

솔레노이드 밸브의 고유유량계수에 대한 실험과 성능예측

이중엽*, 이수용**

Experiment and Performance Prediction on Inherent Flow Coefficient of a Solenoid Valve

JoongYoup Lee*, SooYong Lee**

Abstract

The Equations of inherent flow coefficient are different from compressible to incompressible flow. The paper has been conducted to measure the inherent flow coefficient of solenoid valve under various flows. Experimental results for compressible and incompressible flow were confirmed to inherent flow coefficient correctly. The value of inherent flow coefficient for the 0.5" solenoid valve is about 2. Dynamic characteristics of a solenoid valve, which plays an important role in real model, have been analysed by AMESim simulator modeling.

초 록

일반적으로 압축성과 비압축성에 따라 사용되는 밸브의 유량 관계식은 다르다. 본 논문에서는 유체에 따라 유량 실험에 수행했고, 고유유량계수를 측정했다. 압축성 및 비압축성 유체에 대한 실험 결과, 고유유량계수는 정확히 일치했다. 1/2" 솔레노이드 밸브에 대한 유량실험 결과 고유유량계수는 약 2 이다. 실험을 통해 확보 된 솔레노이드 밸브의 고유유량계수는 아메시모 모델링하여 밸브의 유동특성을 예측했다.

키워드 : Inherent flow coefficient(고유유량계수), Pressure ratio(압력비), AMESim(아메시)

1. 서 론

유압시스템에서 가장 중요한 사항 중의 하나가 제어이다. 제어 부품을 올바르게 선정하지 못하면 전체 시스템은 원하는 기능을 발휘할 수 없다. 유압은 우선 밸브라고 부르는 제어장치를 사용하여 제어한다. 이러한 제어장치의 선택에는

형태뿐만 아니라 크기, 작동기술 그리고 원격-제어 능력이 포함된다. 제어 장치의 세 가지 기본 형태로서 방향과 압력, 유량제어밸브가 있다.

방향제어밸브는 주어진 회로에서 유체가 이동하는 경로를 결정한다. 압력제어밸브는 유량의 수요가 감소함에 따라 점진적으로 형성된 과도한 압력, 혹은 밸브가 열리거나 닫힐 때의 갑작스런

접수일(2011년 5월 19일), 수정일(1차 : 2011년 6월 1일, 2차 : 2011년 6월 27일, 게재 확정일 : 2011년 7월 1일)

* 발사체미래기술팀 / leejy@kari.re.kr

** 발사체미래기술팀 / sylee@kari.re.kr

서지(Surge)에 기인한 과도한 압력으로부터 시스템을 보호한다. 그리고 유압회로의 여러 관로에서 유량이 제어되어야 한다. 예를 들면 작동기의 속도를 제어하기 위해서는 유량을 제어하여야 한다. 이러한 형태의 제어는 유량제어밸브를 사용함으로써 성취될 수 있다. 만일에 서로 다른 속도로 작동되는 여러 작동기가 포함된 시스템이 아니라면 가변 용량형 펌프를 사용하여 작동기의 속도를 제어할 수도 있다. 압력강하의 변화에 따라 자동적으로 조절되어 일정한 유량을 공급해야 하는 곳에서는 압력보상형 유량제어밸브가 사용된다[1].

이러한 밸브의 제어성능을 지배하는 것은 가변 또는 고정오리피스이다. 오리피스 식과 밸브의 고유유량계수 식을 통해 밸브를 선정할 수 있고, 선정된 밸브가 어떤 유동으로 제어될 경우 당시의 유량과 압력을 또한 계산할 수 있다. 오리피스를 지나는 유동의 특성은 체적이나 밀도의 변화가 전혀 없는 1차원 정상 및 비점성, 등온과정 상태라고 가정할 수 있고, 이러한 가정 하에서 오리피스 유량식을 도출할 수 있다. 그러나 특정한 형상에 따라 실험적으로 결정되는 방출계수(Discharge coefficient)는 경험식이나 또는 실험, 유동해석을 통해 직간접적으로 파악할 수 있다. 수력학적시스템에서 방출 계수인 C_d (또는 C_d) 값을 측정하기 어렵다. C_d 는 베나 컨트랙터(Vena contracta)의 유효면적을 가늠할 수 있는 척도이다. C_d 을 측정하기 위해 베나 컨트랙터에서의 오리피스의 면적과 정압력과 유량을 측정해야 한다. 물론 일반적인 밸브에서 베나 컨트랙터에서의 압력 측정은 불가능하다. 따라서 상류측으로부터 임의의 한 점을 선정하고 하류측의 측정하기 편 한 지점을 정한 후 각각의 지점까지 압력차에 대한 C_d 라는 유량계수를 도출한다[2].

본 논문에서는 기체 및 액체 유동의 오리피스 식으로 부터 파생된 고유유량계수에 대한 식을 정리했다. 솔레노이드 밸브를 오리피스라고 가정하고 실험을 통해 확보된 주요 인자들을 압축성과 비압축성의 고유유량계수 식으로부터 계산된 결과들이 서로 일치됨을 증명했다. 이러한 정의

를 바탕으로 현재 75톤급 엔진공급계에 적용할 1/2" 솔레노이드 밸브를 이용하여 실험을 수행했고, 제조사 제시하는 고유유량계수를 실제 실험값과 비교 및 고찰했다. 또한, 향후 시스템에 적용을 위해 현재 계산된 고유유량계수 실험값을 아메심(AMESim) 시뮬레이터에 입력하여 요구 조건에 따른 각각의 물리적 변화량 등을 예측해 보았다.

II. 본 론

2.1 지배방정식

$$\dot{m} = A C_q C_m \frac{P_u}{\sqrt{T_u}} \quad (1)$$

여기서, A 는 오리피스 면적, C_q 는 유량 계수, C_m 은 유량 변수, P_u 는 전단압력, T_u 는 기체의 전단온도

유량계수는 실험적이면서 이론적 관계를 이루고 있다. 이 계수는 국지적 마찰과 운동에너지 손실에 의한 여분 손실을 포함한다. 유속이 아음속일 경우, 유량 변수는 $\frac{P_{vc}}{P_u}$ 와 같이 압력비로 나타낼 수 있고, 유속이 음속일 경우 유량변수 C_m 은 일정하게 된다[2]. (여기서, P_{vc} 베나 컨트랙터에서 압력)

유속은 항상 압력비와 임계압력비에 의존적이며, 임계압력비는 다음과 정의 할 수 있다.

$$P_{cr} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (2)$$

여기서, γ 는 비열비

유량변수(C_m)는 다음과 같이 아음속과 음속 두 경우에 대해 식(3), (4)와 같이 차등 적용하게 된다.

$$C_m = \sqrt{\frac{2\gamma}{R(\gamma-1)}} \times \sqrt{\left(\frac{P_{vc}}{P_u}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_{vc}}{P_u}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}} \quad (3)$$

if $\left(\frac{P_{vc}}{P_u}\right) > P_{cr}$ (subsonic)

$$C_m = \sqrt{\frac{\gamma}{R} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4)$$

if $\left(\frac{P_{vc}}{P_u}\right) \leq P_{cr}$ (sonic)

밀도는 변하지 않는 즉, 밸브 전/후단부의 밀도가 같다고 가정하고 압력차가 밸브 전단 압력보다 작다 할 경우 식(5)와 같이 C_q 와 C_v 의 관계식 형태를 얻을 수 있다.

$$C_q \approx \frac{1.64 \times 10^{-5}}{A} C_v \quad (5)$$

2.2 압축성 유동에서의 고유유량계수 계산식

산업용 밸브의 가스를 이용하는 오리피스 또는 밸브류 들은 아래의 식을 이용하여 고유유량계수를 계산한다. 압력비의 비율은 공기나 질소의 경우 0.53을 기준으로 하고 0.53보다 크면 아음속에 속하며, 0.53보다 작거나 같을 경우 초음속으로 조건으로 분류한다[3].

아음속 조건에서는 오리피스 후류부의 센서의 영향을 받고, 초음속 조건에서는 상류측 압력에 지배적이다.

i) Case of subsonic

$$\frac{P_2}{P_1} > 0.53$$

$$C_v = \frac{Q}{1391 \sqrt{\frac{P_2 \Delta P}{S T_R}}} \quad (6)$$

ii) Case of supersonic

$$\frac{P_2}{P_1} < 0.53$$

$$C_v = \frac{Q \sqrt{S T_R}}{695.4 P_1} \quad (7)$$

여기서,

Q = SCFH (Standard Cubic Feet per Hour)

P_1 = Up stream pressure (Psia)

P_2 = Down stream pressure (Psia)

ΔP = Pressure drop across the valve (Psi)

S = Specific gravity

T_R = Absolute temperature in degree Rankin (460+degree Fahrenheit)

특히, Air, GN2, GH2, GO2 기체의 경우 압력비 0.53 영역 조건에 일치한다. 그러나, GHe는 압력비 경계영역이 0.49이고, CH4(methane), CO2의 압력비 경계영역은 0.55 이다.

2.3 비압축성 유동에서의 고유유량계수 계산식[4]

$$C_v = F \sqrt{\frac{S}{\Delta P}} \quad (8)$$

여기서,

F = Flow rate in USGPM for liquids

ΔP = Pressure drop across the valve (psi)

S = Specific gravity

2.4 실험을 위한 대상 솔레노이드 밸브 선정

표 1은 서론부분에서 제시한 발사체 엔진공급계에 적용할 솔레노이드 밸브이다. 본 솔레노이드 밸브를 이용한 최대 운용 압력은 320 bar (@He, 24 VDC, 4.2 A) 이다. 표 1에서 제시하는 솔레노이드 밸브는 사용압력과 Duty Cycle에 의해 솔레노이드 코일의 저항이 결정되며 코일 무게가 밸브의 대부분을 차지한다. 그 외 작동특성과 관련된 응답시간과 누설량 관련 내용은 본 논문에서 제외하며 오직, 제조사에서 제시하는 고유유량계수 C_v 2.7에 주목하도록 한다.

표 1 검증실험을 위한 대상 ; 1/2 inch 솔레노이드 밸브

Nominal Size	1/2"
Type	Right Angle
M.E.O.P	320 bar
Nominal Current	3.9 A 94 W
Resistance	6.2±0.6 Ω
Duty Cycle	50 %
Cv (제조사 측)	2.7

2.5 고유유량계수 실험을 위한 준비

실험을 위해 적용한 센서들의 표2와 표3에서와 같다. 그림 1과 같이 유량을 도시하는 그림에서의 측정 단위는 g/s이다. 온도와 압력을 이용하여 질량유량계 자체로 환산되며, 질량유량 값을 발생되도록 구성되어 있다. 그러나 기체의 고유유량계수 구하는 식에서 기체의 유량은 SCFH (Standard Cubic Feet per Hour)를 사용하는 관계로 식(9)와 식(10)을 이용하여 SCFH로 환산하도록 한다.

일반적으로 가스의 유량을 표준상태의 체적유량의 형태로 나타낸다. 식 (9)와 같이 표준상태의 체적유량은 실제 측정 체적유량을 표준압력과 표준온도로 환산한 값으로 가스 유량 계산이나 가스 유동 측정 장비 사용 시 유용하게 쓰이게 된다. 또한, 일반적으로 사용하는 단위환산 프로그램이나 단위 환산자에서 나타내는 CFM은 모두 SCFM을 지칭한다.

$$SCFM = ACFM \left(\frac{P}{14.7} \right) \left(\frac{288.15}{T} \right) \quad (9)$$

여기서,

SCFM = Standard Cubic Feet per Minute
ACFM 또는 CFM = Actual Cubic Feet per Minute

표 2 실험을 위한 계측 센서 (기체)

	질량 유량계	압력센서	온도센서
정확도	i) 0.1% @Liquid ii) 0.35% @Gas	0.1%	-
측정 위치	질량유량 (g/s)	상류/ 하류측 압력 (bar)	상류측 온도
제조사	Micromotion	Keller	OMEGA
타입	-	-	T-type 열전대

P = Gas Pressure [psia]

T = Gas Temperature [K]

가스의 체적유량을 가장 흔하게 지칭하는 SCFH가 표준상태로 환산된 값이므로 가스의 질량유량으로 변환할 때 식 (10)과 같이 표준상태의 밀도와 체적유량 곱으로 만들어주어야 한다.

$$\begin{aligned} \dot{m} [kg/s] &= \rho_{std} \times Q [S.m^3/s] \\ &= \frac{0.002766 \times Q [SCFH]}{R} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, R = 기체상수 [J/kg/K]

SCFH = Standard Cubic Feet per Hour

기체를 이용한 고유유량계수 측정 실험은 모두 기체 질소(GN2)를 이용했다. 실험 대상인 솔레노이드 밸브는 임의의 시간에서 자유로이 개폐가 가능하도록 DC 전원과 연결되어 있다. 또한, 안정구간의 한 점을 선택하여 유량과 전·후단 압력, 온도를 선정 후 제시된 해당 식으로 입력하여 최종적으로 고유유량계수를 얻도록 한다[5].

그림 1과 같이 15s 대역에서 유동이 정상상태를 유지하고 있으므로 당시의 질량유량 값은 약

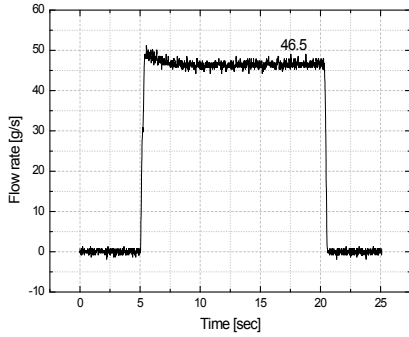


그림 1 압력비 > 0.53 경우 실험 (당시 GN2 유량 ; 46.5 g/s)

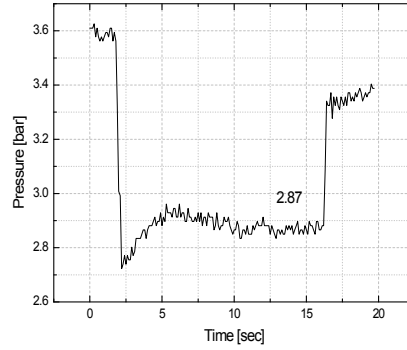


그림 4 압력비 < 0.53 경우 밸브에 작용하는 압력차

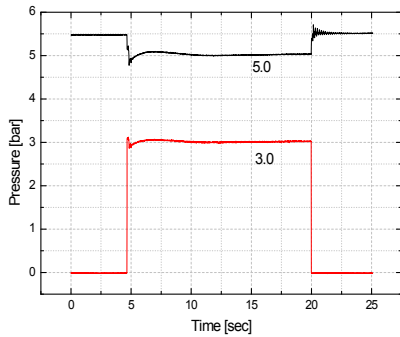


그림 2 압력비 > 0.53 경우 밸브에 작용하는 압력차

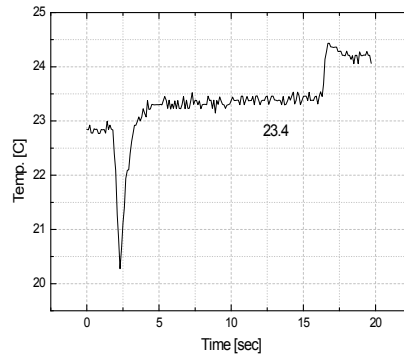


그림 5 압력비 < 0.53 경우 밸브 전단의 GN2의 온도

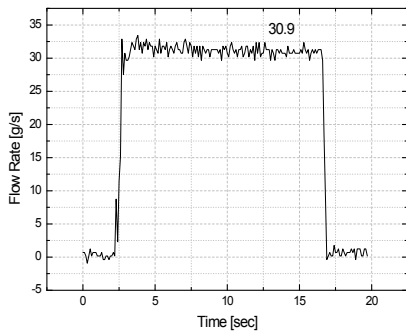


그림 3 압력비 < 0.53 경우 실험 (당시 GN2 유량 ; 30.9 g/s)

46.5 g/s 이다. 그림 2에서는 15 s 일 때 전·후 단 압력이 각각 5 bar와 3 bar 임을 알 수 있다. 표 3에서 압력 [bar]는 [Psi]로 환산하고, 유량 [g/s]은 [SCFH]로 환산한다. 이 때 질소 비중은 0.97 이고, R은 296.8 이다. 식 (6)을 이용한 아음속 조건에서의 고유유량계수는 약 2.03 이다.

그림 3~5는 초음속 조건에서 실험한 결과이다. 아음속 조건으로 실험할 당시와 유사하게 15s 지점을 정상상태로 한다. 안정 구간에서의 질량유량 값(그림 3)은 약 30.9 g/s 이다. 그림 4에서의 밸브 전단 압력은 2.87 bar 이고 후단은 대기압

표 3 물을 이용한 실험에서 사용 된 센서

	체적 유량계	압력센서	온도센서
정확도	0.5% (Liquid)	0.1%	-
측정 위치	상류측 체적유량 (L/s)	상류/하류측 압력 (bar)	-
제조사	Hoffer	Keller	-

으로 배출 된다. 또한, 그림 5와 같이 밸브 전단의 기체의 온도는 23.4 °C 이다. 식 (7)을 이용하여 실험을 통해 얻은 값들을 대입하여 계산해보면, 아음속 조건에서 수행한 결과인 2.03과 일치한다.

2.6 물을 이용한 고유유량계수 실험

물을 이용한 솔레노이드 밸브의 고유유량계수를 측정하는 방법은 기체를 이용한 질량유량 측정 방법과 유사하다. 표 3은 물을 이용한 고유유량계수 측정 실험을 위해 사용된 센서 종류 및 규격이다.

압축성 유동과 달리 비압축성 유동의 경우 온도와 압력에 따라 밀도 변화가 미소하기 때문에 측정 시작시점부터 측정 종료까지를 모두 포함하여 고유유량계수를 평균화 하도록 한다. 특히 밸브 전단압력을 변동시켜 유동량이 변화가 있을지라도 고유유량계수가 유지되는지를 확인 할 필요가 있다. 전단압력에 따라 고유유량계수의 값이 변화가 있을 경우, 정압력 센서 포트 위치 또는 배관 내 직경 대비 길이의 잘못된 선정일 가능성이 높다.

그림 6에서 작동유체인 물의 초기 유량이 약 0.82 L/s로 시작하여 최종 유량이 약 0.75 L/s로 종료됨을 알 수 있다. 당시의 밸브를 통해 발생된 압력차는 그림 7에서 확인할 수 있다. 그림 8에서는 고유유량계수식을 이용하여 함수처리한 것이며, 이것을 평균하면 약 2.02 이다.

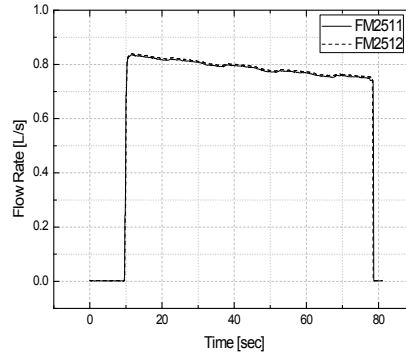


그림 6 물을 이용한 실험 - 유량

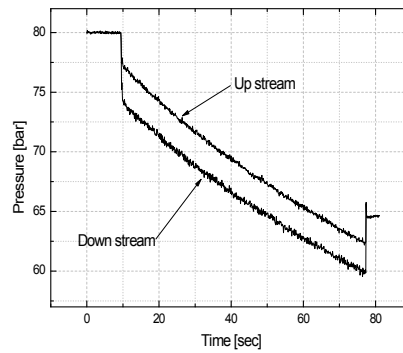


그림 7 물을 이용한 실험 - 압력차

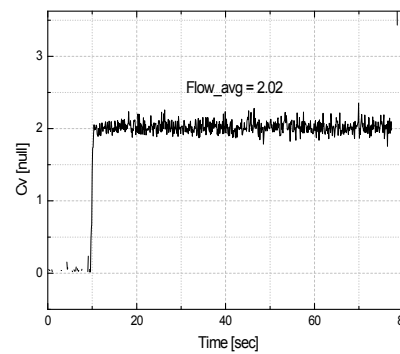


그림 8 물을 이용한 실험 - 고유유량계수

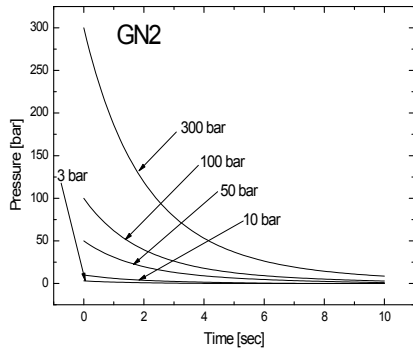


그림 9 밸브의 전단압력 추이 (GN2)

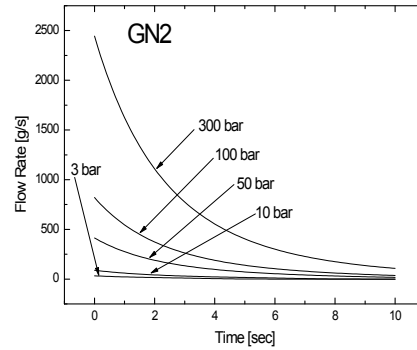


그림 10 밸브를 통한 GN2 유량 변화

2.7 실험결과에 따른 AMESim을 이용한 예측 실험을 통해 확보된 고유유량계수 값을 AMESim 시뮬레이터에 이용하면 요구 압력대비 또는 압력차 대비 발생될 유량을 예측할 수 있다. 또는, 요구 유량 대비 발생 차압을 알 수 있다. 이것은 곧 시스템을 설계할 수 있으며, 시스템 레벨뿐만 아니라 단품 레벨에서까지 필요한 정보를 예측할 수 있다[6].

시뮬레이션에서 사용된 기체는 각각 질소와 헬륨이다. 질소는 실험 당시 얻어진 결과물과 비교를 위해 사용되었으며, AMESim에서 지원해주는 오리피스를 튜닝(Tuning)하여 계산할 수 있다. 튜닝을 통해 최종 결정된 오리피스는 분자량이 다른 헬륨 조건에서 계산할 수 있다.

시뮬레이션을 위해 소스 압력 조건은 총 5 조건으로 달리 적용했고, 묶음계산(Batch) 되도록 하여 각각의 결과를 서로 비교할 수 있다. 소스 압력은 3, 10, 50, 100, 300 bar 이다. 후단 조건은 대기압 조건이 되도록 하며, 압력차는 알 수 없다. 왜냐하면 후단 조건에 대한 요구도 분명치 않기 때문에 본 논문에서는 다루지 않았다. 그리고 5개의 압력조건으로 소스 압력 조건에 따라 발생하는 유량과 오리피스 전단부의 물리적 상태를 예측할 수 있다. 여기서 논문에서 보여주는 물리적 값들은 기체 온도 및 압력, 유량, 베나 컨트랙터에서의 속도이다.

그림 9~12은 GN2 기체를 이용하고 1/2" 솔레

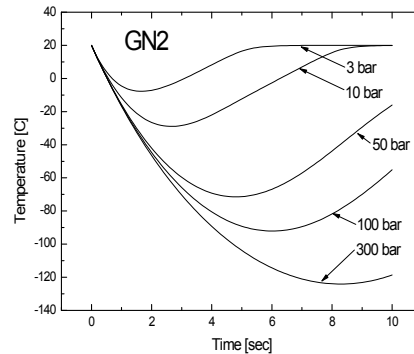


그림 11 밸브 입력부 온도 (GN2)

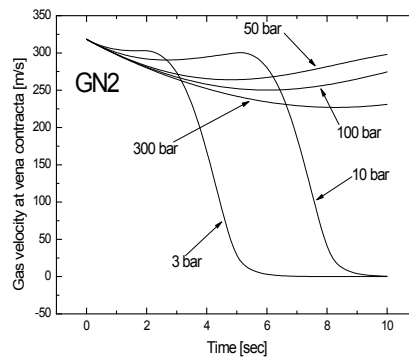


그림 12 베나 컨트랙터에서 속도 (GN2)

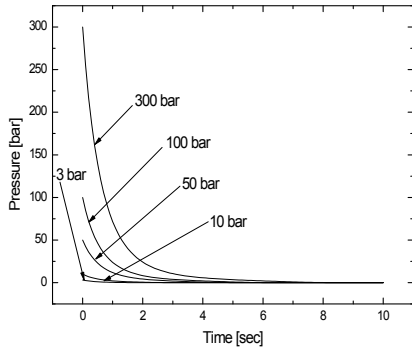


그림 13 밸브의 전단압력 추이 (He)

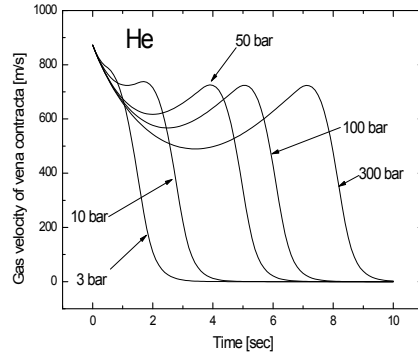


그림 16 베나 컨트랙터에서 속도 (He)

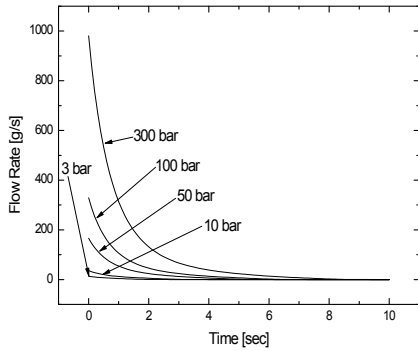


그림 14 밸브를 통한 He 유량 변화

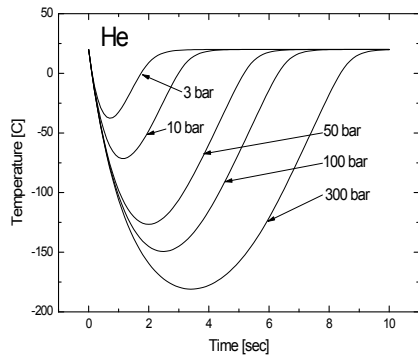


그림 15 밸브 입력부 온도 (He)

노이드 밸브를 이용한 시뮬레이션 결과이다. 각기 다른 소스 압력과 솔레노이드 밸브 후단은 대기압 조건으로 둔다. 솔레노이드 밸브 내의 국부 면적에서 초킹(Choking)이 발생된다. 그림 10을 보면, 압력차가 300 bar 일 경우 유량은 약 2500 g/s이며, 압력차가 100 bar 일 경우 800 g/s 로 예측된다.

그림 13~16은 He를 이용한 시뮬레이션 예측 결과이다. 모든 조건은 기체 질소와 동일한 조건을 이용한다. 그림 14를 보면, 헬륨의 압력차가 300 bar 일 경우 유량은 약 1,000 g/s이며, 압력차가 100 bar 일 경우 320 g/s 로 예측된다.

III. 결 론

실험 결과, 기체 유동에서의 아음속 및 초음속 유동에서 사용되는 고유유량계수 식은 물을 이용한 고유유량계수 식에서 얻어진 결과와 모두 일치 했다.

측정 대상물인 솔레노이드 밸브의 경우, 아음속과 초음속, 물을 이용한 고유유량계수 실험값은 약 2.0 이다.

실험을 통해 확보된 솔레노이드 밸브의 고유유량계수는 AMESim으로 모델링하여 시스템 레벨에서 요구하는 솔레노이드 밸브의 다양한 예측 결과로 제시했다.

참고문헌

1. 강철구, 이교일, 장효환, 조승호, "유공압 공학 (제5판)," 사이텍미디어, 2001.
2. D. McCloy, H. R. Martin, Control of Fluid Power : Analysis and Design, John Wiley & Sons, 1980.
3. Circle-Seal, User manual, 2002.
4. Philip L. Skousen, Valve Handbook, McGraw-Hill, 1998.
5. 이중엽, 이수용, "속도제어기법을 이용한 로켓 엔진 제어밸브의 동특성", 항공우주기술지, 제7권, 제2호, pp. 162-169.
6. Imagine S. A., Thermal-Hydraulic Library for Component Design, 2003.