

# SINDA/FLUINT를 활용한 KSLV-I 추진기관 공급계 해석

조남경\*, 김병훈\*\*, 권오성\*\*\*, 길경섭\*\*\*\*, 정용갑\*\*\*\*\*, 나한비\*\*\*\*\*, 조인현\*\*\*\*\*

## Analysis of KSLV-I Propulsion Feeding System using SINDA/FLUINT

Nam-Kyung Cho\*, Byung-Hun Kim\*\*, Oh-Sung Kwon\*\*\*, Kyung-Sub Kil\*\*\*\*,  
Yong-Gab Chung\*\*\*\*\*, Han-Bee Na\*\*\*\*\*, In-Hyun Cho\*\*\*\*\*

### Abstract

The SINDA/FLUINT program is used as analysis tool. Thermal model and fluid model are applied for reliable results. By this analysis, the global requirements from System requirement review(SRR) is verified, and the detail requirement of each component is investigated. The results of this analysis is used to set up criterion for selecting proper components

### 초 록

KSLV-I 추진기관 공급계의 세부 해석을 통하여 각 부품별 요구조건을 설정하였다. 해석에는 범용 열유체 해석 프로그램인 SINDA/FLUINT를 활용하였다. 열전달 모델과 유동 모델을 적용함으로써 해석의 신뢰성을 높였으며 각 부품에 대한 운용 조건을 설정하였다. 본 해석을 통하여 SRR(System Requirement Review)에서 제시된 각 부분별 요구조건을 검토하였으며, 부품 선정을 위한 기본 자료로 활용할 수 있었다.

키워드 : 추진기관(propulsion system), 가압(pressurization), 열교환(heat exchanger), 극저온(cryogenic), 액체산소(LOX)

## 1. 서 론

본 논문은 터보펌프식 액체추진기관의 열유체 현상을 모사하였다. KSLV-I의 액체추진기관의 개요는 아래의 그림 1과 같다. 가압은 액체산소 탱크 내에 저장된 6개의 고압 저온 헬륨에 의해서 이루어진다. 고압 저온의 헬륨은 레귤레이터에

의해 44 bar로 감압되어 열교환기로 유입되게 되며 열교환기에 의해 550K 정도까지 가열된 후 액체질소 및 케로신 탱크로 유입되어 가압이 이루어지게 된다. 추진제(액체산소 및 케로신)는 얼리지부의 가압 압력과 터보펌프의 suction 압에 의해 액체산소 256 kg/s, 케로신 119 kg/s의 유량으로 엔진으로 공급되게 된다. 본 보고서의 해

\* 추진제어그룹/cho@kari.re.kr

\*\*\* 추진제어그룹/oskwon@kari.re.kr

\*\*\*\* 추진제어그룹/ygchung@kari.re.kr

\*\*\*\*\* 추진제어그룹/ihcho@kari.re.kr

\*\* 추진제어그룹/bhk@kari.re.kr

\*\*\*\* 추진제어그룹/kgs@kari.re.kr

\*\*\*\*\* 추진제어그룹/bigrain@kari.re.kr

석을 통하여 열교환기 유입 전후의 헬륨 요구조건, 각 부품의 요구조건, LOX와 케로신 탱크내의 현상 등을 해석한다.

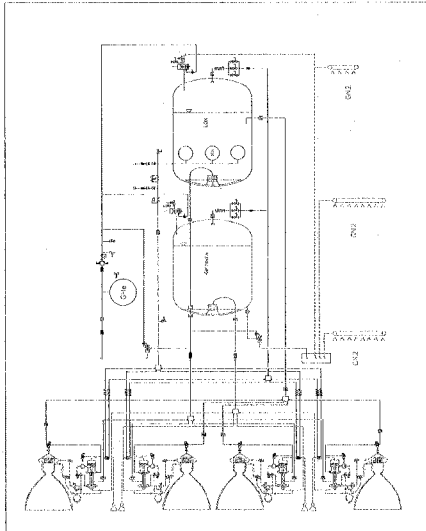


그림 1. 터보펌프식 추진기관 공급계 개략도

## 2. SINDA/FLUINT 해석 프로그램

해석을 위한 소프트웨어로는 범용 열유체 해석 코드인 SINDA/FLUINT를 활용하였다. SINDA/FLUINT 프로그램은 NASA의 표준 열유체 설계/해석 프로그램으로 이상유동(two phase flow) 및 혼합가스에 대한 해석이 가능하여 액체산소 탱크 현상 해석, 터보펌프 및 배관의 냉각 해석 등에 활용되고 있다. SINDA/FLUINT를 활용함에 있어서 thermal model과 fluid 모델을 이해하는 것이 필요하다. thermal 모델은 주어진 control volume간에 열전달만 이루어지는 모델이며 control volume이 capacitance와 conductance에 의해 묘사된다.

Fluid 모델은 열전달 뿐 아니라 mass의 전달이 이루어지는 경우를 묘사할 때 활용된다. 그림 2는 프로그램 전체 구성도를 보이고 있다. 앞부분에 주로 사용자에게 의해서 주로 쓰이는 변수들이 지정이 된 후, thermal model과 fluid model이 지정된다. 이후에 variable 및 flogic 블록에서 열전달 계수와 압력강하 계수등이 update 되어

지정되게 된다. Operation module에서는 steady 및 unsteady 계산이 지정되고 SINDA/FLUINT의 각종 서브루틴이 지정되게 된다. 그림 3은 fluint 프로그램의 모델링을 위한 구성요소를 보이고 있다. 헬륨 탱크 등 각종 탱크는 lump로 모델링을 수행하여, 유체의 흐름이 이루어지는 배관, 레귤레이터 등은 path 모델로 모델링이 이루어진다. 또한 tie와 ftie에 의해 열전달이 정의되게 되며 interface가 정의되게 된다.

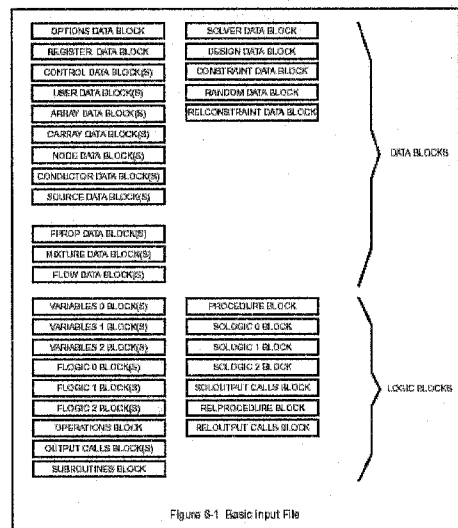


Figure 8-1 Basic Input File

그림 2. SINDA/FLUINT 프로그램 구성

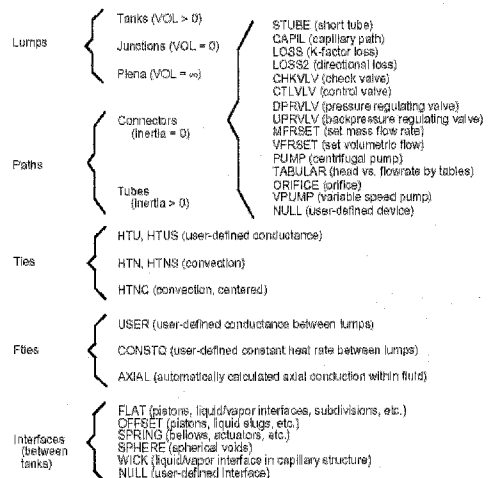


그림 3. SINDA/FLUINT 모델링 구성요소

### 3. SINDA/FLUINT 모델링

#### 3.1 Fluid 모델링

그림 4는 fluid 모델을 보여주고 있다. 저온 헬륨 탱크에서는 93K의 액체산소 탱크와 열전달이 이루어지며 550K 정도로 엔진 열교환기에서 열이 투입되어 추진제 탱크로 유입된다. 탱크내 압력은 액체산소의 경우 4.3bar 정도를 유지하며 케로신 탱크는 3.3bar를 유지한다. 추진제의 공급 유량은 터보펌프의 suction으로 유지되게 한다. 액체산소 탱크내에서 얼리지의 가압 헬륨과 추진제사이의 열전달은 고려하지 않았다. 헬륨 bottle에 저장된 고압 헬륨은 레귤레이터를 거치면서 44 bar로 감압이 되고 얼리지부 직전에서 감압되어 얼리지로 유입되게 된다. 열교환기에서는 순간적으로 열이 유입되어 출구온도가 550 K 정도로 상승하게 하였다.

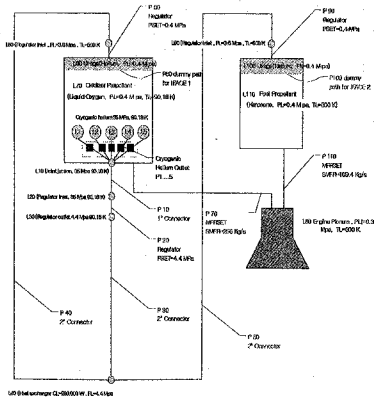


그림 4. 추진기관 공급계 SINDA/FLUINT fluid 모델

#### 3.2 Thermal 모델링

그림 5는 thermal modeling의 개략도를 보이고 있다. 열교환은 액체산소와 헬륨 sphere, 헬륨 sphere와 헬륨간의 열전달이 모사되었으며, 토출 헬륨이 얼리지로 들어가기 전까지 대기로부터의 열전달이 모사되었다.

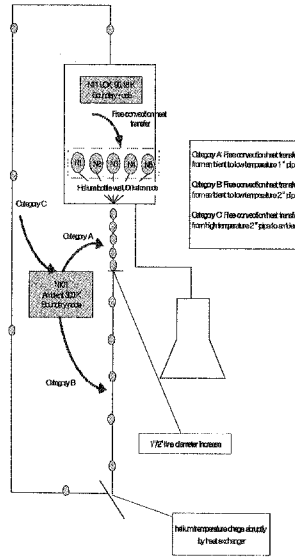


그림 5. 추진기관 공급계 SINDA/FLUINT thermal 모델

LOX에서 Helium sphere bottle로의 열전달 계수는 아래 식과 같다.

$$Nu = 0.53 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu = \frac{hD}{k}$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_{Lox} - T_s)D^3}{\nu^2}$$

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left( \frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p$$

계산에 있어 LOX의 온도는 93K로 일정온도를 유지하고 Ts는 Helium sphere bottle 온도로 thermal capacity 및 열전달에 의해 계속적으로 변화하도록 하였다. 여기서  $\beta$ 는 93K LOX의 heat conductivity이고, D는 helium bottle diameter, g는 중력가속도, Pr은 90K LOX의 프란틀 수 0.79,  $\beta$ 는 volume expansion coefficient이다.

Helium sphere bottle(SS316)에 저장된 helium으로의 열전달 계수는 아래의 식과 같다.

$$Nu = 0.13 Ra_D^{\frac{1}{3}}$$

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_{helium})D^3}{\nu^2}$$

여기서 Ts 및 helium 온도는 계속적으로 변화하므로 열전달 계수의 변화와 coupling 되어 온도 계산이 이루어진다.

대기에서 Helium piping duct로의 열전달 계수는 아래의 식과 같다.

$$Nu = 0.4Ra_D^{1/4}$$

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_{ambient} - T_{pipewall})D^3}{\nu^2}$$

여기서 대기온도 T\_ambient는 일정하게 300K를 유지하고 pipe wall의 온도변화에 따라 열전달 계수값이 계산되어 다시 온도 변화를 계산하게 된다.

Helium piping duct에서 pipe 내의 helium 유동으로의 열전달 계수는 아래의 식과 같다.

$$Nu = 0.4Ra_D^{1/4}$$

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_{pipewall} - T_{helium})D^3}{\nu^2}$$

여기서 pipe wall의 온도변화와 pipe 내부를 흐르는 helium의 온도변화에 의해 열전달 계수값이 계산되어 다시 pipe wall과 helium의 온도 변화를 계산하게 된다.

열전달 모델에서 위와 같은 열전달 계수의 적용은 주로 variable 1 block에서 이루어진다. 주로 property 데이터를 최대한으로 활용하기 위해서는 활용할 수 있는 서브루틴 방법을 주로 활용한다. Rayleigh수를 계산하기 위해서 SINDA/FLUINT에서는 다음과 같은 서브루틴을 주로 활용한다.

Rayleigh값의 계산식에 있어서 주로 유체특성

에 관계되는 값은  $\frac{g\beta}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{\alpha}$ 이며 이 값과 열전달 계수를 구하기 위해 필요한 값인 thermal conductivity "k" 가 NCPROP routine을 통해서 얻어지게 된다. 즉 전체 conductance 값(hA)는 다음의 예를 통하여 얻어질 수 있다.

표 1. SINDA/FLUINT 열전달 계수 적용방법

- TTEST = 0.5\*(TWALL + TFLUID) : 유체와 고체의 평균 온도
- CALL NCPROP(P, TTEST, X, RTEST, PTEST, CTEST, FI)
  - P : 운용압력(변화할 수 있는 값임)
  - TTEST : 온도 여기서는 변화하는 유체와 고체의 평균 온도임
  - X : 기체의 질량분율 (기체 1.0, 액체 0.0)
  - RTEST : 계산되는 Rayleigh수의 계수
  - Rayleigh number 계산 :  
STEST = RTEST\*ABS(TWALL-TFLUID)\*DIAM\*\*3
  - 열전달 계수 계산  
Conductance(hA)=0.4\*(STEST)\*\*0.25\*CTEST\*AREA/D

### 3.3 Operation 과정

본 모델을 수행하기 전에 초기조건을 정확하게 설정하기 위해서 가상적으로 steady state를 수행하였다. 이 경우 thermal model은 DRPMOD/ADDMOD로 하였다. DPLVLV와 같은 경우에는 초기치를 정확하게 잡아줄 필요가 있기 때문에 양쪽이 모두 변화할 경우에는 수렴이 되는데 지장이 있다. 따라서 한쪽을 고정시킨 후 thermal model과 fluid 모델 중 한쪽을 고정시킨 후 계산을 수행한 후 초기조건이 설정되면 다른 한쪽을 active하게 하는 방식이 적용되게 된다. 그 과정은 다음과 같다.

1) thermal model과 fluid model이 있는 경우 우선적으로 thermal model을 inactive(boundary node로 설정)하게 한다.

- Call DRPMOD('wall')

2) 시간에 따라 열역학적 물성치가 변하는 요소들(주로 tank류)를 마치 plenum처럼 다룬다. 본 모델에서는 탱크로 다루었던 헬륨 탱크 및 LOX 및 케로신 ullage 및 추진제 등을 마치 plenum처럼 다룬다.

- Call HLDLMP('press',1)
- Call HLDLMP('press',60)

3) steady state run을 수행한다. 이때 각 중간 점들의 초기조건이 설정된다.

4) ADDMOD('wall')를 적용함으로써 thermal model이 active하게(diffusion node로 변환) 한다.

5) 2번에서 HLDLMP를 적용함으로써 plenum으로 설정하였던 항목들을 다시 tank로 설정한다.

- Call RELLM('press',1)
- Call RELLM('press',60)

6) transient analysis를 수행한다.

#### 4. 해석 결과 및 고찰

그림 6은 저온 고압 가압 헬륨 bottle의 온도/압력 곡선을 보여준다. 초기에 34Mpa로 충전된 헬륨이 100초 경에 5 Mpa 까지 떨어지며 온도는 93 K에서 약 60 K으로 감소함을 볼 수 있다. 따라서 열교환기로 유입되기 전에 부착되는 레귤레이터의 후단 압력 설정값이 초기 설계치대로 44MPa인 경우 연소후반에 전단 압력이 압력 설정치 이하로 내려감으로 인해 사양 변경이 필요함을 알 수 있다. 레귤레이터의 적절한 운용을 위해서는 상류압이 70Mpa 이상이 되어야 하는데 이를 위해서는 충전 헬륨을 보다 고압화 하거나 헬륨 bottle의 부피를 늘려야 된다고 판단된다. 그림 7은 전체 가압 헬륨 유량과 LOX 가압용 헬륨 유량을 보여주고 있다. 전체 가압용 헬륨 유량은 정상상태시 약 0.135kg/s 정도에 해당하며 LOX 탱크로 유입되는 가압용 헬륨은 0.095kg/s 에 해당된다. 약 105초에서는 헬륨 유량이 급격히 주는 것을 볼 수 있는데 이는 열교

환기로 전단에 설치된 레귤레이터 압력이 44 Mpa 인데 반해 전단 압력이 이하로 내려가기 때문인 것으로 판단된다.

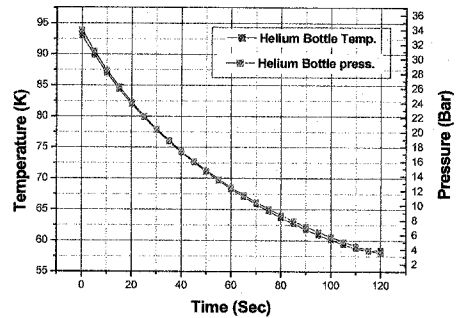


그림 6. 저온 고압 가압 헬륨 bottle 온도/압력 곡선

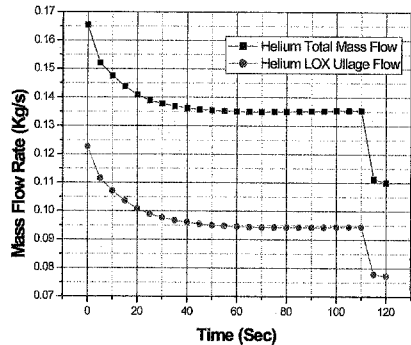


그림 7. 전체 가압 헬륨 유량과 LOX 가압용 헬륨유량

그림 8은 저온/고압 가압 헬륨(1개 bottle의 경우)의 질량을 보여주고 있다. 초기에 약 3.5 kg에서 연소 후기에 약 0.7 kg으로 감소함을 볼 수 있다. 질량변화율은 선형으로 묘사된다. 그림 9는 LOX 얼리지의 온도/압력 곡선을 보이고 있다. 초기에 3%의 저온 헬륨이 충전되어 있고 약 550 K의 공온헬륨이 유입됨으로 인해 얼리지의 온도가 상승함을 볼 수 있다. 온도 상승은 로그곡선 형태를 취하는 것을 볼 수 있다. 얼리지의 온도가 올라감에 따라 압력도 높아짐을 볼 수 있다.

그림 10은 열교환기 출구 온도를 보인다. iteration을 거쳐 계산을 수행한 결과  $h \times A$  값이 1290W/K 인 경우에 약 545K을 유지함을 볼 수 있었다. 열교환기의 열전달 계수는 100-200  $W/(m^2 \cdot K)$ 에 해당하므로 열교환 면적은 6-13  $m^2$ 이다.

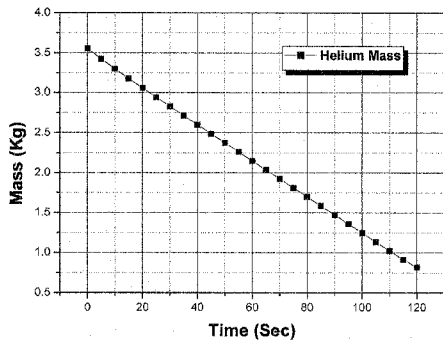


그림 8. 저온/고압 가압 헬륨 질량 곡선

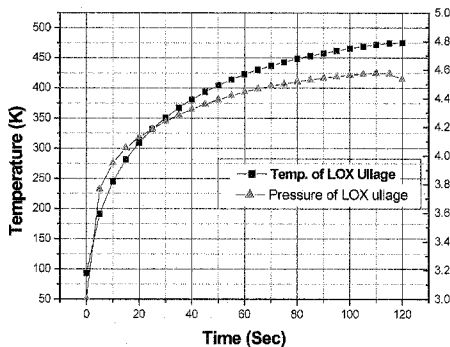


그림 9. LOX 얼리지 온도/압력 곡선

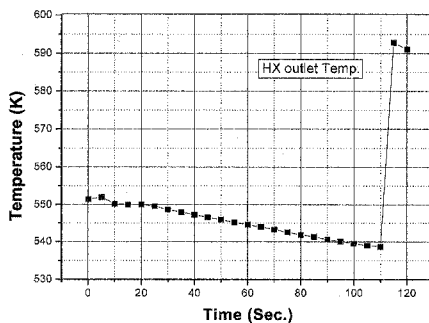


그림 10. 열교환기 출구 온도

그림 11은 LOX 탱크내에서의 LOX의 증발곡선을 보이고 있다. 초기에는 유입되는 고온 헬륨과 LOX와의 온도차가 큼으로 인해 약 0.045kg/s 까지 증발되게 되나, LOX의 증발에 의해 얼리지의 온도가 낮아짐으로 정상상태 값에 이르게 된다. 정상상태 값에 이르게 되면 유입되는 고온 헬륨의 엔탈피가 LOX의 증발열로 전환되어 약 0.028kg/s의 거의 일정한 증발이 이루어지게 된다. 본 계산에서는 LOX와 헬륨 얼리지간에 대류 열전달이 이루어지는 것으로 가정하였으며 열전달 계수는 참고문헌 경험치  $Nu = 0.13Ra_D^{1/3}$  값으로 가정하였다.

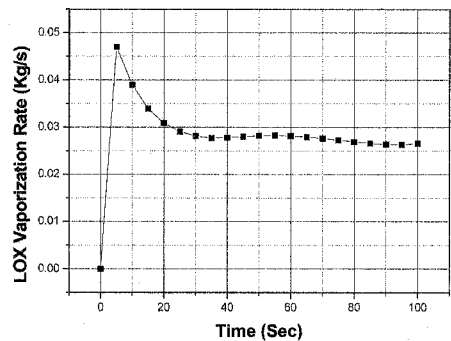


그림 11. LOX 탱크내에서의 LOX 증발곡선

그림 12는 LOX 증발 모델 적용에 따른 LOX 얼리지 온도의 비교치이다. 증발모델을 적용할 경우 증발된 LOX 가 울리지 온도를 낮춤으로 인하여 얼리지 온도가 약 80K 정도 낮아짐을 볼 수 있다. 그림 13은 LOX 증발 모델 적용에 따른 가압 헬륨 유량의 비교치이다. 극저온 LOX의 경우 고온의 가압 헬륨가스가 유입됨으로 인해 LOX 표면에서의 증발이 이루어지게 되며, 증발된 산소가스에 의해 헬륨가스가 냉각되게 된다. 표면에서의 액체산소의 증발은 얼리지 가스의 압력을 상승시키게 되며, 이는 실제 가압에 사용되는 헬륨가스의 양이 줄어들게 됨을 의미한다. 또한 헬륨가스가 액체산소와 증발된 기체산소에 의해 냉각되는 현상이 일어나게 되는데 이것은 헬륨가스의 온도를 낮추고, 가압가스의

압력을 낮춤으로 인해 일정압력을 유지하기 위해서는 추가적인 가압 헬륨이 필요하게 된다. 따라서 이러한 액체산소의 증발과 가압 헬륨에 의한 냉각 효과를 종합적으로 분석할 필요가 있다. 그림 19를 살펴보면 약 30초 까지는 증발된 LOX가 가압가스의 역할을 수행함으로써 가압 헬륨 가스의 소요 유량이 줄어들게 되고 20초 이후부터는 얼리지 냉각 효과가 커짐으로 인해 가압 가스 소요량이 증대되어 약 0.13-0.135kg/s를 유지함을 볼 수 있다. 전체적으로 LOX의 증발을 고려할 경우 가압 헬륨 소요 유량이 줄어들게 됨을 볼 수 있다.

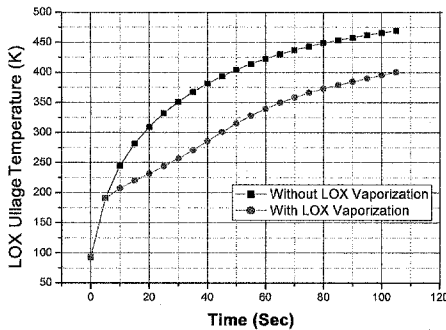


그림 12. LOX 증발 여부에 따른 LOX 얼리지 온도 비교

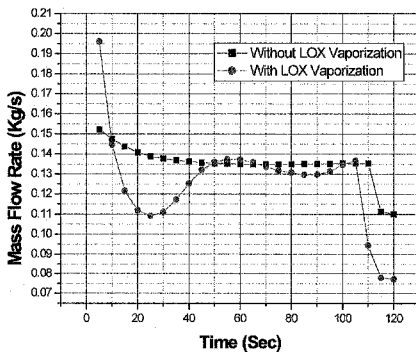


그림 13. LOX 증발 여부에 따른 가압헬륨 소요량 비교

그림 14는 LOX 얼리지 가압에 소요되는 헬륨 유량을 보이며 그림 15에서 제시된 전체 가압 헬

륨 소요 유량과 유사한 경향을 보인다. 그림 15는 LOX의 증발을 고려한 저온/고압 가압 헬륨(1개 bottle의 경우)의 질량을 보여주고 있다. 증발이 고려될 경우 약 2% 정도 소요 헬륨량이 감소함을 볼 수 있다.

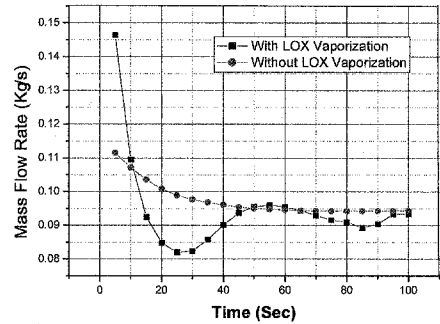


그림 14. LOX 증발 여부에 따른 LOX 가압 헬륨 질유량

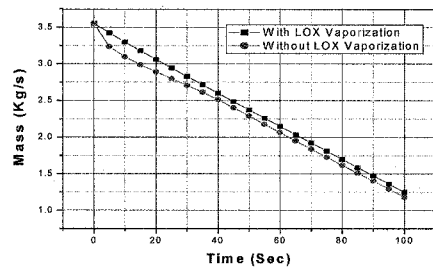


그림 15. LOX 증발 여부에 따른 LOX 가압 헬륨 소요량

## 5. 결 론

SINDA/FLUINT로 공급계 해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

가압 헬륨부에서 레귤레이터의 적절한 운용을 위해서는 상류압이 70Mpa 이상이 되어야 하는데 이를 위해서는 충전 헬륨을 보다 고압화 하거나 헬륨 bottle의 부피를 늘려야 된다고 판단된다.

열교환기의 열교환 면적은 열전달 계수값에 의해 6-13 m<sup>2</sup>의 범위로 예측되었다.

LOX 탱크 얼리지부에서는 액체산소의 증발과 가압 헬륨에 의한 냉각 효과를 종합적으로 분석할 필요가 있으며 전체적으로 증발을 고려할 경우 증발이 고려되지 않은 경우와 비교하여 약 2% 정도 헬륨 소요량을 줄어든게 됨을 볼 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. SP-8112, "Pressurization Systems For Liquid Rockets," NASA, 1975.
2. SINDA/FLUINT Version 4.6 User's Manual, May 2003.
3. B. Cullimore et al, "Control Volume Interfaces: A Unique Tool for a Generalized Fluid Network Modeler," AIAA 2000-2503.
4. J G. Collier et. al. Convective Boiling and Condensation, Clarendon Press, 1994.
5. John A. Clark, Cryogenic Heat Transfer, Advanced Heat Transfer, 1965.