

헬륨 가압시스템에 대한 온도특성 연구(II)

정용갑* · 조남경* · 길경섭* · 김영목*

Study on Temperature Characteristic of Pressurization System Using Helium Gas

Yonggahp Chung* · Namkyung Cho* · Kyoungsub Kil* · Youngmog Kim

ABSTRACT

The pressurization system in a liquid rocket propulsion system provides a controlled gas pressure in the ullage space of the vehicle propellant tanks. It is advantage to employ a hot gas heat exchanger in the pressurization system to increase the specific volume of the pressurant and thereby reduce over-all system weight. A significant improvement in pressurization-system performance can be achieved, particularly in a cryogenic system, where the gas supply is stored inside the cryogenic propellant tank. The temperature characteristic of cryogenic pressurant is very important to develop some components in pressurization system. Numerical modeling and Test data were studied using SINDA/FLUINT Program and PTF(Propellant-feeding Test Facility).

초 록

액체로켓 추진시스템에서 가압시스템은 발사체 추진제 탱크의 얼리지 공간에 제어된 가스를 공급하는 것이다. 가압시스템에서 고온 가스 열교환기를 적용하는 데는 가압제의 비용적용을 증가시켜 전체 발사체 시스템의 중량을 감소시키는 장점이 있다. 가압시스템 성능에 있어서 주목할 만한 개선점은 극저온 시스템에서 얻어질 수 있다. 이러한 경우 가스 공급은 극저온 탱크 내부에 저장되어 진다. 극저온 가압제의 온도 특성은 가압시스템에서 구성 단품을 개발하는데 있어서 매우 중요하다. 본 연구에서는 SINDA/FLUINT를 이용한 수치적 모델링과 PTF(Propellant-feeding Test Facility)에서 수행된 실험에 대하여 해석 및 시험이 수행되었다.

Key Words: Cryogenic(극저온), Helium Gas(가스 헬륨), Pressurization System(가압시스템), Temperature Characteristic(온도특성), PTF(추진제 공급계 시험설비)

1. 서 론

액체로켓 추진시스템에서 가압시스템은 우주 발사체 탱크의 얼리지 공간에 제어된 가스를 공급하여 설정된 압력을 유지하는 것이다. 이러한 가압시스템은 추진제 공급시스템에 따라 크게

* 한국항공우주연구원 추진제어그룹
연락처, E-mail: ygchung@kari.re.kr

가스 가압식과 터보펌프 가압식으로 구분된다. 본 연구에서는 터보펌프 가압시스템에서 사용되는 헬륨가스 가압방식을 선정하였으며, 사용된 가압제인 헬륨은 산화제인 액체산소 탱크 내부의 가압제 헬륨탱크에 저장하여 추진제의 가압 가스로 사용하는 극저온 상태 저장가스 가압시스템이다[1]. 가압제인 헬륨가스 탱크가 극저온 상태인 액체산소 내부에 있기 때문에 극저온 온도 특성에 대한 연구가 가장 중요하다. 이러한 시스템에서는 저장상태일 때와 얼리지 상태일 때 두 경우 모두 가스 밀도와 압력에 따른 가압제-가스 온도가 가장 중요한 변수이다. 가압 배관시스템의 작동 유체인 극저온 헬륨가스를 제어하기 위한 레귤레이터, 개폐밸브, 센서, 벨로우즈, 탱크 등의 부품 개발에 있어서 작동 유체의 극저온 온도는 매우 중요하다. 이러한 온도 특성 연구를 통하여 가압시스템에서 온도 특성을 고찰하여 시스템 규격을 선정할 뿐만 아니라 단품의 상세 규격을 선정하는 데에도 반드시 선행되어야 하는 연구이나 국내에서는 이런 해석이나 실제 실험이 미비한 상태이다. 본 연구에서는 실제 액체산소의 유사 극저온 유체로 액체질소를 사용하였으며, 가압제로는 실제로 사용되는 헬륨가스를 사용하여 가압시스템에서의 온도 특성에 대한 고찰을 수행하였다. 또한 해석을 위한 범용 코드인 SINDA/FLUINT를 사용하여 가압시스템 전반에 걸친 이론 해석을 수행하였다. 향후 실제 추진제로 사용되는 액체산소 저장탱크에서의 시험과 해석을 수행하여 극저온 탱크 내부에서의 온도특성을 연구하여 극저온 가압시스템 설계에 반영하고자 한다.

2. 가압시스템

가압제인 헬륨가스를 사용하는 액체로켓에 있어서 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 주변 온도 조건의 탱크에 헬륨가스를 저장 하였다가 이를 가압제로 사용하는 방법과 다른 하나는 본 연구에서 수행하는 시스템과 같은 형태로 주로 극저온 추진제를 사용하는 시스템에서

사용되는 것으로 극저온 추진제 탱크 내부에 가압제인 헬륨가스 탱크를 넣어서 여기에 극저온 상태의 헬륨가스를 저장하였다가 사용하는 것이다. 이 경우 같은 크기의 헬륨가스 탱크 용적에서 상온과 비교 하였을 경우 약 3배 정도 많은 중량을 저장할 수 있는 장점이 있다.

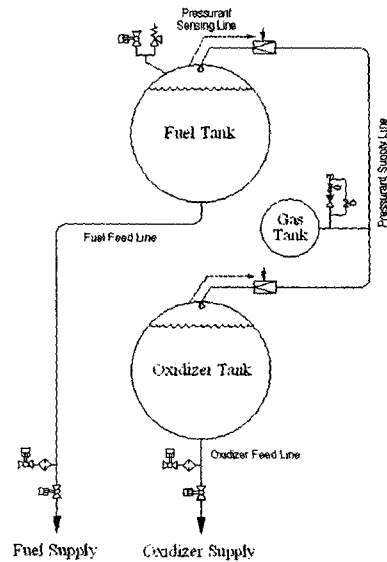


Fig. 1 Ambient Stored-gas Pressurization System

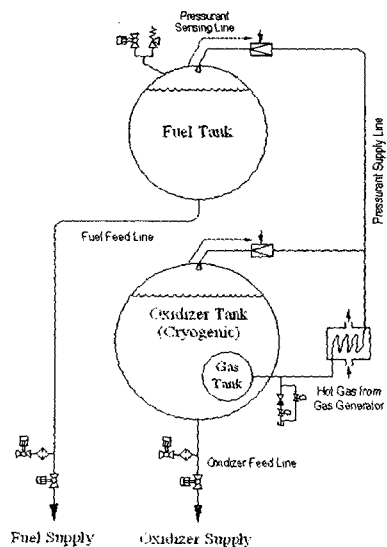


Fig. 2 Cryogenic Stored-gas Pressurization System

Figure 1은 상온 저장가스 가압시스템을 나타낸 것으로 저장가스 가압시스템 중에서 일반적인 형태로 단단 감압제어시스템의 간략한 예를 나타낸 것이다. Figure 2는 극저온 저장가스 가압시스템 개략도이다[2].

3. 이론 해석

3.1 해석 도구

해석 도구로는 범용 열유체 해석 코드인 SINDA/FLUINT를 활용하였다. SINDA/FLUINT 프로그램은 NASA의 표준 열유체 설계 및 해석 프로그램으로 이상유동(Two phase flow) 및 혼합가스에 대한 해석이 가능하다. 유체를 포함하는 유체 거동을 모사하기 위하여 제어체적의 개념인 럼프(Lump)와 제어체적내의 유체 이동과 이에 수반되는 압력강하를 모사하기 위해 Path 개념을 도입하였다. 특정한 열역학적 특성치를 가지는 럼프에 럼프 관계식인 Eq. (1)과 (2)와 같은 질량보존 및 에너지 보존식이 적용된다.

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_m - \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} = \sum h_m \dot{m}_m - \sum h_{out} \dot{m}_{out} - P \cdot (dV/dt) + \dot{Q} \quad (2)$$

Equation (2)에서 제시한 에너지 방정식을 기반으로 해석할 수 있다. 우변의 첫 번째와 두 번째 항은 헬륨의 입 출입에 따른 탱크 내 저장된 헬륨 에너지의 변화를 나타내며, 세 번째 항은 단열 압축 및 단열 팽창에 따른 온도변화를 나타낸다. 그리고 네 번째 항은 헬륨탱크 외부의 액체질소와 헬륨탱크 사이의 열전달을 나타낸다.

유체이동이 관계되지 않고 열전달만 관계되는 대상인 헬륨탱크 벽, 대기 및 추진제 탱크 등을 모사하기 위해 열전달 노드의 개념이 도입되었다. 열전달 노드는 Eq. (3)과 같이 표현될 수 있다. 여기서 좌변은 열용량을 나타내며 우변은 발생 열과 열전달 값을 의미한다.

$$\rho CV \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{generation} + \dot{Q}_{transfer} \quad (3)$$

3.2 가압제 탱크부의 온도특성

본 연구에서는 가압제로 사용되는 상온의 헬

륨가스를 헬륨승압장치로 승압하여 극저온 액체 질소 탱크 내에 있는 헬륨탱크에 충전한다. 이러한 극저온 저장 상태의 헬륨가스를 토출 및 제어하여 추진제 탱크의 가압가스로 사용한다. 헬륨 가스는 충전, 냉각 및 토출과정 등을 통하여 단열 압축 및 팽창과 액체질소와의 열전달을 거치게 된다. 탱크 내 헬륨의 온도변화는 Eq. (2)에서 제시한 에너지 방정식을 기반으로 해석될 수 있다.

헬륨의 입 출입에 따른 헬륨의 저장 에너지 변화와 단열 팽창에 따른 에너지 변화는 헬륨 탱크 후단에 설치되어 있는 충전/토출 시스템의 차압에 관계되는 헬륨 공급량으로 계산될 수 있다. 탱크 내 헬륨의 온도와 압력의 관계는 헬륨의 임계압력인 2.26bar 이상으로 유지될 경우 이상기체 방정식을 적용할 수 없고 $Z=PV/RT$ 형태의 압축성 계수를 고려해야 한다[5]. 헬륨 탱크에서 토출되는 유량은 측정된 탱크 내 압력과 온도를 이용하여 시간에 대한 헬륨의 질량 변화를 계산하였다.

극저온 가압시스템에서 극저온 저장 탱크 내부의 액체질소와 가압제인 헬륨가스 탱크사이에서의 열전달 메카니즘은 Fig. 3과 같다. 여기서 액체질소의 온도를 T_{∞} 라 하고 헬륨가스의 온도를 T_g , SUS304로 제작된 헬륨용기 외부의 액체 접촉면 온도를 T_{w1} , 헬륨용기 내부의 가스 접촉면 온도를 T_{w2} , 헬륨용기 벽두께는 Δl 이라고 정의한다.

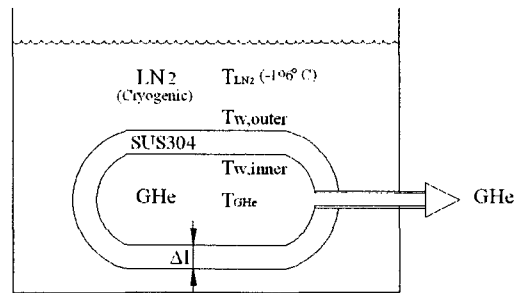


Fig. 3 Heat transfer Mechanism in Cryogenic Tank System

열전달은 크게 액체질소에서 헬륨탱크로 전달되는 대류 열전달, 헬륨탱크 벽에서의 전도 열전달, 헬륨 탱크 내벽에서 헬륨가스로의 대류 열전달로

구분될 수 있다. 헬륨을 공급라인으로 공급시의 경우 단일 팽창으로 인해 탱크내의 헬륨온도가 액체 질소 온도 이하로 내려가게 되므로 온도분포 선도의 경향이 더 낮은 온도로 형성된다.

액체질소와 헬륨 탱크 외벽과의 열전달은 Eq. (4)와 같다. 여기서 $h_{w,outer}$ 는 통상 자연대류 열전달 계수의 형태를 띤다. 공급(토출)시에는 탱크 외벽이 충분히 냉각되어 단일 팽창에 의해 헬륨 온도가 액체질소 온도 이하로 내려가게 되므로 탱크 외벽에서는 액체질소와의 단상(Single phase) 자연대류 열전달 형태가 된다.

$$\dot{Q}_{LM} - w_{,outer} = h_{w,outer} A_{outer} (T_{w,outer} - T_{LM}) \quad (4)$$

헬륨탱크 벽 내부에서는 전도 열전달 식으로 열전달이 예측될 수 있다. 헬륨탱크 내벽과 헬륨간의 열전달은 Eq. (5)와 같이 표현된다. 헬륨은 초임계 상태를 유지하며 열전달 계수는 단상 자연대류 열전달 계수의 경험식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{Q}_{w,inner} - q_{He} = h_{w,inner} A_{inner} (T_{qHe} - T_{w,inner}) \quad (5)$$

본 시험에 사용된 헬륨 탱크는 원통형 외형과 구형의 혼합된 탱크이므로 경험적으로 알려진 원통형상 내부의 자연대류 열전달 계수인 Eq. (6)과 구 형태의 자연대류 열전달 계수인 Eq. (7)을 조합하여 적용할 수 있다.

$$Nu = 0.4 Ra_D^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

$$\text{여기서 } Ra_D = Gr_D \cdot Pr$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_{Helium} - T_{w,inner})D^3}{\nu^2}$$

$$Nu = 0.13 Ra_D^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

헬륨탱크 외벽과 액체질소간의 열전달 및 헬륨 탱크 내벽과 헬륨간의 열전달의 정밀한 예측을 위해서는 온도 변화에 따른 물성치가 정확하게 입력되어야 하며, 헬륨탱크 벽면 온도가 계속되어 적용된 열전달 계수의 검증이 수행되어야 한다.

3.3 해석 모델

본 해석에 적용된 극저온 토출에 대한 해석 모델은 Fig. 4에 제시하였다. 실제 수행된 실험 설비의 형상 및 운영조건을 SINDA/FLUINT의

Lump/Path 개념으로 구성하였다. Figure 5는 실험 데이터와 이론 해석을 수행하기 위한 해석 과정을 나타내는 순서도이다.

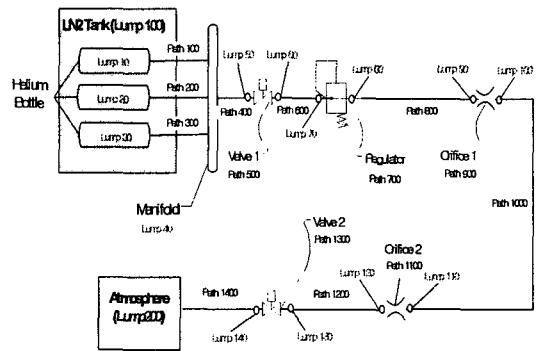


Fig. 4 The Model of Cryogenic GHe Supply

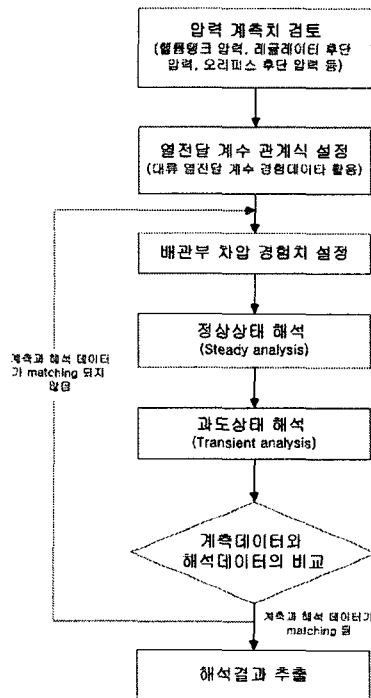


Fig. 5 Cryogenic GHe Analysis Process

4. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치는 크게 극저온 액체 충전 및 저장 시스템과 가압제 저장시스템, 가압제 공

급시스템, 제어/계측시스템 등으로 구성되어 있다. Figure 6은 실험장치의 개략도로서 극저온 추진제인 액체산소를 모사하기 위하여 액체질소를 사용하였다. 액체질소를 충전한 다음에 헬륨 가스 탱크에 헬륨가스를 충전 하였다. 충전 종료 상태의 압력은 206bar이고 온도는 77K 이었다. 극저온 헬륨가스 저장용기는 44L 탱크 3개로 총 132L이다.

극저온 헬륨 가스를 Dome-loaded 타입의 레귤레이터를 사용하여 1차 압력 약 206bar에서 가압제 배출을 시작하며 탱크 내의 압력이 거의 없을 때까지 계속 시스템에 공급하도록 토출 시험이 수행되었다. 이 때의 레귤레이터 후단 2차 압력은 약 44bar로 설정되었다. 온도센서는 20K까지 측정 가능한 RTD 센서를 선정하여 측정하였고 일정 유량의 공급을 위하여 오리피스를 2개 설치하여 유량 제어를 하였다.

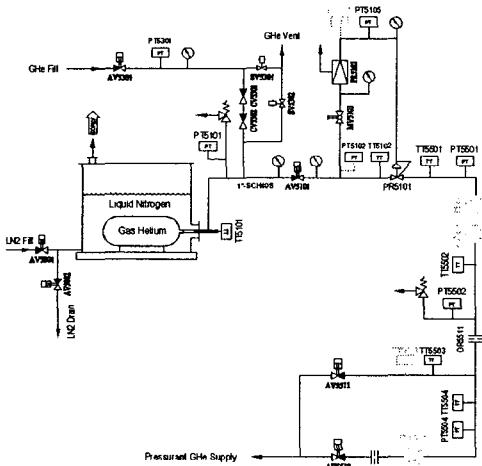


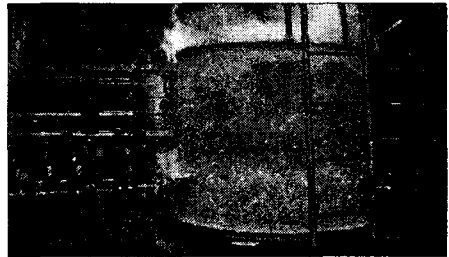
Fig. 6 Pressurization System Test Facility

Table 1. Test Conditions

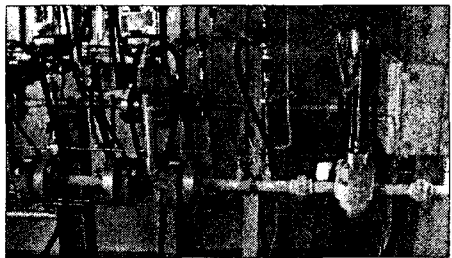
Conditions		Values
Pressurant Press. Range		206 ~ atm. (69bar)
Regulated Pressure		43 bar (ref. 44bar)
GHe tank	Volume	132L (44×3EA)
	Wall thick.	15mm
Main Duration		130 sec.
Orifice	I	D = 6 mm
	II	D = 10.5 mm

5. 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 223K(-50℃)까지 사용 가능한 상온 고압 레귤레이터를 사용하여 압력제어를 수행하였다. Photo 1은 극저온 헬륨 가압시스템 실험시의 사진이다.



(a) LN2 and GHe Tank Department



(b) GHe Supply Line

Photo 1. Pressurization System Test

5.1 충전시 헬륨탱크 및 가압제 온도분포

Figure 7은 Photo 1에서와 같이 충분히 냉각되어 있는 액체질소 탱크 내부에 위치하고 있는 헬륨탱크 내부 헬륨가스 충전 압력과 헬륨탱크 Outlet 부의 온도를 보여준다. 1차 헬륨 충전 압력은 약 209bar로 충전되었고 시간이 지남에 따라 헬륨탱크와의 열전달에 의해 온도 강하로 인하여 압력이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 압력 강하율이 일정하게 유지될 때까지 헬륨 탱크내에 가압제를 충전 하여야 한다. 다시 재 충전한 후 약 20분간 대기 하였을 때 압력 강하가 미미하고 일정해진 것을 알 수 있다. 헬륨 탱크 내의 온도 측정이 약간 높은 값을 지시하는 것은 탱크 내부 온도 측정이 곤란하여 헬륨 토출부에 센서를 설치하여 온도가 약간 높게 나타났으나 공급 시에는 탱크 내부의 온도로 접근하는 것을 알 수 있다(Fig. 9). 충분히 냉각된 정도는 Fig. 9의 온도센서 TT5101의

온도가 자동밸브를 개방하여 가스를 공급하자마자 상압의 액체질소 온도인 -196°C 로 강하하는 것을 통하여 알 수 있다.

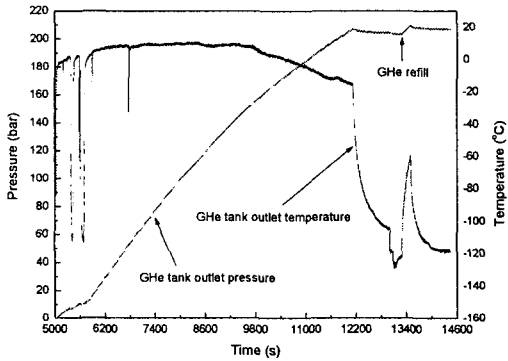


Fig. 7 Temperature and Pressure Distribution during GHe Filling

5.2 가압제 공급시 시스템 압력 및 온도분포

극저온 상태의 헬륨탱크에 헬륨가스를 충전 완료한 후에 가압시스템 가압제 공급시의 온도 및 압력 분포를 측정하였다. 또한 해석시에는 헬륨 탱크 내의 압력 강하율을 기준으로 관내의 압력 손실을 보상하여 계산이 이루어졌다. Figure 8은 가스공급시의 시스템 압력분포를 나타내는 선도이고 이 때의 시스템 온도분포를 나타내는 것은 Fig. 9이다. Figure 8에서 보는 것처럼 열전달이 고려되어 계산된 값은 실제 실험값과 유사하게 계산된 것을 알 수 있다.

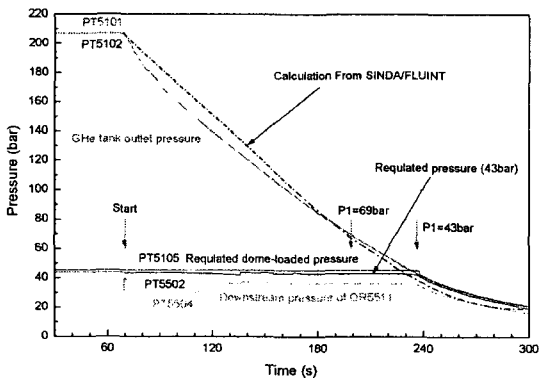


Fig. 8 System Pressure Distribution

PT5101과 PT5102는 헬륨탱크 토출부 근처의

압력을 나타내며, 가스 공급시 탱크부 압력이 일정하게 감소하는 것을 알 수 있다. PT5105는 감압레귤레이터의 Dome에 공급되는 기준 압력으로 44bar로 공급된다. 이 때에 레귤레이터에 의해 감압된 압력(PT5502)은 약 ± 0.5 bar의 제어 오차로 일정하게 43bar를 유지되고 있음을 볼 수 있다. 또한 PT5504는 일정 유량을 유지하는 것을 보정하기 위해 설치된 1차 오리피스 전단 압력이다. Dome-loaded 압력(PT5105)과 가스공급 이전의 설정 제어 압력(PT5502)과의 차이는 약 -1.0bar 이었다.

본 시험의 경우 구성품 전체의 평균 온도와 순간적인 극저온 노출을 고려하여 감압을 위해 사용된 레귤레이터는 극저온용이 아닌 상온의 고압 레귤레이터를 사용하여 온도 특성 시험을 수행하였다. Figure 8의 레귤레이터 제어 압력(PT5502)과 Fig. 9의 레귤레이터 전단의 온도 TT5102에서 보는 것처럼 온도가 상온에서부터 약 -190°C 까지 강하하였음에도 불구하고 레귤레이터는 성능을 유지하며 만족할 만한 압력 제어를 수행하였다. 즉 사용온도 -50°C 의 상온 레귤레이터에 극저온 온도의 가스가 본 시험과 같은 범위의 유량과 온도 강하에도 사용 가능한 것을 알 수 있다(Photo 1(b)의 시험 후 레귤레이터 사진 참조). 이는 배관내의 통과 가스는 비록 극저온 상태이나 열전달에 의한 레귤레이터 자체의 평균온도가 본 시험 지속시간인 약 2분 48초 동안 -50°C 에 도달하지 않은 것으로 사료된다. 향후 구품 표면에 측온 센서를 부착하여 온도를 계측할 예정이다.

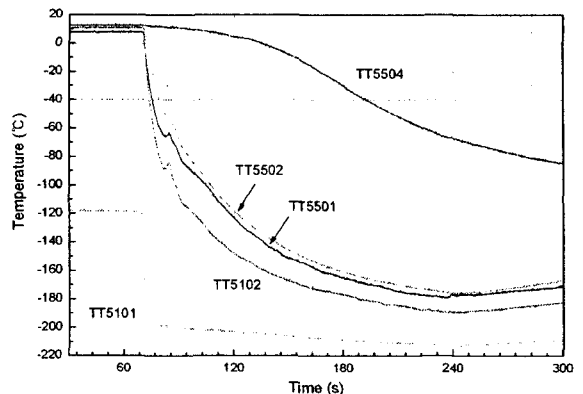


Fig. 9 System Temperature Distribution

본 시스템은 Fig. 9의 TT5101부터 TT5504 쪽으로 공급되는 배관시스템에서의 온도를 나타내는 것으로 각 지점에서의 공급 배관부 온도 분포를 나타낸다. 가스 공급이 시작되면 가스탱크 토출부에 정체하여있던 가스가 배출되어 수초이내에 헬륨탱크 내부 가스의 온도로 하강하게 된다. 그리고 극저온 탱크에서 멀어질수록 배관부의 온도는 점차 높은 것을 알 수 있으며, 이러한 경향은 향후 개발품 설계에 중요한 자료가 되리라 판단한다.

또한 약 240초 이후에는 온도가 점차 상승하는 것을 볼 수 있는데, 이때에는 가스탱크의 가스가 소모되어 1차 압력이 설정된 2차 압력보다 낮은 43bar 이하가 되는 시점이다. 이 때에는 유량이 감소하여 가스 유속의 감소로 인한 배관내 가스와 배관부 벽의 열전달량이 증가로 온도가 점차 상승하게 된다.

헬륨탱크 내의 온도는 액체질소 온도인 -196°C 에서부터 실제 설계 조건인 1차 압력이 69bar에 도달하는 가스공급시작 약 2분 10초 후에 -210°C 로 온도가 떨어져서 본 연구와 같은 조건인 경우에는 약 14°C 정도 강하하는 것을 알 수 있다.

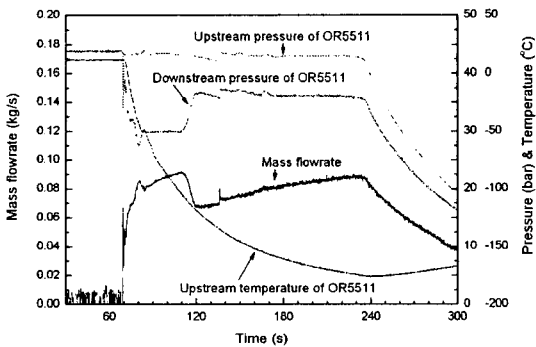


Fig. 10 System Flowrate Distribution

Figure 10은 오리피스(OR5511) 전후단의 압력과 온도를 기준으로 유량을 계산한 결과이다. 오리피스 전단 압력은 거의 일정하게 유지되고 후단 압력은 초기에 자동밸브 조작시 약 30bar까지 감소하다가 36bar 근처에서 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이에 따라 유량선도도 차압 증가에 의해 유량이 증가하다가 차압이 다시 작아지면 유량은 감소하였다가 다시 공급가스 자체의 단열팽창에 의한 온도가 감소된 것으로 인한 유량이 서서

히 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 차압은 거의 일정하나 오리피스를 통과하는 가스의 온도가 낮은 것이 유량 공급에 지배적으로 작용하여 유량이 점차 증가하는 것으로 사료된다. 그리고 약 240초 후부터는 차압은 일정히 유지되나 헬륨가스 자체의 유속 감소로 인한 온도 상승이 지배적으로 작용하여 유량이 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 공급 초기에는 압력이 급격히 떨어졌다가 다시 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 유량은 측정된 것이 아니고 오리피스 전·후단에서의 온도 및 압력에 대하여 계산한 결과의 유량으로 계측오차 여부에 대해서는 향후 추가 실험을 통하여 검증할 예정이다.

5.3 가압계 공급시 헬륨탱크 내의 압력 및 온도특성

Figure 11은 추진제 가압 공급원이 되는 초기 헬륨탱크 내에서의 가스 온도 특성을 나타내는 그래프로 매우 중요한 결과이다. 열전달이 없는 경우에 계산된 값과 실제 열전달이 포함된 계측 결과를 비교하였다. 결과에서 볼 수 있듯이 헬륨가스 토출 시험이 시작하여 1차차 감압 압력이 69bar에 도달하는 데 걸린 시간은 약 2분 10초 정도이었고 이 때의 온도는 -210°C 로 계측되었다. 또한 설정 2차 압력까지 일정하게 유지되는 시간은 이보다 38초 정도 더 유지되었다. 전체 2차 압력이 일정하게 유지되는 구간인 2분 48초 동안 헬륨공급시험이 수행되었다. 이 때의 탱크에서 토출되는 공급 유량 변화는 Fig. 8과 같다. 약 2분 48초 동안에 온도 강하는 -196°C 에서부터 -213°C 까지 -19°C 강하 하는 것을 알 수 있었다.

Figure 12는 실험 결과에서 압력 손실항을 참고하여 해석이 수행된 결과이다. 헬륨가스 탱크 주변의 액체질소 온도와 헬륨 탱크에 있는 헬륨가스의 온도, 헬륨가스 탱크 벽의 온도를 보여주고 있다. 탱크 벽을 경계로 액체질소와 헬륨가스 사이 온도차에 대한 계산 결과이다. 그리고 Figure 13의 경우에는 이러한 탱크에서 열전달이 있을 경우와 없을 경우에 대한 비교를 위해 계산된 시간에 따른 온도분포 그래프이다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 열전달을 고려하지 않을 경우에는 시간이 지남에 따라 상당한 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 해석의 오차가 작을수록 구성요소 설계나 개발이 용이하게 될 수 있다.

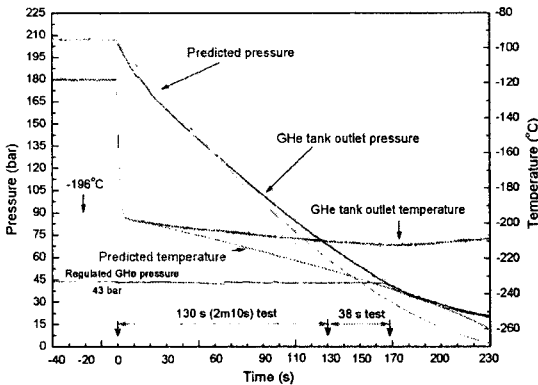


Fig. 11 Temperature Characteristic in the GHe Tank

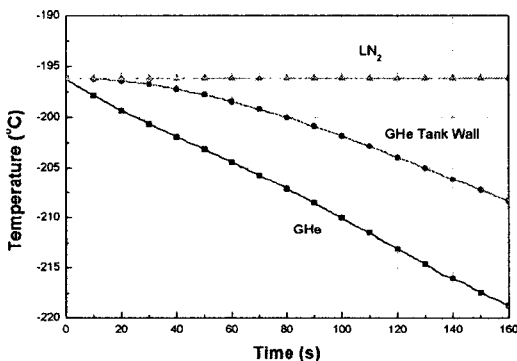


Fig. 12 Calculated Temperature Distribution in the GHe Tank

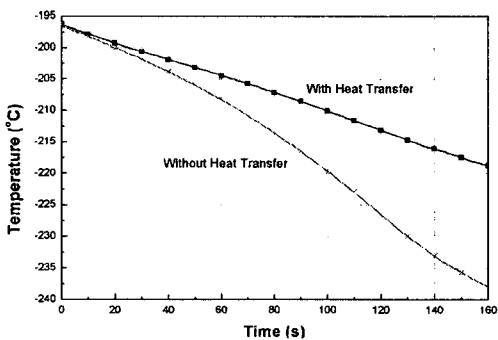


Fig. 13 Calculated Temp. Distribution with Heat Transfer or not

해석이 실제 실험 결과와의 오차를 줄이기 위해서 좀더 많은 실험과 비교가 진행되어야 할 것으로 사료되며, 향후 시스템 보완과 실제 추진제인

액체산소에 대한 시험을 통하여 좀더 정확한 열전달 현상을 예측할 예정이다.

6. 결론

본 연구에서는 극저온 추진제를 사용하는 액체 로켓에서 극저온 상태의 가압제 가압시스템의 온도특성에 대한 연구이다. 이러한 극저온 가압시스템에서 온도특성에 대한 고찰은 가압시스템 개발에 상당한 중요한 기술이 되며, 극저온 온도특성의 범위에 따라 그 개발 난이도가 현저히 다르게 된다. 본 연구를 통하여 극저온 가압시스템 개발시에 반드시 필요한 온도특성에 대한 기본 자료를 실험을 통하여 획득하였으며, 또한 범용 코드를 활용한 해석을 수행하여 해석과 시험 결과가 검증되었다. 이러한 검증 결과를 활용할 경우 유사 가압시스템 설계 수행이 가능할 것으로 사료된다. 향후 실제 가압시스템과 유사한 산화제인 액체산소와 고온 가스를 모사하기 위한 열교환기를 적용한 시험을 수행할 예정이다.

참고 문헌

1. Anon., "Pressurization Systems for Liquid Rockets," NASA Space Vehicle Design Criteria Monograph, SP-8112, October 1975.
2. Elliot Ring, "Rocket Propellant and Pressurization Systems," Prentice-hill, Inc., Englewood Cliffs, N. J.
3. A. Hedayat, T.E. Steadman, "Pressurization, Pneumatic, and Vent Subsystems of the X-34 Main Propulsion System," AIAA-98-3519.
4. Takashi Maemura, Katsuhiko Akiyam, "New H-IIA Launch Vehicle Technology and Results of Maiden Flight," Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol.39 No.2 (Jun. 2002).
5. V.V. Sychev et al. "Thermodynamics of properties of Helium," Hemisphere Publishing Corp. 1987.