법에 크게 좌우된다고 판단되었다. 또한, 본 연구에서 사용된 회전점도계로는 보다 넓은 범위의 전단률을 고려할 수 없었으며 높은 점도를 갖는 젤화제 함유량 7%wt의 경우와 Silica 530의 경우에서 측정값의 변동 폭이 크게 나타나 모세관점도계의 사용이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 Aerosil® R972 젤화제가 젤 고유의 특성을 가장 잘 따르는 것으로 확인되었으며 추후 젤 연료의 제작에 영향을 미치는 주요 인자인 혼합시간, 혼합온도, 젤화제 입자 크기 및 pH에 대한 고려와 더불어 유기계 젤화제의 유변학적 특성 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2012-0008045).

참 고 문 헌

- Hermans, P.H., Gels, in Colloid Science II, Kruyt, H.R. (Ed.), Elsevier Pub. Co., Amsterdam, 1949, pp.483-494
- Michele Negri and Helmut K. Ciezki, "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, AIAA-2010-6821
- Arza Haddad, Benveniste Natan, Rimon Arieli., "Performance Assessments of a Boron Containing Gel Fuel Ramjet," 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2009, AIAA-2009-1421
- 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, AIAA-2010-7140
- R. Arnold, P. H. S. Santos, M. deRidder, O. H. Campanella, W. E. Anderson., "Comparison of Monomethylhydrazine/Hydroxypropylcellulose and Hydrocarbon/Silica G딘," 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010, AIAA-2010-0422
- Y. Solomon1, Sarah Jo DeFini, Timothe L. Pourpoint, W. E. Anderson, "Gelled MMH Hypergolic Droplet Investigation," 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011, AIAA-2011-5705
- Jacob D. Dennis, Timothee L Pourpoint and Steven F. Son. "Ignition of Gelled Monomethylhydrazine and Red Fuming Nitric Acid in an Impinging Jet Apparatus," 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011, AIAA-2011-5706
- Jennifer A. Mallory, Sarah Jo DeFini, Paul E. Sojka, "Formulation of Gelled Propellant Simulants," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010, AIAA-2010-7142
- 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
- 오정수, 전두성, 최상태, 김덕운, 최양호, 이정혁, 문희장, "인젝터 형상 변화에 따른 Gel 추진제의 유동 특성 연구," 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, 2010, pp.300-303

11. Yoon, C. Heister, S. Xia, G. Merkle, C. "Numerical Simulations of Gel Propellant Flow through Orifice," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009, AIAA-2009-5045
12. Changjin Yoon., Stephen D. Heister., Paul E. Sojka., Christopher C. Watson., Guoping Xia, and Charles L. Merkle, "Injector Flow Characteristics for Gel Propellants," 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011, AIAA-2011-5707
13. 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
14. 황태진, 이인철, 구자예, "젤 모사 추진제 삼중 충돌 분사 제트의 거시적 분열 특성 연구," 한국액체미립화학회지, 제15권, 제3호, 2010, pp.109-114
15. Anat Desyatkov, Klaus Madlener, Helmut K. Ciezki, Benveniste Natan, "Experimental Investigation of Gelled Fuel with High Vapor Pressure Species and Metal Additives," 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2008, AIAA-2008-4873
16. Jonathan D. McCabe. Dr. Millicent A. Coil. "A Graphical Spray Analysis Method for Gel Spray Characterization," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010, AIAA-2010-6823
17. 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, AIAA-2010-7124