

가압제어용 둥근 유입형 오리피스 특성

정용갑*, 권오성**, 장제선***, 신동순****, 한상엽*****

Rounded Entry Orifice Characteristics for Pressurization Control

Yonggahp Chung*, Ohsung Kwon**, Jesun Jang***, Dongsun Shin**** and Sangyeop Han*****

Key Words : Orifice(오리피스), Radius of Curvature (곡률), Pressurization(가압), Pressurant(가압제)

Abstract

Pressurization system in a liquid-propellant launcher supplies the controlled gas into the ullage volume of propellant tanks to feed propellants to combustion chamber by pressurizing propellants stored in propellant tanks. The ullage part of propellant tank should be constantly pressurized to supply the propellants stored in propellant tanks to turbo-pump or combustion chamber by pressurant pressurization system. Pressurant used to pressurize propellants is generally stored in a series of tanks at cryogenic temperature and high pressure inside an oxidizer tank. The reason is to store the quantity of pressurant as much as possible and to make pressurant tanks as small as (i.e. as light as) possible. However for test convenience pressurant tank is located at STP (standard temperature and pressure) environment in this study. Orifices are widely adapted to several pressurization systems in liquid rocket propulsion systems. Discharge coefficients of orifices are essentially needed for the optimized design of pressurization system in liquid rocket propulsion system. For this study gaseous nitrogen was served as pressurant and rounded entry orifices were employed. The forty-two (42) rounded entry orifices (the radii of curvatures are 0.5 and 1.0) have been tested experimentally in the supersonic flow region. The discharge coefficients of rounded entry orifices with inside diameters ranging from about 1.4 to 5.0mm was measured with 0.95 ~ 0.99.

1. 서론

액체추진기관이 추진력을 얻어 비행하기 위해서는 액체로켓엔진으로부터 추력이 발생되어야 하므로, 추진제 용기의 얼리지를 헬륨과 같은 가압제를 이용하여 요구된 압력으로 가압하게 되면 추진제 용기에 저장되어 있는 액체 추진제가 로켓엔진으로 공급되어 이를 연소시키게 되면 추진력을 얻을 수 있다. 이와 같이 추진제 용기의 얼리지를 요구 압력으로 가압하여 추진제를 엔진으로 공급하기 위해 필요한 일련의 시스템을 가압시스템이라 한다.

Fig. 1은 액체추진제를 사용하는 액체추진기관의 구성을 개략적으로 나타내는 것으로, 가압제 용기에 저장된 가압제는 용기에서 토출되어 고압필터, 감압어셈블리(솔레노이드밸브, 오리피스 등), 열교환기, 벨로우즈, 저압필터, 디퓨저 등의 주요 구성품을 통과하여 추진제 용기의 얼리지로 공급된다. 가압제 용기에서 토출되는 고압의 가압제를 일정 압력으로 감압시키기 위하여 사용되는 장치로는 레귤레이터나 비례제어밸브, 오리피스/솔레노이드밸브 감압어셈블리 등이 있다. 그리고 액체추진기관의 액체 및 기체 공급시스템에서 일반적으로 사용되는 오리피스 종류에

는 칼날형(sharp edge) 오리피스와 얇은 판형(thin plate) 오리피스, 둥근 유입형(rounded entry) 오리피스가 있다.

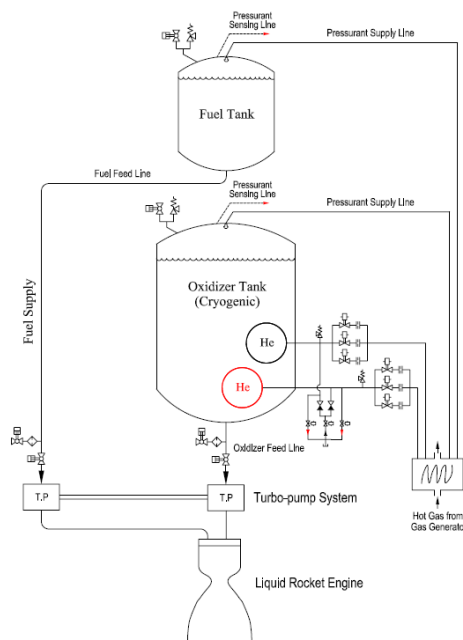


Fig. 1 Liquid-propellant launcher propulsion system

* 한국항공우주연구원, ygchung@kari.re.kr
** 한국항공우주연구원, oskwon@kari.re.kr
*** 한국항공우주연구원, aerototoro@kari.re.kr
**** 한국항공우주연구원, msepl@kari.re.kr
***** 한국항공우주연구원, syhan@kari.re.kr

본 연구에서는 오리피스/솔레노이드밸브 감압어셈블리에 사용되는 등근 유입형 오리피스를 선정하여 이에 대한 연구를 수행하였으며, Fig. 2는 오리피스/솔레노이드밸브 감압어셈블리의 주요 구성에 대한 개략도이다.

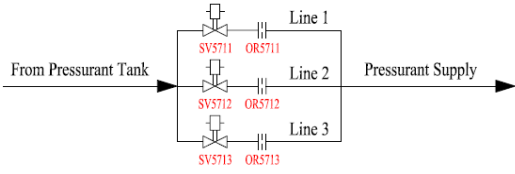


Fig. 2 Orifice/solenoid-valve pressure reducing assembly

본 연구에서는 발사체의 가압시스템에서 유량제어를 위해 일반적으로 사용되는 등근 유입형 오리피스에 대한 연구를 수행하여 오리피스 전단과 후단에서의 압력과 온도 변화, 유동특성 및 유량계수(Cd)를 고찰하였다.

2. 오리피스 유동 및 설계

2.1 오리피스 유동

압축성 유체가 오리피스를 통과할 때의 유동 특성은 노즐 목에서의 유체 속도에 따라 아음속 유동과 음속 유동으로 크게 나눌 수 있다. 그리고 이러한 특성을 무차원수로 나타낸 것이 유량계수(C_d , Discharge coefficient)이다. 식 (1)은 유량계수에 대한 정의로 이는 등엔트로피(isentropic) 단열(adiabatic) 질량 유량에 대한 실제(actual) 질량 유량의 비이다. 본 연구에서는 노즐 목에서 음속인 유동에 대한 경우에 대하여 고찰하였으며, 유동 특성은 식 (2)에서와 같이 작동 유체에 대한 임계 압력비(θ , critical pressure ratio)로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 작동 유체로 질소 가스를 사용하였으므로 임계 압력비가 0.5283 이하인 경우에는 노즐 목(throat)에서 유동은 음속이 된다.

$$C_d = \frac{\dot{m}_{actual}}{\dot{m}_{isen. adiab}} \quad (1)$$

$$\frac{P_t}{P_1} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\gamma/(\gamma+1)} = \theta \quad (2)$$

또한 유량계수를 계산하기 위하여 실제 질량 유량은 실험에서 측정되었으며, 이론 유량은 식 (3)에서와 같이 실험에서 측정된 오리피스 전단에서의 압력과 온도에서 비열비(heat capacity ratio)와 압축성 계수(z)를 적용하여 계산하였다. 특히 압축성 유체의 유량 계산을 위해서는 비열비를 고려해야 되는데, 이는 유체의 압력 변화에 대하여 유량 계산에 미치는 영향이 다소 크게 나타났으나 온도 변화에 대해서는 상대적으로 작게 나타났다.

$$\dot{m}_{isen. adiab} = A_t P_1 \sqrt{\frac{\gamma}{z R_g T_1} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (3)$$

2.2 오리피스 설계

오리피스의 주요 설계 변수는 두 가지로 하나는 오리피스 직경이고 다른 하나는 가압제가 오리피스로 유입되는 부분의 형상

이다. Table 1은 오리피스 규격이고 Fig. 3은 오리피스 설계 도면을 나타내며, 오리피스 직경은 1mm에서 5mm 범위이고 오리피스 유입부의 곡률(radius of curvature)은 각각 0.5와 1.0의 두 가지 형태이다.

Table 1. Orifice specifications (R1/d=0.5 and R1/D=1.0)

No.	Orifice diameter (mm)	No.	Orifice diameter (mm)	No.	Orifice diameter (mm)
1	1.00	8	2.40	15	3.80
2	1.20	9	2.60	16	4.00
3	1.40	10	2.80	17	4.20
4	1.60	11	3.00	18	4.40
5	1.80	12	3.20	19	4.60
6	2.00	13	3.40	20	4.80
7	2.20	14	3.60	21	5.00

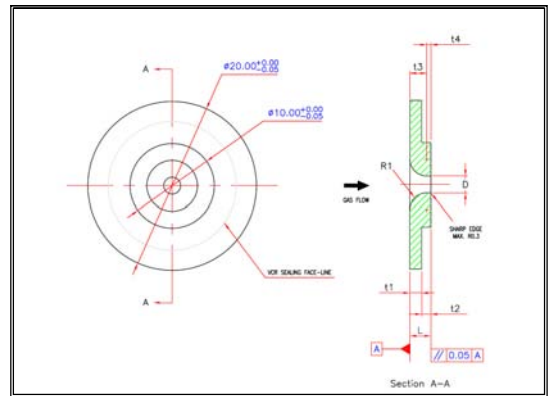


Fig. 3 Schematic of rounded entry orifice

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

오리피스 배출 시험을 위한 시험설비는 추진제공급시험설비(PTF, Propellant-feeding Test Facility)를 활용하였으며, Fig. 5는 추진제공급시험설비 중에서 가압시스템 영역에 대한 개략도이다. 가압제 용기는 상온 및 상압 상태의 대기 조건에 설치되어 있으며 가압제로는 질소 가스를 사용하였다. 가압제 탱크에서 분출되는 고압의 가압제는 레귤레이터가 적용된 감압기구를 이용하여 시험 압력으로 감압된 후에 오리피스를 통과하여 배출된다. 가압시스템의 주요 구성은 가압제 용기부와 감압제어부, 유량 측정부, 오리피스부이다. 시험 대상인 등근 유입형 오리피스는 Fig. 4에서와 같이 Metal Gasket Face Seal(VCR) Fittings에 삽입되는 방식을 적용하였다.



Fig. 4 VCR fitting to insert orifice

3.2 실험방법

실험 방법은 가압제인 질소가스를 일정 압력으로 가압제 용기에 충전한 후에 저장된 가압제를 토출하여 고압의 가압제를

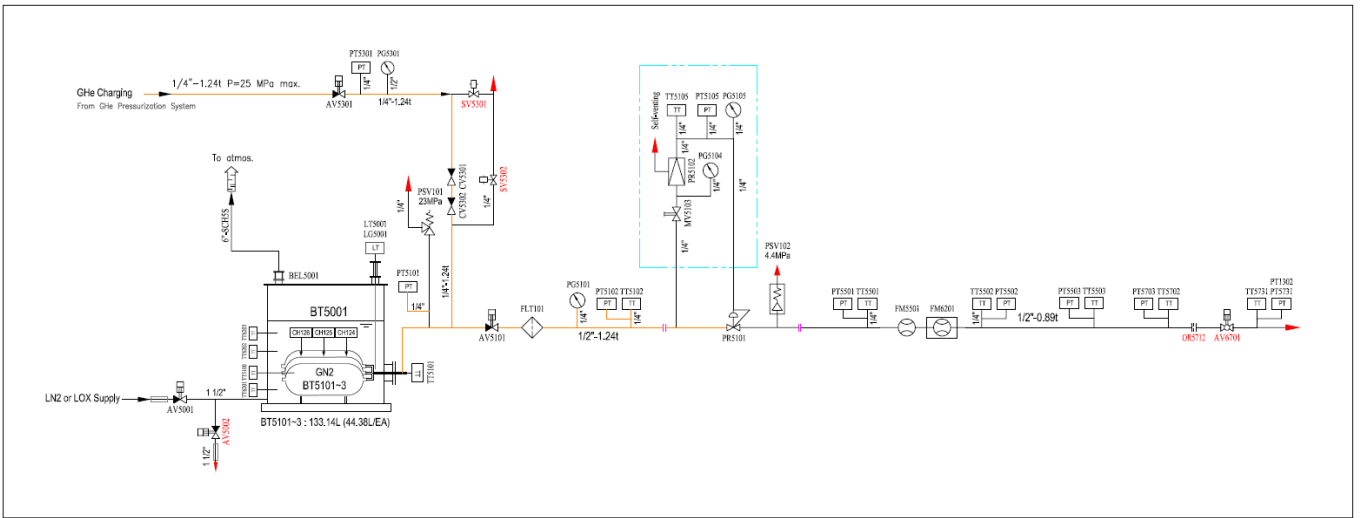


Fig. 5 Schematic diagram of the pressurant discharge system

감압 레귤레이터를 사용하여 시험에 따라 오리피스 전단의 압력을 10bar, 20bar 및 30bar 3단계로 변화시켜 오리피스를 통하여 대기로 약 10초간 배출시켜 실험을 수행하였다. 계측시스템에서는 압력과 온도, 유량 등을 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

가압제어용 등근 유입형 오리피스 총 42개에 대하여 약 10초 동안 오리피스를 통하여 가압제가 대기로 배출되는 시험을 수행하였다. 전체 오리피스 중에서 직경이 약 1.2mm 이하인 경우 오리피스 전단 압력이 10barg 조건에서는 토출 유량이 작아서 유량계 측정되지 않았으나 이를 제외한 나머지 조건에서는 유량계 측정 오차 범위를 만족하였다.

실험 결과의 처리는 식 (4)에서와 같이 오리피스 전단 및 후단에서의 압력 무차원수에 대하여 유량계수의 변화를 비교 고찰하였다. 여기서 $P_{critical}$ 은 작동 유체인 질소가스의 임계 압력이고 P_1 은 오리피스 전단 압력, P_3 는 오리피스 후단 압력이다.

$$\frac{P_1 - P_3}{P_{critical} - P_3} \quad (4)$$

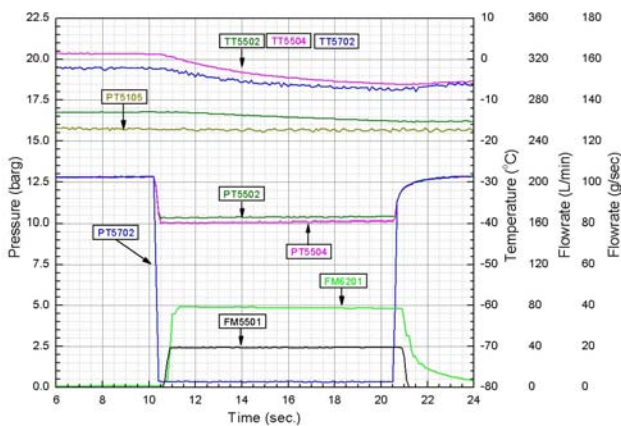


Fig. 6 Pressure, temperature and flowrate

Fig. 6은 오리피스 직경이 3mm이고 곡률이 0.5, 오리피스 전

단 압력 10barg 인 경우에 대한 토출시험에서 획득된 결과를 나타낸 것이다. 약 10초간 가압제 토출이 지속되는 구간의 3점에서 압력과 온도, 유량을 측정하여 오리피스에 대한 유량계수를 계산하였으며, 이때의 오리피스 유량계수(C_d)는 약 0.97로 계산되었다. 다른 크기의 오리피스에 대해서도 이와 같은 방법으로 유량계수를 계산하였으며, 실험 결과는 오리피스 유입부 형상인 곡률 변화에 따라 0.5인 경우와 1.0인 경우로 구분하였다.

4.1 오리피스 유입부 곡률이 0.5인 경우

Fig. 7은 오리피스 유입부의 곡률이 0.5이고 오리피스 직경이 1.4mm에서 3mm 이하인 경우 압력 무차원수에 따른 유량계수를 나타낸 선도이다. 오리피스 내경이 증가함에 따라 유량계수는 다소 증가하는 경향을 보였으며, 오리피스 내경이 2.810mm인 경우에는 다른 경향을 나타내었는데 이는 계속 오차로 인해 발생된 것으로 사료된다. 또한 압력 무차원수가 증가하는 경우에는 유량계수가 약간 감소하는 경향을 나타내었으나 그 차이는 크지 않았다. 본 조건에서와 같이 오리피스 내경이 약 1.4mm에서 3mm 미만에서는 유량계수가 약 0.95에서 0.98 사이의 값을 가짐을 알 수 있었다.

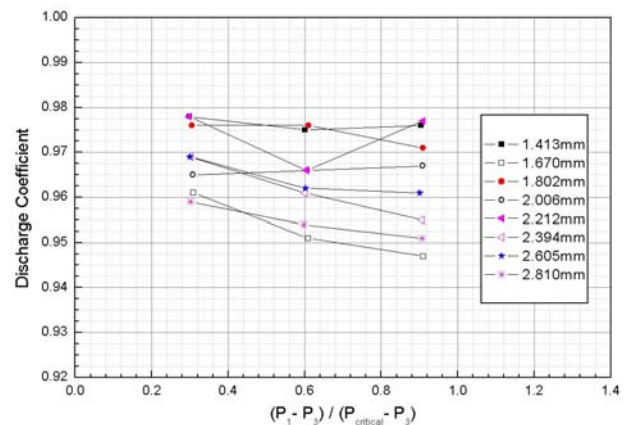


Fig. 7 Variation of C_d with $(P_1 - P_3) / (P_{critical} - P_3)$ ($R1/D=0.5$, $1.4mm < D < 3mm$)

Fig. 8은 오리피스 유입부의 곡률이 0.5이고 오리피스 직경이 3mm에서 4mm 이하인 경우 압력 무차원수에 따른 유량계수를 나타낸 선도이다. 오리피스 내경이 증가함에 따라 유량계수는 다소 증가하는 경향을 보였으며, 또한 압력 무차원수가 증가하

는 경우에는 유량계수가 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 본 조건에서와 같이 오리피스 내경이 약 3mm에서 4mm 미만에서는 유량계수가 약 0.97에서 0.99 사이의 값을 가짐을 알 수 있다.

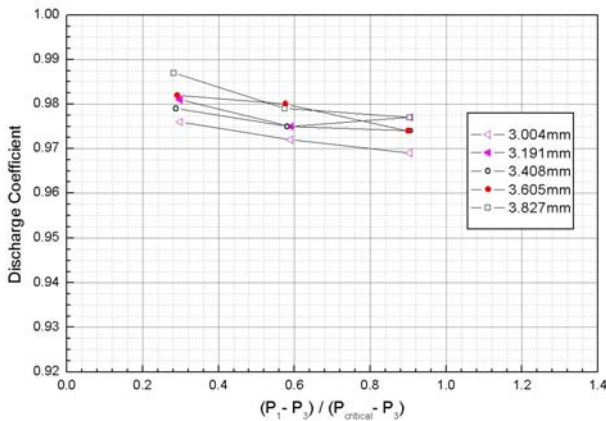


Fig. 8 Variation of C_d with $(P_1-P_3)/(P_{critical}-P_3)$ ($R1/D=0.5$, $3mm < D < 4mm$)

Fig. 9는 오리피스 유입부의 곡률이 0.5이고 오리피스 직경이 4mm에서 5mm 이하인 경우 압력 무차원수에 따른 유량계수를 나타낸 선도이다. 오리피스 내경이 증가함에 따라 유량계수는 다소 증가하는 경향을 보였으며, 또한 압력 무차원수가 증가하는 경우에는 유량계수가 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 오리피스 내경이 약 4mm에서 5mm 미만인 경우에는 이전의 경우에서와 마찬가지로 유량계수가 약 0.97에서 0.99 사이로 나타났다.

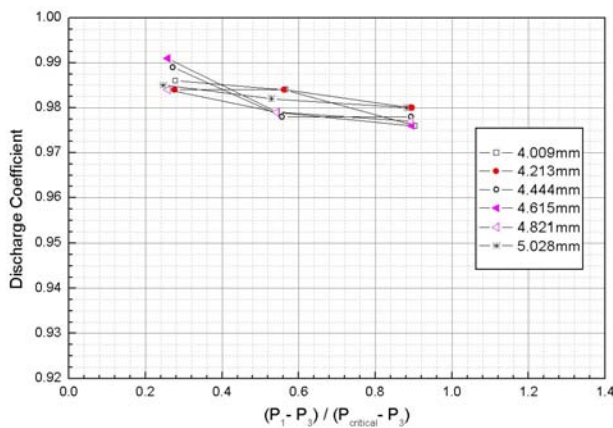


Fig. 9 Variation of C_d with $(P_1-P_3)/(P_{critical}-P_3)$ ($R1/D=0.5$, $4mm < D < 5.1mm$)

4.2 오리피스 유입부 곡률이 1.0인 경우

Fig. 10은 오리피스 유입부의 형상에 따른 유량계수의 영향을 고찰하기 위하여 오리피스 유입부 곡률이 0.5인 경우와 1.0인 경우에 대하여 압력 무차원수에 따른 유량계수를 나타내는 선도이다. 두 경우의 곡률에 대한 비교를 위하여 오리피스 내경의 크기가 유사한 오리피스를 선정하여 유량계수를 서로 비교한 결과, 전체적으로는 곡률이 1.0인 경우가 0.5인 경우에 비하여 다

소 증가하는 경향을 나타내었으나 그 차이는 작게 나타났다.

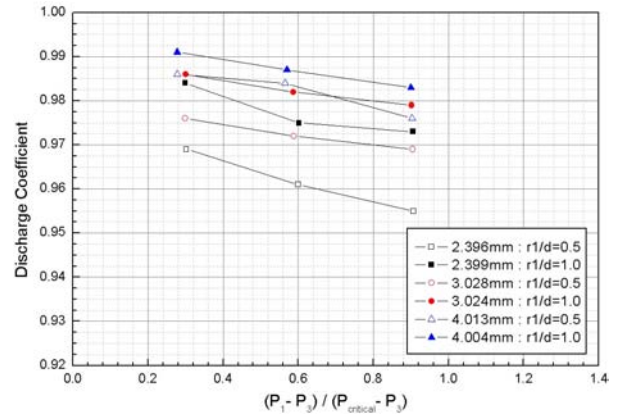


Fig. 10 Variation of C_d with $(P_1-P_3)/(P_{critical}-P_3)$ ($R1/D=0.5$ and $R1/D=1.0$)

5. 결론

본 연구에서는 추진제 공급을 위하여 가압시스템의 가압제어에 적용되는 등근 유입형 오리피스 특성에 대한 연구를 수행하여, 등근 유입형 오리피스에 대하여 압력 무차원수(약 0.2~1.0)에 따른 유량계수를 획득하였다. 오리피스의 직경이 1.4mm에서 5mm 범위이고 유입부 곡률이 약 0.5와 1.0인 경우 등근 유입형 오리피스 유량계수는 0.97 ± 0.02 로 나타났다. 본 연구에서 획득된 데이터는 오리피스/솔레노이드밸브 감압어셈블리로 감압제어되는 가압시스템 설계시 유용한 기초 자료로 활용될 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Elliot Ring, Rocket Propellant and Pressurization Systems, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1964.
- [2] Anon., "Pressurization Systems for Liquid Rockets," NASA Space Vehicle Design Criteria Monograph, SP-8112, October 1975.
- [3] 정용갑, 김유, "극저온 헬륨가스 가압시스템에 대한 온도특성 연구(I)", 한국추진공학회지, 제9권 제3호, 2005.
- [4] 정용갑, 권오성, 조남경, 한상엽, "2단 감압 가압시스템에 대한 연구", 제4회 한국유체공학술대회, 2006.
- [5] 정용갑, 홍문근, 권오성, 조남경, 조인현, "가압제어용 얇은 관형 오리피스 특성", 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007.