액체로켓 동축 분사기의 유량계수에 대한 고찰

서성현* · 한영민** · 최환석*

Study on Flow Discharge Characteristics of Liquid Rocket Coaxial Injectors

Seonghyeon Seo* · Yeoung-Min Han** · Hwan-Seok Choi*

ABSTRACT

The paper presents the results of the experimental study about flow discharge characteristics of double swirl coaxial injectors for a liquid rocket engine. Flow discharge characteristics of injectors become one of critical design issues for LRE combustion devices. Tap water and liquid oxygen/kerosene were used for ambient and hot firing tests, respectively. A combustion discharge coefficient varies depending on a mixture ratio and a recess ratio, and magnitudes of the variations are different with respect to injector shapes and operating conditions. The variation of a combustion discharge coefficient with a LOx injector is considered to result from flame structure changes due to physical property changes.

초 록

본 논문은 액체로켓용 이중 와류 동축 분사기의 유량 특성에 대한 실험적 연구 결과를 수록하였다. 분사기의 추진제 유량 공급 특성은 매우 중요한 로켓엔진 연소장치 설계 인자이다. 분사기 유량 특성 파악을 위해 상온시험은 물을, 연소시험은 액체산소와 케로신을 사용하였다. 상온 시험 결과와 달리 연소시험 유량 계수는 혼합비, 리세스 비 변경에 따라 변화하며 그 변화 정도는 분사기 형상과 작동 조건에 따라 다르다. 연소시험 산화제 측 유량 계수 변동 원인은 물성값 변화에 따른 화염 구조 변화에 의한 것으로 판단된다.

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

1. 서 론

이원 추진제 액체로켓엔진에 적용할 수 있는 분사기 종류로는 크게 충돌형(impinging), 동축형(coaxial), 핀틀형(pintle)이 있다[1]. 분사기는 추진제가 지닌 전위 에너지를 운동 에너지로 변환시키는 액체로켓엔진의 주요 구성품으로 액상

* 한국항공우주연구원 연소기팀, 정회원
** 한국항공우주연구원 연소기팀, 종신회원
연락저자, E-mail: sxs223@kari.re.kr

추진제를 작은 부피의 액적으로 변경시켜 기화와 더불어 연소가 쉽게 이루어지도록 하는 중요한 기능을 담당한다. 이렇듯 분사기는 연소 효율, 안정성과 관련된 특성을 규정하는 매우 중요한 요소이다[2]. 따라서 액체로켓엔진 연소장치인 연소기와 가스발생기 개발에 있어서 분사기 설계가 가장 중요한 부분을 차지하고 있다고 할 수 있다[3]. 분사기 설계 요구 사항 중에서 분사기 차압 대비 유량 관계 파악은 필수 기본 정보이다. 본문에서는 이중 와류를 적용한 동축형 분사기의 유량 특성에 대해 수행한 연구 결과를 수록하고자 한다. 이중 와류 동축형 분사기는 러시아에 의해 개방형 사이클 액체 로켓에 적극적으로 활용된 바 있다[4]. 이중 와류 동축형 분사기에서는 접선 방향으로 형성된 구멍을 통해 분사기 내부로 유입된 추진제가 와류를 형성한 후 서로 충돌하면서 혼합과 동시에 기화, 연소 반응이 이루어진다. 동축형 분사기는 충돌형 분사기와 달리 와류실의 존재로 인해 동적 특성이 매우 특이하다[5]. 또한 분사 출구 단면적에서 유동이 존재하지 않는 부분이 있어 유량계수가 충돌형 분사기 대비 작은 값을 갖는다.

본 연구에서는 실제 추진제를 적용한 연소시험 시 유량 계수를 실험적으로 측정하는 방법으로 이중 와류 동축형 분사기 고유의 동적 특성에 의한 유량 계수 변화에 관한 연구를 수행하였다.

2. 시험 방법

분사기의 유량계수, Cd, 는 분사기 압력차, Δp, 작동 유체의 밀도, ρ, 유동 통과 노즐 면적, A, 유량, $\dot{m}$, 을 이용하여 다음의 Eq. 1과 같이 정의된다.

$$Cd = \dot{m} / (A \sqrt{(2\rho \Delta p)}) \qquad (1)$$

위 식에서 A는 분사기에 따라 산화제 분사기 노즐 출구 내경, d_{LOx}, 또는 연료 분사기 노즐 출구 내경, d_{Fuel}, 을 바탕으로 결정된다. 상온에서 분사기의 유량 계수 측정을 위해서는 물을 사용하며 분사기 전단에서의 압력, 통과하는 물의 유량을 계측한다. 연소 조건에서의 유량 계수 또한 상온 유량 계수와 동일한 방법을 적용한다. 통과 유량 측정, 연소실과 매니폴드에서의 압력 측정을 통해 유량 계수가 결정된다. 여기서 유동 매질 즉, 추진제의 밀도는 유량계 통과 시의 밀도를 이용한다. 본 연구에서 사용된 여러 형태의 이중 와류 동축형 분사기 정보를 Table 1에 나열하였다.

Table 1. List of Injectors for the Present Study

injector	d_{LOx} (mm)	d_{Fuel} (mm)	$\dot{m}$ (g/s)
A-1,2	3.9	10	338
B-1	2.15	5.45	119
C-1,2,3	3	8	232
D-1	4.2	10.3	362
E-1,2,3,4	4.1	8.1	316
F-1,2,3,4	4.1	8.1	316

3. 결 과

3.1 유량 계수 변화

첫 번째로 가스발생기에 적용된 여러 종류의 이중 와류 동축 분사기(A~D)의 상온 시험과 연소시험 간의 유량 계수 측정 결과를 Fig. 1에서와 같이 비교해 보았다.

연소시험 시 계측한 유량계수는 수류시험 유량계수보다 전반적으로 작은 값을 보이며, 산화제 분사기의 경우 -2.6~-27%, 연료의 경우 C-1을 제외하고는 -3.3~-7.7%이다. 즉 연소시험 시 산화제 측 분사기 유량계수 감소가 연료 측 대비 매우 두드러짐을 알 수 있는데 산화제 분사기의 유량계수 차이 크기가 연료 대비 3배 이상이다. A-1, 2의 경우, 산화제 유량계수 차이 크기가 C-1, 2, 3의 경우보다 3배 이상 크다. A-1보다 연료 분사기 접선 유입구(tangential entry)의 내경을 0.1 mm 증가시킨 A-2의 경우 연료 측 유

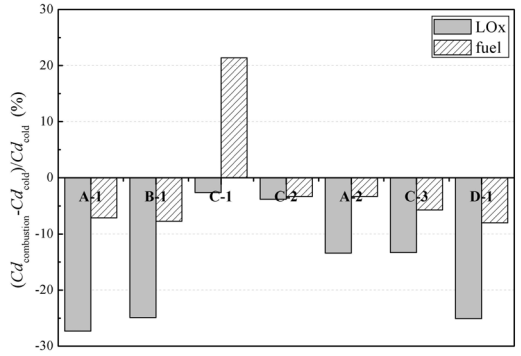

Fig. 1. Differences in the Discharge Coefficient for Various Injectors

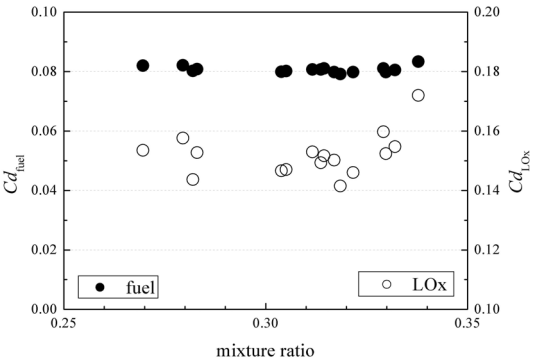

Fig. 2. Variations of Discharge Coefficients as a Function of Mixture Ratio for C-1 Injector

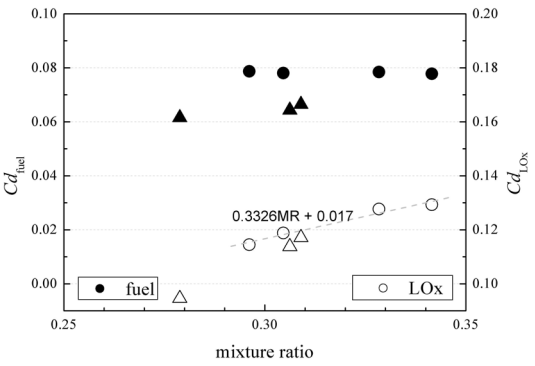

Fig. 3. Variations of Discharge Coefficients as a Function of Mixture Ratio for A-1(triangle), A-2(circle) Injectors

량계수 차이 크기가 반으로 줄어든다. A-1, 2와 유사한 형상 치수 개념을 적용한 D-1의 유량계수 차이 크기 값은 동일한 개념의 분사기를 적용한 A-1과 같은 수준을 보인다.

3.2 혼합비의 영향

혼합비에 따른 분사기의 연소시험 유량계수를 Fig. 2와 3에 C-1과 A-1, 2에 대해 도시하였다. C-1의 경우 혼합비 대비 유량계수 변화는 없으며, 동일한 설계로 제작된 C-2, 3 또한 혼합비에 따른 영향은 없다. A-1, 2의 경우, 연료는 혼합비에 의한 영향이 미미한 반면 산화제 분사기 유량계수는 혼합비 증가에 따라 증가하고 있다. 혼합비가 0.3에서 0.4로 변하는 경우, Fig. 3의 A-2 결과를 선형관계로 이해하여 산화제 분사기 측 유량계수를 구해보면 그 값이 28%가 증가하는 것으로 예측된다.

3.3 리세스 비의 영향

연소기에 적용된 이중 와류 동축 분사기(E, F) 시험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 본 결과에 의하면 함몰길이(recess)가 증가하여 분사기 swirl cup 공간이 커질수록 유량 계수는 와류실 형상(닫힘(closed) 또는 열림(open))과 추진제 종류에 관계없이 모두 감소한다[6]. 여기서 리세스 비(recess ratio)는 산화제 액막과 연료 액막의 충돌 위치를 리세스 길이로 나눈 값이다[7]. 수류 시험 유량계수 대비 연소시험 유량계수 감소율은 연료의 경우 -1~-29%, 산화제의 경우, -6~-23% 수준이다. 가스발생기의 경우와 같은 리세스 비를 갖는 연료측이 open 상태의 산화제 분사기의 유량계수 감소율은 본 결과에서 -16%이다.

4. 분 석

시험 결과에서 상온시험 대비 연소시험 유량계수는 감소하는 경향을 파악하였다. 분사기 출구에 존재하는 화염은 추진제의 흐름을 방해하는 저항으로 작용하기 때문에 상온시험 대비 연소시험 시 추가의 압력 손실이 발생한다.

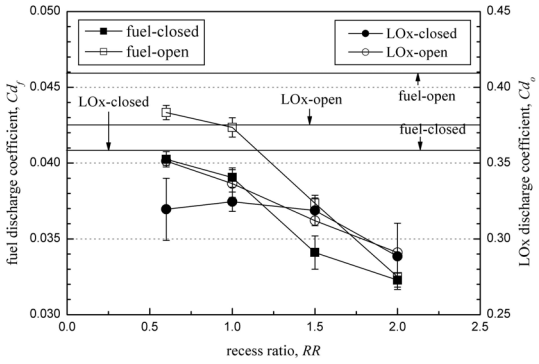

Fig. 4. Discharge Coefficient Variations as a Function of Recess Ratio

본 시험 결과를 바탕으로 특히 산화제 분사기의 유량계수 변경 원인을 다음과 같이 분석해 볼 수 있다. 연소시험 후 분사기 상태와 추진제 와류 유동을 고려하였을 때 연소 화염 존재 시 분사기 출구에서 발생하는 현상은 Fig. 5와 같이 표현할 수 있다. 본 그림에서 표시한 산화제 와류실 내부 중심 바닥에 검댕이가 침착된 흔적이 보인다. D-1의 경우 연료 와류실 내부에도 그림에서 지시한 부위에 검댕이가 퇴적되어 있었다. 그리고 LOx post의 끝단 바깥쪽 모서리(그림에서 discoloration이라고 지시된 곳)에 열변색이 발생하였다. 위의 사실로 보아 연소가스는 그림과 같이 재순환을 통해 액체산소와 연료 와류실에 침투한 것으로 보인다. 액체산소의 밀도가 분사기에서 일정하다고 가정한 상태에서 계산된 유량계수가 감소했다는 것은 그림에서와 같이 고온의 연소가스가 LOx post 끝단에서 액체산소 와류실로 유입되면서 LOx post내부에 흐르는 액체산소의 밀도 즉 다시 말하면 유동 통과 유효 단면적을 감소시키는 것으로 보인다. 액체산소 밀도 감소는 궁극적으로 일정 압력 차에서 유량 감소로 이어지며 결과적으로 유량계수 값 예측 과정에서 계측이 가능한 액체산소 밀도 값을 사용했을 시 유량계수가 감소하는 것으로 나타난다.

LOx post와 연료 노즐의 단면적 대비 통과 유량 즉, 연소 가스가 LOx post와 연료 노즐 내부로 침투할 수 있는 공간을 계산해보면 Table 2와 같다. 표에서 보는 것과 같이 설계 유량 조건에서 연소시험 시와 수류시험 시 유량 계수 차이를 많이 보이는 A-1, 2와 D-1이 그렇지 않은 B-1, C-1, 2, 3 대비 LOx post와 연료 노즐 출구에서 단위 면적당 유량이 작다. 이는 곧 연소 가스의 내부 침투 가능성이 높다는 것을 의미하며 액체산소 밀도 감소에 더 많은 영향을 주는 것으로 분석된다.

혼합비 변화에 의해 유량계수가 변하는 이유는 화염형성을 둘러싼 모든 물성 값들이 비평형 상태인 연료 과농 조건에서는 급격하게 변한다는 사실에서 찾을 수 있다[8]. 즉 연료 과농 조건에서 미소한 혼합비 변화는 정상 연소 대비 화염구조를 크게 변화시켜 유량계수 변화를 야기하는 것으로 판단된다.

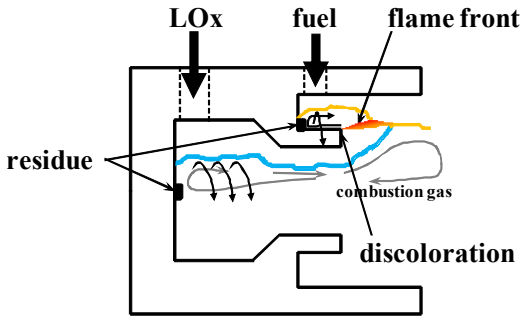

Fig. 5. Sketch of Phenomena Occurring in the Vicinity of an Injector

Table 2. Mass Flux of Injectors for the Present Study

Injector	$\dot{m}_{LOx}/A_{LOx}$ (kg/(s·m^2))	$\dot{m}_{Fuel}/A_{Fuel}$ (kg/(s·m^2))	$\dot{m}/A$ (kg/(s·m^2))
A-1, 2	6890	4676	4309
B-1	7966	6996	5098
C-1, 2, 3	7967	5209	4607
D-1	6354	4820	4348

A_{Fuel}: annular area

5. 결 론

연소시험 시 유량계수는 분사기 끝단의 화염에 의한 유동 저항 발생으로 상온시험 대비 낮게 측정된다. 이중 와류 동축 분사기의 산화제 측 유량 계수 값은 연소시험 시 결과가 수류 시험 시 보다 낮게 예측되는데 이는 액체 산소의 밀도 감소에 의한 유효통과 면적 감소에 의한 것으로 파악된다. 밀도 감소는 분사기 끝단에 형성되는 화염 구조에 영향을 받으며 궁극적으로는 열전달에 의한 것으로 볼 수 있는데 열전달 원인은 LOx post 외부에서 재순환하는 연소가스로부터 열전달, LOx post 내부로 재순환하는 연소가스로부터 열전달, 리세스 비 증가에 의한 swirl cup에서의 온도 증가 등으로 나열할 수 있다. 혼합비가 증가하고 LOx post 끝단에서 화염을 포함한 유동 특성이 변화하여 산화제 유동 유효 단면적이 증가한다면 유량계수 또한 증가할 것으로 예측된다.

참 고 문 헌

1. Liquid Rocket Engine Injectors, NASA SP-8089, 1976
2. Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA, 1992
3. Sutton, G. P. and Biblarz, O., "Rocket Propulsion Elements," Seventh ed. Wiley-Interscience, 2001
4. Rubinsky, V. R.: Combustion Instability in the RD 0110 Engine, Yang, V. and Anderson, W. E. (eds.), Liquid Rocket Engine Combustion Instability, Progress in Aeronautics and Astronautics, Vol. 169, AIAA, Washington, 1995, pp.89-112
5. Bazarov, V. G., "Fluid Injectors Dynamics," Mashinostroenie Pub., Moscow, Russia, 1979, pp.14-68, (in Russian)
6. Seo, S., Han, Y.-M. and Choi, H.-S., "Combustion Characteristics of Bi-Liquid Swirl Coaxial Injectors with Respect to a Recess," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2009. (accepted)
7. 서성현, 이광진, 한영민, 김승한, 김종규, 설우석, “이중와류 분사기를 적용한 고압 모델 연소기의 연소 특성 연구,” 한국추진공학회지, 제8권, 제1호, 2004, pp.54-60
8. Turns, S. R., "An Introduction to Combustion: Concepts and Applications," 2nd ed. McGraw Hill, 2000