

작동 조건에 따른 이중 와류 분사기 유량 계수 변화 연구

서성현* · 안규복** · 한영민** · 최환석*

Study on Discharge Coefficient Variations of Bi-Swirl Injectors with Working Conditions

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

ABSTRACT

It has been studied the effect of mixture ratio and chamber pressure on variations of discharge coefficients. Combustion experiments of bi-liquid swirl coaxial injectors were conducted at fuel-rich conditions with liquid oxygen and kerosene. Using two types of injectors for the experiments, characteristics of the discharge coefficient have been identified from variations in a diameter of the fuel nozzle and a momentum ratio along with the change of a LOx spray angle. It is concluded that discharge coefficients do not vary because of no change of flame structures from the fact that the fuel swirl chamber is completely filled up with fuel flow.

초 록

혼합비와 연소압에 따른 이중 와류 동축 분사기의 유량계수 변화를 살펴보았다. 연료 과농 조건에서 액체산소와 케로신을 이용하여 이중 와류 동축 분사기의 연소시험을 수행하였다. 두 종류의 분사기가 시험에 적용되었는데, 산화제 분무각 변화에 의한 추진제간 모멘텀 비 차이와 연료 노즐 직경 차이로 인한 유량계수 영향 특성이 파악되었다. 연료 와류실을 연료가 모두 채운 상태에서 연소가 이루어지는 경우 화염 구조의 변화가 없어 혼합비에 따른 유량계수 변화 또한 보이지 않는 것으로 파악하였다.

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

1. 서 론

액체로켓엔진 연소장치를 구성하는 가장 중요한 부품은 분사기이다. 분사기는 액체상태의 추진제를 연소가 용이한 분무형태로 변환시키는 역할을 한다. 즉 추진제가 가진 전위에너지를 운동에너지로 변환시켜 연소가 이루어지도록 한다 [1]. 국내에서는 액체로켓엔진에 사용할 목적으

* 한국항공우주연구원 연소기팀, 정회원

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

로 동축형 분사기에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 여러 동축형 분사기 중에서도 이원 추진제를 적용한 와류 분사기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이중 와류 분사기는 충돌형 또는 핀틀형 분사기와 달리 분사공(injection hole)을 추진제가 가득 채우지 못하기 때문에 유량계수(discharge coefficient)가 이들 분사기에 비해 현저히 낮은 값을 보인다[2]. 즉 분사공이 액체상태의 추진제로 채워지지 못해서 빈 공간이 존재하게 되는데 이를 일반적으로 에어 코어(air core)라고 부른다. 이중 와류 분사기의 경우, 각 추진제에 대한 심플렉스(simplex) 분사기가 동심을 이룬 형태를 가지고 있어, 두 추진제 액막이 분사기 내부에서 충돌하게 되는지 아니면 외부에서 충돌하게 되는지에 따라 분사기의 특성이 변화하게 된다[3].

추진제 혼합비가 완전연소에 가까운 조건에서 작동하는 연소기의 경우, 이중 와류 분사기 유량계수는 추진제간 최초 혼합위치가 분사기 내부로 이동함에 따라 유량계수가 감소하는 경향을 보인다[4]. 유량계수 감소 이유는 화염에 의한 연소가스가 분사기 내부에서 팽창함에 따라 배압이 형성되어 분사기 차압이 증가하기 때문이다.

연소기와 동일한 형태의 분사기를 연료 과농 조건에서 작동시키는 가스발생기의 경우, 분사기 유량계수 변화 특성은 연소기 경우와 매우 다르다[5]. 연료 과농 분사기 연소시험 결과에 의한 유량계수는 특정 분사기의 경우 혼합비에 따라 증가하는 경향을 보였다. 유량계수 변화의 원인은 혼합비에 따른 급격한 화염 구조 변화로 인해 발생하는 배압 조건 변경 때문인 것으로 보인다.

본 연구는 이중 와류 동축형 분사기의 유량계수 변화 원인을 적극적으로 파악하기 위한 것으로 이전 연구의 연장선상에 있다. 원인 파악을 위해 이중 와류 동축형 분사기에 대한 시험결과와 분석 내용을 수록하였다.

2. 시 험

유량계수 계측을 위해 실제 연소시험이 이루어졌으며, 추진제로 케로신(Jet A-1)과 액체산소(liquid oxygen)가 사용되었다. 연소실 벽면에서 정압(static pressure)측정과 분사기 헤드 매니폴드에서 정압을 측정하여 그 차이 값을 분사기 차압으로 환산하였다. 또한 공급 추진제 유량과 밀도 측정을 위해 코리올리스(Coriolis)방식 유량계를 사용하였다. 좀 더 자세한 연소시험 방법은 이전의 문헌에서 찾을 수 있다[6]. 분사기 유량계수(Cd)는 분사기 차압(Δp), 작동 유체 밀도(ρ), 유동 통과 노즐 면적(A), 유량(\dot{m})을 이용하여 다음의 Eq. 1과 같이 정의한다.

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

위 식에서 A 는 분사기에 따라 산화제 분사기 노즐 출구 내경, d_{LOx} , 또는 연료 분사기 노즐 출구 내경, d_{Fuel} , 을 바탕으로 결정된다.

분사기는 Table 1에서와 같이 두 종류를 시험하였으며, 단위 분사기당 유량은 동일하다.

3. 결 과

3.1 혼합비 영향

본 연구는 혼합비와 연소 압력을 시험 인자로 하여 유량계수 변화 특성을 살펴보았다. 우선 혼합비에 따른 유량계수 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 연료 측 유량계수는 혼합비에 따라 변하지 않으나, 산화제 측 유량계수가 혼합비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 분사기 A에서 확인할 수 있다. 그러나 분사기 B는 유량계수 편차 root-mean-square(rms)가 5.5% 수준밖에 되지 않을 정도로 변화량이 미미하다.

Table 1. List of Injectors for the Present Study

| injector | d_{LOx} (mm) | d_{Fuel} (mm) | \dot{m} (g/s) |
|----------|----------------|-----------------|-----------------|
| A-1,2 | 4.2 | 10.3 | 362 |
| B-1 | 3.75 | 8.75 | 362 |

3.2 연소압 영향

연소압에 따른 유량계수 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 혼합비 변화 결과와 마찬가지로 분사기 B의 경우, 연소압에 따른 산화제 측 유량계수 변화량이 1.0%로 매우 작다. 연료 유량 계수 변화는 모든 분사기에 대해 보이지 않는다. 분사기 A의 산화제 유량계수가 50 bar 근처에서 갑자기 감소하는 모습을 보이는데 이는 산화제로 사용한 산소의 임계압(50.43 bar)과 관련이 있는 것으로 보인다[7].

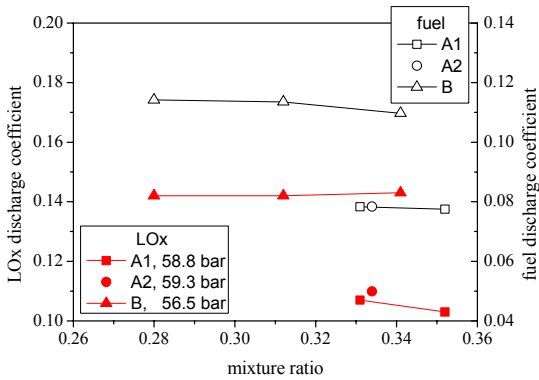


Fig. 1 Discharge coefficients as a function of a mixture ratio

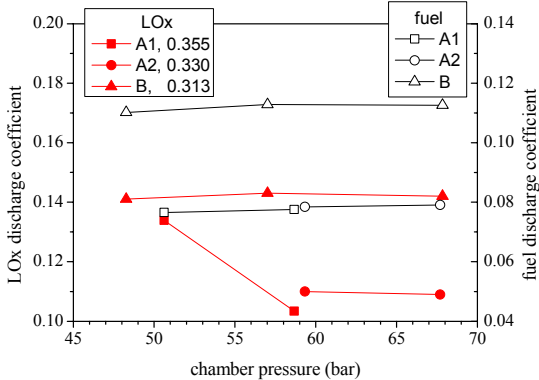


Fig. 2 Discharge coefficients as a function of a chamber pressure

3.3 유량계수 변화원인

시험결과에 의하면 분사기 A에서만 유량계수 변화가 확인되었다. Table 1에 나타난 것과 같이 LOx post 외측과 연료 노즐 내측 사이의 간격이 분사기 A의 2.25 mm에서 분사기 B의 1.7 mm로 줄었다. 이로 인해 분사기 B는 분사기 A와 달리 Fig. 3에 도시한 것과 같이 연료가 LOx post 외측과 연료 노즐 사이의 공간을 가득 채운 상태로 분사되는 것으로 보인다. 연소 시험 후 분사기 A의 경우, 연료 와류실 바닥면에 검

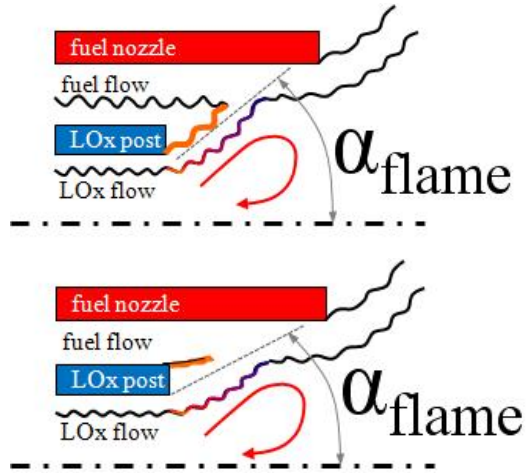


Fig. 3 Schematic diagrams for injector flows and its flame for injector A and injector B (below)

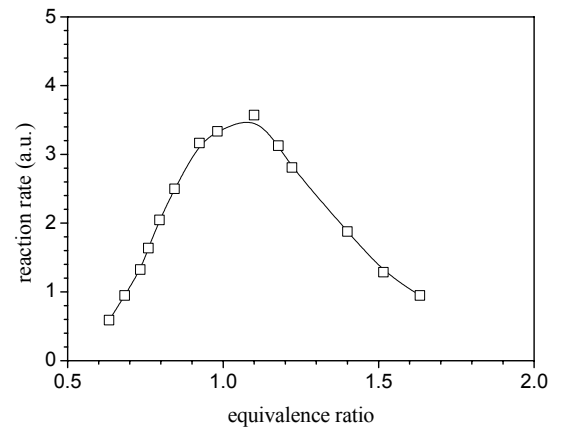


Fig. 4 Reaction rate variations as a function of an equivalence ratio[6]

댕이가 퇴적된 반면에 분사기 B는 연료 와류실이 매우 깨끗하며, LOx post의 외측 상태도 분사기 A 보다 온전한 것으로 보아, 와류실 내부에 연료가 가득 채워진 상태로 유동이 형성되는 것으로 판단된다.

따라서 분사기 B는 혼합비 변화에 따른 화염 구조 변화가 없어 유량 계수 변화 또한 발생하지 않는 것으로 보인다. 또한 LOx 분사기의 분무각이 줄어 모멘텀 비(momentum ratio)가 0.357(분사기 A)에서 0.490(분사기 B)로 증가하였다. 모멘텀 비의 증가에 의해 화염이 축 방향으로 길어진 상태에서 형성되어 유동 통과 면적이 증가함에 따라 유량계수가 전반적으로 증가한 것으로 보인다. 또한 Fig. 4에 도시한 것과 같이 과농 조건에서는 적은 혼합비의 변화도 매우 큰 물성치의 변화를 가져다주기 때문에 혼합비 변화는 연소가 완전연소 조건 가까이에서 이루어지는 연소기에 비해 유량계수에 미치는 영향이 크다 할 수 있다. 따라서 분사기 A의 경우 Fig. 3에서와 같이 혼합비에 따라 화염이 이루는 각 (α_{flame})이 변할 것으로 예상된다.

4. 맺 음 말

가스발생기와 같이 연소가 극한 조건, 즉 연료 과농 조건에서 이루어지는 경우, 유량계수는 혼합비 변화에 많은 영향을 받는다. 혼합비에 의한 영향은 연료 와류실 너비를 감소시켜 화염 구조가 혼합비에 영향을 받지 않도록 할 경우, 유량계수에 대한 영향도가 감소하는 것으로 보인다. 또한 유량계수가 연소압에 영향을 받는 이유는 임계조건에 따른 추진제 밀도 변화에 의한 것으

로 보이며, 자세한 원인 파악은 향후 심도 있는 연구를 필요로 한다.

참 고 문 헌

1. Huzel, D. K. and Huang, D. H., "Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines," AIAA, 1992
2. Liquid Rocket Engine Injectors, NASA SP-8089, 1976
3. Bazarov, V. G., "Fluid Injectors Dynamics," Mashinostroenie Pub., Moscow, Russia, 1979, pp.14-68, (in Russian)
4. 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, Vol. 53, No. 179, pp. 24-31, 2010
5. 서성현, 한영민, 최환석, "액체로켓 동축 분사기의 유량계수에 대한 고찰," 제33회 한국추진공학회 추계학술대회 논문집, pp. 49-53, 경주, 2009
6. Zukoski, E. E., "Afterburners," The Aerothermodynamics of Aircraft Gas Turbine Engines, (editor) Gordon C. Oates, chapter 21, 1978
7. Sychev, V. V., Vasserman, A. A., Kozlov, A. D., Spiridonov, G. A. and Tsymarny, V. A.: Thermodynamic Properties of Oxygen, Hemisphere Publishing, Washington, 1987