고압환경에서 동축 와류형 분사기의 분무특성

임병직* · 김종규* · 문일윤* · 김승한* · 한영민* · 설우석*

Spray Characteristics of Coaxial Swirl Injector under Ambient High Pressure Conditions

Byoungjik, Lim* · Jong-Gyu, Kim* · Il-Yoon, Moon* · Seung-Han, Kim* · Yeoung-Min, Han* · Woo-Seok, Seol*

ABSTRACT

The spray characteristics of coaxial swirl injector under ambient high pressure conditions were investigated in this paper. Three injectors were used to study the effect of recess length and fuel injector type(open or closed). In this research, experimental conditions(ambient gas density) were calculated by Buckingham Pi-theory and spray characteristics of the injectors were represented by mass flow rate according to the injection pressure, the spray angle, mass distribution, and mean diameter of droplet.

초 록

본 논문은 고압조건에서 동축 와류형 분사기의 분무특성 파악을 위한 연구로서 3종류의 분사기가 사용되었으며, 함몰길이와 연료 분사기의 형태에 따른 분무특성을 확인하였다. 또한, 실제 연소기에서 발생되는 연소압력과 수류 실험에서의 압력 상사조건을 계산하여 실험을 수행하여 분사압에 따른 유량변화, 분무각, 질량분포, 평균 액적크기 등의 분무특성이 측정되었다.

Key Words: Coaxial Swirl Injector(동축 와류형 분사기), Mean Diameter of Droplet(평균 액적크기), Recess Length(함몰길이), Open Type(열림형), Closed Type(닫힘형), Similarity Condition(상사조건)

1. 서 론

분사기의 특성에 대한 수류 실험에서 일반적인 상압실험이외에도 연소과정과 동등한 압력 또는 온도조건에서 분무특성을 파악하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 실제 연소과정에서 발생하는 압력(기체밀도)을 사용하는 유체 밀도와 기체 온도 조건에 맞게 모사하여 수류실험을 수행하였다. 러시아 NIICHIMMASH가 가지고 있는 고압챔버를 이용하여 국내에서 설계/제작한

* 한국항공우주연구원 엔진그룹
연락저자, E-mail: tachyon@kari.re.kr

3종의 분사기에 대한 고압환경 분무특성 시험을 수행하였다. 액적크기 측정에는 사진기법이 이용되었으며 액적분포 측정에는 mechanical patternator가 사용되었다.

2. 실험조건 및 실험장치

2.1. 실험조건

실험조건 선정은 Buckingham Pi-theory를 이용하였다. 이론을 이용하여 무차원화된 각각의 변수들 중에서 분사기의 형상과 관련된 값들은 실제 분사기를 사용하므로 인해 항상 상사조건을 만족하게 된다. 그 외의 무차원화된 변수들은 ρ_g/ρ_l, Re_l, Re_g, We 이다. 이 무차원 변수들과 분무특성에 가장 큰 영향을 주는 분사압력(ΔP)을 포함시켜 상사조건을 선정하였다.

Table 1. Experimental Conditions

	Actual		Model	
	Fuel	Oxidizer	Fuel	Oxidizer
P_{ch} (kg/cm^2)	53.54		12.8	
ρ_g (g/cm^3)	15.02		15.02	
ρ_l (g/cm^3)	0.836	1.15	1.0	1.0
$\dot{m}$ (g/cm^3)	116	289	126.9	269.5

하지만, 여기서 유체의 난류특성을 나타내는 Re수는 10^3 이상에서는 자체 상사를 만족하는 것으로 고려할 수 있기 때문에 논외로 한다. 그리고, 많은 경우의 수류시험에서 문제가 되는 표면장력계수의 차이, 즉 We의 차이는 근사적인 미립화 과정의 모사에서는 인정하고 넘어가기로 한다. 따라서 정리된 상사조건은 산화제와 연료에서 분사되는 유체와 주위기체의 밀도비(ρ_g/ρ_l), 분사압력(ΔP)으로 결정된다.

분사압력은 동일한 압력을 가해줌으로써 조건을 만족시킨다. 밀도비의 상사조건을 만족시키기 위해 실제 연소기에서 예측되는 분사기면의 온도, 추진제의 기화정도, 혼합비 등이 고려되었다.

실험은 연소과정과 상사 조건을 만족시키는 압력(12.8 kgf/cm^2)과 높은 압력(20 kgf/cm^2), 낮은 압력(8 kgf/cm^2)에서 수행되었으며, 사용되는 유체는 산화제와 연료 모두 물이다.

2.2. 실험장치

2.2.1. 분사기

실험에 사용된 동축 와류형 분사기는 내부에서 산화제, 외부에서 연료가 모두 와류형으로 분사되는 형태를 가졌다. 각 분사기의 형상과 세부치수는 Fig. 1과 같다.

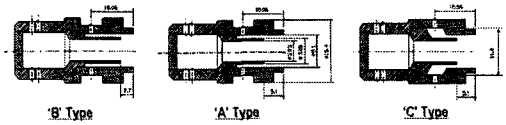

Fig. 1 Dimensional drawing of injector

A 형상의 인젝터를 기준으로 B 형상에서 함몰길이를 줄여 분사되는 산화제와 연료가 만나는 영역에 따른 분무특성을 비교하고, C 형상에서는 연료분사 챔버형태를 변화시켜 분무특성을 비교하였다.

2.2.2. 고압챔버

내경 366mm의 고압챔버는 최대사용압력은 50 kgf/cm^2, 용적은 150liters이며, 챔버안에서 분사되는 분무의 사진을 촬영하여 분무각을 측정하였고, 산화제와 연료 매니폴드에 설치되어 있는 유량계에서 유량을 측정하였다.

액적크기 측정을 위해 일반 카메라 렌즈가 아닌 광학렌즈를 이용하였으며, 확대와 비산되는 액적으로 인한 측정의 부정확성을 피하기 위해 내부에 장착이 가능한 튜브를 설치하였다. 설치된 튜브는 둘 사이의 간격을 조정하여 측정하는 영역을 조절할 수 있다. 촬영된 사진은 필름에 기록되고, 필름을 스캔하여 후처리 과정을 통해 액적크기를 추출하였다. 이때 사용된 광원은 노출시간이 10^{-6}sec이기 때문에 정지된 분무사진을 촬영하기에 충분하다. 이와 같은 광학계를 이용

하여 측정한 영역은 18mm정도의 분무영역이고, 20~30배의 확대를 통해 후처리과정이 진행되었으며 측정가능한 최소 액적크기는 15~20μm이다.

또한 질량분포를 측정하기 위해 챔버 내에 격자 셀(mechanical patternator)을 설치할 수 있도록 하였다. 격자 셀은 하나의 열로 이루어져 있어, 지름 방향으로의 분포 측정에 이용된다.

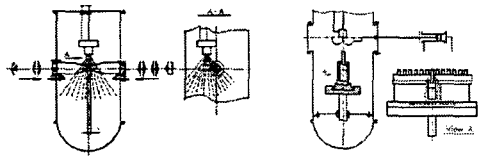

FIg. 2 Schematic of high pressure chamber

3. 실험결과

3.1. 유량

분사기의 유량특성을 파악하기 위해 실험 조건에 해당하는 챔버 압력에서 분사압력을 변화시키면서 유량을 측정하였다.

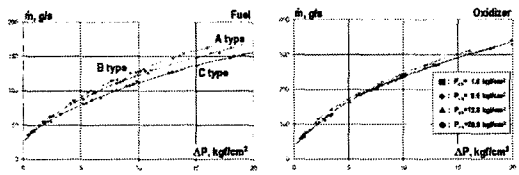

Fig. 3 Flow characteristics of injectors

실험결과를 통해 실험이 수행되는 분사압력 범위(10~15kgf/cm^2)에서 일정한 유량계수를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 연료와 산화제의 동시 분사에서는 산화제 분사압은 거의 일정하지만, 연료 분사압은 13%정도 증가하여야 됨을 알 수 있었다.

3.2. 분무형상

각 분사기에 의해 형성되는 분무형상을 챔버 압력과 분사압에 따라 촬영하였고, 분무각을 측정하였다. 사진을 통한 실험결과에서는 함몰길이 차이에 따른 분무각의 변화는 확연히 드러났지만, 연료분사기의 형상에 따른 분무형상과 분무각은 거의 동일한 형태를 보였다.

또한 동일한 분사압에서 챔버압력의 증가에 따라 연료 분사각이 증가하는 현상을 확인하였다. 하지만, 산화제 분사각과 혼합된 분사각은 감소하는 경향을 보였다.

Fig. 4 Photograph of spray pattern (A type injector, P_{ch}=12.8 kgf/cm^2, $\dot{m}_o$=269.5 g/s, $\dot{m}_f$ =126.9 g/s)

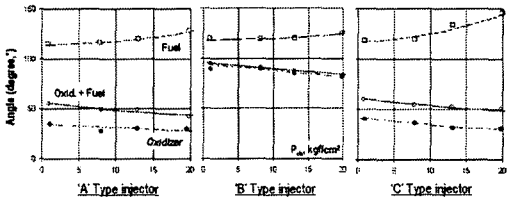

Fig. 5 Spray angle ($\dot{m}_o$=269.5g/s, $\dot{m}_f$=126.9 g/s)

3.3. 질량분포

고압챔버 내부에 분사된 유체를 채집할 수 있는 장치를 설치하여 질량분포를 측정하였다. 질량분포에서 일반적인 동축 형태의 특성을 보였고, 산화제의 분무에서는 함몰길이가 다른 A, B 형상의 분사기에서 유량분포가 차이를 보였다. 즉, 함몰길이가 긴 A가 B에 비하여 질량분포가 중앙으로 밀집되어 있다.

하지만 연료의 분무에서는 연료챔버 형상에 변화를 준 C 형상에서 A, B와 다른 특성을 보였는데, A, B에 비하여 연료 유입반경이 큰 와류 챔버로 인하여 회전 관성력이 커지게 되어

열림형의 A, B에 비하여 바깥쪽으로 치우쳐 유량이 분포되었다.

연료와 산화제를 동시에 분사한 경우에서는 유량분포가 챔버압력의 상승에 따라 중앙으로 모여드는 경향성을 나타내었다.

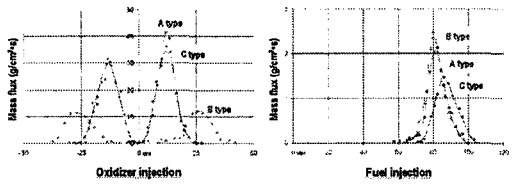

Fig. 6 Mass flux along the radial location

3.4. 액적크기

액적크기의 경향에서도 함몰길이의 차이를 나타내는 A와 B 형상의 분사기에서 B 형상의 분사기에서 발생되는 액적크기가 10% 이상 작게 나타난다. 하지만, 연료 분사기의 챔버형상에 의해서는 액적크기에 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다. 다만 닫힘형(C)의 연료 분사기에서 고압으로 갈수록 액적크기 증가율이 열림형(A, B)에 비해 다소 커지는 현상을 보였다.

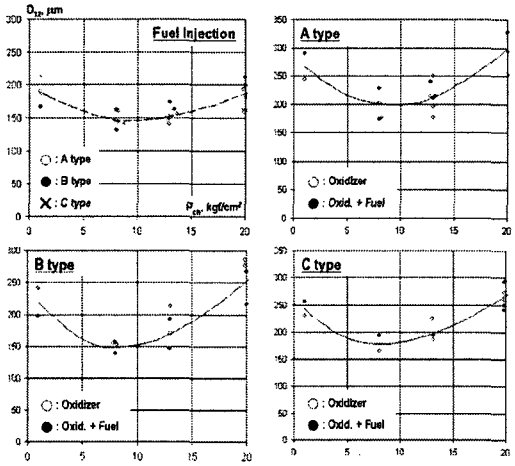

Fig. 7 Drop size (m_o=269.5g/s, m_f=126.9g/s)

앞의 질량분포와 마찬가지로 산화제와 연료를 동시에 분사하는 경우에서는 액적크기가 산화제만 분사하였을 때의 값과 거의 비슷하게 나온다. 이것은 평균액적크기를 나타내는 D32의 특성에 의해 큰 액적에 영향을 많이 받는 것과 전체 유량에서 산화제가 차지하는 비중이 높은 것에 원인이 있다.

4. 결론

고압환경에서 실시된 동축와류형 분사기의 수류실험을 통해 분사기 형상에 따른 분무의 특성을 파악할 수 있었고, 상사조건의 도출을 통해 실제 연소기 모사를 위해 필요한 기체압력(밀도)를 계산하였다.

산화제 분사기 형상에 변화를 주는 함몰길이는 깊어질수록 분무각이 줄어들면서 질량이 중앙으로 모이게 된다. 연료 분사기 형상에 변화를 주었을 때, 닫힘형이 열림형에 비해 분무각에서 크게 차이가 나타나지 않지만 질량분포가 더욱 외곽으로 벗어나게 되었다.

액적크기는 함몰길이의 변화에 의해 차이가 발생하였는데, 함몰길이가 깊은 분사기가 10% 이상 큰 액적을 발생시켰다.

후기

본 연구는 공공기술연구회에서 시행한 기본연구사업인 "로켓엔진연소기 고성능화 기술 개발"의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한 시험을 수행해 주신 NIICHIMMASH 여러분들께도 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김종규 외., "액체로켓엔진 연소기용 분사기의 분무특성 및 혼합특성에 관한 연구", 제3회 한국유체공학 학술대회, 2004, pp.403~406

2. D. Kim et al., "Effect of Flow Condition and Geometry on Flow Characteristics of a Swirl Injector", 16th ILASS America Conference, 2003