

研究論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.3.047>

Al₂O₃ 나노입자가 젤(Gel) 추진제의 곡관 유동특성에 미치는 연구

오정수* · 문희장**†

Flow Characteristics Investigation of Gel Propellant with Al₂O₃ Nano Particles in a Curved Duct Channel

Jeongsu Oh* · Heejang Moon**†

ABSTRACT

Curved duct channel flow characteristics for non-Newtonian gel fluid is investigated. A simulant gel propellant mixed by Water, Carbopol 941 and NaOH solution has been chosen to analyze the gel propellant flow behavior. Rheological data have been measured prior to the flow analysis where water-gel propellant and water-gel propellant with Al₂O₃ nano particles are both used. The critical Dean number examined by the numerical simulation in the U-shape duct flow reveals that although water-gel-nano propellants have higher apparent viscosity, the critical Dean number do show no notable difference for both the two gel propellant. It is found that the power-law index may be a dominant parameter in determining the critical Dean number and that the gel with particles addition may be more vulnerable to Dean instability.

초 록

본 연구에서는 곡관 채널에서의 비뉴튼 젤 추진제의 유동 특성에 대해 연구하였다. 물을 기본유체로 하는 모사젤을 Carbopol 941 젤화 작용제와 NaOH 농축액을 혼합하여 제작하였으며 입자 유무에 따른 유동 특성을 파악하기 위해 Al₂O₃ 나노 입자가 첨가된 젤을 제작하여 두 젤 추진제간의 유변학적 특성을 비교하였다. 두 모사젤에 대해 U-자형의 곡관부 위치별 유동특성과 Dean 와류(vortices)의 경향은 상이하였으나 나노 입자가 첨가된 모사젤 추진제의 경우 높은 컨시스턴시 지수에도 불구하고 두 모사젤 모두 비슷한 범위의 임계 Dean 수를 도출하였다. 나노 입자 첨가 유무와 무관하게 power-law 지수 값이 임계 Dean 수를 결정하는데 주요 변수임을 판단할 수 있었으나 나노입자가 첨가된 젤의 경우 Dean 와류 강도의 변동폭이 상대적으로 크다는 결론을 내릴 수 있었다.

Key Words: Gel Propellant(젤 추진제), non-Newtonian Fluid(비뉴튼유체), Dean Vortices(Dean와류), Curved Duct(곡관 덕트), Dean Number(Dean 수), Secondary Flow(2차 유동)

접수일 2013. 4. 9, 수정완료일 2013. 5. 16, 게재확정일 2013. 5. 22

* 정회원, (주)대주기계 유체기계기술연구소

** 중신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

† 교신저자, E-mail: hjmoon@kau.ac.kr

1. 서 론

젤 추진제(gel propellant)는 액체 상태의 추진

제에 젤화 작용제(gelling Agent)를 첨가하여 얻을 수 있는 액체와 고체 중간 단계의 비뉴턴(non-Newtonian) 물질로서 전단박화(shear thinning) 성질을 갖는 젤 상태의 연료 및 산화제를 일컫는다[1]. 1980년대 미 육군 산하 FMTI(Future Missile Technology integration Program)는 젤 추진제를 적용한 전술소형모터(tactical small motor)의 비행시험 성공을 발표하였으며 발사체용으로 금속첨가 극저온 수소 젤 연료 등의 연구[2]가 시작되었다. 2000년대에 들어 미국의 NASA에서는 젤 추진제를 PDE(Pulse Detonation Engine)에 적용하는 연구[3]가 진행되었고 유럽에서는 프랑스의 CHEOPS 프로그램이 보론-슬러리 추진제를 공기흡입식 엔진에 성공적으로 적용하였으며 이와 유사한 연구[2-4]들이 독일, 영국, 이스라엘 등에서 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.[4]이 수행한 바 있다.

근래의 국외 연구현황은 다양한 젤 추진제의 미립화 특성[5-7]에 집중되어 있으며 일부, 오리피스 형상에 대한 수치적 연구[8, 9]와 나노입자가 첨가된 젤 추진제의 유변학적 연구[10, 11]가 주를 이루고 있다.

국내의 젤 추진제에 대한 연구는 국외에 비해 상대적으로 미흡한 수준이지만 수년전 국방과학연구소에서 국내 최초의 젤 추진제 관련 연구[12, 13]가 수행되었다. 최근에는 water-gel 모사 추진제의 기초 분무 특성 및 오리피스 형상에 대한 연구[14, 15], 혼합방법에 따른 모사젤 제작 연구[16]와 케로신 기반 젤 연료의 유변학적 연구[17]와 더불어 SUS 나노 입자를 포함하는 나노-젤 추진제의 국내 연구가 Baek[18]에 의해 수행된 바 있다. 많은 연구자들은 나노유체의 열적 특성이 마이크로 크기의 입자를 첨가한 유체의 열적 특성과는 다르다는 사실을 발견하였으며, 그 특성이 일반 유체에 비해 우수하다는 기초 연구 결과를 얻었다[19-23]. 나노 입자를 첨가한 근래의 국외 연구현황은 나노-젤 추진제의 미립

화 특성 연구에 집중되어 왔으나 실제 많은 기관 내에 높은 열전달과 부피 감소를 위해 적용되는 90°(elbow 관) 및 180°(U자 관) 곡관에 대한 젤 추진제의 유동 특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다. 이러한 곡관을 통과하는 젤 유체의 유동 거동에 대한 연구는 Fellouah et al.[24] 및 Hammad et al.[25]을 들 수 있다. Fellouah et al.은 비뉴턴유체의 U-자형 덕트 내 부유동을 power-law model 및 Bingham model을 통해 해석하였으며 젤화제 함유량에 따른 임계 Dean수(critical Dean number)의 경향을 분석하였다.

이에 본 연구에서는 모사젤 추진제와 모사젤 추진제에 나노 입자를 첨가하여 확보된 유변학적 데이터를 기반으로 U-자형 곡관 내 젤 추진제 및 나노-젤 추진제의 유동특성을 비교하여 두 추진제간의 Dean 와류(Dean vortices) 특성을 수치해석적으로 분석하고자 한다. RP-1 젤 추진제와 유변학적 특성이 유사한 모사젤 추진제, 그리고 모사젤 추진제에 Al_2O_3 나노 입자를 첨가한 나노-젤 추진제를 제작하였으며 종횡비가 큰 직사각형 단면을 갖는 덕트 내 유동을 분석하여 곡관 유동 특성을 파악하는 데 주로 이용되는 무차원 변수인 Dean 수를 기반으로 나노 입자 유무에 따른 젤 추진제의 유동 특성을 분석하였다.

2. 모사젤 추진제의 유변학 특성 및 Dean 와류 해석

2.1 모사젤의 유변학적 특성

모사젤 추진제의 유동 특성 연구를 위해 Ionized Water 98.5%wt에 아크릴산의 중합 폴리머 계열인 Carbopol 941 0.5%wt와 NaOH 10% 농축액 1%wt를 혼합하여 pH 8.5로 조절한 후 모사젤 추진제를 제작하였다[14]. 또한, 모사젤 추진제에 부피비 0.05%의 Al_2O_3 나노 입자를 첨가하여 나노-젤 추진제를 제작하였으며 두 모사젤의 물성치를 측정하였다. 부피비 0.05%의 낮은 값을 사용한 이유는 두 모사젤 간의 밀도를 비슷하게 유지시키기 위함이며 나노 입자 유무에

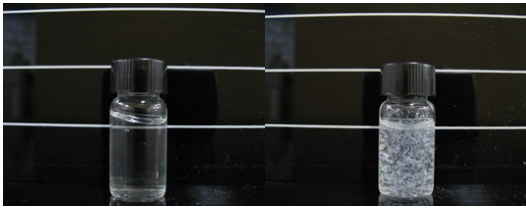


Fig. 1 Simulant gel propellants;
(Left : w/o Nano particles,
Right : with Nano Particles)

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

따른 주요 영향만을 간과하기 위해 채택되었다. Fig. 1의 두 용액은 본 연구를 위해 제작된 모사젤 추진제로서 각각 나노 입자를 포함한 추진제와 포함하지 않은 추진제를 나타내고 있다.

젤 추진제의 유변학적 특성을 정량화하기 위해 Ostwald-de waele의 power-law model을 이용하였다. 1차원 유동에 대한 power-law model은 Eq. 1과 같으며 지수 n 은 유동 거동지수 (behavior index), K 는 컨시스턴시 지수 (consistency index)에 해당된다.

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

25°C 상에서의 모사젤 추진제 및 나노 입자가 첨가된 모사젤 추진제의 유변학적 특성을 Table 1에 정리하였으며 겔보기 점성계수 η (apparent viscosity)의 전단률(shear rate) 대비 변화를 Fig. 2에 도식화하였다.

Table 1의 컨시스턴시 지수를 살펴보면 나노 입자를 첨가한 모사젤(이하 젤) 추진제의 점도가 기존 젤 추진제의 점도에 비해 높은 것을 알 수 있으며 이는 일반적인 나노 유체의 경우 기본

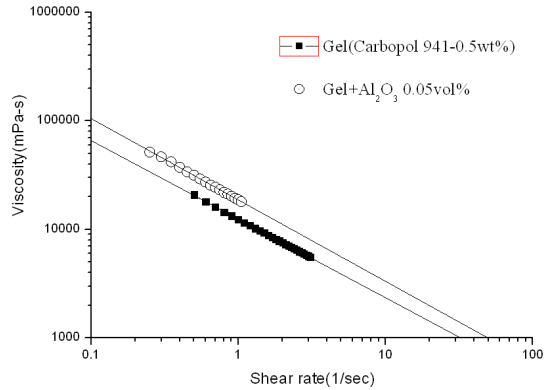


Fig. 2 Rheological data of gel propellants

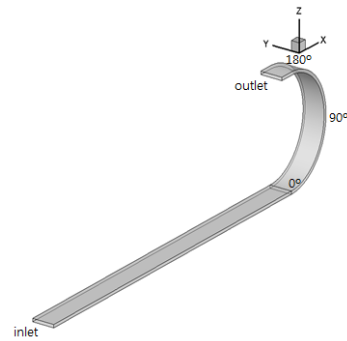


Fig. 3 Schematic of U-shaped curved duct
(y=0 corresponds to the center of the duct)

유체의 점도보다 크게 나타나는 경향과 일치함을 알 수 있다. 반면, power-law 지수는 비슷한 크기를 나타내었으며 이는 두 젤 추진제가 서로 유사한 전단박화(shear thinning) 특성을 갖는 것을 암시한다.

2.2 계산 영역 및 경계조건

Figure 3은 본 연구에서 사용한 덕트 형상 및 좌표계를 나타낸다. 계산 격자는 약 65만 개의 정렬격자로 이루어져있으며 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.

덕트 입구(inlet)의 균일유동이 긴 직관 유입부를 거쳐 곡관부로 유입되면, U-자형의 180° 곡관

Table 2. Dimensionless geometrical parameter ξ proposed by Delplace and Leuliet [28]

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

부를 거친 후 짧은 직관을 통하여 출구로 빠져나가도록 경계조건이 설정되었다. 입구의 유동이 곡관에 도달되기 전에 완전히 발달된 유동이 보장되도록 입구길이(entrance length)를 충분히 길게 적용하였다. 입구와 출구를 제외한 나머지 구간은 모두 벽면 경계조건으로 설정하였다.

본 연구에서는 수렴성과 정확성이 검증된 상용코드 FLUENT 6.3을 사용하였으며 계산영역은 3차원, 층류, 비뉴튼유체, 정상유동의 가정을 통해 해석되었다. SIMPLE 알고리즘을 이용하였으며 압력항은 2차 정확도를 갖도록 해석하였고 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[26, 27]은 이러한 유동을 수학적으로 분석하여 Dean 와류 발생 여부를 결정짓는 무차원 변수, Dean수를 정의하였으며 정의된 식[26]은 Eq. 2와 같다.

$$De = \frac{U_m D_h}{\nu} \sqrt{\frac{D_h}{R_c}} \quad (2)$$

U_m 은 유동의 평균 속도, ν 는 동점성계수이며 수력지름 대비 곡률반경 D_h/R_c 가 고정된 본 연구에서는 Reynolds수 변화에 의한 Dean수를 변화시키는 방법으로 해석을 하였다. 직사각형 단면을 갖는 덕트에서의 power-law 유체에 대한 Reynolds수는 Delplace와 Leuliet[28]가 제안한

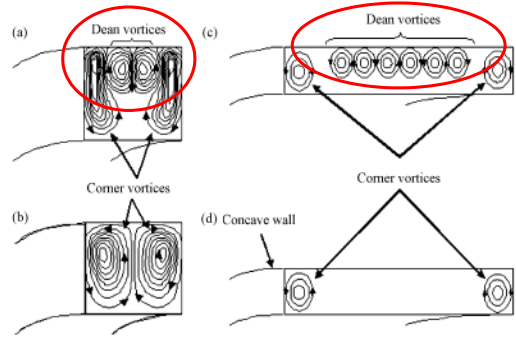


Fig. 4 Schematic of the various vortices in curved channels; (a) and (c): Flow with Dean instability, (b) and (d): Flow without Dean instability(only corner vortices is present)[24]

아래의 식을 적용하였다.

$$Re = \frac{\rho U_m^{2-n} D_h^n}{K[(24n + \xi)/(24 + \xi)n]^n \xi^{n-1}} \quad (3)$$

ρ 는 비뉴튼유체의 밀도, K 는 power-law 컨시스턴시 지수, n 은 power-law 지수를 나타내며, ξ 는 덕트의 종횡비 a/b 에 따른 무차원 기하학적 변수로서 Table 2[28]와 같이 정리된다.

상기 Eq. 2와 Eq. 3에 따르면, Reynolds수 및 Dean수는 점성계수 (비뉴튼 유체의 경우 컨시스턴시 지수 K)에 반비례함을 알 수 있다. 나노 입자를 첨가한 나노-젤 추진체의 경우, 기존 젤 추진체 대비 높은 컨시스턴시 지수 K 를 갖는 관계로 동일한 실험군, 즉 같은 Dean 수에서는 관내 평균 속도인 U_m 이 보다 크다는 것을 의미한다.

Figure 4는 참고문헌[24]에 소개된 정사각 덕트와 큰 종횡비의 직사각 덕트 내에서의 Dean 와류의 개념도를 나타내고 있다.

일반적으로 곡관내 유동에서는 Fig. 4(b)와 4(d)와 같이 양쪽 끝단에서 Eckman 와류(corner vortices or end cells)만이 생성되나, 일정 Dean 수 이상에서는 Fig. 4(a), 4(c)와 같이 중앙 부분에 Dean 와류가 발생되어 불안정을 일으키게 되며 임계 Dean수가 증가할수록 Dean 와류의 쌍(pairs)이 증가하게 된다. Dean 와류를 확인하는

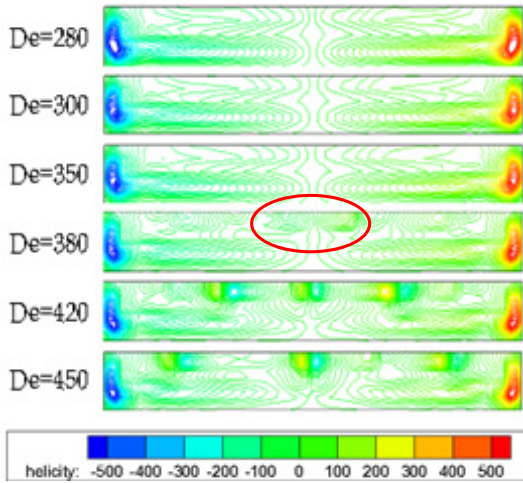


Fig. 5 Helicity magnitude at $\theta = 180^\circ$ for different Dean Number; water-gel w/o nano-particles (upper wall : concave(outer) wall)

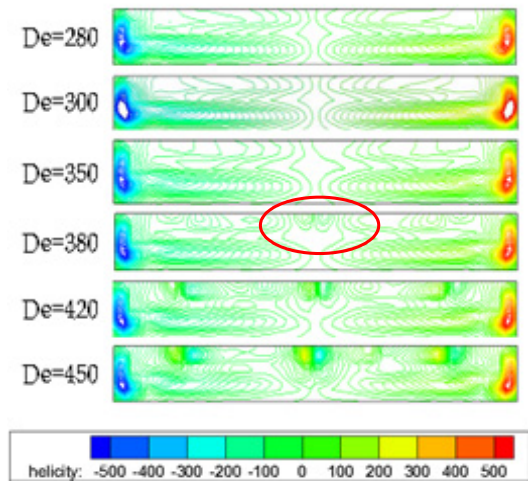


Fig. 6 Helicity magnitude at $\theta = 180^\circ$, for different Dean Number; water-gel with nano-particles (upper wall : concave(outer) wall)

방법으로는 와류의 축방향 크기 즉, 나선도 (helicity)를 통한 분석과 축방향속도구배(axial velocity gradient)를 통한 분석이 가능하며, 본 연구에서는 각 단면에서의 나선도(이하 Helicity)를 확인하는 방법을 사용하도록 한다.

Helicity는 와류(vorticity)와 속도의 내적으로 정의되며 다음의 식으로 표현된다.

$$H = (\nabla \times \vec{V}) \cdot \vec{V} \quad (4)$$

3. 결과 및 분석

3.1 임계 Dean수의 특성

Figure 5와 Fig. 6은 각각 순수 젤과 나노 입자가 첨가된 나노-젤 추진제의 곡관 출구 ($\theta = 180^\circ$)에서의 와류 분포를 도식화하고 있다. 두 경우 모두, Dean수 380 근방에서 2차 유동인 Dean 와류가 관 중앙부분의 concave wall(upper wall)에서 발생하는 것을 알 수 있으며 이는 벽 근처의 높은 전단률로 인해 걸보기점성계수가 감소하여 발생하는 현상[24]으로 알려져 있다.

특이한 점은 나노입자 유무와 상관없이 두 젤 추진제가 동일 임계 Dean수(critical $De=380$)를

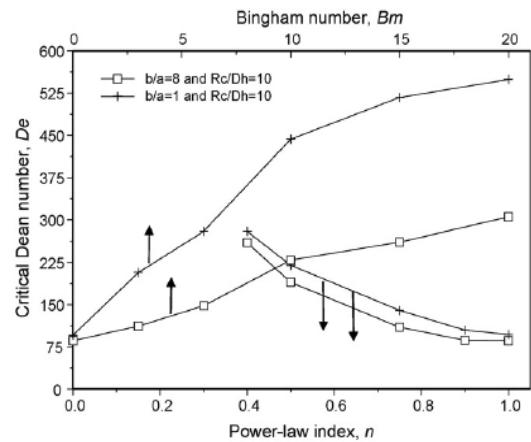


Fig. 7 Effect of rheological parameters on the onset of Dean instability, numerical result[24]

나타내는데 이는 Fellouah et al.이 제시한 Fig. 7을 통해 그 이유를 유추할 수 있다. Fellouah et al.은 power-law 지수 n 값과 임계 Dean수와 상관관계를 얻었으며 n 값이 증가함에 따라 임계 Dean수가 감소하는 현상을 구하였다. 비록 본 연구의 두 젤 유체의 컨시스턴시 지수 K 값이 상이하나 본 연구에서 사용된 순수젤과 나노-젤의 power-law 지수 n 값이 거의 일치되는 관계로 서로 비슷한 크기의 임계 Dean수가 나타났

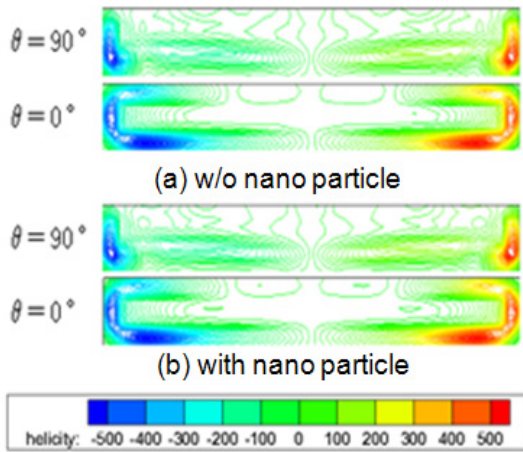


Fig. 8 Helicity magnitude at 0° and 90° for De=450; (a) w/o nano particles, (b) with nano particles

다고 판단된다. Fig. 7의 결과를 선형으로 외삽(extrapolation) 해 보면 $n=0.25$ 근방에서 본 연구의 임계 Dean수($De=380$)에 근접하는 임계 Dean수가 도출됨을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6을 살펴보면 예상대로 임계 Dean수 이상의 Dean수($De=420$, $De=450$)에서 중앙 부분에 새로운 와류 쌍(vortices pairs)들이 추가로 생성됨이 확인된다.

곡관 위치별 Dean 와류의 발현특성을 살펴보기 위해 일정 Dean수 ($De=450$) 상에서 $\theta=0^\circ$ 와 $\theta=90^\circ$ 위치의 와류 분포를 Fig. 8에 나타내었다. $\theta=180^\circ$ 에서는 임계 Dean수가 380일 때 Dean 2차 유동이 발현되었으나 0° 와 90° 에서는 이보다 높은 $De=450$ 에서조차도 Dean 2차 유동이 발생되지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 U-자형 곡관 덕트에서 하류로 갈수록 Dean 불안정 와류가 발생될 확률이 크다는 것을 의미하며 Fig. 9에 나타났는 Fellouah et al.[23]의 곡관 위치별 임계 Dean수의 경향과 일치함을 알 수 있다.

3.2 나노-젤 유체의 나선도(Helicity) 특성

Figure 10은 동일 Dean수인 $De=450$ 에서 나노 입자의 첨가 유무에 따른 곡관출구($\theta=180^\circ$)에서의 Helicity 크기를 나타내고 있다.

본 해석에서는 Delplace와 Leuliet [28]가 제안

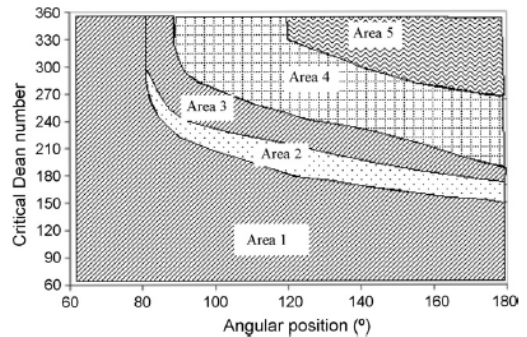


Fig. 9 Critical Dean numbers at different angular positions, $b/a=8$ and $Rc/Dh=10$ ($n=0.75$)[24] (Area 1: no Dean vortices, Area 2: 1 pair of Dean vortices, Area 3-5: 2 or more pairs)

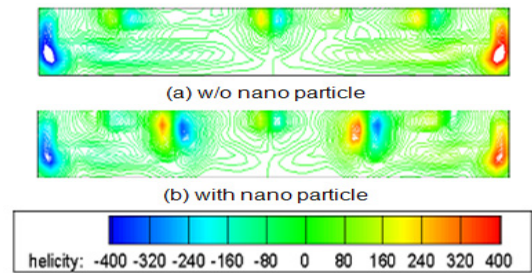


Fig. 10. Helicity magnitude at $De=450$, $\theta=180^\circ$; (a) w/o nano particles, (b) with nano particles

한 Reynolds수를 바탕으로 Dean수를 계산한 관계로 밀도와 power-law 지수 n 이 거의 유사한 두 유체의 경우 Dean수는 U_m^{2-n}/K 에 비례하게 된다. 동일 Dean수에서 Dean 와류의 Helicity 크기 및 변동폭(ΔH)는 나노 입자가 첨가된 젤 추진제에서 더욱 크게 나타나는 것을 Fig. 10(b)를 통해 알 수 있으며, 이는 Dean수가 동일할 경우 컨시스턴시 지수 K 가 클수록 상대적으로 나노-젤 유체의 평균속도 U_m 이 증가되어 나타나는 현상으로 사료된다.

Figure 11은 Dean수 350에서 $\theta=90^\circ$ 부터 $\theta=180^\circ$ 구간사이의 helicity 크기를 $y=0$ 단면(덕트 중앙부분)을 따라 나타내고 있다. Dean수 350은 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인된바와 같이 Dean 와류가 발생($De=380$)되기 직전의 조건에 해당되며 Dean 와류나 Eckman 와류가 존재하

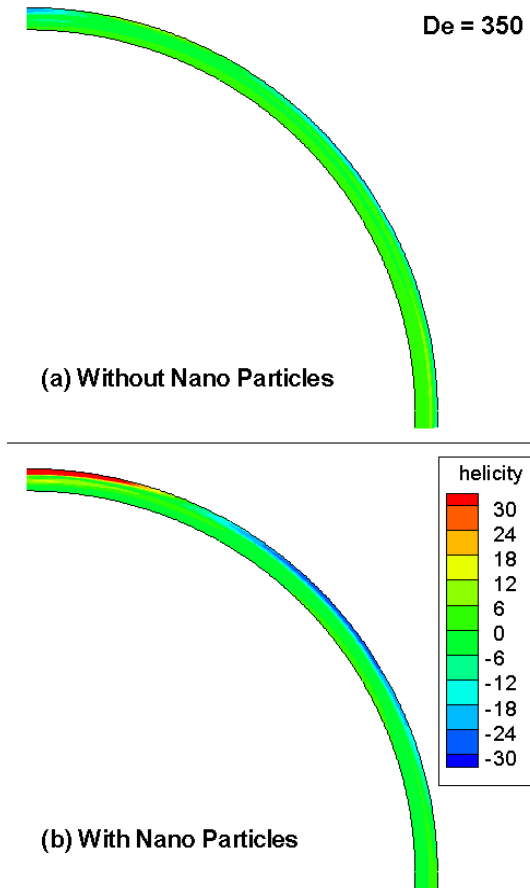


Fig 11. Helicity magnitude at $De=350$, $y=0$ surfaces:
(a) w/o nano particles, (b) with nano particles

지 않는 유동영역에서의 나노 입자 첨가에 유무에 따른 유동특성을 살펴보기 위해 채택되었다. Dean 와류가 없는 관계로 Helicity의 강도(magnitude)는 약하지만 Dean 와류가 발생되기 쉬운 낮은 길보기점성계수 영역인 concave wall 인접부분부터 나노 입자가 첨가된 나노-젤 유체에서 Helicity가 태동되고 있음을 Fig. 11(b)를 통해 알 수 있다. 또한, 크기 및 변동폭(ΔH)이 순수 젤의 것 보다 상대적으로 크다는 것을 Fig. 11(a)와 11(b)의 비교를 통해 확인할 수 있다. 이러한 경향은 Dean 와류가 발생된 $De=450$ (Fig. 10)의 결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 비록, 제작된 두 젤 모두 Dean 와류 발생 시점을 알리는 임계 Dean수는 서로 비슷하지만 나노 입자를

첨가한 젤에서 Dean 와류 발생 전(Fig. 11) 및 발생 후(Fig. 10)의 Helicity 변동폭이 크게 나타난다는 사실은 동일 Dean수에서 Dean 와류의 불안정성이 증폭될 수 있다는 사실을 암시한다. 향후, 동일 Dean수가 아닌 동일 유속 U_m 을 기준으로 두 젤 유체의 Dean 와류 특성에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

곡관 채널에서의 비뉴턴 젤 추진제의 유동 특성을 연구하기 위해 물을 기본유체로 하는 모사 젤을 Carbopol 941 젤화 작용제와 NaOH 농축액을 혼합하여 제작하였으며 입자 유무에 따른 유동 특성을 파악하기 위해 Al₂O₃ 나노 입자가 첨가된 젤을 제작하여 두 젤 추진제간의 유변학적 특성을 비교하였다.

확보된 유변학적 데이터를 기반으로 U-자형 곡관 내 젤 추진제 및 나노-젤 추진제의 유동특성을 비교하여 두 비뉴턴유체 간의 Dean 와류(Dean vortices) 특성을 분석한 결과, 곡관 위치별 Dean 와류의 경향은 상이하였으나 나노 입자가 첨가된 나노-젤 추진제의 경우 높은 컨시스턴시 지수에도 불구하고 두 모사젤 모두 비슷한 범위의 임계 Dean수를 도출하였다. 두 젤 추진제의 power-law 지수 n 이 유사하기에 임계 Dean수 또한 동일하게 나타나는 것을 입증할 수 있었으며 나노 입자 첨가 유무와 무관하게 power-law 지수 값이 임계 Dean 수를 결정하는데 주요 변수임을 판단할 수 있었다.

선행 연구자들이 제시한 임계 Dean수와 power law 지수 n 이 반비례한다는 사실을 본 연구를 통해 재검증할 수 있었으며 동일 Dean수에서는 나노 입자를 첨가한 젤에서 Dean 와류의 불안정성이 증폭될 수 있다는 가능성을 확인하였다. 젤 추진제에 나노 입자를 첨가함으로써 유체의 열적 특성 향상이 기대되나, 곡관 내의 유동 불안정성 증가의 악영향 역시 우려되므로 향후 이를 적용하는 데 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(20100025263).

참 고 문 헌

- Hermans, P. H., Gels, in Colloid Science II, Kruyt, H.R. (Ed.), Elsevier Publ. Co., Amsterdam, 1949, pp.483-494
- Natan, B. and Rahimi, S., "The Status of Gel Propellants in Year 2000," in Combustion of Energetic Materials, 2001, pp.172-194
- Bryan, P., John, J., Kevin, B., and Kim, K., "Metalized Gelled Propellants Combustion Experiments in a Pulse Detonation Engine," NASA/TM2006-214119, 2006
- 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
- 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
- Rahimi, S. and Natan, B., "Atomization Characteristics of Gel Fuels," AIAA Paper 98-3830, 1998
- Chojnacki, K. T. and Feikema, D. A., "Atomization Studies of Gelled Liquids," AIAA Paper 94-2773, 1994
- 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
- Yoon, C., Heister, S., Xia, G., and Merkle, C., "Simulations of Injection of Shear-Thinning Gel Propellant Through Plain-Orifice Atomizer," AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2010
- 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
- Tang, H. S. and Kalyon, D. M., "Estimation of the Parameters of Herschel-Bulkley Fluid under Wall Slip Using a Combination of Capillary and Squeeze Flow Viscometers," Rheologica Acta 43 (1), 2004, pp.80-88
- 한정식, 정병훈, "램제트용 연료의 특성 연구," 국방과학연구소, TEDC-121-041238, 2004
- 정병훈, 고승원, 황갑성, 한정식, 홍명표, "슬러리와 젤 추진제의 기술개발 동향," 한국추진공학회 2007년도 춘계학술대회 논문집, 2007, pp.168-171
- 황태진, 이인철, 김상선, 구자예, "Water-Gel 모사 추진제의 충돌 분무 특성 연구," 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 2009, pp.11-14
- 오정수, 전두성, 최상태, 김덕윤, 최양호, 이정혁, 문희장, "인젝터 형상 변화에 따른 Gel 추진제의 유동 특성 연구," 한국추진공학회 2010년도 추계학술대회 논문집, 2010, pp.300-303
- 김재우, 전두성, 신웅섭, 이효미, 문희장, "제작방법에 따른 모사 젤 추진제의 특성 연구," 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회 논문집, 2011, pp.467-470
- 김재우, 전두성, 강태곤, 장석필, 구자예, 문희장, "SiO₂ 계열 젤화제에 따른 케로신 젤 연료의 유변학적 특성 연구," 한국추진공학회지, 제16권, 제6호, 2012, pp.32-40

18. Baek, G., "Rheological Properties and Atomization Characteristics of Carbopol Gel Containing Nano-size Particles," 2011
19. 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
20. 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
21. 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
22. 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
23. 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
24. Fellouah, H., Castelain, C., Ould-El-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*, Vol. 165, 2010, pp.163-173
25. Hammad, K. J., Vradis, G. C., and Otugen, M. V., "Laminar Flow of a Herschel-Bulkley Fluid over an Axisymmetric Sudden Expansion," *Trans. ASME: J. Fluid Eng.* 123, 2001, pp.588-594
26. Dean, W. R., "Note on the Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Proc. K. Soc. London Ser, A25*, 1927, pp.208-223
27. Dean, W. R., "The Streamline Motion of Fluid in a Curved Pipe," *Philos. Mag.*, Vol. 30, 1928, pp.673-693
28. 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.*, Vol. 56, No. 2, 1995, pp.33-37