

공압구동용 솔레노이드밸브의 동특성 해석

장제선* · 김병훈* · 한상엽*

Analysis of Dynamic Characteristics of Pneumatic Driving Solenoid Valve

Jesun Jang* · Byunghun Kim* · Sangyeop Han*

ABSTRACT

A pneumatic driving solenoid valve operates pneumatic control devices by opening/closing operating flow passage when the command is given by control system for the liquid-propellant feeding system of space launch vehicle. The simulation model of pneumatic driving solenoid valve 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. In addition, the results of internal flow simulation with FLUENT are utilized to improve the accuracy of valve-modeling. Using the model, we analyze performance of valve; opening/closing pressure, operating time on various design factors; shape of control valve seat, drainage seat, rate of sealing diameter, volume of control cavity. 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 공압구동용 솔레노이드밸브는 제어시스템의 명령이 주어지면 구동가스 배관의 통로를 개폐해서 공압제어장치를 작동시킨다. 공압구동용 솔레노이드밸브의 제작에 앞서 설계검증 및 기본적인 작동특성을 분석하기 위해 AMESim 상용코드를 이용하여 해석모델을 수립하였다. 입구압력에 따른 작동시간을 시험결과와 비교하여 모델을 검증하였고 내부유동 해석결과(FLUENT)를 이용하여 3차원 형상을 고려하여 모델의 정확도를 높였다. 밸브모델을 이용하여 다양한 설계변수에 따른 밸브의 개폐압력, 작동시간을 계산하여 설계인자 검증 및 작동성능을 분석하였다. 설계변수인 컨트롤밸브의 시트 형상, 주 밸브와 배출밸브의 시트 형상, 실링 직경비, 컨트롤 캐비티 부피에 대해 밸브의 동특성 해석을 수행하였다. 해석을 통해 밸브 개폐작동시간, 작동성능, 개방압력을 예상하였다. 본 연구 결과는 한국형발사체 공급계 공압구동용 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)

* 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: aerototoro@kari.re.kr

우주발사체 추진기관 공급계에서 솔레노이드 밸브는 액체 추진로켓의 추진제탱크 가압시스템을 구성하고 밸브를 구동하기 위한 공압구동용 밸브로 사용된다. 유즈노이에 제시한 규격의 3-way 공압구동용 솔레노이드밸브는 제어시스템의 명령이 주어지면 구동가스 배관의 통로를 개폐해서 공압제어장치를 작동시킨다. 유즈노이(Yuzhnoye)사에서 설계한 3-way 솔레노이드밸브의 설계검증 및 작동성을 분석하였다[1]. 이를 위해 AMESim 상용코드[2]를 이용하여 공압구동용 솔레노이드밸브를 구성하여 작동시간에 대한 시험결과 및 개폐압력에 대한 수학적 계산결과를 비교하여 모델을 검증하였다. 또한 검증된 모델을 바탕으로 밸브의 다양한 설계변수에 대한 작동시간, 개폐압력 등을 비교하였다.

2. 3-way 솔레노이드밸브의 규격 및 설계 모델

2.1 밸브 규격 및 설계 모델

3-way 솔레노이드밸브의 설계에 대한 초기규격은 표 1과 같다. 압력은 절대압으로 나타내었다. 그림 1에서 작동원리 및 해석을 위해 밸브를 간단하게 도식화하였다. 3-way 솔레노이드 밸브는 다음과 같이 작동한다. 전자석이 작동하지 않을 때 입구압력이 6 ~ 22 MPa으로 구동가스가 입구 캐비티로 들어오게 되고 컨트롤밸브를 통과해서 주 밸브의 입구압력을 받는 반대방향(컨트롤 캐비티)으로 유동이 들어간다. 따라서 주 밸브에 작용하는 힘평형에 의해 밸브는 닫힌 상태가 된다. 전자석에 의해 컨트롤밸브로 힘이 작용하여 로드(rod)가 하강하게 되면 컨트롤 캐비티의 압력이 컨트롤밸브의 배출시트를 통과해서 빠져나가게 된다. 따라서 주 밸브가 개방되고 입구에서 출구로 유동이 흐르게 된다.

이드밸브의 모델링을 수행하였다. AMESim (Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering System)은 유공압시스템의 모델링을 통해 동특성 시뮬레이션 및 해석에 유용하게 이용할 수 있는 상용소프트웨어이다. 밸브의 각 부품 특성을 나타내는 구성품의 조합으로 모델링을 수행하였고 스프링, 라드와 시트, 전자석 등으로 이루어져있다. 또한 3-way 솔레노이드밸브는 컨트롤밸브와 기본밸브로 구성되어 있다. 그림 4와 같이 AMESim 상용소프트웨어를 통해 밸브 작동을 모사하도록 모델링하였다.

Table 1. 설계 규격

Type	Solenoid
Working medium	Helium
Working temperature	248 ~ 323 K
Working pressure	6 ~ 23 MPa
Flowrate Cv	0.5
Conditional diameter of through passage section	0.006 m
Response time	≤ 0.2 s
The maximal consumed current	1.6 A
Weight of the valve	≤ 1.2 kg

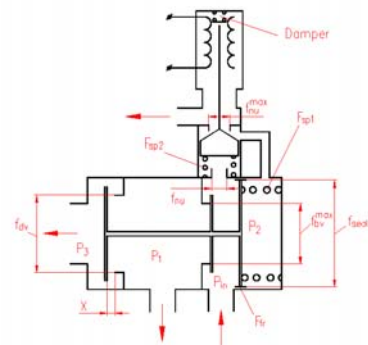


Fig. 1 3-way 솔레노이드밸브 design diagram

3. 3-way 솔레노이드밸브 모델링 및 내부유동해석

3.1 3-way 솔레노이드밸브 모델링

AMESim을 이용한 3-way(공압구동용) 솔레노

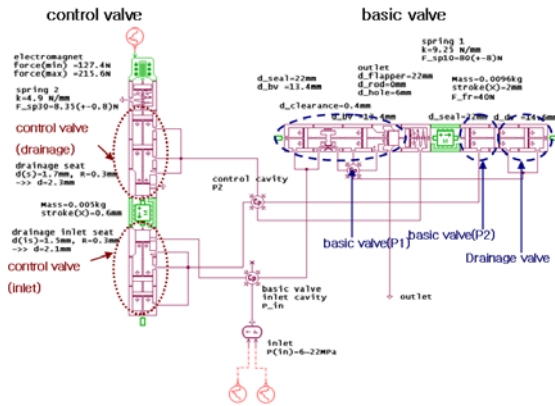


Fig. 2 Modeling and general view of 3-way solenoid valve

3.2 밸브 내부유동해석을 통한 모델 검증

아메심은 1차원 해석 모델 코드이므로 밸브의 3차원 형상을 고려하지 않는다. 따라서 내부유동 해석(FLUENT)결과를 이용하여 솔레노이드밸브의 작동특성분석에 대한 정확도를 높이고자 하였다. 유동해석/경계조건은 다음과 같다.

밸브내부의 실매질인 압축성기체 헬륨(helium gas)을 이용한 유동해석을 수행하였다[3]. 경계조건은 실제 작동압력을 고려하여 6 ~ 22 MPa으로 설정하였다. 밸브의 작동유체인 상온의 헬륨을 이용해서 입구압력에 따른 질유량을 계산하였고 이를 바탕으로 AMESim 모델을 수정하여 3차원 형상을 고려하도록 하였고 압력에 따른 질유량 변화가 잘 일치함을 알 수 있었다.

Table 2. 3-way 솔레노이드밸브의 입구압력에 따른 질유량 변화

		Case1	Case2	Case3
P _{in} (MPa)		6	12	22
Mass flow rate (kg/s)	유동해석 (FLUENT)	0.0694	0.1407	0.259
	AMESim 해석	0.0692	0.1375	0.2514

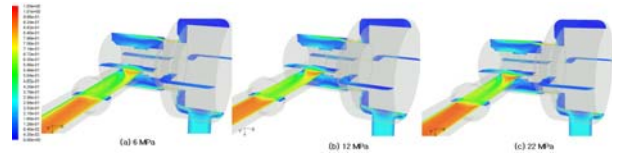


Fig. 3 Contours of Mach number

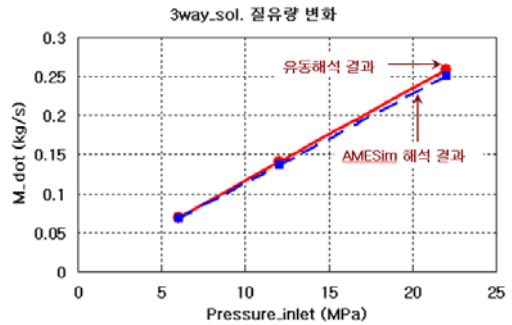


Fig. 4 입구압력에 대한 질유량 해석 비교

4. 3-way 솔레노이드밸브의 작동특성 예측

4.1 입구압력 변화에 대한 작동시간

다음은 입구압력이 변함에 따른 공압구동용 솔레노이드밸브의 작동시간에 대해 해석결과와 시험결과를 비교하였다. 시험은 동일하게 제작된 5개의 모델에 대해 수행하였다. 시험에서 밸브의 작동시간 측정은 전원 인가 후 밸브 출구에서 120 mm 떨어진 지점의 압력이 변하는 시점을 기준으로 측정하였다. AMESim 해석 결과와 약간의 차이는 있지만 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 입구압력의 변화에 대해 밸브의 작동시간이 크게 변하지 않고 거의 일정하게 유지하는 것을 알 수 있었다. 개방압력은 30 ms이내였고 닫힘시간은 20 ms 이내로 밸브의 작동시간은 규격(200 mms 이내)을 잘 만족하였다.

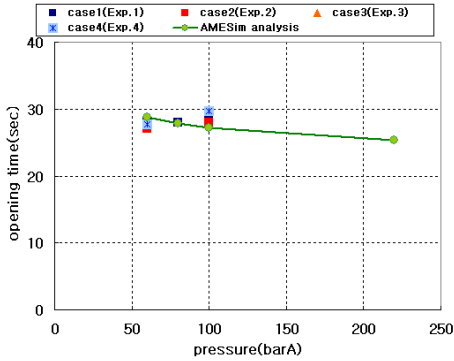


Fig. 5 입구압력에 따른 밸브 개방시간

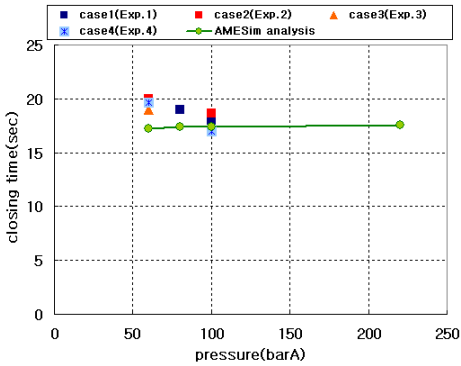


Fig. 6 입구압력에 따른 밸브 닫힘시간

4.2 주 밸브의 시트간격 변화에 대한 밸브성능

주 밸브의 시트 간격에 따라서 솔레노이드 주 밸브의 캐비티 압력(P1)이 변화한다(Fig. 1). 시트의 간격이 작을수록 차압이 크게 발생한다. 즉 시트간격이 작으면 유동이 잘 빠져나가지 못해서 Cv(유량계수)가 작아지고, 시트간격이 커지면 유량계수가 커진다. AMESim 모델을 이용하여 시트의 간격이 0.1 ~ 0.4 mm로 변할 때 주밸브의 압력변화와 유량변화를 통해 밸브의 작동특성을 예측하였다

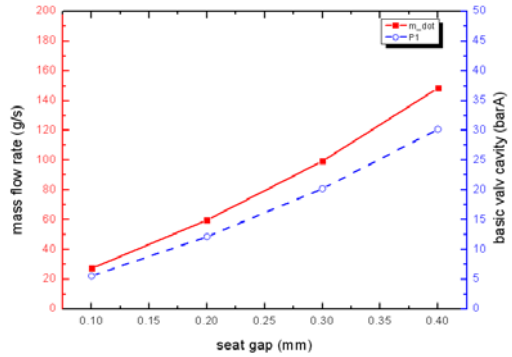


Fig. 7 주밸브 seat gap 에 대한 밸브 특성

4.3 주 밸브의 시트형상에 대한 작동특성

솔레노이드밸브가 개방될 때 가장 혹독한 조건에서 주밸브의 시트면적 변화에 대한 밸브의 작동성을 알아보았다. 밸브의 실링(sealing)은 시트의 라운드오프된 외부반경에서 수행되고, 스프링 힘은 허용공차 내에서 최대값을 가지며, 입구 압력은 개방 될 때에는 최소작동압력 $P_{in} = 6$ MPa, 닫힐 때에는 최대작동압력 $P_{in} = 22$ MPa 가질 때를 고려한다. 주 밸브의 시트 면적이 클수록 최대 개방시간이 단축되었다. 닫힐 때에는 시트면적이 클수록 닫힘시간이 연장되었다. 따라서 밸브 설계 시에 규격에 따른 작동시간을 고려하고 또한 경계조건에서 밸브 작동성을 고려하여 설계하여야 한다.

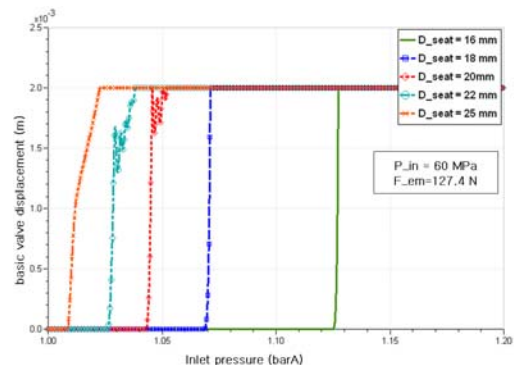


Fig. 8 주 밸브 시트직경에 따른 밸브 개방시간

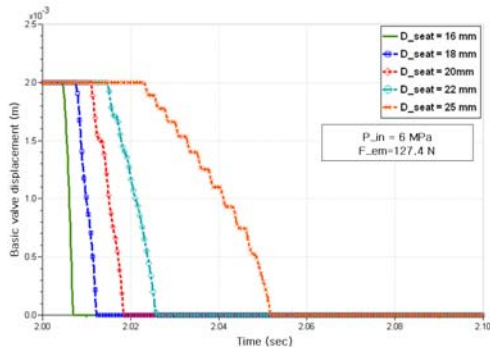


Fig. 9 주 밸브 시트직경에 따른 밸브 닫힘시간

밸브의 작동에 영향을 주는 설계 인자인 주 밸브의 실링되는 면적과 시트의 면적비의 변화에 대한 밸브의 작동성을 알아보았다. 설계된 주 밸브의 직경비는 $k=0.609$ 이다. 기밀에 사용되는 시트 직경을 변화시켜 실링 직경비에 따른 작동압력을 비교하였다. 직경비 $k=0.89$ 이상일 때는 밸브의 최소 작동압력인 6 MPa에서 열리지 않았다. 직경비가 커짐에 따라 밸브의 개방에 필요한 압력이 증가함을 알 수 있었다.

Table 3. 주 밸브 시트 직경비에 따른 작동압력

Basic valve sealing diameter[mm]	직경비 ($k=d_{bv}/d_{seal}$)	Opening pressure [barA]
15	0.893	밸브 개방 안 됨
18	0.744	14.813
22 (설계치수)	0.609	6.653
26	0.515	4.313
30	0.446	3.233

4.4 컨트롤 캐비티의 형상에 대한 작동특성

주 밸브의 컨트롤 캐비티(P2)는 솔레노이드 밸브의 작동성에 결정적인 역할을 하는 영역이다 (Fig. 1). 구동가스가 입구압력이 컨트롤 밸브 입구시트를 통해 컨트롤 캐비티로 출입하고 다시 컨트롤밸브의 배출시트로 나가게 되면서 밸브의 개폐 작동이 일어난다. 따라서 컨트롤 캐비티의

영역의 크기가 밸브 작동시간에 영향을 미치는 설계변수가 될 수 있다. 다음은 모델을 이용하여 컨트롤 캐비티의 부피에 따른 밸브의 작동시간을 비교하였다. 실제 설계된 밸브구동용 솔레노이드 밸브의 컨트롤 캐비티의 부피는 약 0.0014 L이다. 컨트롤 캐비티 부피가 0.001~0.01 L로 변할 때 밸브가 열리는 순간과 최대로 열린상태까지 도달하는 시간과, 밸브가 닫히기 시작하는 시간과 완전히 닫히는 시간을 구하였다. 캐비티의 부피가 클수록 밸브 개방 및 닫힘시간이 길어지고 0.01L 일 때는 작동시간의 초기규격의 한계값에 근접하기 때문에 설계 시 캐비티의 크기 또한 고려해야 한다.

Table 4. 컨트롤 캐비티 부피에 따른 밸브 개방시간

control valve cavity volume[L]	Opening time (full opening time) [sec]	Closing time (full closing time) [sec]
0.001	0.0221 (0.0358)	0.0102 (0.0230)
0.0014	0.0284 (0.0404)	0.0176 (0.0298)
0.002	0.0390 (0.0456)	0.0284 (0.0398)
0.005	0.0898 (0.092)	0.0814 (0.0904)
0.01	0.1738 (0.1776)	0.1648 (0.1722)

4.5 배출시트 형상에 대한 밸브 작동특성

밸브의 작동에 영향을 주는 설계 인자인 배출 밸브의 실링되는 면적과 seat의 면적비의 변화에 대한 밸브의 작동성을 알아보았다. 설계된 배출 밸브의 실링면적과 주밸브의 시트면적 직경비는 $k = 0.663$ 이다. 주 밸브의 시트 직경을 변화시켜 실링 직경비에 따른 작동압력을 비교하였다. 직경비 $k = 0.954$ 이상일 때는 밸브 입구압력이 6 MPa에서 주밸브가 열리지 않았다. 직경비가 커짐에 따라 개방압력이 증가함을 알 수 있었다.

Table 5. 배출 밸브 시트 직경에 따른 작동압력

Drainage valve seat diameter[mm]	직경비 ($k=d_{dv}/d_{seal}$)	opening pressure [barA]
12	0.545	5.525
14.6 (설계치수)	0.663	6.629
18	0.818	10.565
20	0.909	19.217
21	0.954	밸브 개방 안 됨

5. 결 론

우주발사체 추진기관 공급계에서 3-way 솔레노이드밸브는 제어시스템의 명령이 주어지면 구동가스 배관의 통로를 개폐해서 공압제어장치를 작동시킨다. 공압구동용 솔레노이드밸브의 제작에 앞서 설계검증 및 기본적인 작동특성을 분석하기 위해 AMESim상용코드를 이용하여 해석모델을 수립하였다.

입구압력에 따른 밸브의 작동시간을 시험결과와 비교하여 모델을 검증하였다. 모델을 이용하여 다양한 설계변수에 따른 밸브의 개폐압력, 작동시간을 계산하여 설계인자 검증 및 작동성능

을 분석하였다. 설계변수인 주 밸브의 시트 간격, 주 밸브의 시트 직경과 실링 직경비, 컨트롤 캐비티의 형상, 배출시트 직경비에 대해 밸브의 동특성 해석을 수행하였다. 해석을 통해 밸브 개폐작동시간, 작동성능, 개방압력을 예상하였다.

본 연구 결과는 한국형발사체 공급계 가압용 솔레노이드밸브의 설계/해석능력을 확보하고 밸브의 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, Electro-Pneumatic Valve, 44.4004.4701. 0000.00.0(SV-11) Analysis P444-01/09, KARI-08 -0037, 2009, 1-23
2. "AMESim 4.2 User Manual", Version 4.3, IMAGINE S.A., 1995-2005
3. 장계선, 김병훈, 이경원, "2-way, 3-way 솔레노이드밸브의 내부유동해석", KARI-PCT-TM-2010-013, 2010, pp.1-17
4. 한국형발사체(KSLV-II) 개발사업(I) 보고서, 제 4권, 한국항공우주연구원, 2011