

액체스월-기체제트 동축 분사기의 분무특성

전재형* · 홍문근** · 김종규** · 한영민** · 이수용**

Spray characteristics of liquid-swirl/gas-jet coaxial injectors

JaeHyounng Jeon* · Moonguen Hong** · Jonggyou Kim** ·
Yeoung-Min Han** · Soo Yong Lee**

ABSTRACT

In the development of Liquid Rocket Engine(LRE) systems, it is essential to understand the spray characteristics which influence mainly the performance and the stability of combustion. The injectors for this study have a recessed Liquid-swirl/Gas-centered jet coaxial type. For the similarity with actual conditions, the experimental conditions are calculated by using the momentum ratio as a matching parameter, and the stimulants of fuel and oxidizer are gaseous nitrogen and water respectively. The spray fields were measured by means of a photographic technique. Moreover, an effect of the momentum ratio has been investigated.

초 록

우주발사체용 액체추진기관 개발에 있어서, 분사기는 연소성능과 안정성을 결정짓는 매우 중요한 요소로서 이에 대한 분무특성 이해는 필수적으로 이루어져야 한다. 본 연구에서 알아보고자 하는 분사기는 중앙에서 기체산화제를 제트로 분사하고 외부에서 액체연료를 와류(스월)형으로 분사하는 형태이다. 분무형상은 리세스별로 CCD 카메라를 이용한 직접사진기법을 통해 측정하였다. 실제 연소조건과의 모사를 위해 기체질소와 물을 사용하였고, 운동량비를 주요 상사인자로 두어 대기압 수류 시험조건을 도출하여 분무특성을 알아보았다. 또한 기체-액체 운동량비의 영향을 알아보기 위한 연구가 추가적으로 이루어졌다.

Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Liquid-swirl/Gas-jet coaxial injector(액체스월/기체제트 동축형 인젝터), Momentum ratio(운동량비), Recess(리세스)

1. 서 론

우주발사체용 액체추진기관 개발에 있어 분사기는 연소안정성 및 성능에 아주 밀접한 영향을 미치는 구성요소로서, 높은 성능의 분사기 설계를 위해서는 연료와 산화제의 분무특성을 이해하는 일은 필수적이라고 할 수 있다. 동축형 스월 인젝터는 러시아를 중심으로 활발히 연구가

* 과학기술연합대학원대학교 발사체시스템공학

** 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: carrick64@kari.re.kr

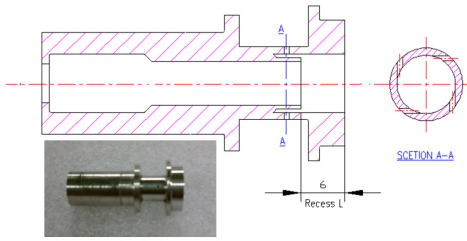


Fig. 1. Liquid-swirl/Gas-jet injector with 6mm recess length (dimensions in mm)

진행되어져왔고, 연소안정성 측면에서 우수한 성능을 보인다[1]. 본 연구에서 알아보고자 하는 분사기는 Fig. 1에서 볼 수 있고, 이는 러시아의 RD-170, 180, 190 엔진에 사용되는 타입으로 산화제 과잉 가스는 중앙으로 제트형태로 분무되고 연료는 스월형태로 분무된다[2]. 그러나 국내에서 이에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았고 특히 기초자료가 되는 수류시험에 대한 결과가 매우 부족한 실정으로, 이 분사기의 분무특성을 파악하는 것은 앞으로 해야 할 액체로켓 엔진 개발에 중요한 자료가 될 것이다.

본 연구에서는 운동량비를 실제조건과의 상사인자로 두어 수류시험조건을 도출하였고, 리세스에 따른 분무특성을 직접 사진 기법으로 측정하여 알아보았다. 또한, 기체-액체의 운동량비가 분무특성에 미치는 영향에 대하여 추가적으로 고찰되었다.

2. 시험조건 및 장비

2.1 수류시험조건

대기압 수류시험조건은 실제 혼합 및 연소를 고려한 상사조건으로 결정되는데, 기체와 액체의 운동량비를 맞추어 줄 경우에 실제와 시험조건에서의 분무 특성이 같게 된다고 볼 수 있다[3]. 분사기에 공급되는 유량과 압력은 분사기 형상에 따른 유출계수의 관계로 나타낼 수 있다. 유출계수는 이론적인 유량과 실제유량과의 비를 뜻하고, 다음과 같이 각각 정의된다[4].

$$C_{D,l} = \frac{\dot{m}_l}{A_o \sqrt{2\rho_l \Delta p}} \quad (1)$$

$$C_{D,g} = \frac{\dot{m}_g}{A_g P_g \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT} \left[\left(\frac{P_{out}}{P_g} \right)^{2/k} - \left(\frac{P_{out}}{P_g} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}} \quad (2)$$

식(1), (2)에서 아래첨자 l , g 는 각각 액체와 기체의 경우를 나타낸 것이다. 액체는 비압축성으로 가정하였고, 기체의 경우에는 압축성이 고려되었다. 시험을 통해 구한 유출계수를 고려한 대기압 수류시험 조건은 Table 1.과 같다.

Table 1. Test conditions

| 변수 | Values | | | | | |
|--------|---------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|
| | unit | Real | A1 | A2 | A3 | A4 |
| 기체 유량 | g/s | 201.7 | 3.60 | 5.89 | 8.80 | 12.34 |
| 기체 차압 | bar | 10.41 | 0.25 | 0.67 | 1.48 | 2.18 |
| 기체 유속 | m/s | 135 | 135 | 202.5 | 270 | 337.5 |
| 기체 밀도 | kg/m ³ | 67.7 | 1.21 | 1.32 | 1.47 | 1.65 |
| 액체 유량 | g/s | 59 | 9.25 | 14.46 | 20.41 | 27.02 |
| 액체 차압 | bar | 26.5 | 0.47 | 1.12 | 2.15 | 3.77 |
| 액체 유속 | m/s | 52.6 | 6.03 | 9.42 | 13.29 | 17.6 |
| 액체 밀도 | kg/m ³ | 728 | 997 | 997 | 997 | 997 |
| 기체 속도비 | | 1 | 1.5 | 2 | 2.5 | |
| 운동량비 | $\rho_g v_g^2 / \rho_l v_l^2 = 0.612$ | | | | | |

* 기체-오리피스 후단의 물성치, 액체-탄젠셜홀 후단의 물성치

2.2 시험장비

시험설비는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 모재인 기체질소와 물을 공급 및 제어할 수 있도록 구성되었고, 배출부를 제작하여 원활한 시험이 이루어질 수 있도록 하였다. 또한 분무형상을 측정하기 위해서 stroboscope를 이용한 직접사진기법이 사용되었다. 물과 기체질소의 유량을 동시에 측정하고, manifold에서의 압력을 각각 측정하여 운동량비를 계산하였다.

분사기는 Fig. 1의 Recess L을 6, 9, 12, 15mm의 4타입으로 제작되었고, 이 길이는 기체노즐의 지름을 기준으로 선정되었다. 리세스는 동축형 분사기에서 혼합효율을 높이고 연소 안정화를

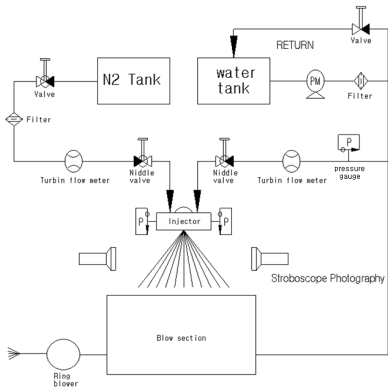


Fig. 2. Schematic of experimental setup

위해 사용되는 것으로, 내부 기체노즐이 외부의 액체 노즐 끝으로부터 안쪽으로 들어간 길이를 말한다. 기체제트의 확산정도에 따라 리세스 길이가 전체 분무형상에 영향을 미칠 것으로 알려져 있다[5].

3. 시험결과

3.1 수류시험결과

이 분사기의 분무형상은 일반적인 와류(swirl)형 분사기에서 볼 수 있는 hollow cone 형태라고 보기 어려운 특성을 보인다. 운동량비가 어느 정도 이상이 되면 액체는 분사기의 내부나 노즐 끝부분에서 미립화가 된다. 위에서 도출된 시험 조건 Table 1에서는 분사기 내부에서 액적이 생기는 것으로 보이고(Fig. 6 참조), 분무형상은 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 분무각도는 Fig.4에서 보는바와 같이 리세스 길이에 영향을 많이 받고 그 길이가 길수록 분무각도는 줄어드는 경향을 보인다. 리세스가 길수록 기체제트가 액체의 운동에 더욱 영향을 미칠 것이고, 증가된 축방향의 운동량으로 인해 분무각도가 줄어드는 것으로 볼 수 있다. 운동량비가 일정할 경우 전체유량이 증가할수록 분무각도가 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 기체와 액체의 운동량이 같이 증가를 하더라도 영향을 미치는 정도가 다르다고 생각할 수 있는데, 이 문제에 대한 추가적인 연구가 더욱 심도 있게 이루어져야 한다.

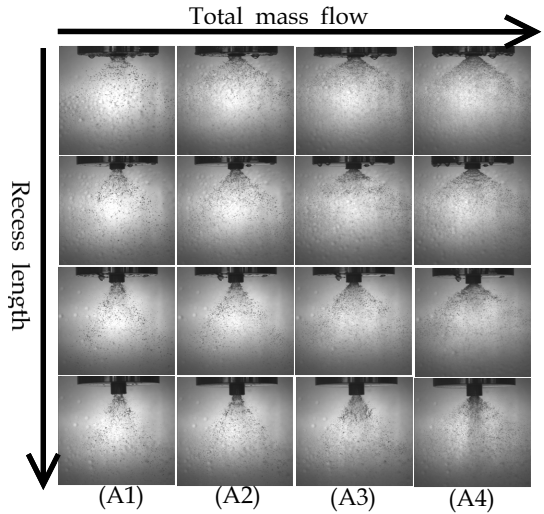


Fig. 3. Patterns of Spray at momentum ratio 0.612

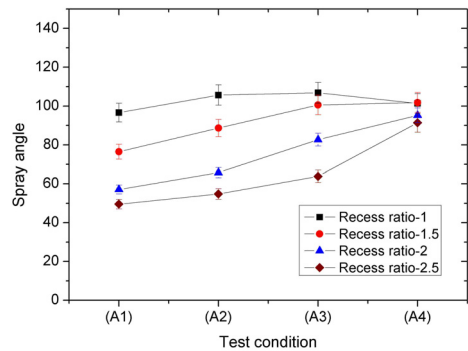


Fig. 4. Spray angle according to the test conditions

한편, 조건 (A4)에서는 기체의 유속이 음속에 이르게 된다. 그로 인한 에너지손실과 유동이 일정하지 않게 될 문제에 대해 고려가 이루어져야 하고, 압축성으로 인해 실제 조건에서의 기체유동과는 다른 특성이 나타날 수 있으므로 이 조건의 결과는 적절한 자료라고 판단하기 힘들다.

3.2 운동량비에 따른 고찰

본 연구에서는 기체-액체의 운동량비를 맞추어 실제조건과의 상사로 두었는데, 운동량비가 미치는 영향에 대한 연구가 더욱 필요하다. 여기서 운동량비는 액체와 기체가 만나는 지점의 속도와 밀도를 사용해야 하지만 그 지점을 정확히

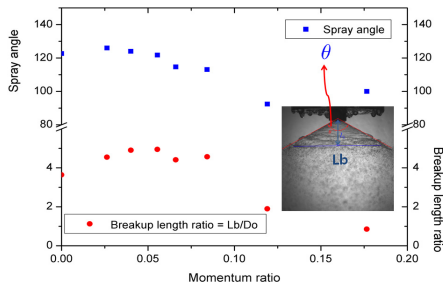


Fig. 5. Half spray angle & breakup length ratio according to the momentum ratio

예측하기 어렵고 내부 유동의 특성에 대한 자료가 부족하므로, 오리피스를 지난 유동의 물성치를 계산하여 이용하였다. 이 부분에 대해서는 추후에 다시 정의될 필요가 있다. 그러나 기체의 운동량이 액체의 유동에 얼마나 영향을 미치는지 보기에는 큰 무리가 없을 것으로 판단되므로, 본 연구에서는 이 값을 기준으로 사용하였다.

액체의 입구압력을 고정시킨 뒤, 기체의 유량을 조절하여 그 결과를 살펴보았다. Fig.5에서 운동량비에 따른 액막의 분열길기와 그때의 초기 분무각도를 볼 수 있다. 운동량비가 증가할수록 액막의 분열길기는 길어지다가 감소한다. 액체의 점성력과 표면장력에 의해 액막의 두께는 얇아지면서 길이가 길어지는 것으로 보이고 기체의 운동량이 더욱 커지게 되면서 점차 빨리 분열이 된다. 분무각도는 Fig. 6에서 보는바와 같이 운동량비가 증가하면서 액막길이가 존재하는 구간까지는 급격하게 감소하다가 분사기 내부에서 분열이 일어나게 되면 다시 증가하는 결과를 보인다. 리세스가 길수록 분사기 내부에서의 분열은 작은 운동량비에서 이루어졌고 분무각도의 차이는 더 뚜렷하게 나타났다.

4. 결 론

액체스월/기체제트 동축 분사기의 분무특성을 알아보기 위해 리세스, 유량조건, 운동량비에 따른 시험이 이루어졌다. 아직은 기초적인 경향성만 파악하고 있는 단계이므로, 앞으로 이에 대한 심도 있는 연구와 해석을 수행할 예정이다.

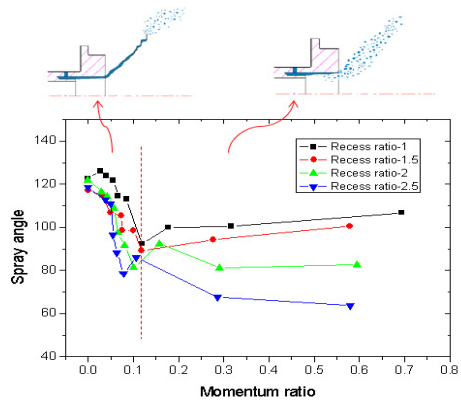


Fig. 6. Spray angle according to Momentum ratio

참 고 문 헌

1. 김종규, 김인태, 임병직, 김승한, 문일윤, 한영민, 설우석, "액체로켓엔진 연소기용 분사기의 분무특성 및 혼합특성에 관한 연구", 제 3회 한국유체공학 학술대회, 2004
2. Kelvin Miller, James Sisco, Nicholas Nugent, William Anderson, "Combustion Instability with a Single-Element Swirl Injector", Journal of Propulsion And Power, Vol. 23, No. 5, September-October 2007, pp.1102-1112
3. P.A. Strakey and D.G.Talley, "Mixing Characteristics of Coaxial Injectors at High Gas to Liquid Momentum Ratios", Air Force Research Laboratory & J.J.Hutt, NASA Marshall Space Flight Center
4. Sebastian Soller, Robert Wagner and Hans-Peter Kau, "Combustion Stability Characteristics of Coax-Swirl-Injectors for Oxygen/Kerosene", 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference&Exhibit 8-11 July 2007, Cincinnati, OH, AIAA 2007-5563
5. 한영민, 이광진, 임병직, 최환석, "내부혼합 동축 와류형 분사기를 장착한 액체로켓엔진용 축소형 연소기의 연소시험", 한국추진공학회지, 제 11권 제 5호, 2007, pp.72-77