

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 improve the accuracy of the model, numerical flow analysis by using FLUNET code. The simulation results of their operating durations of valve by AMESim analysis are matched up with the results of experiments and validate valve model. Using the model, we analyze performance of valve; opening/closing pressure, operating time on various design factors of basic valve and control valve; geometrical size of valve seat, ratio of basic valve and sealing area.

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 AMESim 상용코드를 이용하여 해석모형을 수립하였다. FLUENT 상용코드를 이용하여 내부유동해석을 수행하여해 해석의 정확도를 높이고, 모형을 검증하기 위해 동특성 해석을 통해 입구압력에 따른 작동시간을 시험결과와 비교하였고 잘 일치함을 확인하였다. 또한 해석 모형을 이용하여 컨트롤밸브와 기본밸브의 설계변수에 대한 밸브의 동특성 해석을 수행하였다. 해석을 통해 기본밸브의 시트형상과 직경비에 따른 밸브의 작동시간, 작동성능, 개폐압력을 예상하였다.

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

접수일 2011. 11. 30, 수정완료일 2012. 11. 21, 게재확정일 2012. 11. 27

* 정회원, 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: aerototoro@kari.re.kr

[이 논문은 한국추진공학회 2011년도 추계학술대회(2011. 11. 24-25, 부산 노보텔 엠베서더) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

우주발사체 추진기관에서는 추진제 탱크에 저

장된 추진제를 엔진에 공급하고, 연소를 통해 추력을 얻는다. 이 때 가압제인 헬륨가스를 이용하여 추진제 탱크 내를 가압하여 설계조건에 맞는 압력을 유지시켜서 추진제를 배출시킨다. 추진제 탱크 가압제인 극저온 고압 헬륨가스의 공급 및 차단을 위해 반응속도가 상대적으로 빠르고 가압 압력 변화가 가능한 솔레노이드밸브를 주로 사용한다. KSLV-I 1단 탱크가압시스템, Saturn IC 연료 탱크 가압시스템, Saturn V 3단 LOX 탱크가압시스템, Ariane 5 LOX 탱크가압시스템에서도 솔레노이드밸브를 이용하여 탱크가압 시스템을 구성하였다[1, 2, 3].

본 연구에서는 유즈노이(Yuzhnoye)사에서 설계한 추진제탱크 가압용 솔레노이드밸브의 설계 검증 및 작동성능을 분석하였다[4]. 또한 밸브의 기본설계 자료를 바탕으로 앞으로 개발할 우주발사체 추진제 가압시스템의 요구조건에 부합하는 밸브를 개발하기 위해 설계변수를 쉽게 변경하여 동특성을 파악할 수 있는 AMESim 상용틀을 이용하여 솔레노이드밸브 모델을 구성하였다. 솔레노이드밸브 모델을 이용하여 시험결과와 비교하여 모델을 검증하고, 설계변수를 변화에 대한 밸브의 동특성 해석을 수행하였다.

2. 가압용 솔레노이드밸브의 규격 및 설계 모델

2.1 밸브 규격 및 설계 모델

가압용 솔레노이드밸브의 설계에 대한 초기 규격은 Table 1과 같다. 압력은 절대압으로 나타내었다. Fig. 1에서 작동원리 및 해석을 위해 밸브를 간단하게 도식화하였다.

2.2 가압용 솔레노이드밸브 모델링 및 검증

AMESim을 이용한 2-way(가압용) 솔레노이드밸브의 모델링을 수행하였다. AMESim(Advanced Modeling Environment for Simulation of Engineering System)은 유공압시스템의 모델링을 통해 동특성 시뮬레이션 및 해석에 유용하게 이용할 수 있는 상용소프트웨어이다[5]. 밸브의 각 부품 특성을 나타내는 구성

Table 1. Design specification

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

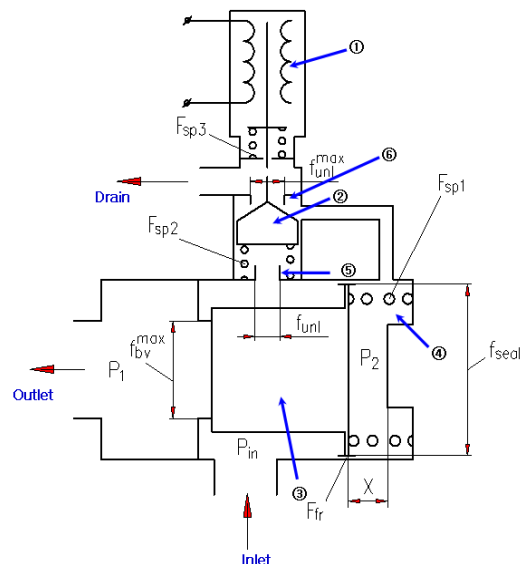


Fig. 1 2-way solenoid valve design diagram

①-electromagnet, ②-control valve, ③-basic valve, ④-control cavity, ⑤-inlet seat of control valve, ⑥-drainage seat of control valve

품의 조합으로 모델링을 수행하였다. 주요 부품으로는 밸브의 스프링, 포핏과 시트, 전자석 등으로 이루어져있다. 또한 솔레노이드밸브는 Fig. 1과 같이 컨트롤밸브(②)와 기본밸브(③)로 구성되어 있다.

솔레노이드밸브는 다음과 같이 작동한다. 전자석(①)이 작동하지 않을 때 구동가스가 입구로 2 ~ 23 MPa 압력으로 들어오게 되면 컨트롤밸브를 통과해서 기본밸브의 입구압력을 받는 반대

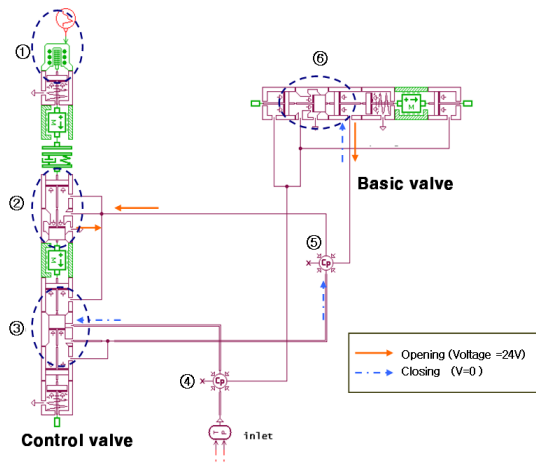


Fig. 2 2-way solenoid valve model ①-electromagnet, ②-drainage seat of control valve, ③-inlet seat of control valve, ④-inlet cavity, ⑤-control cavity, ⑥-seat of basic valve

방향(컨트롤캐비티④)으로 유동이 들어가게 된다. 따라서 기본밸브에 작용하는 힘평형에 의해 밸브는 닫힌 상태가 된다. 전자석에 의해 컨트롤 밸브로 힘이 작용하여 로드(rod)가 하강하게 되면 컨트롤캐비티의 압력이 배출시트(⑥)로 빠져나가게 되기 때문에 기본밸브가 개방되어 유로가 열린다. 이와 같은 개념을 Fig. 2와 같이 AMESim을 이용해 밸브 작동을 모사하도록 모델링하였다.

3. 밸브 모델링을 이용한 설계 검증 및 해석결과

3.1 밸브 내부유동해석을 통한 모델 검증

아메심은 1차원 해석 모델코드이므로 밸브의 3차원 형상을 고려하지 않는다. 따라서 내부유동 해석(FLUENT)결과를 이용하여 솔레노이드밸브의 작동특성 분석에 대한 정확도를 높이고자 하였다. 유동해석/경계조건은 다음과 같다. 밸브 내부의 실매질인 압축성 헬륨가스(helium gas)를 이용한 유동해석을 수행하였다[6]. 경계조건은 실제 작동압력을 고려하여 2 ~ 23 MPa으로 설정하였다. 기본밸브가 개방되었을 때의 속력선도를 Fig. 3에 나타내었다. 밸브의 작동유체인 크

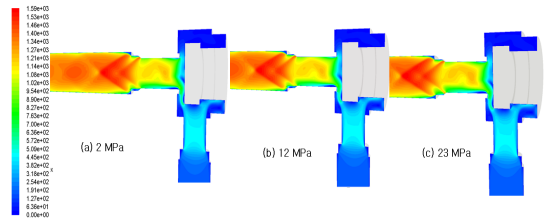


Fig. 3 Velocity contours of solenoid valve(m/s)

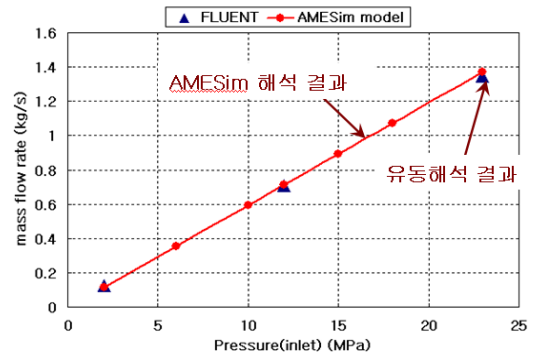


Fig. 4 Comparison of mass flow rates for inlet pressures

저온의 헬륨을 이용해서 입구압력에 따른 질유량을 계산하였고, 이를 바탕으로 AMESim 모델을 수정하여 3차원 형상을 고려하도록 하였다. Fig. 4와 같이 압력에 따른 질유량 변화가 잘 일치함을 알 수 있었다.

3.2 컨트롤밸브의 배출시트 형상 결정

AMESim 모델의 작동성을 검증해보기 위해 힘평형 계산으로 쉽게 구할 수 있는 작동특성 결과와 모델의 해석결과를 비교해보았다.

컨트롤밸브의 배출시트의 형상은 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.

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

Equation 1에 의하면 컨트롤밸브의 배출시트

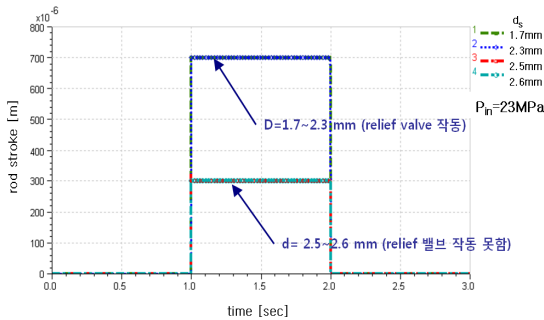


Fig. 5 Rod stroke changes for drainage seat diameters

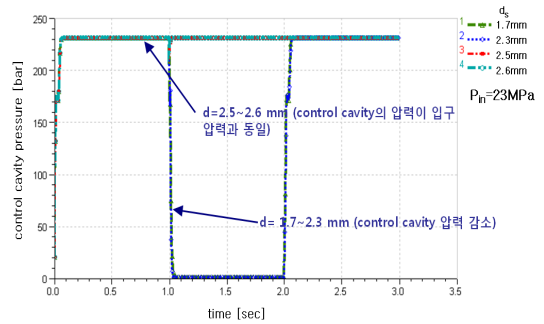


Fig. 6 Pressure changes of control cavity for drainage seat diameters

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

구성한 AMESim 밸브모델을 이용해 라운드오프 반경을 고려하지 않은 배출직경에 대한 컨트롤밸브 작동성능을 알아보았다. 초기조건으로 밸브 입구로 23MPa의 압력을 지속적으로 공급하고, 1초에서 2초 사이에 전자석 힘을 주어서 밸브를 작동시킨다. Fig. 5에서 배출밸브 직경이 2.5 mm 이상에서는 컨트롤밸브를 작동시키기 위한 라드의 스트로크(y축)가 총 0.7 mm에 도달하지 못하였다(전자석에 연결된 라드와 컨트롤밸브 사이의 0.3 mm의 간격이 있음). 따라서 Fig. 6과 같이 컨트롤캐비티의 압력이 감소하지 않았고, 따라서 기본밸브도 작동하지 않게 된다. 반면 2.3 mm 이하에서는 컨트롤밸브가 작동해서 배출시트를 통해 유체가 나가게 되고, 컨트롤캐비티의 압력이 감소하게 되어서 기본밸브가 열려 솔레노이드밸브가 작동하게 된다. 이와 같이 AMESim 해석결과는 배출밸브 시트의 최대직경을 힘평형방정식으로 구한 수학적 계산결과와 일치하였다.

3.3 입구압력 변화에 대한 작동시간

추진제탱크 가압에 필요한 극저온 고압 헬륨 가스의 공급/차단을 하는 솔레노이드밸브의 작동시간은 일정한 규격에 만족해야 하며, 지연될 때는 탱크의 압력 조절에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 작동시간을 정확하게 예측하여 전체

시스템의 안정성을 높여야 한다. 밸브의 작동시간은 밸브를 구성하는 파트의 설계변수와 관련되어 있고 간단한 계산으로 구하기 어렵기 때문에 해석을 이용하는 것이 유리하다. 따라서 현재 모델을 이용하여 작동압력 변화에 따라 작동시간을 예측하고 현재 제작된 밸브의 시험결과와 비교하였다(Fig. 7, 8).

솔레노이드밸브의 입구 작동압력은 20~230 bar이다. AMESim 모델을 이용하여 작동압력 구간에서 밸브가 열릴 때와 닫힐 때의 작동시간을 구하였다. 초기조건으로 밸브 입구의 압력을 지속적으로 공급하고 1~2초 사이에만 전자석 힘을 가하여 밸브의 작동 시간을 알아보았다. 전자석의 힘이 가해지는 시점에서 밸브의 기본밸브의 스트로크가 최대로 오픈 될 때까지의 개방시간과, 전자석 힘이 제거되어서 기본밸브의 스트로크가 처음 위치로 돌아와서 밸브가 닫힐 때까지의 시간을 닫힘시간으로 정의하였다.

밸브의 작동시간을 측정하는 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 일치함을 알 수 있었다. 특히 압력이 높아짐에 따라 특정시간으로 수렴하는 경향을 보였다. 개방시간 비교(Fig. 7)에서 시험결과와 해석결과의 차이는 전자석의 자기에너지가 컨트롤밸브의 라드를 누르는 기계적인 운동으로 변환되는 시간을

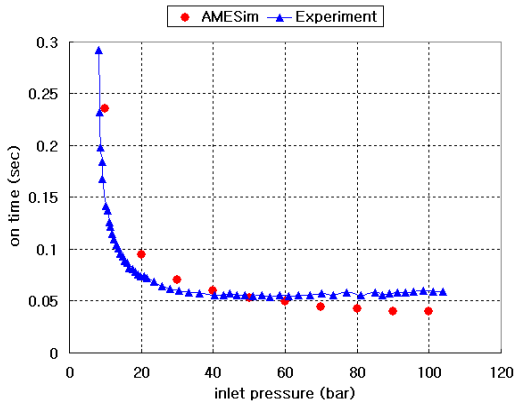


Fig. 7 Comparison of opening time for inlet pressure changes

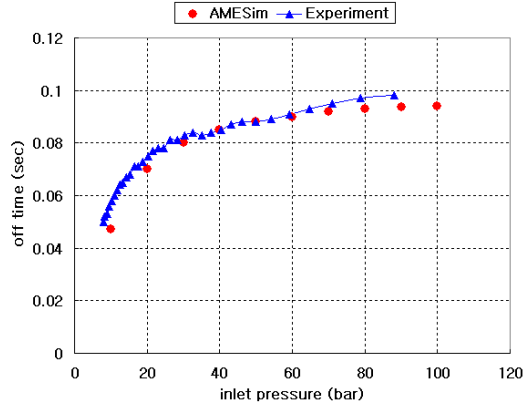


Fig. 8 Comparison of closing time for inlet pressure changes

해석에서는 고려할 수 없어서 발생하는 것으로 판단된다. 또한 입구압력에 따라 컨트롤밸브를 누르기 위한 힘도 변화하기 때문에 인가되는 시간도 변할 것이다.

3.4 기본밸브의 시트 형상 결정

기본밸브의 개방 시 밸브가 움직이기 시작할 때의 힘평형방정식(Eq. 2)을 통해 기본밸브의 시트형상 크기가 결정된다.

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

기본밸브는 컨트롤케비티의 압력(P_2)이 떨어진 후 개방된다(Fig. 1). 즉, 입구압력(P_{in})에 의해 기본밸브 면적과 시트면적의 차이($f_{seal} - f_{bv}^{max}$)로 발생한 힘이 스프링 힘(F_{spr}), 마찰력(F_{fr}), 기본밸브에 작용하는 컨트롤케비티의 압력에 의한 힘($P_2 \cdot f_{seal}$)을 초과할 때까지 개방된다. 따라서 밸브의 개방에 영향을 미치는 주요 인자는 실링직경과 기본밸브의 직경 비 k 와 밸브가 오픈될 때의 압력비 P_2 / P_{in} 이다. 기본밸브면적과 실링면적은 다음의 연관관계를 가진다.

$$f_{seal} / f_{bv}^{max} = k \quad (3)$$

하지만 설계단계에서 개발경험이 없는 경우 다양한 규격의 밸브가 오픈될 때의 압력비를 미

리 아는 것이 어렵다. AMESim 모델을 이용해서 캐비티의 부피 및 형상을 정확히 모사하면 밸브의 작동성 해석이 가능하다. 따라서 앞에서 검증된 모델을 이용하여 기본밸브 시트의 형상해석을 수행하여 설계 치수를 검증하였다.

솔레노이드밸브가 개방될 때 가장 혹독한 조건에서 기본밸브의 실링면적 변화에 대한 밸브의 작동성을 알아보았다. 밸브의 실링(sealing)은 시트의 외부반지름에서 수행되고, 스프링 힘은 허용공차 내에서 최대값을 가지며, 입구압력은 개방 될 때에는 최소작동압력 $P_{in} = 2 \text{ MPa}$, 닫힐 때에는 최대작동압력 $P_{in} = 23 \text{ MPa}$ 일 때를 고려한다. 초기조건으로 밸브 입구의 압력을 지속적으로 공급하고 1~2초 사이에만 전자석 힘을 가하여 밸브의 작동 시간(기본밸브의 스트로크 변위)을 알아보았다. Fig. 9와 같이 기본밸브의 실링직경이 $d_{seal} = 22 \text{ mm}$ 이하에서는 컨트롤밸브가 작동하여도 기본밸브가 열리지 않았다. 밸브의 실링면적이 클수록 최대개방시간이 단축되었다. 닫힐 때에는 실링면적이 클수록 최대 닫힘시간이 연장되었다(Fig. 10). 따라서 현재 설계된 실링직경($d_{seal} = 29 \text{ mm}$)은 작동압력 내의 가장 혹독한 조건에서 잘 작동할 수 있도록 설계되었고 작동시간도 규격 범위를 만족하였다.

밸브의 작동에 영향을 주는 설계 인자인 기본밸브면적과 실링면적 비의 변화에 대한 밸브의 작동성을 알아보았다. 설계된 기본밸브의 직경

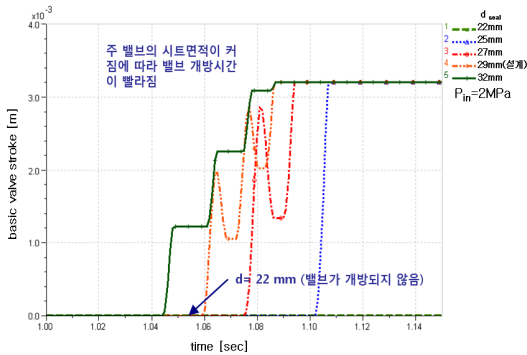


Fig. 9 Comparison of opening time changes for basic valve seat diameters

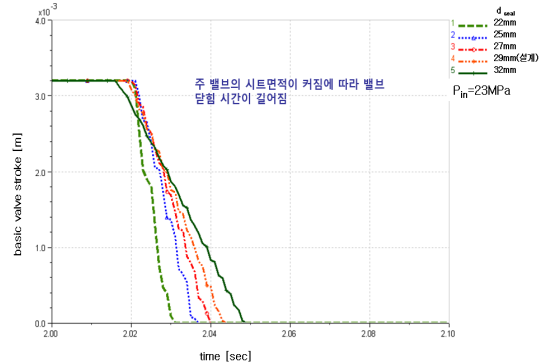


Fig. 10 Comparison of closing time changes for basic valve seat diameters

비는 $k = 0.48$ 이다. 기밀에 사용되는 기본밸브의 직경(d_{bv})을 변화시켜 실링 직경 비에 따른 작동 압력을 비교하였다. Table 2와 같이 직경비 $k = 0.83$ 이상일 때는 밸브 입구압력이 2 MPa에서 열리지 않았다. 직경비가 커짐에 따라 개방압력과 닫힘압력이 증가함을 알 수 있었다.

솔레노이드밸브는 각 단계에 따라 규격이 변경된다. 밸브의 크기를 변경한 파생형 밸브를 설계할 때 기본밸브의 시트면적을 고려할 뿐 아니라 기본밸브의 직경비에 따라서도 밸브의 작동시간 및 개폐압력이 변한다. 또한 입구압력에 따른 밸브의 작동시간도 설계단계에서 경향성을 파악하여 작동압력 범위에서 시간을 예측할 수 있어야 한다. 따라서 밸브 설계 시 검증된 AMESim 모델을 수립하여 동일한 구성 파트로 된 밸브의 주요설계 변수를 변화시켜가며 결정하여야 한다.

4. 결 론

앞으로 개발할 한국형발사체 추진제 가압시스템의 솔레노이드밸브를 개발하기 위한 설계/해석능력을 확보하고, 개발 과정에서 다양한 규격에 부합하는 파생형 밸브의 설계가 필요하다. 이러한 밸브 개발을 위해 현재 개발 중인 공급계 가압용 솔레노이드밸브의 기본설계 자료를 바탕으로 AMESim 상용 툴을 이용하여 솔레노이드밸브 모델을 구성하였고 시험결과를 이용하여

Table 2. Operating pressure for basic valve seat diameters

기본밸브의 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	-	-

모델을 검증하였다. 솔레노이드밸브 모델을 이용하여 한국형발사체 각 단계에 적용될 솔레노이드밸브의 주요 설계변수에 따른 작동시간, 개폐압력 등의 밸브의 동특성을 파악하여 밸브 설계 및 선행연구[6, 7]에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Dussollier, G. and Teissier, A., "Arian 5 main stage oxygen tank pressurization," AIAA-93-1969, 1969
2. Saturn V launch vehicle flight evaluation report AS-508 apollo 13 mission, MRP-SAT-FE-70-2, 1970

3. Saturn V News Reference, "Third stage fact sheet," 1968
4. Boyko, V. and Troiak, A., Electro-Pneumatic Valve, 44.4004.4700. 0000.00.0(SV-03) Analysis P444-31/09, KARI-08-0037, 2009, pp.1-24
5. AMESim 4.2 User Manual, Version 4.3, IMAGINE S.A., 1995-2005
6. 장제선, 김병훈, 이경원, "2-way, 3-way 솔레노이드밸브의 내부유동해석," KARI-PCT-TM-2010-013, 2010, pp.1-17
7. 한국형발사체(KSLV-II) 개발사업(I) 보고서, 한국항공우주연구원, 제4권, 2011