

PIV 및 PDA 계측에 의한 소형 액체로켓엔진 인젝터의 분무특성 연구

김진석* · 정 훈* · 김정수† · 박 정** · 김성초** · 최종욱** · 장기원***

A Study on the Spray Characteristics of Small LRE Injector through PIV and PDA Measurements

Jin Seok Kim, Hun Jung, Jeong Soo Kim, Jeong Park, Sungcho Kim, Jongwook Choi and Ki-Won Jang

Abstract

Spray characteristics of an injector employed in mono-propellant hydrazine thrusters were investigated by PIV (particle image velocimetry) and PDA (phase Doppler anemometry) techniques. The instantaneous plane images captured by PIV measurement were examined in order to judge the pass-fail criteria of spray injection performance according to the specific pressure supplied. PDA technique was also applied to measure the velocity and droplet size of spray which were not obtainable by PIV measurement. The objective of this experimental study is the evaluation of the injector performance which may be utilized for the design of brand-new injector through the clear understanding of spray characteristics.

Key Words : LRE(Liquid Rocket Engine : 액체로켓엔진), Injector(인젝터), Spray Pattern(분무 패턴), Mono-propellant(단일 추진제)

기호설명

We : Weber 수 $\left(We = \rho_w V_w^2 D_{noz} / \sigma_w \right)$

Re : Reynolds 수 $\left(Re = \rho_w V_w D_{noz} / \mu_w \right)$

Oh : Ohnesorge 수 $\left(Z = \mu_w / \sqrt{\rho_w \sigma_w D_{noz}} \right)$

ρ : 밀도
 V : 속도
 D : 직경
 σ : 표면 장력
 μ : 점도
 mil : 1/1000 인치

하첨자

w : 액체(물)
 noz : 인젝터 노즐 출구

† 순천대학교 기계우주항공공학부
 E-mail : jskim@sunchon.ac.kr

* 순천대학교 기계공학과 대학원

** 순천대학교 기계우주항공공학부

*** ㈜한화, 대전공장

1. 서 론

단일액체추진제 하이드라진 추력기(liquid-monopropellant hydrazine thruster) 시스템은 다른 종류의 소형 로켓 엔진(small liquid-rocket engine)에 비해 상대적으로 저렴한 개발비, 간결한 시스템 구조, 장기간의 안정적인 추진제 저장성 등의 장점으로 낮은 추력 및 임펄스 비트(impulse bit) 수준, 장시간의 시스템 운용시간이 요구되어지는 지구궤도 및 행성간의 임무를 비롯한 많은 우주 비행체의 추진 시스템에 사용된다.

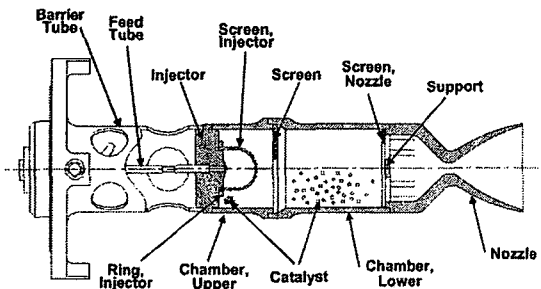


Fig. 1 Configuration of monopropellant hydrazine thruster.

Fig. 1 에 도시된 추력기는 노즐부(nozzle), 촉매대(catalyst), 추력실(thrust chamber), 인젝터(injector), 열차폐관(barrier tube) 등으로 구성되며 기관의 연소실에서 일어나는 열·유체역학적 거동은 추진기관의 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 인젝터에 의한 연소실내 연료의 미립화 특성(atomization characteristic)과 공간상의 분포(spatial distribution)에 대한 정확한 성능 예측이 필요하다.

단일액체추진제 추력기의 연소실험^(1, 2)과 비연소 실험^(3, 4)을 통해, 추력기의 성능 평가, 액적(droplet)의 SMD(Sauter mean diameter), 평균 속도 및 액적 수밀도(number density) 등과 같은 분무 특성(spray characteristic) 변수들에 대한 연구가 활발하게 진행되어왔다. 연소 실험은 정확한 성능 예측이 가능하지만 많은 위험 요소 및 비용이 따르는 반면 비연소 실험은 적은 개발 비용으로 다양한 설계 요소를 바꿀 수 있으며 넓은 실험 범위에서 연구가 가능하다.

본 연구에서는 입자영상 유속계(PIV, particle image velocimetry)와 레이저/위상 도플러 유속계(LDA/PDA, laser/phase Doppler anemometry)를 이용하여 인젝터 출구 압력을 50~400 psi 까지 50 psi 간격으로 변화 시키면서 액적의 분무각(spray angle), 속도 및 직경 등과 같은 분무 특성을 파악한다.

2. 실험 장치 및 방법

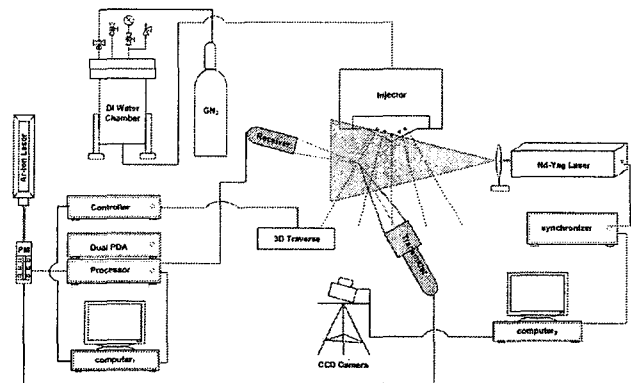


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup.

본 실험의 개략도를 Fig. 2 에 도시하였다. 2 차원 평면에서의 순간 분무 형상을 획득하기 위해서 PIV 기법을 적용하였다. 이 때 사용된 Nd:Yag 레이저의 출력은 120 mJ 이며, 조사된 빛을 평면으로 만드는 원통형 렌즈(cylindrical lens), 동기장치(synchronizer), 1280 × 1024 pixel 의 해상도를 갖는 CCD 카메라 및 컴퓨터가 사용되었다.

최대 허용 압력이 800 psi 인 고압 챔버는 질소(N₂) 가스로 가압되며 비전도성 액체에 전하의 운반 매체 역할을 하는 이온이 제거된 물(deionized water)로 채워진다.

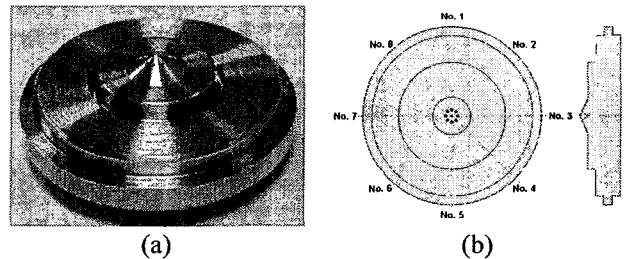


Fig. 3 Injector used in the experiment.

Fig. 3(a)는 실험에 사용된 인젝터이다. 인젝터는 방전가공(electric discharge machining) 되었으며 원뿔 꼭지점 주변으로 16 mil 의 직경을 갖는 8 개 구멍이 인젝터 축방향과 30°의 엇각을 이루고 분사되도록 설계되었다. 또한, Fig. 3(b)에 도시한 것처럼 8 개의 구멍에 각각의 가상 번호를 주어 1-5, 2-6, 3-7, 4-8 번으로 짝을 이루어 실험을 수행하였다. 구멍이 서로 대칭되어 배열되어 있기 때문에 한 번의 레이저 조사에 2 개의 분무 이미지를 획득할 수 있다. PIV 기법을 통하여 분무각뿐만 아니라 입자들의 속도 또한 측정하고자

하였으나 400 psi 의 고압에서도 완전한 미립화가 발생하지 않은 고속의 물줄기 영상 때문에 오류 백터가 많이 발생하여 측정이 불가능하였다.

따라서 분무 입자의 분사 속도 및 입경을 측정하기 위해 LDA/PDA 기법을 적용하였으며, 본 실험에서는 기존 PDA 장치의 단점으로 지적되었던 입자 구형 검증(spherical validation) 성능을 향상시킨 Dual PDA 시스템을 이용하였다. 시스템은 최대 6W 출력의 Ar-Ion 레이저, 레이저 빛을 분리시키기 위한 PM 튜브, 프로세서, 컨트롤러, 3차원 이송장치, 컴퓨터, 그리고 측정 볼륨을 생성하여 신호를 발생시키는 송광부(transmitter)와 입자에 의해 굴절 및 반사되어 나오는 신호를 받는 수광부(receiver)로 구성되어 있다. 송광 렌즈와 수광 렌즈의 초점거리(focal length) 및 확대비(expand ratio)는 각각 1000 mm 와 500 mm 그리고 1 과 1.98 이다.

Ryan 등⁽⁵⁾은 PDA 시스템 측정시 오차율을 $\pm 5\%$ 이내로 하기 위해 각 측정점에서 8,000 개의 입자를 획득하고, Levy 등⁽⁶⁾은 최소 5,000 개를 측정하여 신뢰도(accuracy)를 높였다. 본 실험에서 10 초 내에 10,000 개를 획득하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

단일액체추진제 추력기에 장착되는 인젝터의 가공 성공-실패(pass-fail) 여부를 판단하기 위해서는 대부분 기계적 패터네이터(patternator)를 사용한다⁽⁷⁾. 그러나 이러한 기계적 패터네이터는 분무 유동장 내에서 교란을 발생시킬 뿐만 아니라 제한된 공간 해상도를 가진다. 따라서 본 연구에서는 PIV 계측을 통하여 비간섭적(non-intrusive)인 방법으로 분무의 순간 영상을 획득하였고 그 결과를 Fig. 4-5 에 도시하였다.

본 실험에 사용된 인젝터 구멍 중 8 번 구멍이 50 psi 에서 합격 기준 범위의 가장자리에 위치하다가 압력이 높아질수록 분무각이 좁아져 합격 범위 안으로 들어오는 것을 볼 수 있었고 8 번을 제외한 구멍들은 모두 합격 범위 안에서 분사가 진행되었다. 먼저 Fig. 4 에 도시된 바와 같이 50 psi 에서는 모든 구멍에서 액적이라기 보다는 물줄기의 형태로 분무가 형성되는 것을 볼 수 있다. 압력을 증가시키면 물줄기 주변으로 미립화된 입자가 발생하기 시작하고, 350 psi(Fig. 5)에서 미립화된 입자의 수가 현저하게 증가하는 경향이 모

든 구멍에서 관찰되었다. 이후 400 psi 에서의 미립화 정도는 350 psi 에서와 크게 다르지 않게 나타난다.

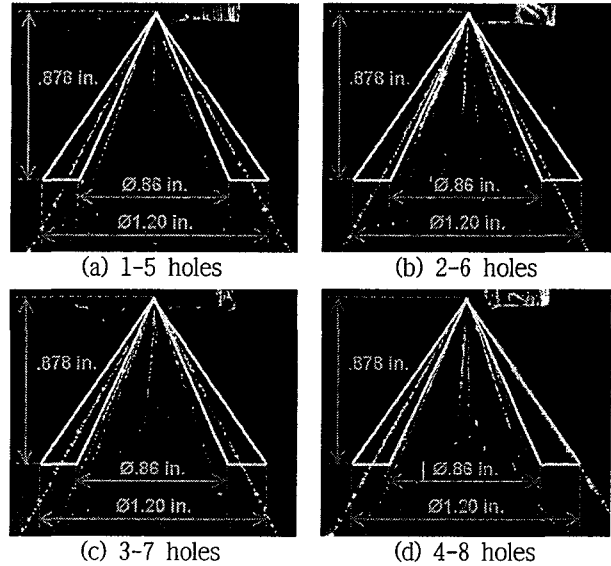


Fig. 4 Spray pattern at 50 psi.

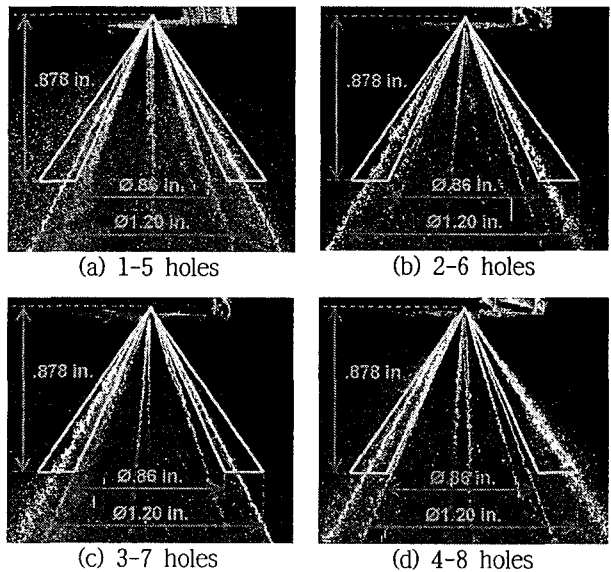


Fig. 5 Spray pattern at 350 psi.

이러한 현상은 LDA 와 PDA 를 통하여 분무의 속도 및 입경을 측정한 결과와 분무 특성 파악을 위해 사용된 무차원 수들의 경향성 등을 비교함으로써 더욱 명료해진다. 각 압력에서의 대표 속도 및 입경을 측정하기 위해 3 번 인젝터 구멍을 이용하였으며, 측정 지점은 인젝터 구멍으로부터 분무 방향으로 230 mm 하단부에 위치한다.

Fig. 6 은 측정 압력에 따른 분무 속도에 대한

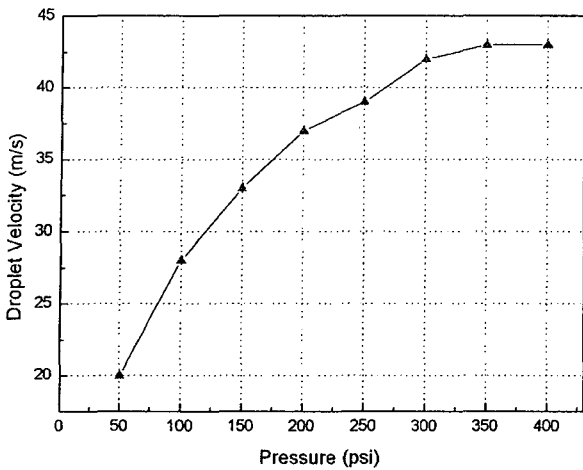


Fig. 6 Velocity distribution at each pressure.

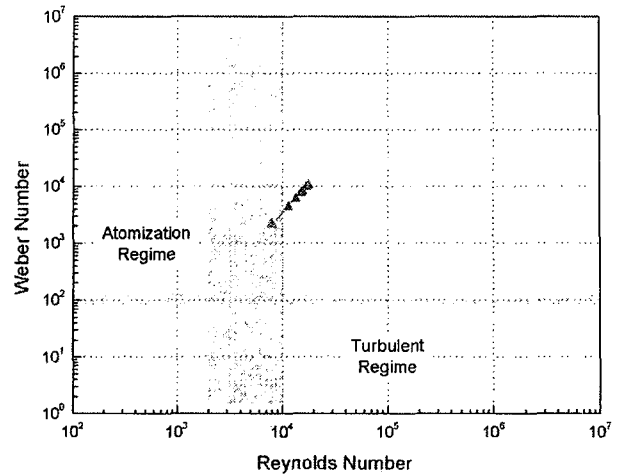


Fig. 8 Weber number vs. Reynolds number.

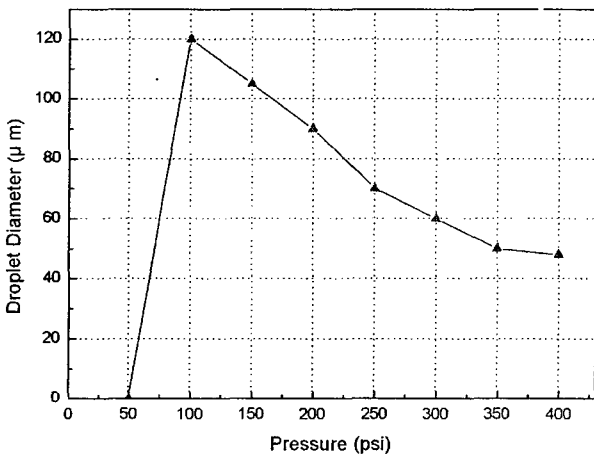


Fig. 7 Mean diameter of droplet at each pressure.

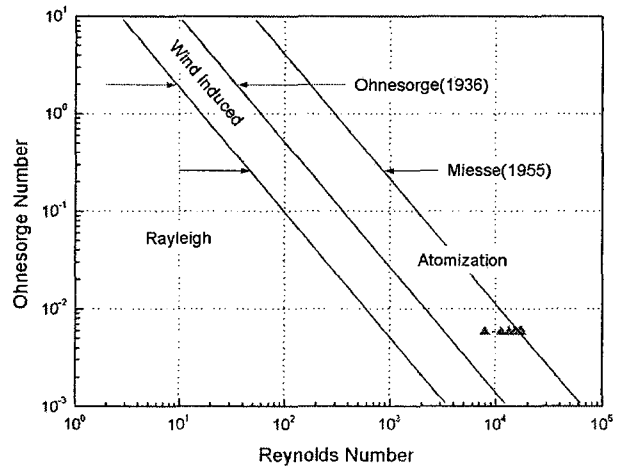


Fig. 9 Ohnesorge number vs. Reynolds number.

결과이다. 측정된 분무는 19.72~43.30 m/s의 속도 범위를 가진다. 압력 증가에 따라 속도가 증가하는 경향을 보이고 350 psi를 기점으로 43 m/s 근처에서 속도는 포화상태에 다다르게 된다.

Fig. 7은 측정 압력에 따른 분무 평균 입경으로 압력 증가함에 따라 분무 입경이 감소하는 경향을 보인다. 50 psi에서 측정된 입자의 직경이 없는 이유는 8개의 모든 인젝터 구멍으로부터 미립화가 이루어지지 않고 물출기에 가까운 분무가 발생하였기 때문이다. 최초 100 psi에서 120 μm 크기였던 분무 입자 직경은 350 psi에서 50 μm까지 작아진다. 이와 같이 압력에 따른 분무 입자의 속도 및 입경의 분포경향은 Mayer 등⁽⁸⁾의 실험결과와 잘 일치한다.

분무의 미립화 및 난류강도 등의 분무 특성을 고찰하기 위해 Weber 수, Reynolds 수, Ohnesorge 수와 같은 무차원 수가 사용되는데 특성 길이를 인젝터 구멍 지름으로 사용한 Weber

수는 2,176 ~ 10,491이며 Reynolds 수는 7,999 ~ 17,654의 범위를 가진다. 또한 Ohnesorge 수는 $z = We^{1/2}/Re$ 의 식으로도 표현되는데 노즐 직경만의 함수이므로 모든 압력 범위에서 0.0058316로 값이 일정하다.

Fig. 8은 Weber 수와 Reynolds 수에 의해 분무 특성 영역을 구분한 것으로서 음영된 부분의 우측과 상단부 영역은 각각 일반적인 난류 및 미립화 지역을 의미하며, 50 psi에서의 결과를 제외한 나머지 실험 결과는 두 영역 모두를 잘 만족하고 있는 것으로 확인된다.

Fig. 9는 Ohnesorge 수와 Reynolds 수에 의해 breakup regimes를 구분한 것이다. Ohnesorge⁽⁹⁾와 Miesse⁽¹⁰⁾는 atomization regime이 시작되는 영역을 다르게 보고 있는데⁽¹¹⁾, 본 실험결과와 Miesse가 구분한 영역에 더 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

단일액체추진제 추력기에 장착되는 인젝터에 대한 분무 형상을 PIV 기법을 통하여 관찰하고, 분무 입자의 속도 및 입경에 대한 분포를 LDA/PDA 기법을 이용하여 획득하였다.

기존의 기계적 패터네이터 대신 평면으로 조사되는 레이저와 CCD 카메라를 이용하여 유동장내에 교란을 일으키지 않고 분무패턴을 측정하였으며, 육안으로는 식별이 불가능하였던 순간 분무 유동장을 관찰함으로써 압력에 따른 분무 형상 변화를 파악할 수 있었다.

LDA/PDA 기법을 이용하여 획득한 분무 입자의 속도 및 입경 측정 결과를 평면 이미지 자료와 비교함으로써 압력에 따른 분무특성에 대한 정확한 이해를 도모하였다.

두 계측 방법을 적용하여 획득한 자료를 비교 연구함으로써 향후 인젝터 성능 향상과 설계를 위한 여러 인자들의 연구에 대한 계기를 마련하였다.

후 기

이 논문은 2006년도 교육인적자원부의 지방대학 혁신역량 강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1) Kim, J. S., 2004, "Hot-Fire Test and Performance Evaluation of Small Liquid-Monopropellant Thrusters under a Vacuum Environment," KSPE, Vol. 8(4), pp. 84~90
- 2) Kim, J. S., 2005, "A study on the Pulse-mode Thrust Behavior of Liquid-monopropellant Hydrazine Thruster," KSPE Spring Conference, pp.194~197
- 3) 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, AIAA-2006-4705
- 4) Xianguo, L. and Jihua, S., 1999, "Experimental Study of Sprays from Annular Liquid Jet Breakup," Journal of Propulsion and Power, Vol. 15(1), pp.103~110
- 5) Ryan, H. M., Anderson, W. E., Pal, S. and Santoro, R. J., 1995, "Atomization Characteristics of Impinging Liquid Jets," Journal of Propulsion and Power, Vol. 11(1), pp.135~145
- 6) Yeshayahou, L., Valery, S. and Yuri, N., 2006, "Modified Vaporizer for Improved Ignition in Small Jet Engine," Journal of Propulsion and Power, Vol. 22(4), pp.828~834
- 7) Nasser, A. and Douglas, T., 2001, "Mixing Mechanisms in a Pair of Impinging Jets," Journal of Propulsion and Power, Vol. 17(3), pp.736~749
- 8) Mayer, W. and Krulle, G., 1995, "Rocket Engine Coaxial Injector Liquid/Gas Interface Flow Phenomena," Journal of Propulsion and Power, Vol. 11(3), pp.513~518
- 9) Ohnesorge, W., 1936, Formation of Drops by Nozzles and Breakup of Liquid Jets, Z Angew Math Mech, Vol. 16, pp.355
- 10) Miesse, C. C., 1955, Correlation of Experimental Data on the Disintegration of Liquid Jets, Indust Engn Chem, Vol. 47, pp.1690
- 11) Stiesch, G., 2003, Modeling Engine Spray and Combustion Processes, Springer, Germany, pp.131~135