

U-자형 덕트에서의 Al₂O₃ 나노 입자를 포함한 모사 Gel 추진제의 유동 특성 수치해석

오정수* · 박지훈* · 장석필** · 문희장***

Flow Simulation of Simulant Gel Propellant with Al₂O₃ Nano Particles in A U-Type Duct

Jeongsu Oh* · Jihoon Park* · Seokpil Jang** · Heejang Moon***

ABSTRACT

The Present study uses non-Newtonian simulant gel propellant mixed by Water, Carbopol 941, and NaOH solution in order to analyze the gel propellant flow behavior. Rheological data have been measured and obtained prior to the analysis of flow characteristics where water-gel propellant as well as water-gel propellant with Al₂O₃ nano particles are both used. The critical Dean number were examined by numerical simulation of gel propellant in the U-shape duct flow. It is found that though gel-nano propellants have higher apparent viscosity, the critical Dean number did not showed notable difference with respect to the water-gel propellant. It is believe that this is due to the fact that the power law index of both propellants have close value, as was demonstrated by Fellouah et al.[1]

초 록

젤 추진제와 유변학적 특성이 유사한 모사 젤 추진제를 물, Carbopol 941, NaOH 농축액을 혼합하여 제작하였고, Al₂O₃ 나노 입자를 첨가하여 점도 특성을 비교하였다. 두 가지 모사 추진제의 물성치를 바탕으로 곡관 덕트 내에서의 유동특성을 수치모사하여 해석하였고 덕트에 Dean vortices가 발생하는 임계 Dean 수를 도출하였다. 젤-나노 추진제의 경우 비록 높은 겔보기 점성계수를 가지나 젤 추진제와 비교시 같은 범위의 임계 Dean 수가 도출되었다. 이는 Fellouah et al.[1]이 제시한 바와 같이 비슷한 값의 Power law 지수에 기인하는 것으로 판단된다.

Key Words: Gel Propellant(젤 추진제), Nano Fluid(나노유체), Curved Duct(곡관 덕트), Dean number(Dean 수), Secondary Flow(2차 유동)

1. 서 론

* 한국항공대학교 대학원
** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부
연락처, E-mail: hjm@kau.ac.kr

젤(Gel) 추진제는 1950년대부터 연구가 시작되었다. 1990년대에 미 육군 산하 AMCOM의

FMTI 프로그램은 젤 추진제를 적용한 tactical small motor의 비행시험 성공을 발표하였으며, 우주항공용으로 극저온 금속첨가 수소 젤 연료 등의 연구가 시작되었다[2]. 2000년대에 들어 미국 NASA에서는 젤 추진제를 Turbo-Engine-PDE(Pulse Detonation Engine)에 적용하는 연구를 진행하고 있고[3], 유럽에서는 프랑스의 CHEOPS 프로그램이 보론-슬러리 추진제를 공기흡입식 엔진에 성공적으로 적용하였으며, 이와 유사한 연구들이 독일과 영국 등에서 활발히 진행되고 있다[2].

일반적으로 젤 추진제는 연료와 산화제를 공급하여 연소시켜 추력을 얻는 액체추진기관의 저장성 및 누설 문제와 고체 추진제의 추력 조절 문제를 극복할 수 있는 대안으로 평가 받고 있다. 또한 흡입된 공기를 산화제로 이용하는 램제트 엔진, 펄스데토네이션 엔진, 젤 연료와 젤 산화제를 모두 탑재하여 점화/소화/재점화가 가능한 전략 미사일인 스마트 엔진(smart propulsion) 및 우주 추진기관에 적용이 가능하다. 최근에는 젤 추진제를 차세대 추진 방식 개념으로 고체로켓-공기 흡입식 엔진이 결합된 복합엔진에 적용하기 위한 연구 또한 진행되고 있다[4].

최근까지의 국외 연구현황은 젤 추진제의 미립화 특성 연구에 집중되어 있으나 복잡한 관내 형상에 대한 열 특성 및 유동 특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 오리피스 형상과 수축 형상의 인젝터에 대한 수치적 연구[5,6] 등이 진행 중에 있으며 non-Newtonian 유체의 특성을 갖는 젤 추진제의 유변학적 연구가 주를 이루고 있다. 국내의 젤 추진제에 대한 연구는 국외에 비해 상대적으로 미흡한 수준이며 국방과학연구소에서 고체, 액체 추진제의 대안으로서 젤에 대한 기술 개발 동향과 일부 기초 연구가 수행 중에 있는 것으로 알려져 있으며 근래에 와서 water-gel 모사 추진제의 기초 분무 특성을 연구한 사례[7,8]가 소개될 정도로 국내 젤 추진제의 연구는 미비한 실정이다.

근래에 이르러 나노 입자를 사용하여 액체 연료의 연소 효율을 향상시키는 방법이 주목되고

있다. 많은 과학자들과 기술자들은 나노유체의 열적 특성이 기존의 수 밀리미터에서 수 마이크로미터 크기를 가지는 입자를 첨가한 유체의 열적 특성과는 전혀 다른 결과를 나타내고 있다는 사실을 발견하였으며, 그 특성이 일반 유체에 비해 우수하다는 결과를 얻었다[9-13]. 젤 추진제에 첨가 물질을 사용하는 방법은 기존부터 많이 수행되었으나 나노 크기의 입자를 첨가하는 연구는 매우 부족한 실정이며, 나노 입자를 포함한 젤 추진제의 기초 물성치 특성에 대한 연구는 전혀 이루어지지 않고 있다. 특히 물성치 특성 파악을 통하여 나노 입자를 포함한 젤 추진제의 유동 특성을 규명하는 연구는 현재까지 알려진 바로는 수행되고 있지 않다.

Fellouah et al.[1]은 non-Newtonian 유체의 U-자형 덕트 내부 유동을 power-law model 및 Bingham model을 통하여 분석하였다. 본 연구진은 모사 젤 추진제를 제작하고 추진제에 나노 입자를 첨가하여 점도를 측정하여 얻어진 데이터를 기반으로 유동 특성을 분석하고자 한다.

이에 RP-1 Gel 추진제와 유변학적 특성이 유사한 모사 젤 추진제와, 모사 추진제에 Al₂O₃ 나노 입자를 첨가한 추진제의 점도 특성을 분석하며 측정된 점도의 실험치를 이용하여 사각형 단면을 갖는 U-자형 덕트 내의 유동을 분석하고자 한다. 곡관 유동 특성을 파악하는 데 주로 이용되는 무차원 변수인 Dean 수의 변화에 따라 모사 젤 추진제의 유동 특성을 분석하도록 한다.

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 제작하였고[8], 제작된 모사 젤 추진제에 Al₂O₃ 나노 입자를 부피비 0.05%로 첨가하여 분산시켜 각각의 물성치를 측정하였다.

젤 추진제의 점도는 Ostwald and de waele가

제시한 power law model($\eta = K\dot{\gamma}^n$)를 이용하였으며 컨시스턴시 지수와 power-law 지수를 측정하였다. 25°C에서 모사 젤 추진제 및 나노 입자가 첨가된 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
Water-Gel + Al ₂ O ₃ nano particle (0.05% Vol.)	18.6905	0.25

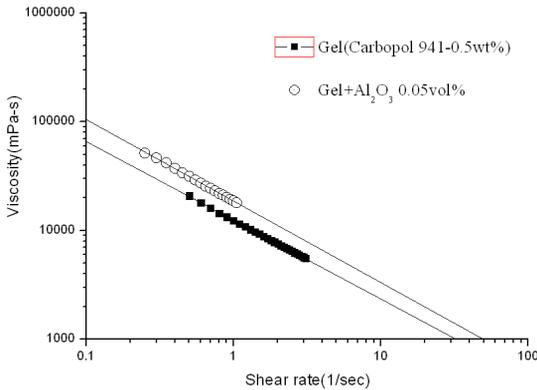


Fig. 1 Rheological data of gel propellants

Table 1과 Fig. 1에 나타나는 나노 입자를 첨가한 젤 추진제의 점도는 기존 젤 추진제의 점도에 비해 크게 나타나고, 이는 일반적인 나노 유체의 경우 기본 유체의 점도보다 크게 나타나는 경향과 일치함을 알 수 있다.

2.2 계산 격자 및 경계조건

Figure 2는 본 연구에서 사용한 덕트 형상 및 좌표계를 나타낸다. 계산 격자는 GAMBIT을 통하여 생성하였으며, 약 65만 개의 정렬격자로 이루어져있다. 덕트의 종횡비 a/b 는 $a/b=8$ 을 선택하였으며, 덕트의 곡률반경 R_c 와 수력지름

$D_h = \frac{2ab}{a+b}$ 의 비 R_c/D_h 는 10을 택하였다.

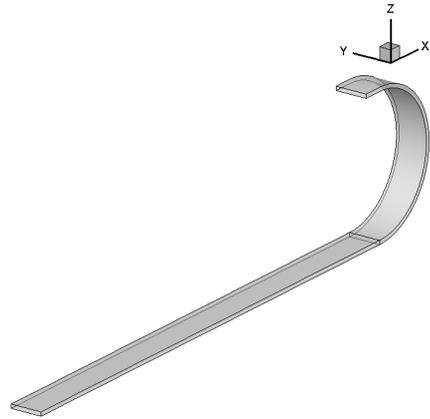


Fig. 2 Schematic of curved duct

입구에서 형성된 균일 유동이 긴 직관 유입부를 거쳐 곡관부로 유입되면, U-자형의 180° 곡관부를 거쳐 짧은 직관을 통하여 출구로 빠져나가기 위해 경계조건이 적용되어있다. 입구와 출구를 제외한 나머지 구간은 모두 벽면 경계조건으로 설정하였다.

본 연구는 수렴성, 정확성과 타당성이 검증되는 상용코드 FLUENT 6.3을 통하여 수치해석하였다. 3차원 층류, 정상 유동으로 해석하였으며 SIMPLE 알고리즘을 통하여 압력, 속도를 계산하였다. 압력항은 2차 정확도를 갖도록 해석하였으며 운동량방정식은 곡관 유동에 적합한 것으로 알려진 QUICK scheme을 사용하여 계산하였다. 수렴조건은 계산의 정확도를 높이기 위하여 잉여값(residual)의 크기가 연속방정식, 운동량방정식에 대하여 10^{-6} 일 경우에 수렴하는 것으로 적용하였다.

2.3 Dean 불안정 해석

곡면을 따라 흐르는 유동에서 원심력과 경계층의 상호작용으로 2차 유동이 발생하는데, Dean[14,15]은 이러한 유동을 수학적으로 분석하여, 유동을 좌우하는 무차원 변수(Dean number)를 정의하였다.

$$De = \frac{U_m D_h}{\nu} \sqrt{\frac{D_h}{R_c}} \quad (1)$$

여기서 U_m 은 유동의 평균 속도, ν 는 동점성계수이며 수력지름 대비 곡률반경 D_h/R_c 가 고정된 상태에서 Reynold수 변화에 의한 Dean수를 변화시키는 방법으로 해석을 하였다. 직사각형 단면을 갖는 덕트에서의 power-law fluid에 대한 Reynold수는 Delplace와 Leuliet[16]가 제안한 다음의 식을 적용하였다.

$$Re = \frac{\rho U_m^{2-n} D_h^n}{K[(24n + \xi)/(24 + \xi)n]^n \xi^{n-1}} \quad (2)$$

ρ 는 Non-newtonian 유체의 밀도, K 는 power law의 컨시스턴시 지수, n 은 power law 지수를 나타내며, ξ 는 덕트의 종횡비에 따른 무차원 변수로 아래의 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Dimensionless geometrical parameter ξ proposed by Delplace and Leuliet[16]

b/a	1	1.33	4	5	8	∞
ξ	7.113	7.238	7.774	9.116	9.787	12

Figure 3는 Fellouah et al.이 참고문헌 [1]에서 소개한 정사각 덕트와 종횡비가 큰 덕트내에서의 Dean 불안정을 나타내고 있다.

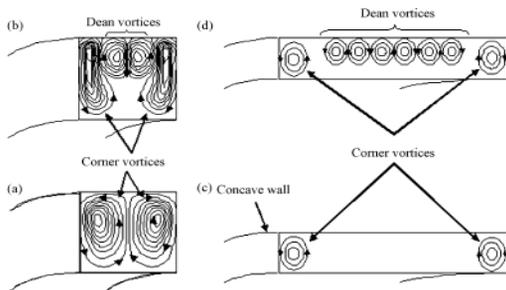


Fig. 3 Schematic of the various vortices in curved channels. (a and c) Flow without instability; (b and d) flow with Dean instability[14]

일반적으로 곡관내 유동에서는 Fig. 3(a),(c)와 같이 양쪽 끝단에서 corner vortices가 생성되나, 일정 Dean 수 이상에서는 Fig. 3(b),(d)와 같이 중앙 부분에 Dean vortices가 형성되어 불안정을

일으키게 된다. Dean vortices를 확인하는 방법은 helicity를 통한 분석과 axial velocity gradient를 통한 분석이 가능하며, 본 연구에서는 각 case의 단면에서의 helicity를 확인하는 방법을 사용하도록 한다.

Helicity는 vorticity와 속도의 내적으로 정의되며 다음의 식으로 나타난다.

$$H = (\nabla \times \vec{V}) \cdot \vec{V} \quad (3)$$

3. 결과 및 분석

Figure 4와 Fig. 5은 나노 입자가 첨가되지 않은 순수 모사 젤 추진제와 나노 입자가 첨가된 모사 젤 추진제의 $\theta = 180^\circ$ 위치에서의 vortices 형상을 각각 도식화하였다.

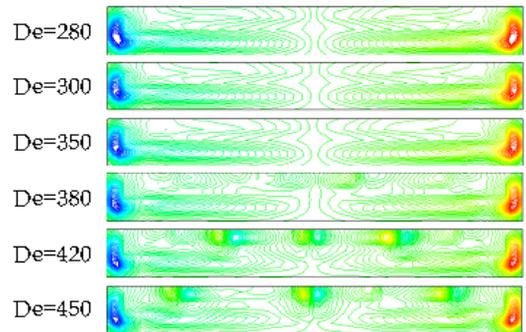


Fig. 4 Helicity magnitude at $\theta = 180^\circ$, water-gel w/o nano-particles (Figure 상단 : concave wall)

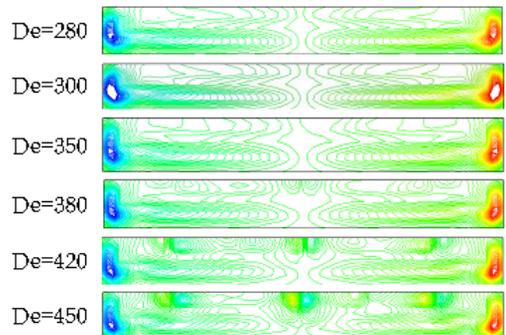


Fig. 5 Helicity magnitude at $\theta = 180^\circ$, water-gel with nano-particles (Figure 상단 : concave wall)

Figure 4와 Fig. 5 두 경우 모두 Dean 수가 약 380일 때 중앙 부분에서 Dean vortices가 발생함을 알 수 있다. Dean수가 증가함에 따라 덕트의 양쪽 끝단에서 반대 방향의 corner vortices가 점차 덕트의 중앙으로 발달하며 임계점에 이르러 Dean vortices가 형성이 됨을 확인할 수 있었다. 임계 Dean수에서 생성된 Dean vortices는 Dean수가 증가함에 따라 덕트의 양 끝단을 향하여 이동하고, 새로운 vortices가 덕트 중앙에 생성되는 것이 되풀이됨이 확인되었다.

Figure 6은 일정 Dean 수에서 각각 0° , 90° 위치별로 vortices 분포를 나타낸다. $\theta = 180^\circ$ 에서 Dean 수가 약 380일 때 Dean 2차 유동이 발생하였고, 90° 와 0° 에서는 이보다 높은 $De = 450$ 에서도 Dean 2차 유동이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 U-자형 곡관 덕트에서 곡관 후류에 불안정성이 크게 발생하는 것을 의미한다.

Figure 7은 동일 Dean수에서 나노 입자의 첨가 유무에 따른 $\theta = 180^\circ$ 위치의 helicity 크기를 나타내었다. 나노 입자가 첨가된 모사 젤 추진제가 높은 점성을 가지고 있으므로, Reynold수의 함수인 Dean수가 동일할 경우 점성이 높은 추진제에서 더 큰 helicity를 보인다.

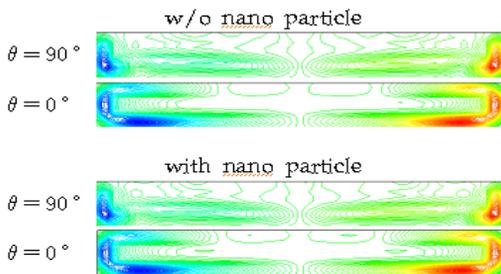


Fig. 6 Helicity magnitude at $De=450$ (Figure 상단 : concave wall)

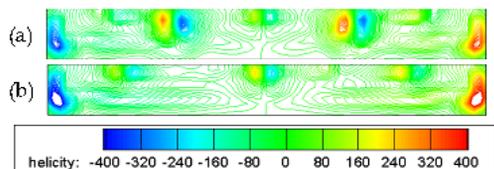


Fig 7. Helicity magnitude at $De=450$, $\theta = 180^\circ$; (a) with nano particles, (b) without nano particles (Figure 상단 : concave wall)

4. 결 론

젤(Gel) 모사 추진제에 첨가된 Al_2O_3 나노 입자를 분산시켜 젤-나노 추진제를 제작하였다. 측정된 젤-나노 추진제의 걸보기 점성계수가 순수 젤 추진제에 비해 높게 나옴으로써 점도가 더 큰 것으로 확인되었다. 젤 추진제를 power-law 점도 모델을 사용하여 U-자형 덕트 내부에서의 유동 특성을 파악하였다. 일반화된 Reynold수와 Dean수를 통해 해석을 수행한 결과 덕트 양 끝단에 존재하는 corner vortices가 Dean 수의 증가에 따라 덕트 중앙으로 발달하여 약 380의 Dean 수에서 2차 유동(Dean vortices)을 발생시켰고, 이러한 Dean 2차 유동은 점차 덕트 양 끝단으로 진행하면서 중앙에 새로운 Dean 2차 유동을 생성하는 경향을 나타내었다. 곡관 덕트에서의 불안정은 주로 곡관의 후류에 발생하는 것으로 확인되었으며, Fellouah et al.[1]이 제시한 power-law 지수 n 상승에 따른 임계 Dean수의 감소 효과가 증명되었다.

참 고 문 헌

1. Fellouah, H., Castelain, C., Ould-며-Moctar, A., and Peerhossaini, H., "The Dean instability in power-law and Bingham fluids in a curved rectangular duct," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 165, 2010, pp.163-173
2. Natan, B. and Rahimi, S., "The Status of Gel Propellants in Year 2000," in *Combustion of Energetic Materials*, 2001, pp.172-194
3. Bryan, P., John, J., Kevin, B., and Kim, K., "Metalized Gelled Propellants Combustion Experiments in a Pulse Detonation Engine," NASA/TM2006-214119, 2006
4. 한정식, 정병훈, "램제트용 연료의 특성연구," 국방과학연구소, TEDC-121-041238, 2004
5. 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
6. 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
 7. 정병훈, 고승원, 황갑성, 한정식, 홍명표, "슬러리와 젤 추진제의 기술개발 동향," 한국추진공학회 2007년도 학술대회 논문집, 2007, pp.168-171
 8. 황태진, 이인철, 김상선, 구자예, "Water-Gel 모사 추진제의 충돌 분무 특성 연구," 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 2009, pp.11-14
 9. Eastman, J. A., Choi, S. U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J., "Anomalous increased effective thermal conductivity of ethyleneglycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," Appl. Phys. Lett, Vol. 78, 2001, pp.718-720
 10. Choi, S. U. S., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F. E., and Grulke, E. A., "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions," Appl. Phys. Lett., Vol. 79, 2001, pp.2252-2254
 11. Patel, H. E., Das, S. K., and Sundararajan, T., "Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle base nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects," Appl. Phys. Lett., Vol. 83, 2003, pp. 2931-2933
 12. Jang, S. P., and Choi, S. U. S., "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids", Appl. Phys. Lett., Vol. 84, 2004, pp. 4316-4318
 13. You, S. M., Kim, J. H., and Kim, K. H., "Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer," Appl. Phys. Lett., Vol. 83, 2003, pp. 3374-3376
 14. Dean, W. R., "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," Proc. K. Soc. London Ser, A25, 1927, pp.208-223
 15. Dean, W. R., "The Streamline Motion of Fluid in a Curved Pipe," Philos. Mag., Vol. 30, 1928, pp.673-693
 16. Delplace, F. and Leuliet, J. C., "Generalized Reynolds number for the flow of power law fluids in cylindrical ducts of arbitrary cross-section," Chem. Eng. J. Biochem. Eng. J. 56 (2), 1995, pp.33-37