

비동질 3중 충돌형 인젝터의 기체-액체 라인 선택에 따른 분무특성

이인철* · 이창진** · 구자예†

Mass Distribution and Spray Characteristics to Liquid-Gas Line Selection of Unlike Triplet Impinging Injector

I. C. Lee, C. J. Lee and J. Y. Koo

Key Words: Triplet impinging injector(3중 충돌형 인젝터), Impinging angle(충돌각), Impinging distance(충돌거리), G-L-G(Gas-Liquid-Gas), L-G-L(Liquid-Gas-Liquid), Mass distribution(질량분포)

Abstract

Impinging angle, impinging distance, length over diameter and injection pressure of a triplet injector were tested to evaluate the spray characteristics injected by liquid/gas combinations. Two different kinds of unlike triplet sprays were produced by changing the gas and liquid feed lines. One was the G-L-G(Gas-Liquid-Gas) type, and the other was L-G-L(Liquid-Gas-Liquid) type. Spray angles were wider with the G-L-G type than with L-G-L type. Mass distributions in spray were obtained with a mechanical patternator. Mass distributions were not circular but elliptical distributions. When the range of mechanical patternator to injector decreased, mass distributions were more concentrated in the center region.

1. 서 론

가스터빈 엔진이나 로켓 엔진에서의 성능은 기체와 액체의 혼합기가 얼마나 안정적이고 미립화되었는가에 따라 영향을 받는다.

로켓의 경우에는 액체상태의 산화제와 재생 냉각을 거친 기체를 충돌시켜 미립화하는 충돌형 인젝터가 사용되고 있다. 이러한 인젝터는 높은 압력을 필요로 하지 않고, 가공이 용이하며 장치가 비교적 간단하고 비용이 비교적 많이 들지 않는다는 장점이 있지만 미립화 성능이 좋지 못할 수도 있고 연소 불안정성에 대하여 민감하게 반응한다는 단점이 있다⁽¹⁾.

과거의 연구는 연소 불안정 현상이 미립화 과정과 관련이 있음을 알고서 그 분열과정에 대해 연구하였다. Taylor⁽²⁾는 액체 제트가 충돌하여 형성되는 액막의 모양과 두께를 이론적으로 계산 했으며, Dombrowski와 Hooper⁽³⁾는 분사압력에 따른 We수에 의해 액막 내에서의 충돌력으로 교란의 진폭이 증가하고 표면 장력과 관성력의 균형이 깨질 때 이 액막이 끊어져 액적을 형성하게 된다는 결과를 실험적으로 밝혀내었다. Luigi와 Michela⁽⁴⁾는 액막 분열에 대한 Kelvin-Helmholtz 불안정 모델을 기본으로 이론적인 연구를 진행했다. 최근의 연구 경향은 기존의 연구를 바탕으로 한 인젝터에 대한 미립화 및 혼합 분무 특성이며, 1976년대부터는 안정된 인젝터의 분사성능을 유지하기 위해 다양한 충돌형 인젝터가 실험되었다⁽⁵⁾. Heidmann⁽⁶⁾은 노즐 직경, 액체 제트 속도, 충돌각, 충돌거리 등의 효과가 충돌시 어떠한 특성을 나타내는가에 대해 연구했으며, 제트 속도와 충돌각이 임계 변수임을 보고했다. 임병직 등⁽⁷⁾은 PLLIF기법을 이용하여 충돌 인젝터의 혼합성능을 비교

(2006년 10월 17일 접수 ~ 2006년 11월 14일 심사완료)

*한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

**건국대학교 기계항공공학부

†책임저자, 회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

E-mail : jykoo@hau.ac.kr

TEL : (02) 300-0116

하였다. 권순탁 등⁽⁸⁾은 총돌 인젝터에서 총돌각, 총돌거리, 운동량비에 따른 혼합효율을 계산하여 최적의 총돌형 인젝터를 제시하였다. 본 논문의 연구목적은 기존의 연구와 더불어 3중 총돌형 인젝터에 대한 거시적인 최적의 분무특성을 연구하여 여러 엔진 시스템에서 효율적으로 사용하기 위함이다.

추진기관에 국한하여 현재까지 사용되어온 여러 종류의 인젝터 중에서 비동질 3중 총돌형 인젝터(Unlike Triplet Injector)는 엔진 시스템에서 제작의 경제성 등의 장점으로 인하여 자주 사용되지만 기체와 액체 사이의 운동량 교환이 작기 때문에 기화 효율이 떨어지는 단점이 있기도 한다⁽⁵⁾.

총돌형 인젝터의 시트분열(sheet breakup), 리가먼트 분열(ligament breakup), 액적분열(droplet breakup) 3 단계의 분열과정은 분사 제트의 종류, 난류 특성과 분사압력에 비례하는 총돌력에 따라 다른 경향성을 갖으며, 이러한 분열 과정이 분무의 미립화 특성을 지배한다⁽⁹⁾. 대부분의 분사된 액체의 질량은 분무장 중앙에 집중되어 있으며, 기체와 액체의 혼합 효율을 낮게 함으로써 연소 효율을 감소시킬 수 있다. 혼합 효율의 경우는 압력차를 증가시키거나 총돌각을 크게 하여 개선할 수는 있으나 총돌각을 조절하는 것이 더욱 효과적이다. 총돌각을 크게 할 경우, 후류가 증가하여 노즐에 손상을 가져올 수 있는데, 이는 총돌거리를 증가시킴으로서 조절할 수 있다⁽⁶⁾.

인젝터의 형식은 기체와 액체의 공급라인을 서로 맞바꾼 G-L-G형과 L-G-L형의 3중 총돌형 노즐을 사용하였다.

2. 실험 방법 및 장치구성

2.1 실험 방법

전체적 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 쉐도우 촬영법(shadowgraphy)을 이용하여 얻은 이미지로 총돌각 변화에 따른 분무형상, 분무각 등을 분석하였으며, 산화제와 추진제 대신에 물과 공기를 이용하였다. 액체의 경우에는 고압용기에 물을 넣고 질소를 가압하는 가압방식을 사용하였다. 채집격자(mechanical patternator)는 총 750개의 시험관 셀로 구성되어 있으며 이 실험 장치로 질량분포를 측정하였다. 한 셀은 16 mm의 직경이며 높이는 125 mm이다. 각각의 시험관끼리의 중심거리는 20 mm이다. 분무를 단속하기 위

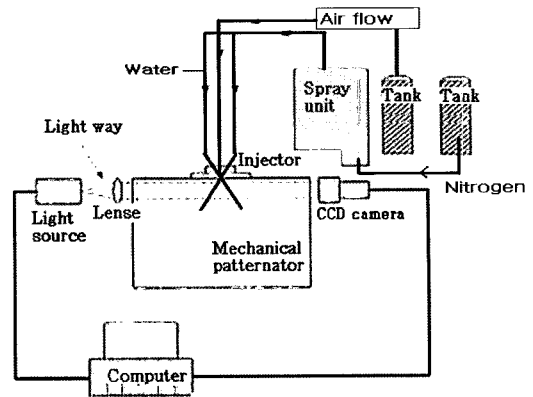


Fig. 1 Schematic of Injector system

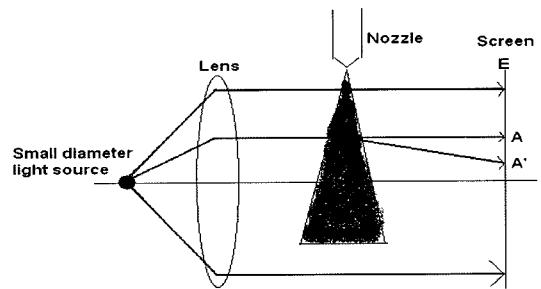


Fig. 2 Basic Principle of Shadowgraphy method

Table 1 Specification of Shadowgraphy equipment

Lens	Diameter	90 mm
	Focal length	600 mm
Zoom lens	Magnification	1 : 7.2
	Focal length	70~200 mm
	Angle of view	34.3°~12.3°
CCD camera	Pixel size	4.65 μm × 4.65 μm
	Resolution	1380 H × 1029 V
Pin hole	Diameter	1 mm

해서 50 MPa까지 건디는 슬레노이드 밸브를 인젝터의 바로 위쪽에 설치했으며 질량분포의 높이별 측정을 위해서 채집격자의 위치를 조절할 수 있는 수동 유압 리프터를 사용하여 조절하였다. 실험에 사용된 3중 총돌형 인젝터의 총돌각은 30°, 60°이며 기체=0.5 MPa, 액체=1.0 MPa, 2.0 MPa의 분사압력으로 인해 총돌로부터 발생하는 분무 질량을 측정하기위해 40 mm씩 리프터를 변화시켜 질량분포 특성을 실험하였다. 본 실험을 위한 장치는 Fig. 2와 같은 원리로 진행되었다. 점

광원 효과를 나타내기 위한 핀 홀의 직경은 1 mm이고 조정의 편리함을 위해 광원 앞에 부착된 판에서 2차원 이송이 가능하도록 제작되었다. 플래시 램프에서 발생된 강력한 빛은 지름 1 mm의 핀 홀을 통과하여 블록 렌즈를 지난 후 평행 광을 이루고 가압 챔버를 지나 카메라 렌즈로 들어간다. 이미지를 획득하기 위해 사용된 블록렌즈, CCD 카메라, 줌렌즈(zoom lens)의 제원은 Table 1과 같다.

2.3 인젝터의 형상 및 특성변수

Figure 3의 그림과 같이 비동질 3중 충돌형 인젝터는 오리피스수가 3개로 인젝터의 특성 변수는 Table 2와 같다. L-G-L 인젝터에서는 보통 액체가 공급되는 양 측면 오리피스의 직경은 1.1 mm이고 기체가 들어가는 중앙 오리피스의 직경은 0.9 mm이다. G-L-G 인젝터에서는 기체와 액체를 공급라인을 서로 맞바꾸어 양쪽에서 기

체가 들어가고 중앙 오리피스로 액체가 공급된다. \dot{m} , ρ 는 각각 연료 또는 산화제의 유량과 밀도이다. c_d (discharge coefficient)는 일반적인 경향을 따라 연료 0.75, 산화제 0.78로 계산한다⁽¹⁰⁾.

이론적인 분사구 직경계산은 인젝터 양면의 압력강하와 c_d 를 이용한 식을 사용하였다⁽¹¹⁾.

$$d_{ori} = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{c_d \cdot \pi \cdot \sqrt{2\rho\Delta P}}} \quad (1)$$

대부분 액체추진 로켓의 인젝터 직경은 0.5~3.0 mm 이다. L_{fs}/d_{ori} (L_{fs} =liquid jet length, d_{ori} =orifice diameter)가 5 이하이면 횡단류, 와류 등의 영향으로 오리피스 형상 분사제트가 역류하여 인젝터 표면에 손상을 입힐 수 있으며, 10 이상이면 체트유동이 서로 불일치하여 균일한 혼합기 생성에 나쁜 영향을 준다⁽⁵⁾.

현재 사용되는 충돌 인젝터의 충돌각은 30°, 45°, 60°, 90°이며, 실험적으로 밝혀진 최적의 혼합 효율을 지닌 인젝터의 충돌각으로는 45°, 60°이기 때문에⁽⁸⁾ 실험에서는 동일하게 45°, 60°의 인젝터를 제작하여 실험하였다. 그리고 인젝터의 분무 특성 변수로서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 운동량비(momentum ratio, MR)는 다음과 같다.

$$MR = \frac{N_f \dot{m}_o^2 \rho_f (d_f)^2}{N_o \dot{m}_f^2 \rho_o (d_o)^2} \quad (2)$$

여기서 N_f 는 연료 공급 오리피스 수, N_o 는 산화제 공급 오리피스 수, \dot{m}_f 는 연료 질량 유량, \dot{m}_o 는 산화제 질량 유량, ρ_f 는 연료밀도, ρ_o 는 산화제 밀도, d_f 는 연료 오리피스 직경, d_o 는 산화제 오리피스 직경이다.

인젝터의 분사성능 평가를 위한 혼합효율의 관계식은 다음과 같다.

$$\eta_{mix} = 1 - \sum_{i=0}^n \frac{MF_i \cdot (R-r_i)}{R} - \sum_{i=0}^{\bar{n}} \frac{\overline{MF}_i \cdot (R-\bar{r})}{R-1} \quad (3)$$

MF 는 각 셀의 (국소질량/채워진 총 질량), n 은 cell의 수 ($R>r$), \bar{n} 는 cell의 수($R<r$), $R = \{\text{총혼합비}/(\text{총혼합비}+1)\}$, $r = \{\text{국소혼합비}/(\text{국소혼합비}+1)\}$ 이다. 운동량비가 1일 때에 가장 이상적인 효율로 혼합이 이루어지나 운동량비가 0.3~0.5의 범위에서 최대의 혼합효율을 얻을 수 있으며, 운동량비 0.3에서 충돌각 45°의 노즐이 최대 혼합효율을 나타낸다. 충돌각, 혼합효율, 작은 연소실 직경을 고려할 경우 충돌각 45°의 노즐을 최적의 노즐로 선정할 수 있다⁽⁸⁾.

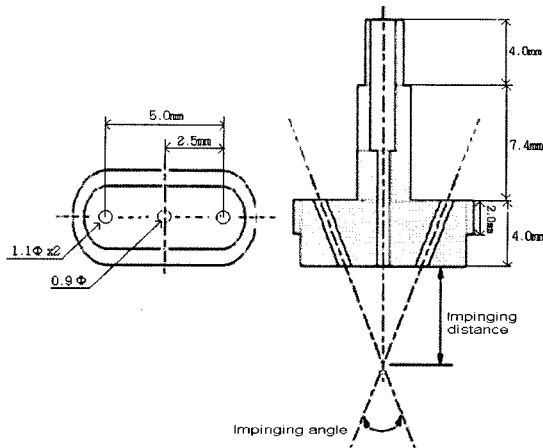


Fig. 3 Schematics of Injector

Table 2 Design Parameters of Injector

특성	노즐 No	No.1	No.2
L_{ori}/d_{ori} (D=1.1 mm hole)		4.09	4.09
L_{ori}/d_{ori} (D=0.9 mm hole)		7.77	4.44
Orifice Length(mm) at D=1.1 mm		4.5	4.5
Orifice Length(mm) at D=0.9 mm		7	4
Impinging distance(mm)		6.0	8.6
Impinging angle (degree)		60	30

L_{ori} = orifice length
 d_{ori} = orifice diameter

3. 결과 및 고찰

3.1 인젝터의 분무특성

Figure 4에서 보듯이 G-L-G형의 분무각을 살펴보면 액체 압력을 일정하게 유지시켰을 때 기체의 분사압력이 증가 할수록 분무각은 감소하는 경향을 나타낸다. 이와 반대로 Fig. 5에서 기체의 압력을 일정하게 유지시켰을 때 액체의 분사압력이 증가 할수록 분무각이 증가하는 경향을 나타낸다. Fig. 6의 L-G-L형은 기체 압력이 증가 할수록 분무각이 감소하는 현상을 보인다. 이와 마찬가지로 Fig. 7에서 액체 압력이 증가 할수록 분무각이 증가하는 것을 볼 수 있다. 각 노즐의 G-L-G형과 L-G-L형에 대한 분무각을 비교해 본 결과는 분무각이 0.1 MPa에서 0.4 MPa의 범위에서 선형적으로 일정한 분무각을 보인다는 것이다.

Figure 8은 G-L-G형과 L-G-L형의 노즐에서 생성된 분무의 가시화 사진이다. 이미지의 단면은 충돌 반대방

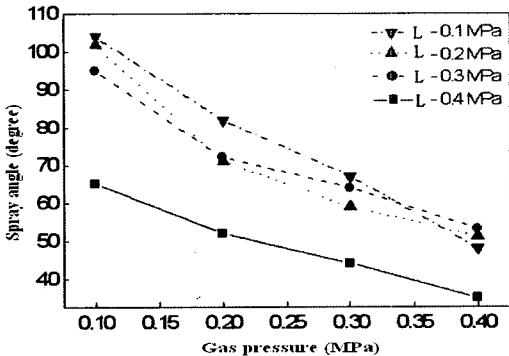


Fig. 4 Spray angle of Gas-Liquid-Gas type graph under constant liquid pressure (Nozzle No.1)

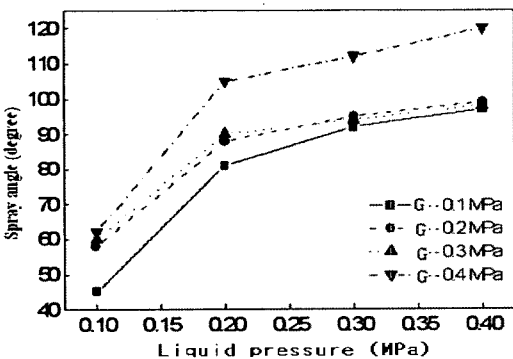


Fig. 5 Spray angle of Gas-Liquid-Gas type graph under constant gas pressure (Nozzle No.1)

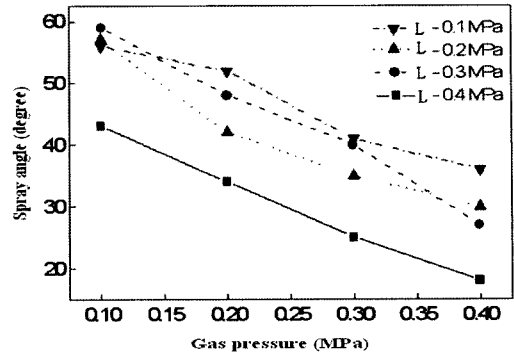


Fig. 6 Spray angle of Liquid-Gas-Liquid type graph under constant liquid pressure (Nozzle No.2)

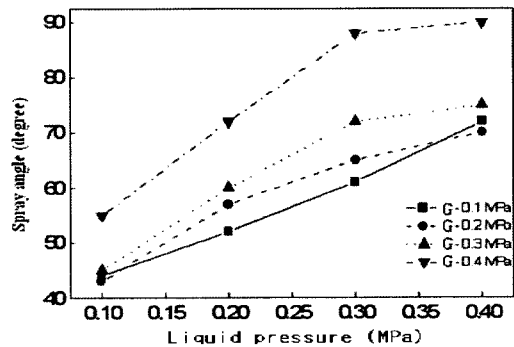


Fig. 7 Spray angle of Liquid-Gas-Liquid type graph under constant gas pressure (Nozzle No.2)

향이이다. 충돌방향에서 관찰한 이미지는 양쪽의 오리피스에서 갈라져 나오는 액주의 충돌점이 보인다. G-L-G형의 분무 특성은 가스의 분사압력이 0.1 MPa에서 0.4 MPa로 증가함에 따라서 분무각이 작아진다. 반대로 L-G-L형의 분무 특성은 액체의 분사압력이 0.1 MPa에서 0.4 MPa로 증가함에 따라서 분무각이 커지다가 0.3 MPa 이후에 거의 일정해진다.

Figure 8의 이미지를 분석한 결과 충돌각과 분무각은 비례하는 것으로 나타났다. 충돌각 30°를 갖는 L-G-L형과 충돌각 60°를 갖는 G-L-G형에서 액체 압력을 높이면 상대적인 충돌 운동량이 커져 분산이 이루어져야 하지만 분사된 액체의 아래로 향하려는 더 큰 운동량과 분사 속도의 불균형 때문에 가운데에 유량이 집중되는 현상을 보인다. 충돌각 30°의 L-G-L형에서 액체의 분무압이 1.0 MPa에서는 중심 부분의 밀도가 상대적으로 길어진 결과로 보아 미립화가 되었음을 이미지로 파악할 수 있다.

충돌각 30°의 G-L-G형에서 가장자리 영역의 작은 액

Gas 0.3 MPa 일정	Liquid 0.1 MPa	Liquid 0.2 MPa	Liquid 0.3 MPa	Liquid 0.4 MPa
Impinging angle 60° Impinging distance 6.0 mm G-L-G type				
Impinging angle 60° Impinging distance 6.0 mm L-G-L type				
Gas 0.3 MPa 일정	Liquid 0.2 MPa	Liquid 0.4 MPa	Liquid 0.8 MPa	Liquid 1.0 MPa
Impinging angle 30° Impinging distance 6.0 mm L-G-L type				
Liquid 0.1 MPa 일정	Gas 0.1 MPa	Gas 0.2 MPa	Gas 0.3 MPa	Gas 0.4 MPa
Impinging angle 30° Impinging distance 6.0 mm G-L-G type				

Fig. 8 Spray photos of each pressure at G-L-G and L-G-L type nozzle

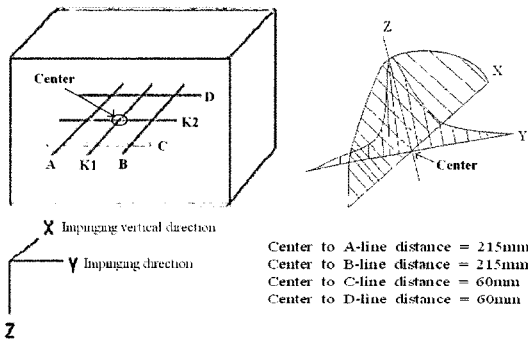


Fig. 9 Position of mechanical patterner

적들은 중심 영역에서 액체와 기체의 충돌 후에 분산된 아직 미립화가 되지 않는 작은 액적들이다. 기체의 압력을 증가시키에 따라 중심 영역에서 액체와의 충돌 운동량이 증가하여 이 작은 액적들이 점점 미립화가 된다. 이미지 상에서 밀도가 짙은 부분은 미립화된 영역이며, 기체의 압력이 높아질수록 충돌 운동량이 증가하여 미립화가 향상된다.

3.2 인젝터의 질량분포 특성

우선 Fig. 9는 개략적인 그림으로서 채집격자 중심에

서 끝부분까지 위치별 간격, 질량분포도를 나타낸 것이다. 채집격자의 전체 분무 채집율은 82%이고 이 채집된 질량에서 18%를 제외한 양을 채집된 총 질량유량으로 계산했다. 질량 분포율에 대한 계산 방법은 다음과 같다.

$$\frac{\text{국부 질량유량(kg/s)}}{\text{채집된 총 질량유량(kg/s)}} \times 100 \quad (4)$$

여기서 Y축은 충돌방향을 나타내며, X축은 충돌방향(액주끼리 충돌하는 방향)에 수직인 방향이다. 질량분포 측정은 충돌방향인 Y축에서 A, K1, B 선상과 충돌수직 방향인 X축에서 C, K2, D 선상에서 수행되었다. X축 방향에서는 K1을 중심으로 하였고, Y축 방향에서는 K2를 중심으로 하였다. 무차원 거리는 X축에 대하여 X_b/X_i , Y축에 대하여 Y_b/Y_i 로 나타낼 수 있다. 하첨자 b는 각각의 시험관 사이거리이며, 하첨자 i는 각각의 시험관 사이거리에 대한 총합이다.

L-G-L(Liquid-Gas-Liquid) type L_{fs}/d_{ori} 5.8, 충돌거리 6.0 mm, 충돌각 60°의 실험조건에서 측정된 질량분포는 Fig. 11, 12, 13, 14와 같이 그래프로 나타내었다. Fig. 10에서 중심 지역의 집중된 질량분포의 원인은 충돌 후 아래로 향하려는 주된 운동량과 충돌 반대 방향으로 퍼지려는 운동량 효과 때문이며, 외곽 지역의 적은 질량 분

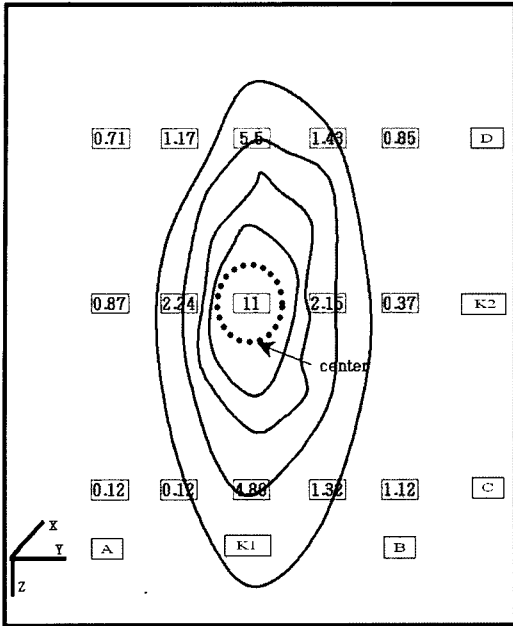


Fig. 10 Image for mass distribution (Each numerical value is percentage of total mass distribution, Air : 0.5 MPa, N₂ : 2.0 MPa, Between Injector and bottom of tube height : 556 mm)

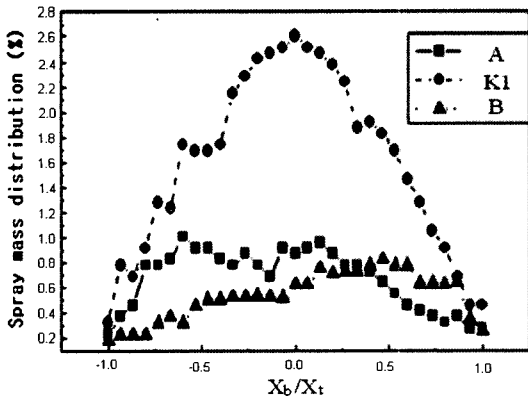


Fig. 11 Spray mass distribution of X-axis (Air : 0.5 MPa, N₂ : 1.0 MPa, Between Injector and bottom of the tube height : 556 mm)

포도는 액주끼리의 충돌과 공기 충돌의 상호적인 영향으로 발생된 미립화된 액적들이 넓게 퍼져서 발생한 결과이다.

Figure 11의 그래프는 Fig. 10에서와 같이 액주끼리의 충돌 운동량 효과로서 주로 중심과 K1축 선상으로 분무가 이루어졌기 때문에 경사 곡선이 완만한 것이다. Fig.

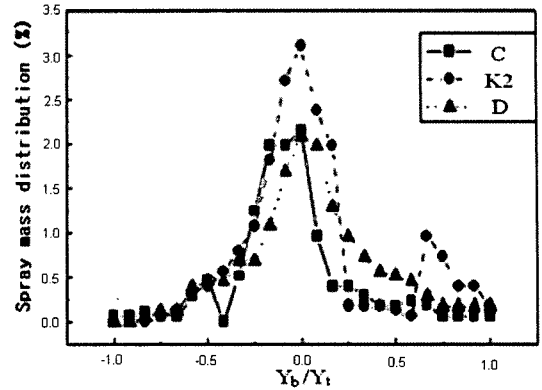


Fig. 12 Spray mass distribution of Y-axis (Air : 0.5 MPa, N₂ : 1.0 MPa, Between Injector and bottom of the tube height : 556 mm)

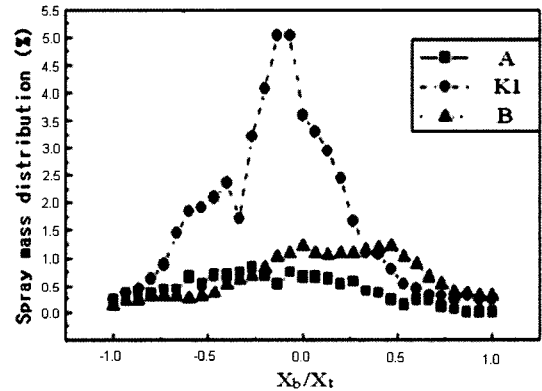


Fig. 13 Spray mass distribution of X-axis (Air : 0.5 MPa, N₂ : 1.0 MPa, Between Injector and bottom of the tube height : 476 mm)

12의 경우는 분무의 집중이 충돌 지점 중심에서 K1축 방향으로 집중되기 때문에 상대적으로 K2축으로는 중심만 집중되고 그 이외의 영역에서는 분무의 집중이 적어서 그래프를 그렸을 때 경사곡선이 급한 것이다. Fig. 13, 14에서 채집격자의 높이가 올라 갈수록 각각의 축에 대한 그래프 형태는 서로 비슷해지며, 액체의 분사압력이 증가 할수록 중심에 유량이 집중되는 현상을 보였다. 액체의 운동량 비를 높이면 기체와 충돌하여 분산 하려는 충돌 운동량이 커지지만 그 운동량에 비해 아래로 향하려는 액체의 운동량의 비가 크기 때문에 유량이 중심에 집중되는 것이다. 또 다른 이유로는 액체의 운동량을 증가시켰기 때문에 상대적으로 기체의 충돌 속도가 작아져 충돌로 인한 액체의 분산 현상이 적게 일어나는 것이기도 하다.

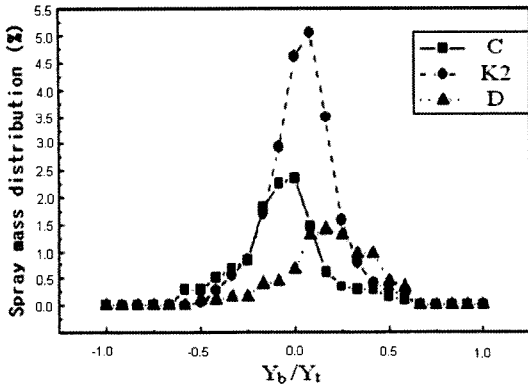


Fig. 14 Spray mass distribution of Y-axis (Air : 0.5 MPa, N₂ : 1.0 MPa, Between Injector and bottom of the tube height : 476 mm)

4. 결 론

설계변수가 다른 인젝터들을 사용하여 액체와 기체 공급 라인을 변경시키면서 충돌형 인젝터의 분무 특성을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 충돌각은 분무각에 비례하며 G-L-G형의 일정한 기체 압력 조건에서 액체 압력을 높이면 분무각이 감소한다. G-L-G형에서 기체의 압력을 높이면 액체의 분열을 촉진하는 충돌 운동량의 증가로 액체가 더욱 미립화 된다.
- 2) L-G-L형에서는 액체의 분사압력이 높을수록 기체와의 충돌 운동량 증가로 분무형상은 미립화 되지만 미립화 정도는 미약하다. 일정한 기체 압력 조건에서 충돌각 60°일 때 분사각도 증가하였다.
- 3) 충돌형 인젝터의 분무는 대부분이 충돌점을 중심으로 집중되어 있기 때문에 이러한 집중현상은 공기와의 혼합특성을 감소시켜 연소효율을 저하시킬 수 있다. 즉 충돌각, 충돌거리, 분사압력 등의 조절을 통하여 최적의 미립화 특성을 만들 수 있으며 가장 효율적인 방법은 충돌각을 조절하는 것이다.
- 4) 충돌압에 따른 질량분포 면적은 충돌방향인 Y축 방향보다는 X축 방향으로의 더 넓게 나타났다. 위에서 본 채집격자에 채집된 전체적 분무 형상은 타원형으로 볼 수 있으며 측정위치가 노즐 출구에 가까이 갈수록 중심에 질량분포 비율이 증가하는 현상을 보였다.

후 기

본 연구는 2006년도 한국항공대학교 교비 연구비 지원으로 수행된 연구결과이며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) V Yang, "Liquid Rocket Engine Combustion Instability," Pennsylvania State University, AIAA, 1955, pp. 11~50.
- (2) Taylor, G. I., "Formation of Thin Flat Sheets of Water," Proceedings of the Royal Society of London, A., Vol. 259, 1960, pp. 1~17.
- (3) Dombrowski, N., and Hopper P. C., "A study of the Sprays Formed by Impinging Jets in Laminar and Turbulent Flow," J. Fluid Mech., Vol. 18, Pt. 3, 1964, pp. 392~400.
- (4) Luigi De Luca and Michela Costa, "Instability of a Spatially Developing Liquid Sheet," J. Fluid Mech., Vol. 331, 1997, pp. 127~144.
- (5) "Liquid Rocket Engine Injectors," Space Vehicle Design Criteria, NASA SP8089, 1976, pp. 1~81.
- (6) Heidmann, M. F., Priem, R. J., and Humphrey, J. C., "A Study of Sprays formed by two Impinging Jets," NACA Technical Note 3855, March. 1957.
- (7) 임병직, 정기훈, 윤영민, "액체로켓용 FOF와 FOF 인젝터의 분무특성 비교," 한국추진학 회지, 제7권, 제2호, 2003, pp. 1~6.
- (8) 권순탁, 이창진, 김승한, 한영민, "가스발생기용 F-O-F 충돌형 인젝터 분사특성," 한국항공우주학회지, 제33권 1호, 2005, pp. 62~68.
- (9) H. M. Ryan, W. E. Anderson, S. Pal and R. J. Santoro, "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets," Journal of Propulsion and Power, Vol. 2, No. 1, Jan-Feb. 1995, pp. 135~145.
- (10) D. K. Huzel, and D. H. Huang, "Modern Engineering for Design of Liquid Propellant Rocket Engine," Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Vol. 147, 1992, pp. 53~55, 155~218.
- (11) 이인수, "액체로켓용 Unlike-doublet 인젝터의 혼합 특성 연구," 서울대학교 대학원 공학석사논문, 2003, pp. 4~5.