

압력선회형 인젝터를 이용한 젤 추진제의 분열특성 연구

조장희^a · 이동희^a · 김설희^a · 이동근^b · 문희장^{c,*}

Study on Breakup Characteristics of Gel Propellant Using Pressure Swirl Injector

Janghee Cho^a · Donghee Lee^a · Sulhee Kim^a · Donggeun Lee^b · Heejang Moon^{c,*}

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

^bGraduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, Korea

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

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

ABSTRACT

In this study, cold-flow test of simulant gel is conducted using a pressure swirl injector to identify spray characteristics according to gellant weight percent. Experiment results show the aircore is developed locally at the nozzle and expanded to the entire swirl chamber as the supply pressure increases. The aircore formation of simulant gel showed no significant difference compared to Newtonian fluid. The spray pattern was classified into four distinct shapes where relationship between the breakup regimes and dimensionless numbers were investigated. In the future, additional study is necessary to understand the aircore formation mechanism, stability and spray characteristics at different configuration of the swirl chamber shape.

초 록

본 연구에서는 압력 선회형 인젝터를 이용한 모사 젤 추진제의 분무실험을 수행하여 젤화제 첨가량에 따른 분무특성을 파악하였다. 실험을 통해 인젝터 내부의 공기층이 노즐에 국부적으로 형성되며 점차 와류실까지 확장되는 것을 확인하였으며 뉴턴 유체의 공기층 발달과정과 형상학적으로 유사한 경향성을 보였다. 분무형상은 4개의 유형으로 구분하였으며, 이를 공기층의 형성과정과 연관하여 형상학적으로 분석하였다. 분무형상을 바탕으로 일반화된 레이놀즈수, 웨버수 및 오네소지수와 같은 무차원 수에 따라 분열영역을 구분하였다. 추후 분무성능에 영향을 미치는 와류실 형상변화에 따른 공기층의 형상과 안정성, 이에 따른 분무특성에 관한 연구가 추가로 필요할 것으로 사료된다.

Key Words: Pressure swirl injector(압력 선회형 인젝터), Gel propellant(젤 추진제), Spray shape(분무형상), Aircore(공기층), Breakup regime(분열영역)

1. 서 론

Received 5 June 2021 / Revised 15 September 2021 / Accepted 21 September 2021

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2021년도 춘계학술대회(2021. 5. 26-28, 리마다프라자 제주호텔) 발표논문을 심사하여 수정보완한 것임.]

압력선회형 인젝터(pressure swirl injector)는 작동유체가 선회하여 미립화되는 인젝터로서, 연료 미립화에 충분한 낮은 요구 공급압력, 균일한

액적 분포도, 단순한 구조로 인해 소형화가 용이하고 항공우주용 추진기관 인젝터와 더불어 다양한 산업용 인젝터로 활용되고 있다[1,2]. 특히 액체로켓용 인젝터 보다는 기체상의 공기가 산화제로 활용되는 가스터빈 및 램젯트 연료 공급용으로 적합하기에 공기흡입 추진기관용 인젝터로서의 성능 향상을 위한 연구가 많이 수행되어 왔다[3].

젤 추진제(gel propellant)는 우수한 저장성을 가지며 고에너지 물질 첨가가 용이함에 따라 추진기관의 성능향상을 도모할 수 있어 추진기관의 차세대 연료로 주목받고 있다[4]. 그러나 높은 점도로 인해 미립화 성능이 저하되는 단점이 산재하여 이를 개선하기 위한 인젝터 종류별 분무 및 미립화 특성에 관한 연구가 활발히 수행되고 있다[4]. 비뉴턴 전단박화(non-Newtonian shear thinning) 특성을 갖는 젤 추진제는 연소실 유입 전, 점도를 급격히 낮추어야 되기에 일반적으로 충돌형(impinging) 또는 전단동축형(shear coaxial) 인젝터가 사용되어 왔으나 단순한 구조를 갖는 압력선회형 인젝터의 젤 분무장치 응용연구가 근래 보고되고 있다[5,6]. Yang et al.[5]은 모사 젤 추진제를 이용해 압력에 따른 압력선회형 인젝터의 분무형상(spray shape)을 4개의 분무패턴으로 구분하였으며, 인젝터 노즐 및 접선포트 직경 변화에 따른 분무각 및 분열길이의 변화를 비교하였다. Guan et al.[6]은 친환경 ADN 젤 추진제의 분무형상을 파악하였으며, 분무각, 분열길이 및 정량적 액적분포를 측정하였다. 그러나 현재까지 수행된 압력선회형 인젝터를 이용한 젤 추진제의 분무 연구는 젤화제(gellant) 첨가량에 따른 변화나 인젝터 내 공기층(aircore) 형상등 수력학적(hydraulic) 조건에 따른 분무형태의 형상학적 분석에 대한 연구가 현재까지 보고된 바 없다.

이에 본 연구에서는 젤화제 첨가량과 공기층 형상이 분무특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 모사 젤 추진제를 이용하여 분무실험을 수행하였다. 분무가시화실험을 통해 공기층 및 분무형상의 발달과정을 정성적으로 파악하였으며, 공기층의 형성과정을 바탕으로 분무형상의 형상학

적(morphological) 분석을 수행하였다.

2. 모사 젤 추진제의 유변학 특성

2.1 모사 젤 추진제 제작 및 물성 파악

본 연구에서 사용된 모사 젤 추진제는 기반유체인 증류수에 Carbopol 941 젤화제와 수산화나트륨용액(NaOH) 중화제를 혼합하여 제작하였으며, 제작 과정에서 젤화제 및 중화제의 균일한 교반을 위해 Silverson사의 homogenizer를 사용하였다. 젤화제 첨가량에 따른 분무특성 변화를 파악하기 위해 모사 젤을 각각 젤화제 첨가량 0.2 wt%, 0.4 wt% 그리고 0.5 wt% 별로 제작하였다. Fig. 1은 모사 젤 추진제의 전단변형률-전단응력 및 점도모형을 적용한 그래프이며, 점도모형 적합도를 비교한 Han[7]의 연구결과를 활용하여 구성방정식을 Herschel-Bulkley 점도모형(Eq. 1)로 선정하였다. 젤화제 첨가량에 따른 점도모형의 계수를 Table 1에 나타내었으며, 여기서 τ_0 는 항복응력, K 는 컨시스턴스 상수(consistency index), n 은 유동지수를 나타낸다.

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

또한 모사 젤 추진제의 표면장력 파악을 위해 젤화제 첨가량 별 모사 젤 추진제의 표면장력을

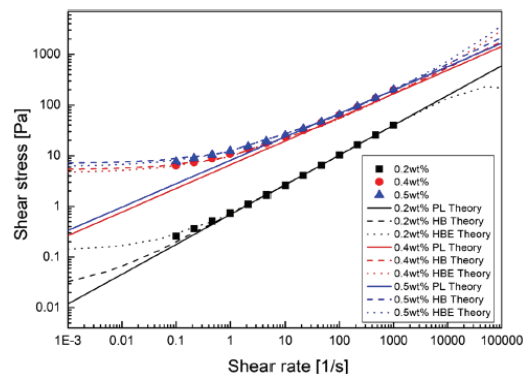


Fig. 1 Shear rate and stress curves with rheological models on gellant concentration[7].

Table 1. Curve fit parameters of viscosity model on gellant concentration[7].

Fluids	τ_0	K	n
CBP 0.2 wt%	0.021	0.683	0.589
CBP 0.4 wt%	5.546	4.803	0.519
CBP 0.5 wt%	7.040	5.293	0.521

Table 2. Surface tension of Carbopol 941 gel on gellant concentration[8].

Fluids	CBP 0.2 wt%	CBP 0.4 wt%	CBP 0.5 wt%
Surface tension (dyne/cm)	103.62	113.92	114.85

측정한 Kim[8]의 연구결과를 활용하였다. Table 2는 모사 젤 추진제의 젤화제 첨가량에 따른 측정된 표면장력을 나타낸다.

2.2 무차원수

본 연구에서는 분열영역을 구분하기 위해 무차원수를 사용하였으며, 모사 젤 추진제의 경우 전단변형률에 따라 점도가 비선형적으로 변하기 때문에 Herschel-Bulkley 점도모델을 따르는 일반화(generalized)된 무차원수, $Re_{gen,HB}$ 를 사용하였다[9]. Eq. 2, Eq. 4 및 Eq. 5는 각각 일반화된 레이놀즈수(generalized Reynolds number), 관성력과 표면장력의 비를 나타낸 웨버수(Weber number), 그리고 Eq. 2, 4로부터 도출된 오네소지수(Ohnesorge number)를 나타낸다. 여기서 ρ , \bar{u} , D 는 각각 모사 젤 추진제의 밀도, 축 방향 속도, 액막두께를 나타내며, Table 1에 나타낸 점도모델 계수(τ_0 , K , n)와 Table 2에 나타낸 표면장력(σ)를 사용하였다.

$$Re_{gen,HB} = \frac{\rho \bar{u}^{2-n} D^n}{\left(\frac{\tau_0}{8}\right) \left(\frac{D}{u}\right)^n + K \left(\frac{3m+1}{4m}\right)^n 8^{n-1}} \quad (2)$$

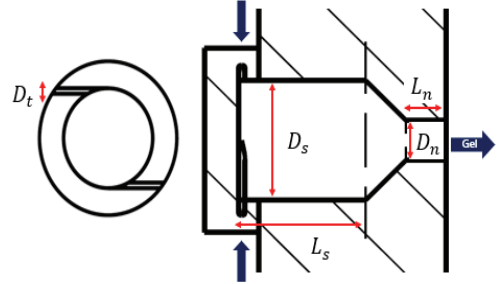


Fig. 2 Schematic of pressure swirl injector.

Table 3. Specification of pressure swirl injector.

Design parameter	Value(mm)
Swirl chamber Diameter (D_s)	18
Swirl chamber length (L_s)	19
Nozzle diameter (D_n)	6
Nozzle length (L_n)	6
Tangential port diameter (D_t)	1

$$m = \frac{nK(8\bar{u}/D)^n}{\tau_0 + K(8\bar{u}/D)^n} \quad (3)$$

$$We = \frac{\rho \bar{u}^2 D}{\sigma} \quad (4)$$

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re_{gen,HB}} \quad (5)$$

3. 실험장치 및 실험조건

3.1 압력 선회형 인젝터

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 압력 선회형 인젝터의 개략도를 나타낸다. 인젝터의 구조는 접선 유입구, 와류실, 노즐로 구분되며 내부 공기층 형상을 파악하기 위해 내부 가시화가 가능한 아크릴 소재로 제작하였다. 인젝터의 형상은 수축부를 통해 접선속도를 증가시켜 작은 에너지로 원활한 공급이 가능한 close-type의 형태로 제작하였으며 설계된 인젝터의 주요 설계수치는 Table 3에 나타내었다.

3.2 분무실험장치 및 조건

Fig. 3은 젤 추진제 분무실험장치의 개략도를 나타낸다. 추진제 공급은 기체 가압방식을 통해 실린더 내 피스톤 헤드를 이송시켜 모사 젤 추진제가 일정하게 공급될 수 있도록 하였다. 공급 압력은 설치된 레귤레이터를 통해 조절하였으며 모사 젤 추진제의 공급압력을 측정하기 위해 인젝터 상단에 정압센서를 설치하였다. 공기층 이미지로부터 액막두께 및 분출면적을 측정하여 추진제의 축방향 속도를 계산하였다. 촬영을 위해 초고속 카메라(Phantom VEO 640)를 이용하여 촬영속도 10,000 fps로 해상도 512x512 pixel의 이미지를 촬영하였다. 실험은 Lab-VIEW 프로그램을 통해 제어되며 NI(National Instruments) DAQ 보드를 이용하여 데이터를 수집하였다. Table 4는 본 연구에서 진행한 분무 실험 조건을 나타낸다.

4. 실험결과

4.1 공기층 형성

Fig. 4는 공급압력 변화에 따른 인젝터 내 공기층의 형상을 나타낸다. 공기층은 회전하는 유체의 원심력에 의한 정압과 대기압의 상호작용에 의해 형성되며[10], 초기 낮은 공급압력에서는 공기층 형성이 되지 않는다(Fig. 4(a)). 이는

낮은 접선속도 및 높은 점도로 인해 선회류 형성이 어려우며, 임계원심력 조건을 만족하지 못한 것으로 판단된다. 공급압력의 증가 시 수축부 이후 영역에서는 유체의 접선속도 증가에 따른 원심력 증가로 인해 국부적인 영역에서 공기층이 형성되며(Fig. 4(b)), 이후 공급압력 증가에 따른 접선속도가 전 구간에서 임계원심력 이상의 조건을 만족하여 인젝터 내 전반적으로 형성되어 발달하는 것을 확인하였다(Fig. 4(c),(d)). 이러한 내부 공기층의 발달과정은 작동유체가 뉴턴 유체일 때와 형상학적으로 유사한 경향성을 보인다[10].

Table 4. Experiment condition.

	CBP 0.2 wt%	CBP 0.4 wt%	CBP 0.5 wt%
Injection pressure (bar)	2~32		
Mass flow rate (g/s)	12~76	7~75	6~74
Re_{genHB}	45~967	4~280	3~181
We	10~597	3~537	2~389
Oh	0.025~0.070	0.082~0.424	0.108~0.500

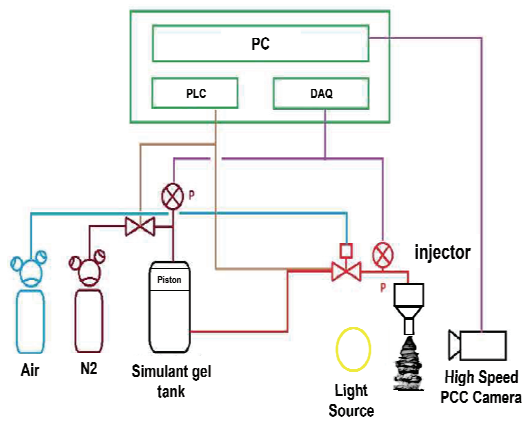


Fig. 3 Schematic of experimental setup.

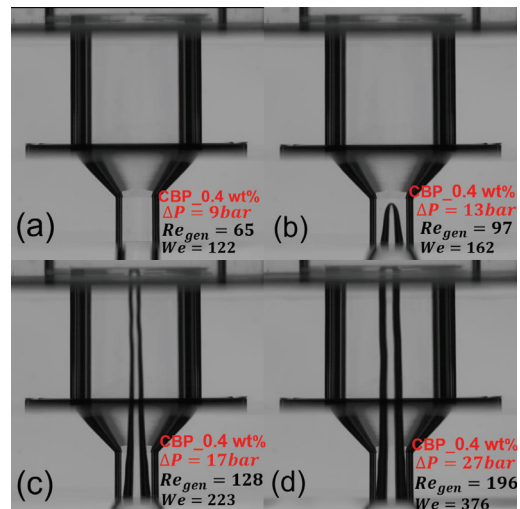


Fig. 4 Development process of aircore formation.

Fig. 5는 젤화제 첨가량에 따른 공기층 형상을 나타낸다. 동일 공급조건에서 공기층의 형성 여부 및 두께 차이를 보이는 것을 확인할 수 있으며 이는 젤화제 첨가량이 증가함에 따라 점도에 의한 속도 손실량이 더 크기 때문에 와류실 내 원심력 차이로 인해 발생하는 것으로 사료된다.

4.2 분무형상

Fig. 6은 압력선회형 인젝터의 젤화제 첨가량에 따른 모사 젤 추진제의 분무형상 발달과정을

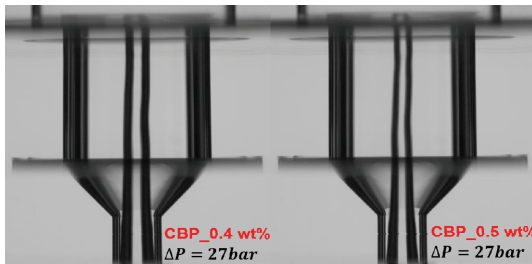


Fig. 5 Aircore thickness comparison according to gellant weight percent.

나타낸다. 분무형상 발달과정은 Fig. 7과 같이 총 4개 유형으로 구분된다. 이는 Thomson et al.[11]에 의해 여러 유형이 압력선회형 인젝터 이용 시 발현됨을 제시한 바 있으며 Yang et al.[5]은 이들 각 유형을 기하학적인 차원에서 twist ribbon, finger, fluid web 그리고 hollow cone의 형태를 갖는다고 언급하였다. 각 분무 유형의 명칭을 정의한 것은 아니나, 본 연구에서는 Yang의 결과를 토대로 독자들의 이해를 돕고자 이들 명을 활용하여 비뉴턴유체의 미립화 과정을 분류하였다. Fig. 4와 Fig. 5의 공기층 형성 과정을 바탕으로 4.2절에서는 이들 4개 영역의 형상학적(morphological) 분석을 수행하고자 한다.

4.2.1 Twisted ribbon 형상

Fig. 7(a)는 비틀린 액막 형상(twisted ribbon)의 분무유형을 나타낸다. 유체가 분사 시 액사(ligament) 및 액적(droplet)으로의 분열이 발생하지 않는 것을 확인하였다. 이는 해당 분무조건에서 공기층이 형성되지 않아(Fig. 4(a) 참조) 낮은 공급압력에서 낮은 점선속도로 인해 선회류

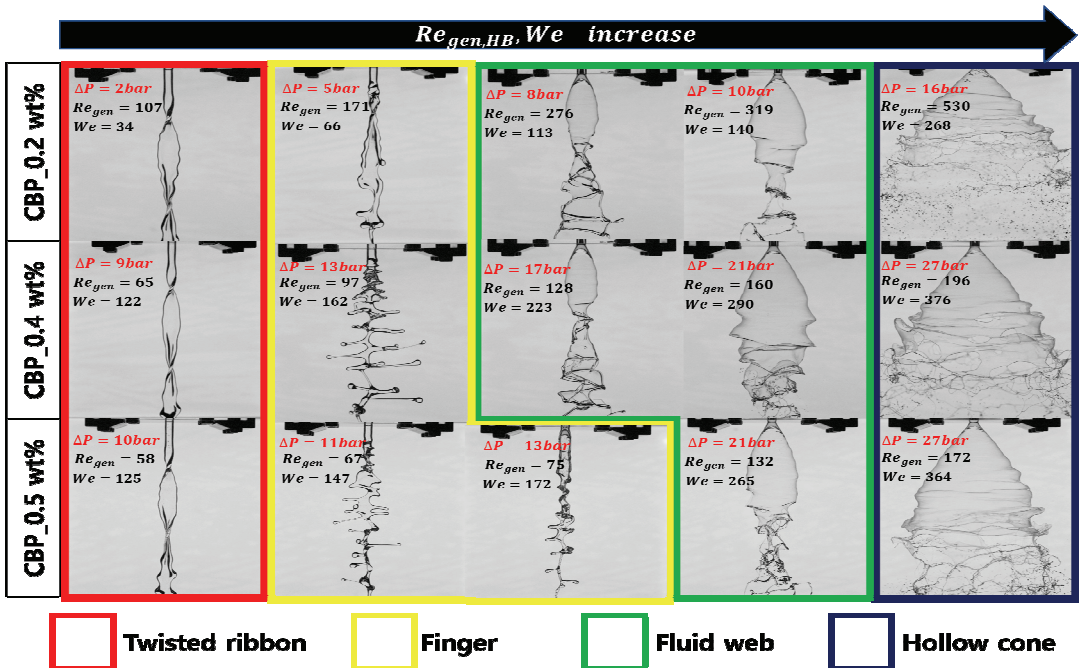


Fig. 6 Snapshots of spray pattern with respect to gellant concentration.

의 형성이 어렵고 비틀린 액막형태로 분사되는 것으로 판단된다.

4.2.2 Finger 형상

Fig. 7(b)는 손가락 형상(finger)의 분무유형을 나타낸다. 비틀린 액막 형상으로부터 공급압력이 증가함에 따라 유체가 가장자리로부터 변형이 일어나는 것을 확인하였다. 이는 해당 분무조건에서 공기층이 노즐에 국부적으로 형성되며(Fig. 4(b) 참조) 분사된 유체의 가장자리에 높은 원심력의 작용으로 인해 분열이 시작된다고 볼 수 있다. 이후 표면장력 및 인장점도로 인해 회전방향으로 늘어난 형상이 나타난다[11]. 본 형상은 젤화제 첨가량 증가 시 점도 및 표면장력 증가로 인해 상대적으로 넓은 공급압력 범위에서 나타나는 것을 확인하였다.

4.2.3 Fluid web 형상

Fig. 7(c)의 영역은 그물 형상(fluid web) 영역에 해당된다. 노즐 출구로부터 하류로 유체가 이탈하면서 초기 원추형의 형상을 보인 후 주름(rim) 형상이 발현되고 이후 하류로 액사가 발현될 수 있는 영역이 존재함을 확인하였다. 이는 해당 분무조건에서 공기층이 위치에 따라 큰 직

경변화를 보이는 불안정한 형상을 가지며(Fig. 4(c) 참조), 불안정한 공기층 형상이 난조를 유발하여[1] 원추형의 액막이 단힌 형태로 분사되는 것으로 판단된다.

4.2.4 Hollow cone 형상

Fig. 7(d)는 중공 분무형상(hollow cone)의 분무유형을 나타낸다. 유체의 분사 시 원추형의 액막형상을 가지며 이후 액사 및 액적으로 분열되는 것을 확인하였다. 해당 분무조건에서 공기층이 인젝터 내 전반적으로 동일한 직경을 가지며(Fig. 4(d) 참조), 높은 접선속도로 인해 임계원심력을 만족하여 공기층이 안정한 형상을 가져 중공 분무형상으로 분사되는 것으로 판단된다. 모사 젤 추진제의 분열은 뉴턴유체의 액막분열[12]과 달리 공기역학적 파(aerodynamics wave) 외에도 천공(perforation)이 형성(Fig. 8)되는 것을 확인하였다. 이는 기반유체 대비 증가된 표면장력에 의해 천공이 발생한 것으로 판단된다. 형성된 원추형 액막에서 공기역학적 파의 성장으로 인해 얇은 막을 형성하게 되며, 얇은 막에서 표면장력의 작용으로 인해 천공이 발생하는 것으로 사료된다[13].

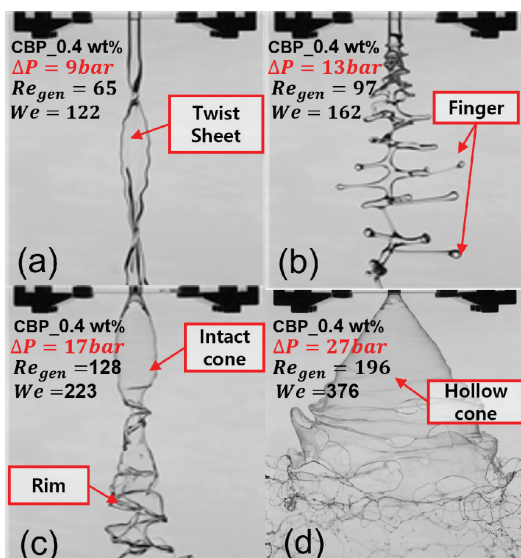


Fig. 7 Development process of spray pattern.

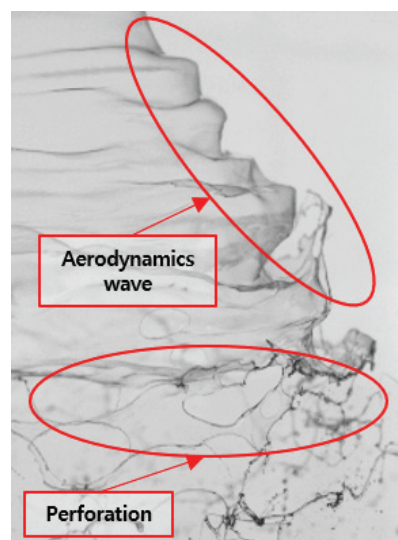


Fig. 8 Breakup mode of simulant gel liquid film.

4.3 분열영역

Fig. 9는 젤화제 첨가량에 따른 각 분무형상을 웨버수와 일반화된 레이놀즈수로 도시한 그래프를 나타낸다. 젤화제 첨가량이 0.2 wt% 인 경우 웨버수 약 180 이상에서, 0.4 wt% 및 0.5 wt% 인 경우 웨버수 약 340 이상에서 완전발달 형상을 갖는 것을 확인하였으며, 분열영역을 웨버수만으로 구분하는 뉴턴유체[12]와 달리 젤 추진제에서는 분무조건에 따라 변화하는 유변학적 특성이 분열형상에 영향을 주며, 따라서 레이놀즈수와 같이 점성 항이 존재하는 무차원수가 고려되어야 한다.

Fig. 10은 오네소지수와 일반화된 레이놀즈수 관계를 통해 모사 젤 추진제의 분열영역을 4가지로 구분하여 나타낸 그래프다. 각 분열영역을

구분하기 위해 Ohnesorge[14]가 제안한 임계곡선(Eq. 6) 및 각 분열영역 임계점의 곡선피팅을 수행하였으며, Eq. 7, 8, 9는 각각 twisted ribbon 형상과 finger 형상(검은 점선), finger 형상과 fluid web 형상(붉은 점선), fluid web 형상과 hollow cone 형상(파란 점선)을 구분하는 임계곡선을 나타낸다.

$$(Oh)^a (Re_{gen,HB})^b = 10 \quad (6)$$

$$\text{Region I, II} : (Oh)^{0.33} (Re_{gen,HB})^{0.16} = 10 \quad (7)$$

$$\text{Region II, III} : (Oh)^{0.37} (Re_{gen,HB})^{0.20} = 10 \quad (8)$$

$$\text{Region III, IV} : (Oh)^{0.40} (Re_{gen,HB})^{0.25} = 10 \quad (9)$$

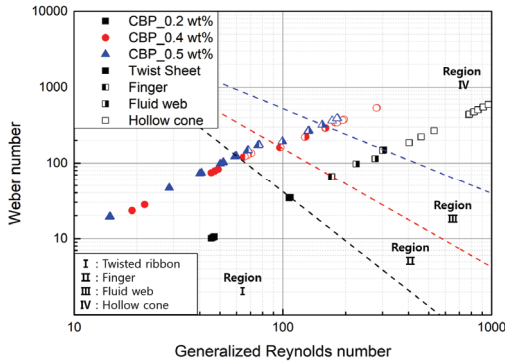


Fig. 9 Breakup regimes of simulant gel by the interrelation of $Re_{gen,HB} - We$.

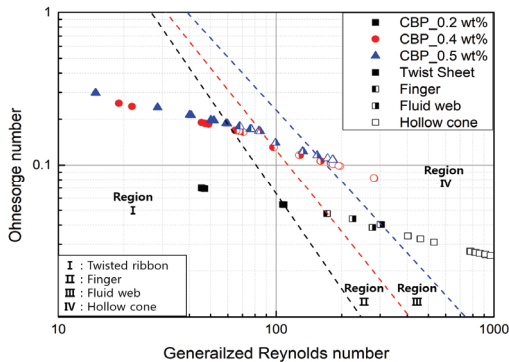


Fig. 10 Breakup regimes of simulant gel by the interrelation of $Re_{gen,HB} - Oh$.

5. 결 론

본 연구에서는 압력 선회형 인젝터를 이용하여 모사 젤 추진제의 젤화제 첨가량에 따른 분무실험을 통해 공기층의 형성과정을 바탕으로 분무의 형상학적 분석을 수행하였다.

공기층 형상은 공급압력이 증가함에 따라 초기 노즐 끝단에서 국부적으로 형성되어 와류실까지 확장되며 뉴턴유체의 공기층 발달과정과 형상학적으로 유사한 것을 확인하였다. 또한 젤화제 첨가량이 증가함에 따라 공기층의 두께가 감소하였으며, 이는 높은 점도로 인한 속도 손실량 차이로 인한 것으로 사료된다.

분무형상은 공급압력이 증가함에 따라 비틀린 액막 형태(twisted ribbon)로부터 원추형의 중공 분무형상(hollow cone)으로 발달하는 것을 ref [5]와 마찬가지로 재차 유사한 결과를 확인하였다. 분무형상을 공급조건 및 무차원수에 따라 4개의 형상으로 구분하였으며, 공기층의 형성과정을 바탕으로 분무의 형상학적 분석을 수행하였다. 완전발달 영역에서는 뉴턴유체와 달리 증가된 표면장력으로 인해 공기역학적과의 성장뿐만 아니라 천공의 성장이 분열의 주요 원인으로 작용하는 것을 확인하였다. 분열영역 구분을 위

해 웨버수, 일반화된 레이놀즈수, 오네소지수를 이용하여 도시하였으며, 각 영역별 임계곡선에 해당하는 무차원수 관계식을 도출하였다.

추후 분무성능에 영향을 미치는 와류실 형상 변화에 따른 공기층의 형상과 안정성, 그리고 이에 따른 분무특성에 관한 연구가 추가로 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-미래국방혁신기술개발사업의 지원과(NRF-2020M3F6A1110342) 2020년 한국연구재단 BK21 FOUR(과제번호 : 5199990714521)의 지원을 받아 수행된 연구임

References

1. Jeon, H.S., *Liquid Atomization*, 1st ed., Mun undang., Seoul, Korea, pp. 347-352, 2009.
2. Moon, S.S., Abo-Serie, E. and Bae, C.S., "Air flow and pressure inside a pressure-swirl spray and their effects on spray development," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 33, No. 2, pp. 222-231, 2009.
3. Kang, Z., Wang, Z.G., Li, Q. and Cheng, P., "Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine," *Acta Astronautica*, Vol. 145, pp. 174-198, 2018.
4. Natan, B. and Rahimi, S., "The status of gel propellants in year 2000," *International journal of energetic materials and chemical propulsion*, Vol. 5, No. 1-6, 2002.
5. Yang, L.J., Fu, Q.F., Qu, Y.Y., Zhang, W., Du, M.L. and Xu, B.R., "Spray characteristics of gelled propellants in swirl injectors," *Fuel*, Vol. 97, pp. 253-261, 2012.
6. Guan, H.S., Li, G.X. and Zhang, N.Y. "Experimental investigation of atomization characteristics of swirling spray by ADN gelled propellant," *Acta Astronautica*, Vol. 144, pp. 119-125, 2018.
7. Han, S.J., Koo, J.Y., and Moon, H.J., "Morphological classification of disintegration behavior of viscoelastic simulant gel propellant in coaxial streams," *Journal of Visualization*, Vol. 23, No. 2, pp. 287-298, 2020.
8. Kim K.H., Kim S.J., Han S.J., Kim J.G. and Moon H.J., "Surface tension change of simulant gel propellant according to the metal particle addition," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 3, pp. 34-40, 2017.
9. Madlener, K., Frey, B. and Ciezki, H.K., "Generalized reynolds number for non-newtonian fluids," *Progress in Propulsion Physics*, Vol. 1, pp. 237-250, 2009.
10. Amini, G., "Liquid flow in a simplex swirl nozzle," *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 79, pp. 225-235, 2016.
11. Thompson, J.C. and Rothstein, J.P., "The atomization of viscoelastic fluids in flat-fan and hollow-cone spray nozzles." *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, Vol. 147 No. 1-2, pp. 11-22, 2007.
12. Prakash, R.S., Gadgil, H. and Raghunandan, B.N., "Breakup processes of pressure swirl spray in gaseous cross-flow," *International journal of multiphase flow*, Vol. 66, pp. 79-91, 2014.
13. Saurabh, A., Deshmukh, D., Nath, S., Agarwal, D.K. and Kabiraj, L., "Impingement Atomization of Carbopol Gels." *In AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*, AIAA 2020-3973, Aug. 2020.
14. Ohnesorge, W.V., "Formation of Drops by Nozzles and Breakup of Liquid Jets," *UT Faculty/Researcher Works*, 2019.