

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2025.33.4.261>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

충돌형 인젝터 오리피스 내부 그루브 구조 적용에 따른 모사 젤 분무특성 비교

김정원*, 이동근*, 이주현**, 김범진**, 문희장***

Comparison of Spray Characteristics of a Simulant Gel in an Impinging Injector Using an Orifice with an Internal Groove

Jung-Won Kim*, Dong-Geun Lee*, Ju-Hyeon Lee**, Beom-Jin Kim**, Hee-Jang Moon***

ABSTRACT

This study investigated the influence of a grooved orifice on the spray characteristics of a non-Newtonian fluid in an impinging injector. A simulant gel was used as the working fluid, and two orifice configurations (plain and grooved) were examined. The spray behavior was characterized in terms of the discharge coefficient (Cd), breakup length, spray angle, and spatial mass distribution. The discharge coefficients of the two orifices were found to be comparable; however, the grooved orifice resulted in a shorter breakup length and larger spray angles and spatial mass distributions than the plain orifice. These differences were attributed to the groove feature, which promoted more turbulent-like jet development and facilitated the formation of an unstable liquid sheet, thereby enhancing breakup. These results suggest that a grooved orifice could be an effective geometry for improving the spray performance of the simulant gel.

Key Words : Impinging Injector(충돌형 인젝터), Breakup Length(분열길이), Spray Angle(분무각), Patternator(패터네이터), Grooved Orifice(그루브 오리피스), Plain Orifice(플레인 오리피스)

1. 서 론

항공기 운용에 주로 사용되는 액체 연료(Jet A, JP-4)는 슬로싱(sloshing)과 진동에 의한 누유 및 사고 시 화재 확산과 같은 안전성 한계가 지적되어 왔다(Peacock, 1970). 그리고 이러한 문제를 해결하기 위해 전단박화(shear-thinning) 특성을 지닌 비뉴턴 유체(Non-Newtonian)인 젤 연료(gel fuel)

가 대안으로 제시되고 있다. 젤 연료는 항복응력 이하에서 고체와 같이 거동하여 연료 유출을 억제함으로써 안전성을 향상시키며, 높은 전단율에서는 점도가 감소하여 기존 액체 연료 공급계를 활용할 수 있다는 이점을 가진다. 그러나 액체 연료 대비 높은 점도로 인해 미립화 성능이 저하되어 연소 안정성 및 추진 성능에 한계를 보이므로, 이를 개선하기 위한 인젝터 형상 설계 연구가 필수적이다(Natan, 2020).

특히 충돌형 인젝터는 구조가 단순하고 미립화 성능이 우수하여 젤 추진제 연구에 널리 활용되고 있다(Anderson, 1992; Ryan, 1995; Von Kampen, 2006). 그 중, 충돌형 doublet 인젝터는 동일 평면 상에서 분사된 두 개의 액주가 일정한 충돌각을 이루며 충돌하여 얇은 액막(liquid sheet)을 형성하고,

Received: 24. Dec. 2025, Revised: 26. Dec. 2025,

Accepted: 29. Dec. 2025

* 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

*** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처자 E-mail : hjmoon@kau.ac.kr

연락처자 주소 : 경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76, 한국항공대학교 기계관 412호

공기역학적파(aerodynamic wave)와 충돌파(impact wave)에 의해 액사(ligament)와 액적(droplet)으로 분열되는 분열 메커니즘을 지닌다. 선행 연구에 따르면 인젝터 오리피스의 기하학적 형상은 분무특성을 결정짓는 민감한 인자로 알려져 있다(Fu, 2014). 특히 오리피스 내부에 홈을 적용한 groove 구조는 유동의 마찰 손실을 저감하는 효과가 있음이 보고된 바 있다(Javaherchain, 2019). 이와 관련하여 Kim(2023)과 Lee(2022)는 plain 및 grooved 오리피스 형상 변화에 따른 젤 연료의 내부 유동 해석을 수행하였으나, 해당 구조가 실제 분무 발달 및 미립화 특성에 미치는 영향에 관한 연구는 여전히 미비한 실정이다.

본 연구에서는 충돌형 인젝터 오리피스 내부의 groove 유무에 따른 모사젤 추진제의 분무특성을 실험적으로 규명하였다. 유량측정 및 분무가시화 실험을 수행하여 토출계수, 분열길이, 분무각 등의 기본적인 분무 인자를 측정하였으며, 패턴네이터(patternator)를 활용하여 공간적 질량 분포를 파악하였다. 이를 통해 groove 구조가 젤 추진제의 미립화 성능 향상에 미치는 영향을 분석하였다.

II. 본 론

2.1 모사젤 추진제의 유변학적 특성

본 연구에서 사용된 모사젤 추진제는 기반유체인 종류수 99.1 wt%에 젤화제인 Carbopol 941 0.4 wt%와 증화제인 20% 수산화나트륨용액(NaOH)을 0.5 wt%를 혼합하여 제작하였다. Fig. 1은 모사젤 추진제의 젤화제 첨가량에 따른 전단율-전단응력 선도이고, 식 (1)로 표현되는 Herschel-Bulkley 점도 모델을 사용해 점도에 의한 영향을 분석하였다. Table 1은 점도 모델의 계수 및 표면장력을 나타내며, 여기서 τ_0 는 항복응력(yield stress), K 는 컨시스턴트 시 상수(consistency index), n 은 유동지수(flow number)를 의미한다.

모사젤 추진제는 전단박화 비뉴턴 유체로, 뉴턴 유체의 일반적인 레이놀즈 수를 통한 분석이 어렵다. 이에 본 연구에서는 Herschel-Bulkley 점도 모델을 적용한 일반화된 레이놀즈 수 $Re_{gen,HB}$ 를 사용하였으며, 이는 식 (2)와 같이 표현된다(Madlener,

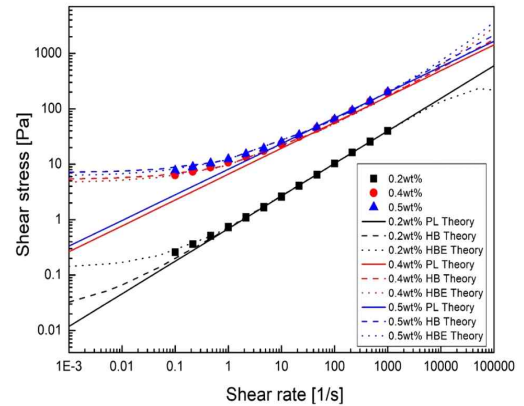


Fig. 1. Shear rate and shear stress curves with rheological models on gellant concentration (Han, 2019)

Table 1. Surface tension and curve fit parameters of HB viscosity model on Carbopol 941 0.4 wt% gel(Han, 2019)

Index	Value
Surface tension (dyne/cm)	113.92
τ_0 [Pa]	5.5455
K	4.8029
n	0.5190

2009). 이때 \bar{u} 는 액주의 축 방향 평균 속도, ρ 는 모사젤 추진제의 밀도, D 는 오리피스의 직경을 의미한다. 식 (3)은 충돌형 인젝터의 분열특성 분석에 주로 사용되는 무차원 수로, 관성력과 표면장력(σ)의 비를 의미하는 웨버 수(Weber number)의 관계식을 나타낸다.

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

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

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

$$We = \frac{\rho \bar{u}^2 D}{\sigma} \quad (3)$$

2.2 실험장치 및 실험조건

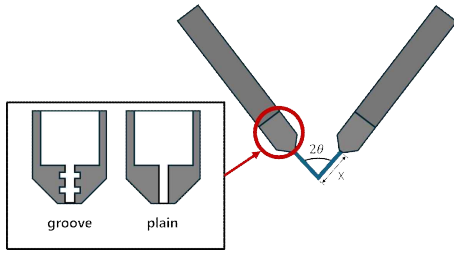


Fig. 2. Schematic of impinging injector

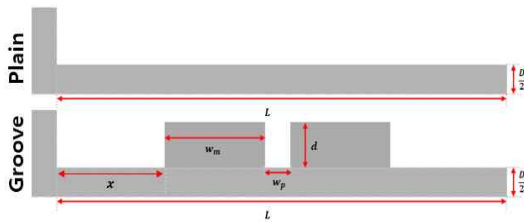


Fig. 3. Geometries of orifices

Fig. 2는 충돌형 인젝터의 개략도와 각 오리피스의 단면 형상을 나타낸다. Fig. 3은 본 연구에서 사용한 plain 오리피스와 grooved 오리피스의 내부 형상을 나타낸 것이고, 이에 대한 설계 변수는 Table 2에 나타내었다. 여기서 L 은 오리피스의 길이, D 는 오리피스의 직경, x 는 오리피스의 입구로부터 groove까지의 거리, w_m 은 groove의 너비, w_p 는 rib의 너비, d 는 groove의 깊이를 의미한다. L/D 비는 Kim (2023)의 CFD 결과를 바탕으로 토출계수가 가장 높은 $L/D=5$ 로 설정하였다. 오리피스 입구와 groove 사이의 거리 x 는 오리피스 입구에서 유동박리에 의해 발생하는 재순환 영역이 groove 내부에 형성되는 재순환 영역에 간섭하는 것을 방지하기 위해 0.75 mm로 설정하였고, $r_m(=d/w_m)=0.3$ 이상에서는 깊이 d 가 증가해도 압력손실 감소 효과가 더 이상 증가하지 않는다는 Javaherchian (2019)의 연구 결과를 바탕으로

Table 2. Values of orifice geometries

Index		Value [mm]
Orifice length	(L)	5
Orifice diameter	(D)	1
Groove height	(d)	0.5
Groove width	(w_m)	1.5
Groove location	(x)	0.75
Rib width	(w_p)	0.2

d 와 w_m 을 각각 0.5 mm, 1.5 mm로 설정하였다. w_p 는 실물 인젝터 제작이 가능한 한계값인 0.2 mm로 설정하여 제작하였다.

Fig. 4는 모사젤 추진제 분무실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 질소를 통한 가압방식을 이용하여 모사젤 추진제가 안정적으로 공급될 수 있도록 하였으며, 공급압력 측정을 위해 인젝터 상단에 정압센서를 설치하였다. 이미지는 고속 카메라 (Phantom VEO 640)를 사용하여 해상도 512×512 pixel의 이미지를 촬영속도 10,000 fps로 0.1 초 동안 촬영하였다. Table 3은 본 연구의 상세한 분무 실험조건을 나타낸다. 충돌 거리(X)는 일반적으로 설정하는 $X/D=10$ 으로 설정하여 X 값은 10 mm로 고정하였고, 충돌각이 너무 작은 경우 분열되는 과정을 확인하기 어려워 최솟값을 50° 로 설정하였다. 또한 충돌각이 90° 를 넘는 경우 액막의 일부가 충돌지점 기준 위쪽으로 형성되고, 액적이 인젝터에 부착되어 관찰 및 측정을 방해하므로 최대 충돌각을 90° 로 설정하였다. 공급압력은 액막이 분열하여 분무각 측정이 가능한 구간을 기준으로 설정하여 실험을 진행하였다.

2.3 실험 결과

2.3.1 토출계수(Discharge Coefficient)

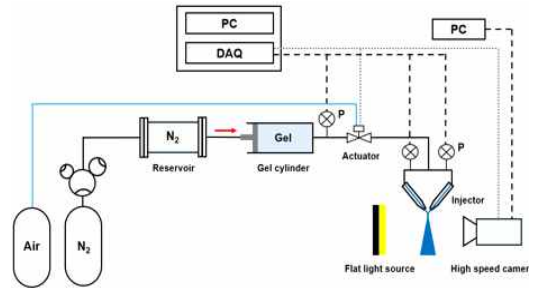


Fig. 4. Schematic of spray experimental setup

Table 3. Experimental conditions

Index	Value
Impinging length (X)	10 mm
Impinging angle (2θ)	$50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$
Supply pressure	8 - 29 bar
Mass flow rate	22.3 - 42.8 g/s
Re_{genHB}	1,955 - 5,137
We	6,787 - 24,989

토출계수는 이론유량 대비 실제유량의 비율로 식 (4)와 같이 정의되며, 인젝터에서 발생하는 손실을 나타내는 지표이다. Fig. 5는 각 오리피스의 토출계수를 $Re_{gen,HB}$ 의 변화에 따라 나타낸 것이다. groove 구조에 의한 마찰 손실 감소 효과로 인해 토출계수 값이 plain 오리피스 대비 높을 것이라는 예상과 다르게 유의미한 차이가 관찰되지 않았다. 이는 orifice의 짧은 길이로 인해 groove의 수가 적어 마찰 손실 감소 효과가 미미하게 나타난 것으로 사료된다.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{ideal}} = \frac{\dot{m}_{actual}}{A\sqrt{2\rho(\Delta P)}} \quad (4)$$

2.3.2 분열길이(Breakup Length)

Fig. 6의 (a)는 분열길이 측정 기준을 나타내며, 액주의 충돌지점으로부터 액막이 액사로 최초로 분리되기까지의 거리인 1차 분열길이를 측정하였다. Fig. 6의 (b)는 $Re_{gen,HB}$ 에 따른 각 오리피스의 분열길이를 충돌각 별로 나타낸 것이다.

실험 결과, 충돌각 및 $Re_{gen,HB}$ 가 증가함에 따라 plain과 grooved 오리피스 모두 분열길이가 감소하였

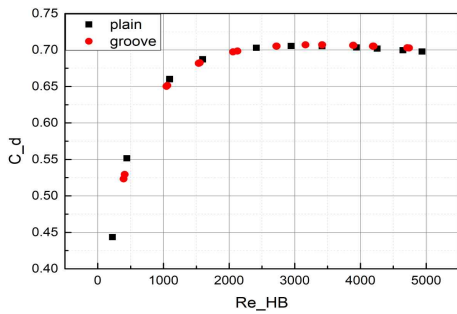


Fig. 5. Discharge coefficient of each orifices

고, 충돌각 50°, 70°, 90°에서 모두 grooved 오리피스의 분열길이가 plain 오리피스 대비 짧게 나타났다. Fig. 7의 (a)는 각 오리피스별 액주의 촬영 사진이고, (b)는 Dombrowski (1964)가 촬영한 층류 및 난류 액주의 형상이다. 이를 통해 plain 오리피스의 액주는 층류로 나오는 반면, grooved 오리피스의 경우 액주가 난류 형상으로 나오는 것을 확인할 수 있다. 이는 Kim (2023)의 수치적 연구에서 확인된 groove 내부의 재순환 영역이 groove 외부로 확장되는 현상으로 인해 mixing 효과가 발생하여 grooved 오리피스의 내부 유동이 난류로 발달된 것으로 사료된다. 이러한 난류 액주의 충돌은 불안정한 액막을 형성하여 분열을 촉진시키는 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 grooved 오리피스의 분열길이가 더 짧게 나타난 것으로 판단된다.

2.3.3 분무각(Spray Angle)

Fig. 8의 (a)는 분무각의 측정 기준을 나타내며, (b)는 $Re_{gen,HB}$ 에 따른 각 오리피스의 분무각 변화를 충돌각별로 나타낸 것이다. 분무각은 액주의 충돌 이후

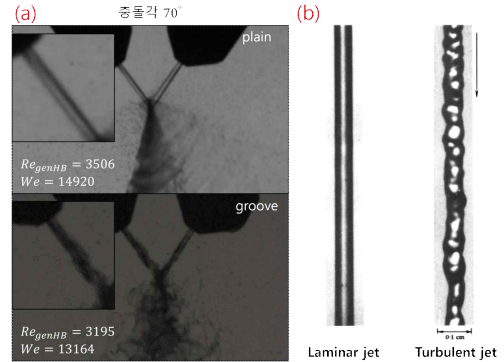


Fig. 7. (a) Spray column of orifices, (b) Photographs of jets from orifices(Dombrowski, 1964)

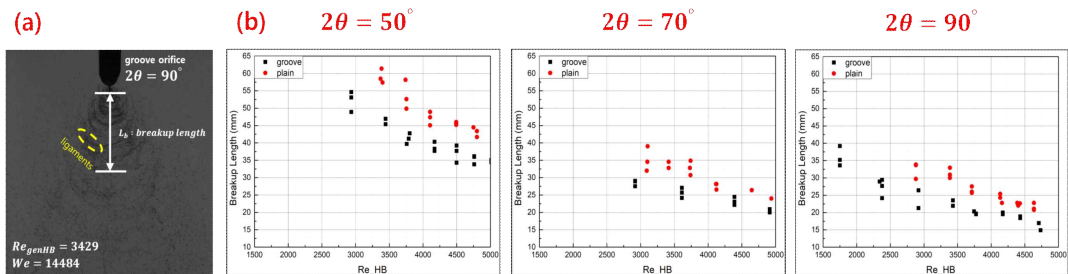


Fig. 6. (a) Measurement of breakup length, (b) Variation in breakup length with $Re_{gen,HB}$

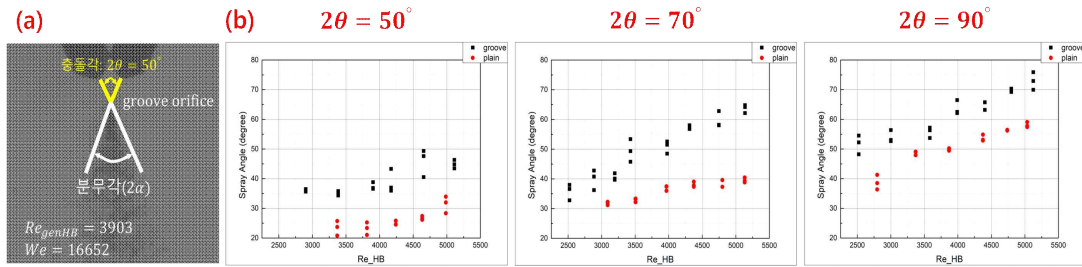


Fig. 8. (a) Measurement of spray angle, (b) Variation in spray angle with $Re_{gen,HB}$

spray가 이루는 각도를 기준으로 측정하였다.

실험 결과, 각 오리피스 모두 $Re_{gen,HB}$ 및 충돌각이 증가함에 따라 분무각이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 낮은 충돌각(Fig. 9(a))에서는 액주 충돌 후 고속 유동이 측방향으로, 저속 유동이 접선 방향으로 이동하며 저속 액체 박층을 형성하는 반면, 높은 충돌각(Fig. 9(b))에서는 고속 유동이 균일하게 분포하고, 충돌각 증가에 따른 충돌파의 증가로 인해 액막 너비가 확대되며 질량 보존에 의해 액막 두께가 감소하여 분열이 가속된 것으로 사료된다(Dombrowski, 1964). grooved 오리피스의 경우 plain 오리피스 대비 모든 충돌각에서 더 큰 분무각이 도출되었다. 이는 groove 구조에서 발생한 재순환 영역의 slip 효과로 인해 벽면에서의 마찰 항력이 감소함에 따라 나타난 결과인 것으로 사료된다(Kim, 2023). 또한, Fig. 8(b) 그래프의 충돌각 70°와 90°에서 $Re_{gen,HB}$ 에 따른 grooved, plain 오리피스의 충돌각별 분무각의 변화율을 보면 grooved 오리피스의 변화율이 plain 오리피스 대비 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 특히 충돌각 70°에서

grooved 오리피스의 변화율이 plain 오리피스 및 다른 충돌각 대비 높게 나타났다. 이에 grooved 오리피스의 경우 충돌각 70°에서 $Re_{gen,HB}$ 값이 상승함에 따라 가장 큰 분무각을 보일 것으로 판단된다.

Fig. 10은 $We \times \sin^2(\theta)$ 에 따른 분무각을 오리피스별로 나타낸 것이다. $We \times \sin^2(\theta)$ 는 액주가 충돌할 때 액막과 수직인 방향의 표면장력 대비 관성력을

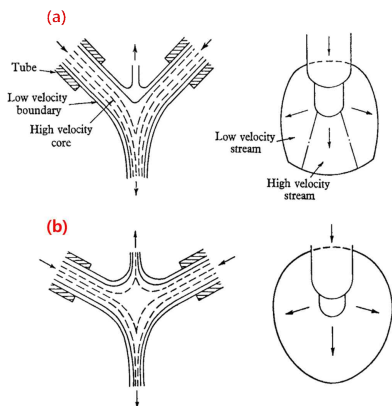


Fig. 9. Impingement of two laminar jets (Dombrowski, 1964)

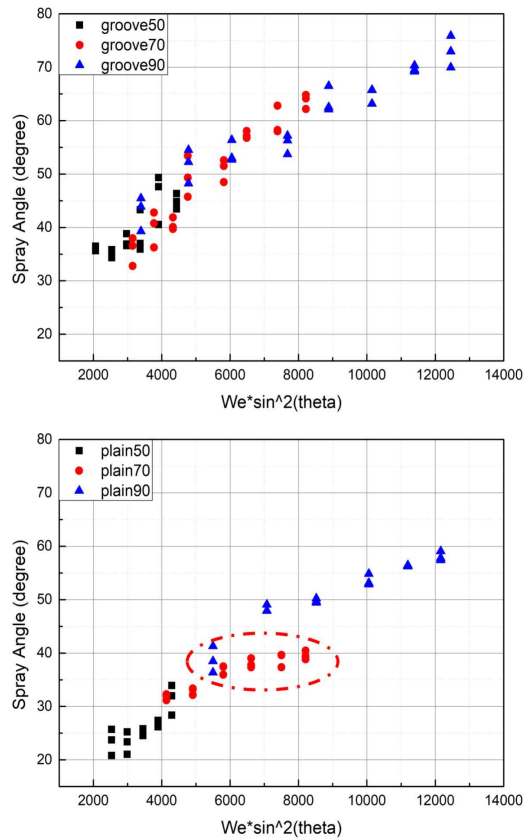


Fig. 10. Variation in spray angle with $We \times \sin^2(\theta)$

의미하고, 이는 충돌파의 크기를 결정하는 지표이다. Fig. 10에서 분무각이 $We \times \sin^2(\theta)$ 에 비례하여 상승하는 경향을 보인다. 이에 관성력 증가에 따른 분무각의 변화가 충돌각에 관계없이 일정한 것을 알 수 있다. 그러나, plain 오리피스 충돌각 70° , $We \times \sin^2(\theta)$ 값 6,000 이상에서 분무각의 경향이 충돌각이 다른 경우 대비 작은 것을 확인할 수 있다(red circle). 이는 충돌형 인젝터 오리피스의 가공 오차로 인한 비정렬(misalignment)에 의해 나타난 결과로 사료된다.

2.3.4 질량분포도(Mass Distribution)

분무각 측정을 통한 분무특성 파악은 실제 젤 추진제의 충돌 이후 액적의 분포도를 파악하는 데 있어 한계가 존재하고, 충돌형 인젝터에서 빈번히 발생하는 비정렬(misalignment)의 정도를 판단하기 어렵기 때문에 입체적 분무형상의 파악이 가능한 패턴네이터(patternator)를 활용하여 질량분포도를 측정하였다. Fig. 11의 (a)는 패턴네이터(patternator) 장치의 형상을 나타낸 것이고, (b)는 오리피스 내부 형상 및 충돌각에 따른 공간적 질량 분포도의 측정 결과이다. 패턴네이터 실험장치는 패턴네이터 장치 위에 유리시험관을 7×7 배열로 배치하고 3초간 액적을 수집하였다. 실험조건은 분열길이 가장 길게 나타나는 충돌각 50° plain 오리피스의 분열길이(Fig. 6)를 기준으로 설정하여 모두 동일한

$Re_{gen,HB}$ 값으로 실험을 진행하였다.

실험 결과, plain과 grooved 오리피스 모두 충돌각이 증가함에 따라 액적의 분포가 넓어지는 경향이 나타났다. 이는 Fig. 8에서 나타난 결과와 동일한 것으로 판단된다. grooved 오리피스의 경우 plain 오리피스 대비 더 넓은 질량분포도가 나타났는데, 이는 grooved 오리피스의 난류 액주로 인해 액막의 분열이 촉진되어 나타난 결과인 것으로 사료된다.

충돌형 인젝터의 경우 액막이 액주 평면에 수직인 평면을 형성하여 액적의 분포가 상하로 긴 타원형의 분포로 나타나는 것이 일반적이다(Ryan, 1995). plain 오리피스의 경우 타원의 장축이 기울어져 나타난 것을 확인할 수 있으며, 이는 plain 오리피스 가공오차로 발생한 비정렬(misalignment)로 인해 모멘텀(momentum)의 방향이 틀어져 발생한 것으로 판단된다. 비정렬로 인해 장축이 기울어져 형성되는 각도를 spray fan angle이라 하며, 충돌각이 50° 에서 70° , 90° 로 증가함에 따라 spray fan angle은 45° 에서 60° , 70° 로 증가하는 경향을 보였다. 비정렬 정도는 spray fan angle을 이용해 계산한 skewness fraction(x)으로 평가하였으며, 이는 식 (4)와 같이 액주 간 축 사이 거리(y)를 액주 직경(D)으로 나눈 값으로 충돌형 인젝터의 미세한 비정렬을 나타낸다(Subedi et al., 2017). 선행연구에 따르면

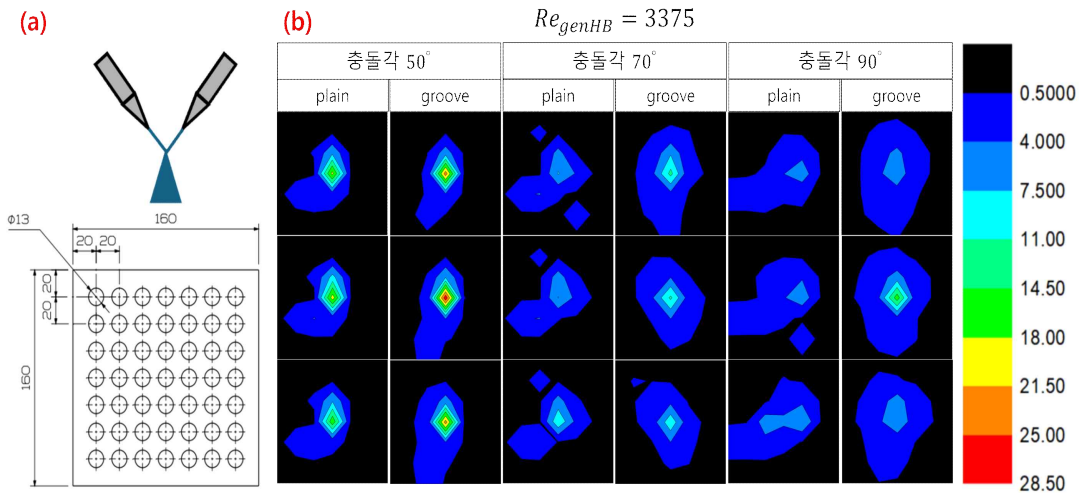


Fig. 11. (a) Schematic of patternator, (b) Mass distribution with orifice internal shape and impinging angle

skewness가 증가할수록 spray fan angle도 증가하며, 충돌각 90°에서 skewness fraction이 0.7일 때 spray fan angle은 약 70°로 나타난다. 본 연구의 plain 오리피스 역시 충돌각 90°에서 spray fan angle이 70°로 측정되어 skewness fraction은 0.7, 액주 간 축 사이 거리는 0.7 mm로 추정된다.

$$x = \frac{y}{D} \quad (4)$$

III. 결 론

본 연구에서는 충돌형 인젝터를 이용하여 오리피스 내부 groove 유무가 모사젤 추진제의 분무특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해 토출계수 측정, 분무 가시화 실험, 패터네이터 기반 공간적 질량분포 측정을 수행하여 분열길이, 분무각, 질량 분포도를 파악하였다.

실험 결과, 두 오리피스 간 토출계수 차이는 미미하였으며, 이는 짧은 오리피스 길이와 제한된 groove 개수로 인해 추가적인 압력강하 효과가 제한적이었기 때문으로 사료된다. 반면, groove 오리피스는 모든 충돌각 조건에서 plain 오리피스 대비 분열길이가 감소하고 분무각이 증가하는 경향을 보였다. 이는 오리피스 내부 재순환 영역으로 인해 발생한 난류 액주가 액막의 분열을 촉진한 결과로 판단된다. 또한, 충돌각 변화를 반영한 수정 웨버 수 ($We \times \sin^2(\theta)$)를 도입하여 groove 적용에 따른 분무각 증가 경향을 정리하였고, 공간적 질량분포 측정 결과를 통해 이를 일관되게 확인하였다. 따라서 오리피스 내부 groove 구조는 토출성능 저하 없이 액막 분열을 촉진함으로써 젤 추진제의 미립화 및 분무특성 개선에 유효한 오리피스 형상임을 확인하였다.

Acknowledgements

본 논문은 정부(우주항공청, 과학기술정보통신부, 산업통상자원부)의 재원으로 한국연구재단 및 한국산업기술기회평가원(RS-2022-NR067039, RS-2023-00302750, RS-2024-00467969)의 지원을 받아 수행된 연구로 지원에 감사드립니다.

References

1. Peacock, A. T. and Christensen, L. D., "Compatibility of gelled and emulsified fuels with jet transport aircraft", SAE Transactions, 79, 1970, pp.846 - 853.
2. Natan, B. and Rahimi, S., "The status of gel propellants in year 2000", International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 5(1 - 6), 2002, pp.1 - 8.
3. Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S. and Santoro, R. J., "Atomization characteristics of impinging liquid jets", Journal of Propulsion and Power, 11(1), 1995, pp.135 - 145.
4. Von Kampen, J., Madlener, K. and Ciezki, H., "Characteristic flow and spray properties of gelled fuels with regard to the impinging jet injector type", Proceedings of the 42nd AIAA Joint Propulsion Conference, 2006, pp.1 - 4.
5. Anderson, W. E., Ryan, H. M., Pal, S. and Santoro, R. J., "Fundamental studies of impinging liquid jets", Proceedings of the 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1992, pp.1 - 2.
6. Fu, Q. F., Yang, L. J., Cui, K. D. and Zhuang, F. C., "Effects of orifice geometry on gelled propellants sprayed from impinging-jet injectors", Journal of Propulsion and Power, 30(4), 2014, pp.1113 - 1117.
7. Javaherchian, J. and Moosavi, A., "Pressure drop reduction of power-law fluids in hydrophobic microgrooved channels", Physics of Fluids, 31(7), 2019, pp.7 - 10.
8. Kim, S., "A study on the spray characteristics of gel propellants for the orifice internal geometry of doublet impinging injector", M.S. thesis, Korea Aerospace University, Goyang, 2023, pp.1 - XX.
9. Lee, I. W., Kim, S. H. and Moon, H. J., "Analysis of orifice internal flow for shear-

- thinning fluid according to the presence of groove". The Korean Society for Aviation and Aeronautics Fall Conference, 2022, pp.1-3.
10. Madlener, K., Frey, B. and Ciezki, H. K., "Generalized Reynolds number for non-Newtonian fluids", Progress in Propulsion Physics, 1, 2009, pp.237 - 250.
 11. 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, 23(2), 2020, pp.287 - 298.
 12. Dombrowski, N., "A study of the sprays formed by impinging jets in laminar and turbulent flow", Journal of Fluid Mechanics, 18(3), 1964, pp.392 - 400.
 13. Subedi, B., Son, M., Jang, S. P. and Koo, J. Y., "Reliability study on skewness of doublet impinging injectors", Journal of Mechanical Science and Technology, 31, 2017, pp.2295 - 2306.