

LOX conditioning을 위한 재순환배관의 성능해석 및 설계인자 파악

권오성*, 조남경**, 정용갑***, 조인현****

Performance analysis and design factor of recirculation pipe for LOX conditioning

Oh-Sung Kwon*, Nam-Kyung Cho**, Yong-Gab Chung***, In-Hyun Cho****

Abstract

In cryogenic feeding system of turbo pump fed liquid-propulsion rocket, rise of cryogenic propellant temperature can bring into geysering in pipe or cavitation in turbo pump. In this paper, performance analysis of recirculation line which is one of the method to inhibit these phenomenon is carried out based on the configuration of KSLV-I 1st stage LOX feeding system, and parametric study to find design parameter. Diameter and re-entrance height, initial LOX temperature, ullage pressure, and natural convection heat transfer coefficient are varied to see the effects on performance. Additional He is injected into recirculation line to promote LOX recirculation. 1-dimensional analysis using network-solver, SINDA/FLUINT is carried out.

초 록

액체추진기관의 극저온 추진제 공급부에서 추진제의 주입 후 대기시간 동안의 온도상승은 배관내의 geysering 현상 및, 점화시 터보펌프에서의 cavitation을 발생시킬 수 있다. 본 자료에서는 이런 문제를 해결하는 방법 중 하나인 재순환배관 방식에 대하여 KSLV-I 예비안의 산화제부 형상을 바탕으로 LOX를 산화제로 사용한 경우에 있어서 그 성능을 파악하였다. 또한, 다양한 parametric study를 통하여 재순환배관의 설계인자를 찾고자 하였다. 재순환배관의 직경, 초기 LOX 온도, 재순환배관 높이, ullage 압력, 열전달 계수 등의 변화에 의한 영향 및 추가적인 He 분사를 통한 순환 촉진 효과를 살펴보았다. 상용 열유체해석 프로그램인 SINDA/FLUINT를 사용하였고 1차원적으로 해석을 수행하였다.

키워드 : LOX conditioning, 재순환(recirculation), 헬륨분사(He injection)

1. 서 론

액체추진기관을 사용하는 발사체의 극저온 추진제 공급부에서는 엔진부로 공급되는 추진제의

온도를 요구조건에 맞추는 것이 필수적이다. 특히, 극저온 추진제의 주입, 대기시간 동안의 온도상승은 배관내의 geysering 현상 및, 점화시 터보펌프에서의 cavitation을 발생시킬 수 있다. 이의

* 추진제어그룹/oskwon@kari.re.kr

*** 추진제어그룹/ygchung@kari.re.kr

** 추진제어그룹/cho@kari.re.kr

**** 추진제어그룹/ihcho@kari.re.kr

방지를 위한 온도 conditioning 방법으로는 He injection, 밀도차를 이용한 recirculation, 승온된 유체의 bleed 등이 있다.

KSLV-I 1단 산화제시스템은 터보펌프 전단의 온도조건을 충족시키기 위하여 재순환배관을 설치, 주배관과의 밀도차에 의한 자연대류를 발생 시킴으로 LOX conditioning 효과를 얻도록 설계되어 있다. 본 논문에서는 KSLV-I 1단 산화제 시스템의 형상을 바탕으로 하여 LOX를 산화제로 사용하고 재순환배관 방식을 적용하는 경우에 있어서 자연대류에 의해 발생하는 유동의 질유량 및 배관 내의 온도분포를 살펴봄으로써 재순환배관의 성능을 파악하고자 하였다.

또한, 재순환배관의 설계인자를 찾기 위하여 재순환배관의 직경, 초기 LOX 온도, 재순환배관의 높이, ullage 압력, 열전달 계수 등을 변화시키면서 parametric study를 수행하였고, 재순환배관에 추가적인 He injection을 통해 순환속진 효과를 살펴보았다.

2. 해석 모델

2.1 기본형상 및 조건

전체 산화제시스템의 형상은 KSLV-I 1단을 기준으로 하였다. KSLV-I 1단은 4개의 엔진을 clustering하여 사용하므로, LOX 주배관은 매니폴드에서 4개의 분기배관으로 나누어지고, 각각의 엔진시스템을 거쳐 재순환배관 매니폴드에서 다시 합쳐진다.

그림 1은 단순화된 형상 및 해석 조건을 보여준다. 모델의 단순화를 위하여 시스템의 모든 구성품을 단순배관으로 대체하였으나, 적절한 차압 조건 및 지속적인 열량을 주어 각 구성품을 모사하도록 하였다. 모든 배관 및 구성품과 LOX의 초기 온도조건은 87K로 주었는데, 특히, 산화제 탱크 내의 LOX는 항상 87K로 동일한 온도를 유지한다고 가정하였다. LOX 탱크는 모델링에 포함되지 않고, 단순히 주배관 입구와 재순환배관 출구에서의 압력 및 온도조건으로만 표현되었다.

배관 자체는 길이방향의 열전도를 고려하였고, 배관과 내부의 LOX는 강제대류에 의한 열전달이 발생하게 된다. 배관의 외부에서는 288K로 일정한 온도를 유지하는 대기와 복사 및 자연대류에 의해 열전달이 이루어지는데, 이 때 자연대류 열전달 계수는 산화제 배관과 연료탱크 tunnel 사이의 자연대류 열전달 계수를 기준으로 주배관과 재순환배관 모두 $6.0W/m^2K$ 로 일정하다고 가정하였다.

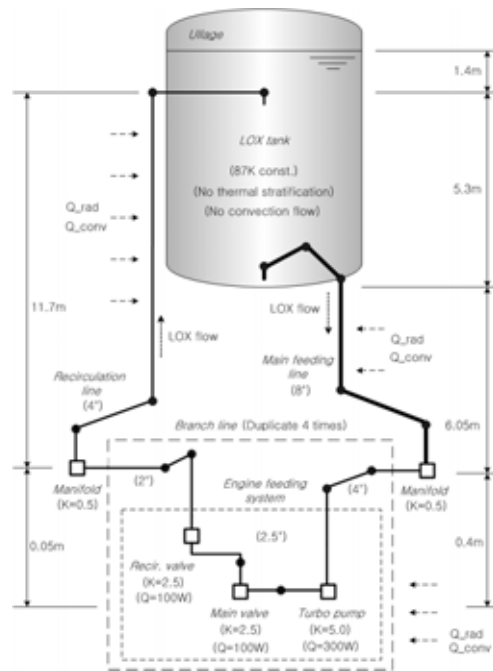


그림 1. KSLV-I 예비안 1단 산화제부 모델

2.2 해석 방법

해석은 상용 열유체 해석 프로그램인 SINDA/FLUENT를 사용하였다. 이 프로그램은 배관 내부 유동에 대한 1차원적 해석을 수행하는데, fluid 모델을 "lump"와 "path"로 구성하고 thermal 모델을 "node"와 "conductor"로 구성하여, 이 두 모델을 "tie"로 연결시켜 계산을 수행하는 network solver이다. 사용되는 방정식은 아래와 같다.

$$\frac{dM}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out}$$

$$\frac{dU}{dt} = \sum (h_{do\,nor} \times \dot{m}_{in}) - \sum (h_{eff} \times \dot{m}_{out}) + \dot{Q} - P \times \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{A}{l} \times (P_{up} - P_{down} + HC + FC \times \dot{m} \times \dot{m}^{FPOW} + AC \times \dot{m}^2)$$

여기서 \dot{m} 은 질유량, h 는 lump의 enthalpy, \dot{Q} 는 강제대류와 사용자 입력에 의해 lump에 부과되는 열량, A 는 유동단면적, l 은 배관길이, P 는 "lump"의 정압, HC 는 head coefficient, FC 는 irrecoverable 손실 계수, AC 는 recoverable 손실 계수, $FPOW$ 는 FC 항목에서의 flowrate exponent를 나타낸다.

Steady-state 상태로 해석을 수행하였고, 산소의 물성치 데이터로는 온도에 따라 물성치가 변하지만 상변화는 발생하지 않는 simple liquid를 나타내는 SINDA/FLUINT의 9000series를 사용하였다. 이 때 계산과정에서 two-phase를 제외한 대신 계산결과에 대하여 two-phase 상태를 감지하도록 하였다. 헬륨을 분사하는 경우에는 LOX와 가스헬륨 사이의 상호작용을 고려하지 않고, 단순히 mixture 상태로 가정하였다.

설계 변수의 변화에 따른 영향을 살펴보기 위하여 parametric study를 수행하였고, 표 1에 변수항목 및 변화값을 나타내었다.

표 1. Parameter of recirculation line

Parameter	Value	
Diameter (mm)	110, 88.9, 76.2, 63.5, 50.8	
Initial temp. (K)	83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90	
Ullage pressure (MPa)	0.1, 0.3, 0.433, 0.6	
N.C.H.T. coefficient (W/m2K)	recir. line 1, 3, 6, 9 other line 1, 3, 6	
Height (m)	5.25, 4.25, 3.25, 2.25, 1.25	
He injection	Flowrate (l/s)	0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1, 5, 10
	Temp. (K)	87, 110, 130, 150

3. 해석 결과

3.1 자연 재순환 방식

Basic configuration

그림 2는 기본 형상에 대하여 주배관 입구에서 재순환배관 출구까지 배관 길이방향으로 LOX의 온도분포를 나타낸다. 터보펌프와 주밸브 및 재순환밸브를 모사하는 부분에는 임의의 지속적인 열량을 투입하였으므로 온도상승폭이 크고 그 패턴 또한 일정하지 않다. 재순환배관 내의 LOX 유속은 주배관 및 분기배관에 비해 크므로 온도상승률이 가장 완만하였다. 터보펌프 입구의 온도는 88.2K, 주밸브 전단 온도는 88.5K를 보여 tow-phase flow는 발생하지 않았으나, 탱크로 다시 유입되는 LOX의 온도는 89.7K로서 다소 높았다. 본 해석에서는 LOX 탱크의 온도가 일정하다고 가정하였으나 실제로는 승온된 LOX의 유입으로 인하여 탱크 내부 LOX 온도에 영향을 미칠 수도 있을 것으로 생각된다.

재순환되는 LOX의 유량은 4.232kg/s로서 분기배관에서 1.058kg/s로 나누어졌다고 재순환배관에서 다시 합쳐지게 된다. 배관 내의 유속을 살펴보면 주배관과 분기배관에서 약 10cm/s, 엔진부 배관에서 약 29cm/s, 재순환배관에서 약 39cm/s를 보인다. Gopal Mehta[1] 등은 재순환되는 LOX의 유속이 1~2ft/s라고 하였는데 배관의 직경 및 유입 열량 등이 본 해석조건과 다르므로, 대체로 타당한 결과라고 판단된다.

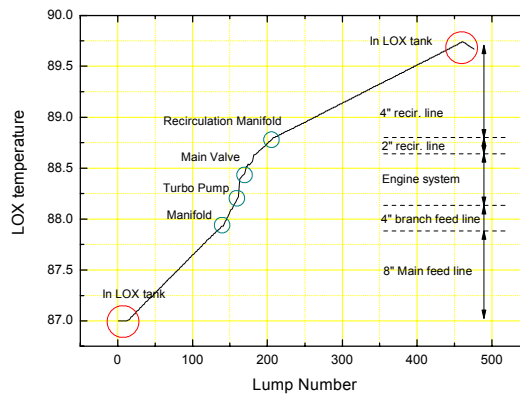


그림 2. 배관 길이방향의 LOX 온도분포

Diameter of recirculation line

직경의 변화는 재순환 매니폴드 이후의 배관에 적용하였고, 4", 3.5", 3", 2.5", 2", 1.5"로 변화시켰다.

계산 결과 재순환배관의 직경을 2" 까지 줄여도 two-phase의 발생 없이(안정화 된 후에) LOX의 자연대류 유동이 발생하였다. 하지만, 1.5" 배관에서는 재순환배관의 윗부분에서 지속적인 two-phase가 발생하였다. 2" 배관의 경우 터보펌프 전단의 온도는 90K, 주밸브 전단의 온도는 90.6K로 계산되었는데, 이 온도 조건이 수용된다면 재순환배관의 직경을 감소시켜 배관무게 및 배관 내부의 LOX의 무게를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, LOX 탱크로 다시 유입되는 온도는 92.5K로써 상당히 높아 대기시간동안 탱크 내 LOX 온도를 크게 상승시킬 것으로 생각된다. 이 때, LOX의 질유량은 1.683kg/s이다. 표 2는 직경에 따른 LOX의 질유량이고, 그림 3은 직경에 따른 주요지점의 온도이다.

표 2. 재순환배관 직경에 따른 LOX 질유량

Inner Diameter. of recirculation line (mm)	50.8	63.5	76.2	88.9	110.0
LOX mass flowrate (kg/s)	1.68	2.35	2.96	3.50	4.23

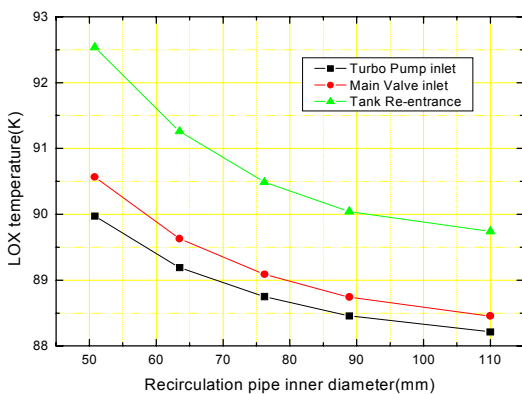


그림 3. 재순환배관 직경에 따른 주요 지점의 온도

Initial LOX temperature

초기 LOX 충전 온도가 변화하면 탱크 내부의 LOX 밀도변화로 인하여 배관시스템 양 끝단에 걸리는 수두값 및 배관내부의 압력분포가 달라지게 된다. 이러한 조건에 대한 해석 결과, LOX 초기 온도에 따른 질유량의 변화는 매우 미미하였다. 또한, 각 지점의 온도 상승율은 초기 온도에 관계없이 거의 일정하여, 초기 온도가 그대로 각 지점의 온도상승에 반영되는 결과를 보여주고 있다. 결국 초기 충전온도는 재순환 배관내의 유동 현상에 특별한 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

Tank ullage pressure

탱크 내 ullage의 압력을 대기압, 0.3MPa, 0.433MPa, 0.6MPa로 변화시키면서 성능해석을 수행하였다. 결과 LOX 질유량과 온도분포는 거의 변화가 없었다. 이는 ullage 압력의 변화가 전체 배관 양끝단에 동일한 압력변화를 초래하므로, 배관 시스템의 차압 조건에는 특별한 변화가 발생하지 않기 때문으로 판단된다. 결국, 대기압 상태에서 single-phase를 유지하기 위한 온도 조건을 만족하도록 시스템이 설계되면 가압 상태에서는 더욱 안정된 상태를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

Natural convection heat transfer coefficient

KSLV-I 1단 산화제 시스템에서는 외부단열재를 사용하지 않는다. 이 때 배관 표면에 생성되는 성애, 풍속, 및 발사체 내부의 저온 환경 등의 영향으로 정확한 열전달 계수를 적용하기가 어려우므로, 본 해석에서는 열전달 계수값을 변화시키면서 LOX의 온도변화 범위를 제시하고자 하였다. 그림 4는 열전달 계수 변화에 따른 주요 지점의 온도변화를 나타낸다. 발사체 내부에 위치한 배관에 대한 열전달 계수의 변화는 전체 LOX의 온도에 영향을 주었으나, 재순환배관에 대한 열전달 계수의 변화는 탱크로 다시 유입되는 LOX의 온도에만 영향을 줄 뿐, 터보펌프 전단의 온도에는 그다지 큰 영향을 주지 않았다.

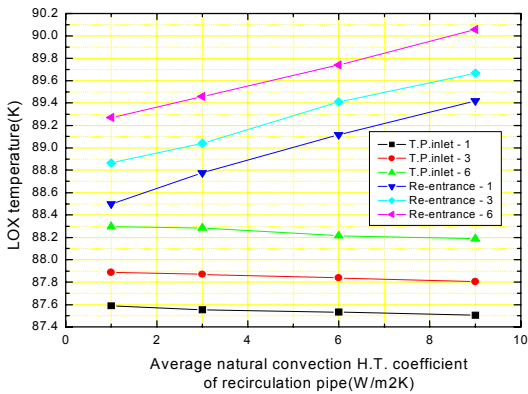


그림 4. 열전달 계수 변화에 따른 주요 지점의 온도

표 3. 재순환배관 장착 높이에 따른 LOX 질유량

Height of recirculation pipe re-entrance (m)	1.25	2.25	3.25	4.25	5.25
LOX mass flowrate (kg/s)	3.54	3.74	3.87	4.03	4.23

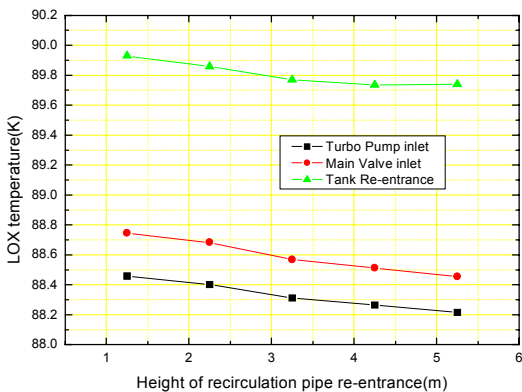


그림 5. 재순환배관 장착 높이에 따른 주요 지점의 온도

Re-entrance height of recirculation line

KSLV-I 1단 산화제 시스템에서는 탱크의 바닥 높이를 기준으로 할 때 LOX의 액위는 약 6.7m 이고, 재순환배관의 출구 높이는 약 5.25m이다. 이 높이를 1m씩 줄이면서 해석을 수행하였다. 표 3은 배관 높이에 따른 질유량을, 그림 5는 주요 지점의 온도변화를 나타낸다. 배관의 높이가 낮아질수록 배관 양 끝단의 수두차가 감소하고,

재순환배관에서의 열유입량 감소에 따라 밀도차가 줄어들어 질유량이 감소하였고, 온도 또한 상승하였다. 하지만, 이에 따른 온도 변화의 폭이 그리 크지 않았다. 결국, 재순환배관의 위치는 높을수록 좋지만, 성능에 큰 영향을 주지 않는 범위 내에서 재순환배관의 길이를 줄여줌으로써, 큰 성능의 변화 없이 배관시스템의 무게를 감소시킬 수 있을 것이다.

3.2 추가 헬륨분사 방식

본 해석에서는 LOX와 헬륨 사이의 상호작용을 고려하지 않고 단순히 mixture 상태로 가정하여, lump의 밀도를 감소시킴으로써 자연대류가 촉진되는 현상을 살펴보았다. 헬륨 분사위치는 발사체 외부의 재순환배관 가장 아래쪽이며, 분사 온도는 LOX와 동일하게 87K로 가정하였다.

그림 6은 2"와 4" 배관에 대한 헬륨분사량에 따른 LOX 질유량이고, 그림 7은 주요 지점의 온도변화이다. 초기에는 LOX의 질유량이 급격히 증가하였으나, 이후 분사량을 늘려도 질유량의 증가는 크지 않았고, 2" 배관에서는 오히려 질유량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 분사량이 증가할수록 배관내 void fraction이 증가하여 LOX의 원활한 유동을 방해하기 때문으로 생각된다. 또한, 초기에는 주요 지점의 온도가 급격히 감소하였으나, 그 이후에는 질유량이 증가하여도 온도감소가 미미함을 알 수 있다. 헬륨분사로 인하여 주배관과 재순환배관 사이의 온도차도 크게 줄어들었다.

그림 8은 lump의 밀도분포를 나타낸다. 여기서 밀도는 LOX 자체의 밀도가 아니라 가스헬륨과 LOX가 섞인 two-phase 상태의 lump의 밀도를 나타낸다. 헬륨을 분사하지 않는 경우는 배관내의 온도분포에 의해 밀도분포가 결정되므로, 밀도분포는 온도분포와 거의 반대되는 경향을 보여주었으나, 헬륨을 분사하는 경우는 급격한 밀도차를 발생시켜 유동을 촉진시키게 된다. 위의 결과를 통하여 재순환배관의 직경을 줄여 발사체의 무게를 감소시키면서도 충분한 LOX conditioning 효과를 얻을 수 있을 것으로 판

단된다.

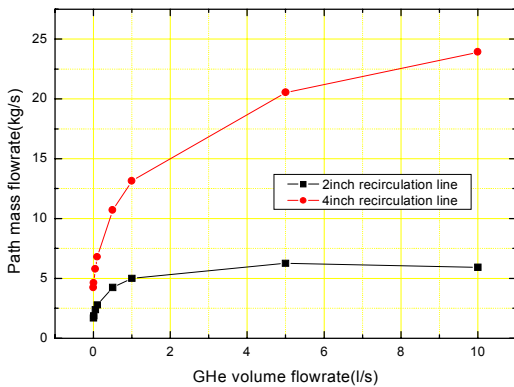


그림 6. 헬륨 분사량에 따른 질유량 변화

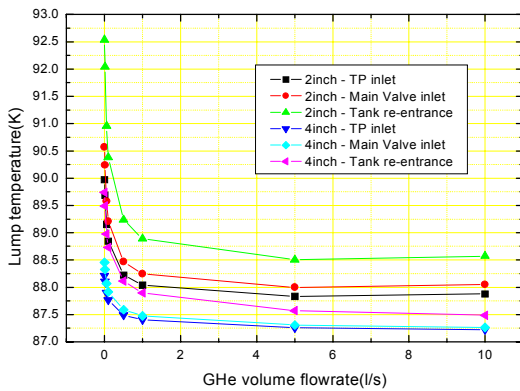


그림 7. 헬륨 분사량에 따른 주요 지점의 온도

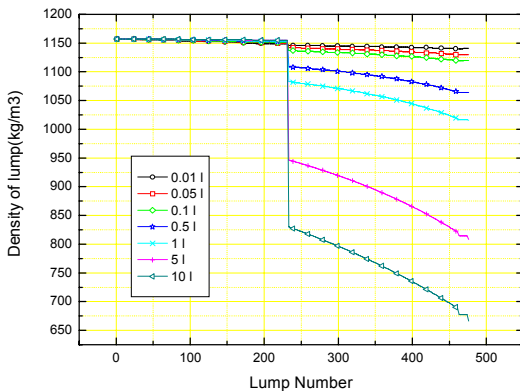


그림 8. 헬륨 분사량에 따른 배관 내 밀도분포

일정한 헬륨분사량에서 분사되는 헬륨의 온도를 변화시켰을 때, 분사 온도가 증가할수록 질유량은 감소하고, lump의 온도는 상승하였지만, 그 변화량은 그리 크지 않았다.

4. 결 론

KSLV-I 1단 산화제시스템에 대하여 LOX conditioning 성능을 살펴보고, 그 결과 기본형상에서 초기 충전 온도를 87K로 가정하였을 때, 터보펌프 입구 온도 88.2K, 주밸브 전단 온도 88.5K로서 발사체 성능 요구조건을 만족함을 확인하였다. 또한, 재순환배관의 직경을 2"까지 감소시키더라도, 터보펌프 입구 온도 90K, 주밸브 전단 온도 90.6K로서 역시 요구조건을 만족하면서 산화제시스템의 무게를 줄일 수 있음을 확인하였다.

초기 LOX의 충전온도 및 ullage 압력변화는 재순환배관의 성능에 특별한 영향을 미치지 않았다. 배관 외부의 자연대류 열전달 계수를 변화시킴으로써, 다양한 환경조건을 모사하고자 하였고, 재순환배관의 적정 탱크 부착위치를 살펴보았다.

재순환배관 내로 헬륨을 분사하였을 때 초기 분사량에서는 온도의 감소폭이 매우 컸으나, 점점 그 영향이 줄어들었고, 어느 지점 이후에는 오히려 성능이 감소되기 시작하였다. 추후, 성능 요구조건을 만족시킬 수 있는 적절한 분사량이 결정된다면, 발사전 시점까지 umbilical을 통해 지상에서 헬륨을 분사하는 방식을 통하여 재순환배관의 크기를 줄이고도 충분한 LOX conditioning 효과를 얻을 수 있을 것으로 보인다. 분사되는 헬륨의 온도가 감소할수록 LOX의 질유량은 증가하고, 배관 내 온도는 감소하였다.

본 해석을 통하여 기본형상에 대한 성능을 확인하였고, 다양한 조건들에 대하여 질유량 및 온도분포를 살펴봄으로써 추후 성능 요구조건을 만족시키면서 무게를 최소화 할 수 있는 산화제시스템의 설계에 바탕이 되는 자료를 제시하고자 하였다.

참 고 문 헌

1. Gopal Mehta, Michael Orth, William Stone, Gretchen Perry, Kimberly Holt, and John Suter, 1994, "Advances in LO2 Propellant Conditioning", AIAA.
2. P. S. Larsen, J. A. Clark, W. O. Randolph, and J. L. Vaniman, 1962, "Cooling of Cryogenic Liquids by Gas Injection", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 8, pp. 507-520.
3. L. Zhang, et al., 2004, "Geysering Inhibiting Research for Single Feeding-line in Cryogenic Propellant Transfer System", Cryogenics, Vol. 44, pp. 643-648.
4. KARI, 2004, "Preliminary Design Review of KSLV-I (3-Stage LV)", Vol. 2, pp. 1-89.
5. A. F. Mills, 1995, "Basic Heat and Mass Transfer", IRWIN.
6. D. S. Miller, 1990, "Internal Flow Systems", BHRA.