

액체로켓 핀틀 인젝터의 분사조건이 미립화 성능에 미치는 영향

손 민* · 유기정* · 구자예† · 권오채** · 김정수***

Injection Condition Effects of a Pintle Injector for Liquid Rocket Engines on Atomization Performances

Min Son, Kijeong Yu and Jaye Koo, Oh Chae Kwon and Jeong Soo Kim

Key Words: Pintle Injector(핀틀 인젝터), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Spray(분무), Atomization(미립화)

Abstract

Effects of injection conditions on a pintle injector which is proper to recent liquid rocket engines requiring low cost, low weight, high efficiency and reusability were studied. The pintle injector with a typical moving pintle was used for atmospheric experiment using water and air. Injection pressures of water were considered 0.5 and 1.0 bar, 0.1 to 1.0 bar for injection pressures of air and 0.2 to 1.0 mm for pintle opening distance. Sauter mean diameters (SMD) of spray was measured at 50 mm distance from a pintle tip and SMD was treated as a representative parameter in this study. As a result, because of shape characteristics of the pintle injector, there was a transient region between the pintle opening distances of 0.6 and 0.7 mm and this region affected to mass flow rates and SMDs. Also, Reynolds numbers for gas, Weber numbers and momentum ratios were adopted as major non-dimensional parameters and the momentum ratio has strong correlation with SMD.

기호설명

ΔP : 분사 차압 (bar)
 L_{open} : 핀틀 개도 (m)
 M : 운동량비
 \dot{m} : 질량유량 (kg/s)
 Re : Reynolds 수
 V : 속도 (m/s)
 We : Weber 수

μ : 점성계수 (Pa·s)
 ρ : 밀도 (kg/m³)
 σ : 표면장력 (N/m)

하첨자

gas : 기체
liq : 액체

Received: 13 Jun 2015, Received in revised form: 20 Jun 2015, Accepted: 21 Jun 2015

*회원, 한국항공대학교 대학원

**회원, 성균관대학교 기계공학부

***회원, 부경대학교 기계공학부

†책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

E-mail : jykoo@kau.ac.kr

TEL : (02)300-0116 FAX : (02)3158-0117

1. 서 론

핀틀 인젝터는 움직이는 핀틀기구를 이용하여 유량을 조절하는 인젝터로서 간접분사식 디젤엔진에 널리 사용하고 있다. 우주추진기관 분야에서는 로켓엔진의 추력

을 조절하기 위해 사용할 수 있으며 1950년대에 자발 추진제를 이용한 인젝터로써 개발이 진행되었고, 1969년 아폴로 달탐사선의 착륙엔진에 실제로 적용이 되었다^(1,2). 하지만 이후 주력으로 개발된 인젝터는 동축전단 또는 동축스웰 인젝터로써, 고정된 형상을 가진 인젝터를 사용하여 상류에서 차압을 조절하여 유량을 제어하는 방법이 널리 사용되었다. 최근 들어 핀틀인젝터가 재조명되고 있는데 핀틀 인젝터는 저비용, 경량화, 고효율, 재사용과 같은 최신 로켓엔진의 추세에 적합하기 때문이다. 기존에 널리 사용되는 고정형상을 가진 동축형 인젝터는 인젝터의 분사면적이 고정되고 차압을 조절하여 추력을 제어하기 때문에, 100% 추력 상태에서 최적화된 인젝터 형상은 저추력 조건에서는 효율이 감소하게 된다. 하지만 핀틀인젝터는 직접적으로 분사면적을 조절함으로써 저유량, 저추력 조건에서도 최적의 분무 조건을 유지함으로써 연소효율을 유지할 수 있다. 또한 대형 발사체의 경우 분무 효율을 높이기 위해 100개 이상의 다수의 인젝터 모듈을 가진 인젝터 플레이트를 사용하는데, 이 때문에 인젝터 플레이트는 연소기 전체 무게의 약 30%를 차지하여 엔진 무게증가에 크게 기여한다⁽³⁾. 하지만 핀틀 인젝터는 높은 유량의 추진제를 단일 인젝터로 미립화 및 혼합이 가능하여 엔진 전체의 유량을 제어할 수 있기 때문에 무거운 인젝터 플레이트를 단일 핀틀 인젝터로 대체하여 엔진을 경량화할 수 있는 장점을 가진다. 부가적으로 기존에는 1회 발사후 폐기되었던 1단 발사체를 다시 발사지점으로 귀환시켜 재사용한다면 발사체의 개발 비용을 크게 줄일 수 있는데, 이를 위해서는 넓은 범위의 추력조절이 필수적이며 핀틀인젝터는 이러한 동작이 가능하다. Space X사는 재사용 발사체 개발프로그램으로써 핀틀 인젝터를 사용한 Merlin 엔진을 사용한 발사체인 Falcon 9의 1단 발사체를 귀환시키는 연구를 수행하고 있다⁽⁴⁾.

이러한 장점에도 핀틀 인젝터는 다양한 핀틀의 형상, 동작 메커니즘 등 동축형 인젝터보다 더 많은 설계점이 존재하며 다양한 미립화 성능에 대한 연구가 진행된 동축형 인젝터^(5,6)와는 달리 이를 최적화하기 위한 연구가 요구된다. Son 외⁽⁷⁾는 핀틀 인젝터의 분무 조건에 따른 분사각 영향을 분석하였는데 분사각 뿐 아니라 미립화에 대한 영향도 분석이 필요하다. 최적화된 액체로켓용 핀틀 인젝터는 연소실 전체를 활용할 수 있도록 충분한 분사각과 적절한 미립화 성능을 유지해야 한다. 따라서 본 연구에서는 액체로켓용 핀틀 인젝터의 최적설계를

위한 기초연구로써 기본적인 형상의 핀틀 인젝터를 이용하여 핀틀의 개도 및 분사 조건에 따라 분무 미립화에 미치는 영향을 연구하고자 하였다. 상압조건에서 실추진제를 물과 공기로 모사하여 액적평균입경(SMD; Sauter mean diameter)을 측정하였으며, 추후 연소시험과 연계하기 위해 주요 무차원수와의 상관관계를 분석하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 핀틀인젝터 및 실험 범위

핀틀 인젝터는 Fig. 1과 같이 넓게 퍼지는 핀틀팁(pintle tip)을 가지는 핀틀로드(pintle rod)가 움직이며 액체의 유량을 개도 및 차압으로 조절하며 기체가 분사되는 환형 갭은 고정된 면적을 가진다. 상세한 형상제원은

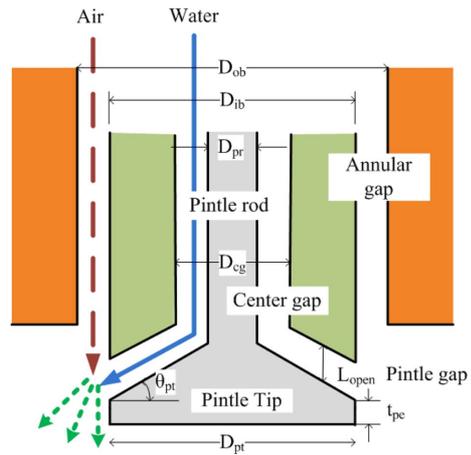


Fig. 1 Schematic of pintle injector

Table 1 Dimensions of the pintle injector and experimental conditions

Outer body diameter	D_{ob}	9.0 mm
Inner body diameter	D_{ib}	8.0 mm
Center gap diameter	D_{cg}	4.5 mm
Pintle rod diameter	D_{pr}	3.0 mm
Pintle tip diameter	D_{pt}	8.0 mm
Pintle tip angle	θ_{pt}	40.0°
Pintle end thickness	t_{pe}	1.0 mm
Pintle opening distance	L_{open}	0.2~1.0 mm

Table 1과 같으며, 핀틀 인젝터의 특성상 저개도에서는 핀틀 팁이 최소면적으로 유량을 제어하나 일정 개도 이상에서는 핀틀 팁의 최소면적이 핀틀 로드 주위의 센터 갭(center gap)의 면적을 초과하여 유량이 일정해지는 특징을 갖는다. 핀틀의 구동은 마이크로미터(micrometer)를 사용하여 0.001 mm 단위로 정밀하게 제어하였으며 본 연구에서는 0.2 mm~1.0 mm 범위에서 0.2 mm 간격으로 실험을 수행하였다.

액체가 분사되는 액체분사 차압은 0.5, 1.0 bar로 일정하게 유지하고 환형갭(annular gap)에서 분사되는 기체 차압은 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0 bar로 유지하였다.

2.2 실험계측장치 및 무차원수

분무 시험을 위해 액체 공급은 피스톤 펌프를 이용하였으며 펌프의 진동을 감쇄하기 위해 세틀링 챔버(settling chamber)를 공급라인 중간에 설치하였다. 인젝터 차압의 조절은 바이패스 밸브(bypass valve)를 사용하였으며 차압의 측정은 압력 트랜스듀서(pressure transducer)를 사용하여 패널미터(panel meter)로 수치화하였다. 압력 트랜스듀서는 0~2 bar의 스케일 및 0.3%의 오차를 가진다. 공기는 압축기로 충전된 고압 탱크로부터 공급을 하였고 레귤레이터(regulator)를 이용하여 인젝터 차압을 조절하였다. 기체의 유량은 부유식 유량계를 사용하여 체적유량을 측정된 후 측정된 압력으로 질량 유량을 계산하였고 오차는 최대 ±0.5 ml이다.

미립화 성능을 평가하기 위한 지표로써 액적평균입경(SMD)를 선정하였고 이를 측정하기 위해 레이저 회절 입경 측정장치를 도입하였다. 레이저 회절 측정장치는 Mie scattering 원리를 이용하여 구형으로 가정된 액적의 굴절률 및 흡수계수를 매개변수로 입사된 레이저의 산란 중 회절에 따른 광량을 측정한다. 레이저는 632.8 nm의 파장으로 29.5 mm의 직경으로 분무를 투과하여 원통형 체적내의 액적들에 의한 다중 산란광을 분석하여 평균 입경을 도출한다. 다양한 정의를 가지는 평균입경 중 유체역학적 특성 및 연소특성과 관련된 입자체적과 면적의 비인 SMD를 기준으로 미립화 성능을 분석하였다. SMD는 분무 중심부를 측정하였고 핀틀 팁에서 50 mm 떨어진 거리를 기준으로 하였다. 또한 거시적인 분무의 형상분석을 위해 스트로보스코프(stroboscope)와 CMOS 카메라를 이용하여 분무의 후광이미지(back-lit image)를 촬영하였다.

분무성능 특성 분석을 위해 핀틀 인젝터 분무에 관련성이 높은 세 가지 무차원 수를 기체 Reynolds 수, 기체

Weber 수, 운동량 비(momentum ratio)를 선정하였고 정의는 다음과 같다. 핀틀 인젝터에서의 주요 특성길이는 핀틀 개도이며 이를 무차원수 정의에 도입하였다.

$$Re_{gas} = \frac{\rho_{gas} V_{gas} L_{open}}{\mu_{gas}} \quad (1)$$

$$We = \frac{\rho_{gas} (V_{gas} - V_{liq})^2 L_{open}}{\sigma_{liq}} \quad (2)$$

$$M = \frac{\dot{m}_{gas} V_{gas}}{\dot{m}_{liq} V_{liq}} \quad (3)$$

3. 실험 결과 및 분석

3.1 유량특성 및 거시적 분무특성

핀틀 인젝터는 가변면적을 가진 인젝터로써 핀틀 팁에 따라 유량을 결정하는 최소면적이 조절되지만 일정 개도 이상에서는 센터 갭이 최소면적이 되는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징은 Fig. 3과 같이 측정된 액체 유량에서 확인할 수 있으며 개도 0.6~0.7 mm에서 유량이 감소 후 다시 증가하는 경향을 보인다.

실제 엔진에 적용 시에는 이와 같은 천이구간은 선형적인 추력조절을 어렵게 하므로 실사용 구간은 천이가 발생하기 전까지에서 사용되어야 할 것으로 보인다. Fig. 4는 환형 갭에서의 기체유량을 나타내고 있으며 공급 압력의 증가에 따라 거의 선형적으로 증가하는 특성

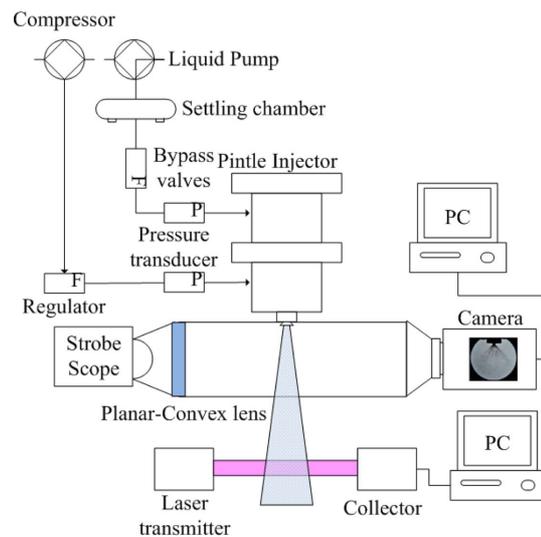


Fig. 2 Experimental setup

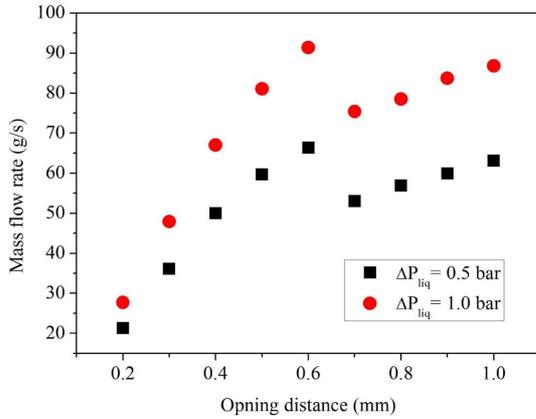


Fig. 3 Mass flow rate of water from pintle nozzle

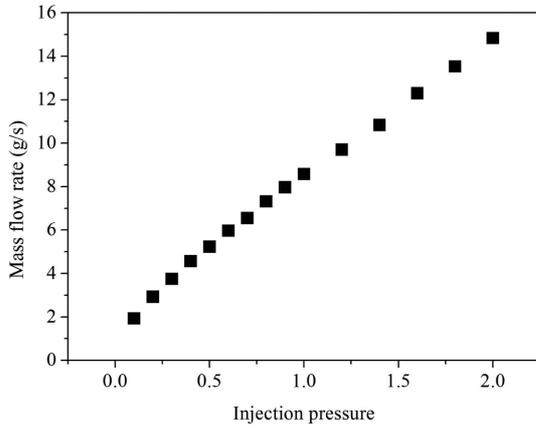
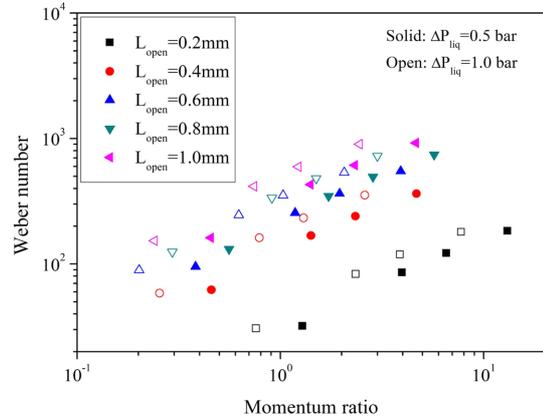


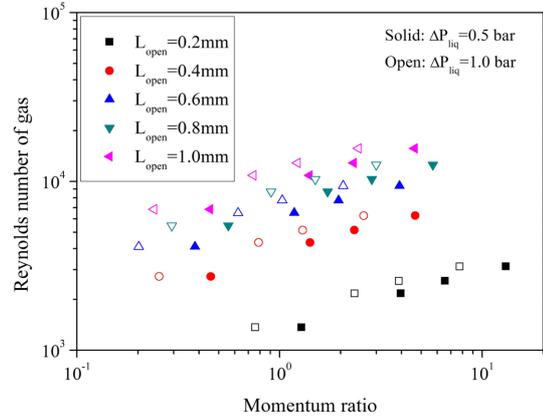
Fig. 4 Mass flow rate of air from annular gap

을 가진다. 유량 및 인젝터 형상제원을 이용하여 실험에서 포함하는 무차원 수의 범위는 Fig. 5와 같으며, 산소-수소 추진제의 일반적 운동량 비⁽⁸⁾를 참고하여 목표 추진제인 액체산소-기체메탄을 위한 낮은 운동량 비와 추후 연구할 액체산소-액체메탄의 높은 운동량 비를 모두 포함할 수 있는 범위를 기준으로 대응되는 Weber 수와 Reynolds 수를 나타낸다.

추가적으로 거시적 분무 특징을 분석하기 위해 촬영된 분무의 대표적 후광이미지는 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)의 액체 분사차압 0.5 bar, 기체 분사차압 0.1 bar, 개도 0.2 mm를 기준으로 하였을 때, Fig. 6(b)와 같이 액체의 차압만 0.5 bar에서 1.0 bar로 증가하는 경우에는 액체의 속도 및 운동량이 증가하여 분사각이 증가하였다. 동일한 조건(a)에서 Fig. 6(c)와 같이 기체 분사차압을 0.5 bar로 증가시켰을 경우에는 반대로 기체 운동량이 증가



(a) Weber number



(b) Reynolds number of gas

Fig. 5 Experimental range of non-dimensional numbers

하여 분무각이 매우 작아지고 액체가 중심부로 몰리면서 액체 시트 표면에서 기체의 전단력으로 인해 작은 액적들이 분리되는 현상을 보였다. 또한 Fig. 6(d)와 같이 개도를 0.2 mm에서 0.6 mm로 증가시켰을 경우에는 액체의 유량이 증가하는 경우인데 Fig. 6(b)와 달리 증가한 개도의 영향으로 속도는 증가하지 못하면서 낮은 미립화 성능을 보였다. 이는 미립화에 충분한 속도차 및 운동량비 조건이 이루어지지 않았기 때문이며, 높은 개도에서도 미립화가 가능하도록 분사차압의 증가가 요구된다.

3.2 미립화 성능

미립화 성능의 지표로 SMD를 사용하여 분석하고자 하였다. Fig. 7에서는 다양한 개도조건에서 기체 분사압력에 따른 관계를 나타낸다. 전반적으로 기체 압력이

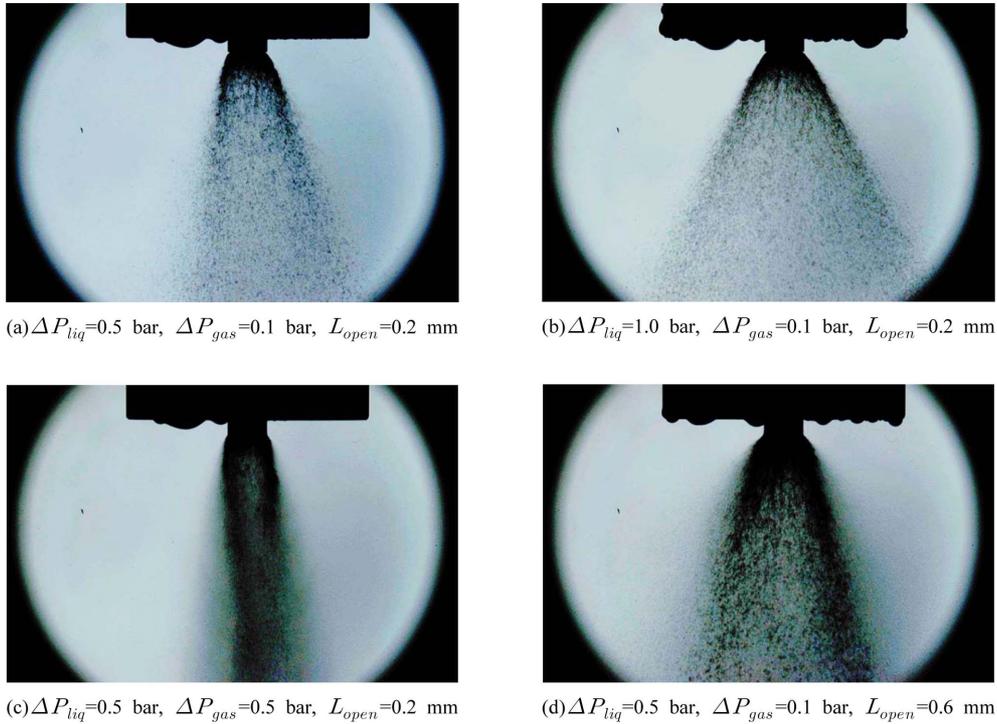


Fig. 6 Spray images at various injection conditions

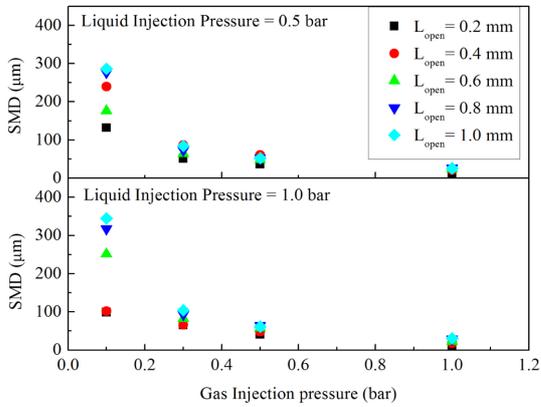


Fig. 7 SMD according to gas injection pressure at various pintle opening distances

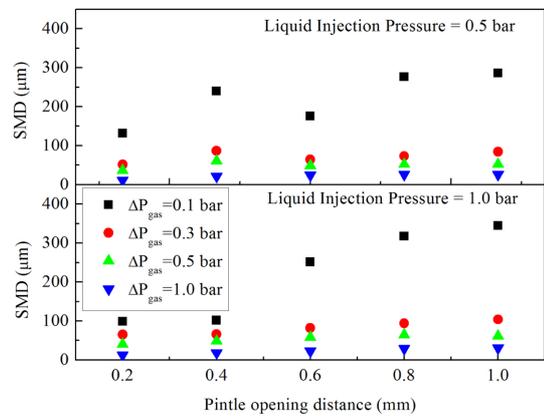


Fig. 8 SMD according to pintle opening distance at various liquid injection pressures

증가할수록 SMD가 감소하는 형상을 보이며 기체압력 0.3 이상에서는 약 100 μm 이하의 매우 높은 미립화 성능을 보인다. 또한 액체 분사 압력이 높은 1.0 bar 조건에서 최대 SMD가 더 크게 나타난다. Fig. 8은 동일한 실험결과를 다양한 분사압력 조건에서 핀틀 개도에 따라 나타내고 있다. 액체 분사압력 0.5 bar 조건에서는 개

도 0.6 mm에서 앞에서 설명하였던 최소 면적 구간 천이로 인해 SMD가 상승하다가 순간적으로 감소하는 형상을 보인다. 천이 구간의 영향은 액체 분사압력이 1.0 bar로 증가하면 천이구간의 영향이 감소하는 현상을 보인다. 이는 초기 낮은 개도에서 액체의 속도 증가로 인해 액체 시트 자체가 미립화에 영향을 미쳐 개도가 증

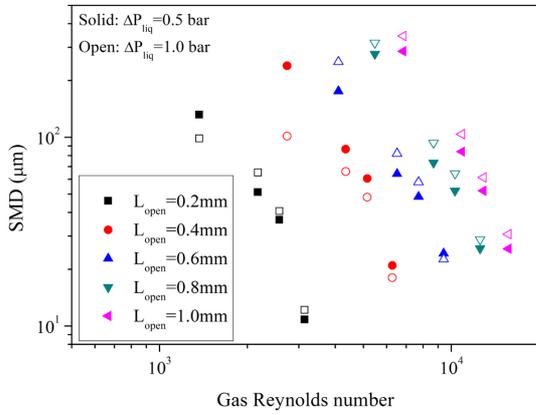


Fig. 9 SMD according to gas Reynolds number

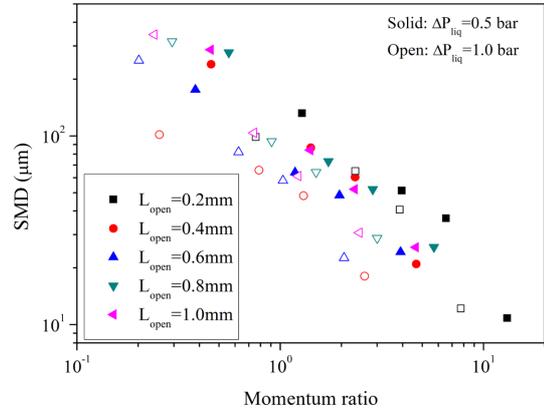


Fig. 11 SMD according to momentum ratio

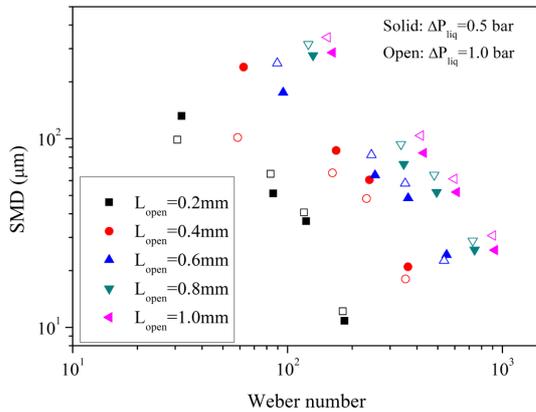


Fig. 10 SMD according to gas Weber number

가해도 좋은 미립화 성능을 유지할 수 있기 때문이다. 무차원수와의 상관관계 분석을 위해 기체 Reynolds 수, Weber 수, 운동량 비 세가지 무차원 수를 도입하였다. Fig. 9은 SMD와 Reynolds 수와의 관계를 나타내고 있는데 같은 개도 내에서는 Reynolds 수의 증가에 따라 SMD가 감소하는 영향을 보이며, 같은 기체 분사압력 조건에서는 개도가 증가함에 따라 SMD가 증가하는 경향을 보인다. 기체 Reynolds 수만으로는 넓은 산포를 보여 미립화 성능을 분석하기는 매우 어려울 것으로 판단된다. Fig. 10에서는 Weber 수와 SMD간의 관계를 나타내고 있으며 기체 Reynolds 수와 마찬가지로 동일한 개도 내에서는 Weber 수가 증가할수록 SMD가 감소하는 경향을 나타내고 있으나 같은 기체분사압력 조건에서 개도가 증가할수록 SMD가 증가하는 경향을 보인다. 기체 Reynolds 수 보다는 높은 상관관계를 가지지만 여전히

히 Weber 수만으로는 미립화에 대한 설명이 충분하지 않다. 마지막으로 Fig. 11에서 운동량비와 SMD의 관계를 나타내고 있는데 운동량비가 증가할수록 SMD가 감소하는 공통적 경향성을 명확하게 나타낸다. 이와 같은 결과는 핀틀 인젝터의 미립화는 추진제 사이의 전단력 (shear force)로 인해 분열이 가속되는 동축형 인젝터와는 달리, 가스터빈 인젝터와 같이 횡단류(cross flow) 내의 수직분사 시에 발생하는 운동량 차이에 의한 분열과 유사한 메커니즘을 가지고 있음을 나타낸다.

4. 결 론

1960년대 달탐사선에 사용되었던 핀틀 인젝터가 최근 로켓엔진 개발추세에 따라 새롭게 주목받고 있으나, 설계를 위한 형상변수가 많아 최적설계를 위한 기초연구가 요구된다. 본 연구에서는 핀틀인젝터의 다양한 분사 조건 및 핀틀의 개도에 따라 미립화 성능을 분석하고자 하였으며 레이저 회절 입경 측정장치를 이용하여 SMD를 측정 후 미립화 성능의 지표로 사용하였다.

SMD는 대체적으로 기체 분사압력이 증가할수록 개도가 작을수록 낮은 경향을 보였으나, 핀틀 인젝터의 형상특성상 발생하는 천이구간이 미립화 성능에도 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 보다 일반적인 관점으로 분석하기 위해 미립화에 관련된 대표적 무차원 수인 기체의 Reynolds 수, Weber 수, 운동량 비를 핀틀 개도를 이용해 새롭게 정의하여 분석한 결과, 운동량 비가 클수록 SMD가 작아지는 경향을 가지고 있으나 Weber 수는 SMD와 약한 상관관계를 가지고 있었다. 이러한 특징은

동축전단 인젝터는 두 가지 추진제의 분사 방향이 일치하여 운동량의 교환보다는 표면의 와류 및 전단력에 의해 분열이 되지만, 핀틀 인젝터는 핀틀팁을 통해 넓은 분사각을 가지는 액체와 축방향으로 분사되는 기체의 운동량 교환이 분열에 크게 영향을 주기 때문이다. 이와 같은 특징은 핀틀팁의 각도에 따라 핀틀 팁 각도가 커지는 경우 액체의 분사 방향이 축방향으로 가까워짐으로써 표면에서의 전단력의 영향이 증가할 것이다.

후 기

본 연구는 서울대학교 차세대 우주추진 연구센터와 연계된 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 선도연구센터지원사업(NRF-2013R1A5A1073861)의 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) R. Gilroy and R. Sackheim, "The Lunar Module Descent engine-A Historical Summary", Proceedings of the 25th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, C.A., AIAA 89-2385, 1989.
- (2) M. J. Casiano, J. R. Hulka and V. Yang, "Liquid-Propellant Rocket Engine Throttling: A Comprehensive Review", Journal of Propulsion and Power, Vol. 26, No. 5, 2010.
- (3) D. K. Huzel and D. H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid-propellant Rocket Engines", AIAA, 1992.
- (4) E. Seedhouse, "SpaceX: Making Commercial Spaceflight a Reality", Springer Science & Business Media, 2013.
- (5) 한재섭, 강경택, 김유, 김선진, "동축형 인젝터의 미립화 특성", 한국액체미립화학회지, 제5권, 4호, 2000, pp. 40~46.
- (6) 김도헌, 신정환, 이인철, 구자예, "다공성재를 이용한 동축형 분사기의 미립화특성", 제17권, 1호, 2012, pp. 35~44.
- (7) M. Son, K. Yu, J. Koo, O. Kwon, and J. Kim, "Effects of Momentum Ratio and Weber Number on Spray Half Angles of Liquid Controlled Pintle Injector", Journal of Thermal Science, Vol. 24, No. 1, 2015, pp. 37~43.
- (8) D. K. Huzel and D. H. Huang, "Design of Liquid Propellant Rocket Engines", NASA, 1967.

- (1) R. Gilroy and R. Sackheim, "The Lunar Module Descent engine-A Historical Summary", Proceedings of the 25th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Con-