

Technical Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2021.25.5.073>

미세입자를 첨가한 케로신 젤 추진제의 멀티 홀 핀틀 인젝터에서의 분무 이미지

황주현^a · 최명환^b · 구자예^{a,*}

Spray Image of Gelled Kerosene with Nanoparticles at Multi-hole Pintle Injector

Juhyun Hwang^a · Myeunghwan Choi^b · Jaye Koo^{a,*}

^aDepartment of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

^bDepartment of Smart Drone Convergence, Korea Aerospace University, Korea

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

ABSTRACT

This study was carried out to analyze the properties of the gel propellant and spray characteristics according to the addition of fine particles. The multi-hole diameter was 0.4 mm to induce a high shear rate, and a kerosene gel propellant was prepared using 5 wt% of the Thixatrol ST and SUS304 of 100 nm. The experiment was conducted by fixing the supply pressure in the axial direction to 0.7 MPa and adjusting the supply pressure in the radial direction from 0.7 MPa to 2.1 MPa. Due to the addition of fine particles, pressure vibration during spraying, a small TMR(Total Momentum Ratio) of up to 0.19, and a phenomenon that the spraying angle rapidly increased to more than 70 degrees occurred.

초 록

미세입자 첨가에 따른 젤 추진제의 물성 분석과 분무의 특성을 분석하고자 실험적 연구를 수행하였다. 멀티 홀의 직경을 0.4 mm로 하여 높은 전단 속도를 유도하였고, 점증제 Thixatrol ST 5 wt% 와 100 nm의 SUS304를 사용해 케로신 젤 추진제를 제작했다. 축방향의 공급압력을 0.7 MPa로 고정 시킨 후 반경방향의 공급압력을 0.7 MPa부터 2.1 MPa까지 조절하여 분무 실험을 진행하였다. 미세 입자 첨가로 인해 압력진동과 최대 0.19의 작은 TMR(Total Momentum Ratio), 그리고 분무 각도가 70도 이상으로 급격하게 커지는 현상이 발생하였다.

Key Words: Gelled Kerosene(케로신 젤 추진제), Pintle Injector(핀틀 인젝터), Multi-hole Pintle Injector(멀티 홀 핀틀 인젝터), Nanoparticle(미세입자)

1. 서 론

운 단점이 있다. 자발점화 추진제 조합으로 이루어진 액체 추진제는 독성에 유의해야하고 저장과 취급이 어려운 문제가 있다.[1] 젤 추진제를 사용했을 때 고체 추진제에 비해 높은 비추력과 정밀한 추력제어가 가능하고, 액체 추진제와 비교했을 때 높은 저장성을 가지므로 기존 추진제의 단점을 보완할 수 있다. 또한 젤 추진제에 반응성 금속 입자를 첨가했을 때 액체 추진제와 유사한 수준의 높은 밀도 비추력을 갖는 장점이 있다.

추진 시스템에 대한 보다 높은 안정성과 에너지 밀도의 필요로 젤 추진제에 대한 관심이 높아지고 있다. 기술적 문제로 인해 많은 연구가 진행되지 못했지만, 독일의 DLR과 이스라엘에서 꾸준히 연구를 진행하고 있으며[2-5] 우리나라에서도 젤 추진제에 대해 연구한 논문을 지속적으로 발표하고 있다.[7-10]

고체 추진제와 액체 추진제의 단점을 보완한 젤 추진제는 정밀한 추력조절이 가능하여 우주발사체의 안정적인 행성착륙에 사용할 수 있으며 유도무기 등의 국방 분야 무기체계에 적용할 수 있다. 반응성 금속 입자를 첨가했을 때 훨씬 높은 비추력을 낼 수 있으며, 금속 입자의 첨가로 인한 변화가 추진제의 물성과 분무에 미치는 영향을 분석하고자 본 연구를 진행하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 젤 추진제 제작

일반적으로 케로신 젤은 10 wt% 이하의 점증제를 첨가하며[11-12] 미세입자 첨가로 인한 급격한 점도 증가[13]를 고려하여 점증제와 미세입자의 농도를 결정하였다. 유기성 기반의 케로신 액체에 유기성 점증제 Thixatrol ST를 첨가해 5 wt%로 제작하였다. 금속입자를 첨가하여 고에너지의 젤 추진제를 제작하기 위해 100 nm의 SUS 입자를 10 wt% 첨가한 젤 추진제를 제작하였다. Fig. 1의 왼쪽과 오른쪽은 각각 순수한(pure) 케로신 젤 추진제와 미세입자(micro particle)를 첨가한 케로신 젤 추진제이다. 균일한 혼합을 위해

히팅 맨틀을 사용해 70 °C로 일정하게 가열시키면서 1,200 rpm에서 4시간동안 교반하였다. 교반을 한 후, 상온에 이틀이상 두어 충분한 경화과정을 거친 후에 실험에 사용하였다.

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

Fig. 2에 순수한 케로신 젤 추진제와 미세입자를 첨가한 케로신 젤 추진제의 전단속도에 따른 점도를 나타내었다. 젤 추진제는 전단속도가 가해짐에 따라 점도가 감소하는 비뉴턴 유체 중 전단 박화 유체의 특성을 가지고 있다. 비뉴턴 유체의 점성변화를 가장 일반적인 Power-law 모델링을 사용해 모사했으며, 기본 수식은 Eq. 1과 같다. τ 는 점성계수, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도, 상수 K는 초기상태의 점도를 나타내며 상수 n은 유체의 주요 인자인 유동지수를 나타낸다.

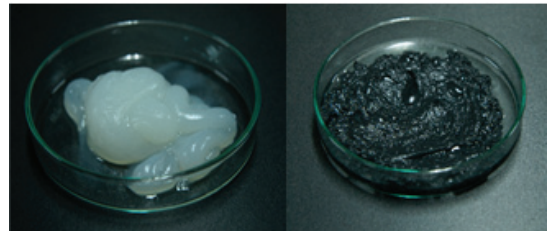


Fig. 1 Image of pure kerosene-gel and kerosene-gel with SUS particle.

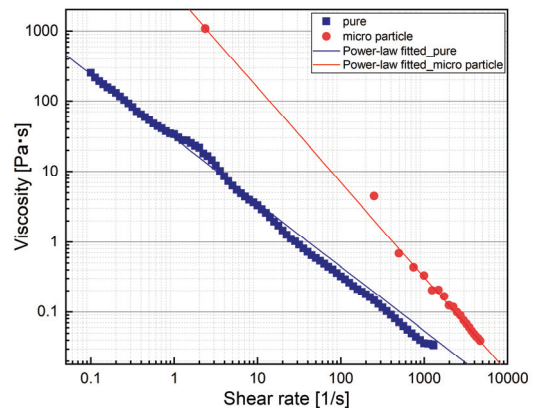


Fig. 2 Viscosity according to shear rate of pure and SUS particle gelled kerosene.

순수한 케로신 젤 추진제의 경우 상수 K 와 n 이 각각 $29.62 Pa \cdot s$, 0.087 이고, 미세입자를 첨가한 케로신 젤 추진제의 경우 $3.500 Pa \cdot s$, -0.35 이다. 고에너지 물질의 첨가로 인해 초기상태의 점도가 높아졌고, 전단속도가 가해짐에 따라 점도가 빠르게 감소하지만 순수한 케로신 젤 추진제보다 여전히 높은 점성을 가진다. 순수한 케로신 젤 추진제는 전단속도가 $1,000 s^{-1}$, 미세입자를 첨가한 케로신 젤 추진제는 $5,000 s^{-1}$ 일 때부터 점도가 $3.6 mPa \cdot s$ 로 수렴한다. 본 연구의 모든 실험 조건에서 멀티 홀에서 분무된 직후에 케로신 젤 추진제에 $30,000 s^{-1}$ 이상의 큰 전단속도가 가해지므로, 뉴턴 유체로 가정하여 해석할 수 있다.

2.2 실험장치

실험장치의 전체 개략도는 Fig. 3과 같다. 초기상태의 케로신 젤 추진제는 고체 추진제와 유사한 거동을 보이고 왁스와 같이 부서지는 특징이 있다. 케로신 젤 추진제를 일정한 압력으로 공급하기 위해 피스톤을 이용하여 공급시스템을 구축하여 안정적으로 공급하였다. 산화제로는 과산화수소를 모사하기 위해 표면장력과 점도가 유사한 물을 사용하였다. 질소를 이용해 케로신 젤 추진제와 물을 가압하였고, 레귤레이터를 이

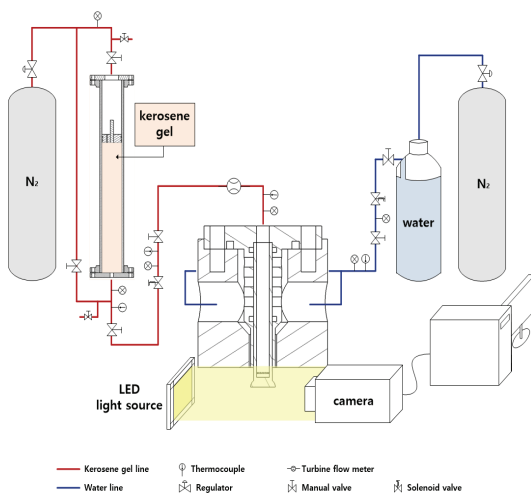


Fig. 3 Schematic of the entire experiment system.

용해 압력조건을 설정하였다.

큰 전단력을 가하여 케로신 젤 추진제가 유체 추진제와 유사한 거동을 띠기 위해 멀티 홀 핀틀 인젝터를 사용하였고, 이에 대한 세부 형상은 Fig. 4와 Table 1과 같다. 전단속도를 높이기 위해 멀티 홀의 직경을 $0.4 mm$ 로 하였고, 미립화가 잘 이루어지게 하여 분열 성능을 높였다. 젤 추진제는 액체 추진제보다 점도가 높기 때문에, 미립화와 고른 분열이 가장 중요하다. 멀티 홀의 간격에 의해 고르지 않게 분열되고 비대칭적으로 분무되는 현상을 줄이기 위해 각 층에 멀티 홀을 12개 배치하였고, 이를 이층으로 엇갈리게 설계하였다. 핀틀 팁의 끝부분에 편향판을 설계하여 케로신 젤 추진제와 물이 충돌한 후 2차

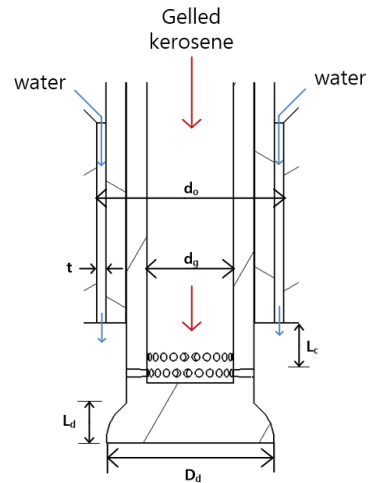


Fig. 4 Schematic of pintle injector.

Table 1. Dimension of pintle injector.

Pintle inner diameter, d_g [mm]	4.35
Outer post diameter, d_o [mm]	9.36
Pintle deflector diameter, D_d [mm]	8.35
Pintle hole diameter, D_h [mm]	1.0
Annular gap, t [mm]	0.48
Opening distance, L_c [mm]	1.7
Height of deflector, L_d [mm]	2
Number of pintle hole	14

충돌을 유도하였고, 분열의 성능을 높였다. 편향판이 산화제인 물과 직접적으로 충돌되지 않도록 편향판의 최대 직경(D_d)을 8.35 mm로 설계하였다.

2.3 실험분석방법

핀틀 인젝터의 분무 성능을 파악하기 위한 지표로 주로 사용되는 운동량비와 분무각도와 의 상관관계를 이용해 결과를 해석하였다. 무차원수 TMR(Total Momentum Ratio)은 Eq. 2와 같으며, 축 방향의 운동량 대비 반경 방향의 운동량을 뜻한다. 액체 추진제를 Continuous 형태의 핀틀 인젝터에서 분무했을 때의 분무 각도와 TMR과의 관계는 Eq. 3과 같이 제안되었으며[6], 순수한 케로신 젤 추진제를 멀티 홀 핀틀 인젝터에서 분무했을 때 Eq. 4와 같은 실험식이 도출되었다.[7] 같은 TMR 조건일 때 Eq. 3에 비해 Eq. 4에서 더 높은 분무 각도 결과가 나왔는데, 이는 continuous 형태일 때보다 멀티 홀일 때 분무 속도가 커서 반경 방향의 운동량이 크기 때문이다. 순수한 케로신 젤 추진제일 때와 비교했을 때 미세입자를 첨가한 케로신 젤 추진제의 TMR과 분무 각도의 관계를 분석하였다.

분무가 안정적으로 이루어질 때의 500장의 분무 순간 이미지를 평균화한 후에 회색조 처리를 하여 분무각도를 측정하였다. 분무각도의 정의는 다음과 같으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. Otsu의 이원화 이미지 기법을 이용해 평균화한 이미지의 경계를 처리하고, 핀틀 팁과 인접한 부분의

전체각도를 측정하여 이의 절반 값을 분무각도로 사용하였다.

$$TMR = \frac{\Sigma(\dot{m}V)_{Radial}}{\Sigma(\dot{m}V)_{Axial}} = \frac{m_{fuel} V_{fuel}}{m_{ox} V_{ox}} \quad (2)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{1 + TMR} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{1}{1 + TMR^{0.75}} \quad (4)$$

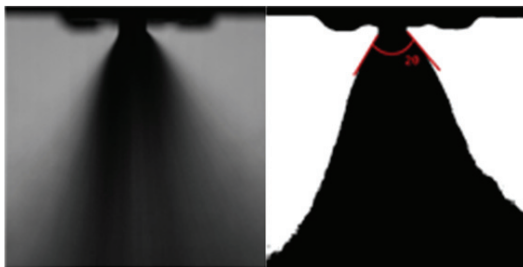
2.4 실험조건

반경 방향의 운동량 변화에 따른 분무 형상을 분석하기 위해 축 방향으로 분무되는 물의 공급 압력을 0.7 MPa로 일정하게 유지하였다. 반경 방향으로 분무되는 케로신 젤 추진제의 분무 압력을 0.12 MPa부터 0.02 MPa씩 증가시키며 실험을 진행하였고, 각 경우를 Case 1, Case 2, Case 3라 하였다. 케로신 젤 추진제가 멀티 홀에서 분무된 직후를 기준으로 하여 분무 압력과 분무 속도, 유량계수를 계산하였으며, 각 실험 조건은 Table 2와 같다.

LED광원을 이용해 백라이트 가시화 기법을 사용하여 분무를 가시화하였다. 고속카메라를 이용해 초당 10,000 frames, 셔터 스피드 1/70,000 초, 해상도 512*512의 조건으로 촬영했으며, 분무

Table 2. Experimental conditions.

	Case 1	Case 2	Case 3
Water pressure [MPa]	0.7		
Kerosene-gel pressure [MPa]	0.7	1.3	2.1
Kerosene-gel spray pressure [MPa]	0.12	0.14	0.16
Water spray velocity [m/s]	20.7		
Kerosene-gel spray velocity [m/s]	5.96	8.82	12.01
Flow coefficient	0.148	0.219	0.299
TMR	0.046	0.102	0.189



(a) Average image (b) Binary image

Fig. 5 Average and binary of the spray image.

가시화를 통해 분무의 전체적인 형상과 분열 정도, 분무 각도를 분석하였다.

3. 실험 결과

Fig. 6은 SUS입자를 첨가한 케로신 젤 추진제의 분무 압력 변화그래프이다. 순수한 케로신 젤 추진제는 안정적으로 공급되는 것과는 달리, 미세입자가 첨가된 케로신 젤 추진제는 전체적으로 공급 압력에 진동이 발생했으며, 도중에 크게 압력진동이 발생하면서 불안정한 분무가 이루어졌다.

모든 실험 조건에서 분무 진동이 발생했으며, 그 때의 분무 형상을 0.0075초 간격으로 Fig. 7

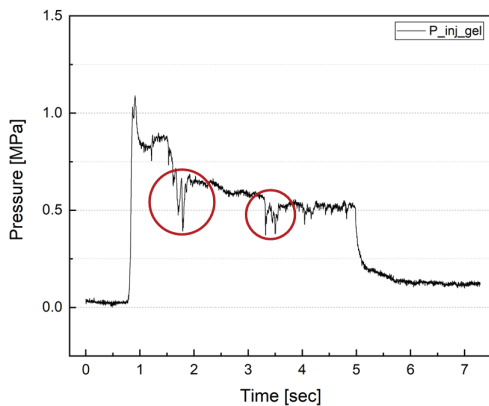


Fig. 6 Pressure fluctuation of gelled kerosene with SUS particle.

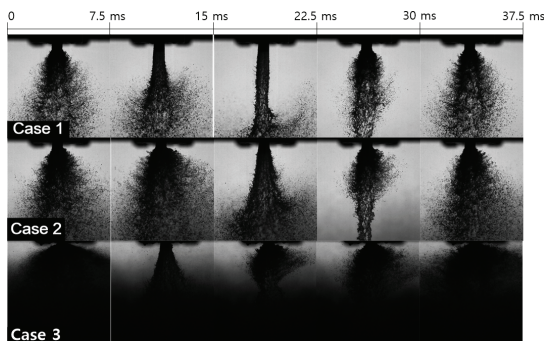


Fig. 7 Spray fluctuation image of gelled kerosene with SUS particle.

에 나타내었다. 젤에 충분한 전단속도가 가해지면 내부 구조가 변하여 액체와 같은 형상을 보이지만, 미세입자가 사이의 간격이 불규칙해지며, 미세입자의 첨가율이 높을수록 불규칙성이 커지는 경향이 있다.[9] 미세입자가 고르게 분포되지 못한 영향으로 불안정한 분무가 발생하였고, 2 MPa 이상의 고압 조건으로 케로신 젤 추진제를 공급했음에도 해결되지 않았다.

TMR에 따른 분무 각도를 Fig. 8에 나타내었다. Eq. 3와 Eq. 4를 Fig. 8에 각각 파란색 점선과 검정색 실선으로 표시하였고, 미세입자를 첨가한 케로신 젤 추진제의 실험 결과를 검정색 점으로 나타내었다. 유사한 공급압력 조건 하에서 순수한 케로신 젤 추진제를 사용했을 때에는 0.3 이상의 TMR값을 보였지만[7] 미세입자를 첨가했을 때에는 0.2 이하의 작은 값을 보인다. 미세입자를 첨가하였을 경우 젤의 네트워크 구조가 끊어지며 분무 속도가 줄어들게 되어[10] 반경방향에 대한 운동량이 줄어들기 때문에 순수한 케로신 젤일 때보다 작은 TMR값을 가지게 된다. 미세입자를 첨가했을 때 젤의 밀도가 증가하고 충돌 에너지가 증가하여[10] 순수한 케로신 젤에 비해 분무 각도가 커진 것으로 보인다. 고압의 공급조건에서는 70도 이상의 분무 각도를 보이며 실험식인 Eq. 4와 매우 큰 차이를 보였다. 또한 불규칙한 미세입자의 배열로 인해 압력 진동과 큰 분무 각도를 보이며 불안정한 분무가 이루어졌다.

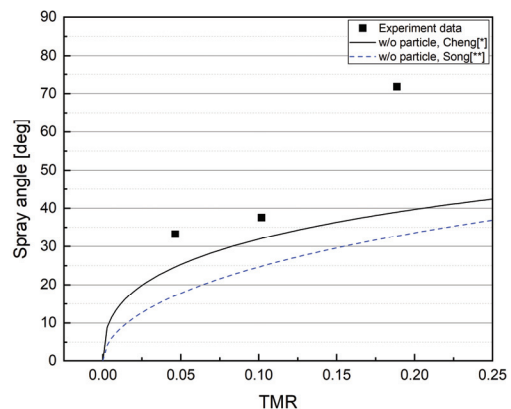


Fig. 8 Spray angle according to TMR.

4. 결 론

점중제 Thixatrol ST 5 wt%를 첨가해 만든 케로신 젤에 미세입자인 100 nm의 SUS304를 첨가했을 때의 분무 특성을 파악하기 위한 실험적 연구를 진행하였다. 분무 직경 0.4 mm의 멀티홀 핀틀 인젝터를 사용했으며, 반경방향으로 분무되는 케로신 젤 추진제의 압력만 조절하여 실험을 진행하였다. 미세입자의 불규칙한 배열로 인해 압력진동이 발생하고 큰 분무 각도를 보였다. 미세입자의 영향으로 젤의 네트워크 구조가 끊어지며 분무 속도가 감소하였고, 순수한 케로신 젤과 비교했을 때 더 낮은 TMR값을 보였다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 4단계 두뇌한국21사업(과제번호 : 5199990714521)의 지원 및 개인 기초연구지원사업(2016R1D1A1B04934852)의 지원을 받아 작성되었습니다.

References

1. Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket propulsion elements*, 9th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 2016.
2. Hodge, K., T. Crofoot, and S. Nelson. "Gelled propellants for tactical missile applications," *35th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Los Angeles, C.A., U.S.A., p. 2976, June 1999.
3. Rahimi, Shai, and Benveniste Natan. "Atomization characteristics of gel fuels," *34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, Cleveland, O.H., U.S.A., p.3830, July 1998.
4. Kirchberger, Christoph U., et al. "Overview of recent gel propellant activities at DLR Lampoldshausen," *2018 Joint Propulsion Conference*, Cincinnati, O.H., U.S.A., p. 4855, July 2018.
5. Ciezki, Helmut K. and Karl Wieland Naumann. "Some aspects on safety and environmental impact of the German green gel propulsion technology," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 41, No. 3, pp. 539-547, 2016.
6. Cheng, Peng, et al. "On the prediction of spray angle of liquid-liquid pintle injectors," *Acta Astronautica*, Vol. 138, pp. 145-151, 2017.
7. Song, Wooseok, Juhyun Hwang, and Jaye Koo. "Atomization of gelled kerosene by multi-hole pintle injector for rocket engines," *Fuel*, Vol. 285, 119212, 2021.
8. Jyoti, Botchu VS, and Seung Wook Baek. "Rheological Characterization of Metalized and Non Metalized Ethanol Gel Propellants," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 39, No. 6, pp. 866-873, 2014.
9. Baek, Gookhyun, and Chongyoup Kim. "Rheological properties of Carbowol containing nanoparticles," *Journal of Rheology*, Vol. 55, No. 2, pp. 313-330, 2011.
10. Baek, Gookhyun, et al. "Atomization characteristics of impinging jets of gel material containing nanoparticles," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 166, No. 21-22, pp. 1272-1285, 2011.
11. Madlener, Klaus, and Helmut Ciezki. "Some aspects of rheological and flow characteristics of gel fuels with regard to propulsion application," *45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Denver, C.O., U.S.A., Aug. 2009.
12. Padwal, Manisha B. and D. P. Mishra. "Interactions among synthesis, rheology, and atomization of a gelled propellant," *Rheologica Acta*, Vol. 55, No. 3, pp. 177-186,

2016.

13. Jejurkar, Swarup Y., Geetanjali Yadav, and D. P. Mishra. "Visualizations of sheet breakup of non-Newtonian gels loaded with nanoparticles," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 100, pp. 57-76, 2018.