

## 연료 과농 환경에서 분사기 유량 통과 특성 연구

서성현\* · 임병직\* · 김문기\* · 안규복\* · 김종규\* · 최환석\*

### Study of Flow Discharging Characteristics of Injectors at Fuel Rich Conditions

Seonghyeon Seo\* · Byoungjik Lim\* · Munki Kim\* · Kyubok Ahn\* ·  
Jong-Gyu Kim\* · Hwan-Seok Choi\*

#### ABSTRACT

This paper discusses experimental data for the assessment of flow discharging characteristics of double swirl coaxial injectors operating at fuel-rich conditions. Combustion tests employing liquid oxygen and kerosene (Jet A-1) were conducted and a discharge coefficient was utilized for defining flow characteristics. A mass flow rate, a pressure, and a temperature were measured to estimate discharge coefficients. Fuel injectors revealed a fixed value of a discharge coefficient regardless of matched LOx injector design, chamber pressure, and mixture ratio. However, oxidizer injectors showed varying discharging coefficients depending on chamber pressure and mixture ratio. Flame structure variations seem to affect flow discharging characteristics of the oxidizer side.

#### 초 록

본 논문은 연료 과농 연소 환경 하의 이중 와류 동축형 분사기의 유량 통과 특성 파악을 위해 수행한 실험결과를 수록하였다. 액체산소와 케로신(Jet A-1)을 사용하여 연소시험을 수행하고 유량 통과 특성을 유량계수로 표현하였다. 유량계수 산출을 위해 유량, 압력, 온도를 측정하였다. 연료 분사기의 경우, 산화제 측 분사기 형상, 연소압, 혼합비에 관계없이 일정한 유량 계수 값을 보였다. 이에 반해 산화제 분사기는 연소압과 혼합비 변화에 영향을 받는 것으로 나타났다. 화염 형성 변화가 유량계수 변화에 특히 산화제 측에 영향을 주고 있음을 밝혔다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Injector(분사기), Coaxial(동축), Swirl(와류), 유량계수(Discharge Coefficient), Fuel-Rich(연료과농)

#### 1. 서 론

액체로켓엔진에서 가장 중요한 구성품은 연소기이며, 연소기의 성능을 좌우하는 것은 분사기이다. 분사기는 압력 감소를 통해 위치에너지를 운동에너지로 변환시켜 연소를 위한 연료와 산

\* 한국항공우주연구원 연소기팀  
연락처, E-mail: sxs223@kari.re.kr

화제간 혼합이 원활하게 이루어지게 하는 기능을 한다. 따라서 혼합의 정도가 연소 효율에 큰 영향을 미치며 궁극적으로 연소기의 성능을 결정한다. 엔진시스템을 설계할 시에 터보펌프 토출 압력을 어떻게 각 구성품에서 분배할지를 결정하기 위해서는 통과 유량 등을 포함한 작동 조건에 따른 분사기 차압 특성 파악이 필수적이다. 분사기의 유량 통과 특성은 유량계수 (discharge coefficient,  $C_d$ )라고 하는 값으로 표현할 수 있다 [1].

분사기는 에너지 변환 방식에 따라 여러 가지 형상을 갖게 되는데, 연소 안정성과 분무의 축대칭 특성으로 인해 동축형 분사기가 현재 국내에서 개발 중인 터보펌프 방식의 연소기에 적용되고 있으며 특히 이와 같은 방식의 분사기는 러시아에서 활발하게 적용된 사례가 있다[2]. 동축형 분사기는 그 특성상 추진제가 토출되는 분사공(injection hole)을 추진제가 가득 채우지 못하는 이유로 상대적으로 총돌형 분사기에 비해 낮은 유량계수 값을 갖는다. 로켓엔진의 작동 유연성을 높이기 위해서는 유량계수가 통과 유량이나 작동 환경에 영향 받지 않으며 고정된 값을 유지해야 한다. 그러나 본 연구 이전에 실시한 선행연구 결과에 의하면 분사기의 유량계수가 작동 조건에 따라 변하는 것을 확인하였으며 특히 가스발생기 환경하의 연료 과농 조건에서 그 특성이 두드러진다. 이전 결과를 살펴보면 이중 와류 동축형 분사기는 실제 연소 시의 유량계수가 물을 이용한 상온 시험 시보다 최대 27% 감소한다[3]. 특히 연료 보다 산화제 분사기의 차이가 심한 것으로 밝혀졌다. 연료 과농 연소 조건의 경우, 혼합비가 증가함과 동시에 산화제 분사기의 유량 계수가 증가하는 경향이 있음을 확인하였다[4].

본 연구는 이중 와류 동축형 분사기가 산화제 대비 연료가 매우 농후한 조건에서 연소 반응을 겪을 때 발생하는 화염에 의해 유량 통과 특성 변화를 파악하기 위한 것으로 이전 선행 연구[3, 4]에서 밝힌 결과를 심화하고자 한다.

## 2. 시 험

### 2.1 장치

실제 연소 조건에서 유량계수 특성을 살펴보기 위한 연소시험이 진행되었다. 분사기를 포함한 연소기는 스테인리스 스틸 재질로 제작되었다. 분사기는 연소 시험 전에 상온 조건에서 물을 이용한 유량 시험을 거쳤다. 연소시험에 사용된 추진제는 케로신(Jet A-1)과 액체산소이다. 적용된 분사기는 산화제와 연료 분사기의 동심을 이루는 이중 와류 방식으로 Fig. 1에서 분사기 단면 모습과 같이 산화제 분무를 연료가 감싸는 형태이다. 분사기 헤드에 장착된 분사기 개수는 총 7개로 중심에 한 개, 그리고 원주 방향으로 6개의 분사기가 장착되었다. 연소기 헤드는 연소실과 분리할 수 있어 Table 1과 같이 세 종류의 서로 다른 분사기를 채택한 분사기 헤드가 동일 연소실과 결합하여 시험할 수 있도록 고안되었다. 시험 방법 등에 대한 좀 더 자세한 설명은 참고 문헌에서 찾아볼 수 있다[5].

### 2.2 시험

통과 유량 특성 파악을 위해서는 유량계수 측정이 필수적이다. 유량계수,  $C_d$ , 는  $\dot{m}/A\sqrt{2\rho\Delta p}$ 로 표현되는데 이를 구하기 위해서는 유량( $\dot{m}$ ), 분사기 차압( $\Delta p$ ), 추진제 밀도( $\rho$ )가 필요하다. 추진제 유량은 코리올리스 방식의 질유량계에 의해 측정되었으며, 차압을 위해 연소기 매니폴드와 연소실에서 정압이 측정되었다. 세 종류의 분사기(INJ A, B, C)에 대해 각각 9회, 9회, 5회의 시험이 진행되었다. 연소시험 시간은 연소압력이 일정하게 유지된 상태에서 4초간 진행되었다. Figure 2에서 연소압과 혼합비로 표현되는 2차원 공간에서 설계 조건(점선으로 갇힌 내부)과 실제 시험 조건을 표시하였다. 연소압이 일정한 상태에서 혼합비 변화와 일정 혼합비 조건에서 연소압 변화에 따른 특성 파악이 이루어졌다.

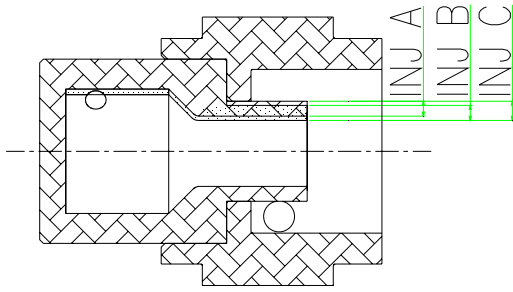


Fig. 1 Cross Sectional View of a Bi-propellant Swirl Coaxial Injector Used for the Present Study

Table 1. Major Specifications of Injectors

inj. type	$d_o$ (mm)	$d_f$ (mm)	$\delta_o$ (mm)	mass flow rate (g/s)
INJ A	3.75	8.75	0.8	362
INJ B	3.30		0.8	
INJ C	3.30		1.03	

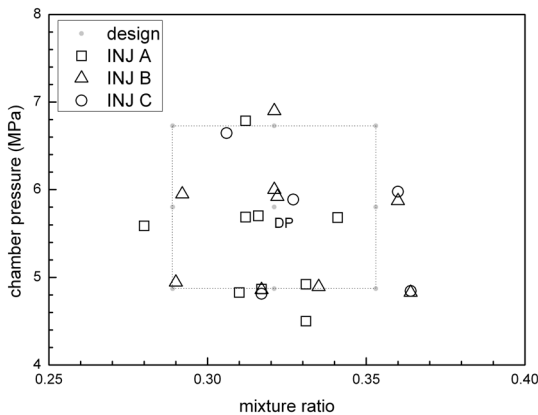


Fig. 2 Experimental and Design Conditions on the Domain of a Chamber Pressure and a Mixture Ratio

### 3. 결과 및 토의

연소시험 전에 우선 물을 매질로 이용하여 유량계수를 측정하였다. 동일한 설계 형상을 갖는 연료 분사기의 경우, 분사기(INJ A, B, C)에 따라 0.1185, 0.1196, 0.1211의 유량계수를 보였다.

본 결과는 표준편차가 1.1%로, 결국 동일한 유량계수를 보인다고 할 수 있다. 산화제 분사기 유량계수의 경우, INJ A(0.1726) 대비하여 동일한 설계 형상을 갖는 INJ B, C (0.2169, 0.2260)가 0.05의 차이를 보였다. INJ A보다 INJ B, C에서 축 방향 유속 증가로 분무각을 감소시켜 분사기 유량계수를 증가시키는 효과를 가져왔다. 결과적으로 물을 이용한 상온 시험 결과는 연료와 산화제 측이 서로 영향을 주지 않으며, 기존 설계 방법을 통해 유량계수 예측이 가능하였다.

실제 연소시험에서 분사기 종류에 따라 혼합비 변화에 의한 산화제와 연료 분사기의 유량계수를 Fig. 3에 표시하였다. 동일한 설계 형상이 적용된 연료 분사기의 경우 연소시험 시 유량계수는 상온시험 결과와 같이 산화제 분사기 형상 변경에 영향을 받지 않고 표준편차가 평균 대비 3.6%로 일정한 값을 보인다. 산화제 분사기 유량계수 또한 혼합비에 따른 변화가 미미한 것으로 판단된다. INJ C 경우는 작동 압력에 따라 유량계수 증가 패턴이 시험 압력에 따라 상이한 것으로 보이는데 이 같은 결과가 실제 물리적 현상에 의한 것인지 판단을 위해서는 좀 더 많은 시험이 요구된다. 산화제 분사기 평균 유량계수는 분사기 종류에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 각각의 추진제에 대해 동일한 분사기 설계를 갖지만 LOx post의 두께( $\delta_o$ )가 다른 INJ B와 C의 경우, LOx post의 두께가 클수록 연료와 만나 형성하는 화염의 유동 저항 효과가 적게 발생하는 것으로 보인다. INJ B의 경우, 작동 압력이 4.89 MPa에서 5.91 MPa로 증가함에 따라 산화제 평균 유량계수가 감소하는데 이는 압력 증가에 의한 기체 밀도 증가에 따른 액상 표면에서의 저항 증가에 의한 것으로 볼 수 있다[6]. 또한 산화제인 산소의 임계압력 5.04 MPa를 경계로 액상과 기상의 경계가 불명확해지면서 나타나는 유효 유동 단면적 감소에 의한 것으로 보인다[4,7]. 압력 변화에 따른 유량계수 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 본 그래프에서도 INJ B와 C의 경우, 연소압 증가에 따라 유량계수가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 앞서 언급한 기체 밀도의 증가에 의한 것이라 볼 수 있다.

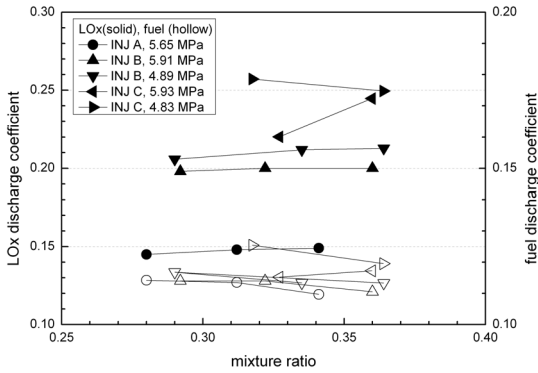


Fig. 3 Injector Discharge Coefficient Variations as a Function of a Mixture Ratio

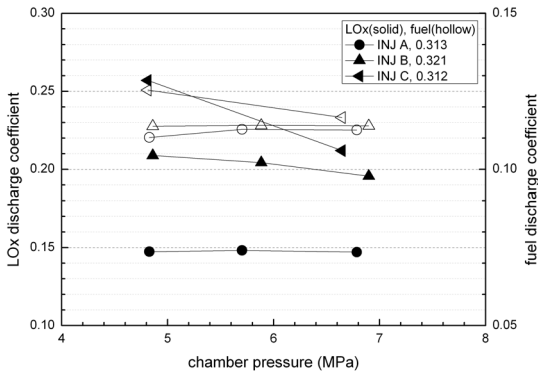


Fig. 4 Injector Discharge Coefficient Variations as a Function of a Chamber Pressure

#### 4. 맺음말

본 연구에서는 혼합비가 0.3의 수준으로 연료 과농 상태에서 작동하는 이중 와류 동축형 분사기의 유량 통과 특성을 살펴보았다. 연료 분사기의 경우, 연소시험 시 물을 이용한 상온시험보다 유량계수가 감소하지만, 산화제 측 분사기 형상, 연소압, 혼합비에 관계없이 일정한 값을 보였다. 이에 반해 산화제 분사기는 연소압과 혼합비 변화에 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히하게 연료와 산화제의 혼합이 발생하는 곳에서의 형상

변경 또한 분사기 유량 통과 특성에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 결과를 종합해 볼 때 화염 형성과 변화가 유량계수 변화에 특히 산화제 측에 큰 영향을 주고 있음을 밝혔다.

#### 참고 문헌

- Gill, G. S. and Nurick, W. H., "Liquid Rocket Engine Injectors," NASA SP-8089, 1976
- 최환석, 서성현, 김영목, 조광래, "추력 30톤급 액체산소/케로신 로켓엔진 연소장치 개발(I)-가스발생기," 한국항공우주학회지, 제37권, 10호, 2009, pp.1038-1047
- 서성현, 한영민, 최환석, "액체로켓 동축 분사기의 유량계수에 대한 고찰," 한국추진공학회 2009년도 추계학술대회 논문집, 2009, pp.49-53
- 서성현, 안규복, 한영민, 최환석, "작동 조건에 따른 이중 와류 분사기 유량 계수 변화 연구," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.177-180
- 김문기, 서성현, 안규복, 임병직, 김종규, 이광진, 한영민, 최환석, "75톤급 액체로켓엔진 축소형 가스발생기 연소시험," 한국추진공학회 2010년도 춘계학술대회 논문집, 2010, pp.173-176
- Kenny, R. J., Hulka, J. R., Moser, M. D., and Rhys, N. O., "Effect of Chamber Backpressure on Swirl Injector Fluid Mechanics," Journal of Propulsion and Power, Vol. 25, No. 4, 2009, pp.902-913
- Edwards, T., "Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903-2003," Journal of Propulsion and Power, Vol. 19, No. 6, 2003, pp.1089-1107