# 액체로켓엔진 추력제어를 위한 유량제어밸브의 설계 및 성능 평가

정태규*†

# Design and Performance Evaluation of a Flow Regulator for Thrust Control of a Liquid Rocket Engine

Taekyu Jung*†


## ABSTRACT

A thrust control valve of a liquid rocket engine plays a role to increase or decrease the thrust of an LRE by modulating the flow rate of propellant into a gas-generator. This paper deals with a flow regulator that has functions of not only modulating thrust but also maintaining constant flow rate regardless of pressure change at inlet or outlet of the flow regulator. A direct acting flow regulator was fabricated and tested for the comparison of experimental and simulation results under steady-state conditions. The drawbacks and limitations of the flow regulator were analyzed. Also the new design of a flow regulator was proposed.

## 초 록

로켓엔진에서 추력제어밸브는 가스발생기로 유입되는 추진제 유량을 변경하여 엔진 추력을 증가 또는 감소시키는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 추력 증감의 기능뿐만 아니라 유량제어밸브 입출구 압력 변화에 상관없이 항상 일정한 유량을 유지할 수 있는 유량제어밸브를 다루었다. 직동식 유량제어밸브 시제품을 제작하여 정상상태 성능에 대한 해석 및 실험 결과를 비교하였다. 아울러 제작된 시제품의 단점과 한계를 분석하고 설계 개선안을 제시하였다.


Key Words: Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Thrust Control(추력제어), Flow Regulator(유량제어밸브)

## 1. 서 론

유량제어밸브는 로켓엔진에서 중요한 구성품 중의 하나로서 다음과 같은 두 가지의 기능을 수행한다. 첫 번째 기능은 로켓엔진의 추력을 증가 또는 감소시키기 위해 가스발생기로 유입되는 추진제 유량을 변화시키는 것이다. 두 번째 기능은 유량제어밸브 입출구 압력 변화에 상관없이 항상 일정한 유량을 유지함으로써 유량제

* 한국항공우주연구원 미래로켓연구팀
† 교신저자, E-mail: tkjung@kari.re.kr

어밸브의 개도를 제어하지 않고도 자동으로 일정한 추력을 유지하는 것이다. 로켓엔진의 유량제어밸브 입구 압력 또는 출구 압력은 엔진 구성품의 제조 편차와 비행 중 외란 등에 의해 변할 수 있는데, 이때 유량제어밸브는 외부의 도움 없이 자체적으로 일정한 유량을 유지함으로써 엔진 제어 및 엔진 설계  자유도를 증가시킨다. 이와 같은 기능을 하는 유량제어밸브는 러시아 로켓엔진에 주로 사용되고 있는 것으로 알려져 있으나 로켓분야의 특성상 문헌에 공개된 것이 거의 없다. Kozlov는 유량제어밸브의 개념도와 작동 원리만을 간단히 그의 저서[1]에 소개하였다. Lebedinsky, Zaytsev, Sobolev[2]는 유량제어밸브의 수학적 모델을 제시하였고 정상상태에서의 성능을 해석하였다. 그러나 유량제어밸브의 성능에 영향을 미치는 주요 설계인자와 최적 성능을 위한 설계 조건은 제시하지 않았으며 실험을 통해 수학적 모델의 타당성을 입증하지 않았다. 한편, Jung[3]은 직동식 유량제어밸브를 제안하였으며 정상상태 수학적 모델을 이용한 이론적 분석을 통해 직동식 유량제어밸브의 주요 설계 인자와 최적 성능을 위한 설계 조건을 제시하였다. 또한 해석결과와 시제품을 이용한 실험결과가 일치함을 보임으로써 수학적 모델의 타당성을 입증하였다. 본 논문에서는 Jung이 제안한 직동식 유량제어밸브에 대한 추가 연구 결과를 다루고자 한다.

## 2. 직동식 유량제어밸브

Jung이 제안한 직동식 유량제어밸브는 Fig. 1과 같다. 직동식 유량제어밸브는 두 개의 부분으로 구성되어 있는데, 유량을 조절하기 위한 쓰로틀 밸브와 일정 유량을 유지하기 위한 레귤레이터로 구성된다. 쓰로틀 밸브는 회전축(1)과 슬리브(2)로 구성되고 레귤레이터는 스풀(3)과 스프링(4) 등으로 구성된다. 작동 원리는 다음과 같다. 일반적으로 밸브의 입구 압력이 증가하면 유량도 증가한다. 그러나 유량제어밸브는 Fig. 1에서와 같이, 입구 압력 $P_1$이 증가하면 스풀이 우측으로 이동하여 슬롯의 유로 면적이 줄어들기 때문에 유량의 변화가 없다.

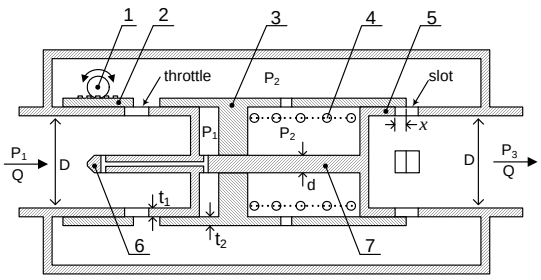


Fig. 1 Cross-sectional view of a direct acting flow regulator; 1- rotating shaft, 2-sleeve, 3-spool, 4-spring, 5-guide, 6-pressure probe, 7-sliding rod

Figure 2-3은 기존 연구 결과[3]로서, 유량제어밸브의 입구 압력 변화에 따른 성능 곡선이다. 해석 및 실험 결과가 비교적 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. $\zeta_1$, $\zeta_2$는 각각 유량제어밸브 쓰로틀 및 출구 배관의 수력저항($m^{-4}$)을 나타낸다. 한편, 수학적 모델에서 스풀의 양 끝단에 작용하는 압력 힘의 보정 계수, $\alpha$가 0.06일 때 해석결과와 실험결과가 잘 일치하였다.

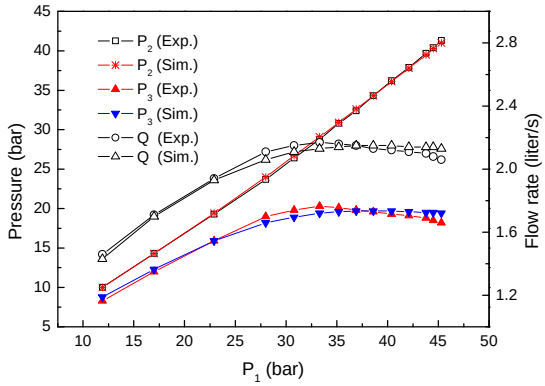


Fig. 2 Simulation and experimental results ($\alpha$=0.06, $\zeta_1$=1.873×10$^8$, $\zeta_2$=8.543×10$^8$)

기존 연구에서는 입출구 압력차가 대략 10bar 이상에서는 입출구 압력차의 변화에 상관없이 비교적 일정한 유량(Q)이 유지되는 것을 알 수 있었다. 또한 보정 계수, $\alpha$가 0.06일 때 해석결과와 실험결과가 잘 일치하였다.

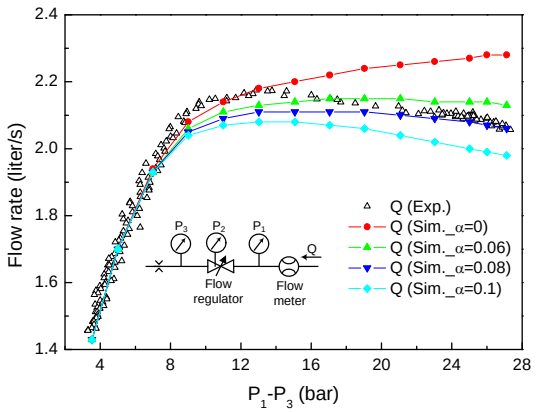


Fig. 3 Simulation and experimental results of flow rate along $a$

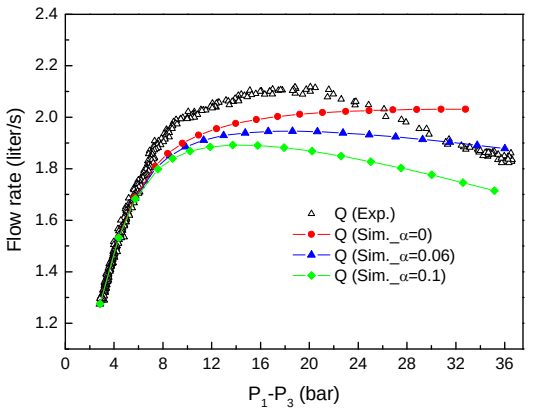


Fig. 4 Simulation and experimental results ($\zeta_1$=2.332×10$^8$, $\zeta_2$=1.077×10$^9$)

그러나 유량제어밸브의 쓰로틀 면적을 변화시키지 않고 한 포인트에서만 실험을 하였기 때문에 수학적 모델 및 유량제어밸브의 검증을 완벽하게 했다고 볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 기존과 다른 입출구 조건에서 실험을 수행하였다. 즉, 유량제어밸브의 쓰로틀 면적은 좀 더 줄이고, 출구 배관 저항을 크게 한 후, 실험을 수행하였다. 실험결과, Fig. 4와 같이 실험 및 해석 결과가 서로 일치하지 않았다. 또한 유량도 일정하게 유지하지 못하였다. 이와 같은 결과는 기존의 연구에서 압력 힘의 보정계수, $a$를 상수로 가정한 것이 적절하지 않다는 것을 보여준다. 다시 말해서, 스풀에 작용하는 힘의 평형식인 식(1)에서, 스풀의 양 끝단에 작용하는 압력힘의 보정계수($a$)를 상수로 취급할 수 없다는 것을 의미한다.

$$(P_1 - P_2)A_p + \alpha A_t(P_2 - P_3) - k(x_0 + x) = 0 \qquad (1)$$

즉, $a$는 상수가 아니라 스풀의 위치($x$)와 압력($P_2$,$P_3$)의 함수라고 볼 수 있다. 불행히도 슬롯에서의 유동은 매우 복잡한 양상을 보이고 해당 부위에서 교축(vena contracta)이 발생하기 때문에 스풀의 오른쪽 끝단에 작용하는 압력힘을 정확하게 예측하는 이론은 보고된 바가 없다.

따라서 정량적인 예측이 불가능한 스풀의 양 끝단, 특히 우측에 작용하는 압력힘의 작용을 최소화하기 위하여 Fig. 5와 같이 스풀의 양 끝단에 테이퍼를 가능한 크게 주어 해당 압력힘이 작용하는 면적을 최소화 하도록 설계 변경을 하였다. 이와 같은 설계 변경의 효과는 식(1)에서 확인할 수 있다. 즉, 식(1)의 두 번째 항에서 스풀 끝단의 단면적($A_t$)을 줄임으로써 압력힘의 영향을 최소화 하고자 하였다.

Fig. 5 Design modification on the spool end tips (Left : before modification, Right : after modification)

Figure 6은 상기와 같이 설계 변경된 스풀을 장착한 유량제어밸브의 정상상태 성능실험 결과이다. 입출구 압력차가 약 10bar 이상에서는 거의 일정한 유량을 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 또 다른 실험 조건에서도 일정한 유량을 유지할지는 미지수이다. 또한 해석과 실험 결과도 일치하지 않았다. 이는 스풀 양 끝단의 면적

을 줄였음에도 여전히 해당 압력힘의 영향을 무시할 수 없다는 것을 의미한다.

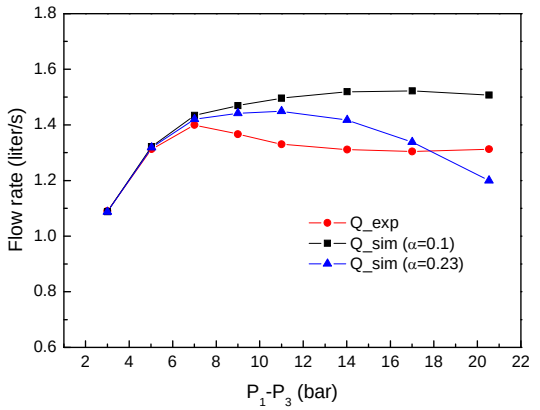


Fig. 6 Simulation and experimental results of flow rate with modified spool

지금까지의 결과로 볼 때, Fig. 1과 같은 직동식 유량제어밸브는 제 역할을 수행하지 못함을 알 수 있다. 또한 스풀 양단, 특히 우측에 작용하는 교축부에 의한 압력힘을 무시할 수 없고, 이 힘을 정확히 예측할 수 있는 이론적 방법이 없기 때문에 실험 결과와 일치하는 수학적 모델도 완성하는 것이 어렵다. 한편, 유량제어밸브는 구조상, Fig. 1과 같이 스풀과 가이드 사이 두 곳, 스풀과 슬라이딩 라드 사이 한 곳, 총 세 군데를 ~20μm의 간극을 유지하면서 동축을 유지하도록 매칭(matching) 가공을 해야 하므로 제작이 매우 어렵다. 따라서 상기와 같은 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 벨로우즈 방식 유량제어밸브[4]를 제안한다.

### 3. 벨로우즈 방식 유량제어밸브

기존 연구에서 발견된 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 벨로우즈 방식 유량제어밸브는 Fig. 7과 같다. 벨로우즈를 적용함으로써 매칭가공 부위를 스풀(6)과 가이드(7) 사이 한 곳으로 줄였기 때문에 제작성이 향상되었다. 또한 스풀을 슬롯의 우측까지 연장하여 슬롯에 작용하는 압력힘이 스풀에 영향을 미치지 않도록 하였다. 작동원리는 기존 연구에서의 유량제어밸브(Fig. 1)와 동일하다.

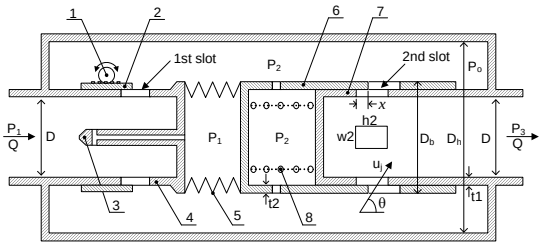


Fig. 7 Bellows-type flow regulator; 1- rotating shaft, 2-sleeve, 5-bellows, 6-spool, 7-guide, 8-spring

### 4. 결 론

기존 연구에서 제안된 직동식 유량제어밸브는 본 연구에서 추가 실험을 통하여 적절한 성능을 보장하지 못함을 밝혔다. 이는 스풀 우측 끝단에 영향을 미치는 슬롯 교축부에서의 압력을 정확하게 예측할 수 없기 때문이다. 따라서 예측 불가능한 압력힘을 상쇄할 수 있고 제작성이 우수한 새로운 벨로우즈 방식의 유량제어밸브를 제안하였다.

### 참 고 문 헌


1. Kozlov, A. A., Power Supply System and Control for Liquid Rocket Engines, Mashinostroyenie, Moscow, 1988
2. Lebedinsky, E. V., Zaytsev, B. V. and Sobolev, A. A., "Miltilevel Mathematical Simulation of the Flow Regulator for LRE," 4th international conference on launcher technology "Space Launcher Liquid Propulsion," Liege, 2002.
3. Jung, T., "Static Characteristics of a Flow Regulator for a Liquid Rocket Engine," Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 48, No. 3, May-June, 2011, pp.541-544
4. 정태규, “유량조절밸브,” 대한민국특허, 출원번호 10-2011-0111891, 2011