

인젝터 형상 변화에 따른 Gel 추진제의 유동 특성 연구

오정수* · 전두성* · 최상태** · 김덕윤** · 최양호** · 이정혁** · 문희장***

Study of Flow Characteristics of Gel Propellant through Various Injector Geometries

Jeongsu Oh* · Doosung Jeon* · Sangtae Choi** · Deokyoon Kim** · Yangho Choi** · Jeonghyuk Lee** · Heejang Moon***

ABSTRACT

The present study investigates the flow characteristics of simulant gel propellant(carbopol 0.5%wt) in a variety of injectors. Rheological data for gel propellant has been measured and injector flow characteristics for plain-orifice, chamfered-orifice and venturi type injector have been numerically analyzed. The apparent viscosity of plain-orifice and chamfered-orifice have tendency to increase along axial direction, whereas for venturi type injector, low viscosity has been achieved in the injector flow. This phenomenon was clearly pronounced as Reynolds number is increased.

초 록

다양한 형상의 인젝터 내부 젤 추진제 유동을 수치적으로 연구하였다. 모사 젤 추진제의 유변학적 물성치를 측정하고 plain-orifice, chamfered-orifice 및 venturi 형상 인젝터의 유동 특성을 분석하였다. Plain-orifice 및 chamfered-orifice 인젝터의 경우 하류방향으로 유동이 진행할수록 점도가 높아지는 특성이 나타났으며 Venturi 형상의 경우 인젝터 내부 유동에서 낮은 점도가 지속적으로 유지됨을 알 수 있었다. Reynolds 수가 증가할수록 이러한 경향이 뚜렷하게 나타나는 것이 확인되었다.

Key Words: Gel Propellant(젤 추진제), Non-Newtonian Fluid(비뉴턴유체), Power-Law Model (멱법칙 모델), Venturi Injector(벤투리 인젝터), Shear-Thinning Behavior(전단담화거동)

1. 서 론

젤(Gel) 추진제는 젤화 작용제를 첨가함으로써

유변학적 물성이 변화하게 되는 액체 연료 및 산화제이다. 젤 추진제는 다양한 고체 입자를 첨가함으로써 순수한 액체 연료만으로 얻을 수 없는 고밀도와 고발열량을 얻을 수 있고, 젤화제를 첨가하여 액체 상태의 연료 및 산화제를 젤화시킴으로써 보관성을 향상시켜 누출에 의해서 발생하는 안전사고 문제를 방지할 수 있고 독성을

* 한국항공대학교 대학원

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail: hjm@kau.ac.kr

줄일 수 있다. 그러나 추진제의 점도가 증가함에 따라 분사 유체의 미립화 성능은 떨어지게 된다. 따라서 분무는 보다 미세하지 못하게 되어 엔진 성능이 감소될 수 있으며, 따라서 미세하게 미립화하기 위한 고압이 요구된다.

젤 추진제 시스템의 유변학적 거동을 규명하기 위해서 Ostwald and de waele[1]는 지수법칙 유변학 구성방정식을 제안하였다. 젤의 점도가 변형률에 영향을 받기 때문에, 인젝터 형상 변화에 따라 분사 시 높은 변형률을 가하여 점도를 낮추고 인젝터 출구 부근에서 액화시키는 것이 가능하다. 2000년대부터 국외에서는 수축 인젝터 및 오리피스 인젝터에서의 젤 추진제 유동 특성 연구가 수행되었다[2,3]. Venturi Injector의 경우 Chun. K. S. et al.[4]에 의해 보다 효과적인 미립화와 기화 특성이 나타난다고 밝혀진 바 있으나 이는 뉴턴유체에 국한된 결과로서 비뉴턴유체에 대한 결과는 대단히 미흡한 것으로 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 비뉴턴유체에 대한 Venturi type 인젝터와 오리피스 type의 인젝터, chamfer line이 적용된 인젝터를 설계하고 각각의 유동 특성을 수치적으로 해석하였다.

2. 모사 젤 추진제 제작 및 유동 특성 수치해석

2.1 모사 젤 추진제의 유변학적 특성 분석

추진제의 유동 특성 연구를 위해 Ionized Water 98.5wt, 아크릴산의 중합 폴리머 계열인 Carbopol 941 0.5wt, NaOH 10% 농축액 1wt를 혼합하여 pH 8.5로 조절한 후 모사 추진제를 제작하였다[5]. 젤 추진제의 점도는 Ostwald and de waele power-law model ($\tau = K\dot{\gamma}^n$)를 이용하였으며 컨시스턴시 지수와 power-law 지수를 측정하였다. 25°C에서 모사 젤 추진제의 물성치를 Table 1에 정리하고 Fig. 1과 같이 도식화하였다.

Table 1. Power-law data of simulant gel propellant

Gel Type	$K(Pa \cdot s^{-n})$	n
Water-Gel	12.4379	0.2753

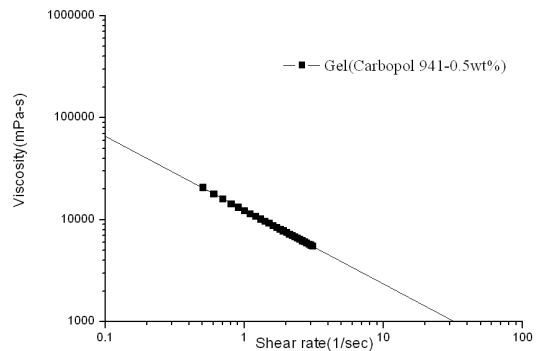


Fig. 1 Rheological data of gel propellant

2.2 수치해석 조건

Figure 2는 본 연구에서 사용한 세 가지 인젝터 중 venturi 형상 인젝터의 격자를 나타내고 있으며 약 24만 개의 정렬격자로 이루어져 있다. Table 2는 사용된 인젝터들의 형상인자를 보여 주고 있다.

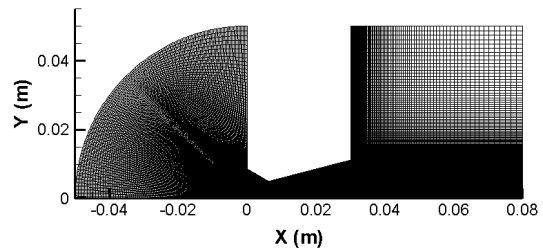


Fig. 2 Grid of venturi type injector

Table 2. Test matrix for the injector geometry

	Plain Orifice	Chamfered Orifice	Venturi
Injector Length	30mm	30mm	30mm
Injector Diameter	10mm	10mm	10mm
Convergence Angle	x	30°	30°
Divergence Angle	x	x	15°
Convergence Length	x	6mm	6mm
Divergence Length	x	x	24mm

인젝터의 길이와 직경의 비율인 L/D 비를 3으로 고정시켰으며 확산부의 길이가 수축부의 길이의 4배가 되도록 설계하였다. 수축부와 확산부의 각도는 각각 30°와 15°로 설정하였으며 같은 조건에서 단면적의 변화가 없는 plain-orifice

type 인젝터와 수축부만 존재하는 chamfered-orifice type 인젝터의 유동 특성을 함께 비교하였다.

유량 크기에 따른 유동 특성을 분석하기 위하여 인젝터 직경을 기준으로 Reynolds 수가 5000인 경우와 20000인 경우에 대해 해석을 수행하였다. Power-law model에 대한 Reynolds 수는 수정된 Reynolds 식을 사용한다[6].

$$Re_{gen} = \frac{\rho D_1^n U_1^{2-n}}{k} 8 \left(\frac{n}{6n+2} \right)^n \quad (1)$$

비뉴턴유체의 유동은 수렴성, 정확성과 타당성이 검증된 범용코드 FLUENT 6.3을 이용하여 해석하였다. 인젝터 내부 유동은 2차원 축대칭, 층류, 정상 유동으로 해석하였으며 SIMPLE 알고리즘을 통하여 압력과 속도를 해석하였다. 압력항 및 모멘텀항은 2차 정확도를 가지며 수렴조건은 계산의 정확도를 높이기 위하여 연속방정식과 운동량방정식에 대해 잉여값(residual)의 크기를 10^{-6} 으로 정하였다.

3. 결과 및 분석

Figure 3과 Fig. 4는 인젝터 내부 Reynolds 수가 각각 5000과 20000일 때 plain-orifice, chamfered-orifice, 그리고 venturi type 인젝터의 점도 특성을 보여준다.

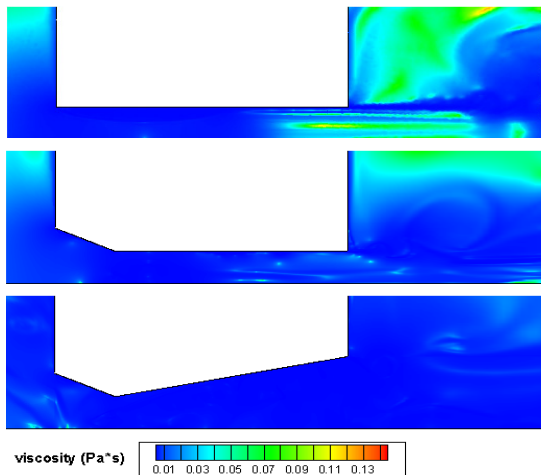


Fig. 3 Viscosity distributions for $Re = 5000$

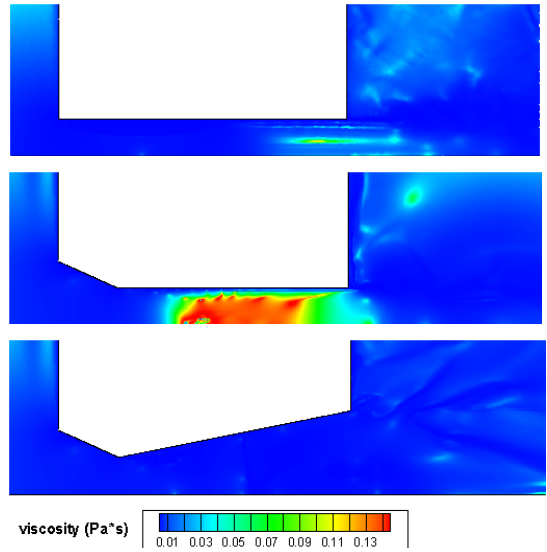


Fig. 4 Viscosity distributions for $Re = 20000$

세 가지 형상 모두 인젝터 입구에서 점도가 급격히 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 Shear-thinning 유체의 특성인 변형률이 증가함에 따라 겔보기점성계수가 낮아지는 것을 검증한다. Plain-orifice type과 chamfered-orifice type의 경우 유동이 축 방향으로 진행됨에 따라 점도가 점차 높아지는 현상이 나타나고 있으나, Chamfered-orifice type의 경우 높은 Reynolds 수($Re=20000$)에서 수축부가 끝나는 지점에 상대적으로 높은 점성을 갖는 구간이 발생됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 plain-orifice에 비해 상대적으로 vena contracta 현상이 미미하여 속도 구배와 유체가속이 약한 chamfered-orifice type의 고유 영향에 기인하는 것으로 판단된다.

Figure 5와 Fig. 6은 인젝터 중심축을 기준으로 겔보기 점성계수의 축방향 값들을 도시하고 있다. $Re = 5000$ 의 경우와 $Re = 20000$ 의 경우 모두 변형률이 낮은 인젝터의 출구부인 $x = 0.03m$ 지점에서 점도가 크게 나타나는 것이 확인되었다. 반면 Venturi type 인젝터는 점도가 인젝터 전 구간에 걸쳐 상대적으로 낮게 나타났으며, 국부적으로 점도가 튀는 구간이 발생하는데 이는 Fig. 7에 도시된 높은 가속, 감속 구간의 존재와 순차적으로 발생하는 와류 현상으로 설명될 수 있다.

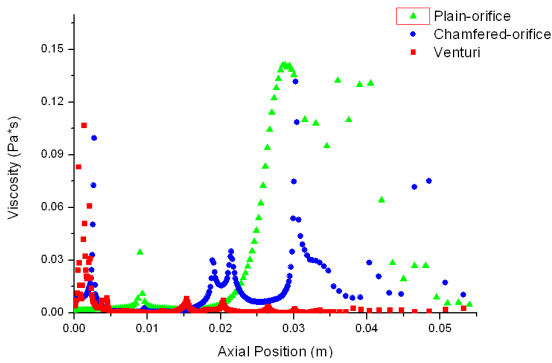


Fig. 5 Viscosity profiles at $y=0$ for $Re = 5000$

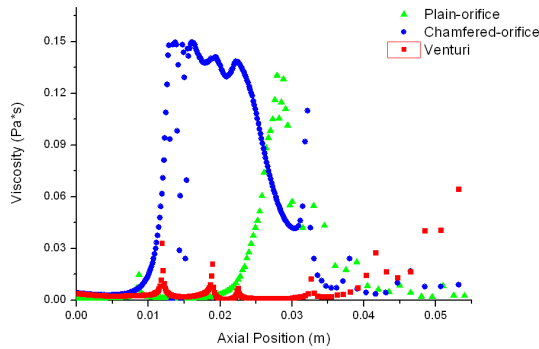


Fig. 6 Viscosity profiles at $y=0$ for $Re = 20000$

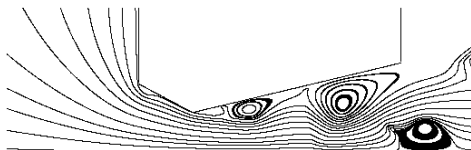


Fig. 7 Stream lines of venturi type injector for $Re = 20000$

4. 결 론

실제 젤 추진제와 유변학적 특성이 유사한 Carbopol-물 모사 젤 추진제를 제작하고 점도 특성을 측정 후 다양한 인젝터 형상에 따른 유동 특성을 분석하였다. Plain-orifice 및 chamfered-orifice 인젝터의 경우 하류방향으로 유동이 진행할수록 점도가 높아지는 특성이 나타났으며 Venturi type의 형상의 경우 인젝터 내부 유동에서 낮은 점도가 지속적으로 유지됨을 알 수 있었다. Reynolds 수가 증가할수록 이러한 경향이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Chamfered-orifice의 경우 높은 Reynolds 수에서 수축부가 끝나는 지점에 상대적으로 높은 점성을 갖는 구간이 발생됨을 알 수 있었으며, 이들 현상의 정확한 규명을 위해서는 국부 변형률의 분석이 추후 뒤따라야 할 것이다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Chojnacki, K. T. and Feikema, D. A., "Studies of Non-newtonian liquid Sheets Formed by Impinging Jets," July 1997, AIAA Paper 97-3335
2. Rahimi, S. and 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
3. Yoon, C., Heister, S., Xia, G., and Merkle, C., "Simulation of Injection of Shear-Thinning Gel Propellants through Plain-Orifice Atomizer," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010
4. Chun, K. S., Locke, R. J., Lee, C. M., and Ratvasky, W. J., "Focused Schlieren Flow Visualization Studies of Multiple Venturi Fuel Injectors in a High Pressure Combustor," AIAA 32nd Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, January 1994
5. 오정수, 박지훈, 장석필, 문희장, "U-자형 덕트에서의 Al_2O_3 나노 입자를 포함한 모사 Gel 추진제의 유동 특성 수치해석," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.377-382
6. Metzner, A. B. and Reed, J. C., "Flow of non-Newtonian fluids correlation of the laminar, transition and turbulent flow regimes," AIChEJ, 1955, pp.434-440