

## 압력 릴리프 밸브 스템부 운동 및 유동 연계해석 기법

조남경\* · 신동순\* · 한상엽\* · 김영목\*

### Analysis of Pressure Relief Valve Considering Interaction between Valve Stem Motion and Flow

Nam-Kyung Cho\* · Dong-Soon Shin\* · Sang-Yeop Han\* · Young-Mog Kim\*

#### ABSTRACT

Direct acting pressure relief valve applicable to propellant tank of launch vehicle is modeled in this study. The flow resistance of the partially opened valve is modeled as a function of the distance of the valve stem from the resting position. The position of the valve varies transiently as a function of its mass, the spring force, sliding friction, and the pressure differential. Choking at valve throat and compressibility are considered for the analysis. This study presents systematic analysis method for pressure relief valve applicable to propellant tank of liquid rocket. The results shows transient flow resistance caused by stem motion and the importance of choking at valve throat for pressure relief valve design.

#### 초 록

본 연구에서는 발사체 추진제 탱크에 적용되는 압력 릴리프 밸브에 대한 모델링 방법을 제시하였다. 압력 릴리프 밸브의 유동저항은 밸브 스템의 정지 위치에 대한 이동거리에 의해서 결정된다. 밸브 스템의 위치는 스템의 질량, 스프링의 탄성계수, 마찰저항, 차압 등에 의존하며 일반적으로 시스템 운용 시간에 걸쳐 변하게 된다. 본 연구에서는 이러한 밸브 스템부 운동 및 그에 따른 유동저항의 천이를 제시하였다. 다른 종류의 밸브와는 달리 압력 릴리프 밸브는 일반적으로 밸브 전 후단의 차압이 크기 때문에 밸브목 근처에서 유량이 음속에 의해 제한되는 초킹 현상이 발생한다. 따라서 압력릴리프 밸브 설계 시에는 이러한 초킹 현상을 고려해야 하며 본 논문에서는 초킹을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 결과를 비교하여 제시하였다. 또한 스템부 직경 및 스프링 탄성계수에 의한 밸브의 벤트 성능을 제시하였다.

Key Words: Pressure relief valve (압력릴리프밸브), Valve throat (밸브목), Valve stem(밸브 스템), Choking(초킹), Compressibility (압축성)

#### 1. 서 론

\* 한국항공우주연구원 추진제어팀  
연락처, E-mail: cho@kari.re.kr

모든 밸브에는 유동의 제어를 위한 구동부가

NOMENCLATURE

<p><math>A</math> : area</p> <p><math>A_p</math>: poppit area</p> <p><math>A_o</math>: orifice area</p> <p><math>A_{vc}</math>: vena contractor area</p> <p><math>C_f</math>: stem friction coefficient</p> <p><math>D</math> : diameter</p> <p><math>F_p</math> : pressure force acting on poppet area</p> <p><math>F_f</math> : friction force</p> <p><math>F_i</math> : Initial force due to spring</p>	<p><math>F_s</math> : spring force</p> <p><math>k_s</math> : spring constant</p> <p><math>M_s</math>: stem mass</p> <p><math>P_{up}</math>: upstream pressure</p> <p><math>P_{down}</math>: downstream pressure</p> <p><math>R</math> : radius</p> <p><math>t</math>: time</p> <p><math>X_o</math>: initial spring compression length</p> <p><math>X_s</math>: spool displacement</p>
--	---

장착된다. 구동부는 작동방식(actuating method)에 따라 사람이 구동을 수행하는 수동제어방식(manual control type)과 전기 또는 공압에 의해 구동되는 자동제어방식(automatic control type)으로 나눌 수 있다. 발사체와 같이 고압/대용량의 유동제어가 필요한 곳에서는 자동제어방식이 널리 적용된다[1]. 일반적인 차단밸브나 제어밸브의 경우 구동부(actuator)의 움직임은 유동과 독립적으로 다를 수 있으나, 체크밸브나 릴리프 밸브와 같이 스프링에 의해 작동되는 구동부를 가진 밸브에서는 유동과 구동부의 움직임이 상호 연계되어 있다. 따라서 이들 밸브에서는 구동부와 유동을 상호 연계하여 설계/해석을 수행하여야 한다. 본 논문에서는 릴리프 밸브 설계에 있어서 유동과 유동의 제어를 위한 구동부를 연계 해석하는 방법을 정립하여 향후 체크밸브나 릴리프 밸브 설계 시 활용하고자 한다.

릴리프 밸브는 차압이 비교적 적은 다른 종류의 밸브와는 달리 전후단의 차압이 크기 때문에 밸브몸 근처에서 유량이 음속에 의해 제한되는 초킹 현상이 발생한다. 따라서 압력 릴리프 밸브 설계시에는 이러한 초킹 현상을 반드시 고려해야 한다. 본 논문에서 압력 릴리프 밸브에서의 초킹을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우에 대한 성능해석 결과를 비교하여 제시한다. 또한 체계적인 밸브 설계를 위해 스템부 직경 및 스프링 탄성계

수에 의한 밸브의 벤트 성능을 제시하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 릴리프 밸브의 유동 및 스템 운동 연계 기구

릴리프 밸브는 Fig. 1과 같이 탱크의 압력이 허용압력 이하일 경우 스프링의 힘으로 스펴(spool)의 끝 부분(포핏, poppit)이 밸브 시트(seat)를 눌러서 유동을 차단시키며, 탱크압력이 허용압력 이상으로 증가할 경우 스펴을 들어올려 유체를 배출함으로써 탱크의 압력을 낮추는 기능을 수행한다. 이 때 밸브 시트부에 밀착되어 있던 포핏은 유체의 압력에 의해 단면에 작용하는 힘이 스프링의 장력을 이김으로서 동작하게 된다. 포핏이 동작하면 탱크에 있던 유체가 외부로 방출되게 되고, 이에 따라 탱크의 압력이 낮아진다. 이 경우 포핏의 상승에 의해 형성되는 유체의 흐름면적(개도)이 큰 것이 탱크의 압력저감에 유리하다. 유체가 흐르는 개도면적과 직접적으로 연관되는 것은 시트에 물려있던 포핏이 이동한 거리다[2]. Fig. 2에서 보듯이 포핏의 이동거리( $X_s$ )가 클수록 개도면적(유동면적)이 넓어져서 유동량(배출량)이 커지게 된다. 따라서 릴리프 밸브의 벤트성능을 예측하는데 있어 유체의 전단/후단 압력 및 스템의 설계변수에 따른

포핏의 이동거리( $X_s$ )를 예측하는 것이 필요하다.

### 22 릴리프 밸브 스템의 이동거리

포핏에 작용하는 힘의 관계식(force balance)을 정리하면, 먼저 포핏면에 작용하는 압력하중( $F_p$ )은 전단과 후단의 압력차 및 하중면적을 고려하여 Eq. 1과 같이 표현된다.

$$F_p = (P_{up} - P_{down}) \cdot A_p \quad (1)$$

윗 식에서 하중면적( $A_p$ )은 포핏 하부의 수평 투사면적으로 정의된다.

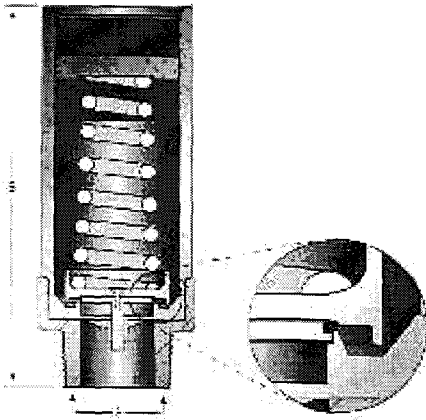


Fig. 1 Schematics of pressure relief valve

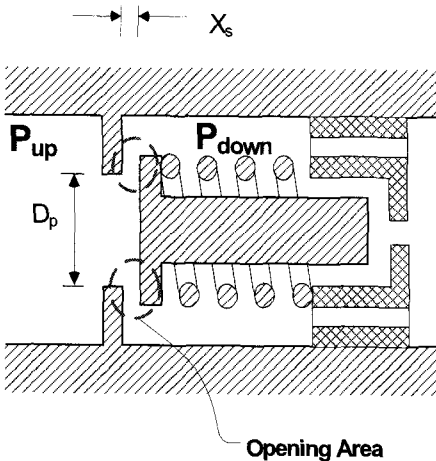


Fig. 2 Stem displacement and related vent area

스프링에 의한 장력은,

$$F_s = F_i + K_s(X_s - X_0) \quad (2)$$

또한 마찰저항에 의한 항력은,

$$F_f = C_f \cdot d(X_s)/dt \quad (3)$$

전체 힘의 관계식(force balance)을 정의하면,

$$F_{net} = F_p - F_f - F_s \quad (4)$$

질량  $M_s$ 을 가진 밸브 스템의 운동은 Eq. 5와 같이 2차 상미분 방정식으로 표현된다.

$$M_s \cdot d^2 X_s / dt^2 = F_{net} \quad (5)$$

Eq. 1 ~ Eq. 4를 Eq. 5에 대입하여 표준 이차 상미분방정식 형태로 표현하면,

$$M_s \frac{d^2 X_s}{dt^2} = -C_f \frac{dX_s}{dt} - K_s X_s + (P_{up} - P_{down}) A_p + K_s X_0 \quad (6)$$

윗 식에서, 일반적으로  $M_s$ ,  $C_f$ ,  $K_s$ 은 상수지만, 전단압력  $P_{up}$  배출유량에 의존하는 변수다. Eq. 6에서 스템의 이동거리  $X_s$ 를 구한 후, 구해진  $X_s$ 로 유동면적, 벤트유량, 전단압력을 계산한다.

### 23 오리피스 관계식

밸브와 같이 유동면적이 감소되는 기구에서의 유동은 Fig 3에 제시된 오리피스 유동으로 묘사할 수 있으며 베르누이 방정식에 의해 Eq. 7과 같이 표현된다[4].

$$\dot{m}_o = C_d A_o \sqrt{2\rho \Delta P} \quad (7)$$

여기서  $C_d$ 는 오리피스 면적과 최소유동면적(vena contractor area)의 비( $A_o/A_{vc}$ )로서 정의되며 일반적으로 0.6에서 0.7 사이의 값을 갖는다. Eq. 7은 초킹이 일어나지 않는 경우에 적용되는 식으로서 만일 최소유동면적(vena contractor)에서 유동속도가 음속의 값에 도달한다면, 유량은 임계치에 도달하여 Eq. 7과 같이 압력차에 의해서 표현되지 못한다. 이 때 초킹 조건은 Eq. 8과 같이 표현된다[5].

$$P_{up}/P_{down} = [(k+1)/2]^{k/(k-1)} \quad (8)$$

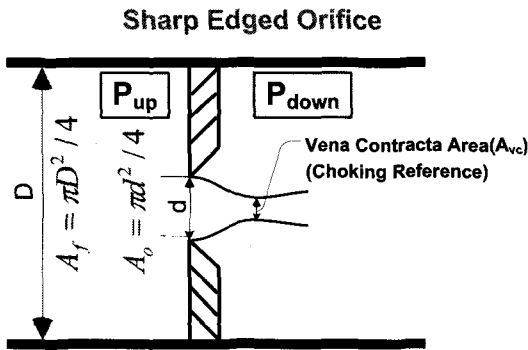


Fig. 3 Schematics of orifice flow

#### 24 릴리프 밸브의 벤트유량 예측

Figure 4는 포핏이 닫혀진 상태와 압력차에 의해 이동된 상태를 보여준다. 여기서 포핏의 이동에 의한 유동면적은 포핏의 이동거리( $X_s$ )의 함수로 계산될 수 있다.

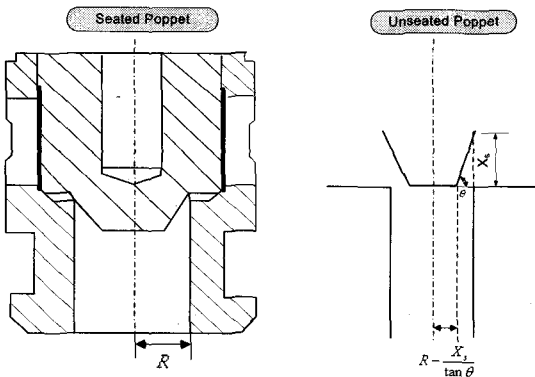


Fig. 4 Flow area with poppet displacement

압력이 가해지는 면적은 포핏의 수평방향 투사면적으로 Eq. 9와 같으며,

$$A_p = \pi R^2 \quad (9)$$

이 때 유동면적은 Eq. 10과 같다.

$$A_o(X_s) = \pi [R^2 - (R - \frac{X_s}{\tan \theta})^2] \quad (10)$$

시트부와 상승한 포핏 사이의 간극을 통과하는 유동은 Eq. 11과 같이 압축성 유동에 대한 오리피스 관계식으로 표현되며,

$$\dot{m} = C_d A_o(X_s) P_{up} \sqrt{\frac{2M}{ZRT_1} \left(\frac{k}{k-1}\right) \left[ (P_{down}/P_{up})^{2/k} - (P_{down}/P_{up})^{(k+1)/k} \right]} \quad (11)$$

이때 포핏을 통과하는 유동이 초킹되었을 경우 (Eq. 8의 조건) 벤트유량은,

$$\dot{m} = C_d A_o(X_s) P_{up} \sqrt{\left(\frac{kM}{ZRT_1}\right) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (12)$$

로 예측된다[6]. 여기서  $C_d$ 는 discharge coefficient로 일반적으로  $0.6 < C_d < 0.7$ 에 해당한다.

### 3. 해석조건

본 논문에 적용된 압력 릴리프 밸브의 기준규격은 Table 1과 같다. 액체산소 탱크에 부착된 릴리프 밸브로서, 5 bar를 유지되고 있는 액체산소 탱크 압력이 열유입 등의 원인에 의해 7 bar로 증가된 경우 대기로 벤트유량을 토출하는 것으로 설정하였다.

초킹 및 압축성의 모델링 포함효과를 파악하기 위해 Table 1의 기준규격에 대하여 Table 2와 같이 압축성을 고려유무, 초킹 고려 유무에 따른 결과를 도출하였으며, 릴리프 밸브의 직경 및 스프링 탄성계수의 변화에 의한 효과를 파악하였다.

해석에는 범용 열유체 해석 프로그램인 SINDA /FLUINT [7]를 이용하였다.

Table 1. Reference specification of pressure relief valve

Parameters	Reference values
Cracking pressure	5 bar
Initial pressure	7 bar
Tank volume	0.3 m <sup>3</sup>
Poppit diameter	2 cm
Poppet area	3.2 cm <sup>2</sup>
Spring constant	452 N/m
Spool friction coefficient	37.1 N · s/m
Poppit angle	60 deg.

Table 2. Analysis variables

No.	Variables	
1	choking	Y
	compressibility	Y
	Valve parameter	$D_{ref}, K_{ref}$
2	choking	Y
	compressibility	N
	Valve parameter	$D_{ref}, K_{ref}$
3	choking	N
	compressibility	Y
	Valve parameter	$D_{ref}, K_{ref}$
4	choking	N
	compressibility	N
	Valve parameter	$D_{ref}, K_{ref}$
5	choking	Y
	compressibility	Y
	Valve parameter	$0.5D_{ref}, D_{ref}, 2D_{ref}$
6	choking	Y
	compressibility	Y
	Valve parameter	$0.5k_{ref}, k_{ref}, 2k_{ref}$

#### 4. 해석결과

Figure 5는 Table 1에 제시된 기준 규격에 대하여 초킹 및 압축성 모델링 포함 유무에 따른 압력천이를 보여준다. 압축성 고려에 따른 차이는 미미한 반면, 초킹 모델링 적용여부에 따라서

5 bar까지 압력이 감소하는 시간이 2배 이상 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

Figure 6은 기준 규격에 대하여 초킹 및 압축성 모델링 포함 유무에 따른 벤트 유량 천이선을 보여준다. 앞에서의 압력저감선도와 호응되는 결과로서 초킹을 고려할 경우 유량이 제한되는 것을 볼 수 있으며 이는 Fig. 7에 제시한 벤트유량과 임계유량의 비에서 보듯이 벤트벨브의 목(vena contractor)에서 초킹이 발생한다. 여기서 임계유량은 Eq. 12로 예측되며, 임계유량에 대한 벤트유량의 비는 마하수와 같은 개념으로 간주될 수 있다 [6].

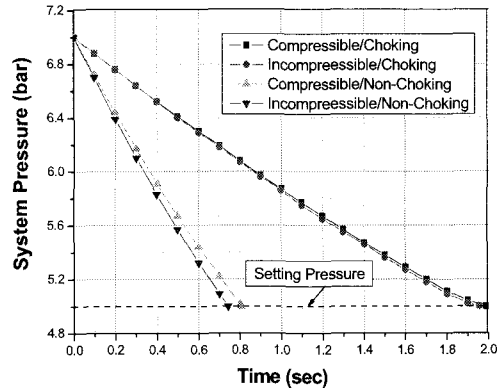


Fig 5. System pressure transient with varying modeling method

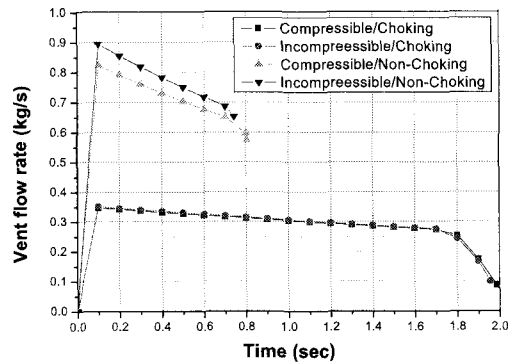


Fig. 6. Vent flow rate transient with varying modeling method

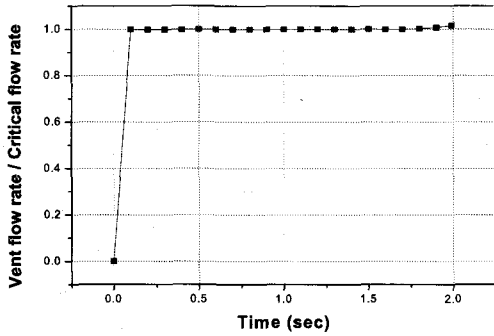


Fig. 7. Ratio of Vent flow rate and critical flow rate

Figure 8은 압축성 및 초킹을 고려한 기준 규격에 대하여 스펴의 포핏부 직경을 변화시킬 경우의 시스템의 압력저감 특성을 보여준다. 포핏부 직경이 커짐으로 인해 시스템의 압력이 급격히 감소하고 Fig. 9에서 보듯이 벤트유량이 커짐을 볼 수 있다. 이는 Fig. 10에 제시된 바와 같이 포핏의 직경이 커짐으로 포핏부에 걸리는 힘이 증가하며, 따라서 포핏의 이동거리가 증가(릴리프 밸브의 유동면적 증가)한데 기인한 것으로 볼 수 있다.

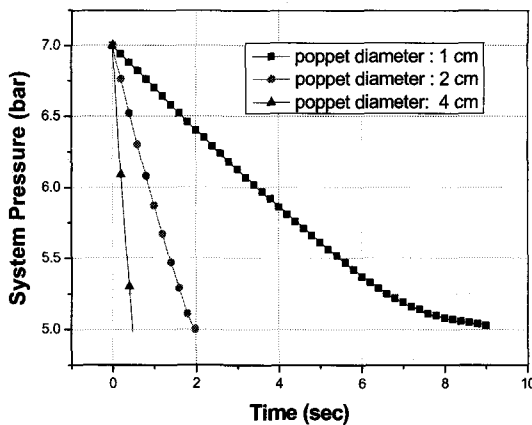


Fig. 8. System pressure transient with varying poppit diameter

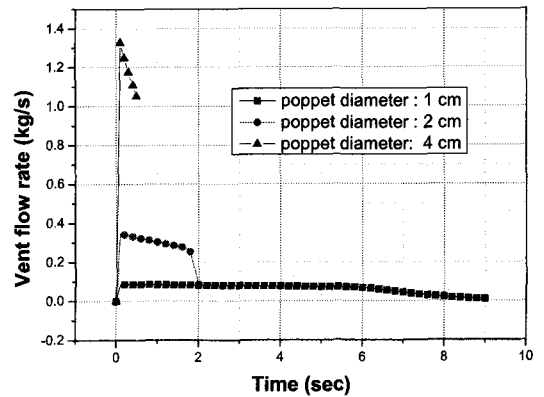


Fig. 9. Vent flow rate transient with varying poppit diameter

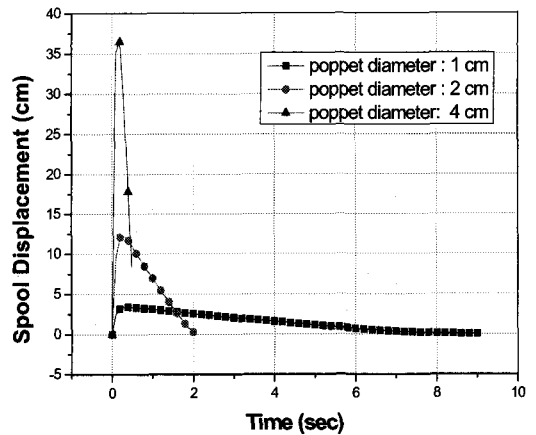


Fig. 10. Spool displacement transient with varying poppit diameter

Figure 11은 압축성 및 초킹을 고려한 기준 규격에 대하여 밸브 스펴의 스프링 탄성계수를 변화시킬 경우의 시스템의 압력저감 특성을 보여준다. 스프링의 강성계수를 1/2로 감소시키면 Fig. 12와 같이 스펴의 이동거리는 증가함에도 불구하고 시스템 압력저감 특성이 유사함을 볼 수 있다. 이는 기준 스프링 탄성계수 경우에 이미 최대유동면적(포핏의 수평투사면적)에서의 초킹상태에 도달하였기 때문에 스프링 탄성계수를

낮추어 스프링의 이동거리를 증가시킨다 해도 벤트유량을 증가시킬 수 없음을 기인한다.

최대유동면적을 발생시키는 스프링의 이동거리는 Eq. 13에서 결정할 수 있다. 이 경우는 스프링의 탄성을 낮추는 것이 벤트 성능향상에 기여하지 못한다.

$$R < \frac{X_s}{\tan\theta} \quad (13)$$

앞에서 본 바와 같이 스템의 이동거리가 큰 것이 벤트성능 향상에 유리하나, 스템의 이동거리는 밸브의 기하학적 형상 제한조건을 만족해야 하므로 이를 고려하여 선정되어야 한다.

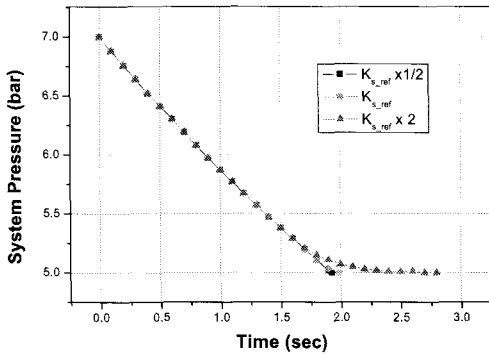


Fig. 11. System pressure transient with varying spring constant

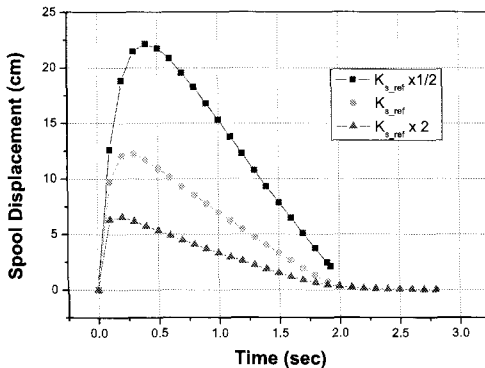


Fig. 12. Spool displacement transient with varying spring constant

## 5. 결 론

본 논문에서는 릴리프 밸브 설계에 있어서 유로부와 유동의 제어를 위한 구동부를 연계 해석 방법을 체계적으로 제시하였다. 압력릴리프 밸브 설계시에는 전후단 압력차가 임계압력을 초과할 경우 발생하는 초킹현상을 반드시 고려하여야 한다. 포핏부 직경이 큰 것이 벤트 성능에 유리하나 스템의 이동거리 제한조건을 고려하여야 한다. 또한 릴리프 밸브의 최대유량조건에서의 스템 이동거리가 고려되어 설계되어야 한다.

## 6. 후 기

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

## 참 고 문 헌

1. Elliot Ring, "Rocket Propellant and Pressurization Systems," Prentice-hill, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
2. Martti Husu et. al., "Flow Control Manual", NELES-JAMESBURY, 1992
3. BLAMINE W. ANDERSEN "The Analysis and Design of Pneumatic Systems", Airresearch Manufacturing Company of Arizona, 1992
4. D.S.MILLER "Internal Flow Systems", BHRA, 1990
5. E. C. Fitch and I. T. Hong, "Hydraulic Component Design and Selection", BarDyne Inc., 2004
6. Blackwell, Wayne W. Calculating Two phase Pressure Drop, Chemical Engineering magazine, 1981
7. Cullimore BA, Ring SG, Johnson DA. SINDA /FLUINT user's manual. Version 4.7, November, 2004.