

가압제 토출시 온도강하율에 대한 연구

정용갑* · 홍문근* · 권오성* · 김영목*

Study on Temperature Drop Rate during Pressurant Discharge

Yonggahp Chung* · Moongeun Hong* · Ohsung Kwon* · 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. Therefore a significant improvement in pressurization system performance can be achieved, particularly in a cryogenic system. For this study air and GN₂ are employed as external fluid and pressurant respectively. Numerical analysis on the pressurant discharging characteristics have been compared with the experimental results performed at the PTF(Propellant-feeding Test Facility). It is shown that the discrepancy of analytic and experimental results is within about $\pm 15\%$. It is estimated that the temperature drop rate of cryogenic pressurant immersed liquid oxygen can be predicted using this analytic approach method.

초 록

액체로켓 추진시스템에서 가압시스템은 발사체 추진제 탱크의 얼리지 공간에 제어된 가스를 공급하는 것이다. 가압시스템에서 고온 가스 열교환기를 적용하는 데는 가압제의 비용적을 증가시켜 전체 발사체 시스템의 중량을 감소시키는 장점이 있다. 그러므로 가압시스템 성능에 있어서 주목할 만한 개선점은 특히 극저온 시스템에서 얻어질 수 있다. 본 연구에서는 외부 유체와 가압제로 공기와 GN₂를 각각 적용하였다. 가압제 토출 특성에 관한 수치 해석은 PTF에서 수행된 실험 결과와 비교되었다. 해석과 실험 결과의 오차는 약 $\pm 15\%$ 이내로 나타났다. 이러한 해석적 접근을 사용하면 액체산소에 잠겨진 극저온 가압제의 온도강하율을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

Key Words: Cryogenic(극저온), Pressurant(가압제), Pressurization System(가압시스템), Temperature Drop Rate(온도강하율), PTF(추진제 공급계 시험설비)

1. 서 론

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

액체로켓 추진시스템에서 추진제를 터보펌프

나 연소기 등으로 공급하기 위해서는 추진제 탱크의 열리지를 가압제로 가압하여야 한다. 추진 시스템 전체 성능과 연관된 액체 추진제 공급 시스템의 성능은 추진제 탱크 열리지부를 가압하는 가압시스템의 성능과 밀접하게 관련되어 있으므로 이에 대한 연구가 매우 중요하다. 액체로켓 추진시스템 설계 변수로는 여러 가지가 있으나 그 중에서 무엇보다 중요한 것이 무게이다. 그래서 추진시스템 설계시 시스템 경량화에 주안점을 두어야 한다. 가압제 저장 탱크에 저장되는 가압제의 비중량을 크게 하기 위해서는 낮은 온도로 저장될수록 비중량이 커지게 되므로 주로 적용되는 가압시스템은 극저온 추진제 탱크 내에 가압제 용기를 설치하는 극저온 시스템을 적용하여 시스템을 경량화 한다. 이러한 극저온 가압시스템을 적용하기 위해서는 작동 온도 규격에 맞는 구성 부품에 대한 개발이 필수적이며 시스템 설계시 작동 온도 규격을 설정하기 위해서는 가압제 토출시 압력강하를 대비 온도강하율에 대한 정보가 반드시 필요하다. 이러한 온도강하율 특성을 연구하기 위하여 해석과 실험을 수행하여 그 결과를 서로 비교하였다. 본 연구는 극저온 가압제를 적용하기 위한 선행 연구로 가압제로 He 대신 GN₂를 그리고 외부유체로 LOX 대신 대기압의 공기 중에서 수행되었다.

2. 수치 해석

2.1 가압제 탱크에서의 열전달

극저온 추진제 탱크 내부에 가압제 탱크가 설치되어 극저온 추진제에 가압제 탱크가 잠겨지게 되는 것이 일반적으로 적용되는 극저온 가압 시스템이다. Figure 1은 이러한 극저온 가압 시스템에서의 가압제 탱크부를 개략적으로 나타낸 것이다. 외부 유체로는 극저온 유체인 LOX나 LH₂ 그리고 가압제로는 GN₂나 GHe가 주로 적용되나 본 선행 연구에서는 공기와 GN₂에 대하여 수행되었다.

가압제 탱크부에서의 열전달은 크게 세 부분으로 나눌 수 있다. 즉 가압제 탱크 내부에서의

가압제와 탱크 벽 사이의 대류 열전달과 탱크 벽에서의 전도 열전달, 탱크 벽과 외부 유체 사이의 대류 열전달이다.

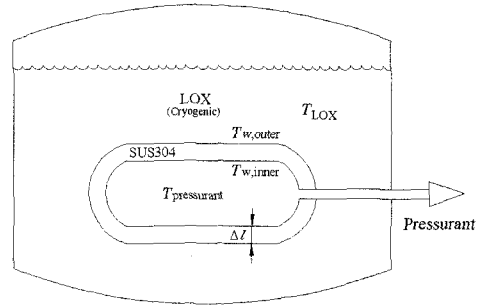


Fig. 1 Pressurant Tank Located in Cryogenic Tank

2.2 해석 모델

해석적 접근을 위한 지배방정식으로는 Eq. (1)과 (2)의 질량보존방정식과 에너지방정식이 적용되었다. Eq. (2)에서 제시한 에너지 방정식의 우변 첫 번째와 두 번째 항은 헬륨의 유입 및 토출에 따른 탱크 내 저장된 헬륨의 에너지 변화를 나타내며, 세 번째 항은 단열 압축 및 단열 팽창에 따른 온도변화를 나타낸다. 마지막 항은 헬륨탱크 외부의 액체질소와 헬륨탱크 사이의 열전달을 나타낸다.

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

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_{in} h_{in} - \dot{m}_{out} h_{out} - \frac{pdV}{dt} + \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

2.3 열전달

해석은 가압제가 탱크에서 외부로 토출시 탱크에서 토출되기 직전의 가압제 온도강하율을 예측하는 것이다. 열전달이 없이 해석을 할 경우에는 상당한 온도 예측 오차가 발생하였으며 본 연구에서는 이러한 열전달이 없는 경우에 대한 해석은 생략하기로 한다. 앞의 2.1에서 언급된 것처럼 가압제 탱크부에서는 대류와 전도로 열전달이 이루어진다.

가압제 탱크 벽에서는 전도 열전달이 이루어지며 이러한 전도 열전달은 Eq. (3)에서와 같이 열류에 수직한 면적과 그 방향의 온도기울기의 곱에 비례한다. 또한 집중용량법을 적용하기 위하여 탱크벽을 20등분하여 Biot 수가 0.1 미만이 되도록 하였다.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

대류열전달은 가압제와 탱크벽사이 그리고 외부유체와 탱크벽사이의 열전달이며 Eq. (4)에 의하여 계산된다.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = h dT \quad (4)$$

여기서 $Nu_D = hD/k$ 이고 $Ra_D = Gr_D \times Pr$ 이다.

본 시험에 사용된 가압제 탱크는 원통형과 구형이 혼합된 형상의 탱크를 사용하였다. 원통형 내외부에서는 계산결과 자연대류로 볼 수 있어 이에 대한 경험식으로는 Eq. (5)를 적용하였다. 구형상에 대한 경우 가압제 탱크 외부에 대해서는 외부 유동 자연 대류 경험식 Eq. (6)과 내부에 대해서는 내부 유동 경험식 Eq. (7)을 적용하였다.

$$Nu_D = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (5)$$

$$Nu_D = 2 + \frac{0.589 Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}}} \quad (6)$$

$$Nu_D = 0.59 Ra_D^{\frac{1}{4}} : 10^4 \leq Ra_D \leq 10^9 \quad (7)$$

$$= 0.13 Ra_D^{\frac{1}{3}} : 10^9 \leq Ra_D \leq 10^{12}$$

Eq. (5)는 Ra_D 가 10^5 에서 10^{12} 까지 넓은 범위에 대하여 적용 가능하며 Eq. (6)은 Pr이 0.7 이상이고 Ra_D 가 10^{11} 이하인 경우에 적용 가능하다.

본 해석을 위한 계산 프로그램은 EES Solver V7.731을 사용하였다.

3. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험 장치는 극저온 액체 충전 및 저장 시스템과 가압제 저장시스템, 가압제 공급 시스템, 제어/계측시스템 등으로 구성되어 있다. Figure 2는 실험장치 개략도로 외부 유체로는 실체로는 극저온 유체를 적용하나 본 연구에서는 선행 연구로서 대기중의 공기가 있는 상태로 적용되었다. 가압제로는 GN_2 가 적용되어 초기 충전 압력은 약 220barG이고 이때의 온도는 상온이었다.

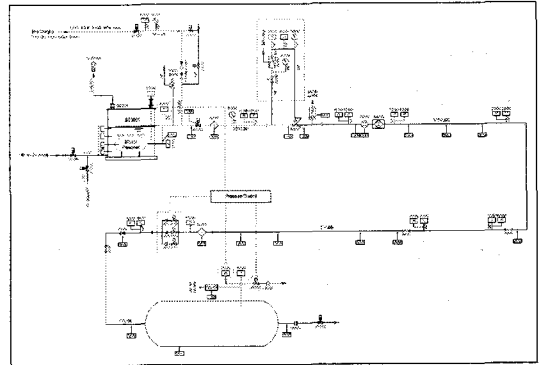


Fig. 2 Schematic diagram of pressurization system

가압제 탱크는 Stainless steel 304로 제작되었으며 주요 규격은 표 1과 같다.

Table 1. Pressurant tank specifications

Parameter		Values
Material		SUS 304
Volume [m ³]	Cylinder	0.04063
	Sphere	0.00375
	Total	0.04438
Cylinder length [m]		0.8776
Inner radius [m]		0.1214
Outer radius [m]		0.1365
Wall thickness		15.1 mm

실험방법은 감압 레귤레이터를 사용하여 약 40 ±5barG로 감압한 후에 유량계 등이 설치된 공급 라인을 통과한 후 다시 열리지 요구압력으로 2차 감압되게 된다. 본 연구에서 측정된 센서는 압력과 공급라인 내부온도, 공급라인 표면온도, 유량 등이 측정되었다. 해석 및 실험 조건은 표 2와 같으며 열리지 시뮬레이션 장치에서 가압제를 토출하는 오리피스는 10가지가 적용되었다. 가장 작은 유량을 토출하는 오리피스의 직경은 3.482mm이고 최대 토출 유량의 오리피스 직경은 11.382mm 이다.

Table 2. Test conditions

Parameter	Values
Initial pressure	about 220 barG
Initial temperature	about 300 K
External fluid	Air (1 atm.)
Pressurant fluid	GN ₂
Orifice for discharge	3.482 ~ 11.382

4. 결과 및 고찰

4.1 해석 결과

해석시 초기 조건은 실험 결과에서 획득되는 데이터를 조건에 따라 적용하여 계산되었다. 토출 유량의 경우에는 지속시간동안의 평균 유량을 해석시 적용하였다. 또한 주요 변수인 압력강하율 대비 온도강하율을 무차원수인 Eq. (8)의 형태로 고찰하였다.

$$\frac{dT}{dt} \propto \frac{dp}{dt} \quad (8)$$

탱크벽의 열전달 계산시 Biot 수가 0.1 미만이어야 하는데 시험조건 중에서 가장 큰 경우는 Test10이다. Figure 3은 Test10에서의 Biot 수에 대한 선도로 탱크 벽을 20등분하여 계산된 본 연구의 모델은 집중용량법의 적용에 만족함을 알 수 있다.

가압제 탱크벽과 외부 유체 및 가압제와의 자연대류 열전달에 대한 특성은 대류 열전달계수와 밀접한 연관이 있다. Figure 4는 Test10에서

의 대류 열전달계수를 나타내는 선도로 가압제와 탱크벽사이의 대류 열전달계수가 외부 유체에서의 열전달계수보다 현저하게 큰 것을 알 수 있다. 이는 외부 유체가 공기인 경우에는 외부 열전달이 미미하며 향후 적용 예정인 LOX인 경우에는 외부 유체에 대한 열전달이 높아질 것으로 사료된다. 주요 해석 결과는 실험 결과 부분에서 서로 비교하여 고찰하고자 한다.

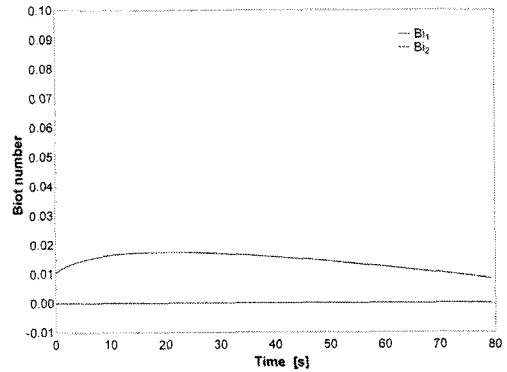


Fig. 3 Biot number at Test10 condition

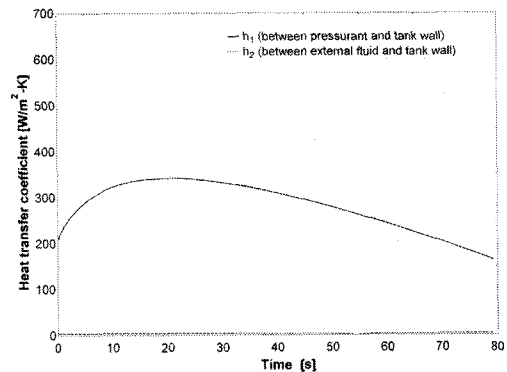


Fig. 4 Heat transfer coefficient at Test10 condition

4.2 실험 결과

가압제 공급시스템은 고압의 가압제가 두 단계로 감압되어 열리지 시뮬레이션 장치를 요구 압력범위로 제어하게 된다. 가압시스템에 대한 주요 공급 특성은 모든 시험 조건에서 유사하므로 중간 유량 조건인 Test05 조건에 대하여 나타

내면 Fig. 5와 같다. 여기서 PT5101은 가압제 탱크내의 압력이고 PT5105는 1차 감압 레귤레이터 돌압력, PT5502는 1차 감압 레귤레이터로 제어된 압력, PT1302는 2차 감압 장치로 제어된 얼리지 압력이다. 또한 TT5100은 가압제 탱크내의 가압제 온도이고 TT5101은 가압제가 토출된 직후 온도, TT6202는 외부 유체의 온도이다.

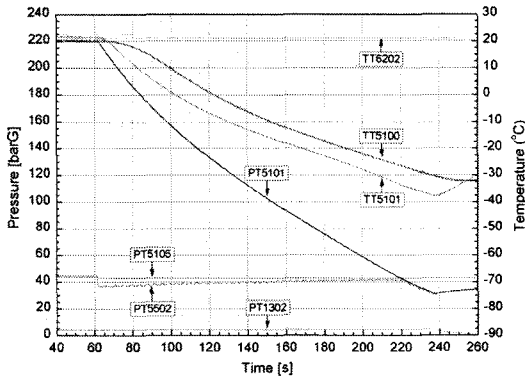


Fig. 5 System pressure and temp. distribution

- Test01 조건에서의 해석 및 실험 결과

Figure 6은 Test01 조건에서의 압력과 온도에 대한 해석을 실험결과와 비교하여 나타낸 선도이다. 점선은 외부 유체로의 열전달이 없다고 가정하여 계산된 것으로 실제 실험결과와 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 압력과 온도에 대한 예측값은 실험결과와 매우 잘 일치하였으며 초기 시점 대비 종료 시점에 대한 해석의 예측 오차는 압력과 온도에 대하여 각각 -2.11% 및 -4.69%로 실험결과보다 더 낮게 예측되었다. Test01 조건에서의 압력강하율은 0.0208/s 이었고 온도강하율은 0.0376/s 이었다.

- Test02 조건에서의 해석 및 실험 결과

Figure 7은 Test02 조건에서의 압력과 온도에 대한 결과 비교 선도이다. 초기 시점 대비 종료 시점에 대한 해석의 예측 오차는 압력과 온도에 대하여 각각 -1.95% 및 -8.47%로 Test01 조건에서와 마찬가지로 실험결과보다 더 낮게 예측되었다. Test02 조건에서의 압력강하율은 0.0435/s 이었고 온도강하율은 0.0967/s 이었다.

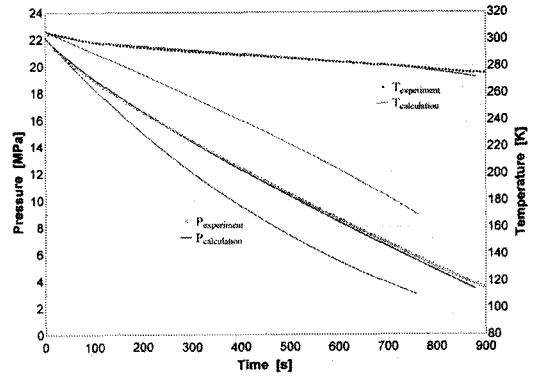


Fig. 6 Pressure and temperature at Test01

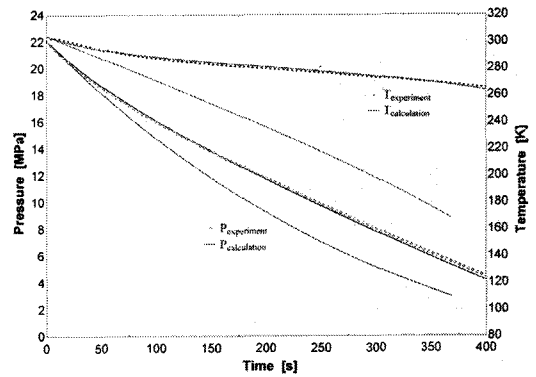


Fig. 7 Pressure and temperature at Test02

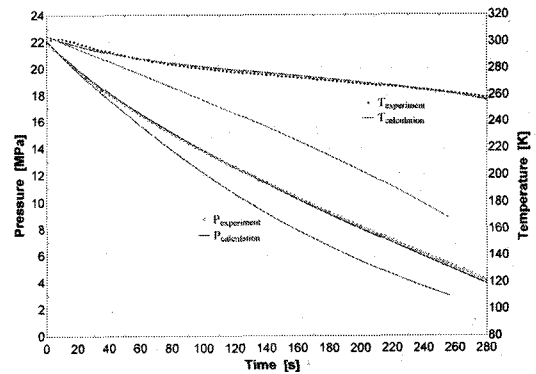


Fig. 8 Pressure and temperature at Test03

- Test03 조건에서의 해석 및 실험 결과

Figure 8은 Test03 조건에서의 압력과 온도에 대한 결과 비교 선도이다. 초기 시점 대비 종료 시점에 대한 해석의 예측 오차는 압력과 온도에 대하여 각각 -2.03% 및 -6.83% 이었다. 또한

Test03 조건에서의 압력강하율과 온도강하율은 각각 0.0631/s과 0.1643/s 이었다.

- 기타 조건에서의 해석 및 실험 결과

Test04에서 Test10까지의 해석과 실험도 모두 같은 방법으로 수행되었으며 결과 선도는 생략하기로 한다. 기타 조건 중에서 해석시 최대 오차는 Test05 조건에서 압력의 경우 -1.88%, 온도의 경우 -14.94% 이었다. 온도의 경우 가압제의 토출 유량이 증가할수록 오차가 약간씩 증가하였다.

Figure 9는 온도강하율 대비 압력강하율 선도이다. 가압제가 GN₂인 경우 실험결과에 대한 선도와 해석 결과를 나타내었으며 압력강하율이 커질수록 즉, 가압제 토출 유량이 증가할수록 해석 결과의 편차가 커지는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 해석시 경험식인 Nusselt 수의 오차가 가압제 토출량이 증가할수록 커지기 때문인 것으로 사료된다. 본 연구에서의 조건에서 압력과 온도의 예측 편차는 각각 -2.11%와 -14.94% 이었다.

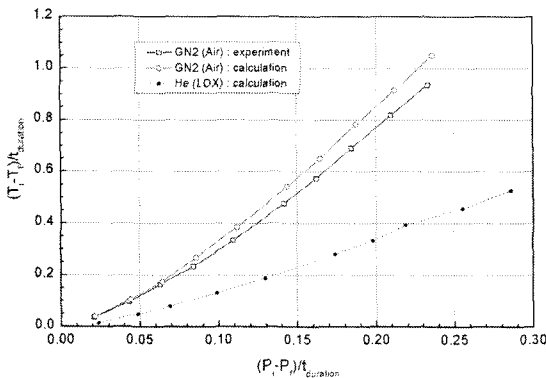


Fig. 9 Drop rate temperature versus pressure

또한 향후 수행예정인 극저온 가압시스템에 대한 연구를 위하여 외부 유체가 LOX이고 가압제가 He인 경우에 대하여 본 연구에서 적용된 해석도구로 계산하여 예측하였으며 그 결과는

Fig. 9에 점선으로 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에서는 극저온 추진제를 사용하는 액체 로켓에서 극저온 가압제 가압시스템에 대한 압력 및 온도 특성에 대한 연구를 위한 선행 연구가 수행되었으며 해석결과는 실험결과와 잘 일치하였다. 향후 수행 예정인 극저온 가압시스템에 대한 압력 강하율 대비 온도강하율에 대한 예측을 수행하였으며 실험을 통하여 계산결과를 검증할 계획이다.

6. 후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형 위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

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. 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).
4. Louis C. Burmeister, "Convective Heat Transfer", A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, 1982.