

PLIF 기법을 이용한 액체로켓용 충돌분사 인젝터의 분무분포 특성 해석

정기훈* · 윤영빈* · 황상순**

Analysis of the Spray Distribution Characterization of Impinging Jet Injectors for Liquid Rockets Using PLIF Technique

K.H.Jung*, Y.B.Yoon*, S.S.Hwang**

ABSTRACT

Most researches for impinging jet spray have been focused on understanding the breakup mechanism of a liquid sheet formed by the collision of jets and modeling the spray breakup using experimental data. For this reason, there have been few studies on the characteristics of the spatial spray distribution which affects significantly the combustion efficiency. Hence, we measured the radial distribution of fuel massflux using a like-doublet type injector. Instead of PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer) which has been used only for the point measurement of the drop size of spray, PLIF(Planar Laser Induced Fluorescence) technique was developed for the 2-D measurement of the massflux distribution of spray. Indirect photography technique was also used to verify PLIF data.

초 록

지금까지의 충돌분무에 대한 연구는 제트의 충돌시 형성되는 액막의 분열 과정을 이해하고 이를 모델링하는데 초점을 두어왔기 때문에 실질적으로 연소 효율에 가장 큰 영향을 미치는 연료의 공간분포 특성에 대한 연구가 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 like-doublet 충돌분사 노즐을 사용하여 연료 유량 플럭스의 단면분포 특성을 연구하였다. PDPA(Phase Doppler Particle Analyzer)를 통해 액적의 크기를 측정하는 기존의 방법은 연료의 평면적인 분포특성을 이해하는데 상당히 제한적이었기 때문에 평면 레이저 유도형광기법(PLIF : Planar Laser Induced Fluorescence)을 이용하여 분무의 단면 분포를 측정하였고, 직접사진을 통하여 액적의 크기도 측정하여 PLIF의 결과와 비교하였다.

*서울대학교 항공우주공학과(Seoul National University, Dept. of Aerospace Eng.)

**인천대학교 기계공학과(Inchon University, Dept. of Mechanical Eng.)

기호설명

Area_{50%} (%) : Ratio of region covered by half of mass to total spray region

Area_{50%} (mm) : Area of the half of mass

C_f', C_f : Constants

D_{10} : Length-mean diameter

D_{30} : Volume-mean diameter

d_o : Orifice diameter

G_f : Intensity of fluorescence signal

$I_i(x, y)$: Intensity of incident beam at point x, y

m : Mass of liquid drop

U_j : Injection velocity of liquid

We : Weber number, $\rho U_j^2 d_o / \sigma$, based on liquid property

θ : Half of the impinging angle

ΔP : Injection pressure drop

ρ : Density of liquid

σ : Surface tension

1. 서 론

액체 연료 로켓엔진의 인젝터에 대한 연구는 연소 효율과 안정성 향상에 초점을 두어왔다. 그중, 충돌분사형 인젝터는 구조가 매우 간단하면서 고유량의 연료를 분사시킬 수 있기 때문에 개발 초기부터 많은 연구가 이루어졌으며 실제 여러 엔진에 응용된 바 있다. 최근에는 액체 연료 로켓엔진에 있어서 심각한 문제로 부각되었던 연소기 내의 연소 불안정 현상 또한 연료의 초기 미립화 과정과 밀접한 관련이 있다는 사실이 밝혀지면서 인젝터의 분무특성에 대한 근본적인 연구의 필요성이 다시 제기되고 있다^[1].

충돌분무에 대한 연구는 액체 로켓의 개발 이전부터 계속적으로 진행되어 왔다. Taylor^[2]는 매우 낮은 We 수의 조건에서 두 오리피스로부터 분사된 액체 제트가 충돌하여 형성되는 액막의 모양과 두께를 이론적으로 계산하였으며 실험을 통해 이를 입증하였다. 그는 낮은 분사 속도에서는 두 제트의 충돌

시 형성되는 액막을 교란시키는 요인이 없다고 가정하고, 유량 및 운동량 보존식만으로 이론적인 계산을 수행하였다.

그러나 이는 매우 낮은 We 수에서만 적용할 수 있으며, 보다 높은 We 수에 대해서는 두 제트의 충돌시 생기는 충돌력(impact force)에 의해 액막 내에서 파(wave)가 형성되고, 이 파의 성장과 분열 과정이 분무의 미립화 특성을 지배한다는 사실이 여러 실험적 연구에 의해 밝혀졌다^[3]. 따라서, 충돌제트로부터 형성되는 액적의 크기 및 공간적인 분포 특성을 예측하기 위해서는 액막의 성장과 분열 과정에 대한 이해가 반드시 필요함을 인식하게 되었다.

일반적으로 충돌제트에 의해 형성되는 액막은 분사제트의 We 수에 따라 다양한 패턴을 가진다는 것이 알려져 있다. 즉, 제트 속도가 매우 작을 때에는 액막에 교란이 없는 폐쇄형 영역(closed rim regime)을 이루며, 점차 속도가 증가함에 따라 교란이 증가하여 액막의 파장에 따른 주기적인 분열을 보이는 영역(periodic drop regime)으로 천이한다. 이보다 속도가 더 클 때에는 액막의 끝이 열려 말단에서 분열이 빠르게 이루어지는 개방형 영역(open rim regime)으로 진행되며, 일정 속도 이상에서는 액막이 거의 존재하지 않고 충돌력에 의한 직접적인 분열이 이루어지는 영역(fully developed regime)에 들어서게 된다^[4].

이와같은 액막의 분열에 대한 이론적인 연구는 Kelvin-Helmholtz 불안정 모델을 기본으로 하며, 이를 선형 또는 비선형으로 모델링하고 이에 대한 수치계산을 통하여 시간·공간상의 액막의 불안정 조건을 찾아내는데 초점을 두어 왔다^[5-7]. 그러나 이러한 수치계산 결과는 실제 실험 결과와는 상당한 차이를 보이고 있어, 아직까지는 액막의 분열 과정을 완전히 이해할 수 있는 이론적인 모델이 없는 실정이다.

한편, 충돌분사 인젝터의 성능해석에 관한 지금까지의 연구는 대부분 분사 조건에 따른 액막의 분열 과정과 그로부터 형성되는 액적의 크기 측정에 의존하여왔다. 그러나 실제 액체로켓 연소기의 고온고압 조건에서는 액적은 매우 빠른 속도로 기화하기 때문에 연소효율을 향상시키기 위해서는 액적의 크기보다는 전체 액적의 공간적인 분포 특성이 중요하다.

액체연료 인젝터의 분무 분포 특성을 측정하는 방법으로서 초기에는 일정한 미세 격자를 가진 채집판을 이용하는 기계적인 방법을 사용하였다. 이는 포집된 액체의 부피로부터 단위 시간당 유량의 공간적 분포로 환산하는 원리이나, 근본적으로 유동의 흐름을 교란시킬 수 있고 공간 해상도가 매우 낮으며 상당히 번거롭다는 단점이 있었다. 근래에 들어 레이저를 응용한 연소 진단 기법이 비약적으로 발전함에 따라 Malvern이나 PDDA를 이용하여 노즐로부터 특정거리에서의 액적 크기를 비교적 정확하게 측정할 수 있었다^[8]. 그러나 Malvern은 레이저 빔 방향의 액적들의 크기 분포에 대한 정보를 얻을 수 없으며, PDDA는 1차원 측정 기법이기 때문에 평면상의 공간 분포를 얻는데는 상당한 노력이 필요하고 그 공간 해상도도 매우 낮다. 이에 비해 평면 레이저 유도 형광기법은 매우 높은 공간 분해능을 가지면서 2차원 평면상의 연료 유량의 공간분포를 측정할 수 있다는 장점을 가지고 있다^[9].

본 연구에서는 분사조건에 따른 충돌형 인젝터의 분무 분포 특성을 분석하기 위해 PLIF 기법을 이용하여 유량 플럭스의 평면분포를 측정하였다. 또한 PLIF 측정 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 스트로보스코프를 이용하여 순간 사진을 촬영한 후 직접 액적의 크기를 측정하여 얻은 액적의 총 부피로부터 유량 플럭스를 구하였고, 이를 PLIF 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 PLIF를 이용하여 단면방향의 유량분포를 측정하기 위한 실험장치와 실험에서 사용된 좌표계를 보여주고 있다. Ar-Ion 레이저(514.5nm)로부터 얻은 빔은 광섬유를 통해 평면광으로 조사된다. 연료는 안전상의 문제로 물을 사용하였는데, 514.5nm의 파장에서 형광을 일으키는 fluorescein을 용해시키기 위해 메틸알코올을 물과 4:1의 비율로 첨가하였다. 연료의 분사압은 연료탱크를 가압해주는 질소가스로 1차적으로 조절하며 노즐 입구에서 감압기를 통해 보다 미세하게 2차 조절된다. 형광신

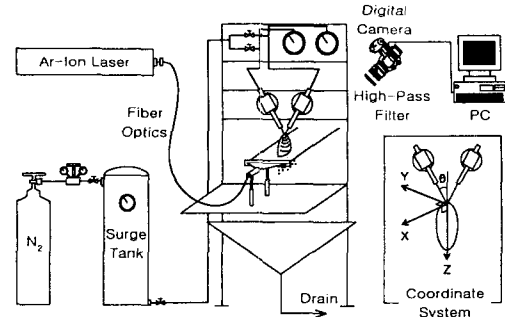


Fig. 1. Experimental setup for PLIF

호는 530nm high-pass 필터를 거쳐 디지털 카메라로 감지된다. 카메라의 수직방향 접근이 불가능하기 때문에 측면에서 촬영한 후 이미지 처리를 통해 원근 보정을 해준다. 형광신호는 각각 1/4초의 노출 시간을 준 10개의 이미지를 평균하여 구한다. 또한 입사광의 감쇠를 보정하기 위하여 좌우에서 평면광을 조사한 후 각각의 이미지를 합성하였으며, 실험에 사용한 좌표계는 형성되는 액막의 폭방향을 X, 두께 방향을 Y, 중력 방향을 Z로 정하였다.

한편 액적의 크기는 고배율($\times 10$)의 직접사진으로부터 크기 측정 프로그램을 이용한 일괄처리 방식으로 측정하였다(측정가능 범위 : 150~2000 μm). 충돌 분무의 경우, 액적은 액막의 분열로 형성되기 때문에 2차원적인 분포를 이루게 된다. 따라서 카메라의 초점을 벗어난 액적이 측정되는 경우가 적고, 그러한 액적들은 이미지 처리과정을 통해 대부분 제거된다. 연료의 분사를 위한 실험장치는 Fig. 1과 동일하며, 다만 분무의 순간사진을 촬영하기 위하여 광원으로 스트로보스코프를 사용하였다. 또한 간접촬영의 기법을 택하여 보다 선명한 이미지를 얻을 수 있었으며, 렌즈의 왜곡현상을 최소화하기 위하여 측정위치를 항상 렌즈의 중앙에 위치하도록 하였고, 각 조건에 대하여 총 60장의 이미지를 통계처리 하였다.

Fig. 2은 노즐을 구성하는 장치의 실제 형상을 보여주고 있다. 노즐은 정밀 표면가공을 한 튜브를 사용하였으며 안쪽 지름이 0.069cm, 길이가 6.90cm로 $L/D=100$ 으로 하였다. 노즐 내부는 표면 거칠기 정도를 알 수 없기 때문에 층류·난류 특성에 대한 정확한 구분은 할 수 없으나, 분사되는 단일

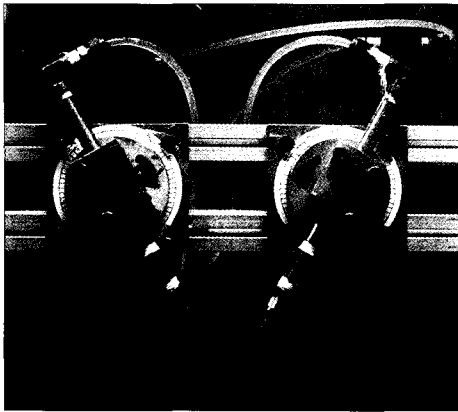


Fig. 2. Nozzle assembly

제트의 순간사진으로부터 분사압이 0.5bar 이상에서는 확실한 난류 특성을 갖게됨을 확인할 수 있었다.

2.2 실험방법

PLIF 기법은 형광 염료가 시험 유체 내에 균일하게 존재하고 있을 때 형광 신호의 강도는 유체의 체적, 즉 질량에 비례한다는 이론에 바탕을 두고 있다. 또한 형광신호의 강도는 입사 레이저광의 강도에 비례하므로 다음과 같이 정리할 수 있다^[10].

$$G_f = C_f' I_i(x, y) \delta m = C_f I_i(x, y) \rho$$

이때 액적이 존재하는 모든 영역의 신호강도의 합은 총 분사유량과 같은 의미를 갖기 때문에 유량 플럭스(massflux)로 정량화 할 수 있다.

질은 분무에서는 액적들에 의하여 상당한 입사광의 감쇠가 발생하기 때문에, 정확한 분무의 패턴을 얻을 수 없으므로 이에 대한 보정이 필요하다. 본 연구에서는 레이저를 순차적으로 좌우에서 조사하여 얻은 각각의 이미지의 기하평균을 구하는 Talley^[10]의 알고리즘을 사용하여 이를 해결하였다. 또한, 평면광 자체의 강도 분포는 대체적으로 불균일하기 때문에, quartz calibration cell을 사용하여 보정해주었다.

한편, 분무의 단면 측정인 경우에는 카메라의 수직방향 접근이 불가능하기 때문에 비스듬한 각도에서 획득한 이미지의 원근에 대한 보정이 필요하다. 이는 Affine 변환을 수행함으로써 해결하였는데, 이

변환을 위한 계수들은 측정 위치에 정사각형의 격자를 놓고, 이미지를 얻은 후 사다리꼴의 이미지가 정사각형의 이미지로 변환되는 값들을 찾음으로써 구할 수 있다. 이때 원근의 보정은 변환 격자 안에서만 이루어지기 때문에 이미지를 얻을 때에는 항상 이 범위 내에서 수행하여야 한다.

액적의 크기를 측정하기 위하여 순간사진으로부터 얻은 액적 이미지는 측정 위치에서 2mm의 정사각형 격자로 cutting 된다. 이를 다시 이미지 프로세싱 프로그램을 통해 액적의 edge를 검출해내고, 이러한 edge 이미지로부터 액적의 크기를 측정하는 프로그램으로 2mm 격자가 포함하는 액적의 크기를 통계 처리한다(Fig. 3). 이때, 충돌로 인해 구형의 형태가 파괴된 액적들을 측정 대상에서 제외시키기 위해 가로세로비가 일정범위 이내에 있는 액적만을 측정하도록 하였다. 실험결과, 충돌각이 20°, 분사압이 2bar 이하의 조건에서 이와같은 현상이 발견되거나 충돌각과 분사압이 그 이상이 될 경우에는 크게 줄어든다. 따라서 측정된 액적의 총 부피로부터

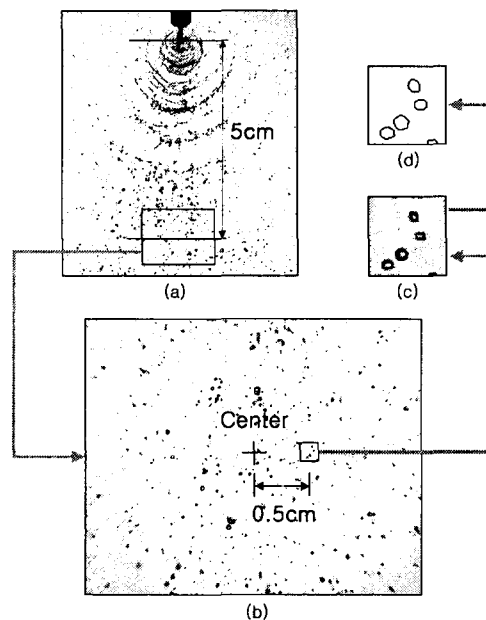


Fig. 3. Image processing for measuring the drop size ; (a) full spray image, (b) magnified image with zoom lens, (c) cutting image, (d) edge image of drops

LIF 결과와 비교할 때에는 이를 고려하여, 20° , 2bar 이상의 조건을 선택하였다. 크기측정 프로그램은 실제 액적의 등배울 사진을 정밀한 눈금자로 측정해본 결과, 그 신뢰성을 확인할 수 있었다.

이와 같은 방법으로 총 60장의 이미지로부터 액적의 크기를 측정하며, 이때 획득되는 데이터의 개수 N_i 는 액적의 빈도수를 의미하게 된다. 따라서 측정위치에서 존재하는 액적의 부피의 총 합 $\sum N_i \cdot D_i^3$ 은 단위시간당의 유량, 즉 유량 플럭스의 의미를 갖게되므로, PLIF의 유량 플럭스 측정결과와 상대적인 비교가 가능하게 된다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 액막의 분열 형상

순간촬영 기법을 이용하여 분사압에 따른 액막 분열과정을 이해할 수 있었다. Fig. 4는 분사 제트의 분사압이 높아 난류특성을 보이는 경우에 형성되는 액막의 분열 양상을 보여주고 있는데, 충돌파로 인한 액적의 주기성이 분사압이 커짐에 따라 점차 짧아짐을 확인할 수 있다.

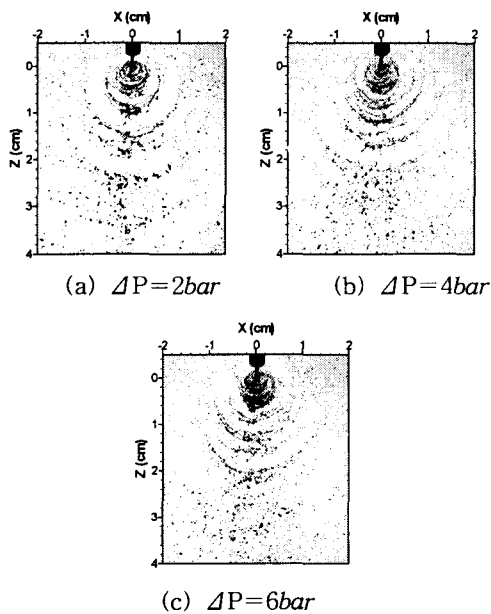


Fig. 4. Sheet breakup as a function of injection pressure ($\theta = 40^\circ$)

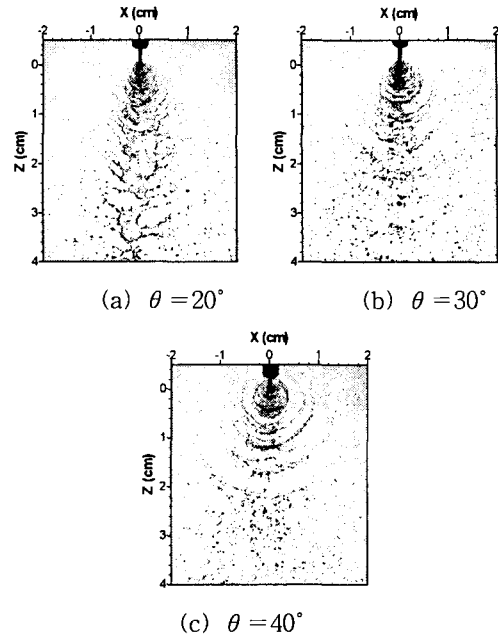


Fig. 5. Sheet breakup as a function of impinging angle ($\Delta P = 4\text{bar}$)

한편, Fig. 5는 동일한 분사압에서 충돌각에 따른 액막의 분열 형상을 보여주고 있다. Fig. 4와 비교하여 볼 때, 충돌각의 증가로 액막의 전체 형상이 매우 달라지고 있는데, 충돌각이 20° 일 때에는 Z 방향으로 3cm 위치에까지 액막이 그대로 유지되고 있으며(Fig. 5(a)), 30° 에서는 액주의 형태로 존재하며(Fig. 5(b)), 40° 에서는 이 액주가 다시 액적으로 분열되고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 5(c)).

3.2 유량의 단면분포

PLIF 기법을 이용하여 분무 단면의 유량 플럭스를 측정한 결과, 대부분의 유량이 충돌점을 중심으로 집중적으로 분포되어 산화제와의 혼합효율을 감소시키는 요인이 될 수 있음을 밝혀내었다. 이를 보다 명확하게 이해하기 위하여 각 단면에서 전체 유량의 절반을 차지하는 면적과 전체 액적이 존재하는 영역에서 이 영역이 차지하는 비율(%)을 산출하였고, 그 결과로부터 연료의 집중현상에 대한 충돌점으로부터의 높이, 충돌각, 분사압, 충돌 모멘텀, 충돌 거리와의 상관관계를 알 수 있었다.

3.2.1 총돌점으로부터의 높이에 따른 영향

Fig. 6은 Z방향으로 3, 5, 7, 9, 11, 13cm에서 단면의 유량 플럭스를 정량화한 결과이다. 그림에서 처럼 두 제트의 총돌점을 중심으로 대부분의 연료가 집중되어 있는 것을 확인할 수 있으며 이러한 경향성은 하층에서 둔화되어 점차 전체 분무 영역이 확장된다.

3.2.2 총돌각의 영향

Fig. 7의 단면 분포는 총돌각이 증가함에 따라 유량의 집중현상이 뚜렷하게 개선되고 있음을 보여주고 있다. 또한 Fig. 8은 높이에 따른 단면 방향 유량 플럭스의 분포 형태를 명확하게 살피기 위하여 중심을 통과하는 x 축방향의 분포와 y 축방향의 분포를 나타낸 것인데, 총돌각이 증가할수록 단면 모양이 원형에 가까운 형상을 가짐을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 총돌각이 커짐에 따라 중심부의 면적과 비율이 지수함수에 가까운 증가를 보이고 있다. 이로부터 유량 집중현상에 대한 총돌각의 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

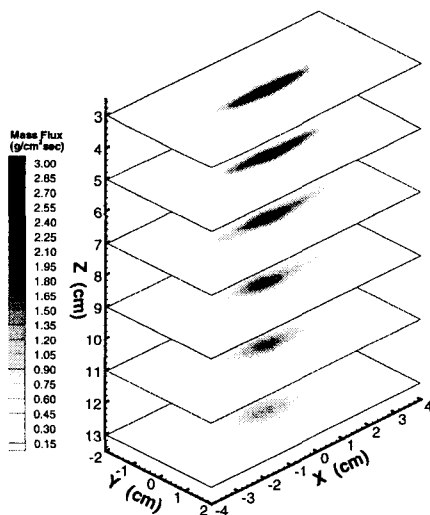
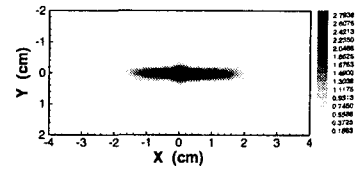
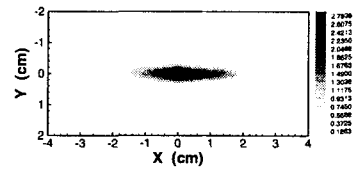


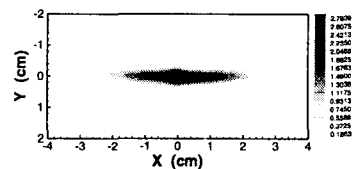
Fig. 6. Images obtained by PLIF showing radial massflux distribution at different downstream distance from impinging point ($\theta = 30^\circ$, $\Delta P = 2\text{bar}$, unit : $\text{g}/\text{cm}^2\text{sec}$)



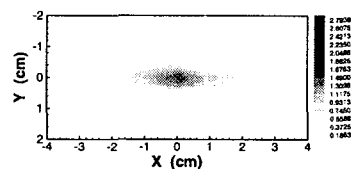
(a) $\theta = 20^\circ$



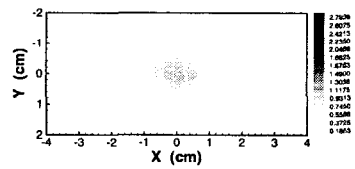
(b) $\theta = 25^\circ$



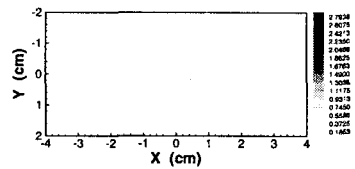
(c) $\theta = 30^\circ$



(d) $\theta = 35^\circ$

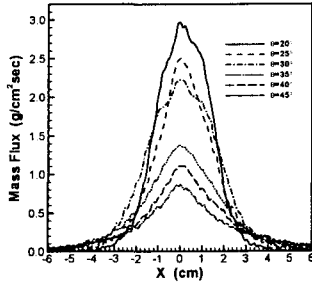


(e) $\theta = 40^\circ$

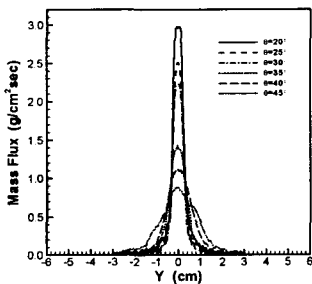


(f) $\theta = 45^\circ$

Fig. 7. Images for impinging angle effect on radial massflux distribution ($\Delta P = 2\text{bar}$, $Z = 5\text{cm}$, unit : $\text{g}/\text{cm}^2\text{sec}$)

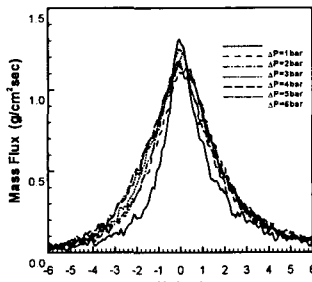


(a) Massflux distribution at x-axis

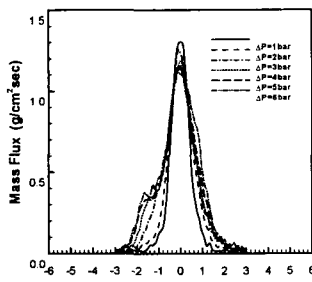


(b) Massflux distribution at y-axis

Fig. 8. Impinging angle effect on axial massflux distribution ($\Delta P=2\text{bar}$, $Z=5\text{cm}$)



(a) Massflux distribution at x-axis



(b) Massflux distribution at y-axis

Fig. 9. Injection pressure effect on axial massflux distribution ($\theta = 40^\circ$, $Z=5\text{cm}$)

3.2.3 분사압의 영향

Fig. 9는 분사압에 따른 유량 플럭스의 x, y 축 방향 분포를 보여주고 있다. 그림으로부터 분사압이 커질수록 유량이 증가하여 액적이 존재하는 영역이 확장되기는 하지만 전체적인 분포 형태는 분사압에 크게 민감한 변화를 보이지는 않음을 알 수 있다.

Fig. 11은 분사압이 유량의 집중현상에 미치는 영향을 수치적으로 보여주고 있는데, Fig. 10과 비교하여 볼 때, 분사압을 증가시키는 것은 분무 면적을 크게 하거나 중심부의 유량 집중현상을 제어하기 위한 수단으로서 그리 효율적이지 못함을 알 수 있다.

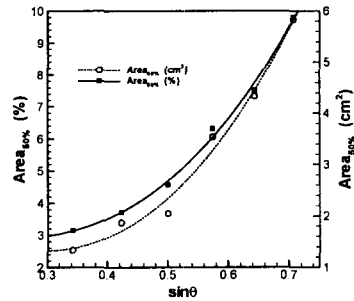


Fig. 10. Impinging angle effect on massflux concentration ($\Delta P=2\text{bar}$, $Z=5\text{cm}$)

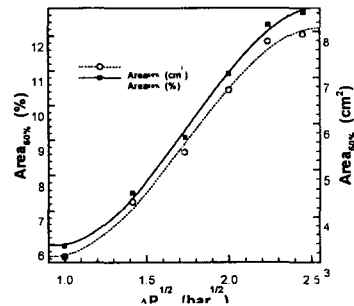


Fig. 11. Injection pressure effect on massflux concentration ($\theta = 40^\circ$, $Z=5\text{cm}$)

3.2.4 충돌 모멘텀의 영향

지금까지의 결과로부터 충돌각을 증가시키는 것이 분사압, 즉 유량을 증가시키는 것보다 더 효과적임을 알 수 있었다. 그러나 충돌각과 유량은 서로 다른 단위를 갖는 물리량이기 때문에 정량적인 비교대상이 될 수 없다. 따라서 분사압과 충돌각의 효과를

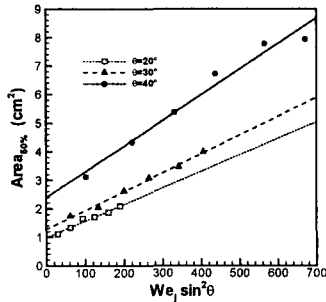


Fig. 12. Normal We number effect on massflux concentration ($Z=5\text{cm}$)

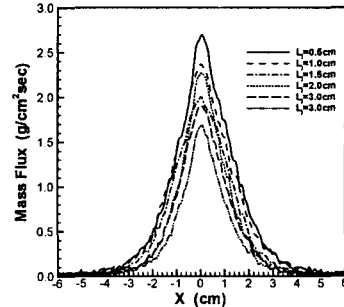
동시에 고려하기 위하여 수직방향 We 수에 대한 유량 집중현상을 Fig. 12에 나타내었다. 여기서 수직방향 We 수는 두 제트의 충돌 모멘텀과 같은 의미를 가지며 액막의 분열현상을 지배하는 무차원 변수로 알려져있다. 결과로부터 동일한 충돌 모멘텀을 갖는 조건에서도 충돌각에 따라 중심부의 유량 집중현상에 큰 차이가 있음을 보여주고 있다. 따라서 충돌각이 충돌형 인젝터의 분무 특성에 지배적인 변수로 작용하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2.5 충돌거리의 영향

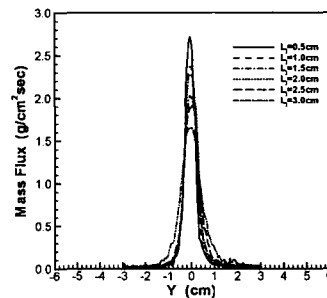
결론적으로, 분무의 집중현상을 제어하여 연소효율을 극대화시키기 위해서는 충돌각을 크게 할 필요가 있다. 그러나 충돌각을 크게 할 경우, 단면 방향의 속도 성분이 증가하여 충돌 모멘텀이 커지게 되며, 이로인해 인젝터로 향하는 유량이 증대하게 된다. 이러한 후류(back-flow) 현상은 로켓엔진 인젝터에 치명적인 손상을 가져오기 때문에 충돌각을 높이는 것은 제한적인 방법일 수 밖에 없다.

그러나 일정 한도 내에서 두 오리피스 사이의 거리를 증가시켜준다면 충돌점과 인젝터 사이의 거리를 충분히 확보할 수 있을 것이다. 따라서 충돌거리에 따른 분무 특성 변화를 측정하는 것은 연료의 후류를 방지할 수 있는 대안으로서의 의미를 가지게 된다.

Fig. 13은 이와같이, 충돌거리에 따른 유량 플럭스의 분포 특성을 보여주고 있다. 충돌거리가 증가함에 따라 연료의 집중현상이 다소 완화되며, 전체 단면 분포 형상 또한 균일한 형태로 개선되고 있음을 알 수 있다. 이는 분사 제트가 하류쪽에서 좀더 강한 난류의 특성을 보이기 때문이다. 그러나 이러한



(a) Massflux distribution at x-axis



(b) Massflux distribution at y-axis

Fig. 13. Pre-impinging length effect on axial massflux distribution ($\Delta P=2\text{bar}$, $\theta=30^\circ$, $Z=5\text{cm}$)

효과는 크게 두드러지는 것은 아니어서 분포 경향성이 역전되는 현상도 발생한다(1.5cm와 2.0cm).

이와같은 결과로부터 충돌거리를 조절함으로써, 분무분포 특성에 영향을 주지 않으면서 후류를 방지할 수 있음을 알 수 있다.

3.3 PLIF 결과의 신뢰성 검증

Fig. 14의 액적의 크기 측정 결과로부터 중심부에서는 상대적으로 큰 액적이 존재할 뿐만 아니라, 액적의 개수도 중심부에 집중되어 있어서 중심부에서 연료의 유량 플럭스가 집중되고 있음을 다시한번 확인할 수 있었다.

한편, Fig. 14에서 보여주는 바와 같이, PLIF 기법의 신뢰성을 검증하기 위하여 측정된 액적의 크기로부터 $\sum N_i \cdot D_i^3$ 의 분포를 계산하여 PLIF 결과와 비교하여 보았다. PLIF로부터 정량화시킨 유량 플럭스와 액적 크기 측정으로부터 얻은 상대적인 유량 플럭스가 상당한 유사성을 보이고 있다. 이로부터,

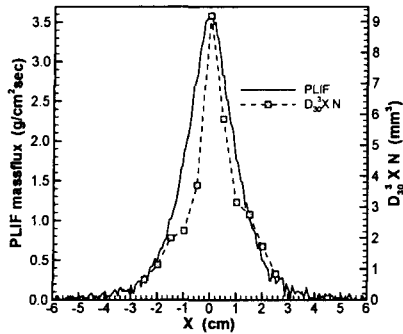


Fig. 14. Profile of drop volume distribution compared with PLIF ($\theta=30^\circ$, $\Delta P=4\text{bar}$, $Z=5\text{cm}$)

PLIF 기법은 유량플럭스의 2차원 공간분포를 매우 높은 해상도로 빠르게 측정할 수 있으며, 그 신뢰성 또한 우수한 기법임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

이차원 분무특성 측정 기법인 PLIF를 이용하여 인젝터의 분무 형상, 분무 단면 분포와 액적 크기 등을 측정하고 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 충돌형 인젝터의 분무는 액막이 액주로 분열되는 1차분열, 다시 액주가 액적으로 분열되는 2차분열의 메카니즘을 갖는다. 이러한 분열 과정은 분사 제트의 종류, 난류 특성과 분사압에 비례하는 충돌력에 따라 다른 경향성을 갖는다. 이때 형성되는 액막은 임계 분사압 이후에는 충돌파에 의해 주기적인 분열 특성을 갖게된다. 이러한 주기성은 분사압이 커짐에 따라 짧아진다.
2. PLIF를 이용한 단면의 분포 특성의 분석을 통하여, 충돌형 인젝터의 분무는 연료의 대부분이 충돌점을 중심으로 집중되어 있음을 알 수 있었다. 이는 하류쪽에서 다소 완화되지만 공기와의 혼합 특성을 감소시켜 연소효율을 저감시킬 것이다. 이러한 집중현상은 충돌점 중심부에 큰 액적이 집중되어 있고 그 빈도수도 크기 때문이며, 노즐 양단의 압력차를 증가시키거나 충돌각을 크게하

여 개선할 수 있는데, 충돌각을 조절하는 것보다 효과적이다. 또한, 충돌각을 크게 할 경우, 후류가 증가하여 노즐에 손상을 가져올 수 있는데, 이는 충돌거리를 증가시킴으로써 조절할 수 있다.

3. 본 연구를 통하여 사용된 PLIF 기법은 실제로 액적 크기를 측정하여 비교함으로써 1차원 측정 방식인 PDPA의 한계를 뛰어넘어, 뛰어난 공간 해상도로 분무의 2차원 분포 특성을 측정하는데 매우 유용한 기법임이 판명되었다. 또한 이 기법을 액체로켓에 적용하여 그 분포 특성을 해석할 수 있게 됨에 따라 실제 인젝터 설계에 있어서 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 "98 전력기술 기초연구"의 98-지-11 과제로 진행되었으며, 이와 관련하여 한국전력공사의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Jeffrey, A. Muss, "Instability Phenomena in Liquid Oxygen/Hydrocarbon Rocket Engines," Liquid Propellant Rocket Combustion Instability, AIAA, 1994.
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 Hooper 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. M.F. Heidmann, R.J. Priem, and J.C. Humphrey, "A Study of Sprays Formed by Two Impinging Jets," NACA TN 3835, March 1957.

5. R.H. Rangel and W.A. Sirignano, "The Linear and Nonlinear Shear Instability of a Fluid Sheet," *Phys. Fluid A* 3(10) October, 1991, pp. 2392~2400.
6. Luigi De Luca and Michela Costa, "Instability of a Spatially Developing Liquid Sheet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 331, 1997, pp. 127~144.
7. Xianguo Li and R.S. Tankin, "On the Temporal Instability of a Two-Dimensional Viscous Liquid Sheet," *J. Fluid Mech.*, Vol. 226, 1991, pp.425~443.
8. W.E. Anderson, H.M. Ryan, and R.J. Santoro, "Impinging Jet Injector Atomization", *Liquid Propellant Rocket Combustion Instability*, AIAA, 1990.
9. Su, J., Drake, M. C., Fansler, T. D., and Harrington, D. V., "Toward Quantitative Characterization of Transient Fuel Sprays Using Planar Laser Induced Fluorescence Imaging," 11th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray System, 1998, pp.106~110.
10. Talley, D.G., Verdick, J.F., Lee, S. W., McDonell, V.G., and Samuelsen, G.S., "Accounting for Laser Sheet Extinction in Applying PLLIF to Sprats", AIAA-96-0469, 1996.
11. Lefevre, A. H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishibg Corporation, 1989.