

추진제탱크 가압용 솔레노이드밸브의 작동특성 분석 및 해석

장제선*[†] · 김병훈* · 한상엽*

Analysis of Dynamic Characteristics and Performance of Solenoid Valve for Pressurization Propellant Tank

Jesun Jang*[†] · Byunghun Kim* · Sangyeop Han*

ABSTRACT

A 2-way solenoid valve regulates to maintain the pressure of ullage volume of propellant tanks when the command is given by control system for the liquid-propellant feeding system of space launch vehicle. The simulation model of solenoid valve for pressurization is designed with AMESim to verify the designs and evaluate the dynamic characteristics and pneumatic behaviors of valve. To validate a valve simulation model, the simulation results of their operating durations of valve by AMESim analysis are compared with the results of experiments. Using the model, we analyze performance of valve; opening/closing pressure, operating time on various design factors; shape of control valve seat, basic valve seat, rate of sealing diameter. This study will serve as one of reference guides to enhance the developmental efficiency of ventilation-relief valves with the various operating conditions, which shall be used in Korea Space Launch Vehicle-II.

초 록

우주발사체 추진기관 공급계에서 2-way 솔레노이드밸브는 제어시스템의 명령에 의해 추진제 탱크를 가압하여 탱크내의 압력을 조절한다. 가압용 솔레노이드밸브의 제작에 앞서 설계검증 및 기본적인 작동특성을 분석하기 위해 AMESim상용코드를 이용하여 해석모델을 수립하였다. 입구압력에 따른 작동시간을 시험결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 솔레노이드밸브 모델을 이용하여 설계변수인 컨트롤 밸브의 시트 직경, 주 밸브의 시트 직경, 실링 직경 비에 대해 밸브의 동특성 해석을 수행하였다. 해석을 통해 밸브의 개폐작동시간, 작동성능, 개폐압력을 예상하였다. 본 연구 결과는 한국형 발사체 공급계 가압용 솔레노이드밸브의 설계/해석능력을 확보하고 밸브의 개발과정에서 효율성을 높일 수 있으며 파생형 밸브의 설계 및 선행연구에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words: AMESim.(아메심 상용코드) Dynamic Characteristics(동특성), Solenoid Valve(솔레노이드밸브), Pneumatic Valve(공압밸브), Propellant Tank(추진제탱크)

* 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: aerototoro@kari.re.kr

우주발사체 추진기관 공급계에서 솔레노이드 밸브는 액체 추진로켓의 추진제 탱크 가압시스템을 구성하고 밸브를 구동하기 위한 공압구동용 밸브로 사용된다. 2-way 솔레노이드밸브는 제어시스템의 명령에 의해 추진제 탱크를 가압하여 탱크내의 압력을 조절한다. 본 연구에서는 유즈노이(Yuzhnoye)사에서 설계한 가압용 솔레노이드 밸브의 설계검증 및 작동성능을 분석하였다[1]. 또한 AMESim 동특성 상용툴을 이용하여 밸브 모델을 구성하였다. 솔레노이드밸브 모델을 이용하여 설계변수인 컨트롤 밸브의 시트 직경, 주 밸브의 시트 직경, 실링 직경 비에 대해 밸브의 동특성 해석을 수행하였다. 해석을 통해 밸브의 개폐작동시간, 작동성능, 개폐압력을 예상하였다.

2. 가압용 솔레노이드밸브의 규격 및 설계 모델

2.1 밸브 규격 및 설계 모델

가압용 솔레노이드밸브의 설계에 대한 초기규격은 표 1과 같다. 압력은 절대압으로 나타내었다. 그림 1에서 작동원리 및 해석을 위해 밸브를 간단하게 도식화하였다.

Table 1. 설계 규격

Type	Solenoid,
Working medium	Helium, nitrogen, air
Working temperature	70 ~ 300 K
Working pressure	2 ~ 23 MPa
Flowrate v	1.9~2.1
Conditional diameter of through passage section	0.012
Response time	≤ 0.25 s
Weight of the valve	≤ 2.2 kg

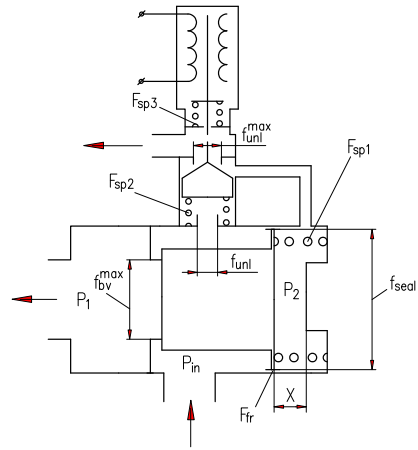


Fig. 1 2-way 솔레노이드밸브 설계 구성도

2.2 가압용 솔레노이드밸브 모델링 및 검증

AMESim을 이용한 2-way(가압용) 솔레노이드 밸브의 모델링을 수행하였다. AMESim (Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering System)은 유공압시스템의 모델링을 통해 동특성 시뮬레이션 및 해석에 유용하게 이용할 수 있는 상용소프트웨어이다[2]. 밸브의 각 부품 특성을 나타내는 구성품의 조합으로 모델링을 수행하였다. 주요 부품으로는 밸브의 스프링, 포핏과 시트, 전자석 등으로 이루어져있다. 또한 솔레노이드밸브는 컨트롤밸브와 기본밸브로 구성되어 있다.

솔레노이드 밸브는 다음과 같이 작동한다. 전자석이 작동하지 않을 때 입구압력이 2 ~ 23 MPa으로 구동가스가 입구 캐비티로 들어오게 되면 컨트롤밸브를 통과해서 기본밸브의 입구압력을 받는 반대방향(컨트롤 캐비티)으로 유동이 들어가게 된다. 따라서 기본밸브에 작용하는 힘 평형에 의해 밸브는 닫힌 상태가 된다. 전자석에 의해 컨트롤밸브로 힘이 작용하여 로드(rod)가 하강하게 되면 컨트롤 캐비티의 압력이 빠져나가게 되기 때문에 주 유로가 열리고 밸브가 개방된다. 이와 같은 개념을 아래 그림과 같이 AMESim 상용소프트웨어를 통해 밸브 작동을 모사하도록 모델링하였다

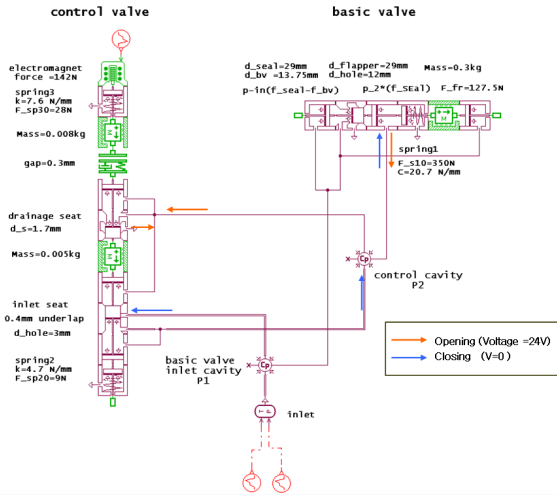


Fig. 2 2-way 솔레노이드밸브 모델

3. 밸브 모델링을 이용한 설계 검증 및 해석결과

3.1 컨트롤밸브의 배출시트 형상 결정

컨트롤밸브의 배출시트의 형상변수는 밸브가 열릴 때의 전자석의 힘(F_{em}), 스프링 힘(F_{sp2} , F_{sp3}), 밸브입구 최대압력($P_{in,max}$)으로 결정된다. 컨트롤밸브의 힘평형을 이용해 밸브가 개방되는 순간에 컨트롤밸브 배출시트의 최대 하중면적을 계산할 수 있다.

$$f_{unl}^{max} = \frac{F_{nec} - F_{sp3} - F_{sp2}}{P_{in,max}} = 4.68 \text{ mm}^2 \quad (1)$$

다음과 같이 컨트롤밸브의 배출시트의 최대 직경은 2.44 mm이었고, 라운드오프 반경 $R = 0.35 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ 을 고려하면 배출시트의 내부직경은 약 1.74 mm이다. 따라서 배출시트의 직경은 1.74 mm 이하가 되어야 한다.

구성한 AMESim 밸브 모델을 이용해 라운드 오프 반경을 고려하지 않은 배출직경에 대한 컨트롤밸브 작동성능을 알아보았다. 배출밸브 직경이 2.3 mm를 초과하면 입구압력이 23 MPa 일 때 컨트롤 밸브가 작동하지 않았다. 따라서 컨트롤

밸브의 캐비티의 압력이 감소하지 않았고 주 밸브도 작동하지 않게 된다. 반면 2.3 mm 이하에서는 릴리프 밸브가 작동해서 배출 시트를 통해 유체가 나가게 되고, 컨트롤 캐비티의 압력이 감소하게 되어서 주 밸브가 열려 솔레노이드 밸브가 작동하게 된다. 이와 같이 AMESim 해석결과는 배출밸브 시트의 최대직경을 힘평형방정식으로 구한 수학적 계산결과와 일치하였다.

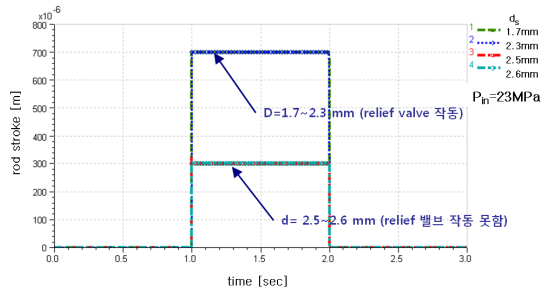


Fig. 3 배출시트 직경에 대한 로드 스트로크 변화

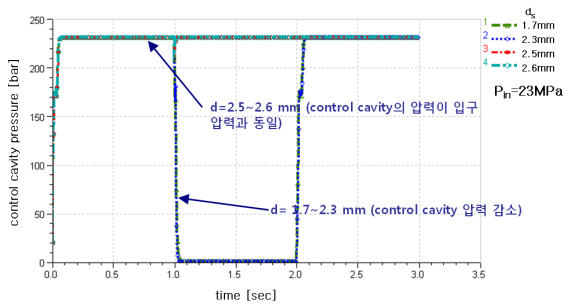


Fig. 4 배출시트 직경에 대한 컨트롤캐비티의 압력변화

3.2 입구압력 변화에 대한 작동시간

솔레노이드 밸브의 입구 작동압력은 20~230 bar이다. 작동압력 구간에서 밸브가 열릴 때와 닫힐 때의 작동시간을 구하였다. 10 bar에서는 개방되는 시간이 0.1초 이상이었고 20 bar 이상에서는 0.1초 이내에 주 밸브가 열리는 것을 확인하였다. 압력이 높아짐에 따라 0.055초로 작동 시간이 수렴하였다. 또한 밸브가 닫힐 때는 압력이 증가함에 따라 0.04초로 수렴하는 것을 알 수 있었다.

다음은 입구압력이 변함에 따른 솔레노이드

밸브의 작동시간에 대해 해석결과와 시험결과를 비교하였다. 밸브의 작동시간 측정 시험은 전원 인가 후 밸브 출구에서 120 mm 떨어진 지점의 압력이 변하는 시점을 기준으로 측정하였다. AMESim 해석 결과와 압력이 높아짐에 따라 약간의 차이는 있지만 압력증가에 따른 개방시간과 닫힘시간이 시험 결과와 동일한 패턴으로 서로 잘 일 치함을 알 수 있었다. 압력이 높아짐에 따라 특정시간으로 수렴하는 경향을 보였다. 입구 압력이 10 bar일 때는 작동 개방시간이 0.2초 이상으로 크게 증가하였고 작동압력이 20 bar 이상일 때 밸브가 규격 내의 시간으로 작동할 것으로 예상할 수 있다.

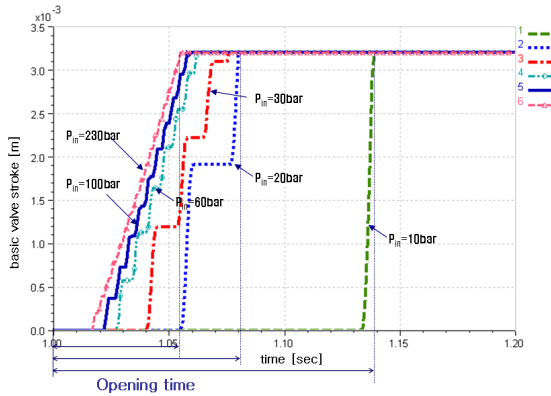


Fig. 5 입구압력에 따른 개방시간

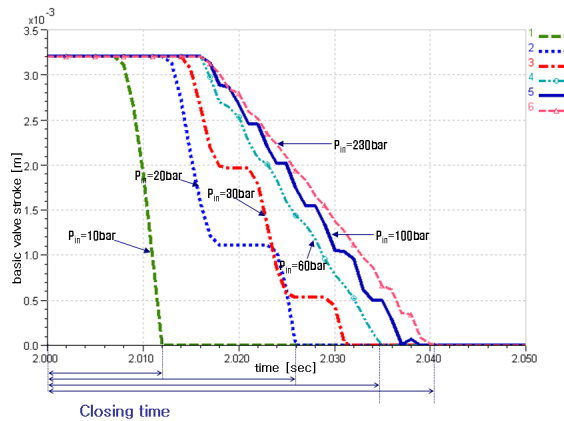


Fig. 6 입구압력에 따른 닫힘시간

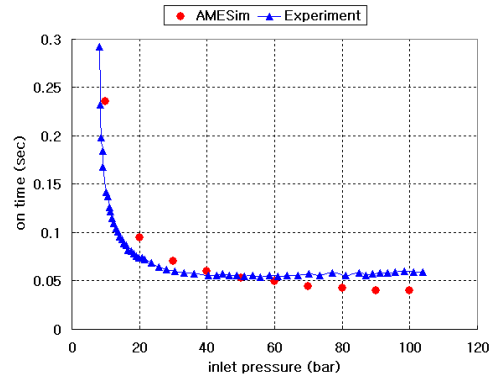


Fig. 7 입구압력 변화에 따른 개방시간 비교

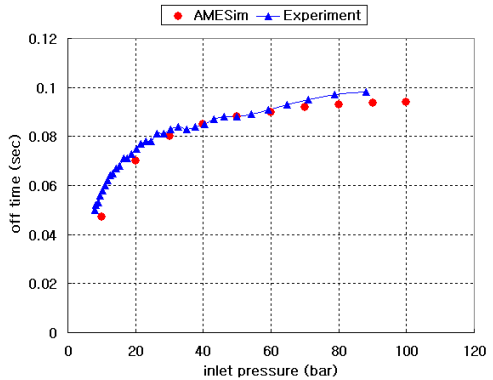


Fig. 8 입구압력에 따른 닫힘시간 비교

3.3 주 밸브의 시트 형상 결정

주 밸브의 개방 시 밸브가 움직이기 시작할 때의 힘평형방정식을 통해 주 밸브의 시트형상 크기가 결정된다.

$$P_{in} \cdot (f_{seal} - f_{bw}^{max}) - P_2 \cdot f_{seal} - F_{sp1} - F_{fr} = 0 \quad (2)$$

주 밸브는 컨트롤 캐비티 P_2 압력이 떨어진 후 개방된다(Fig. 1). 즉, 입구압력에 의해 주밸브 면적과 시트면적의 차이로 발생한 힘이 스프링 힘, 마찰력, 주 밸브에 작용하는 컨트롤 캐비티의 압력에 의한 힘을 초과할 때까지 개방된다. 따라서 밸브의 개방에 영향을 미치는 주요 인자는 실링직경과 주밸브의 직경 비 k 와 밸브가 오픈될 때의 압력비 P_2 / P_{in} 이다.

다음은 솔레노이드밸브가 개방될 때 가장 혹독한 조건에서 주밸브의 시트면적의 변화에 대한 밸브의 작동성을 알아보았다. 밸브의 실링(sealing)은 시트의 외부반지름에서 수행되고, 스프링 힘은 허용공차 내에서 최대값을 가지며 입구압력은 개방될 때에는 최소작동압력 $P_{in} = 2$ MPa, 닫힐 때에는 최대작동압력 $P_{in} = 23$ MPa 가질 때를 고려한다. 그림과 같이 기본밸브의 시트직경이 22 mm 이하에서는 컨트롤밸브가 작동하여도 주 밸브가 열리지 않았다. 밸브의 시트면적이 클수록 최대개방시간이 단축되었다. 닫힐 때에는 시트면적이 클수록 최대닫힘시간이 연장되었다. 따라서 밸브 설계 시에 규격에 따른 작동시간을 고려하고 또한 경계조건에서 밸브 작동성을 고려하여 설계하여야 한다.

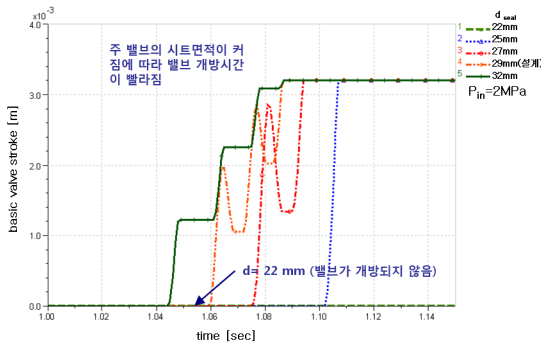


Fig. 9 주 밸브 시트 직경에 대한 개방시간 변화

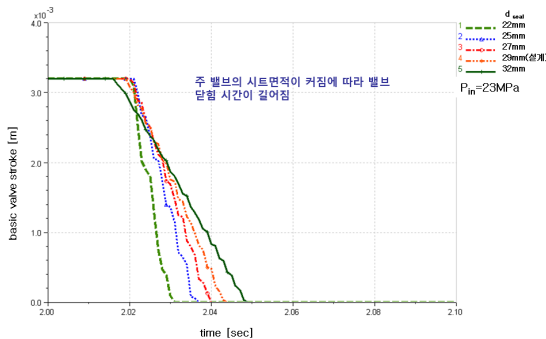


Fig. 10 주 밸브 시트 직경에 대한 닫힘시간 변화

밸브의 작동에 영향을 주는 설계 인자인 주밸브의 실링되는 면적과 seat의 면적비의 변화에 대한 밸브의 작동성을 알아보았다. 설계된 주 밸브의 직경 비는 $k = 0.474$ 이다. 기밀에 사용되는 시트 직경을 변화시켜 실링 직경 비에 따른 작동압력을 비교하였다. 직경비 $k = 0.83$ 이상일 때는 밸브 입구압력이 2 MPa에서 열리지 않았다. 직경비가 커짐에 따라 개방압력과 닫힘압력이 증가함을 알 수 있었다.

Table 2. 주밸브의 실링 직경비에 따른 작동압력

주밸브의 직경(d_{bv}) [mm]	직경비 ($k=d_{seal}/d_{bv}$)	opening pressure [bar]	closing pressure [bar]
10	0.34	9.2	5.5
12	0.41	9.7	5.7
14(설계)	0.48	10.4	6.1
17	0.58	12	6.7
20	0.68	14.6	7.8
24	0.83	-	-

4. 결 론

우주발사체 추진기관 공급계에서 2-way 솔레노이드밸브는 제어시스템의 명령에 의해 추진제 탱크를 가압하여 탱크내의 압력을 조절한다. 추진제 탱크 가압용 솔레노이드밸브의 제작에 앞서 설계검증 및 기본적인 작동특성을 분석하기 위해 AMESim상용코드를 이용하여 해석모델을 수립하였다. 입구압력에 따른 작동시간을 시험결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 솔레노이드밸브 모델을 이용하여 설계변수인 컨트롤 밸브의 시트 직경, 주 밸브의 시트 직경, 실링 직경 비에 대해 밸브의 동특성 해석을 수행하였다. 해석을 통해 밸브의 개폐작동시간, 작동성능, 개폐압력을 예상하였다.

본 연구 결과는 한국형발사체 공급계 가압용 솔레노이드밸브의 설계/해석능력을 확보하고 밸

브의 개발과정에서 효율성을 높일 수 있으며 파생형 밸브의 설계 및 선행연구[3,4]에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. V.Boyko, A.Troiak, Electo-Pneumatic Valve, 44.4004.4700. 0000.00.0(SV-03) Analysis P444-31/09, KARI-08 -0037, 2009, 1-24
2. "AMESim 4.2 User Manual", Version 4.3, IMAGINE S.A., 1995-2005
3. 장제선, 김병훈, 이경원, "2-way, 3-way 솔레노이드밸브의 내부유동해석", KARI-PCT-TM-2010-013, 2010, pp.1-17
4. 한국형발사체(KSLV-II) 개발사업() 보고서, 제 4권, 한국항공우주연구원, 2011