

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(7), 585-592(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.7.585

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

핀틀 인젝터의 개도가 액체-기체 상압 분무에 미치는 영향

유기정*, 손 민*, 구자예**

Effects of opening distance on liquid-gas spray of pintle injector under atmospheric condition

Kijeong Yu*, Min Son* and Jaye Koo**

Graduate Student, Korea Aerospace University*

School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University**

ABSTRACT

Effects of opening distance on liquid-gas spray of pintle injector were experimentally investigated under atmospheric condition by using water and air as simulants of propellants. Discharge coefficients(C_d) and mass flow rates were calculated with various injection conditions; 0.1 bar - 1.0 bar for water pressures and 0.2 mm - 1.0 mm for the pintle opening distances. Spray angles were measured from the spray images that were obtained by a shadowgraphy method. When opening distance is 0.2 mm, liquid sheet is not formed properly and it show non-uniform spray. than it can result in combustion instability. it has a weak correlation between the momentum flux ratio and the spray angle, while it has a strong correlation between the momentum ratio and spray angle. Finally the spray angles reduced exponentially when the momentum ratio increased and the spray angles converged to about 40 degrees.

초 록

모사 추진제로 물과 공기를 사용하여 상압 상태에서 핀틀 인젝터의 개도가 액체-기체 분무에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다. 액체 공급 압력은 0.1 bar에서 1.0 bar 까지, 핀틀 개도는 0.2 mm에서 1.0 mm 까지의 다양한 분사 상태에서 유량 계수와 질량 유량을 계산하였다. 분사각은 역광 기법을 이용하여 얻어진 분사 이미지에서 측정하였다. 핀틀 개도가 0.2 mm인 경우 정상적인 액막이 형성되지 않았고, 비 균질한 분사를 보였다. 이는 연소실 내부에 연소 불안정을 가져올 수 있다. 핀틀 개도를 이용하여 계산된 운동량 플럭스 비는 분사각에 약한 상관관계를 갖고 있고, 운동량 비는 분사각과 강한 상관관계를 갖고 있다. 운동량이 증가할수록 분사각은 지수 함수적으로 감소하였고, 분사각은 약 40도로 수렴하였다.

Key Words : Pintle Injector(핀틀 인젝터), Discharge Coefficient(유량 계수), Spray Angle(분사각), Momentum Ratio(운동량 비), Momentum Flux Ratio(운동량 플럭스 비)

† Received : August 27, 2014 Revised : March 19, 2015 Accepted : June 22, 2015

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

I. 서론

추력 조절이 가능한 추진 기술을 갖춘 엔진은 차세대 로켓 엔진의 중요한 요구사항으로서 각 나라의 정부와 우주 관련 산업체에서 많은 관심을 가지고 연구를 진행하고 있다. 추력 조절이 가능한 로켓 엔진은 작동 환경에 따라 추력을 변화시킬 수 있기 때문에 추진제를 효율적으로 사용할 수 있고, 추력 조절을 통해 외란에 대처할 수 있다. 또한 단일 종류의 로켓 엔진이 다양한 추력을 갖도록 할 수 있기 때문에 엔진의 양산이 가능하다. 일반적으로는 형상이 고정된 동축 전단 인젝터[1] 또는 동축 스윙 인젝터[2]를 사용하지만, 추력 조절을 위해 유량을 변화시킬 경우 설계점을 벗어나기 때문에 미립화 및 연소 효율이 감소하는 단점이 있다. 따라서 추력 조절을 위해서는 노즐의 형상이 변형되거나 추진제 공급 유량이 변하여야 한다. 핀틀 인젝터는 단순하고 빠른 방법으로 추진제의 유량을 조절하여 추력을 조절하는 가변 추력장치로 구성이 단순하여 저렴하고 안정적인 작동이 가능하다[3]. 또한 기존의 인젝터와는 다른 분무 특성을 가지고 있어 안정적인 연소가 가능하다[4].

핀틀 인젝터는 1950년대 중반 JPL에서 자발 점화성 추진제의 혼합과 연소 반응 속도에 대한 연구를 위한 실험 기구로 사용하기 위해 만들어졌다[5]. 1963년에 TRW에서 개발하기 시작한 Lunar Module Descent Engine(LMDE)에 가변 면적을 갖는 인젝터로 사용되어, 1969년 달착륙선에 사용되었다[5]. 2000년대에 들어 Northrop Grumman Space Technology(NGST)에서 LOx와 LH2를 이용하여 2세대 재사용 발사체를 위한 1000 lbf 핀틀 인젝터 추력기를 실험하였다[6]. 그 후 NGST는 핀틀 인젝터를 사용한 엔진에 Deep throttling 엔진 기술을 적용하는 연구를 진행하고 있다[7]. 최근에는 Space X사의 Falcon 로켓의 Marlin엔진에 사용되어 높은 추력의 대형 엔진에서도 핀틀 인젝터가 사용될 수 있다는 것을 보여주었다. 대학교 실험실 수준의 연구로는 Purdue University에서 높은 연소 효율에 영향을 주는 매개변수를 알아보기 위해 150 lbf급 핀틀 인젝터 추력기를 제작하고 실험한 경우가 있다[8]. 최근 Purdue University에서는 LOX - LCH4를 이용한 교축 가능한 핀틀 인젝터 엔진의 설계, 제작, 실험이 진행되고 있다[9].

핀틀 인젝터는 기존의 충돌 인젝터와는 다르게 핀틀에서 분사되는 액막이 오리피스에서 분사되는 액막과 충돌하여 분열한다. 따라서 핀틀에서

분사되는 추진제의 분사 특성은 기존의 인젝터와는 다른 특성을 보인다. 때문에 추력 계산을 위한 분무 유량 결정을 위해 핀틀에서 분사되는 추진제의 유량 계수에 대한 실험적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 핀틀 인젝터에서 분사되는 액체의 질량 유량을 측정하고, 기하학적 형상과 공급 압력으로 얻을 수 있는 질량 유량과 비교하여 핀틀의 개도와 공급 압력에 따른 유량 계수를 구하였다. 그리고 핀틀 개도와 액체 공급 압력, 기체 공급 압력에 변화를 주어 분사각을 측정하고 후에 전단력에 의해 분열되는 인젝터의 분무 특성 분석에 주로 사용되는 운동량 비(momentum ratio)[10], 운동량 흐름 비(momentum flux ratio)[11]에 따라 분사각에 영향을 주는 변수를 구분하였다.

II. 실험 방법 및 장치

연소실 압력 6.89 bar에서 추력 20 ~ 70 kg_f 의 연소기에 사용하는 달 탐사선의 달 지면 착륙용 엔진의 인젝터를 설계하였다. 산화제는 액체 산소로서 최대 추력에서 필요한 유량은 0.116 ~ 0.232 kg/s 이고, 연료는 기체 메탄으로 최대 추력에서 필요한 유량은 0.058 kg/s 이다. 초기 연소 실험을 위해 최대 추력을 약 1/4로 축소하여 최대 목표 액체 유량을 0.058 kg/s 로 선정하였다.

2.1 유량 계수 측정 실험

핀틀 인젝터에서 분사되는 질량 유량을 측정하기 위한 액체 순환식 핀틀인젝터 실험 장치를 Fig. 1에 나타내었다. 액체는 수조에서부터 피스톤 펌프로 가압되어 공급되며, 피스톤 펌프의 진동을 감쇄시키기 위해 공급라인 중간에 저장 용

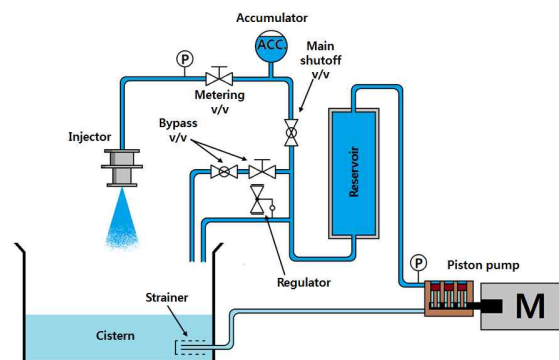


Fig. 1. Schematic of spray test system

기를 설치하였다. 피스톤 펌프에서 공급되는 물의 유량 및 공급 압력은 2개의 바이패스 라인을 통해서 조절되고, 최종적으로 계량 밸브를 거쳐 액체가 공급된다. 공급된 액체는 핀틀의 유로를 따라 흘러가고, 핀틀 끝단에서 분사된다. 분사된 액체는 수조로 회수되고, 회수된 물은 스트레이너를 통해 필터링 된 후 재사용된다. 액체 공급 압력은 액체가 핀틀에 공급되기 직전에 압력계를 통하여 측정되고, 이 때 압력 측정 장치의 측정 범위는 0 ~ 6 bar며, 측정 오차는 ±0.3 % 이다.

핀틀로 공급되는 액체의 유량 계수를 얻기 위해 이론적인 질량 유량을 구하였다. 핀틀 개도 면적(A), 공급 유체의 밀도(ρ_l), 액체의 공급압력(p_l)으로 부터 질량유량(\dot{m}_m)은 다음의 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\dot{m}_m = A \sqrt{2\rho_l p_l} \quad (1)$$

공급 유체의 밀도는 상온 20 °C에서의 물의 밀도 1000 kg/m³을 사용하였다. 액체의 공급 압력은 0.1 bar, 0.5 bar, 1.0 bar를 사용하였다. 핀틀 개도 면적은 핀틀 개도 0.2 mm - 1.0 mm에 따라서 선형으로 증가하다가 일정해진다.

Figure 2는 핀틀 인젝터의 단면도이다. 환형 오리피스의 면적은 일정하게 고정되어 있으며, 연료를 분사한다. 핀틀 오리피스의 면적은 핀틀 개도에 따라 변화하며, 분사되는 유량에 변화를 준다. 핀틀 개도는 그림과 같이 핀틀 팁과 핀틀을 둘러싸고 있는 바깥 케이스 사이의 수직 거리로 정의한다.

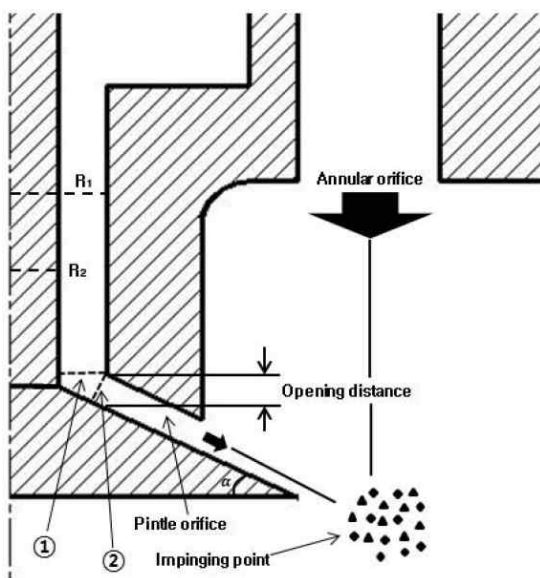


Fig. 2. Schematic of pintle spray area

Table 1. Experimental ranges of discharge coefficient

Variance	Range	Unit
Opening pintle length	0.2 ~ 1.0	mm
Liquid supply pressure	0.1, 0.5, 1.0	bar

핀틀 오리피스의 면적(A_p)은 핀틀 개도에 따라서 선형적으로 증가 후에 특정 개도를 지나면 일정해진다. 핀틀 개도가 작은 경우 Fig. 2의 출구 핀틀 오리피스(②)가 핀틀 오리피스의 최소 면적이 된다. 핀틀 개도가 증가할수록 출구 핀틀 오리피스의 면적은 증가하고, 핀틀 개도가 꾸준히 증가하다 보면 출구 핀틀 오리피스의 개도가 핀틀 내부 유로(①)보다 넓어지는 지점이 생긴다. 이 지점 이상의 핀틀 개도에서는 핀틀 오리피스의 최소 면적을 핀틀 내부 유로로 정의한다. 출구 핀틀 오리피스의 면적과 핀틀 내부 유로의 면적이 동일해지는 핀틀 개도의 값을 C라고 정의할 때 핀틀 쪽 오리피스의 면적은 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{cases} A_p = \left(2 \frac{R_1^2}{\sin \alpha} - \pi \left(\frac{R_1}{\sin \alpha} - l \cos \alpha \right)^2 \frac{R_1}{L} \right); l < C \\ A_p = \left(\pi (R_1^2 - R_2^2) \right); l \geq C \end{cases} \quad (2)$$

Figure 2와 식 (2)에서 R_1 은 핀틀을 둘러싼 바깥 구조물의 직경, R_2 는 핀틀 로드의 직경이고, α 는 핀틀 팁의 각도이다. 핀틀 개도는 l 로 정의한다. L 은 핀틀 개도 면적을 원뿔의 측면 면적 일부로 가정하였을 때 구해지는 원뿔의 측면 길이이며 식 (3)으로 정의된다.

$$L = \frac{R_1}{\sin \alpha} \quad (3)$$

본 실험의 액체 공급 압력과 핀틀 개도를 Table 1에 나타내었다. 액체의 공급 압력은 인젝터로 공급되기 바로 직전인 액체 공급 채널 끝단에서 측정된 압력을 사용하였다. 유량의 측정 실험은 3가지 압력에서 핀틀 개도를 변화시켜가며 분사되는 액체의 질량을 측정하였다. 20초씩 분사된 질량 유량을 총 3회 측정하고, 초당 질량 유량을 계산하였으며, 3회의 질량 유량의 평균값을 측정 질량 유량으로 사용하였다.

2.2 분사각 측정 실험

Figure 2에 분무 충돌에 대한 개략도가 그려져 있다. 핀틀 오리피스로 분사된 액체와 환형 오리

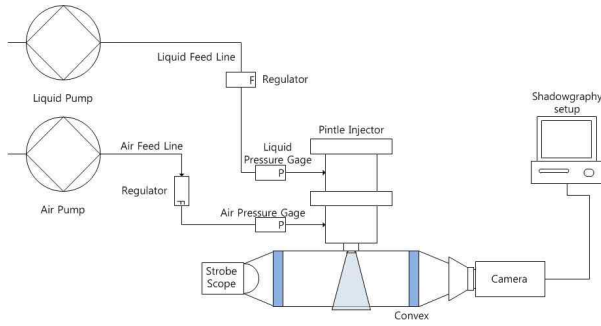


Fig. 3. Schematic of visualization system

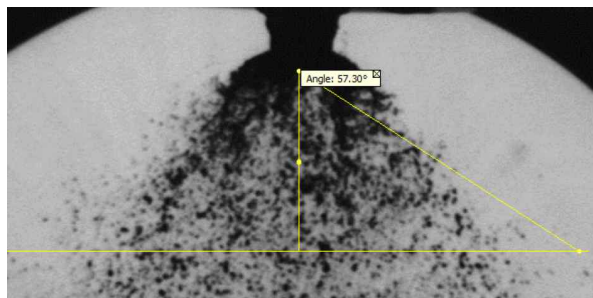


Fig. 4. Definition of spray angle

Table 2. Experimental ranges of spray angle

Variance	Range	Unit
Opening pintle length	0.2 ~ 1.0	mm
Liquid supply pressure	1.0	bar
Air supply pressure	0.02 ~ 0.5	bar

피스로 분사된 기체는 충돌 점(Impinging point)에서 충돌하여 미립화 된다. 미립화 된 액체는 핀틀 끝단에서 일정한 각도를 이루어 분사된다.

분사각 측정 실험의 조건을 Table 2에 정리하였다. 액체 공급 압력은 1.0 bar로 고정하였으며, 기체 압력을 변화시켜 실험을 수행하였다. 핀틀 개도는 0.2 mm 이상에서 1.0 mm까지 변화시켰다.

상압 조건에서 분사각 측정을 위한 가시화 장치를 Fig. 3에 나타내었다. 분사각은 Fig. 3의 장치를 사용한 역광 기법(Backlight method)을 이용하여 분무 이미지를 얻은 다음, 이미지를 분석하여 구하였다. 분사 이미지의 촬영은 고속카메라 또는 고 화소 CMOS 카메라를 이용하였으며, 광원으로는 스트로브스코프를 이용하였다.

Figure 4는 역광 기법으로 얻은 분무 사진에서 분사각을 정의한 것이다. 분사각은 핀틀에서 분사되는 액체와 오리피스에서 분사되는 기체가 충돌하여 분사되는 모양에서 핀틀 팁부터 일정한 거리에 선을 긋고, 그 선을 지나는 액적들 중 가

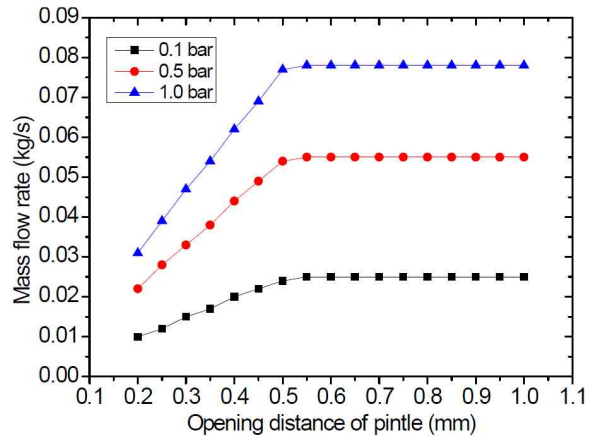


Fig. 5. Predicted mass flow rate of liquid spray

장 바깥에 있는 액적과 핀틀 팁 가운데를 연결하여 이루어지는 각도로 정의하였다. 핀틀 인젝터는 좌우 대칭으로 분사되기 때문에 반각만을 분사각으로 정의하였다.

Table 2의 액체 공급 압력과 기체 공급 압력에 따라 핀틀의 개도를 이용하여 액체와 기체의 운동량과 운동량 흐름을 계산하고, 계산된 운동량과 운동량 흐름의 비와 분사각 사이의 관계를 그래프로 나타내었다.

III. 실험 결과

3.1 핀틀 개도에 따른 유량 변화 특성

Figure 5는 이론적으로 예측된 핀틀 인젝터에서 분사되는 질량 유량을 핀틀 개도에 따라 나타낸 그래프다. 이론적인 질량 유량은 핀틀 개도에 따라 유량식 (4)에 대입하여 구할 수 있다. 여기에서 C의 값은 Fig. 2의 ①과 ②의 면적이 동일해 지는 개도 값이다.

$$\begin{cases} \dot{m}_p = \left(2\pi \frac{R_1^2}{\sin\alpha} - \pi \left(\frac{R_1}{\sin\alpha} - l \cos\alpha \right)^2 \frac{R_1}{L} \right) \sqrt{2\rho P}; l < C \\ \dot{m}_p = \left(\pi (R_1^2 - R_2^2) \right) \sqrt{2\rho P} & ; l \geq C \end{cases} \quad (4)$$

Figure 6은 실제 측정된 핀틀 인젝터의 액체 질량 유량을 나타내고 있다. 실제 핀틀 인젝터에서 분사된 유량은 예측한 유량과 달리 일정 개도 이상에서 유량의 증가량은 감소하지만 여전히 유량이 증가하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 이론과 다소 차이를 보였으며, 실제 측정값과 이론 추정값의 차이를 이용하여 유량 계수를 산출하였다.

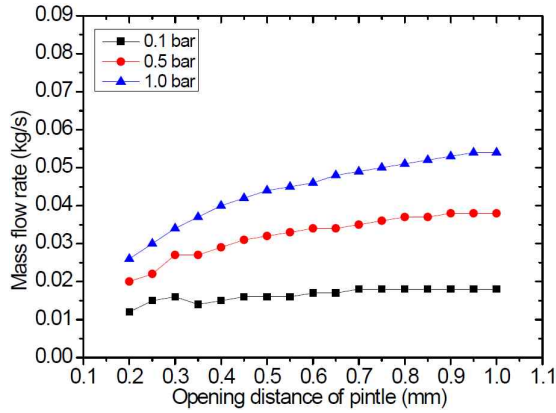


Fig. 6. Measured mass flow rate of liquid spray

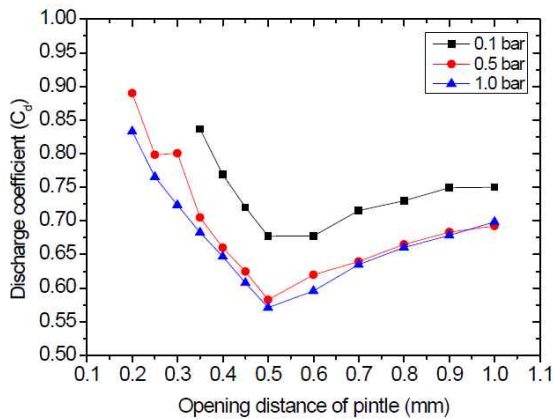


Fig. 7. Discharge coefficients at various distances

Figure 7은 실험으로 측정된 유량과 인젝터 차압을 이용하여 계산한 이론 유량의 비율인 유량 계수를 나타낸 그래프이다. Figure 7에서 유량 계수(C_d)는 실제 측정된 질량 유량 (\dot{m}_r)과 식 (1)에서 구한 이론적인 질량 유량 (\dot{m}_m)으로부터 식 (5)와 같이 정의된다.

$$C_d = \frac{\dot{m}_r}{\dot{m}_m} \quad (5)$$

Figure 7의 그래프에서 핀틀 개도에 따라 유량 계수가 감소하며 개도가 약 0.5 mm 일 때 노즐 최소 면적이 고정되어 유량 계수가 증가하는 현상을 보인다. 이론적으로 계산한 질량 유량은 0.5 mm부터 고정된 유량으로 계산이 되지만 실제 측정된 유량은 이 지점 이상에서도 증가하는 추세를 보이기 때문에 유량 계수가 증가하는 현상이 나타나는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 핀틀 개도에 따른 최소 면적을 정의하는데 있어서 과대평가가 되었다고 추정할 수 있다. 과대평가가

의 원인으로서는 핀틀 유로에서 끝단으로 이어지는 모서리 부분에 박막 현상이 발생하여 실제 유로가 더 좁혀졌을 가능성을 고려할 수 있다.

3.2 핀틀 개도에 따른 분무 특성

역광 기법으로 얻은 이미지 중 대표적인 것들을 Fig. 8에 정리하였다. Fig. 8과 같이 얻어진 이미지에서 분사각을 측정된 후에 각 기체 공급 압력에서 핀틀 개도에 대한 분사각을 Fig. 9로 나타내었다. 모든 기체 공급 압력에서 핀틀 개도가 증가할수록 분사각은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 핀틀 개도가 증가하면 액체 공급 유량이 증가하고, 증가하는 유량만큼 액체의 운동량이 증가하면서 운동량 비가 감소하고, 이에 따라 분사각이 증가한다.

Figure 9의 그래프를 보면 기체 공급 압력이 높을수록 더 큰 분사각을 갖지만 핀틀 개도가 0.2 mm인 경우에는 기체 공급 압력이 낮을수록 분사각이 큰 것을 볼 수 있다. 이 부분을 자세히 살펴보기 위해 각 핀틀 개도에서 공급 압력에 따른 분사각을 Fig. 10에 나타내었다. 핀틀 개도가 0.2 mm인 경우 기체 공급 압력이 증가할수록 분사각은 감소하고, 0.4 mm 이상의 핀틀 개도에서는 기체 공급 압력이 증가할수록 분사각이 증가

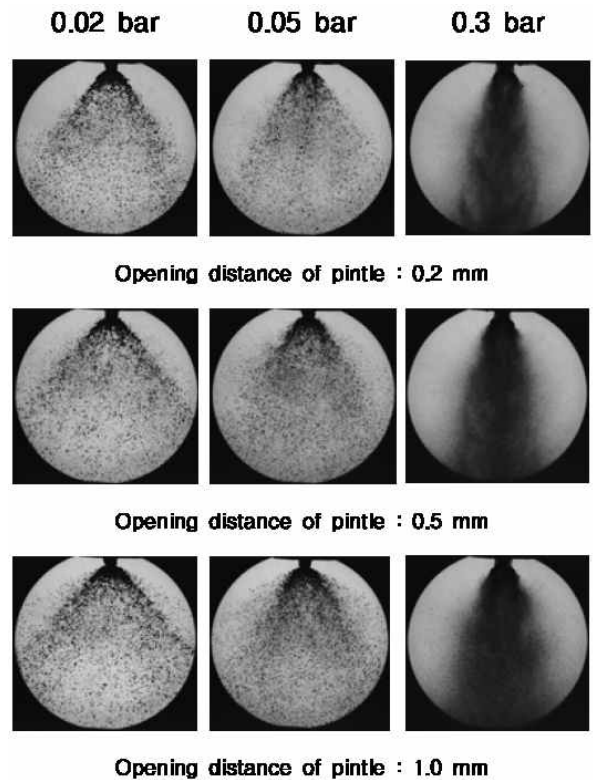


Fig. 8. Backlight images at various pintle distances and gas pressures

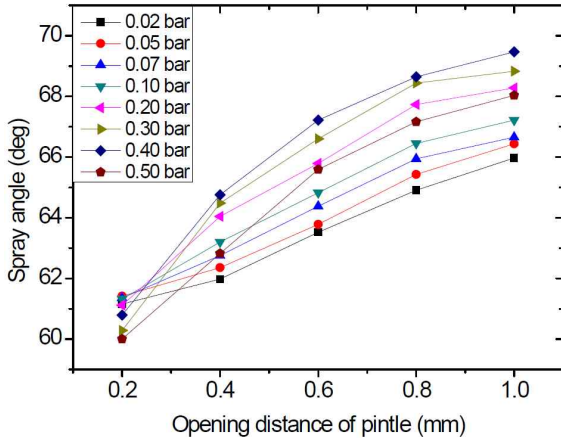


Fig. 9. Relation between opening distance of pintle and spray angle

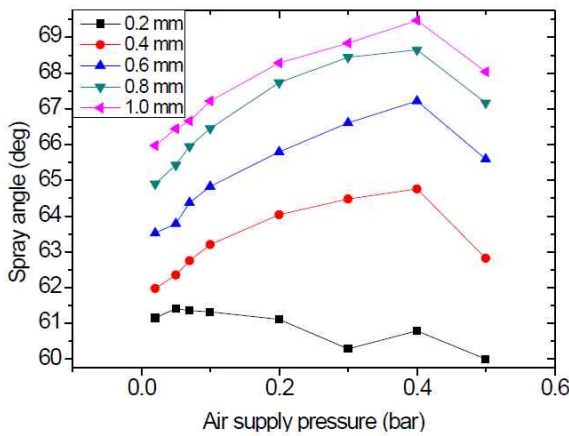


Fig. 10. Relation between Air supply pressure and Spray angle

하는 경향을 보이고 있다. 기체 공급 압력이 0.5 bar인 경우에는 그보다 낮은 기체 공급 압력보다 분사각이 작아지는 것을 볼 수 있다. 핀틀 개도가 0.2 mm인 경우에는 Fig. 11과 같이 정상적인 액막이 형성되지 않는다. 정상적인 액막이 형성되지 않는 경우에는 분사되는 기체가 액막에 부딪치지 않고, 핀틀에서 분사되는 액체 사이로 빠져 나가게 된다. 따라서 액막이 형성되지 않은 상태에서의 분사는 Fig. 12와 같이 층이 나뉘게 되어 비 균질하게 분사되고, 비산되는 액적이 거의 나타나지 않기 때문에 분사각이 작다. 이러한 비 균질한 분사는 연소실 내부에 연소 불안정을 가져올 수 있다. Fig. 13은 정상적인 액막이 형성된 액체 분사 이미지다. 액막이 형성되었을 경우 기체가 분사되면 액막과 부딪치면서 재순환 영역이 형성되어 비산된다. 비산되는 액적들은 분사각을 커지게 만드는데 Fig. 14에서 확인할 수 있다. 또한 액막이 형성되는 경우 분사가 균

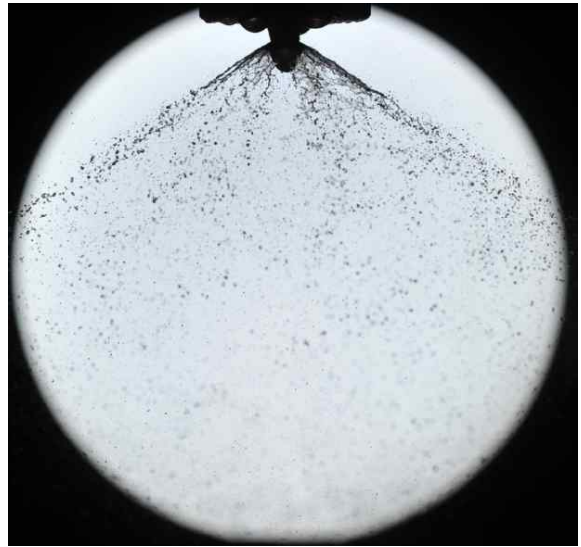


Fig. 11. Backlight image of spray at 0,2 mm of opening distance



Fig. 12. Scattering image of spray at 0.2 mm of opening distance

질하게 이루어지는 것을 확인할 수 있는데 균질한 분사는 연소실 내부에 연소 안정성을 높일 수 있다. 따라서 핀틀 인젝터는 균질한 분사를 위한 액막 형성이 필요하다. 액체가 비산되는 정도는 공급 압력이 커질수록 커지다가 0.5 bar에서부터는 기체 공급 압력이 증가할수록 분사각이 작아진다.

Figure 8과 같이 얻어진 이미지에서 분사각을 측정 한 후에 핀틀 개도와 공급 압력을 이용하여 계산된 운동량 비(Momentum ratio)와 운동량 플럭스 비(Momentum flux ratio)에 따른 분사각을 정리하였다. 운동량 플럭스 비(J)는 기체 밀도(ρ_g)와 기체 분사 속도(V_g), 액체 밀도(ρ_l), 액체 분사 속도(V_l)로부터 식 (6)과 같이 정의되고, 운

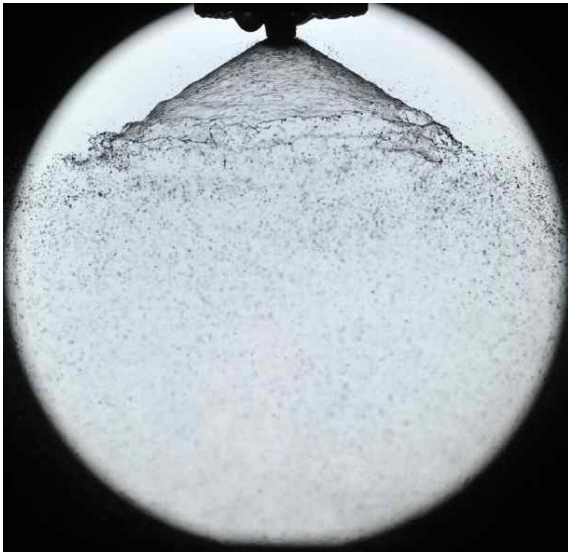


Fig. 13. Backlight image of spray at 0.4 mm of opening distance



Fig. 14. Scattering image of spray at 0.4 mm of opening distance

동량 비(M)는 기체 분사 유량(\dot{m}_g)과 기체 분사 속도(V_g), 액체 분사 유량(\dot{m}_l), 액체 분사 속도(V_l)로부터 식 (7)과 같이 정의 된다.

$$J = \rho_g V_g^2 / \rho_l V_l^2 \quad (6)$$

$$M = \dot{m}_g V_g / \dot{m}_l V_l \quad (7)$$

Figure 15는 분사각을 운동량 흐름 비에 따라 나타낸 것이고, Fig. 16은 운동량 비에 따라 나타낸 것이다. Fig. 15의 그래프에서 운동량 흐름 비에 따라 분사각이 다소 넓게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 운동량 흐름 비와 분사각은 약한 상관관계를 갖는다. Fig. 16의 그래프에서 운동량 비가 증가할수록 분사각이 지수함수로 감소하는 경향을 보이며 분사각은 약 40° 로 수렴하였다. 이 결과는 운동량 비가 운동량 흐름

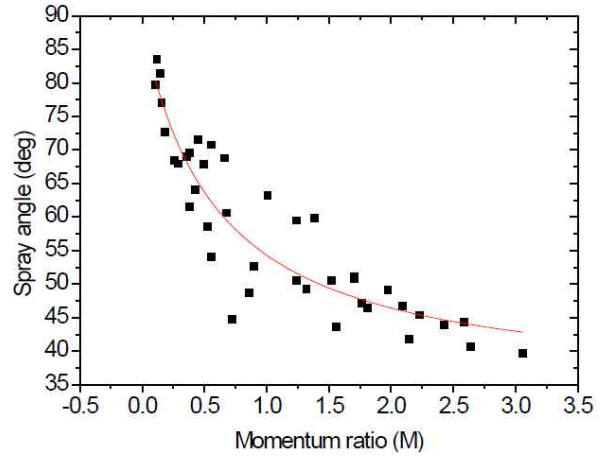


Fig. 15. Relation between momentum ratio and spray angle

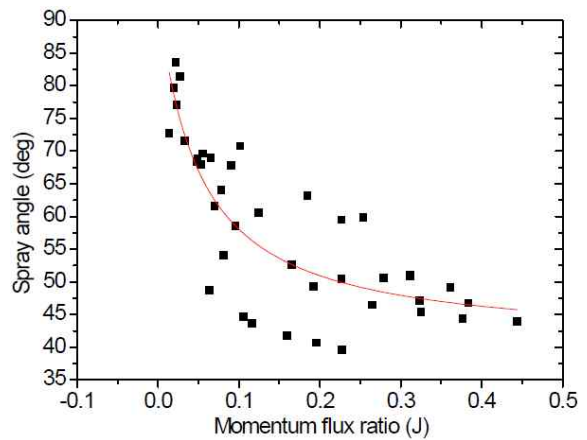


Fig. 16. Relation between momentum flux ratio and spray angle

비보다 분사각에 더 강한 상관관계를 갖는다고 할 수 있다. 운동량의 경우 질량 유량을 이용하고, 운동량 플럭스는 밀도만을 이용하기 때문에 운동량 플럭스와 다르게 출구 면적에 대한 고려가 수행되므로 운동량 플럭스에 비해서 분사각과 더 강한 상관관계를 갖는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

다양한 액체 공급 압력에서 핀틀 개도의 변화에 따른 유량 계수 변화에 대한 실험적 특성을 파악하였으며, 액체-기체 상압 분무 실험을 통하여 거시적인 특성으로 분사각에 대한 결과를 분석하였다.

핀틀 개도가 증가할수록 유량계수의 값은 감소하다가 핀틀 내부 유로 면적과 핀틀 출구 면적이 같아지는 지점보다 핀틀의 개도가 증가하면 유량

계수가 증가하였다.

핀틀 개도가 0.2 mm인 경우에는 액막이 형성되지 못하고, 액막이 형성되지 않을 경우 분사가 비 균질하게 이루어진다. 핀틀 개도가 0.4 mm 이상인 경우에는 액막이 형성되고 분사가 균질하게 이루어졌다. 비 균질한 분사는 연소실 내부에 연소 불안정을 가져 올 수 있으므로 액막이 형성되는 충분한 핀틀 개도를 확보하여야 한다.

핀틀 개도와 공급 압력을 이용하여 계산된 운동량 비와 운동량 플럭스 비를 분사각과의 관계로 나타내었다. 운동량 비를 계산할 때 질량 유량을 고려하였기 때문에 운동량 흐름 비보다 분사각과 더 높은 상관관계를 갖고 있음을 파악하였다. 또한 운동량 비가 증가할수록 분사각은 지수함수로 감소하며 40° 에 수렴 하였다.

후 기

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

Reference

- 1) Jeong, W. H., Kim, D., Im, J. H., Yoon, H., "A Study on Characteristics of Gas/Liquid Coaxial Sprays Under Varying Flow Conditions," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 33, No. 8, 2005, pp. 54-61.
- 2) Kim, Hyunsung, Kim, Byungsun, Yoon, Youngbin, "Effect of Multi-Swirl injector on Acoustic Damping for Reduction of Combustion instability," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 36, No. 9, 2008, pp. 62-71.
- 3) Dressler, G. A. and Bauer, J. M., "TRW pintle Engine heritage and Performance Characteristics," 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, A.L.,

U.S.A, AIAA 2000-3871, 2000.

- 4) Gavitt, K. R. and Mueller, T. J., "Testing of the 650 klbf LOX/LH2 low cost pintle engine," 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, U.T., U.S.A, AIAA 2001-3987, 2001.

- 5) Gilroy, R. and Sackheim, R., "The Lunar Module Descent engine-A Historical Summary," 25th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, C.A., U.S.A, AIAA 89-2385, 1989.

- 6) Calvignac, J., Dang, L., Tramel, T. L., and Passeur, L., "Design and Testing of Non-Toxic RCS Thrusters For Second Generation Reusable Launch Vehicles," 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, A.L., U.S.A, AIAA 2003-4922, 2003.

- 7) Gromski, J. M., Majamaki, A. N., Chianese, S. G., Weinstock, V. D., and Kim, T. S., "Northrop Grumman TR202 LOX/LH2 Deep Throttling Engine Technology Project Status," 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, T.N., U.S.A, AIAA 2010-6725, 2010.

- 8) Austin, B. L. and Heister, S. D., "Characterization of Pintle Engine Performance For non-Toxic Hypergolic Bipropellants," 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, I.N., U.S.A, AIAA 2002-4029, 2002.

- 9) Bedard, M. J., Feldman, T. W., Rettenmaier, A. and Anderson, W., "Student Design/Build/Test of a Throttleable LOX-LCH4 Thrust Chamber," 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, G.A., U.S.A, AIAA 2012-3883, 2012.

- 10) Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern engineering for design of liquid-propellant rocket engines," AIAA, 1992.

- 11) Keffer, J. F. and Baines, W. D., "The round turbulent jet in a cross-wind," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 15, No.04, 1963, pp. 481-496.