

발사체 추력제어 안정성을 위한 PWM 솔밸브의 탱크압력제어

이중엽* · 홍문근** · 한상엽*** · 김영목****

Tank Pressure Control of PWM Sol V/V for Thrust Control of Launch Vehicle

Joong-Youp Lee*, Moon-Geun Hong**, Sang-Yeop Han***, Young-Mog Kim****

Keywords : Solenoid Valve(솔레노이드 밸브), PWM(펄스 폭 변조), Max Cycle Rate(최대운용주파수), Ullage

Abstract

This paper achieved dynamic characteristics with test to use solenoid valve for flight model that have present. Designed pressure control virtual system which PWM solenoid valve to use test result. Examination compared solenoid valve dynamic characteristics in atmosphere and cryogenic fluid and presented technique and valuation method that measured upstream and down stream pressure of solenoid valve, as well as, temperature, excitation voltage etc. These test results could confirm solenoid valve response time and maximum using frequency characteristic at use in atmosphere and cryogenic temperature and this derived design variables pressure control system from those bases.

1. 서론

발사체의 안정된 추력제어를 위해서는 추력제어밸브 및 터보 펌프의 고성능화가 필요하다. 특히 터보펌프(Turbo Pump)로 흡입되는 일정한 압력유지는 발사체가 비행 도중 급격히 변하는 외부환경에 관계없이 일정압력으로 펌프에 입력되어야만 원하는 추력 즉, 유량제어가 가능하게 된다. 일반적으로 단순 압력유지를 위해서 레귤레이터(Pressure Regulator)를 이용하지만 발사체처럼 추력 변화에 따른 터보펌프로 입력되는 요구 유체유량이 변하는 시스템에서 고압/고유량 및 극저온 유체의 원하는 압력 제어를 위한 레귤레이터 적용은 시스템 차원에서 많은 문제점(무계증가)을 노출하고 있다. 이에 PWM 솔밸브(Solenoid Valve) 제어를 통하여 레귤레이터를 대체할 가능성 확인 및 압력 유지 방법과 후단부 유량이 변경되어도 압력제어 가능성 등을 단품상태의 실험방법부터 시스템 설계까지 전반적으로 다룰 계획이다.

본 논문에서는 비행용 솔밸브를 이용하여 동특성 관련 성능 실험 결과를 토대로 하여 PWM 제어를 이용한 가상의 압력제어 시스템을 가능성을 보였다. 이러한 실험결과들은 극저온환경(단품상태)에서의 솔밸브의 응답시간과 최대운용주파수 획득할 수 있었으며 이를 기반으로 압력제어시스템의 설계 변수를 도출하였고, 탱크의 가스압력제어를 통하여 목표인 발사체의 안정적 유량 제어 가능성을 보고자 하였다. 특히 시스템 최적화를 위하여 솔밸브를 이용한 단품레벨에서 성능확인 실험결과 및 이를 근간 한 발사체 압력제어시스템까지 동특성을 총정리 하였다.

2. 본론

2.1 지배방정식

미소 유동이 밀도변화가 있는 유체라고 가정하면 고정 또는 변하는 체적과 열교환을 고려한 시스템에 대해 적용할 수 있는데, 내부에너지를 열역학 1법칙에 의해 표현하면 다음과 같이 에너지방정식의 형태로 나타낼 수 있다[1].

$$\frac{dU}{dt} = \sum m_i \dot{h}_i + \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} \quad (1)$$

여기서, \dot{h}_i 는 입력부에서 enthalpy flow rate, dQ/dt 는 제어체적에서 공급 또는 배출 heat flow, dW/dt 는 시스템에 한일 (1)식은 (2)식과 같이 $U = m u$ 를 이용하여 내부에너지를 다시 정리할 수 있다.

$$m \frac{dU}{dt} + u \frac{dm}{dt} = \sum m_i \dot{h}_i + \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} \quad (2)$$

이상기체라면 내부에너지는 식(3-1)과 같이 온도 함수로 표현할 수 있고, 식(1),(2)를 식(3-1)을 이용하여 식(3-2)로 정리할 수 있다.

$$\frac{du}{dt} = C_v \frac{dT}{dt} \quad (3-1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \left(\sum m_i \dot{h}_i - \frac{dm}{dt} \int C_v dT + \frac{dQ}{dt} - \frac{dV}{dt} \right) / m C_v \quad (3-2)$$

이상기체법칙에서 시간에 관한 미분식은 식(4)와 같다.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{V}{RT} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

또한 식(4)를 이용하면 시간에 대한 압력변화율로 다시 정리할 수 있고 식(5)과 같다.

$$V \frac{dP}{dt} = -P \frac{dV}{dt} + m R \frac{dT}{dt} + R T \dot{m} \quad (5)$$

* 한국항공우주연구원 추진제어그룹, leejy@kari.re.kr

** 한국항공우주연구원 추진제어그룹, conquet@kari.re.kr

*** 한국항공우주연구원 추진제어그룹, syhan@kari.re.kr

**** 한국항공우주연구원 추진제어그룹, ymkim@kari.re.kr

2.2 단품상태에서 실험 및 결과

Max. Cycle Rate(최대운용주파수)은 후단 압력유지의 섭동폭을 좌우하는 중요한 설계인자이고 이를 얼마나 잘게 나눠 구동(솔밸브의 Mechanism)할 수 있는냐는 시스템의 성능과 큰 연관이 있다[2].

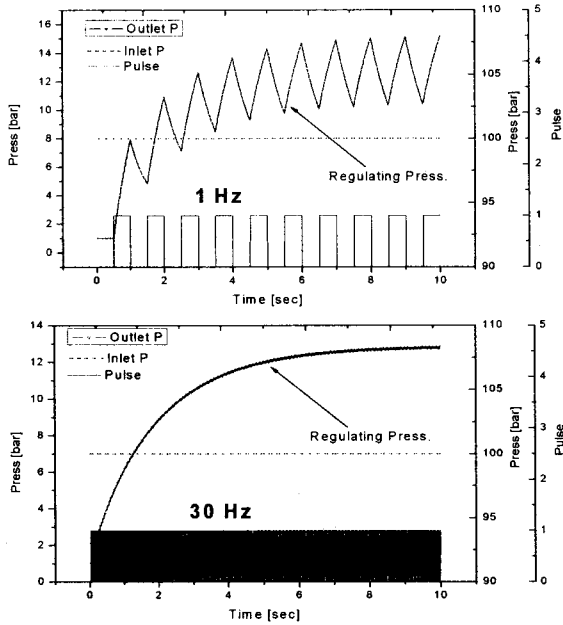


그림. 1 PWM 솔밸브를 이용한 압력제어 실험

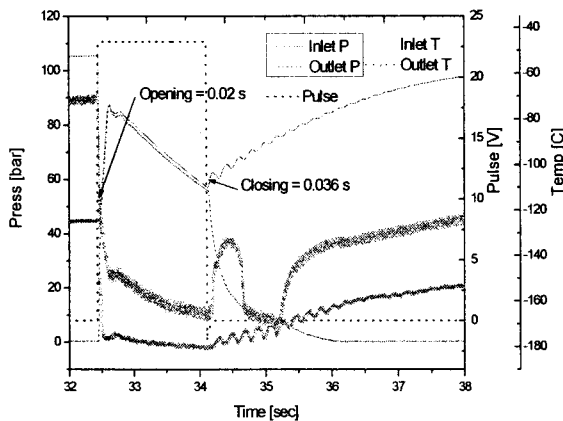


그림. 2 극저온/고압 유체를 이용한 솔밸브 응답시간 실험 (4mm)

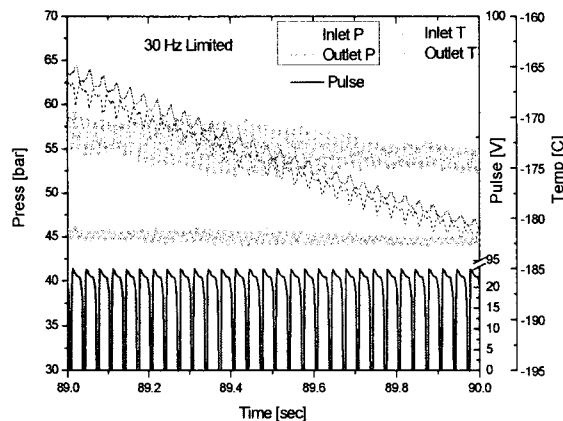


그림. 3 극저온/고압 유체를 이용한 솔밸브의 Max Cycle Rate 확인 실험 (4mm)

간단하게 시스템(Simulation)을 구성하여 설명하면 맨 위의 그림과 같이 전단압력은 100 bar이고 후단 유지압력은 약 13 bar로

유지, 임의의 밸브를 설치하고 PWM Pulse를 1Hz, 30Hz 단계별로 올려 후단 압력 유지 폭을 보자. 그리고 PWM Pulse는 솔밸브의 Max. Cycle Rate과 같다고 가정하면 Max. Cycle Rate가 커지면 커질수록 후단 압력유지 섭동폭이 급격히 감소됨을 알 수 있다. 그렇다면 고유유량계수가 매우 큰 솔밸브가 장착되어 있다 가정하고 본 솔밸브가 한번 개폐하면 후단부 압력폭이 매우 큰 폭으로 섭동한다 해도 결국 그 솔밸브가 원하는 만큼 고속으로 동작 할 수만 있다면 압력 유지 섭동폭을 아주 작게 가져갈 수 있다. 따라서 Max. Cycle Rate이 큰 솔밸브를 보유하고 있다면 시스템 설계자 입장에서 좀 더 안정적인 압력제어시스템을 구축할 수 있을 것이다.

표 1. 각 솔밸브의 작동유체 및 전단압력 조건에 따른 지연시간

Orifice Dia.	4 mm		10 mm	
	Opening Delay [sec]	Closing Delay [sec]	Opening Delay [sec]	Closing Delay [sec]
Atmosphere Temp.	0.012	0.02	0.014	0.038
Cryogenic Temp.	0.02	0.036	0.028	0.13

표 2. Max. Cycle Rate

Orifice Dia.	4 mm	10 mm
Atmosphere Temp.	30 Hz @80 bar	15 Hz @90 bar
Cryogenic Temp.	30 Hz @60 bar	17 Hz @55 bar

앞서 설명한 PMW Sol의 Max Cycle Rate을 찾기 위해 다음과 같이 실험(실험 결과 : 그림 2, 그림 3)이 이루어졌다. 본 실험에 사용된 솔밸브가 Working Mechanism(Semi Direct Acting)에서 타 밸브보다 우위에 선점하고 있으므로 Max Cycle Rate 한층 더 크게 가져갈 수 있으리라 판단된다. 그렇다면 Max Cycle Rate(응답시간 포함)은 어떻게 찾을 것인가? 실험에서는 솔밸브 전/후단에 압력센서를 장착하여 전/후단 압력값이 더 이상 섭동하지 않는 바로 이전 영역을 Max. Cycle Rate으로 취하기로 하였다. 계측장비(DL-750, YOKOKAWA., CO)의 Sampling Time을 500 Hz으로 설정하였으므로 이보다 빠른(2배 이상) 압력센서(KELLER., CO)를 장착하여 솔밸브의 응답시간과 Max. Cycle Rate 찾았다.

위의 그림과 표(표 1, 표 2)에서 알 수 있듯이 솔밸브 개폐 응답시간은 매우 신속하며, 특히 4 mm 오리피스 솔밸브의 경우 Max Cycle Rate은 자그마치 약 30 Hz까지 동작함을 볼 수 있으며 이것은 곧 정밀 압력제어 가능성을 보여주고 있다.

2.3 가상의 시스템 구성 및 시뮬레이션 결과

단품상태의 솔밸브 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 발사체 압력제어 시스템 특성을 예측해 보도록 하자. 발사체의 터보펌프에 일정한 압력과 온도로 LOX가 입력된다고 가정하고, 이를 위해 LOX 가압은 임계점이 매우 낮은 He를 사용하며, He 비체적을 감소시키기 위해 그림(시스템 구성도)처럼 LOX의 내부에 He 탱크(체적:200 L)를 두도록 한다. 만약 상온의 He를 그대로 사용할 경우 온도 대비 비체적이 매우 커지므로 매우 큰 헬륨 저장용기가 있어야 하므로 이것은 적절한 방법이 아니다. 추력제어를 위해 임의의 LOX 유량제어밸브를 두어 유량을 자유자재로 변경 가능하도록 한다. 특히 He의 특성곡선을 통해 알 수 있듯이 온도에 따라 비체적이 크게 달라지므로 실제 가압제어체

적(Ullage)은 열교환기(저온 He → 고온 He 변환)을 통해 He의 비체적을 크게 가져가도록 한다. 또한 GHe 탱크의 초기 조건은 가압량이 250 barA이고, 온도는 LOX의 비점(Boiling Point)인 90K이다. 또 솔밸브의 위치에 따라 배관 두께를 달리하여 열교환(열교환기 외부 온도 1000 K)에 의한 열전달(대류, 전도) 특성의 차이를 두어 배관 두께와 열전달과의 관계를 보도록 한다.

이미 실험을 통해 확인된 솔밸브(오리피스 직경 : 4 mm, 10 mm)의 결과를 그대로 시뮬레이션에 반영하였다. Type "A"와 "B"는 솔밸브 후단에 위치하고 솔밸브의 PWM 제어에 의해 5 barA로 감압되므로 배관 두께를 작게 설계 했으며, Type "C"는 열교환기가 그대로 고압을 받아 감압하므로 배관 두께는 1.65 mm로 설계하였다. 또 탱크압력 유지는 가압제어체적의 상단부에 압력 센서를 두어 되먹임제어가 이루어지도록 하였다.

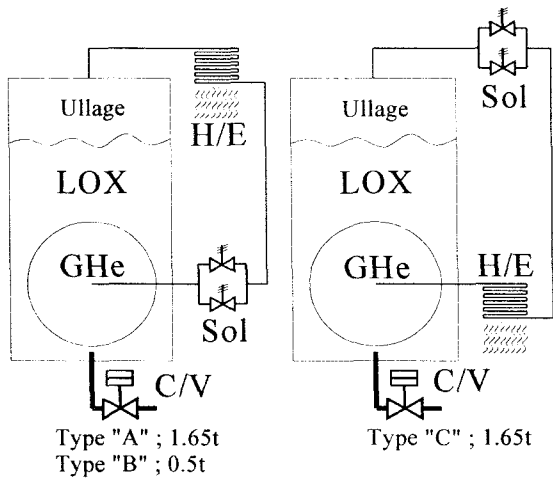


그림. 4 시스템 구성

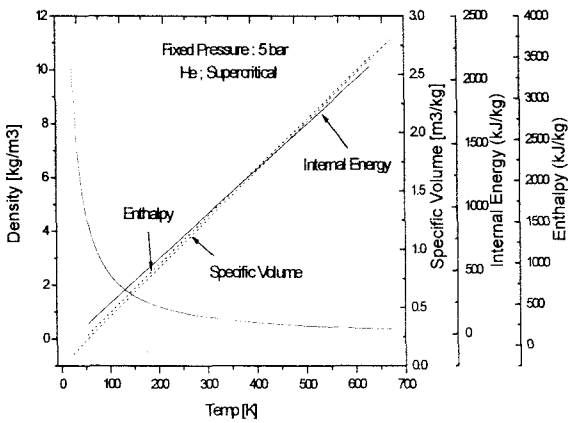


그림. 5 온도에 대한 He의 Properties (Nist) [3]

시스템 구성도에서 볼 수 있는 것처럼 LOX가 제어밸브에 의해 제어가 이루어지고 동시에 가압제어체적이 계속증가하게 된다. 따라서 제어체적이 증가된 만큼 감소된 압력을 채우기 위해서 PWM 솔밸브 제어에 의한 개폐를 반복 후 체적의 압력을 일정하게 유지되도록 하는 특징이 있다. 그러나 LOX의 제어 유량을 일정하게 유지하는 것이 아니라 초기 20초 구간에서는 약 160 kg/s가 유지되다가 제어밸브의 유로면적을 감소시켜 20 초 이후부터는 약 60 kg/s로 제어하게 된다. LOX의 방출 유량이 달라진다는 것은 상단부 가압제어체적의 급변을 의미하므로 이에 각기 다른 Type "A", "B", "C"를 두어 어떠한 방식의 시스템 및 무게의 최적화인지를 찾아 볼 것이다.

LOX의 제어유량과 Ullage 압력유지 그림에서 알 수 있듯이 Type "A"는 신속하게 목표점에 도달하지만 Overshoot이 발생했으며, Type "B" 안정적이지만 긴 지연시간을 포함됨을 알 수 있

다. 이것은 열교환에 의한 Ullage He 온도에 매우 밀접함을 알 수 있으며, 위의 He Properties 그래프 에서 볼 수 있듯이 He의 온도에 따라 엔탈피와 비체적, 내부에너지가 선형적으로 증가되고 이를 통해 초기 내부열전달 및 외부열전달의 평형조건의 차이를 보이기 때문에 초기 과도 구간에서는 각기 다른 결과를 보이게 됨을 알 수 있다.

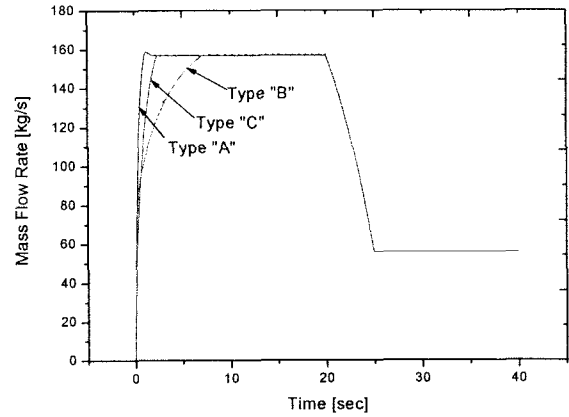


그림. 6 제어밸브에 의한 LOX 제어유량

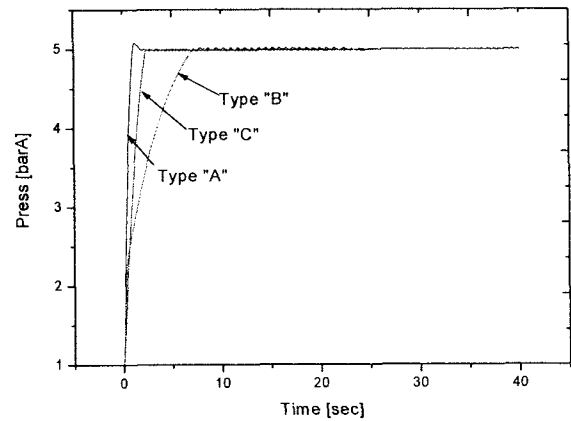


그림. 7 Ullage 부분의 He 압력 유지

PWM 솔밸브를 이용한 가압압력 유지 시 어느 정도 유사한 경향을 보임을 알 수 있었으며, 오직 초기과도구간과 PWM 폭만이 달리 제어 됨 을 알 수 있다. 특히 Type "B"만이 Ullage의 He 온도가 급격하게 감소된 상태에서 열교환이 이루어지다보니 초기과도구간에서 긴 지연시간을 보임을 알 수 있다. 이는 솔밸브의 개폐동작 그림에서 확인할 수 있으며, 또한 초기 5 barA를 추종하기 위해 3종류 모두 각기 다른 유량으로 He이 소모되고 있음을 유량선도(He)에서 확인할 수 있다.

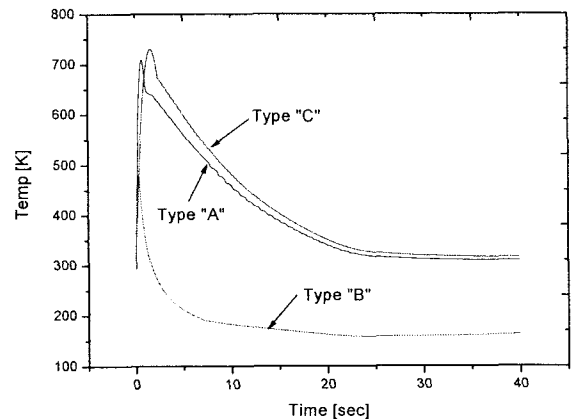


그림. 8 Ullage 부분의 He 온도 분포

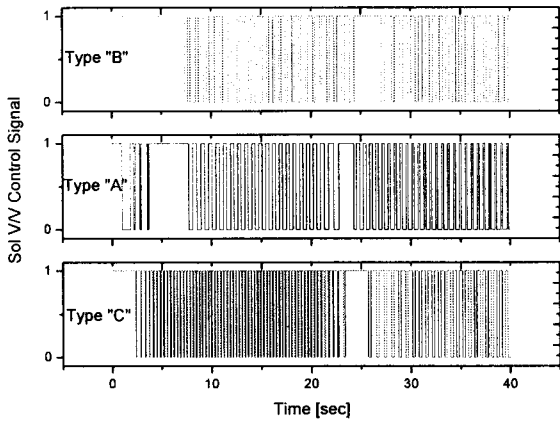


그림. 9 오리피스 직경 4 mm 솔밸브의 동작

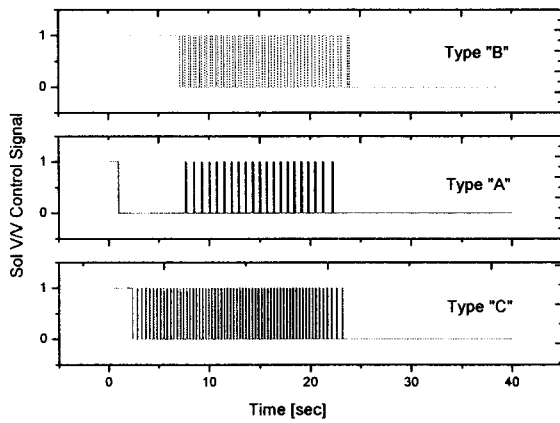


그림. 10 오리피스 직경 10 mm 솔밸브의 동작

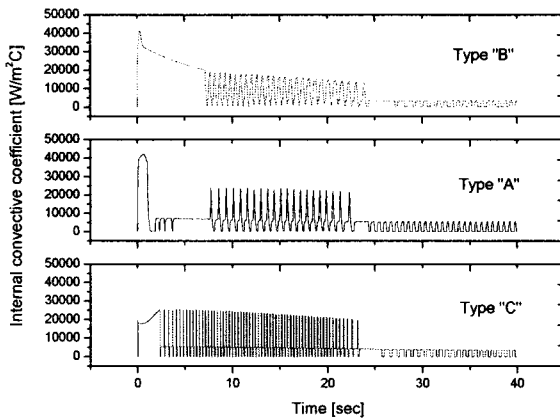


그림. 11 열교환에 의한 배관 내 유동 열전달 계수

초기 20초 구간에서는 Ullage 증가폭이 크므로 두 개의 솔밸브가 동시에 동작을 하였고, 20 초 이후부터는 오직 작은 솔밸브(오리피스 직경 4mm)만으로도 충분히 일정하게 유지되고 있음을 알 수 있다. Ullage가 요구하는 압력조건을 유지하기 위해 각각 He 특성(온도변화)이 제 각각인 Gas를 PWM 신호에 의해 솔밸브가 개폐되므로 시스템의 최적화 및 고성능화와 관계없이 절대 추종하게 된다.

(솔밸브 후단에 열교환기가 위치 ; Type "B") 저압을 고려하여 배관의 두께를 작게 적용하게 되면 배관 내부의 저온 He의 초기 열전달 계수가 매우 커져서 열교환기를 통한 외부 열전달(고온)과 적절한 열평형을 이루어지지 못하며 초기 저온 헬륨이 계속 입력되어 결국 과다 He의 소비와 초기 추종 시간 지연, 짧은 압력지속시간 유지 등의 단점을 보이게 됨을 알 수 있다. 결국 배관 두께를 크게 고려하면 비록 배관의 무게가 증가할지라도 (He 소비 예측) He 탱크 적재량이 감소되어 무게 측면에서

Type "B"가 더 유리하게 된다. 또 Type "A"와 "B"를 비교해본 결과, 열교환기 후단에 솔밸브가 위치해야 압력유지 시 섭동폭도 작게 가져가면서 초기과도구간에서 신속하면서 Overshoot 없이 목표점에 도달하는 것을 확인 할 수 있었다. 즉 Type "C"가 가장 적절한 시스템이라고 할 수 있다.

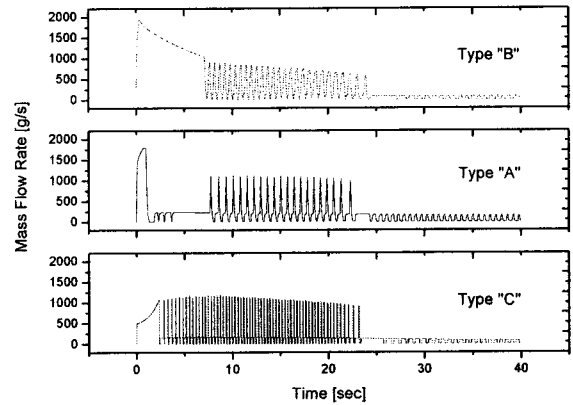


그림. 12 He의 배관 내 유동

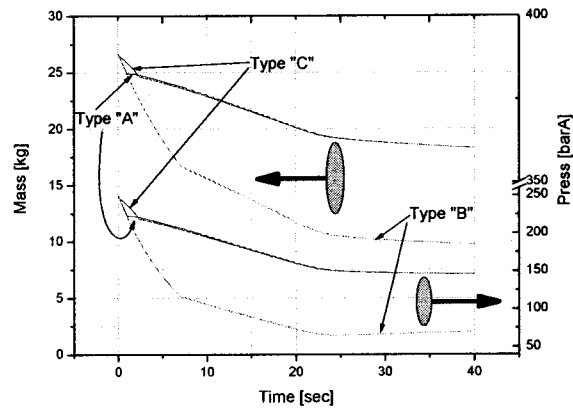


그림. 13 저장 Tank 내 He 질량 및 압력 소비 추이

3. 결론

- 솔밸브의 실험 방법(응답시간 및 최대운용주파수 획득 실험)등을 간략하게 제시 하였다.
- 비행용 솔밸브를 이용하여 동특성 관련 성능실험 결과를 토대로 한 가상의 발사체 압력제어시스템을 구성하였다.
- 제안된 시스템에서 같은 열교환 조건하에 열교환기 배관의 직경을 작게 적용하면 적절한 열교환 효과를 얻을 수 없으며, 시스템의 최적화 및 무게 측면에서 Type "C"를 추천한다.

후 기

본 연구는 공공기술연구회에서 기본연구사업의 일환으로 시행한 "로켓엔진 추력제어기술 개발" 연구의 일부입니다.

참고문헌

- [1] 이중엽, 정태규, 정용갑, 김영목, 2004, "터보펌프 모사를 위한 압력조절계의 특성에 관한 연구," 한국추진공회지, 제8권, pp.27-36.
- [2] Herbert C. Roters, "Electromagnetic Devices," 1951.
- [3] <http://webbook.nist.gov>