

고압환경에서의 기체-액체 분사기 분무 특성 연구

김종규* · 한영민* · 배태원* · 최환석* · 윤영빈**

Spray Characteristics of Gas-centered Swirl Coaxial(GCSC) Injector in High Pressure Condition

Jonggyu Kim* · Yeoung-Min Han* · Taewon Bae* · Hwan-Seok Choi* · Youngbin Yoon**

ABSTRACT

The GCSC injectors studied in this paper are those applied to the combustion chamber of staged combustion engines. Liquid fuel is injected through tangential holes along the outer wall of the GCSC injector forming a swirling sheet and oxygen rich gas generated by a preburner enters axially through the center orifice of the injector to form a gaseous jet. The spray characteristics of GCSC injectors under ambient/high pressure conditions and the effect of recess on spray characteristics have been examined in this paper. These results are expected to be used as fundamental data to develop of a staged combustion engine.

초 록

본 논문에서 연구하고자 하는 분사기는 다단 연소 사이클 엔진 연소기에 적용하는 분사기이다. 본 분사기에서 연료는 접선홀을 통해 와류 형상으로 분무되며, 예연소기에서 생성된 산화제 과잉 가스는 중앙에서 jet의 형태로 공급된다. 이러한 기체-액체 분사기의 상압/고압환경에서의 분무특성 및 분사기의 리세스에 따른 분무특성의 차이를 알아보았다. 이러한 결과들은 향후 다단 연소 사이클 엔진 개발의 기본 데이터로 활용될 수 있을 것이다.

Key Words: Gas-centered Swirl Coaxial Injector(기체제트-액체와류 동축 분사기), Recess(리세스), High Pressure Condition(고압조건)

1. 서 론

기체제트-액체와류 동축 분사기(gas-centered

swirl coaxial : GCSC)는 구소련의 다단 연소 사이클 엔진용 연소기에 많이 적용되는 분사기이다. 예연소기(preburner)에서 생성된 산화제 과잉 가스는 GCSC 분사기의 중앙에서 제트의 형태로 공급되며, 연료(케로신)는 접선홀을 통해 와류(swirl) 형상으로 중앙의 산화제를 감싸면서 분무되는 형태의 분사기이다. 이러한 다단 연소

* 한국항공우주연구원 연소기팀

** 서울대학교 기계항공공학부

연락처, E-mail: bellstar@kari.re.kr

사이클 엔진은 대부분의 고성능 로켓엔진에서 적용하고 있는 것으로서 지금까지 구소련의 동구권을 중심으로 개발이 이루어졌고, 최근 미국에서 cryogenic hydrogen 로켓에서 hydrocarbon 로켓으로 전환하려는 시도가 활발히 진행되고 있다[1]. 이러한 다단 연소 사이클 엔진 연소기에 사용되는 GCSC 분사기에 대한 연구는 구소련의 동구권을 제외하고는 많이 진행되지 못하였으나 최근에 미국 Air Force Research Laboratory를 중심으로 GCSC 분사기에 대한 연구가 진행되고 있고[2][3], 국내 또한 일부 대학에서 GCSC 분사기의 상압수류시험을 통한 분무 특성 파악이 진행되었다[4][5]. 본 논문에서는 GCSC 분사기 설계, 고압수류시험 설비, 시험조건 도출 및 상압수류시험 및 일부 진행된 고압수류시험 결과를 기술하였다.

2. GCSC 분사기 설계 및 고압수류시험 조건

2.1 GCSC 분사기 설계

기초 연구의 목적으로 다단 연소 사이클 엔진용 연소기에 적용하는 분사기를 설계하였다. 기존의 다단 연소 사이클 엔진 중 케로신을 사용하는 엔진 중 하나인 우크라이나의 RD-8 엔진을 참고로 하였다[6]. 산화제는 예연소기(preburner)에서 생성된 산소과잉가스(oxygen-rich gas)가 터빈을 구동하고 연소기 헤드로 유입되어, GCSC 분사기 중앙에서 분무되고, 연료는 재생냉각연소실을 냉각하고 난 후 연소기 헤드로 유입되어 GCSC 분사기를 통해 분무된다.

분사기당 추진제의 총유량은 261 g/s이며, 산소과잉가스 및 액체연료(Jet-A1) 유량은 각각 202 g/s, 59 g/s이다.

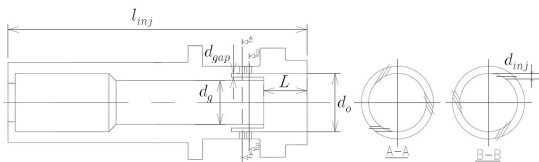


Fig. 1 Schematic of GCSC Injector

Table 1. Dimensions of GSCS injector

	[mm]	
d_{in}	5.3	Gas inlet orifice diameter
d_g	6	Gas nozzle diameter
d_o	8	Outer nozzle diameter
d_{inj}	0.7	Liquid inlet tangential hole diameter
d_{gap}	0.5	Gap height
L	6, 9, 12, 15	Recess length
l_{inj}	41.5	GCSC length

GCSC 분사기의 개략도 및 형상 데이터를 Fig. 1과 Table. 1에 각각 나타내었다. 우선 가스측의 형상은 입구 오리피스와 내부 직경이 감소하는 유로로 설계하였고, 액체연료는 open 타입으로 설계하였다. 그리고 리세스 길이(L)를 4가지 경우로 두어 리세스의 길이에 따른 분무특성을 파악하도록 하였다. 여기서 리세스 비(RR: Recess Ratio)를 L/d_g 로 정의하여 RR=1, 1.5, 2, 2.5로 각각 설계하였다. 설계 변수중 하나인 리세스 길이는 액체-액체 분사기에서도 알려져 있듯이 연소 성능과 매우 밀접한 연관이 있다. 이러한 연관성은 기체-액체 분사기에서도 크게 다르지 않을 것이라 판단되고, 실제 수류 시험한 결과 리세스에 따른 분무특성이 다름을 알 수 있었다.

2.2 고압수류시험 조건

설계/제작된 GCSC 분사기의 분무특성을 파악하기 위해서 수류시험을 실시하였다. 기존의 선행된 분사기 수류시험은 주로 상압조건에서 수행되었다. 즉 상압조건에서 기체와 액체의 운동량 플럭스 비(MFR : Momentum Flux Ratio)에 따른 분무특성(분무각, 액적크기, 분열길이 등)에 관한 연구들이 진행되었다. 이를 바탕으로 고압 조건에서의 분무특성을 파악하기 위해서 고압 챔버를 이용한 고압수류시험을 수행하였다. 고압 챔버는 작동 압력이 100 bar이며, 내경 0.8 m, 직관부 높이 1 m, 체적은 0.7 m³ 이다. 챔버내의 분사기 설치부는 수직방향 이동 및 회전이 가능하도록 하여 다양한 위치에서 분무특성을 관찰할 수 있도록 하였다. 여러 개의 가시화 창이 있

으며, 각각의 챔에는 고압 질소 퍼지를 할 수 있도록 하여 챔의 오염을 방지하였다. 각각의 유사 추진제(액체:물, 기체:질소)는 런탱크에 저장되며, 질소 가압을 통해 분사기로 유입된다. 각각의 추진제 런탱크는 약 150 bar까지 가압할 수 있고, 그 중간라인에 압력센서와 유량계가 각각 설치되었다.

고압수류시험조건은 기존 문헌에서 제시하고 있는 연소 시의 분무조건과 유사하도록 설정하였다[2]. 좀 더 구체적으로 기술하면 다음과 같은 조건을 설정하였다.

- 1) 기체의 분사속도(U_g)를 연소 시(설계치)와 동일하게 하였다.
- 2) 분무되는 기체의 밀도(ρ_g)를 연소 시의 산화제의 밀도와 동일하게 하였다. 이는 고압 챔버의 압력을 변화시켜 밀도를 맞추었다.
- 3) 기체와 액체의 운동량 플럭스 비(MFR)를 연소 시와 동일하게 유지하여 액체의 유량을 결정하였다.

Table 2. Test Conditions of GCSC Injector

	Unit	Hot 조건	Cold 조건
기체유량	g/s	201.7	201.7
기체차압	bar	9.0	9.7
기체유속(U_g)	m/s	105.4	105.4
기체밀도(ρ_g)	kg/m ³	67.7	67.7
액체유량	g/s	59	69.4
액체차압	bar	10.7	10.8
액체유속(U_l)	m/s	37.1	31.7
액체밀도(ρ_l)	kg/m ³	728	997
MFR $\left(\frac{\rho_g U_g^2}{\rho_l U_l^2} \right)$		0.752	

위와 같은 기준으로 정한 시험조건을 Table. 2에 나타내었다. 기체밀도를 맞추기 위해 챔버 압력을 59 bar로 가압하여 시험을 수행하였다.

3. 시험 결과

스트로보스코프를 이용한 back-lit strobe imaging 기법을 이용하여 분무사진을 획득하였다. 우선 상압조건에서의 액체측만 분무했을 때의 사진을 Fig. 2에 나타내었다. 위에서부터 아래로 RR이 증가하고 왼쪽에서 오른쪽으로 차압이 증가한다. 차압이 4 bar 이상이 되면 분무형상은 거의 변화하지 않음을 알 수 있었다.

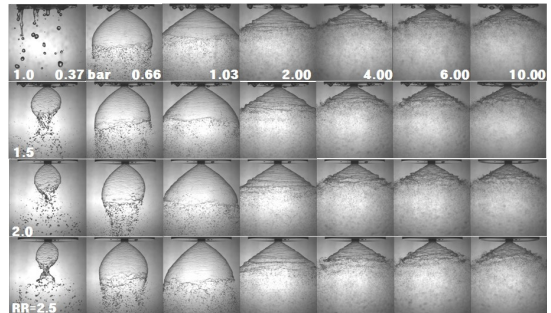


Fig. 2 Spray Images of GCSC Injectors (Ambient pressure & liquid only)

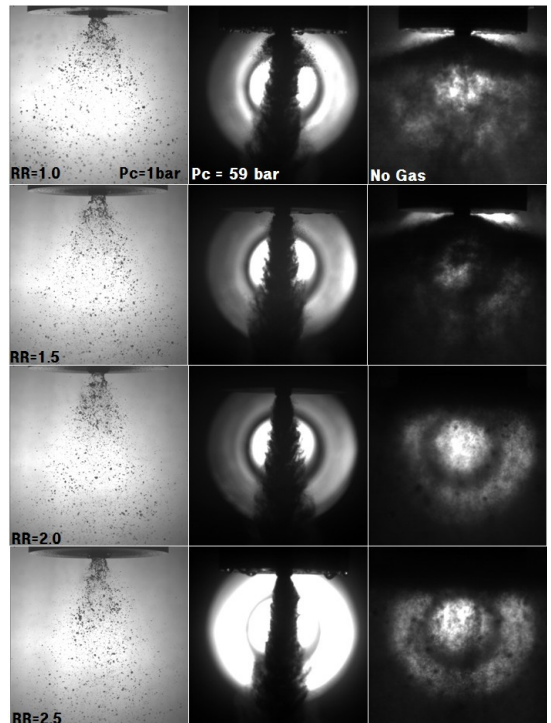


Fig. 3 Spray Images of GCSC Injectors (Ambient / High Pressure / No Gas)

Figure 3에 MFR을 0.752로 고정했을 때 상압 조건에서와 고압조건에서의 RR에 따른 분무사진을 나타내었고, 고압조건에서 기체를 공급하지 않고 액체만을 분무했을 경우의 사진을 같이 나타내었다. 우선 상압조건에서의 분무각은 RR이 증가할수록 작아짐을 보였고, 같은 MFR 조건이라도 상압과 고압에서의 분무특성은 다름을 보였다. 고압조건에서 액체만 공급했을 때 RR이 증가할수록 분무형상이 콘의 형상을 유지하지 못하고 분사기 면에 부착되어 분무되는 현상을 보였다. 이 때 액체측의 차압은 약 10.8 bar를 보이는데 상압조건에서 비슷한 차압을 형성했을 때는 콘의 형상을 보이는 점(Fig. 2참조)으로 미루어 보아 이는 분무된 주위의 밀도(압력)에 의한 영향이라고 볼 수 있다. 액체측만 분무 했을 시 넓게 퍼져 있던 분무형상이 기체를 공급함과 동시에 제트의 형상을 보이면서 분무된다.

고압 조건에서 RR이 작을 경우 분사기 노즐 출구와 가까운 곳에서의 분무형상이 RR이 큰 경우와 상당히 다름을 보였다. RR이 클 경우 기체와 액체가 리세스 구간(L)안에서 충돌하여 기체의 빠른 속도에 의해 액체의 와류 효과가 감소하면서 출구를 나와 제트의 형상으로 분무된다. 이에 반해 RR이 작을 경우는 동일한 기체 속도와 와류 효과를 가지지만 리세스 구간에서 완전한 혼합이 이루어지지 못하고 빠져나오으로써 액체의 와류 효과가 남아 있는 것으로 보인다. 이런 와류 효과는 밀도(압력)가 높은 노즐 출구 밖으로 나오면서 감소되어 콘의 형상을 보이지 못하고 제트의 형상으로 바뀌면서 후류로 분무되는 것으로 판단된다. RR이 1.0, 1.5일 경우에 이러한 현상이 보이다가 RR 2.0 일 때부터 이러한 경향은 보이지 않고 완전한 제트의 형상으로 분무됨을 보였다.

4. 결론 및 향후 연구 방향

다단 연소 사이클 엔진용 연소기에 적용하는 기체-액체 분사기 설계를 수행하고, 상압 및 고

압에서의 리세스 길이에 따른 분무특성 파악을 위한 기초실험을 수행하였다. 상압 및 고압(59 bar)에서의 공통적인 조건은 기체와 액체의 MFR을 동일하게 유지하였다. 같은 MFR일 경우, 상압과 고압 조건에서의 분무특성은 다름을 알 수 있었고, 리세스 길이에 따른 분무특성도 다름을 보였다. 이러한 기초시험 결과를 토대로 향후 좀 더 여러 가지 변수들을 변화시켜 가면서 실험을 진행하고자 한다. 기체와 액체의 MFR, 기체와 액체의 밀도비(density ratio) 등을 변화시킬 때 분무특성이 어떻게 달라지는 지를 확인할 예정이다.

참 고 문 헌

1. Cohn, R.K., Strakey, P.A., Bates, R.W., Talley, D.G., Muss, J.A., and Johnson, C.W., "Swirl Coaxial Injector Development," 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper No. 2003-0125, January, 2003.
2. Strakey, P.A., Cohn, R.K., Talley, D.G., "Gas-Centered Swirl Coaxial Liquid Injector Evaluations," 5th International Symposium on Liquid Space Propulsion, October 2003.
3. M.D.A. Lightfoot, S.A. Danczyk and D.G. Talley, "Atomization in Gas-Centered Swirl-Coaxial Injectors," ILASS Americas, 19th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Toronto, Canada, May 2006.
4. 전재형, 홍문근, 김종규, 한영민, 이수용, "액체스웰-기체제트 동축 분사기의 분무특성," 한국추진공학회 추계학술대회논문집, 2009. 11, pp.82-85.
5. 임지혁, 박구정, 윤영빈, "기체중심 스웰 동축형 분사기의 분무특성 연구," 한국항공우주학회 추계학술대회, 2009. 10.
6. <http://www.astronautix.com/engines/rd8.htm>