

소형 액체로켓엔진 인젝터의 분무 분열특성에 대한 연료분사압력의 영향

정훈* · 김정수** · 김성초** · 박정***

Effects of Fuel-Injection Pressure on the Spray Breakup Characteristics in Small LRE Injector

Hun Jung* · Jeong Soo Kim** · Sungcho Kim** · Jeong Park***

ABSTRACT

Spray characteristics of an injector in a small liquid rocket engine (LRE) is characterized by Particle Image Velocimetry (PIV) and Dual-mode Phase Doppler Anemometry (DPDA). Instantaneous plane images captured by PIV are examined for the qualitative prediction of spray breakup with the setup of evaluation technique for effect of spray angles on injector performance. DPDA is also applied in order to quantify the average velocity, turbulent intensity, SMD, and number density of spray droplets along the spray stream distance leading to precise observation of spray atomization behavior. An objective of the study is the derivation of design parameters of new injectors and the establishment of performance criteria through the clear understanding of spray characteristics.

초 록

Particle Image Velocimetry(PIV) 및 Dual-mode Phase Doppler Anemometry(DPDA) 기법을 적용하여 소형 액체로켓엔진에 사용되는 인젝터의 분무특성 규명을 위한 연구를 수행하였다. PIV 측정법으로 순간평면 이미지를 획득하여 분무 거동을 정성적으로 예측하고, 분사각 관련 인젝터 성능평가 기법을 수립하였다. 또, DPDA 측정법을 통해 액적의 속도와 크기 등의 분무거리에 따른 변이를 정량화하고, 인젝터의 미립화 성능을 관찰하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 분무특성에 대한 명확한 이해를 통해 개발하고자 하는 새로운 인젝터의 설계변수 도출 및 분무성능 평가기준을 마련하기 위함이다.

Key Words: Spray Droplet(분무액적), Atomization(미립화), Particle Image Velocimetry(입자영상유속계), Dual-mode Phase Doppler Anemometry(이중모드 위상도플러속도계)

† 2007년 4월 24일 접수 ~ 2007년 6월 16일 심사완료

* 정회원, 순천대학교 기계공학과 대학원

** 종신회원, 순천대학교 기계우주항공공학부

*** 정회원, 부경대학교 기계공학부

연락처, E-mail: jskim@sunchon.ac.kr

1. 서 론

저렴한 개발비, 간결한 시스템 구조, 장기간의

안정적인 추진제 저장성 등의 장점을 갖는 소형 액체로켓엔진(Small Liquid Rocket Engine)은 낮은 추력(thrust) 및 임펄스비트(impulse bit), 장기간의 시스템 운용이 요구되는 인공위성의 속도 및 자세(attitude) 제어에 주로 활용된다[1]. 액체로켓엔진 추진체계의 성능은 연소실내로 추진제를 분사하는 인젝터의 성능에 크게 의존한다[2]. 따라서 인젝터 분무에 의한 연소실내 연료 미립화 특성(atomization characteristics) 및 공간상의 분포(spatial distribution)에 대한 정확한 예측, 압력변화에 따른 분무패턴 시험은 인젝터 설계 및 개발 과정에서 필수 단계이다.

Xianguo 와 Jihua[3]는 Phase Doppler Anemometry(PDA) 계측을 통하여 환상 액체제트(annular liquid jet)의 평균속도, 액적수밀도(droplet number density), Sauter Mean Diameter(SMD), 섭동 속도(velocity fluctuation) 등을 측정하였고, 이와 같은 대부분의 분무특성 매개변수(parameter)는 분무측에 대칭으로 분포함을 확인하였다. Ryan 등[4]은 Phase Doppler Particle Analyzer(PDPA)를 이용해 충돌형 인젝터 분무의 분열길이(breakup length)를 고찰하고, 순간이미지(instantaneous image)를 통한 충돌 제트의 미립화 특성 및 연소 불안정성(combustion instability) 규명을 위한 연구를 수행하였다.

Kenny 등[5]은 추력 조절(throttling)에 의한 분무 미립화 특성에 대해 연구하였다. 추력의 감소로 인한 미립화 양식(regime) 변화를 확인하였고, 무차원수 비교를 통한 1차(primary) 미립화 특성 및 인젝터 성능 평가를 하였다. 1차 미립화 단계에서는 화학반응에 의한 영향을 거의 받지 않으므로 실제 연료가 아닌 물과 질소가스(GN₂)를 모사 유체(simulant)로 사용하였다.

Unlike doublet 인젝터의 설계 변화가 액적 크기에 미치는 영향과 축방향 거리에 따른 액적분포의 규명을 위해 Malvern 입경해석기를 사용하여 입경을 측정한 연구가 수행되었으며, 모사 액체로 물을 사용하여 충돌각, 압력강하, 축방향 거리가 증가함에 따라 액적크기가 감소함을 관

찰하였다[6].

Tropea 등[7]은 Standard-PDA와 Planar-PDA가 조합된 Dual-mode PDA(DPDA)를 액적추정에 사용하였다. DPDA는 네개의 광검출기를 통하여 2차원 속도성분 측정이 가능하고, 레이저빔의 강도가 Gaussian 분포를 보이면서, 원치 않는 신호까지 받아들여져 부정확한 사이즈 정보도 출시키게 되는 Gaussian 빔 효과(Gaussian Beam Effect, GBE)를 없애 구형 검증(spherical validation) 능력을 향상시킨 측정법이다.

본 연구에서는 PIV 기법으로 획득한 순간이미지를 통해 인젝터 분무의 연료분사압력에 따른 분무 거동을 정성적으로 예측한다. 또한 실제 인젝터 수류시험에 사용되는 치구의 설계 도면을 바탕으로 도식화한 이미지를 PIV 이미지에 중첩시켜 인젝터 분무 거동에 대한 합격-불합격 여부를 비간섭적인(non-intrusive) 방법으로 판단한다. DPDA로 액적의 속도와 크기를 측정하고, 평균속도, 난류강도(Turbulent Intensity, TI(%)), SMD, 그리고 액적수밀도(concentration) 등에 대한 변이를 정량화하고, 인젝터의 미립화 성능을 관찰한다.

2. 실험 장치

PIV, DPDA, 분무발생장치(Injector Spray Generation System, ISGS) 등으로 구성되는 실험 장치를 Fig. 1에 보이고 있다 (ISGS는 간략하게 인젝터로 도시한다). PIV 시스템은 Double-head

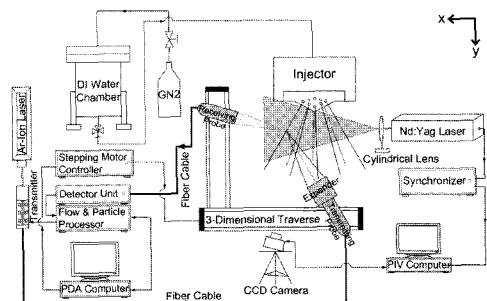


Fig. 1 Schematic Diagram of Experimental Setup

Nd:Yag 레이저, 원통형(cylindrical) 렌즈, CCD 카메라, 데이터 수집 및 후처리를 위한 컴퓨터, 시스템 동기화장치(synchronizer) 등으로 구성된다. 최대 120 mJ 출력의 Nd:Yag 레이저 빔은 원통형 렌즈를 지나 평면(sheet) 형태로 한 쌍의 분무에 조사되며 빔의 펄스지속시간(pulse duration)은 8 nsec 이다. CCD 카메라는 1280×1024 픽셀의 해상도를 가지며, 초점거리 600 mm의 렌즈가 장착된다.

DPDA 시스템은 Ar-Ion 레이저, 분광신호 발생기(transmitter), 송광부(transmitting probe), 확대렌즈(expander), 수광부(receiving probe), 신호 검출기(detector unit), 신호처리기(flow & particle processor), 3차원 이송장치(traverse system) 및 모터 컨트롤러(steping motor controller), 시스템 측정 제어를 위한 컴퓨터로 구성된다. 송/수광부의 초점거리는 500/400 mm 이고 본 실험과 같은 수밀도가 높은 조건에서는 프린지(fringe)에 중속하는 측정불륨을 줄이는 것이 측정에 유리하므로[8] 송광부에 확대비 1:1.98의 확대렌즈를 장착해 측정불륨을 줄인다. 측정 불륨을 줄임으로써 나타나는 GBE에 의한 오차는 DPDA 시스템으로 극복할 수 있다[9].

분무액적 직경 측정에 대한 신뢰도를 95% 이상으로 높이기 위해서는 5,500개 이상의 데이터를 수집해야 하므로[10] 각 측정지점마다 10,000 개씩, 인젝터 출구면으로부터 축 방향으로 220 mm 하류까지 5.5 mm 간격으로 액적의 속도와 크기를 측정했으며 Fig. 2에 그 측정위치를 도시하였다.

추력기의 핵심 구성품 중의 하나인 인젝터는 전극과 가공대상을 전해용액에 담그고 전류를 인가하여 금속을 가공하는 방전가공(Electro Discharge Machining, EDM)으로 제작하며 그 인젝터 형상을 Fig. 3에 보이고 있다. 본 실험에 사용된 인젝터(오리피스 타입)는 실제 5 Newton 급 추력기에 장착되는 것으로, 실제 도면을 근거로 제작되었다. 직경 16/1000 인치를 갖는 8개 인젝터 노즐은 중심축과 30° 엇각(cant angle)을 이루고 있으며 실험시 편의를 위해 Fig. 3(c)와

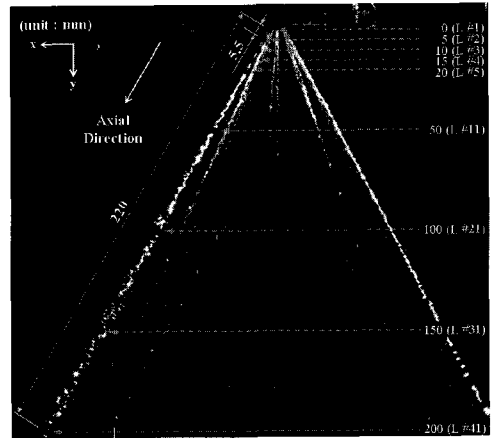


Fig. 2 Positional Indication for the Droplet Size and Velocity Measurements

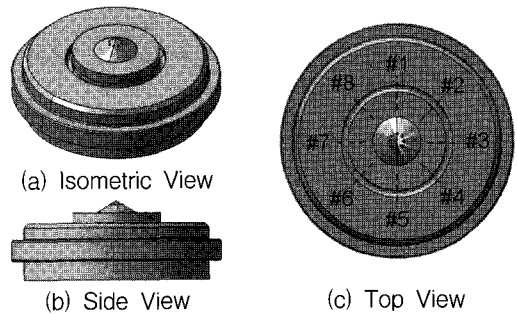


Fig. 3 Configuration of the Injector

같이 가상의 번호를 각각의 노즐에 부여한다. 실제 LRE에 사용되는 연료인 하이드라진(N_2H_4)은 독성, 폭발성 등의 위험요소로 인해 실험실 단위 연구에서 취급하기에 많은 제약이 따르기 때문에 선행 연구자들[5, 6]과 같이 실제 연료를 사용하는 대신에 모사액체를 사용한다. 본 실험에서는 N_2H_4 와 물성치가 매우 유사하고, 고압 실험 환경에서의 정전기에 의한 미립화 액적의 이상 거동을 방지하기 위하여 이온이 제거된 물(Deionized Water, DIW)을 작동유체(working fluid)로 사용한다. DIW(H_2O)와 N_2H_4 의 표준상태에서의 물성치를 Table 1에 각각 나타낸다. DIW는 질소가스로 가압되며 일련의 밸브와 필터를 지나 최종적으로 인젝터에서 250, 300, 350, 그리고 400 psi의 압력으로 분사된다.

Table 1. General Properties of H₂O and N₂H₄

	Melting Point [k]	Boiling Point [k]	Density [g/ml]	Viscosity [cP]
H ₂ O	273.15	373.15	0.997	0.894
N ₂ H ₄	274	387	1.01	0.9

3. 결과 및 고찰

Figure 4는 #1 및 #2 노즐의 분무거동과 미립화 성능에 대한 가시적 특성파악을 위해 250, 300, 350, 그리고 400 psi에서 PIV로 획득한 순간 이미지이다. 각각의 분류를 포함하는 이미지 영역(half width×height)은 19×33 mm²이다. 인젝터 수류시험 평가용 치구를 도식화한 이미지(둔각삼각형)를 중첩시켜 확인한 결과, #1과 #2 노즐 모두 모든 압력에서 인젝터 중심축과 이루는 분사각(injection angle)이 합격범위에 있음을 확인할 수 있었다. 노즐로부터 분사되는 분류에서는 유동의 주기적 흘림현상(shedding)이 관찰되나, 순간이미지만으로는 흘림현상의 주기성에 대한 정량화가 일반적으로 불가능하며 초고속 카메라를 이용한 추가적인 연구가 요구된다.

Figure 4(a)-(d)의 이미지에서 확인되듯이 #1과 #2의 분무 모두는 고압일수록 미립화가 활발하게 진행되어 주분류(main stream)의 주위에서 미립화가 잘된 미세 액적들의 수가 증가함을 알 수 있다. 또한 고압(400 psi)에서 #2 분무는 #1 분무보다 분무각(spray spreading angle)과 주분류의 두께가 크고, 주분류 주변의 미세액적의 수가 많다는 사실이 관찰된다. PIV와 DPDA로 측정된 속도 비교를 통하여 실험의 정확도를 높이고자 하였으나, 입자들의 불규칙한 크기 및 형상과 높은 수밀도로 인해 PIV를 통한 속도측정이 불가하여, PIV 이미지는 인젝터 분무의 개략적인 패턴을 예측/고찰하는데 활용기로 한다.

인젝터 분무의 미립화 특성에 관한 정량적인 고찰을 위해 #1과 #2 노즐에서 분사된 액적의 속도 및 직경을 PIV 측정에서와 동일한 압력 조건(250-400 psi)에서 DPDA 계측을 수행하였다.

Figure 5는 액적의 속도분포를 나타낸다. 분류

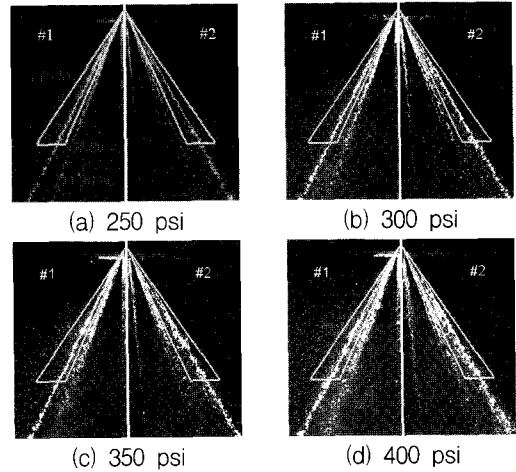


Fig. 4 Instantaneous Images of Spray for Each Pressure

를 따라 비정상적으로 속도가 증가하는 Fig. 5(b)의 음영부분(노즐 출구 영역: 0~16.5 mm)은 계측오류의 결과로 판단되며, 이는 액적의 형상과 크기가 불규칙하고, 덩이 형태의 리거먼트(ligament)가 지배적으로 존재하는 노즐 근처에서 발생하는 도플러 신호 오차에 기인한다. 이러한 이유로 노즐 출구 근처에서는 DPDA 기법에 의한 정확한 계측이 용이하지 않은 것으로 알려져 있다[11]. 반면, #1 노즐은 이러한 계측오류가 나타나지 않는 것으로 보이는데, 이에 대한 추가적인 정밀 실험이 요구된다. 일반적으로 분무의 속도는 상류에서 하류로 진행하면서 감소하며, 고압일수록 높은 초기속도를 가지나 하류로 진행하면서 고압과 저압간의 속도차가 작아지다가 분무의 후류(약 150 mm 근처, Fig. 5(b))에서 속도가 역전되는 현상이 관찰된다. 이는 높은 운동 에너지를 갖는 고압분무가 더 많은 에너지를 주변 기체로 전달하면서 미립화가 가속되어 액적의 직경이 저압 분무보다 상대적으로 작아져 주변 기체에 의한 저항을 더 많이 받기 때문이다. #1 노즐의 분무가 #2의 그것보다 초기속도는 높으나 하류에서 속도가 보다 작은 것도 이 때문이다. 두 노즐의 초기속도가 서로 다른 것은, 미시적 관점에서의 가공오차로 인한 결과이다.

평균속도에 대한 섭동속도의 백분율로 정의되

는 난류강도는 Eq. 1과 같으며 Fig. 6에 계산결과를 보이고 있다.

$$TI(\%) = (u' / U) \times 100 \quad (1)$$

$$u' = \sqrt{(u')^2} = \sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \eta_i (u_i - U)^2} \quad (2)$$

여기서, u' 은 섭동속도, U 는 평균속도, η 는 가중인자(weighting factor), u 는 속도, N 은 액적의 총개수, 하첨자 i 는 직경분류(each size class) 인자이다.

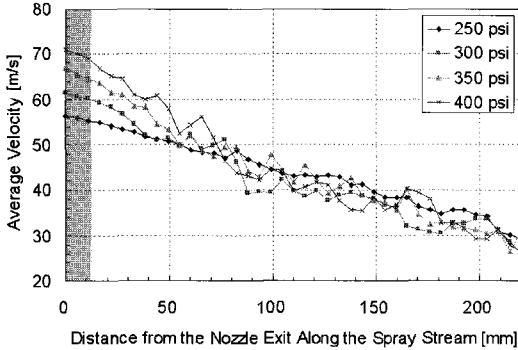
난류강도는 대개 저압보다 고압에서 강하고, 모든 압력에서 하류로 진행하면서 증가하는 사실이 관찰되는데, 이는 섭동속도 보다 평균속도의 감소가 지배적인 영향을 미치기 때문이며[3], 이류체 내부혼합형 선회노즐 분사기에 관한 선행연구[12]에서도 유사한 결과를 보이고 있다. #2, 300 psi의 난류강도가 일정 지점까지 크게

나타나는 것은, 1차 분무분열(primary breakup) 영역에서의 불충분한 미립화로 인해, 섭동속도의 구배가 고압의 그것보다 상대적으로 크기 때문이다.

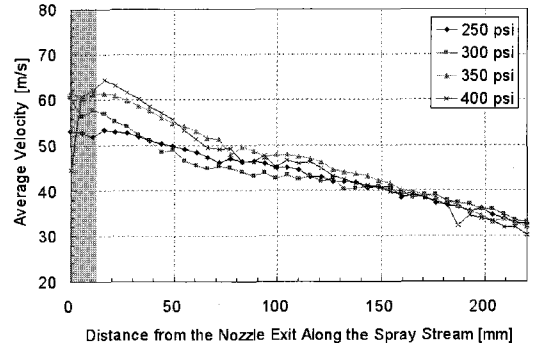
Figure 7은 분무액적의 SMD 분포를 도시한다. 액적의 표면적에 대한 체적의 비로 정의되는 SMD(D_{32})는 열전달량을 결정하는 단면적에 대한 증발될 액적질량의 비와 직접적으로 관계하므로 분사된 DIW의 증발율에 대한 척도이다[13]. D_{32} 와 산술평균직경(Arithmetic Mean Diameter, AMD)을 나타내는 D_{10} 은 다음의 Eq. (3), (4)와 같이 정의된다.

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^3}{\sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i^2} \quad (3)$$

$$D_{10} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_i} n_i D_i \quad (4)$$

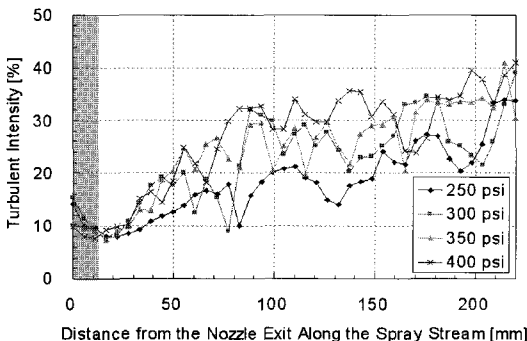


(a) #1

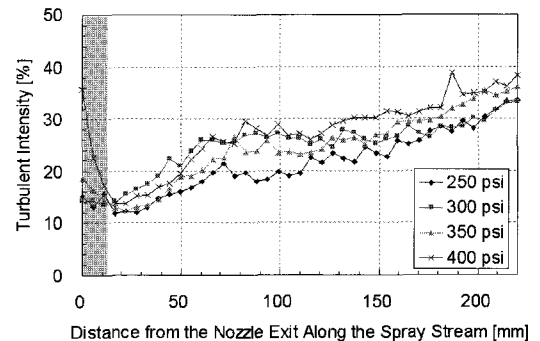


(b) #2

Fig. 5 Velocity Distribution Along the Spray Stream for Each Nozzle



(a) #1



(b) #2

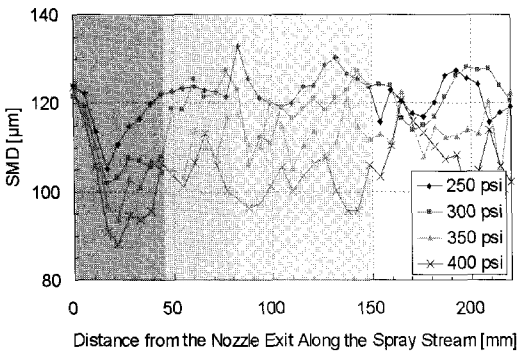
Fig. 6 Turbulent Intensity Distribution Along the Spray Stream for Each Nozzle

여기서, 하첨자 i 는 직경분류인자로서 D_i 는 i -class 입자군의 직경, n_i 는 i -class 액적의 개수, N_i 는 입자군(class)의 수이며 N 은 입자의 총개수이다. 정의식에 의하면, D_{32} 는 D_{10} 보다 직경변화에 민감하여 액적크기의 불균일도에 대한 예측을 용이하게 한다. 입자의 구형을 가정하고 크기를 측정하는 DPDA의 계측원리상 노즐 출구 근처에서의 리거먼트와 같은 비구형 입자의 경우 계측의 정확도는 현저히 저하되는데 액적의 크기가 증가하는 그림의 진한 음영으로 표시한 노즐 출구영역(0~44 mm)이 이에 해당된다. Fig. 7(a)에서 나타나는 액적의 불규칙한 변화 또한 분열이 잘 이루어지지 않은 분무에서 보이는 구형입자의 부재에 기인하는 것으로 판단된다. Fig. 7(b)에서 250 psi의 경우를 제외하고는 약 150 mm(연한 음영영역) 이후로 직경이 서서히

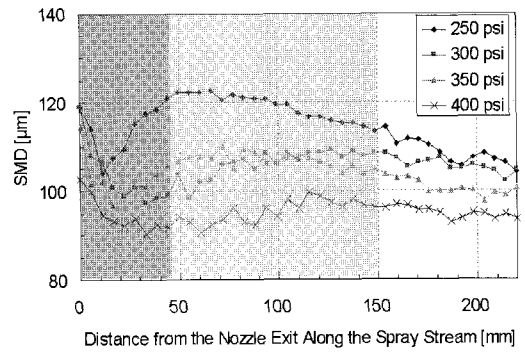
줄어드는데, 이는 미립화가 포화상태에 이르렀음을 시사한다. 반면에 저압(250 psi)에서는 노즐 출구영역에서 이루어지는 불충분한 1차 분무분열의 결과로 큰 직경을 갖는 분무입자의 미립화가 현저히 진행되는 과정을 관찰할 수 있다.

Figure 8은 액적 수밀도의 변이를 도시한 것이다. 고압에서 미립화 성능이 뛰어나므로 저압보다 많은 수의 액적이 단위 부피(cm^3) 내에 분포하고 있음이 그림에서 확인된다. #2 노즐의 경우 모든 압력에서 분무의 하류로 진행함에 따라 수밀도가 감소하다가 미립화가 포화상태에 이르는 약 150 mm 이후 그 값이 일정해진다. 리거먼트가 지배적으로 존재하는 1차분열 영역에서는 미립화로 인해 수밀도가 증가하고, 2차 분무분열 영역에서는 분무각의 증가로 단위면적당 수밀도가 감소하는 현상이 나타난다.

이상의 결과를 종합해보면 #1과 #2 노즐 모두

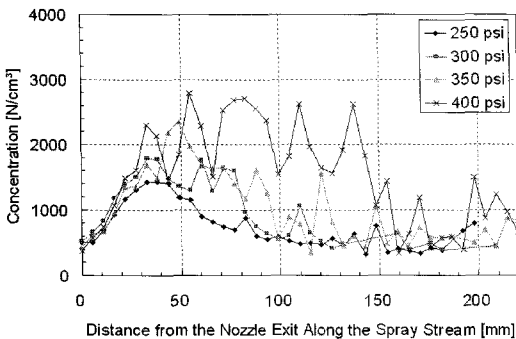


(a) #1

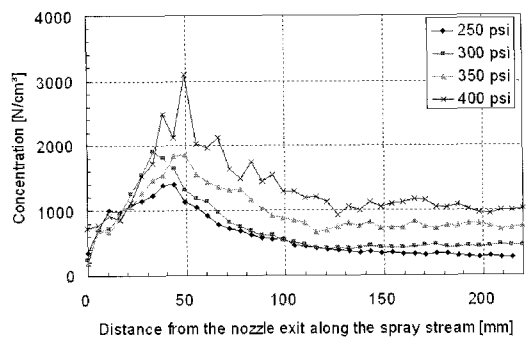


(b) #2

Fig. 7 SMD Distribution Along the Spray Stream for Each Nozzle



(a) #1



(b) #2

Fig. 8 Concentration Distribution Along the Spray Stream for Each Nozzle

PIV 기법으로 획득한 순간이미지에서 유동의 주기적 홀림현상이 관찰되며, DPDA로 측정된 데이터에서 #1 노즐의 분무 진행거리에 따른 속도 및 액경의 불규칙한 결과는 비구형의 큰 액적 덩어리(liquid ligament)로 인한 DPDA의 측정 오류로 판단된다. 또, 전술한 바와 같이 #2 노즐은 약 150 mm 이후에서 공기역학적 미립화(액주나 액막의 표면에 주위 기체에 의해 불안정한 섭동이 발생하여 액체가 분열하는 현상)와 수력학적 미립화(액주나 액막 내부의 유동의 변화, 즉 속도, 난류 등의 변화에 의한 미립화)에 대한 분무특성 매개변수(속도, 입경, 난류강도, 액적수밀도 등)가 포화상태에 이르게 된다. 충돌형 인젝터에 관한 선행연구[6]에서도 분무 후류(125 mm 이후)에서 미립화 진행이 둔해지는 경향이 제시된 바 있으며, 본 실험의 인젝터 분사보다 이른 시기에 미립화가 포화 상태에 다다른 것은 충돌형 인젝터가 분무 액적간의 충돌로 인한 초기 미립화 성능이 비충돌형의 그것보다 뛰어나기 때문이다.

주목할만한 사실은 본 실험에 사용된 인젝터의 #1과 #2 노즐이 동일한 가공법(EDM)으로 제작되었음에도 불구하고 미세한 가공오차로 인하여 두 노즐간의 분무 분열특성이 서로 다르게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다: #1 노즐은 #2 노즐과 압력에 따른 거시적 경향성은 비슷하게 나타나지만, 분무 액적의 이동거리에 따른 특성은 섭동 성분에 크게 지배되는 것으로 보인다. 따라서 정밀한 연료/산화제의 분무 분사와 미립화를 요구하는 인젝터의 경우(예컨대, 소형 이원 추진제 액체엔진의 충돌형 인젝터), EDM에 의한 인젝터의 미세한 노즐 가공이 분무 미립화와 균일성 측면에서 비효율적인 가공법이 될 수도 있음을 시사한다.

Baumgarten 등[14]이 제시한 개략도를, #2 노즐에서 분사된 분무의 실험결과를 바탕으로 수정하여 Fig. 9에 간략하게 도시하였다. 수정된 개략도에서는 직경 측정이 부정확하다고 판단되었던 44 mm 까지를 1차, 그 이후를 2차 분열영역으로 구별하였다. 분무의 주류(spray core)를

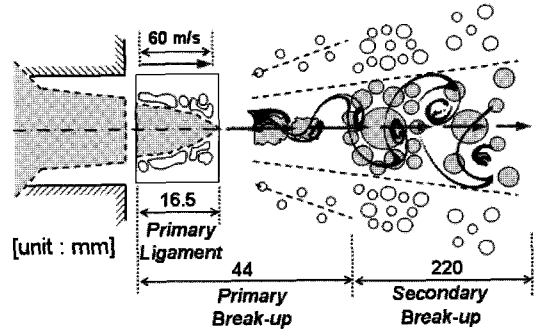


Fig. 9 Schematic of Spray Breakup with Velocity Vector and Shedding Phenomenon

따라서 홀림현상이 관찰되며 속도는 액적의 진행 거리에 비례하여 감소하고, 액적수밀도는 일정하게 감소하다가 약 150 mm 이후 감소율이 둔해진다.

4. 결 론

본 연구에서는 소형 액체로켓엔진 인젝터의 분무거동에 대한 이해를 목적으로, 동일한 방법으로 가공된 두개의 노즐에서 분사된 분무의 분열특성을 분사압력(250-400 psi)과 분무액적의 진행거리(속도: 22-220 mm, 직경: 49.5-220 mm)에 따라 고찰하였다. PIV 기법으로 순간평면이미지를 획득하여 분무거동에 대하여 정성적으로 예측하고, 비간섭적 방법에 의한 분사각 관련 인젝터 성능평가기법을 수립하였다. 또, DPDA 측정법을 통해 액적의 속도, 직경, 수밀도를 측정하여 평균속도, 난류강도, SMD, 그리고 액적수밀도 등에 대한 변이를 정량화하고, 인젝터의 미립화 성능을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험에 사용된 인젝터의 #1과 #2 노즐에서 분사된 분무 모두에서 유동의 주기적인 홀림현상이 관측된다.
- (2) 분사압력과 분무액적의 초기속도는 비례하지만, 액적이 하류로 진행하면서 분사압력에 종속하는 속도가 역전되는 현상이 나타난다.
- (3) 공기역학적, 수력학적인 미립화가 포화 상

태에 다다른데 걸리는 시간은 분사압력이 높을수록 짧아진다.

- (4) 인젝터 분무는 1차, 2차 분열영역으로 구분되고, #2 노즐은 약 150 mm 이후에서 미립화의 진행이 둔해지지만, 비구형의 큰 액적 덩어리가 지배적으로 존재하는 #1 노즐에서는 특별한 경향을 파악하기 어려웠다.
- (5) 두 노즐간의 미세한 가공 오차는 서로 다른 분무 분열특성을 나타낼 수 있으므로, 정밀한 미립화 제어가 요구되는 인젝터에서는 적절한 노즐 가공법의 선택이 요구된다.

후 기

이 논문은 교육인적자원부의 2006년도 지방대학혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

1. 김정수, "단일액체추진제 소형 추력기의 진공 환경 연소시험 및 성능특성 평가," 한국추진공학회지, 제8권, 제4호, 2004, pp.84-90
2. 이광진, 문덕용, 김유, "F-O-O-F 충돌형 injector의 분무특성 및 혼합성능에 관한 실험적 연구," 한국추진공학회지, 제3권, 제3호, 1999, pp.1-8
3. Xianguo, L. and Jihua, S., "Experimental Study of Sprays from Annular Liquid Jet Breakup," Journal of Propulsion and Power, Vol. 15, No. 1, 1999, pp.103-110
4. Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S., and Santoro, R. J., "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets," Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 1, 1995, pp.135-145
5. Kenny, R. J., Moser, M. D., Hulka, J., and Jones, G., "Cold Flow Testing for Liquid Propellant Rocket Injector Scaling and Throttling," 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion conference and Exhibit, 2006, AIAA-2006-4705
6. 정해승, 김선진, 박승운, 김유, "충돌형 Doublet 주입기의 설계변수에 따른 분무특성에 관한 연구," 한국항공우주학회지, 제22권, 제6호, 1994, pp.8-14
7. Tropea, C., Xu, T. -H., Onofri, F., Gréhan, G., Haugen, P., and Stieglmeier, M., "Dual-mode Phase-Doppler Anemometer," Part. Part. Syst. Charact. 13, 1996, pp.165-170
8. Edwards, C. F. and Marx, K. D., "Analysis of the Ideal Phase-Doppler System: Limitations Imposed by the Single-Particle Constraint," Atom. and Sprays, Vol. 2, 1992, pp.319-366
9. Tropea, C., Xu, T. -H., Onofri, F., Gréhan, G., and Haugen, P., "Dual-mode Phase Doppler Anemometry," Proc. 7th Int. Symp. on Appl. of Laser Anemom. to Fluid Mech. Lisbon, 1994
10. Bowen, I. G. and Davies, G. P., Shell Research Ltd., Rept. ICT 28, London, 1951
11. 임병직, 정기훈, 윤영빈, "액체로켓용 FOF와 FOF 인젝터의 분무특성 비교," 한국추진공학회지, 제7권, 제2호, 2003, pp.1-6
12. 이삼구, "공기액체질량비에 따른 이류체 선회형 분사의 분무거동 및 미립화 특성," 한국추진공학회지, 제8권, 제2호, 2004, pp.39-45
13. 임병직, 문일윤, 서성현, 한영민, 최한석, "고밀도 탄화수소계 연료의 분무 및 연소특성," 한국추진공학회지, 제10권, 제4호, 2006, pp.26-33
14. Stiesch, G., Modeling Engine Spray and Combustion Processes, Springer, Berlin, 2003, pp.119-192