

공압시스템의 공급능력 예측기법

조남경* · 정용갑* · 신동순* · 조인현*

Estimation of Feeding Performance of Pneumatic System

Namkyung Cho* · Yong-Gahp Chung* · Dong-Soon Shin* · In-Hyun Cho*

ABSTRACT

Pneumatic system is widely applied to ground facility and launcher on-board system. One of the important aspects of pneumatic system is to meet pressure and flow rate requirements of gas consumers. In this paper, a systematic analytical approach for pneumatic system is proposed, which uses and systematically combines previous studies. The proposed analytical method is that pressure/flow calculation using conservation equations are combined with sonic limit check at vena contracta of the components of pneumatic system, which checks the installed components whether they are merely pressure loss elements or flow limiting element of the system. In this paper, gas consumers are categorized and simulated using the proposed method. The results reveal that the feeding performance of general pneumatic system can be properly estimated using the proposed approach.

초 록

공압시스템은 지상설비 및 발사체 공급시스템에 광범위하게 활용되고 있다. 공압시스템의 목적은 수요처에서 요구되는 유량 및 압력을 만족시켜 공급하는 것이다. 본 논문은 기존의 연구결과들을 체계적으로 통합하여 공압시스템 공급능력 해석에 있어 시스템적인 방법을 구축하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위해 보전방정식을 이용한 유량/압력계산과 시스템에 장착된 부품의 유동목에서의 음속확인 방법을 조합된 형태의 공압시스템 예측기법을 제안하였다. 제안된 기법을 이용하여 장착된 부품들이 단순히 압력손실만 발생시키는지 또는 부품 내 유속이 음속이 되어 시스템 유량을 제한시키는지를 구분하고 이를 시스템 해석에 적용하였다. 공압시스템을 공압 수요처의 특성 및 요구조건에 따라 범주화하였으며, 본 논문에서 제안한 기법을 통하여 다양한 범주의 공압시스템을 모사할 수 있고 공급능력을 적절하게 예측할 수 있음을 보였다.

Key Words: Pneumatic system(공압시스템), Feeding performance(공급능력), Choking(질식), Flow rate (유량), Pressure difference(차압), Pressure loss (압력손실)

† 2009년 8월 6일 접수 ~ 2009년 10월 11일 심사완료

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

발사장 지상설비 및 발사체 공급시스템에 있어 압축가스를 이용한 공압시스템은 매우 광범위하게 활용된다[1]. 압축가스의 사용처는 크게 환경제어, 발사체 탱크충전, 압력에 의한 일생성, 기타 이젝터 효과에 의한 진공생성, 극저온 추진체 온도제어 등 특수한 목적을 위해 사용되기도 한다[2].

공압일은 공압 압력에 의한 힘으로서 밸브 및 여러 기계장비를 구동시키는데 사용한다. 또한 발사체탱크 충전을 위한 가스공급은 발사체의 가스탱크를 요구되는 압력으로 충전하는 것이다.

공압을 통한 환경제어는 일반적으로 불활성가스로 수행된다. 퍼지를 통해 충전/배출/배기 라인의 이물질 제거 및 공기, 수분 치환이 이루어지며 발사체 부품이 일정한 온도 및 수분조건을 유지할 수 있게 한다[3]. 엔진에 대한 퍼지는 다음의 3가지 목적을 가지고 수행된다. 첫째, 시험전후에 배관을 불활성 분위기로 만들어 줌으로써 위험상황을 방지한다. 예를 들어 추진제 A가 연소실로 먼저 공급될 때, 추진제 B의 매니폴드로 추진제 A가 역류하는 것을 방지한다. 둘째, 극저온 라인에서 수분이 응축되어 이상 작동이 일어나는 것을 방지하는 역할을 한다. 셋째, 지상연소시험에서 밸브 개폐시 급격한 추진제의 공급을 방지하기 위하여 중단밸브와 매니폴드 사이에 역압을 걸어놓는다.

공압에 의한 가압제어는 액체추진기관에서 추진제 공급방식에 따라서 다르게 적용된다. 액체추진기관에서 사용하고 있는 추진제 공급방식은 가압식과 터보펌프 방식이다. 가압식은 고압가스의 압력으로 추진제 탱크로부터 연소기로 추진제를 공급하며, 터보펌프 공급방식에서는 펌프가 안정적으로 동작하기 위하여 유입되는 액체의 수두(Head)가 동공화(cavitation)현상이 발생하지 않도록 일정한 압력으로 추진제를 가압한다[4].

이젝터로의 고속의 가스분출에 의한 진공생성은 배관이나 공간 내 공기가 빨려 들어오게 함으로서 진공을 생성하는 방법으로서 엔진의 점화계통이나 고고도 시험설비에 널리 응용된다. 또한 헬륨가스를 극저온 추진제 내로 분사를 함

으로써 액체산소의 온도를 직접적으로 저감시키거나, 액체산소를 순환시킴으로써 액체산소의 온도를 제어하기도 한다.

이상에서 언급한 바와 같이 공압시스템은 매우 광범위하게 활용되며, 모든 공압시스템의 적용에 있어서 공압 수요처의(gas consumer)의 요구조건이 존재한다. 수요처의 요구조건은 발사체 부품의 개발과정에서 도출된다. 설정된 수요처의 요구조건은 공압시스템이 만족시켜야 할 공급조건에 해당한다. 특수한 경우를 제외하고 대부분의 공압시스템의 공급능력은 얼마의 압력(힘)으로서 가스를 수요처에 얼마나 빠르게 공급할 수 있는가에 대한 능력으로 표현된다. 공급요구조건은 수요처에 따라서 압력이 중요한 경우와 유량이 중요한 경우로 구분된다. 예를 들어 액추에이터 구동과 같은 압력에 의한 일생성의 경우, 유량보다는 압력이 중요한 요건이 되며 퍼지와 같이 빠르게 주위공기를 치환할 필요가 있는 경우에는 압력보다는 유량이 중요한 조건이 된다. 위험을 방지하기 위한 가스퍼지에 있어서는 불활성 가스를 빠르게 공급함으로써 산소의 체적분율(volume ratio)을 위험치 이내로 낮추는 것이 필요하다[3]. 수요처의 요구조건이 정해지면 공압시스템 설계자는 공압 수요처에 공급되는 유량 및 압력을 정확하게 예측하는 것이 필요하다.

공압시스템은 고압가스가 저장된 압력소스와 공압수요처가 배관으로 연결되며 연결배관에 밸브, 레귤레이터, 오리피스, 필터 등의 부품이 설치되는 형태를 가진다. 이러한 시스템의 일반적인 특징은 설치되는 부품들의 유로면적이 배관의 내경보다 적은 유동 제한부를 다수 포함한다는 것이다. 예를 들어 1 인치 연결배관에 부품들이 설치되는 경우 연결 피팅은 배관과 동일한 1 인치 피팅이 사용되며, 부품의 유로면적은 1 인치 보다 일반적으로 적게 된다. 이렇게 배관내 직경보다 적은 부품을 제한부라 할 수 있다.

시스템 해석에 있어 제한부는 단순히 압력손실만 발생시키는 '차압요소'로 기능할 수도 있고 또는 부품 내 유속이 음속이 되어 시스템 유량을 제한시키는 '유량제한 요소'로 기능할 수 있

다. '차압요소'는 유량에 비례하는 압력손실을 가지게 되고, 해석적으로 압력손실 값을 시스템 운동량 보전식에 적용시켜 유량을 구하게 된다. 반면 '유량제한 요소'는 시스템 전후단 압력차와 압력손실에 관계되는 운동량 보전식이 아닌, 전단압력에만 관계되는 질식(choking) 유동식으로 유량을 구하게 된다. 따라서 정확한 시스템의 유량 및 압력 예측을 위해서는 제한부에 해당하는 부품들이 단순히 압력손실을 유발하는 '차압요소'인지, 아니면 '유량제한 요소'인지에 대한 판별이 필요하다.

기존에 부품단위의 유동에 대해서는 차압요소와 유동질식요소에 대한 많은 연구가 수행되었으나, 시스템을 대상으로 하는 해석에 있어서 각각의 제한부가 어떻게 통합되고 다루어져야 하는지에 대한 연구결과는 많지 않다. 기존의 여러 연구에서 레귤레이터나 오리피스와 같은 부품에서 후단압력과 전단압력의 비가 질식 임계압력 비보다 클 경우에는 질식이 발생하지 않는다고 간주하였다[4-6]. 그러나 유동면적은 부품의 유로에서 축소되어 유동목(vena contracta)에서 최소가 되고, 후단에서 다시 유동면적이 커지는 것을 고려하면, 제한부의 후단압력이 아닌 유동목에서의 속도와 압력이 '유량제한 요소' 판별의 기준이 되어야 한다[7]. 또한 공압시스템 분석에 있어서 오해될 수 있는 내용의 하나는 가스 수요처에 해당하는 sink부 압력과 소스 가스압력의 비가 질식 임계압력비보다 적을 경우 시스템 유동을 질식(choking) 유동으로 간주하는 것이다. 그러나 이 경우에도 실제로 제한부의 최소 유동면적에서 음속에 도달하는지에 대한 분석이 필요하다.

본 논문은 기존의 연구결과들을 체계적으로 통합하여 시스템적인 방법을 구축하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 보전방정식을 이용한 유량/압력계산과 시스템에 장착된 부품의 유동목에서의 음속확인 방법을 조합한 형태의 공압시스템 예측기법을 제안하였다.

2장에서는 먼저 공압시스템의 공급능력을 정의하기 위하여 수요처 요구조건에 따라 공압시

스템을 범주화하여 제시하였다.

3장에서는 공압시스템을 비교적 간단히 해석할 수 있는 링크-노드(link-node) 방식으로 모사하여, 운동량 방정식과 유량제한요소 판별이 통합된 형태의 해석기법을 제시한다. 기존의 유동질식 관련 연구결과를 이용하여 유량제한요소의 판별시 유의할 점에 대하여 상세히 논의한다.

4장에서는 공압시스템의 제한요소를 오리피스로 모사하여 해석한 결과를 제시한다. 4장에서 단일오리피스 시스템 해석은 주로 밸브와 같이 유로면적이 배관직경에 비해 크게 적지 않은 경우를 대상으로 질식이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우의 사례와 특성을 제시하였다. 이중 직렬 오리피스 시스템 해석은 유량제한을 목적으로 유로 면적이 배관직경에 비해 크게 적은 경우를 대상으로 하였으며 하나의 오리피스에서 질식이 발생하였을 때 다른 오리피스에서의 유동특성을 보고자 하였다.

4장의 해석결과를 통하여 3장에서 제시하는 운동량방정식과 유량제한요소 판별이 통합된 형태의 유량예측기법이 공압시스템의 공급능력을 적절하게 예측할 수 있음을 보였다.

2. 수요처 요구조건에 따른 공급시스템 분류

2.1 공압기동 (pneumatic actuation) 압력설정 방식

이 방식은 수요처의 요구유량이 공급유량에 비해 매우 적은 경우로서 요구조건은 압력의 형태로만 주어진다. 발사체 내부의 밸브구동과 같이 공압에 의한 액츄에이터 구동의 경우에 적합한 모델이다. Fig. 1에서 P_s 는 소스부 압력이며 일반적으로 공압시스템에서 레귤레이터 후단에 해당한다. P_1 은 수요처 요구압력, V_1 은 공급시스템의 차단밸브(shutoff valve)에서 수요처까지의 공급라인 부피다. 발사체 내부의 밸브구동에 소요되는 가스량은 공급라인(체적 V_1)에 충전되어 있는 가스량에 비해 매우 적은 양이기 때문에 공급라인 체적(V_1)에 요구압력(P_1)이 충전되는 시간이 공급능력으로 설정된다.

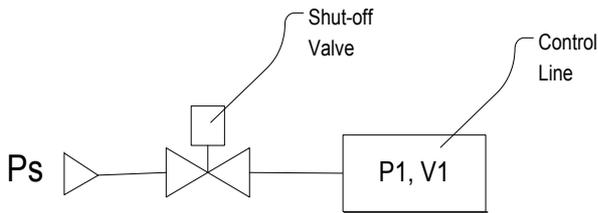


Fig. 1 Supply system for pneumatic actuation

2.2 최대 충전유량 제한 방식

이 방식은 수요처 용기의 충전압력과 함께 최대 충전유량 요구조건이 제시된 경우로서 일반적으로 발사체 탱크에 가스를 충전할 때 제시되는 방식이다. 가스를 일정속도 이상으로 빠르게 충전하면 압축열로 인해 용기에 구조적인 부하가 발생하고, 또한 외기와의 열전달에 의해 압력의 변동이 발생하게 된다. 따라서 공급시스템에 오리피스를 장착하여 요구된 최대충전 유량을 초과하지 않도록 하여야 한다. 오리피스 직경은 후단 압력을 대기압으로 간주하고 제시된 최대 유량 조건을 이용하여 산정한다. 이 방식에서 공급설비의 공급능력은 충전유량 및 충전시간으로 제시된다.

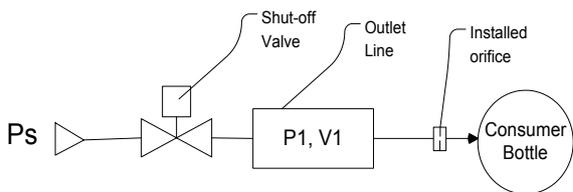


Fig. 2 Supply system for filling with constrained maximum filling rate

2.3 지정된 일정 샘플링 방식

이 방식은 수요처에서 요구되는 유량과 압력이 지정된 경우이다. 가스 수요처는 요구 압력이 유입될 때 요구유량을 공급할 수 있는 등가 오리피스(equivalent orifice)로 간주된다. 등가 오리피스 전단의 압력과 공급유량이 정의되어 있으므로, 요구 공급압력에 압력 소스로부터 등가 오리피스까지의 압력손실을 더한 값으로 공급시스템의 압력소스(P_s) 값을 설정한다. 즉 공급설비

의 공급능력은 압력소스(P_s) 값 및 유량으로 정의된다. 이 방식은 추진제 공급배관 및 엔진의 퍼지, 이젝터에 의한 엔진점화라인 진공생성, 극저온 추진제 온도제어를 위한 헬륨가스 분사 등 고압에서 낮은 압력으로 기체를 방출하는 경우에 주로 적용된다.

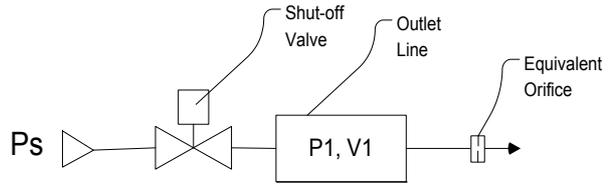


Fig. 3 Designated constant sampling

2.4 감압 일정 샘플링

이 방식은 앞의 경우와 같이 공급시스템에 요구되는 유량과 압력이 정의된 경우이나, 실제 수요처에서 사용하는 압력은, 보다 감압된 압력을 사용하는 경우이다. 공급된 압력을 추가로 감압하기 위하여 수요처를 등가 오리피스로 모사한다. 이 방식은 요구조건으로 제시된 유량을 이용하여 공급시스템의 오리피스 직경을 계산하고 수요처를 모사한 등가 오리피스로 추가로 감압시켜 사용한다. 오리피스를 2단계로 장착한 경우의 특징은 4 장에 상세히 기술하였다. 이 방식은 추진제 탱크의 지상 선가압 또는 저압의 퍼지시스템에 주로 적용된다.

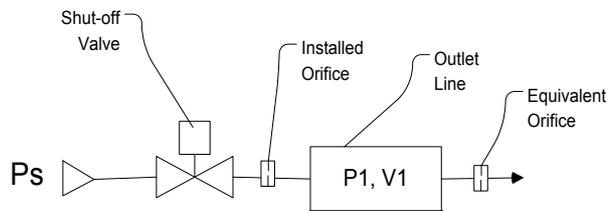


Fig. 4 Reduced pressure constant sampling

3. 시스템 해석기법

3.1 개요

공압시스템은 2장에서 제시한 개략도(Fig. 1~

Fig. 4)와 같이 고압가스 소스와 수요처를 밸브, 오리피스, 그 밖의 부품을 연결한 형태를 가진다. 이들 부품의 유로면적은 일반적으로 배관의 직경보다 적은 제한부가 된다. 시스템 해석에 있어 제한부는 단순히 압력손실만 발생시키는 '차압요소'로 기능할 수도 있고 또는 부품 내 유속이 음속이 되어 유량을 제한시키는 '유량제한요소'로 기능할 수 있다.

본 장에서는 공압시스템을 비교적 간단히 구현할 수 있는 링크-노드(link-node) 방식으로 묘사하여 유량 및 압력계산을 수행하는 방법을 제시한다.

노드(node)는 차별화된 시스템의 특정부분의 부피(개략도에서 V_i)를 표현한 것으로 해당 부피에서의 압력(개략도에서 P_i), 온도, 질량과 같은 특성치를 가진다. 링크는 각 노드의 연결을 표현한 것으로서 유량, 압력손실 등의 특성치로 표현된다.

계산과정을 살펴보면 먼저 유량제한 요소를 '차압요소'로 가정하여 3.2에 제시된 기본방정식을 적용하여 유량을 구하고, 다음에 3.3에서 제시된 방법과 같이 구해진 유량이 제한요소 내로 흐를 때 제한요소의 유동목(vene contracta)에서 유속이 음속이 되어, 해당 제한요소가 시스템 유량을 제한시키는 '유량제한요소'로 기능하는지를 판별한다.

3.2 기본방정식

일정한 부피(arbitrary volume, i)를 가지고 표면(j)으로부터 유입/배출 유동을 포함하는 적분 형태의 질량보전, 운동량 보전, 에너지 보전을 적용하면[8, 9],

$$\frac{\partial m_i}{\partial t} = \sum_j \rho_j v_j A_j = \sum_j \dot{m}_j \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{m}_i}{\partial t} = \frac{A}{L} \left((P_{in} - P_{out}) - \left(\frac{fL}{D} + k \right) \frac{\dot{m}^2}{2g\rho A^2} \right) - A\rho g/g_c \sin(\theta) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} = + \sum \dot{m}_{in} h_{in} - \sum \dot{m}_{out} h_{out} + \dot{q} \quad (3)$$

본 수식 전개에 사용되는 기호는 다음과 같다.

m : 질량	P : 압력
\dot{m} : 질유량	f : 배관압력손실
ρ : 밀도	k : 부품압력손실
v : 속도	g_c : 중력변환계수
A : 유동면적	θ : 중력벡터각
D : 유동직경	h : 엔탈피
L : 유동길이	\dot{q} : 열전달량
e : 에너지	A_o : 오리피스 개구면적

기본방정식은 아래와 같이 4개의 변수를 가지게 되며,

- ① 밀도 ρ , 또는 질량 ρV
- ② 속도 v , 또는 유량 \dot{m} , 또는 모멘텀 ρv
- ③ 에너지 e , 또는 엔탈피 $h = e + P/\rho$, 또는 온도 $T = fn(e)$ or $fn(h)$
- ④ 압력 P

위의 Eq. 1~Eq. 3의 보전방정식에서 3개의 방정식이 도출되고, Eq. 4의 상태방정식에서 4번째 방정식이 도출된다.

$$P = fn(h, \rho) \quad (4)$$

주어진 노드(node)의 체적 내에서 질량과 에너지(온도)를 알면 상태방정식에서 압력을 구할 수 있다. 유량은 차압에 의해서 계산되므로 구해진 노드의 압력값과 Eq. 2의 모멘텀 방정식을 이용하여 계산한다. Eq. 2에서 f 는 배관의 마찰력에서 일어나는 적은 압력손실이며 k 는 부품의 유동면적 및 형상등에 의해 결정되는 경험적인 압력손실 계수로서 주로 부품 제작사로부터 얻을 수 있다. 일반적으로 사용되는 칼날형(sharp edged) 오리피스의 압력손실계수 k 는 오리피스 압력손실 계수로서 Re수가 2500인 조건에서,

$$k = \left(2.72 - \frac{A_o}{A} \left(\frac{4000}{Re} \right) \right) \left(1 - \frac{A_o}{A} \right) \left(\left(\frac{A}{A_o} \right)^2 - 1 \right) \quad (5)$$

로 알려져 있다 [10].

여기서 A 는 배관 내부 유동면적이고 A_o 는 오리피스 면적이다. 위의 식은 비압축성 유동의 경우에 대한 경험식으로서 압축성유동의 경우에는 Eq. 5의 k 에 오리피스 전단의 밀도(ρ_{up})와 전후 단 평균 밀도(ρ_{avg})의 비(ρ_{up}/ρ_{avg})를 곱하여 보정한다. 여기서 ρ_{avg} 는

$$\rho_{avg} = (\rho_{up} + \rho_{down}) \quad (6)$$

로 정의된다[11]. 시스템 계산과정을 Fig. 5에 도시하였다[9]. 계산순서는 첫째, 초기조건(IC) 및 경계조건(BC)을 가지고 Eq. 1의 질량 보전식에서 노드의 질량을 예측하고, Eq. 3의 에너지 보전식으로부터 에너지(온도)를 계산한다. 계산된 질량 및 에너지 값을 상대방정식에 전달한다. 둘째, 상대방정식에서 압력 데이터를 도출하여 Eq. 2의 운동량 방정식에 제공한다. 운동량 방정식에서 압력데이터를 입력하여 유량값을 계산한다. 셋째, 계산된 유량값을 질량 보전식과 에너지 보전식에 전달하여 해당 노드의 질량 및 에너지(온도)를 갱신한다.

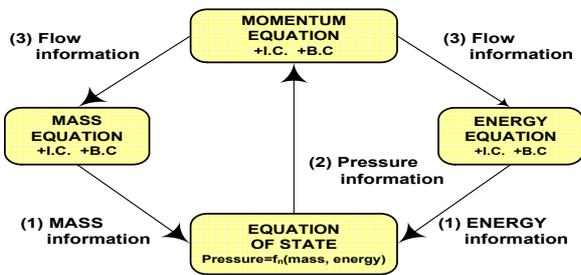


Fig. 5 The four cornerstone equations and the flow information between them

3.3 유량제한요소 판별

일반적인 공압 공급시스템은 Fig. 6과 같이 레귤레이터, 차단밸브, 체크밸브, 오리피스 등의 부품으로 이루어져 있으며 각 부품들은 내부에 유

동면적이 최소가 되는 유동제한 부분을 가지고 있다. 일반적으로 오리피스 개구 (orifice opening)가 최소유동 면적을 갖는 부분이 되어야 하나 레귤레이터나 밸브에 최소유동 면적을 갖는 밸브목(valve throat)을 가지는 경우도 있다. 이렇게 유동제한 영역이 존재하거나 낮은 압력으로 공급되는 경우에는 유동제한이 발생하는 위치에서의 속도가 음속을 넘을 수 없다는 제한 조건이 추가된다[4]. 일단 가스의 속도가 이러한 임계속도에 도달하게 되면, 유량은 Eq. 2에서 제시된 것과 같이 차압에 의해 정해지는 것이 아니라 음속한계에 의해 좌우되며 이 경우 유량은 질식(choking) 되었다고 할 수 있다.

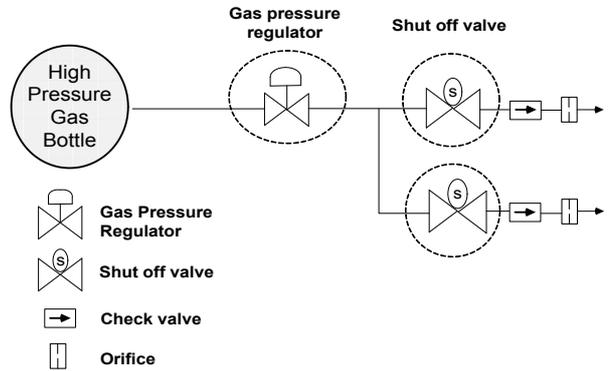


Fig. 6 Typical compressed gas supply system

유동제한 영역에서 질식될 경우 유량은 후단 압력에 상관없이 유량이 일정하게 된다. 각 유동 제한요소는 오리피스로 모델링 할 수 있다[5, 6]. Fig. 7은 오리피스 유동의 개략도를 보인다. 오리피스 후방에 최소 유동면적을 갖는 유동목

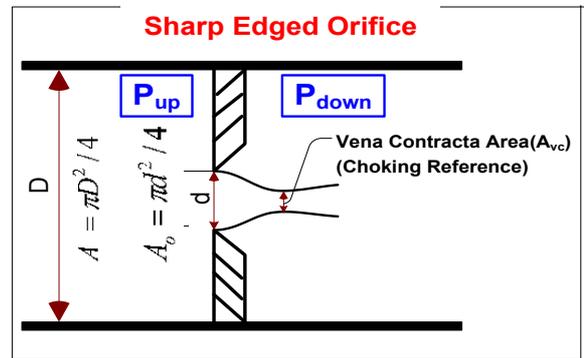


Fig. 7 Schematics of orifice flow

(vena contracta)이 존재하며 일반적으로 오리피스 직경의 60 - 90% 에 해당한다[12].

오리피스로 표현된 제한요소의 유동목(vena contracta)에서 유동이 음속에 도달했는지의 여부를 파악하기 위해서는 유동목 면적 A_{vc} 를 구해야 한다. A_{vc} 는 유량계수 c_d 와 관련되어 있다. c_d 는 수축계수 c_c 와 속도계수 c_v 의 곱으로 ($c_d = c_c \cdot c_v$) 표현된다. 여기서 c_v 는 속도 프로파일의 불균일성에 대한 보정치를 대표하는 계수로서 0.98 정도의 값을 가진다[10]. c_c 는 유동목(vena contracta, A_{vc})의 면적과 오리피스 면적 (A_o)의 비로서

$$c_c = \frac{A_{vc}}{A_o} = \left(\frac{A}{A_o} \right) \left(\frac{1}{1 + \sqrt{k}} \right) \quad (7)$$

표현된다[10].

시험을 통하여 c_d 를 알 경우 A_{vc} 는 수축계수 c_c ($c_c = c_d/0.98$)에 오리피스 면적 A_o 를 곱하여 구할 수 있고, 경험적인 c_d 가 없을 경우 Eq. 5로부터 압력손실계수 k 를 구하고 Eq. 7의 우측항을 이용하여 A_{vc} 를 구한다. 다음에 3.2절의 운동량 보존방정식으로부터 얻은 시스템 유량 \dot{m}_s ($\dot{m}_s = \rho_{vc} A_{vc} V_{vc}$)로부터 유동목에서의 유속 V_{vc} 를 얻고 이 값을 음속과 비교하여 오리피스의 질식발생 여부를 판별한다. 여기서 유동목에서의 밀도 ρ_{vc} 는 근사적으로 ρ_{down} 로 간주한다[11].

유동목에서의 질식 발생 여부는 유동목에서의 압력으로도 판별할 수 있다. 앞에서 구한 유동목에서의 유속 V_{vc} 와 베르누이 방정식으로부터 유동목에서의 압력 P_{vc} 를 구할 수 있다. 오리피스 개구에서의 등엔트로피 팽창을 가정하면 유동목(vena contracta)과 전단압력의 비가(P_{vc}/P_{up}) Eq. 8과 같은 경우 질식이 발생한다[4].

$$\frac{P_{vc}}{P_{up}} < \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (8)$$

여러 문헌에서 오리피스에서의 압력손실이 후류에서 회복되지 않는다고 가정하여[5, 6] (P_{vc}/P_{up})대신 후류압력(P_{down}/P_{up})을 이용하여 질식 여부를 판별하나, 일반적으로 유동목에서의 압력은 후류에서 회복되어 증가하므로 ($P_{vc} < P_{down}$)[7] 반드시 최소유동 면적인 P_{vc} 를 기준으로 질식여부를 판별하여야 한다[7, 10].

질식이 발생한 경우의 유량식은[4],

$$\dot{m} = c_d A_o B \frac{P_{up}}{\sqrt{T}} \varphi \left(\frac{P_{vc}}{P_{up}} \right) \quad (9)$$

$$\varphi \left(\frac{P_{vc}}{P_{up}} \right) = \left(\frac{2}{r+1} \right)^{1/(r-1)} \sqrt{\frac{r}{r+1}} \quad (10)$$

이다. Eq. 9에서 A_o 는 오리피스 개구의 면적이며 ($A_o = 0.785 d_o^2$), B 는 상수($B = \sqrt{2/R}$), c_d 는 앞에서 정의한 유량계수다.

만일 요구요량이 주어지고 이를 만족시키기 위한 오리피스 직경을 계산할 경우는 Eq. 9를 이용하면,

$$d_o = \sqrt{1.27 \cdot \frac{\dot{m} \cdot \sqrt{T}}{c_d \cdot B \cdot P_{up} \cdot \varphi(P_{vc}/P_{up})}} \quad (11)$$

로 표현된다.

3.3 질식제한을 고려한 유량예측

Figure 8은 초킹 제한을 고려한 유량예측 절차를 보여준다. 먼저 Fig. 5에 제시한 과정에 의해 기본방정식에서 시스템 유량을 계산한다. 이와 함께 유동면적이 최소로 되는 부품의 유동목(vena contracta)에서 유량이 음속에 의해 제한되는 임계압력비(Eq. 8)에 도달하는지의 여부를 확인한다. 만일 임계압력비에 도달했을 경우 Eq. 9에서 제시한 질식유량을 시스템 유량으로 설정한다. 임계압력에 도달하지 않을 경우에는 기본

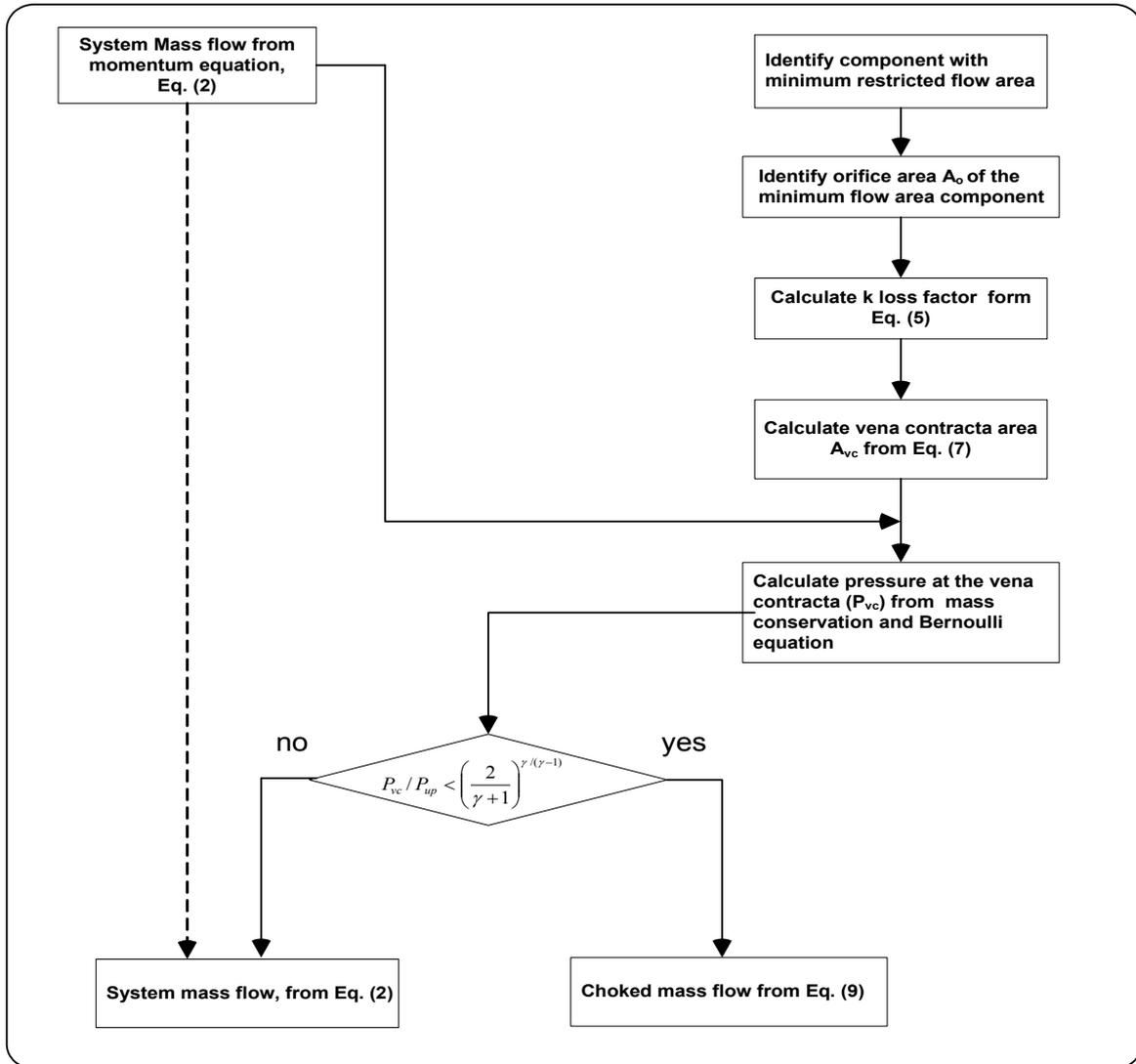


Fig. 8 Flow estimation procedure considering choked restriction

방정식에 의해 예측된 유량이 시스템 유량이 된다.

4. 오리피스 해석

4.1 개요

공압부품은 오리피스로 모델링 될 수 있음을 고려하여[5, 6], 단일 오리피스와 이중 직렬 오리피스 해석을 수행하였다. 본 장에서 공압시스템의 부품들을 오리피스로 모사한 것은 대부분의 부품들은 배관 내경보다 적은 유로면적과 최소

유동 면적(vena contracta)을 가지고 있으며, ‘차압요소’ 또는 ‘유량제한 요소’로 기능할 수 있다는 점에서 이와같은 특성을 가진 오리피스로 간략화(simplify)하여 분석하는 개념이다. 해석에 있어 오리피스 직경을 변화시킨다는 것은 부품의 유로직경을 변화시킨다는 것과 정성적으로 대응되는 것으로 가정하였다.

본 장에서 제시한 오리피스해석은 앞의 3.2절에서 제시한 보전방정식을 이용하여 비교적 간단히 구현할 수 있는 링크-노드방식의 유량/압력계산과 3.3절에서 제시한 유동목에서의 음속확

인 방법이 조합되어 시스템 유량과 압력이 도출됨을 확인하고, 3장에서 논의된 내용들을 검증함을 목적으로 하였다.

4.2절의 단일 오리피스 해석은 주로 밸브 등 유로면적이 배관직경에 비해서 크게 적지 않은 경우를 모사하였다. 여기서 질식이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우의 사례와 특성을 제시하였다.

4.3절의 이중 직렬 오리피스 해석은 유량제한을 목적으로 유로면적이 배관직경에 비해 크게 적은 부품의 경우를 모사한 것이며, 하나의 오리피스에서 질식이 발생하였을 때 다른 오리피스에서의 유동특성을 보고자 하였다. 4.3 절의 계산결과는 이중오리피스를 설치하여 시험을 수행한 참고문헌[13]의 결과와 정성적으로 유사한 경향을 보였다.

해석에는 링크-노드 방식의 범용 열유체 해석 프로그램인 SINDA/FLUINT[14]를 이용하였다. 해석에는 3.2절에서 장에 제시된 기본 보전방정식과 3.3 절의 유량제한요소 판별식이 적용되었다. 또한 질식에 의한 유량제한을 명확하게 파악하기 위해 제한부(오리피스)에서 임계유량비(시스템유량/질식유량)를 계산하였다. 해석에 적용된 오리피스의 유량계수(c_d)는 일반적인 값인 0.7을 적용하였다.

4.2 단일 오리피스 해석

Figure 9는 단일 오리피스 해석 개략도이다. 44 bar 소스 압력을 내경 25 mm 배관을 통해 대기압(1 bar)으로 질소가스를 배출하는 유동을 모사하였다. 오리피스의 직경을 19 mm에서 24 mm까지 변화시키면서 유동특성을 파악하였다.

Figure 10은 오리피스 개구 직경에 따른 유량

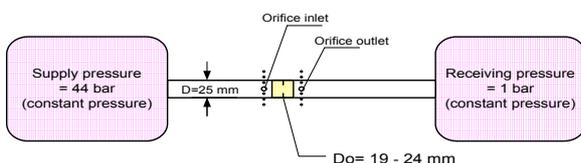


Fig. 9 Schematic diagram of single orifice flow analysis

및 오리피스 유동목(vena contracta)에서의 임계유량비(시스템유량/질식유량)이다. 임계유량비는 질식 발생 여부나 질식발생까지의 여유를 표현하는 변수로서, 질식이 발생할 경우 시스템 유량은 임계유량값과 동일하여 임계유량비가 1이 된다. 25 mm 내경의 파이프에 대해 오리피스 개구 직경이 22 mm 까지는 임계유량비가 1보다 적어서 질식이 발생하지 않고 21 mm 가 되었을 때 유동목(vena contracta)에서 임계유량비가 1인 질식이 발생함을 볼 수 있다. 본 절의 단일 오리피스 해석은 주로 밸브와 같이 유로면적이 배관 직경에 비해서 크게 적지 않은 경우를 대상으로 하는 것으로서 내경 25 mm (1 inch)에 설치된 유로면적 21 mm의 밸브에도 질식이 발생함을 확인할 수 있었으며 이는 향후 공압시스템 부품 선정 시 고려되어야 하는 사항으로 판단된다.

Figure 11은 압력소스 및 오리피스 전후단의 압력, 그리고 유동목(vena contracta)에서의 압력을 보여준다. 오리피스 개구 직경이 커짐에 따라 유량증가에 따른 차압의 커지며 이에 따라 오리피스 입구 압력이 감소함을 보여준다.

Figure 11에서 오리피스 출구압력(orifice outlet pressure)과 유동목(vena contracta)에서의 압력이 차이가 있음을 볼 수 있다. Eq. 8의 판별식에서 보면 질소가스가 유동제한부에서 질식이 발생하는 임계 압력비는 약 0.53 ($((2/(Y+1))^{Y/(Y-1)} \approx 0.53)$) 이며, 오리피스 후단을 기준으로 한 압력비(P_{down}/P_{up})가 아닌 유동목 압력을 적용한 압력비(P_{vc}/P_{up})를 기준으로 판별해야 질식여부를 바르게 판단할 수 있음을 알 수 있다. 질식이 발생한 경우에는 오리피스 전후단 압력차가 매우 큼을 볼 수 있는데 이는 오리피스에서 후단에 보내는 유량이 제한됨에 따라 후단압력을 상승시키지 못한 데 기인한다. 공압 시스템에서 밸브 등의 부품을 선정할 때 최소 유동면적이 충분하지 못하여 질식이 발생할 경우, 큰 차압이 발생하여 공급압력 요구조건을 만족시키지 못할 수 있음을 알 수 있다.

본 절의 해석을 통하여 가스 수요처에 해당하는 대기압력과 소스 가스압력의 비가 44로 매우

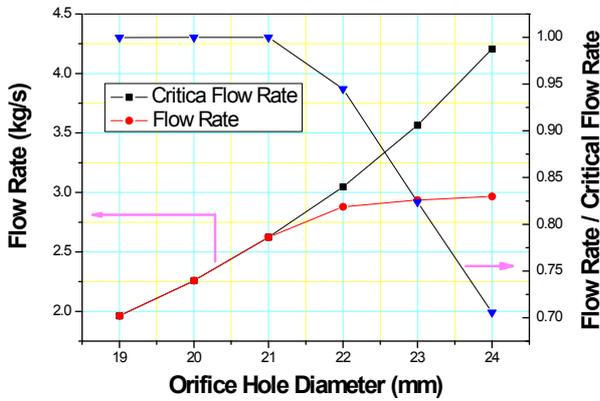


Fig. 10 System flow rate and critical mass flow ratio at vena contracta with varying size of orifice (single orifice)

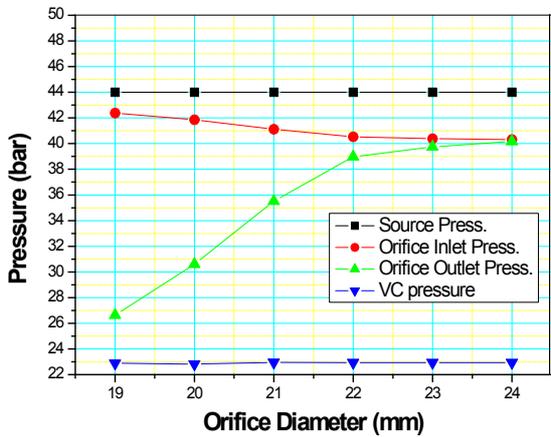


Fig. 11 Pressures of orifice flow with varying size of orifice (single orifice)

크에도 불구하고 유동질식이 발생하지 않는 영역이 존재함을 알 수 있다. Fig. 11에서 오리피스 직경이 적은 경우에 오리피스 전단 압력이 소스압력과 근접하게 된다.

4.3 이중 직렬 오리피스

Figure 12는 2중 직렬 오리피스 해석 개략도이다. 44 bar 소스 압력을 내경 25 mm 배관을 통해 대기압(1 bar)으로 질소가스를 배출하는 유동을 모사하였다. 1차 오리피스는 6 mm로 고정하였고 2차 오리피스 직경을 4 mm에서 9 mm까지 변화시키면서 해석을 수행하였다.

Figure 13에서 2차 오리피스는 실제 시스템 유량과 임계유량의 비가 1인 상태로 항상 질식

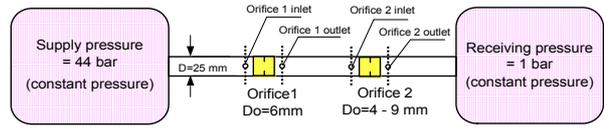


Fig. 12 Schematic diagram of two orifices installed in series

이 발생하며 1차 오리피스는 2차 오리피스 직경이 6 mm 이하일 경우(1차 오리피스의 직경보다 적을 경우) 질식이 되지 않음을 알 수 있다.

Figure 14에서 시스템유량 및 각 오리피스에서의 임계유량값을 보면 2차 오리피스가 6 mm 이하(1차 오리피스의 직경보다 적을 경우)일 경우에는 2차 오리피스에 의해 유량이 제한되고, 2차 오리피스가 7 mm 이상일 경우(1차 오리피스의 직경보다 클 경우) 1차 오리피스에서 질식이 발생하며 시스템 유량, 1차 오리피스 임계유량, 2차 오리피스 임계유량은 모두 동일한 값을 가진다. 즉 2차 오리피스의 임계유량이 1차 오리피스 토출유량으로 수렴하는 특성을 보인다. 이는 1차 오리피스 후단(2차 오리피스 전단) 압력과 관계된다. 이 부분의 압력은 1차 오리피스로부터의 유입 유량과 2차 오리피스로의 토출유량의 균형에 의해서 결정된다. 그런데 만일 유입유량이 토출유량 보다 커서 압력이 증가하면 Eq. 9에서 보듯이 2차 오리피스로의 임계유량이 증가하며 이는 2차 오리피스 전단압력을 낮추게 된다. 반대로 1차 오리피스로부터의 유입유량이 2차 오리피스로의 토출유량보다 적어서 압력이 감소하면 다시 2차 오리피스로의 토출유량은 감소하여 결국 평형압력에 도달하게 되고 시스템 유량과 1차 오리피스 임계유량, 2차 오리피스 임계유량이 모두 동일하게 된다.

Figure 15는 2중 직렬 오리피스 시스템의 각 부분 압력선도를 보인다. 앞의 4.2절의 단일 오리피스의 결과와 비교하면 2차 오리피스 장착에 의해 수요처로 공급되는 압력이 크게 감소함을 볼 수 있다. 2차 오리피스의 직경이 증가할수록 1차 오리피스 후류 유동저항이 적어져서 2차 오리피스 전단압력이 감소하며 2차 오리피스 후단 압력은 약간 증가함을 볼 수 있다.

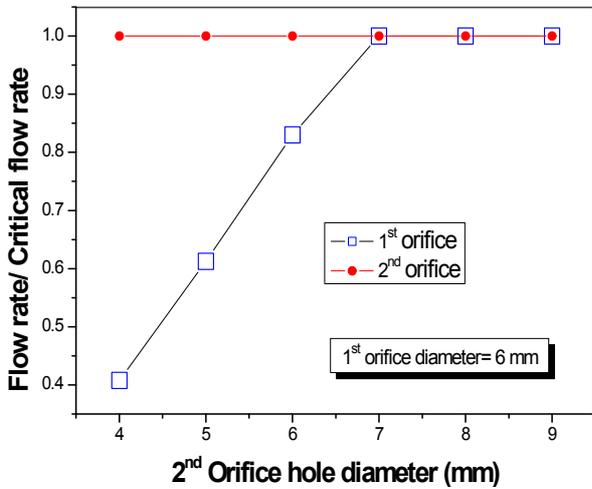


Fig. 13 Critical flow ratio with varying 1st and 2nd orifice size (2 orifices in series)

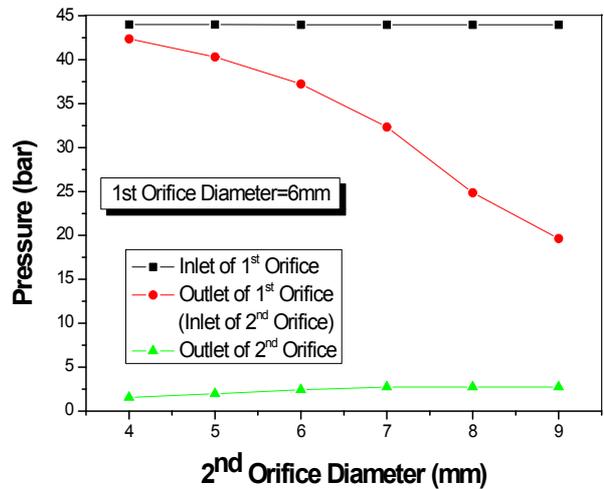


Fig. 15 Pressures of orifice flow with varying size of orifice (2 orifices in series)

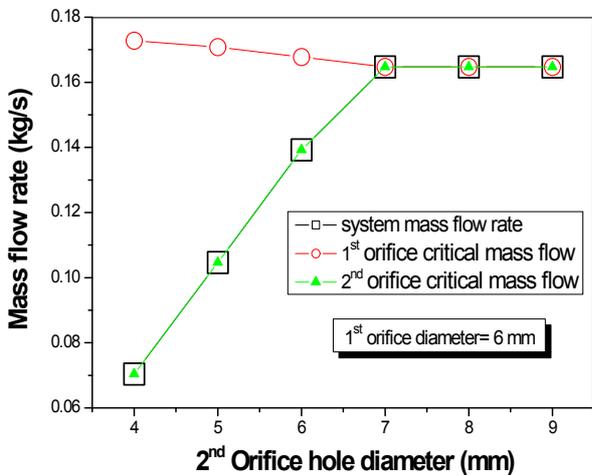


Fig. 14 System and critical mass flow rate (2 orifices in series)

Figure 15에서 2차 오리피스가 1차 오리피스보다 충분히 적을 경우, 1차 오리피스 출구압력(2차 오리피스 입구압력)이 공급시스템 소스압력과 유사하게 수렴한다. 2장을 참조하여 수요처를 요구유량을 공급할 수 있는 등가 오리피스(equivalent orifice)로 본다면 '지정된 일정 샘플링'의 경우를 모사한다고 할 수 있다.

반대로 2차 오리피스가 1차 오리피스에 비해 충분히 클 경우 1차 오리피스에 의해 유량을 설정하고 2차 오리피스에 의해 압력을 추가로 낮추어 수요처에 공급하는 '감압 일정 샘플링'을

모사한다고 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 기존의 연구결과들을 체계적으로 통합하여 공압시스템 공급능력 해석에 있어 시스템적인 방법을 구축하는데 목적으로 하였다.

이를 위해 보존방정식을 이용한 유량/압력계산과 시스템에 장착된 부품의 유동목에서의 음속확인 방법을 조합한 형태의 공압시스템 예측기법을 제안하였다.

제안된 방법을 이용하여 공압시스템 내 부품에서 질식이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우를 구분할 수 있고, 이를 고려하여 시스템의 공급유량 및 압력을 예측할 수 있음을 보였다.

또한 하나의 제한 요소에서 질식이 발생했을 때 다른 제한요소가 시스템 특성에 미치는 영향을 보였으며, 본 기법이 다양한 유형의 공급시스템에 대해 공급능력을 예측할 수 있음을 보였다.

본 논문의 연구내용은 향후 발사장 지상설비 및 압축가스를 이용하는 다양한 발사체 시스템 개발에 있어 직접적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

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", Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1964
2. Vehicle and launch complex functional description, pneumatic distribution systems SPACE DIVISION of CHRYSLER, 1964
3. Masashi Mizukami Griffin P. Corpening, et. al., "Linear Aerospike SR-71 Experiment (LASRE): Aerospace Propulsion Hazard Mitigation Systems", NASA/TM-1998-206561, 1998
4. Liepmann HW, Roshko A. "Elements of gas dynamics", New York: Wiley, 1962
5. El Golli Rami et. al. "Modelling of a pressure regulator", International Journal of Pressure Vessels and Piping 84, 2007, pp. 234-243
6. Xue-Song Wang, "Modeling and self-tuning pressure regulator design for pneumatic-pressure - load systems", Control Engineering Practice 15, 2007, pp.1161-1168
7. Floyd D. Jury, "Fundamentals of Gas Pressure Regulation", Technical monograph 27, Fisher Control, 1972
8. AGE 82 L.J. Agee, "RETRAN Thermo-hydraulic Analyses: Theory and Applications", Progress in Nuclear Energy, Vol. 10, No. 1, 1982, pp.19-67
9. Nik Popov, Basic Equations for Thermalhydraulic Systems Analysis, www.nuceng.ca/ep718/chap2.pdf
10. W.B. Hooper, "Calculate Head Loss Caused by Change in Pipe Size," Chemical Engineering, Nov 7, 1988, pp.89-92
11. "Duct Systems," Section 405.4, Fluid Flow Division of General Electric, November 1969
12. 정용갑, 홍문근, 권오성, 조남경, 조인현, "가압제어용 얇은 관형 오리피스 특성" 제8회 우주발사체기술 심포지움, 2007
13. 정용갑, 김유, "극저온 헬륨가스 가압시스템에 대한 온도특성연구(I)", 한국추진공학회지 제9권 제3호, 2005, pp.66-73
14. SINDA/FLUINT User's manual, C&R Technology, 2008, www.crtech.com