소형 액체로켓엔진 인젝터의 분사성능 고찰을 위한 분무특성 매개변수 측정

정훈* · 김진석* · 김정수** · 박정** · 최종욱***

Measurement of Spray Characteristic Parameters for Inquiry into Small LRE-Injector's Injection Performance

Hun Jung* · Jin Seok Kim* · Jeong Soo Kim** · Jeong Park** · Jongwook Choi***

ABSTRACT

An injector plays an important role in the process of an efficient combustion in liquid-rocket engines (LRE). This paper is focused on the injection performance of a small LRE-injector by employing the spray characteristic parameters made up of the velocity, Sauter mean diameter, and turbulence intensity. An experimental investigation is carried out with the aid of a dual-mode phase Doppler anemometry (DPDA) according to the injection pressure variation and along transverse axis, spatially. The Weber number and Reynolds number are used to characterize the atomization and turbulence nature of injector spray.

초 록

액체로켓엔진 연소실의 연소특성은 인젝터의 성능에 지대한 영향을 받는다. 본 논문은 소형 액체로 켓엔진 인젝터의 분사성능 고찰을 위해 이중모드 위상도플러속도계를 이용하여 분사압력 및 분무의 횡 단방향 이동거리 변화에 따라 액적의 속도, Sauter 평균직경, 난류강도와 같은 분무특성 매개변수를 측 정한다. 또, Weber 수와 Reynolds 수를 활용하여 인젝터 분무의 미립화 및 난류특성을 규명한다.

Key Words: LRE-Injector(액체로켓엔진 인젝터), Injection Performance(분사성능), Atomization(미립 화), Dual-mode Phase Doppler Anemometry(이중모드 위상도플러속도계)

1. 서 론

단일액체추진제(liquid-monopropellant) 로켓엔

- * 순천대학교 기계공학과 대학원
- ** 부경대학교 기계공학부
- *** 순천대학교 기계우주항공공학부 연락저자, E-mail: jeongkim@pknu.ac.kr

진은 용이한 추력조절(throttling), 추력실(thrust chamber)의 경량화, 장기간의 추진제 저장성 등 의 장점으로 오랜 시스템 운용이 요구되는 우주 비행체 추진 시스템의 속도, 자세(attitude) 제어 및 궤도(trajectory) 기동 등에 활용되어 왔다[1]. 액체로켓엔진의 성능은 인젝터로부터 발생하는 미립화 연료의 공간분포 특성에 지배적인 영향

을 받으므로 인젝터 분무에 의한 연소실내 연료 미립화 및 공간분포 특성에 대한 평가시험은 연 소실 설계를 포함한 엔진 개발과정에서 필수단 계이다[2].

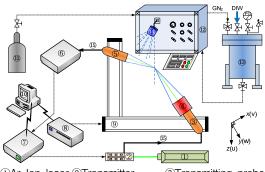
인젝터 분무의 미립화 특성 연구를 위해 추력 조절에 의한 미립화 양식 변화를 관찰하고[3], 아음속 횡단류(crossflow) 내로 분사되는 인젝터 분무의 구조를 위상도플러 입자분석기(phase Doppler particle anemometry, PDPA)를 이용하 여 규명하였다[4].

입자영상 유속계(particle image velocimetry, PIV) 기법으로 획득한 순간이미지를 통해 소형 액체로켓엔진에 장착되는 인젝터 분무의 거동에 대한 합격-불합격 여부를 비간섭적인 방법으로 판단하였다. 또, 이중모드 위상도플러속도계 (dual-mode phase Doppler anemometry, DPDA)를 이용하여 인젝터 분무의 중심축을 따 라 분무특성 매개변수를 측정하고 인젝터의 미 립화 성능을 규명하였다[2]. 인젝터 분무의 분사 압력 변이에 따른 분무확산방향 공간분포 특성 을 규명하기 위한 연구에서는, 분무의 상류 (z/do=656)에서 분무특성 매개변수를 DPDA로 측정하고, Sauter 평균직경(SMD, D32)에 대한 산 술평균직경(AMD), 수밀도, 그리고 체적유속 (volume flux)의 상관관계를 도출한 바 있다[1].

본 연구에서는 선행연구[1,2]와 동일한 인젝터를 사용하여 분무 하류($z/d_O=1,312$)에서의 인젝터분무의 공간분포 특성을 분사압력(P_{inj}) 변이 및분무액적의 분무횡단방향 이동거리에 따라 고찰한다. 분무액적의 속도, SMD, 난류강도 등과 같은 분무특성 매개변수를 고정된 분무종단방향(주유동방향) 위치에서 분무횡단방향(분무확산방향)이동거리 및 분사압력을 변화시키며 DPDA를이용하여 계측하고, Reynolds 수(Re_D)와 Weber수(We_D)를 활용하여 인젝터 분무의 미립화 및 난류특성을 규명한다.

2. 실험장치 및 방법

분무발생장치(injector-spray generation system, ISGS)와 DPDA로 구성되는 실험장치를 Fig. 1에



①Ar-Ion laser ②Transmitter ③Transmitting probe ④Expander ⑤Receiving probe ⑥Detector unit ⑦Flow & particle processor ⑥Motor controller ⑨3-D traverse system ⑩Computer ⑪GN₂ ⑫ISGS ⑪DIW chamber ⑭Injector ⑯Fiber cable

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

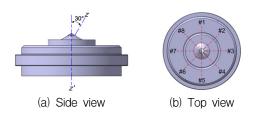


Fig. 2 Configuration of the Injector

보인다. 본 실험에 적용된 DPDA는 Standard-PDA와 Planar-PDA를 결합하여 4개의 레이저 빔 성분으로 2차원 속도성분 측정이 가능하며, 입자의 궤적(trajectory)에 대한 모호성을 제거하여 액적 크기측정에 대한 정확도를 높인 것이다[1]. DPDA는 Ar-Ion 레이저, 분광신호 발생기(transmitter), 송/수광부(transmitting/receiving probe), 신호처리기(flow & particle processor), 3차원 이송장치(3-D traverse system), 컴퓨터 등으로 구성된다.

본 실험은 인젝터 노즐 오리피스 출구로부터 분무종단방향으로 200 $mm(z/d_o=1,312)$ 지점에서, 분사압력(1.72, 2.76 MPa)과 분무확산방향 위치 $(x=y=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4 \ mm, \ x/d_o=y/d_o=\pm 6.6, \pm 13.1, \pm 19.7, \pm 26.2$ 에 각각 해당)를 변화시켜 측정하였으며, 분무확산방향 원점은 오리피스의 중심축(z)으로 정의하였다. 또, 각 측정지점에서 최대 데이터 획득 개수와 시간을 10,000개와 10초로 각각 제한하였다.

실험에 사용된 인젝터는 5 뉴턴급(Newton-class)

액체로켓엔진에 장착되는 것으로, 인젝터의 노즐 오리피스는 방전가공(electrical discharged machining, EDM)으로 제작하였으며 그 모델형 상을 Fig. 2에 보이고 있다. 직경(do) 0.15 mm를 갖는 8개의 오리피스는 인젝터 중심축(z')과 30° 의 엇각을 이루고 있으며, 실험시 편의를 위해 각각의 오리피스에 Fig. 2(b)와 같이 가상의 번호 를 부여한다. 실제 단일액체추진제 로켓엔진의 연료로 사용되는 N_2H_4 (hydrazine)는 독성, 폭발 성 등의 위험요소로 인해 취급에 많은 제약이 따 르므로, 본 연구에서는 N2H4와 물성치가 매우 유 사하고[1], 고압 실험환경에서의 정전기 등에 의 한 미립화 액적의 이상거동을 방지할 수 있는 이 온이 제거된 물을 작동유체로 사용한다. 작동유 체는 질소가스(GN₂)로 가압되며 일련의 밸브와 필터를 지나 최종적으로 인젝터에서 분사된다.

3. 실험결과 및 고찰

8개의 오리피스 가운데 #3 오리피스에서 분사된 분무액적의 속도, 크기 등의 분무특성 원시변수가 DPDA로 측정된다. 일반적으로 오리피스타입의 노즐은 분무축(z-axis)을 중심으로 분무특성 매개변수가 유사 대칭성을 보이게 된다. 본실험의 결과 또한 비슷한 양상을 보이고 있으며, 완전한 대칭특성을 보이지 않는 것은(Figs. 3-5참조) 실험에 사용된 인젝터의 노즐 오리피스가EDM으로 가공되어 오리피스 단면이 완전한 원형을 이루지 않고, 균일하지 않은 오리피스 내부의 표면거칠기(surface roughness), 오리피스 내부유동에서 발생하는 공동현상(cavitation)[1] 등으로 인해 제트의 대칭성이 깨져서 발생하는 결과이다.

분무액적의 속도(V), SMD(D_{32}), 난류강도(TI_V) 의 변이를 Fig. 3에 도시하였으며, 분사압력 및 분무액적의 횡단방향 이동거리에 따른 용이한 비교를 위해 측정된 각각의 값 가운데 최대값 (V_{max} =49 m/s, $D_{32,max}$ =132 μ m, $TI_{V,max}$ =0.2)으로 무차원화 하였다. 그림에서 분무특성 매개변수(속도, SMD, 난류강도)가 고압과 저압 모두 분무의 중심에서 외곽으로 이동하면서 분무액적과 주변

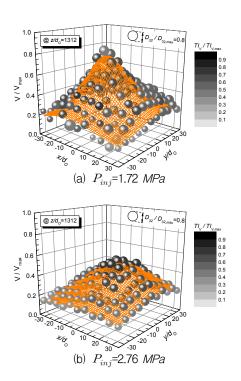
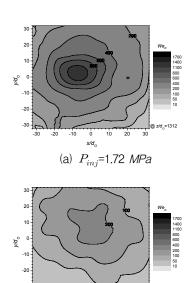


Fig. 3 Cross-sectional Distributions of Spray Characteristic Parameters

기체간의 운동량 확산(momentum diffusion)에 의해 그 크기가 감소하는 것이 관찰된다. 주목할 만한 점으로, 고압으로 분사된 분무액적은 분무의 상류와 중심에서의 충분한 미립화 결과로 인하여 분무액적이 중심에서 외곽으로 이동하여도 분무특성 매개변수의 크기 감소가 거의 없음이확인된다. 한편, 저압으로 분사된 분무의 최외곽지역에서 분무특성 매개변수가 고압에 비해 다소 작은 값을 보이는 것은 저조한 미립화의 결과로 분무의 폭이 고압보다 좁기 때문이다.

분무액적의 미립화 및 난류특성 규명을 위해 We_D 와 Re_D 를 Fig. 4와 5에 각각 나타낸다. 일반적으로 $We_D \ge 100$, $Re_D \ge 2,000$ 이면 미립화 및 난류가 시작된다고 간주된다[3]. 본 실험의 결과는 저압으로 분사된 분무액적이 고압의 그것보다 We_D 와 Re_D 의 크기가 더 크고, 미립화 및 난류영역의 분포 또한 고압보다 저압이 더 넓은 것이 관찰된다. 고압의 분무가 저압의 분무보다 미립화 성능이 저조하고 난류세기가 작게 나타나는 것은, 본 실험이 분무의 하류에서 진행되었기



 $\label{eq:polynomial} \mbox{(b)} \ \ P_{inj}\mbox{=}2.76 \ \mbox{\it MPa}$ Fig. 4 Cross-sectional Distributions of Weber Number

20

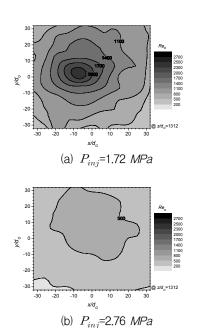


Fig. 5 Cross-sectional Distributions of Reynolds Number

때문이다. 즉, 고압의 경우는 상류에서 이미 충분한 미립화 과정이 전개되어 분무의 하류에서는 미립화가 활발하지 않은 것이다.

4. 결 론

소형 단일액체로켓엔진 인젝터 분무의 연료 분사압력 및 분무확산방향으로의 이동에 따른 액적의 공간분포특성 규명을 위해 Dual-mode PDA를 이용한 실험적 연구를 수행하였다.

분무액적의 속도, SMD, 그리고 난류강도는 분무의 중심에서 외곽으로의 이동에 따라 그 크기가 작아졌다. 또, 본 실험의 조건인 분무의 하류에서는 저압으로 분사된 분무가 고압보다 분무의 중심과 외곽에서의 분무특성 매개변수 크기차이가 크고, 저압이 고압보다 상대적으로 활발한 미립화가 진행되고 있는 것을 관찰할 수 있었다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부의 2009년도 지방대학혁신역량강화사업(NURI)에 의해 지원되었음.

참 고 문 헌

- 1. 정훈, 김정수, "소형 액체로켓엔진 인젝터 분 무의 연료분사압력 변이에 따른 액적의 공간 분포 특성," 한국추진공학회지, 제12권, 제5 호, 2008, pp.1-8
- 정훈, 김정수, 김성초, 박정, "소형 액체로켓 엔진 인젝터의 분무 분열특성에 대한 연료분 사압력의 영향," 한국추진공학회지, 제11권, 제3호, 2007, pp.50-57
- 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, 2006, AIAA-2006-4705
- 4. Wu, P. K., Kirkendall, K. A, Fuller, R. P., and Nejad, A. S., "Spray Structures of Liquid Jets Atomized in Subsonic Crossflows," Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 2, 1998, pp.173-182