

액체/액체 핀틀 분사기의 개도에 따른 분무특성 연구

윤원재^{a,b} · 안종현^a · 안규복^{a,*} · 윤호성^b

Study on the Spray Characteristics of Liquid/Liquid Pintle Injector by Opening Distance

Wonjae Yoon^{a,b} · Jonghyeon Ahn^a · Kyubok Ahn^{a,*} · Hosung Yoon^b

^aSchool of Mechanical Engineering, Chungbuk National University, Korea

^bNew Business Development Department, Spacesolutions Co., Ltd., Korea

*Corresponding author. E-mail: kbahn@chungbuk.ac.kr

ABSTRACT

An experimental study was conducted on the spray characteristics of the pintle injector by opening distance. The discharge coefficient of the pintle injector was investigated and the spray angle was measured by taking the spray image by test conditions. As a result of the measurement of the discharge coefficient, it was confirmed that the change in the discharge coefficient of the outer injector was not significant over the experimental conditions, but the change in the discharge coefficient of the inner injector was decreased as the flow rate increased. Measurement of the spray angle showed that the change in the spray angle was not significant in the conditions under which the spray was fully developed, but the spray was not fully developed at low flow rates. This confirmed the possibility of thrust control using the pintle injector.

초 록

개도에 따른 핀틀 분사기의 분무특성에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 분사조건에 따른 핀틀 분사기의 유량계수를 확인하였으며, 분무 이미지 촬영을 통해 분무각을 측정하였다. 유량계수 측정 결과 바깥쪽 분사기는 실험조건에 걸쳐 유량계수 변화가 크지 않았지만 안쪽 분사기는 유량에 따른 유량계수 변화가 큰 것을 확인하였다. 분무각 측정결과 분무가 완전 발달되는 조건에서는 분무각의 변화가 크지 않았으나 낮은 유량에서 분무가 완전 발달되지 않는 경우가 있었다. 이를 통해 핀틀 분사기의 추력조절 가능성을 확인하였다.

Key Words: Pintle Injector(핀틀 분사기), Discharge Coefficient(유량계수), Spray Angle(분무각), Throttling(추력조절)

Nomenclature

Received 30 November 2020 / Revised 10 May 2021 / Accepted 15 May 2021

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2020년도 추계학술대회(2020. 11. 25-27),

파라다이스호텔 부산) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

A_i : Orifice area of inner injector

A_o : Orifice area of outer injector

$C_{d,i}$: Discharge coefficient of inner injector

$C_{d,o}$: Discharge coefficient of outer injector

P_c	: Chamber pressure
r_i	: Radius of inner injector
r_o	: Radius of outer injector
L	: Opening distance
V_a	: Axial velocity
V_i	: Spray velocity of inner spray
$V_{i,a}$: Axial velocity of inner spray
$V_{i,a,m}$: Modified axial velocity of inner spray
$V_{i,r}$: Radial velocity of inner spray
$V_{i,r,m}$: Modified radial velocity of inner spray
V_o	: Spray velocity of outer injector
V_r	: Radial velocity
θ_i	: Half angle of inner injector
θ_o	: Half angle of outer injector
θ_p	: Pintle tip angle
θ_{spray}	: Spray half angle
$\theta_{spray,i}$: Spray half angle of inner injector
ΔP_i	: Pressure drop of inner injector
ΔP_o	: Pressure drop of outer injector

1. 서 론

액체로켓엔진은 고체 추진제를 사용하는 로켓엔진에 비해 추력 제어, 정지 및 재시동이 용이하기에 최적화된 추력 프로파일을 개발할 수 있다. 특히 액체로켓엔진의 추력 제어는 비행 중 발생하는 외란에 대해 효율적으로 대처할 수 있을 뿐만 아니라 발사체의 착륙 및 자세변환과 같이 보다 폭넓은 임무를 수행 가능하게 하므로 추력조절에 관한 대한 많은 연구들이 수행되고 있다[1,2].

액체로켓엔진의 추력제어를 위해 가장 많이 사용되는 방법은 추진제 유량을 제어하는 것으로, 이를 위해 고압 추진제 분사, 기체주입, 가변면적 분사기 사용 등 다양한 기법을 통한 액체로켓엔진의 추력제어 연구들이 진행되어 왔다. 그 중에서도 핀틀 분사기로 대표되는 가변면적 분사기를 사용한 액체로켓엔진이 비교적 간단한 구조를 가지며 안정적으로 추력을 조절할 수 있는 수단으로 널리 알려져 있다. 핀틀 분사기는

1960년대 달 모듈 착륙 엔진을 시작으로 현재에 이르러서는 SpaceX의 Merlin 엔진에 사용되는 등 추력조절이 가능한 액체로켓엔진의 분사기로써 꾸준히 사용되어오며 신뢰성을 갖추었다[3-6].

국내에서도 한국형발사체를 비롯하여 우주분야에 대한 지속적인 개발이 이루어지며 달 탐사나 재사용 발사체와 같이 더 높은 난이도의 기술개발을 필요로 하고 있으며, 이를 위해 반드시 필요한 추력 제어 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이에 대학을 중심으로 핀틀 분사기에 대한 기초 연구들이 활발히 진행되고 있으며 더욱 더 많은 연구가 필요한 실정이다[7-12]. 본 연구에서는 액체/액체 추진제를 사용하는 핀틀 분사기의 분무특성을 확인하기 위해 500 N급 핀틀 분사기를 설계하였고 분사기의 개도(opening distance, L)에 따른 분무특성 및 추력 조절 가능성을 확인하였다.

2. 핀틀 분사기 설계

2.1 운용조건 설계

본 연구에서는 500 N 급 핀틀 분사기 설계를 위해 Table 1과 같이 운용조건을 설정하였다. 추진제는 케로신과 액체산소로, 500 N의 추력이 발생될 때의 연소실 압력을 10 bar로 설정하였

Table 1. Design parameters for the pintle injector.

Name	Value
Propellant	Kerosene / LOx
Thrust (vac.)	500 N
Chamber pressure	10 bar (100%)
Target mass flow rate (100% Throttle)	40.9 g/s (Fuel)
	102.4 g/s (Oxidizer)
O/F	2.5
Throttling	1 : 4
Fuel density	810 g/L
Oxidizer density	1141 g/L
Inner injector	Oxidizer
Outer injector	Fuel

다. 추력은 500 N에서 125 N까지 1/4 범위 내에서 추력을 조절하는 것을 목표로 하였으며 이때의 추진제 유량을 결정하기 위해 CEA를 이용해 다양한 O/F비에 따른 비추력(I_{sp}) 및 특성속도(C^*)를 확인하였다. 분석을 위해 노즐 확장비는 50으로 가정하였으며 분석결과 O/F비 2.5, 100% 추력(500 N) 조건일 때 추진제 총 유량을 143.3 g/s으로 결정하였다. 이 조건을 기준으로 핀틀 분사기의 개도를 조절하며 추력이 감소하도록 분사기를 설계하였다.

2.2 핀틀 분사기 형상 설계

Fig. 1은 일반적으로 알려져 있는 핀틀 분사기의 구조를 보여준다. 연료와 산화제 오리피스 사이에 움직이는 슬리브가 있어 각 추진제 오리피스의 유로 면적을 조절한다. 바깥쪽 분사기에서 추진제는 슬리브 바깥 면과 분사기 하우징 사이의 갭을 통해 환형 액막으로 분사되며, 안쪽 분사기에서 분사되는 추진제는 슬리브 안쪽 면과 핀틀 팁 사이에서 액막이나 액주 형태로 분사된다. 안쪽 분사기 분무의 분사각이나 분무형태는 핀틀 팁의 형상에 따라 달라질 수 있다. 각 분사기에서의 추진제 종류는 운용환경에 따라 정해지는데, 연료를 안쪽 분사기에서 분사할 경우 연료가 연소실 벽까지 분사되어 막냉각 효과가 있으며, 산화제를 안쪽 분사기에서 분사할 경우 핀틀 팁 부분의 냉각에 도움을 준다고 알려져 있다[5].

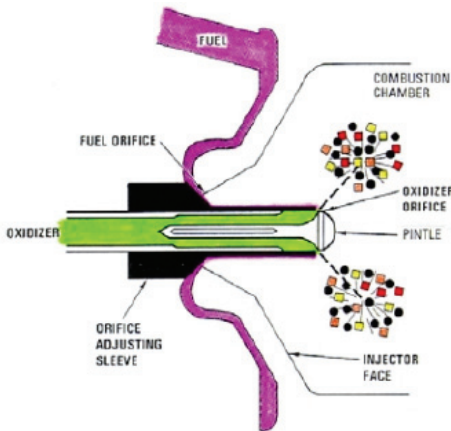


Fig. 1 Typical pintle injector[5].

본 연구에서의 핀틀 분사기는 안쪽에서 산화제를 분사하고 바깥쪽에서 연료를 분사하는 것으로 설계하였다. 개도에 따른 추진제량 변화와 O/F 비의 균일성을 고려하여 분사기의 직경과 오리피스 각도를 설계하였으며 그 구조를 Fig. 2에 나타내었다.

핀틀 분사기의 형상을 설계하기 위해서 유량에 영향을 주는 요소를 확인하고 몇 가지 변수를 정해야 한다. 핀틀 분사기의 오리피스를 통과하는 유량은 Eq. 1, Eq. 2와 같이 베르누이 식을 정리해서 구할 수 있다. 그리고 분사기 오리피스의 면적은 Eq. 3, Eq. 4와 같이 계산되며 개도에 따라 변하게 된다.

$$\dot{m}_i = C_{d,i} A_i \sqrt{2\rho_i \Delta P_i} \tag{1}$$

$$\dot{m}_o = C_{d,o} A_o \sqrt{2\rho_o \Delta P_o} \tag{2}$$

$$A_i = \pi L \sin\theta_i (2r_i - L \sin\theta_i \cos\theta_i) \tag{3}$$

$$A_o = \pi L \sin\theta_o (2r_o - L \sin\theta_o \cos\theta_o) \tag{4}$$

추진제 밀도는 고정되어 있다고 가정하면 유량에 영향을 주는 요소는 오리피스 면적과 분사차압이라고 할 수 있다. 분사차압은 엔진 공급계

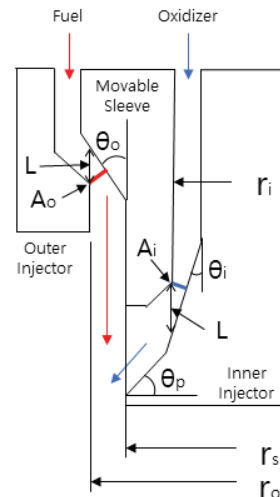


Fig. 2 Schematic of the pintle injector.

에서 설정된 압력과 연소실의 압력 차이로 정해지기 때문에, 분사차압을 설정하기 위해 핀틀 분사기가 사용되는 환경을 가정할 필요가 있다. 본 연구에서는 공급계의 압력조절 요소와 핀틀 분사기 사이에 쓰로틀링 벤츄리 밸브와 같은 유량 조절 요소가 있다는 가정을 하였다.

핀틀 분사기의 가장 큰 장점 중 하나는 오리피스 면적을 조절할 수 있기 때문에 유량이 작아지더라도 분사 차압을 높게 조절할 수 있다는 것이다. 일반적으로 액체로켓엔진에서 저주파 연소불안정(chugging)에 의한 연소불안정을 막기 위해서 연소실 압력의 15~20% 이상의 분사차압을 설정할 것을 기존의 연구들에서 권장하고 있다. 따라서 유량조절밸브와 핀틀 분사기를 함께 사용한다면 유량을 조절함과 동시에 분사차압을 조절할 수 있다. 이 때 핀틀 분사기에서 허용 가능한 분사차압은 유량조절밸브에서 초킹(choking)이 유지되어 유량조절 성능이 영향 받지 않는 범위 내 이다. 만약 분사차압이 유량조절밸브의 한계를 넘어선다면 유량에 따라 분사차압이 변하게 되므로 O/F 비가 일정하지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는 유량조절밸브의 유량조절 성능이 충분하다는 가정 하에 핀틀 분사기의 분사차압을 각 유량 조건에서의 연소실 압력 대비 20% 이상으로 하였다[2,13,14].

핀틀 분사기에서의 분사차압은 오리피스뿐만 아니라 분사기 내부 유로에서의 압력손실을 포함하기 때문에 분사기 형상 기초 설계를 위해 유량계수($C_{d,ir}$, $C_{d,o}$)를 보수적으로 설정할 필요가 있다. 본 연구에서의 핀틀 분사기는 오리피스에 경사가 있는 형태로 단공 오리피스에서보다 압

력손실이 적을 것으로 예상되지만, 유로에서의 압력손실을 확신할 수 없기 때문에 유량계수를 단공 오리피스에서 일반적으로 사용되는 0.65로 가정하였다. Table 2는 이러한 가정 하에 개도에 따른 O/F비 변화 및 가공성과 분사기 내구성을 고려한 핀틀 분사기의 형상 정보이다.

3. 시험장치 및 시험조건 설계

본 연구에서 사용된 핀틀 분사기는 Fig. 3과 같은 형태를 하고 있다. 상단의 산화제 유로를 통해 산화제가 안쪽 라인으로 유입되며, 여러 홀들을 통과한 뒤 슬리브와 핀틀 팁 사이로 분사된다. 연료는 분무의 쓸림을 방지하기 위해 측면으로 유입된 뒤 매니폴드에 있는 여러 홀들을 통과하여 바깥쪽 분사기로 유입된다. 안쪽, 바깥쪽 분사기 사이에 상하로 움직이는 슬리브가 있다. 슬리브는 마이크로미터를 이용해 아래로 움직이며, 스프링 힘을 이용해 위로 움직인다. 슬리브와 안쪽, 바깥쪽 분사기의 슬라이딩 되는 부분은 오링으로 기밀 되었으며 나머지 부분은 용접으로 기밀 되었다.

핀틀 분사기의 유량계수 및 분무형상을 확인하기 위해 Fig. 4와 같이 수류시험 장치를 구성하였다. 분무특성을 확인하기 위한 기초 연구이기 때문에 모사 추진제로 물을 사용하였다. 시험

Table 2. Geometry parameters of pintle injector.

Name	Value
r_i	2.73 mm
r_o	3.71 mm
r_s	3.50 mm
θ_i	15°
θ_o	5°
θ_p	45°

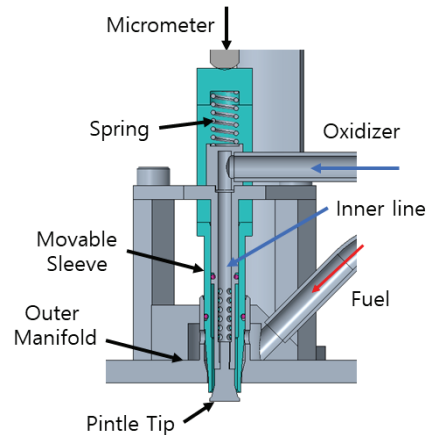


Fig. 3 3D modeling of the pintle injector.

장치는 가압식 추진제 공급 시스템으로, 고압의 압축공기를 이용해 물 탱크를 가압하고, 분사기 전단에 설치된 니들 밸브를 이용해 핀틀 분사기로 공급되는 유량을 조절하였다. 분사기 전단과 니들 밸브 사이에 압력센서와 유량계를 설치하여 유량계수를 구하였으며, 분무 형상을 촬영하기 위해 고속카메라와 광원을 설치하여 대기로 분사되는 분무 이미지를 촬영하였다. 모든 압력, 유량 측정 데이터는 NI의 데이터 수집 장치를 이용해 기록되었으며, 각 조건 별 촬영된 분무 이미지를 통해 분무각을 측정하였다.

Table 3은 물을 이용하였을 때의 이론적으로 계산된 시험조건 별 유량 및 분사차압, 그리고 개도에 따른 오리피스 면적을 나타낸 것이다. 실제 추진제와 모사 추진제의 밀도 차이를 고려하여 동일 개도, 동일 분사차압일 때 유량을 설정하였다. 핀틀 분사기의 개도는 분사기가 닫힌 상

태에서 열린 정도를 나타내는 것이기 때문에, 시험 전 개도의 기준이 될 영점을 설정해야 한다. 본 연구에서는 분사기 전단에 10 bar를 가압한 뒤 물이 새어나오지 않는 상태를 영점으로 잡았다. 영점 및 개도는 메모리 기능이 있는 디지털 마이크로미터로 측정되었기 때문에, 모든 시험 조건에서 동일한 영점을 기준으로 개도를 측정할 수 있다.

4. 시험 결과

4.1 유량계수 측정

분사기 설계를 위해 유량계수 및 분사차압을 특정 값으로 가정하였기 때문에 실제 유량계수를 확인하였다. Fig. 5는 Table 3의 시험 조건에서 유량계수 측정 결과를 나타낸 것이다.

Table 3. Preliminary test conditions for the pintle injector ($C_d = 0.65$).

Throttling	L	\dot{m}_i (oxidizer)	\dot{m}_o (fuel)	P_c	$\Delta P_i, \Delta P_o$	A_i	A_o
	mm	g/s	g/s	bar	bar	mm ²	mm ²
100%	1.757	95.74	45.45	10.0	2.00	7.17	3.50
80%	1.568	76.62	36.37	8.0	1.60	6.46	3.13
60%	1.354	57.44	27.27	6.0	1.20	5.64	2.71
40%	1.103	38.29	18.18	4.0	0.80	4.65	2.21
25%	0.869	23.93	11.36	2.5	0.50	3.71	1.75

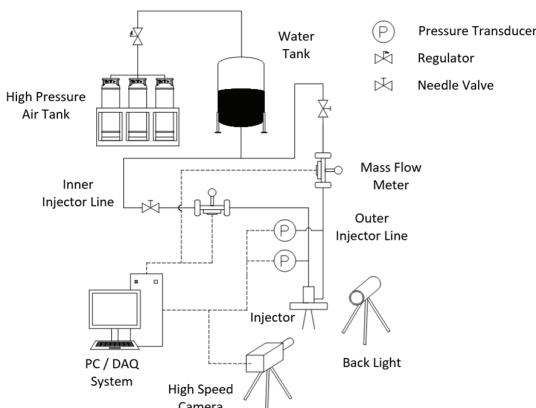


Fig. 4 Schematic of the test equipment.

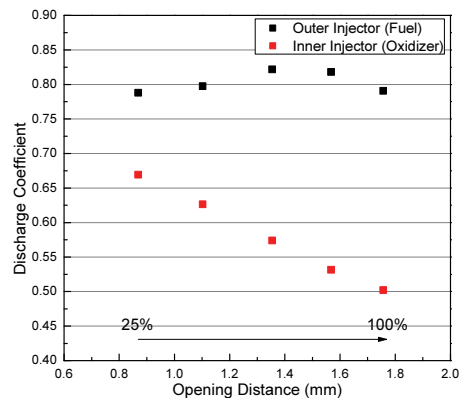


Fig. 5 Discharge coefficient of the pintle injector by opening distance.

바깥쪽 분사기의 경우 시험 조건에서 0.78~0.82 정도의 값을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 설계 값인 0.65보다 높은 값으로 각 시험 조건에서 분사기 오리피스 및 유로에서의 압력손실이 크지 않았음을 의미한다. 유량이 적기 때문에 유로에서의 손실이 크지 않고, 오리피스의 형상 또한 5°의 완만한 경사가 있는 형태이므로 단공 오리피스에 비해 압력손실이 크지 않았다고 보인다. 반면 안쪽 분사기의 경우 25% 유량 조건에서는 유량계수가 0.67로 설계 값과 유사한 값을 보였으나 100% 유량 조건에서는 0.50으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 유량계수는 일반적으로 오리피스 형상에 따라 달라지기 때문에 개도만 변경되었다면 오리피스 형상은 크게 변하지 않았기 때문에 유량계수가 일정해야 한다. 하지만, 유량에 따라 지속적으로 감소하였기 때문에 분사기 입구부터 오리피스 사이의 유로에서도 압력손실이 컸음을 알 수 있다. 두 분사기의 유량계수 차이가 컸기 때문에 시험결과를 토대로 분사조건을 재설정 하였다.

4.2 분사조건 재설정

시험결과에 따르면 바깥쪽 분사기의 분사차압이 연소실 압력 기준 13~14% 범위에서 형성되기 때문에 Table 3 조건의 개도에서는 불안정한 분사조건이라고 할 수 있다. 따라서 바깥쪽 분사기를 기준으로 각 조건 별 유량 및 분사차압 조건을 충족하는 개도를 다시 설정하여야 한다.

Fig. 6, Table 4는 새로 설정한 개도에서 안쪽, 바깥쪽 분사기의 각 유량조건 별 차압, 압력비, 유량계수 결과를 나타낸 것이다. 새로운 분사조

건을 설정하기 위해 바깥쪽 분사기의 분사차압이 연소실 압력의 20%가 되면서 각 조건의 유량을 만족하는 개도를 확인하였고, 이 조건에서 안쪽 분사기의 유량을 만족하는 분사차압을 확인하였다. 그 결과 안쪽 분사기의 분사차압은 연소실 압력 대비 22~40%(0.56~4.0 bar)까지 형성되는 것으로 나타났다. 따라서 핀틀 분사기 전단에 설치된 유량조절밸브가 안쪽 라인의 경우 14 bar, 바깥쪽 라인의 경우 12 bar 이상의 토출 압력에서 유량 조절 특성을 잃지 않는다면 이 조건에서 O/F 비를 유지하며 유량 조절이 가능할 것으로 판단된다.

유량계수 시험결과를 통해 안쪽 분사기의 유로에서 발생한 압력 손실 비중이 큰 것을 확인하였기 때문에 이를 값으로 확인하고자 핀틀 팁을 제거하고 유량에 따른 분사차압을 측정하였다. 핀틀 팁은 Fig. 3에 나타났는 것 과 같이 안쪽 라인에 결합되어 있으며 이를 분리할 경우 안쪽 라인에서의 손실을 확인할 수 있다. Fig. 7은 핀틀 팁 유/무에 따른 분사차압을 나타내는 것으로 유로에서 최대 40% 정도의 손실이 발생했음을 알 수 있다. 설계 당시 안쪽 분사기 유로에서 발생할 손실을 어느 정도 고려는 하였지만 이를 최소화하기 위해서 설계 개선이 필요하다고 생각된다.

이와 같이 안쪽과 바깥쪽 분사기에서 서로 다른 범위의 분사차압을 가지게 되면, 높은 분사차압이 요구되는 쪽의 유량조절밸브에서 더 높은 성능이 요구되기 때문에 이는 시스템의 부담으로 연결된다. 따라서 이 결과를 통해 세 가지 정도의 개선 방법을 고려해볼 수 있다.

Table 4. Modified test conditions for the pintle injector.

Throttling Level	L	\dot{m}_i (water)	\dot{m}_o (water)	ΔP_i (% P_c)	ΔP_o (% P_c)	$C_{d,i}$	$C_{d,o}$
	mm	g/s	g/s	bar	bar		
100%	1.384	95.74	45.45	4.00 (40%)	2.00 (20%)	0.59	0.82
80%	1.230	76.62	36.37	2.95 (37%)	1.60 (20%)	0.62	0.82
60%	1.118	57.44	27.27	1.80 (30%)	1.20 (20%)	0.64	0.81
40%	0.894	38.29	18.18	1.12 (28%)	0.80 (20%)	0.69	0.80
25%	0.732	23.93	11.36	0.56 (22%)	0.50 (20%)	0.72	0.78

첫 번째는 바깥쪽 분사기 유로에도 어느 정도의 압력손실을 발생시킬 수 있는 튜닝 오리피스를 장착하는 것이다. 안쪽 분사기 유로에서 발생하는 손실을 특정 면적의 오리피스에서 발생하는 손실이라고 가정하면, 바깥쪽 분사기에서도 약 2.2 mm 직경의 오리피스를 유로에 장착할 경우 안쪽 분사기와 유사한 유량계수 기울기를 갖는 것으로 계산되었다. 이와 같이 바깥쪽 분사기에 압력손실 튜닝을 한 후 각 유량조건 별 개도를 확인하여 안쪽과 바깥쪽 분사기의 차압을 유사한 범위에서 맞추는 방식을 선택할 수 있다. 하지만 이 방법은 같은 개도에서 차압이 증가하

게 되므로 유량조절밸브의 토출 가능 압력 범위가 커지거나, 분사 차압을 낮추기 위해 더 큰 개도가 요구되는 방법이다. 본 연구의 분사기는 이러한 개도의 확장성이 크게 고려되지 않았지만 만약 이런 조정을 고려하여 설계 시 확장 가능한 개도에 여유를 둔다면 튜닝 오리피스를 사용하여 두 분사기의 분사차압을 유사하게 맞출 수 있다.

두 번째 방법은 안쪽 분사기의 핀틀 팁의 형상을 변경하는 것이다. 본 연구에서의 분사기 오리피스는 반각 15°의 경사가 있는 형태이므로, 이를 키운다면 개도 증가에 따른 Eq. 3에서 알 수 있듯이 오리피스 면적이 더욱 커지게 되므로 분사차압에 따른 유량 역시 증가할 것이다. 즉, 안쪽과 바깥쪽 라인을 모두 튜닝할 수 있으므로 설계 시 다양한 조건을 고려한다면 보다 정확하게 원하는 유량조건을 맞출 수 있을 것으로 생각된다.

세 번째 방법은 연료를 안쪽 분사기에 배치하는 것이다. 핀틀 분사기 구조 상 안쪽 분사기는 유로가 상대적으로 협소하기 때문에 일반적으로 큰 유량을 가지는 산화제가 안쪽에 배치될 경우 유로에서 많은 손실이 발생할 수 있다. 따라서 가능한 경우 연료를 안쪽에 배치하는 것도 분사차압의 차이를 줄이는 방법이 될 수 있다. 하지만 이 경우 일반적으로 축 방향으로 분사되는 산화제 유량이 매우 크므로 분무각이 크게 줄어들 수 있다. 따라서 산화제를 바깥쪽 분사기에 적용할 경우 분무각을 고려해야 할 필요가 있다.

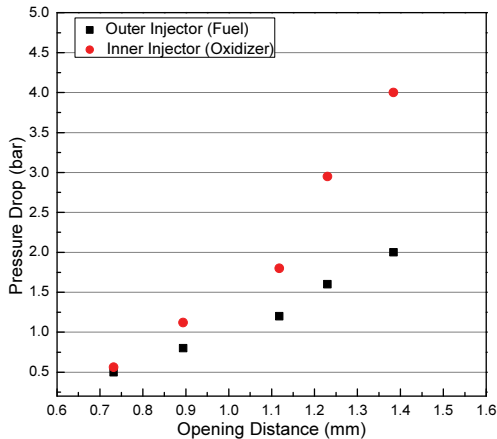


Fig. 6 Pressure drop by modified test condition.

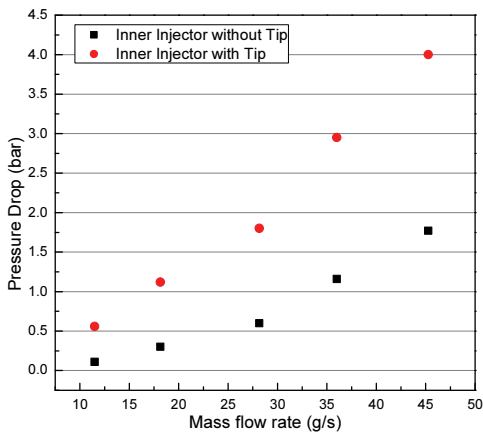


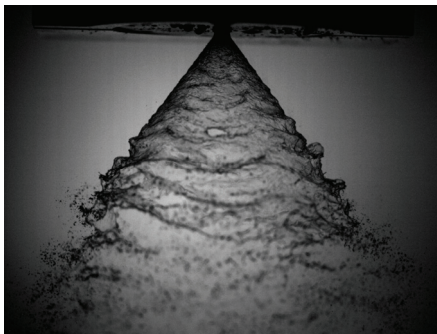
Fig. 7 Pressure drop by mass flow rate in inner injector depending on the presence of pintle tip.

4.3 분무각 측정

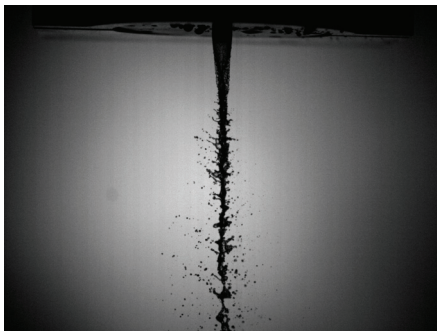
분무각 측정을 위해 고속카메라를 이용해 분사조건 별로 분무 이미지를 촬영하였다. Fig. 8은 100% 유량조건에서 안쪽과 바깥쪽 분사기를 단독으로 분사했을 때의 분무 이미지와 동시에 분사한 혼합분무의 이미지를 나타낸다.

안쪽 분사기의 경우 핀틀 팁을 따라 형성되는 원뿔 모양의 분무를 확인할 수 있다. 분무는 매끄러운 액막을 유지하다가 분사기 후류에서 액적으로 분열된다. 바깥쪽 분사기의 경우 핀틀 팁 부근에서는 환형으로 분사되었지만 분사기 후류

에서 합쳐지는 모습을 확인할 수 있다. 혼합분무는 안쪽 분사기를 단독 분사했을 때 보다 작은 분무각을 보이며, 충돌로 인해 분열길이 짧아진 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 핀틀 분사기의 분무 충돌로 인한 미립화 성능 향상을 확인할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Spray image of single injection in (a) inner injector, (b) outer injector and (c) co-injection.

Fig. 9는 각 시험조건에서 안쪽 분사기의 분무각과 혼합분무의 분무각을 측정된 결과를 나타낸다. 분무각은 핀틀 틈으로부터 측방향 후류 20 mm 지점까지의 분무 바깥쪽 면을 기준으로 측정하였다. 안쪽 분사기의 분무각 측정결과를 보면 60% 유량 조건까지는 분무각 80° 정도에서 크게 변하지 않지만 40%, 25% 조건에서 분무각이 다소 감소하여 77°, 70°로 측정되었다. 이는 안쪽 분무가 완전 발달되지 않았기 때문이다. Fig. 10은 25% 유량조건에서의 안쪽 단독 분무 및 혼합분무의 이미지이다. 분무가 충분히 발달되지 않았고, 충돌에 의한 미립화 역시 잘 되지 않는 것을 확인할 수 있다.

유량 조절 범위를 증가시키기 위해 개도를 감소시키면서 분사차압 역시 함께 감소시켰는데, 너무 낮은 분사차압에서는 분무가 완전 발달되지 않아 미립화 성능이 저하되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 적용한 분사차압 기준은 연소실 압력 대비 20%로, 만약 연소실 압력이 설계했던 10 bar가 아닌 더 높은 압력이라면 20%에 해당하는 분사차압 역시 더 높은 값이 되어 분무가 충분히 발달할 수 있는 조건이 될 수 있다. 결과적으로 분사차압을 연소실 압력에 따라 정하는 것은 경우에 따라서 미립화에 불리한 분사차압 조건을 될 수 있으므로, 낮은 유량 조건에서는 미립화를 고려한 절대적인 분사차압이 필요하다고 판단된다.

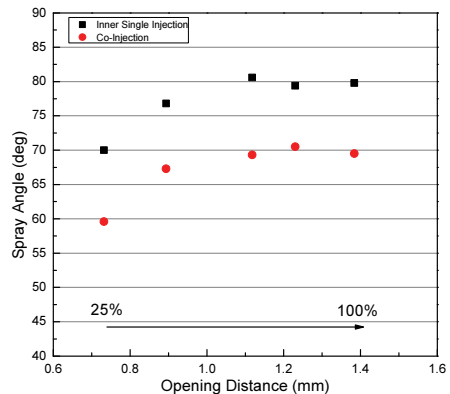


Fig. 9 Spray angle of inner single injection and co-injection.

본 연구에서의 핀틀 팁의 경사는 45°로 안쪽 분무의 예상되는 분무각은 90°이었다. 하지만 완전 발달된 60% 이상의 유량조건에서 분무각은 80°로 다소 작게 측정되었다. 핀틀 팁의 형상이 너무 작아 분무의 속도방향을 변환하기 충분치 못한 것이라 생각하였고, 이를 확인하기 위해 핀틀 팁 부분을 확대 촬영하여 액막의 각도 변화를 살펴보았다.

Fig. 11은 핀틀 팁의 이미지와, 안쪽 분무를 분사했을 때의 이미지, 그리고 분무 이미지에서 핀틀 팁 이미지를 제거한 것으로 액막의 모양과 두께를 가늠해볼 수 있다. 액막은 안쪽 분사기의 경사를 따라 내려오다 핀틀 팁의 경사를 따라 45°로 분사 되어야 하지만 액막의 두께 대비 45° 경사 길이가 너무 짧아 분무의 각을 충분히 변화시키지 못한 것으로 보인다. 따라서 핀틀 팁에

서 분무의 각도를 변화시키고자 할 경우에는 액막의 두께 및 속도성분이 변할 수 있는 충분한 길이를 고려해야 한다.

핀틀 분사기에서 혼합 분무의 각은 두 분무의 운동량 비를 이용해 계산할 수 있다. Fig. 12와 같이 안쪽 분사기의 분무는 핀틀 팁의 경사를 따라 축 방향(V_a)과 반경방향(V_r)속도를 가지게 되며, 바깥쪽 분사기는 축 방향 속도만 가지고 있다. 따라서 분무반각(θ_{spray})은 Eq. 5~Eq. 7을 이용해 계산할 수 있다.

$$\tan(\theta_{spray}) = \frac{\dot{m} V_r}{\dot{m} V_a} = \frac{\dot{m}_i V_{i,r}}{\dot{m}_o V_o + \dot{m}_i V_{i,a}} \quad (5)$$

$$V_i = \frac{\dot{m}_i}{\rho_i A_i} \quad (6)$$

$$V_o = \frac{\dot{m}_o}{\rho_o A_o} \quad (7)$$

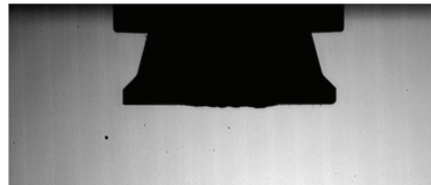


(a)



(b)

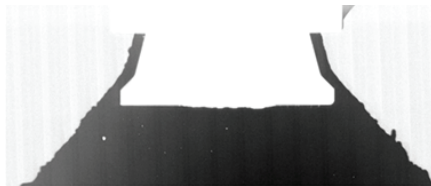
Fig. 10 Spray image of single injection in (a) inner injector, (b) co-injection at 25% mass flow rate condition.



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Close-up image of (a)pintle tip, (b)inner spray and (c)inner spray without pintle tip.

설계한 것과 같이 안쪽 분무가 모두 45° 경사를 따라 분사되었다면 안쪽 분무의 축 방향 속도와 반경방향 속도는 같아야 하며, O/F가 조건에 따라 거의 일정하기 때문에 분무각은 모든 조건에서 같아야 한다. 본 연구에서의 핀틀 분사기는 혼합분무의 분무각이 62°의 분무각을 갖도록 설계되었다. 하지만 실제 측정결과 완전 발달된 조건에서 70°, 그리고 가장 낮은 유량 조건에서 60°까지 감소하는 것으로 측정되었다. 낮은 유량 조건에서는 단독 분무의 경우와 같이 완전 발달되지 않았기 때문에 분무각이 감소했을 것이라 생각해볼 수 있지만, 완전 발달된 조건에서는 설계했던 것 보다 높은 분무각이 측정되었기 때문에 이러한 오차 요인에 대해 분석해보았다.

첫 번째 원인은 바깥쪽 분무의 속도가 감소한 경우이다. 바깥쪽 분무는 축방향 속도만 가지고 있으므로, 예상했던 것 보다 축방향 속도가 감소한다면 측정된 분무각이 예상 값 보다 증가할 수 있다. 바깥쪽 분무의 축방향 속도가 감소할 수 있는 가능성을 생각해보면, 분무가 오리피스를 통과한 후 얇은 시트 형태로 핀틀 팁을 따라 분사된 것이 아닌 바깥쪽 분사기와 슬리브 사이의 환형 갭을 채우고 분사되었을 경우이다. 그렇다면 개도의 변화에 무관하게 바깥쪽 분사기의 최종 유로 면적은 일정하기 때문에 유량이 감소함에 따라 축방향 유속이 크게 감소한다. 이와 같은 가정으로 바깥쪽 분무의 유로 면적과 축방향 속도는 Eq. 8, Eq. 9와 같이 표현할 수 있다.

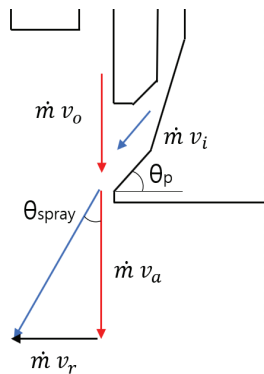


Fig. 12 Spray angle of the pintle injector.

$$A_{o,gap} = \pi(r_o^2 - r_s^2) \tag{8}$$

$$V_{o,gap} = \frac{\dot{m}_o}{\rho_o A_{o,gap}} \tag{9}$$

하지만, 이렇게 계산된 바깥쪽 분무의 축방향 속도를 Eq. 5에 적용한다면 유량이 작아지는 조건에서 축방향 속도가 크게 감소하므로 결과적으로 혼합 분무의 분무각이 68°~77°로 증가하게 된다. 따라서 이 가정을 단독적으로 적용하기엔 어려움이 있다.

두 번째 원인은 안쪽 분무의 속도성분 변화이다. 낮은 유량 조건에서는 안쪽 분무가 완전 발달되지 않았기 때문에 분무각이 감소하였고, 이는 분무의 축방향 유속이 증가했다고 볼 수 있다. 수정된 안쪽 분무의 속도성분은 Fig. 9에서 측정된 분무각과 Eq. 10, Eq. 11을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\tan(\theta_{spray,i}) = \frac{V_{i,r,m}}{V_{i,a,m}} \tag{10}$$

$$V_i = \sqrt{V_{i,a,m}^2 + V_{i,r,m}^2} \tag{11}$$

수정된 안쪽 분무의 유속을 Eq. 5에 적용하면 안쪽 분무의 반경방향 속도가 감소하고, 축 방향 속도가 증가하게 되므로 유량이 작아짐에 따라 분무각이 감소하게 된다. 따라서 유량 조건에 따라 혼합분무가 감소되는 것은 표현이 가능하지만, 설계값 보다 측정된 분무각이 큰 부분은 설명할 수 없다. 만약 안쪽과 바깥쪽 분무가 모두 앞서 기술한 요인에 의해 영향을 받았다고 하면 예측된 분무각은 측정값과 보다 유사해진다.

Fig. 13은 각각의 가정들을 적용했을 때의 분무각 예측결과를 보여준다. 경향적으로는 안쪽 분무의 속도성분 변화만 적용한 것이 가장 유사하나, 값으로는 안쪽과 바깥쪽 분무의 속도성분의 변화를 모두 적용한 것이 측정값과 근사하게 계산된다. 바깥쪽 분사기의 축방향 유속 감소 원인에 대해서는 기술된 가정 외에 다양한 가능성을 고려할 필요가 있으며, 다음 단계 시험에서는

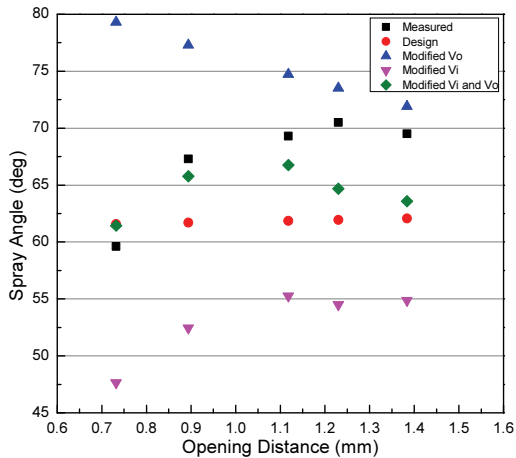


Fig. 13 Measured and estimated spray angle based on different assumptions.

이와 같은 오차 가능성을 개선한 뒤 시험을 수행할 계획이다.

5. 결 론

본 연구에서는 개도에 따른 액체/액체 핀틀 분사기의 분무특성을 확인하기 위해 물을 모사 추진제로 하여 수류시험을 수행하였다.

유량계수 측정결과 바깥쪽 분사기의 유량계수는 크게 변하지 않았으나 안쪽 분사기의 유량계수는 시험조건에 따라 크게 달라졌다. 안쪽 분사기는 핀틀 분사기 구조 상 유로 면적이 좁기 때문에 분사기 오리피스뿐만 아니라 유로에서의 압력손실을 고려할 필요가 있다. 유량계수에 대한 충분한 데이터가 쌓이지 않았을 경우에는 안쪽, 바깥쪽 분사기를 튜닝할 수 있도록 설계변수에 여유를 두는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

분무각 측정결과 낮은 유량 조건에서는 분무가 완전 발달되지 않는 경우가 생겼으며, 분무각 미립화 측면에서 일정값 이상의 절대적인 분사차압이 요구되는 것을 확인하였다. 또한 핀틀 팁이 작을 경우 분무의 형상이 설계값과 다소 다르게 형성될 수 있음을 확인하였다.

혼합분무의 분무각 측정과 운동량을 이용한 분무각 예측 결과 다소의 오차는 있으나 근사하

게 예측하는 것을 확인하였다. 이를 통해 분사조건이 변경되더라도 근사적인 분무각을 예측하는 것은 가능성을 확인하였다.

후 기

본 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단(NRF-2019M1A3A1A02076962, NRF-2021M1A3B8077772) 및 한국항공우주연구원(KARI-FR21C00)의 지원을 받아서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Casiano, M.J., Hulka, J.R. and Yang, V., "Liquid-Propellant Rocket Engine Throttling: A Comprehensive Review," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 26, No. 5, pp. 897-923, 2010.
2. Dressler, G., "Summary of Deep Throttling Rocket Engines with Emphasis on Apollo LMDE," *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, Sacramento, California, U.S.A., Jul. 2006.
3. Huzel, D.K. and Huang, D.H., *Modern Engineering For Desing of Liquid-Propellant Rocket Engines*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C., U.S.A., 1992.
4. Yang, V., Habiballah, M., Popp, M. and Hulka, J., *Liquid Rocket Thrust chambers*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington D.C., U.S.A., 2004.
5. Dressler, G.A. and Bauer, J.M., "TRW Pintle Engine Heritage and Performance Characteristics," *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion

- Conference and Exhibit*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Las Vegas, N.V., U.S.A., 2000.
6. Vozoff, M. and Couluris, J., "SpaceX Products-Advancing the Use of Space," *AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition*, San Diego, C.A., U.S.A., AIAA 2008-7836, Sep. 2008.
 7. Kim, H., Kang, H. and Kwon, S., "A Feasibility Study of Using Pintle Injector as Sole-Throttling Device for Shallow Throttling Condition," *Acta Astronautica*, Vol. 167, pp. 272-279, 2020.
 8. Lee, S., Kim, D., Koo, J. and Yoon, Y., "Spray Characteristics of a Pintle Injector Based on Annular Orifice Area," *Acta Astronautica*, Vol. 167, pp. 201-211, 2020.
 9. Son, M., Yu, K., Koo, J., Kwon, O.C. and Kim, J.S., "Injection Condition Effects of a Pintle Injector for Liquid Rocket Engines on Atomization Performances," *Journal of ILASS-Korea*, Vol. 20, No. 2, pp. 114-120, 2015.
 10. Nam, J., Lee, K., Park, S., Huh, H. and Koo, J., "Spray Characteristics of a Movable Pintle Injector with Pintle Tip Shape," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 47, No. 9, pp. 658-664, 2019.
 11. Park, S., Nam, J., Lee, K., Koo, J. and Hwang, Y., "Prediction on Throttling Performance of a Movable Sleeve Injector for Deep Throttling," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 46, No. 6, pp. 487-495, 2018.
 12. Yu, K., Son, M. and Koo, J., "Effects of opening distance on liquid-gas spray of pintle injector under atmospheric condition," *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 43, No. 7, pp. 585-592, 2015.
 13. Gill, G.S. and Nurick, W.H., "Liquid Rocket engine Injectors," NASA SP-8089, 1976.
 14. Sutton, G.P. and Biblarz, O., *Rocket Propulsion Elements*, John Wiley & Sons Inc., New York, U.S.A., 2001.