

추진제 탱크내의 액체산소 온도상승에 대한 해석적 고찰

조남경* · 정용갑* · 김영목** · 정상권***

Analytical Investigation on Temperature Rise of Liquid Oxygen in Propellant Tank

Namkyung Cho* · Yonggahp Jeong* · Youngmog Kim** · Sangkwon Jeong***

ABSTRACT

For pump-fed rocket propulsion system, the temperature of LOX to be supplied to turbopump inlet should be satisfied with pump inlet temperature requirement during all operating stages, as excessive temperatures can result in cavitation due to reduction in NPSH, thus either damaging the pump or adversely affecting pump performance rise. So exact estimation of LOX temperature rise is absolutely needed for developing reliable propulsion system. This paper presents systematic analysis scheme for estimating inner process of cryogenic propellant tank which is needed for LOX temperature rise. And this paper presents LOX temperature rise and thermal stratification for all rocket operating stages including cooling, filling, waiting, pre-pressurization and firing, with the application of buoyancy driven boundary layer theory.

초 록

터보펌프 공급방식 발사체 추진기관은 공급 시작 시점에서부터 종료되는 시점까지 산화제 터보펌프 입구에서의 온도 요구조건을 충족시켜야 한다. 이러한 조건이 만족되지 못할 경우 터보펌프 입구에서 캐비테이션이 발생하여 펌핑(pumping) 성능이 저하되고, 심한 경우 펌프의 손상을 초래할 수 있다. 따라서 극저온 액체산소를 사용하는 액체로켓 추진기관에서는 액체산소의 온도 상승에 대한 정확한 예측이 필수적이다. 본 논문에서는 탱크 내의 액체산소 온도상승과 관계된 탱크 내 해석 방법을 체계적으로 제시하였고, 부력동기 경계층 이론을 적용하여 터보펌프 공급방식 로켓 추진기관의 충전, 대기, 선가압, 비행 등의 전 과정을 통하여 탱크에 충전된 액체산소의 온도상승을 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

Key Words: LOX(액체산소), Temperature Rise(온도상승), Thermal Stratification (열적 성층화), Pump-fed(터보펌프식 공급), Operating Stage(운용단계)

† 2005년 6월 25일 접수 ~ 2005년 9월 2일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원 추진제어그룹

** 종신회원, 한국항공우주연구원 추진제어그룹

*** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

연락처, E-mail: cho@kari.re.kr

Nomenclature

A_H	: Tank wall heated area	
\dot{V}_H	: Volumetric flow rate of liquid in heated boundary	
V_{LUD}	: Volume of liquid in upper dome before any outflow	
δ	: Boundary layer thickness	
θ	: Temperature excess in boundary layer (actual temperature minus liquid bulk temperature)	
$\bar{\theta}$: Average of "mixing cup" temperature excess of boundary layer	
θ_w	: wall temperature minus liquid bulk temperature	
ξ	: Ratio of $\bar{\theta}/\theta_w = 0.25$	
\dot{m}	: mass flow	
v	: specific volume	
μ	: viscosity	
ρ	: density	V : volume
\dot{Q}	: heat inflow	T : temperature
Nu	: Nusselt number	

Subscript

in	: inlet	g	: gas phase
out	: outlet	sat	: saturated condition
w	: wall	vg	: gas vapor
g	: gas		
gvs	: gas vapor generated at surface		
gs	: gas to surface	wo	: outer wall
ls	: liquid to surface		

Abbreviation

S.V. : LOX sub-volume

B.S.V. : Boundary layer sub-volume

1. 서 론

발사체 액체산소 탱크는 가압가스와 극저온 액체산소간의 열 및 물질 전달이 활발히 일어나는 공간이다. 탱크 내의 열 및 물질 전달은 얼리지(ullage) 공간의 압력, 온도를 변하게 하여 발사체에 탑재해야 할 가압가스 요구량을 변화 시키며, 엔진으로 공급되는 액체산소의 온도변화를 일으킨다. 액체산소의 온도가 올라가게 될 경우 터보펌프 입구에서의 케비테이션(cavitation) 가능성이 증대되므로 이에 대한 정밀한 해석이 필요하다. 액체산소 탱크 내의 현상에 대한 해석 및 시험결과는 벤트 밸브의 설계, 가압가스 탑재 요구량 설정, 추진제 온도상승 예측, 탱크의 단열 요구조건 설정, 액체산소 컨디셔닝 요구조건 설정 등을 위한 기본 자료로 활용된다. 액체산소의 온도상승을 파악하기 위해서는 다음 사항에 대한 고려가 필요하다.

첫째, 탱크 내벽에서의 열 및 물질 전달의 설정이다. 액체산소와 탱크 내벽간의 대류 열전달은 내벽근처에서의 산소의 상에 크게 좌우된다. 특정위치에서의 벽면온도와 액체산소의 포화온도에 따라 벽면에서의 상 및 열전달 계수를 예측할 수 있다. 내벽근처에 이상유동(two phase flow)이 형성될 경우 열전달량은 급격히 커지게 되어 액체산소 온도가 높아질 수 있으므로 이에 대한 정밀한 해석이 필요하다.

둘째, 열적 성층화 정도의 평가다. 대기로부터의 열투입에 의해 데워진 극저온 추진제는 상부로 전달되어, 밀도가 적은 추진제가 상부에 모이게 되며 하부에는 상대적으로 저온이며 밀도가 높은 추진제가 형성되게 된다. 이러한 열적 성층화 현상을 발생시키는 요인으로 대기로부터의 열투입에 의한 내벽(side wall)에서의 자연대류 경계층 유동(buoyancy driven boundary layer flow)이 가장 지배적인 인자로 알려져 있다. 열적 성층화에 의해 상부의 추진제 온도가 상승하며 이에 의해 높은 증기압(vapor pressure)을 발생시킨다. 이에 의해 얼리지 가스부의 압력이 상승되며 벤트 밸브의 용량 증대가 필요하게 된다.

또한 상부의 온도 상승에 의해 터보펌프에서의 케비테이션(cavitation) 가능성이 증대되게 된다. 따라서 이에 대한 정밀한 해석이 필요하다. 본 논문은 터보펌프식 추진기관의 충전, 대기, 선가압, 비행 등의 전 과정을 통하여 탱크에 충전된 액체산소의 온도상승을 예측할 수 있는 모델을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2. 해석을 위한 이론적 고찰

2.1 검사체적(control volume)의 인터페이스

추진제 탱크의 검사체적은 이상적으로 Fig. 1 과 같이 묘사될 수 있다[1, 2]. 즉 액체표면에 마찰 없는 피스톤이 장착되어 액체가 유입되면 수위가 올라가고 액체가 토출되면 반대로 수위가 내려가게 되는 형태이다. 통상적으로 액체와 기체를 별도의 검사체적으로 구분하여 해석을 수행하게 되는데 체적과 압력/유량 등이 서로 관련되어 있다.

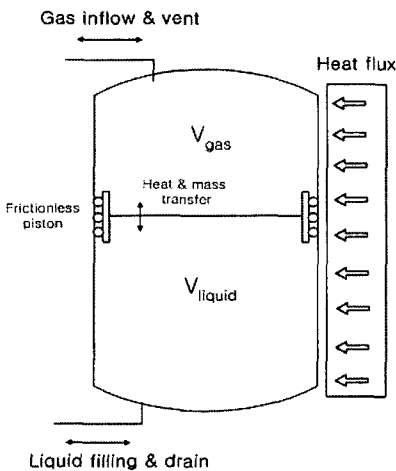


Fig. 1 Schematics of Control Volume Interface

액체 측과 기체 측 각각의 검사체적에 대한 질량보존은 Eq. 1과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \tag{1}$$

또한 액체 측과 기체 측의 에너지 보존식은 식 Eq. 2, Eq. 3, Eq. 4와 같이 표현된다.

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

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot comp \cdot \frac{\partial P}{\partial t} \tag{3}$$

$$comp = \frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P} \tag{4}$$

여기서 탱크 내 검사체적 해석 시에는 두 가지의 제한 조건이 포함된다.

첫째는 Eq. 5와 같이 전체 탱크의 체적이 일정하게 유지된다는 것이다.

$$\frac{dV_{tank}}{dt} = \frac{dV_{gas}}{dt} + \frac{dV_{liquid}}{dt} = 0 \tag{5}$$

또한 액체의 수두에 의한 정하중을 무시한다면 $P_{gas} = P_{liquid}$ 가 되고 미분 식으로 Eq. 6과 같이 표현된다.

$$dP_{gas} = dP_{liquid} \tag{6}$$

액체의 압축성을 무시한다면 dV_{liquid}/dt 는 유입/배출되는 액체산소의 질량유량(mass flow)에서 계산될 수 있다. 액체와 기체측의 검사체적에 대한 계산절차는 다음과 같다.

첫째, 유입/배출되는 액체의 질량유량으로부터 dV_{liquid}/dt 값을 계산한다.

둘째, Eq. 5에서 기체의 체적변화를 계산한다.

셋째, PVT(기체의 압력/체적/온도 관계식) 관

계식이나 물성치 데이터베이스 표에서 기체 측의 압력을 온도의 함수로 표현한다.

넷째, Eq. 2의 에너지 식에서 기체와 액체의 온도를 계산한다.

위와 같은 검사체적 인터페이스 기법은 액체 측 검사체적의 해석을 위해 여러 부체적(sub-volume)으로 나눈 경우에도 적용될 수 있다. 이 경우 Eq. 5는 Eq. 7과 같이 표현된다.

$$\Delta V_{tank} = \Delta V_{gas} + \sum \Delta V_{subvolume} = 0 \tag{7}$$

예를 들어 Fig. 2의 충전 시와 같이 하부에서 액체가 들어올 경우 하부의 부체적의 체적은 커지게 되고 그 만큼 기체 측 체적은 줄어들게 된다. 기체측 압력을 계산한 후 최상층 액체부 부체적(sub-volume)의 압력이 기체 측 압력과 동일하다고 가정한다면 하부 부체적에 가해지는 압력은 상부의 액체 부체적(sub-volume) 들의 수두에 의한 정하중을 합한 값이 된다.

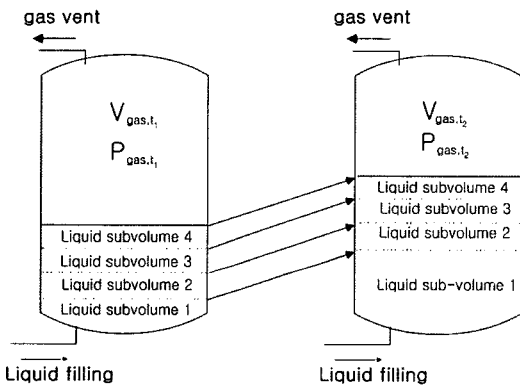


Fig. 2 Schematics of Analysis in Case of Multiple Liquid Sub-volumes

2.2 표면에서의 열 및 물질 전달

탱크 내에서 액체상소 표면에서의 열 및 물질 전달에 대한 개략도를 Fig. 3에 제시하였다.

일반적으로 표면온도는 항상 포화온도(T_{sat})를 유지하는 것으로 가정한다. 기체측과 액체측

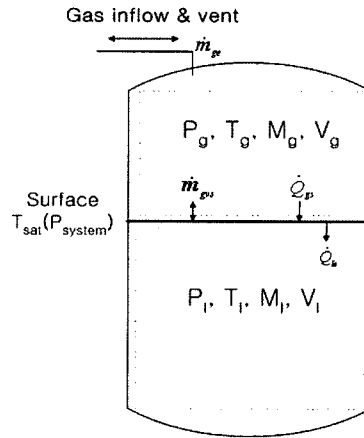


Fig. 3 Schematics of Heat and Mass Transfer at the Surface

검사체적으로의 열전달은 기체측에서 표면으로 전달되는 열전달과, 표면에서 액체측으로 전달되는 열전달로 구분할 수 있다. 기체측에서 표면으로 전달되는 열은 액체를 증발시키며, 표면에서 액체로 전달되는 열은 액체의 온도를 높이는 역할을 한다.

기체 측에서 표면으로 전달되는 열전달은 Eq. 8과 같이 표현된다.

$$\dot{Q}_{gs} = h_{gs} A_{surf} (T_g - T_{sat}) \tag{8}$$

이 때 표면은 항상 포화온도를 유지하며 Eq. 8의 열은 액체의 기화를 일으키는 요인이 된다. 표면에서 액체 측으로 전달되는 열은 Eq. 9 같이 표현되며 액체의 온도를 높이게 된다.

$$\dot{Q}_{ls} = h_{ls} A_{surf} (T_{sat} - T_{ls}) \tag{9}$$

또한 표면에서 증발된 기체는 Eq. 10과 같이 표현된다.

$$\dot{m}_{gvs} = \frac{\dot{Q}_{gs} - \dot{Q}_{ls}}{h_{vg} - h_l} \tag{10}$$

23 탱크 내벽에서 액체산소로의 열전달

탱크 내벽에서 액체산소로의 열전달은 수직 위치별로 차이를 가지게 된다. 특정위치에서의 열전달 계수는 내벽온도(T_{wall})와 국부적 포화온도(T_{sat}) 온도의 차이에 의해서 결정된다. 이 때 T_{sat} 는 Fig. 4에 제시된 바와 같이 액체의 각 부분마다 수두에 의해 변하게 된다.

특정 위치에서의 수두에 의한 압력은 Eq. 11 과 같이 표현된다

$$P_{local}(t) = P_{gas} + \rho g h_{upper}(t). \quad (11)$$

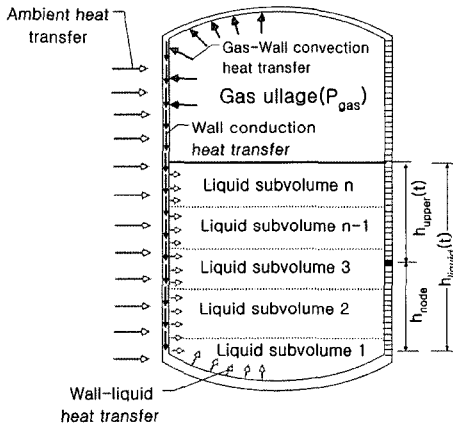


Fig. 4 Schematics of Heat Transfer at Tank Inner Wall

특정위치에서의 계산과정을 살펴보면 먼저 Eq. 11에서 압력을 계산하고 이에 해당하는 포화온도 $T_{sat}(P_{sat})$ 을 계산한다. $T_{sat}(P_{sat})$ 과 해당위치에서의 벽면온도 (T_{wall})을 비교하여 $T_{wall} > T_{sat}(P_{sat})$ 일 경우 이상유동 열전달(two phase flow)이 발생하게 되고 반대로 $T_{wall} < T_{sat}(P_{sat})$ 이면 단상유동 열전달 계수를 적용한다. 과가열 정도(wall superheat, $T_{wall} - T_{sat}(P_{sat})$)에 따른 열전달 계수 적용에 대한 개략도를 Fig. 5에 제시하였다[3-5].

24 탱크 내 열적 성층화

극저온 추진제 탱크 내에서의 열적 성층화는

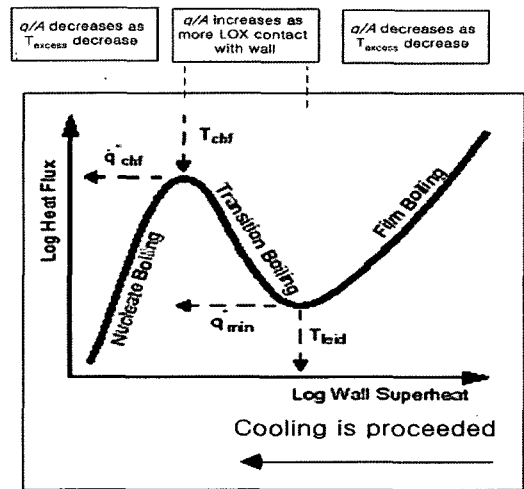


Fig. 5 Heat Transfer Coefficient According to Superheating

외부로부터의 열투입에 의해 발생하게 된다. 대기로부터의 열투입에 의해 데워진 극저온 추진제는 상부로 전달되어, 밀도가 적은 추진제가 상부에 모이게 되며 하부에는 상대적으로 저온이며 밀도가 높은 추진제가 형성되게 된다. 이러한 열적 성층화 현상을 발생시키는 요인으로 대기로부터의 열투입에 의한 side wall에서의 자연대류 경계층 유동(buoyancy driven boundary layer flow)이 가장 지배적인 인자로 알려져 있다.

2.4.1 부력동기 경계층 유동(buoyancy driven boundary layer)의 현상적 고찰

외부의 열 투입은 추진제 탱크 벽면 근처에 얇은 국부적인 포화 상태의 경계층을 형성시켜 이 경계층의 상부로 향하는 자연대류 현상에 의해 열적 성층화가 발생한다. Fig. 6에 자연대류 경계층 이론의 개략도를 제시하였다. 이 이론으로 해석을 하기 위하여 일반적으로 다음의 가정이 설정된다[4].

- ① 초기의 액체의 온도는 균일하다.
- ② 외부로부터의 모든 열은 경계층 유동에 현열(sensible heat) 형태로 흡수된다.

- ③ 경계층 유동내의 모든 유동은 상부의 데워진 층으로 이동한다.
- ④ 데워진 경계층은 혼합되고 하부 층으로 침투한다.
- ⑤ 경계층 유동의 두께는 탱크 직경에 비해 매우 작다.

Fig. 6에서 V_{LUD} 는 자연대류 경계층 유동이 분출이 되는 위치에서 액체의 수위까지의 부피를 의미한다. A_{HC} 는 열이 가해지는 저온층(cold layer)으로 정의된다. 앞의 가정에 의해 대기로부터의 열 침투에 의한 경계층 내에서의 온도상승은 Eq. 12와 같이 표현할 수 있다.

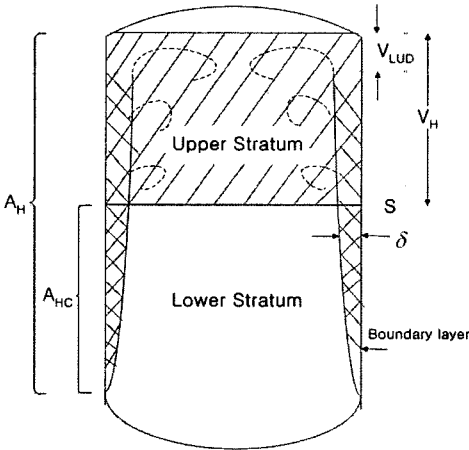


Fig. 6 Schematics of Thermal Stratification by Buoyancy Driven Boundary Layer Flow

$$\frac{q}{A} A_H = \pi D \int_0^{\delta} \rho C_p [T_{(y)} - T_i] u(y) dy \quad (12)$$

Equation 12에서 경계층 내의 특정위치의 온도에서 전체(bulk) 액체산소의 온도를 빼 값인 θ 를 $\theta = T_{(y)} - T_i$ 로 정의하고 ρC_p 가 일정하다고 가정하면 Eq. 13과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{q}{A} A_H = \pi D \rho C_p \int_0^{\delta} \theta(y) u(y) dy \quad (13)$$

이 때 혼합 유동 온도 불균일도 (mixing cup temperature excess)를 Eq. 14와 같이 정의하면

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^{\delta} \theta(y) u(y) dy}{\int_0^{\delta} u(y) dy} \quad (14)$$

Eq. 13은 Eq. 15 로 표현될 수 있다.

$$\frac{q}{A} A_H = \pi D \rho C_p \bar{\theta} \int_0^{\delta} u(y) dy = \rho C_p \bar{\theta} \dot{V}_H \quad (15)$$

즉 경계층 유동을 통한 체적 유량은 Eq. 16과 같이 표현된다.

$$\dot{V}_H = \frac{q}{A} \frac{A_H}{\rho C_p \bar{\theta}} \quad (16)$$

위 식에서 q/A 는 외부로부터 전달되는 열량으로서 $(T_w - T_{sat})$ 에 관계하는 열전달 계수에 의존하고 A_H 는 충전 수위 및 탱크 형상에 따라 정해진다. $\bar{\theta}$ 는 열 및 모멘텀 경계층에 의해 결정되는 값이다.

2.4.2 경계층 유동 및 열전달 계수의 설정

앞의 Eq. 16에서 $\bar{\theta}$ 는 열 및 모멘텀 경계층에 의해 결정되는 값이며 본 연구에서는 Eq. 17과 Eq. 18과 같이 액체산소 탱크 내에서의 경계층 유동에 대한 측정 경험치를 적용하였다[5].

$$u(y) = u_1 \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^4 \quad (17)$$

$$\theta(y) = \theta_w [1 - (\frac{y}{\delta})^{1/7}] \quad (18)$$

Equation 17 과 Eq. 18에서

$$\frac{\bar{\theta}}{\theta_w} = \frac{u_1 \int_0^1 (\frac{y}{\delta})^{1/7} (1 - \frac{y}{\delta})^4 [1 - (\frac{y}{\delta})^{1/7}] d(\frac{y}{\delta})^{1/7}}{u_1 \int_0^1 (\frac{y}{\delta})^{1/7} (1 - \frac{y}{\delta})^4 d(\frac{y}{\delta})} = \zeta \quad (19)$$

이 되며 적분하면 $\zeta = 0.25$ 가 된다.

$$\frac{q}{A} = h\theta_w \text{이므로 Eq. 16은}$$

$$\dot{V}_H = \frac{hA_H}{\rho C \zeta} \quad (20)$$

과 같이 표현된다. Eq. 20에서 열전달 계수 h 는 탱크 노드의 온도(T_{wall})와 LOX의 포화온도(T_{sat})를 비교하여 아래식의 값을 기준으로 Fig. 5와 같은 형태의 열전달 관계식을 적용한다.

$$\Delta T_{excess} = T_{wall} - T_{sat}$$

각 비등(boiling) 영역에 대한 이상유동 열전달 계수는 참조문헌을 활용하였다[6-8].

2.4.3 계산과정

본 연구에 적용된 계산과정을 Fig. 7에 제시하였다. 먼저 충전된 액체산소를 10개의 부체적(sub-volume)으로 나눈 후 각 부체적으로 유입되는 열량을 계산하였다. 투입된 열량을 바탕으로 벽면에서의 열전달에 의해 야기되는 자연대류 경계층 유동을 Eq. 21과 같이 계산하였다.

$$\dot{V}_{H,i} = \frac{h_i A_{H,i}}{\rho C \zeta} \quad (21)$$

상부의 부체적에서는 하부의 부체적에서 유입된 경계층 유동과 합쳐져서 경계층 유동이 Eq. 22와 같이 성장하게 한다.

$$\dot{V}_{H,N-1} = \dot{V}_{H,N-2} + \frac{h_{N-1} A_{H,N-1}}{\rho C_p \zeta} \quad (22)$$

경계층 유동은 최상부의 부체적으로 유입되어 최상부 층을 가열시킨 후 하부 층으로 침투하게 된다. 이 때 하부 층으로 침투하는 체적 유량은 경계층으로 유입된 유량과 동일하게 Eq. 23과 같이 설정하였다. 각 부체적간에는 전도 열전달이 이루어지는 것으로 가정하였다.

$$\dot{V}_{H,j} = \frac{h_j A_{H,j}}{\rho C \zeta} \quad (23)$$

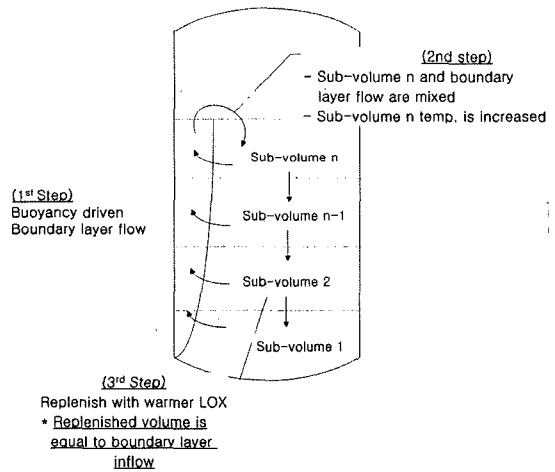


Fig. 7 Calculation Procedures for Thermal Stratification

3. 대상추진시스템 및 운용조건

3.1 대상 추진시스템

대상 추진시스템은 Fig. 8과 같이 헬륨탱크를 액체산소 탱크 내에 위치시켜 가압 헬륨을 액체산소 온도(90 K)까지 냉각 시킨 후 엔진 열교환기를 통해 헬륨의 온도를 약 550 K 까지 상승시켜 가압하는 극저온 헬륨 열교환 가압방식 공급계 시스템을 해석 대상으로 한다[7]. 본 연구에 적용된 액체산소 탱크의 주요 규격은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of Liquid Oxygen Tank

Item	Value
Initial LOX tank temperature	300 K
Initial pressure of LOX tank	1 bar
LOX tank diameter	3.04 m
LOX tank length	4.57 m
Tank wall thickness (aluminum)	12.7 mm
Tank wall insulation thickness	25.4 mm
Tank wall insulation conductivity	0.086 W/m-K
LOX fill level	90 %
LOX vent valve diameter	76.2 mm
LOX flow rate to engine	75.6 kg/sec

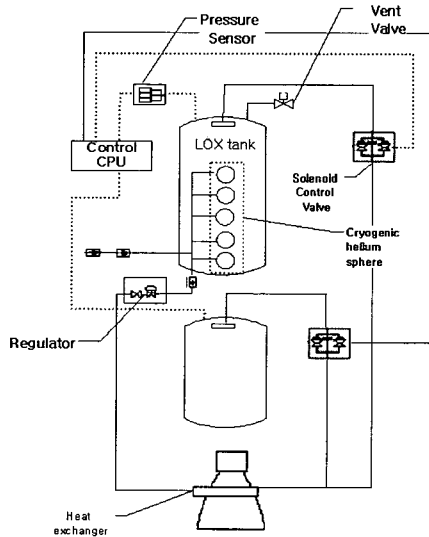


Fig. 8 Specification of Propulsion System for Analysis

3.2 운용단계 설정

액체산소 운용단계는 Table 2와 같이 구분될 수 있다. 가장 먼저 액체산소 탱크 내에 상온 헬륨을 충전한 후 액체산소 탱크 냉각 및 액체산소 충전 단계가 수행된다. 이후 충전이 완료되면 벤트 밸브를 닫은 후 지상 선 가압을 위한 대기단계(no vent holding stage)가 진행된다. 이

후 지상 설비를 이용하여 액체산소의 선 가압이 이루어지는 선 가압(cold pressurization) 단계가 수행되며, 최종적으로 극저온 액체산소 탱크 내의 극저온 헬륨을 엔진 열교환기로 데워서 탱크 내 가압을 수행하고 추진제를 엔진에 토출시키는 엔진공급(hot-pressurization) 단계가 수행된다. 본 연구에서는 각 단계의 운용 시간을 Table 2와 같이 설정하였다.

Table 2. Operating Stages of LOX Feeding System

No	Stage	Time
1	Cooling and filling stage	1.2 hour
2	Holding stage (no vent)	0.1 hour
3	Cold pressurization	0.1 hour
4	Engine firing and hot pressurization	5 minutes

4. 탱크 내 액체산소 온도상승 해석결과

4.1 냉각단계

냉각단계는 극저온 액체산소가 탱크로 유입되어 탱크가 냉각되는 단계다. 이 단계에서는 냉각을 위한 공급 유량 설정 및 벤트 밸브 선정의 적합성 확인이 필요하다. 또한 소요되는 냉각시간이 확인되어야 한다. 포화상태의 액체산소가 유입되어 벽면을 냉각시키며 대기로 열려있는 벤트밸브를 통해 대기로 벤트(vent) 된다. 벤트 밸브의 토출 유량계수가 적을 경우 기화된 산소에 의해 탱크 내 압력이 올라가게 되며 이는 충전되는 액체산소의 온도상승 및 탱크 벽에 구조적 문제를 야기하게 된다. 따라서 이 단계에서는 적절한 공급 유량을 벤트 밸브 사이즈를 고려하여 설정하는 것이 중요하다. 냉각단계와 충전 단계는 정성적으로 탱크 바닥의 냉각완료 여부로 구분될 수 있다. 바닥이 충분히 냉각되기 전에는 바닥에서 기화된 산소가 왕성하게 발생하며 수위가 오르지 않게 된다. 바닥에서 발생한 기체는 상부로 올라가며 액체 층을 혼합시키는 역할을 하므로 열적 성층화가 매우 약하게 형성

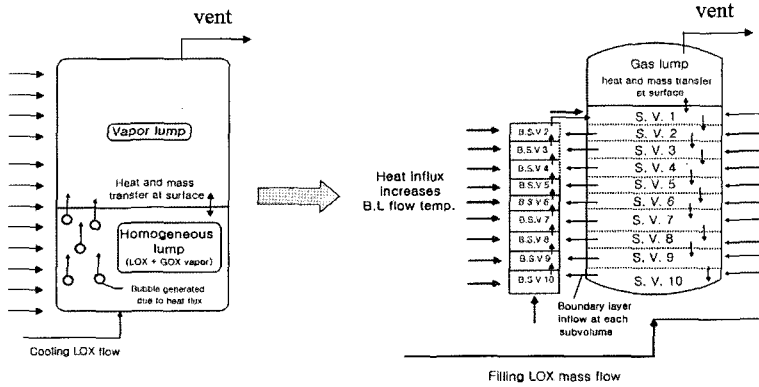


Fig. 9 Transform of Analytical Model from Cooling Stage to Filling Stage

된다. 따라서 정성적으로 가장 하부 노드가 충분 수위가 오르지 않게 된다. 바닥에서 발생한 기체는 상부로 올라가며 액체 층을 혼합시키는 역할을 하므로 열적 성층화가 매우 약하게 형성된다. 따라서 정성적으로 가장 하부 노드가 충분히 냉각이 될 때까지는 충전(filling) 단계로 볼 수 없고 냉각(cooling) 단계로 보는 것이 타당하다고 판단되었다. 냉각단계에서는 Fig. 9의 왼쪽부와 같이 전체 액체가 포화온도(1기압에서는 90 K)에 해당한다고 가정하며 액체산소가 탱크 안에 유입되어 포화온도까지 냉각되어 증발이 되면서 증발열로 탱크벽면을 냉각시킨다. 이 때 외부에서 유입된 열과 탱크를 냉각시키는데 소요되는 열하중(thermal mass)에 의해 기포가 발생하게 되는데 생성된 기포는 상부의 기체부로 상승하여 벤트되게 된다. 대상 시스템에 대하여 탱크 내 압력상승이 0.1 bar 미만을 보이게 액체산소 공급 유량은 약 5 kg/s로 계산되었다. 따라서 지상 설비에서 5 kg/s의 유량으로 액체산소를 주입할 경우 Fig. 10과 같이 약 23분경에 하부 벽면의 냉각이 충분히 이루어지는 것을 볼 수 있다. 바닥의 냉각이 충분히 이루어진 후 탱크 내 기체의 부피 분율인 기공율(void fraction)이 Fig. 11과 같이 급격히 감소하는 것을 볼 때 23분 이후를 충전 단계로 구분하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

4.2 충전단계

이 단계에서는 기화에 의한 탱크 내 압력상승이 중요한 고려인자가 된다. 충전단계에서는 수위가 본격적으로 올라가게 되며 하부의 액체는 수두(hydrostatic force) 때문에 파냉각 상태를 유지하게 된다. 이 경우 전체 검사체적에서 기화가 일어나지 않고 벽면에서만 기화가 일어나며 열투입에 의하여 데워진 액체는 부력동기 경계층유동(buoyancy driven boundary layer flow)에 의해 상층으로 이동하며 이에 따른 충전단계에서의 열적 성층화 해석을 위해 Fig. 9의 오른쪽 그림과 같이 10개의 부체적으로 나누어 열적 성층화를 예측하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 충전 단계에서의 최상층 액체산소의 온도와 압력 이력을 보인다. 하부로부터 액체산소 자연대류 유동이 최상층으로 유입되고 최상층 부 액체가 벽면과 새롭게 접함에 따라 급격한 기화에 의해 열리지 압력이 상승하며 이에 따라 액체산소의 포화온도도 증가하게 된다. 하여 압력과 온도 섭동을 보인다. 충전 종료 시에는 Fig. 14와 같이 약 0.2 K의 온도 성층화를 보인다.

4.3 대기단계

대기단계 (no-vent hold)는 액체산소 공급 밸브 및 벤트 밸브를 닫고 선 가압을 준비하는 과정으로 정의될 수 있다. 이 단계에서는 외부로부터

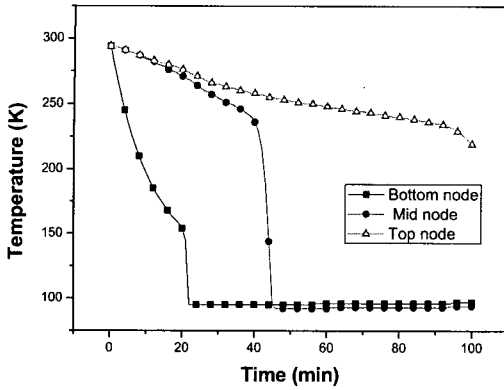


Fig. 10 Temperature History during Cooling Stage

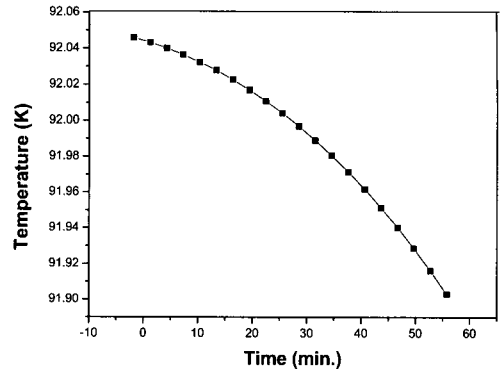


Fig. 12 LOX Temperature History at Top Sub-volume during Filling Stage

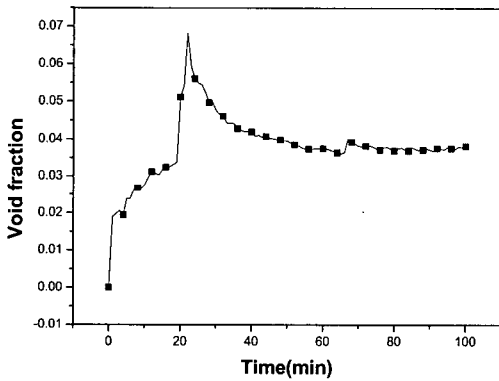


Fig. 11 Void Fraction History during Chilling Stage

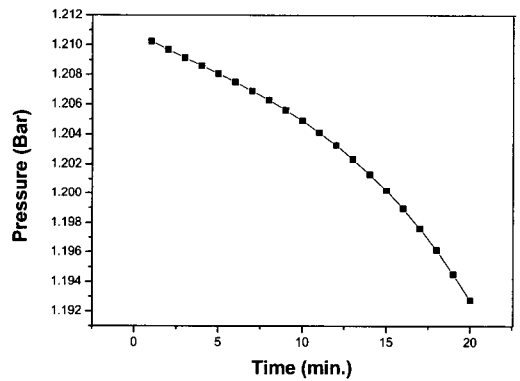


Fig. 13 Ullage Pressure History during Filling Stage

터 액체산소로 열이 지속적으로 투입됨으로 인해 얼리지부의 압력 및 액체산소의 온도가 계속적으로 상승하게 된다. Fig. 15는 대기단계에서의 액체산소 최상층의 온도 이력을 보인다. 액체산소로의 열투입량은 시간에 따라서 급격하게 감소하게 되는데 이는 탱크 벽면이 시간에 따라 냉각되고, 얼리지부 압력이 높아져서 액체산소의 포화온도(T_{sat})가 높아짐으로 인해 벽면에서 액체산소로의 열전달이 이상유동(two phase flow) 열전달에서 단상유동 열전달로 변화함에 따른 것으로 판단된다. 단상유동 열전달은 이상유동

열전달에 비해 열전달 계수가 매우 적으므로[8], 액체산소로 투입되는 열량이 줄어들게 되고 이에 따라 최상부 액체산소 층의 온도상승 경향이 줄어들게 된다. 대기단계 종료 시에 열적성충화는 Fig. 16에 제시된 바와 같이 0.5 K에 해당한다.

4.4 선가압 단계

선가압 단계는 지상에 저장되어 있는 상온의 헬륨을 이용하여 산화제 탱크를 설정된 가압압력(4.5 bar)으로 가압하는 과정이다. 이 과정에서는 얼리지부의 온도 상승 경향, 액체산소의 온도상승, 열적성

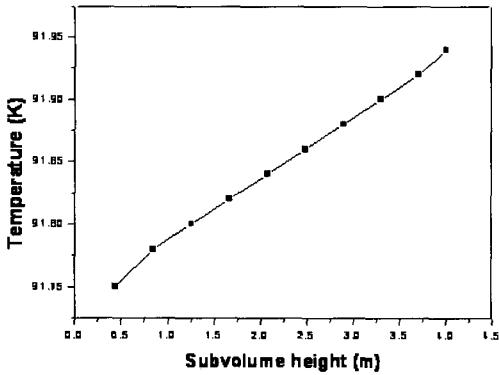


Fig. 14 Thermal Stratification at the End of Filling Stage

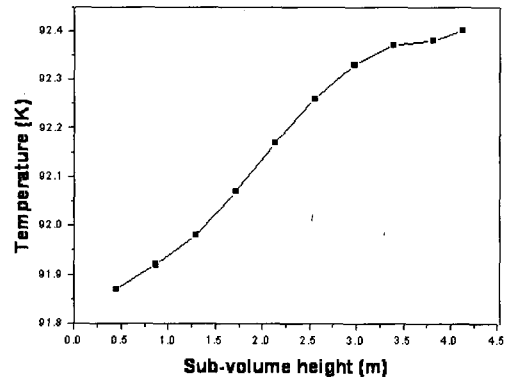


Fig. 16 Thermal Stratification at the End of Waiting Stage

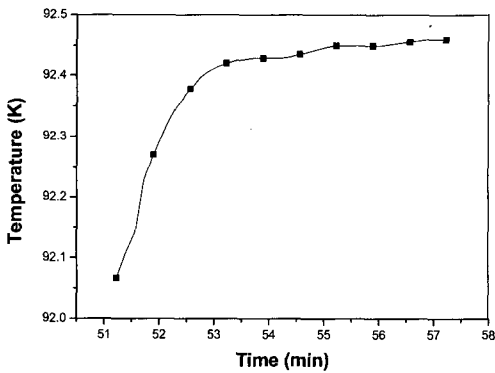


Fig. 15 Top LOX Layer Temperature during Waiting Stage

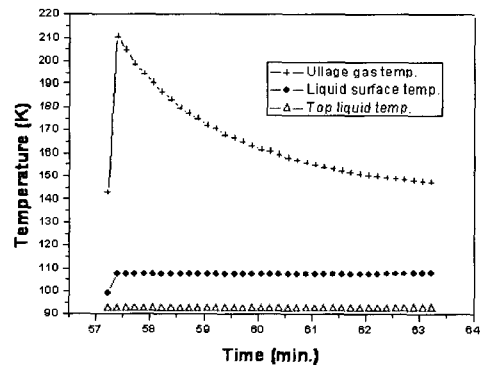


Fig. 17 Temperature of Ullage, Surface, Top LOX Layer during Pre-pressurization Stage

층화 정도가 주요한 고려인자다. 얼리지 부 온도는 Fig. 17과 같이, 4.5 bar까지 가압이 이루어짐에 따라 210 K까지 상승하다가 표면에서 기화된 산소와 섞임으로 인해 온도가 점차로 감소하게 된다. 선가압 종료 시의 열적 성층화는 Fig. 18과 같이 0.5 K 정도로 예측되었으며 최상부 액체 산소 층의 온도는 92.7 K까지 상승하였다. 앞의 대기단계와 유사한 열적 성층화 성능을 보이는 것은 액체 산소 각 층간에 온도차가 증가할수록 층간의 전도 열전달도 따라서 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

4.5 엔진공급 단계

엔진 공급단계는 엔진에서의 연소를 위해 액체 산소를 일정한 유량으로 엔진에 공급하는 단계이다. 공급되는 유량은 얼리지 부를 4.5 bar로 가압한 상태에서 터보펌프의 작동(suction)에 의해 75.6 kg/s의 액체 산소가 공급되는 것으로 설정하였다. 이 단계에서는 Fig. 19와 같이 최하부 층의 액체 산소가 먼저 소진된 후 다음 하부 층의 액체 산소가 소진되는 과정을 거쳐 마지막으로 최상층이 엔진에 공급되게 하면서 실제 엔진에 공급되는 액체 산소의 온도를 예측하는

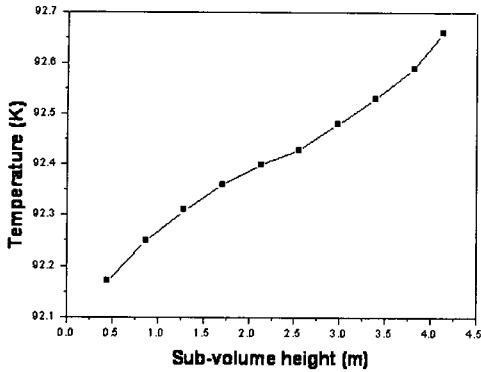


Fig. 18 Thermal Stratification at the End of Pre-Pressurization Stage

Lagrangian 방법을 적용하였다. 엔진 공급단계에서는 고온의 헬륨(약 550 K)이 유입됨으로 인해 탱크 벽면이 데워지게 되어 벽면에서 이상유동(two phase flow) 열전달이 광범위하게 발생한다. 또한 급격한 표면증발 및 액체산소 공급에 따른 팽창에 의해 얼리지부의 물성치가 급격하게 변화한다. Fig. 20은 Lagrangian 방법을 적용하여 엔진 터보펌프가 접하게 되는 액체산소 온도 예측 결과를 보인다.

연소 후기에 터보펌프는 최상층 액체산소를 접하게 되며 이 경우 터보펌프 유입온도는 93.1 K에 해당하는 것으로 예측되었다. 실제 엔진 공급단계에서는 비행이 전제가 되므로 공력가열에 의해 훨씬 큰 열이 액체산소로 유입된다. 따라서 추후 이러한 공력가열 데이터를 입력으로 하여 액체산소의 온도상승을 예측하는 것이 필요하다. 터보펌프 설계가 확정되어 있을 경우 이러한 최상층 액체산소의 공급온도는 터보펌프 공급요구 조건에 부합하는지가 검증되어야 하며, 터보펌프의 온도 요구조건보다 높을 시는 액체산소의 과냉각 충전이 필요하다.

5. 결 론

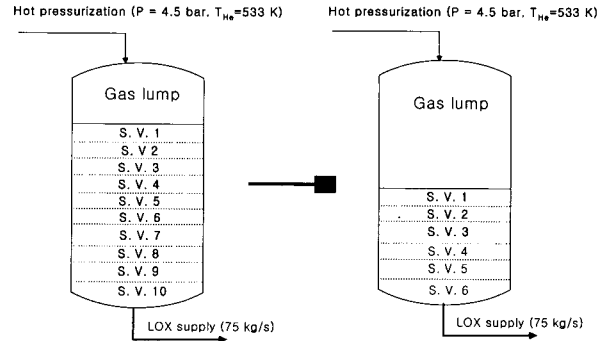


Fig. 19 Schematics of Analysis during Firing Stage

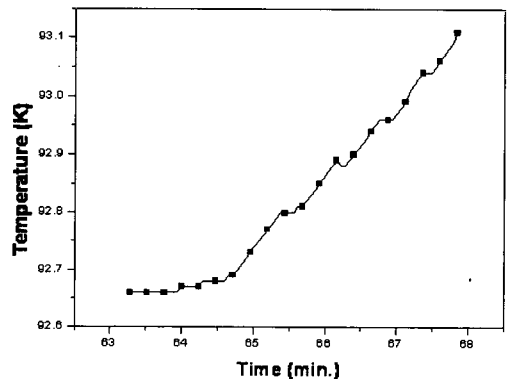


Fig. 20 Estimated Turbopump Inlet Temperature

본 논문에서는 우주발사체 액체산소 탱크 내에서의 해석을 위한 기법을 제시하였으며 아래와 같이 요약될 수 있다.

첫째, 발사체 액체산소 공급시스템 운용 절차를 따라 액체산소 공급 시스템 해석 기법을 정립하였다.

둘째, 각 단계별로 액체산소의 최상층 액체산소 층의 온도 상승과 열적 성층화 정도를 정량적으로 예측 하였다.

본 해석결과는 추후 액체산소 과냉각 요구조건 설정 시 반영될 수 있으며 추후 공력가열 데이터를 입력하여 보다 완전한 해석이 수행될 필

요가 있다.

본 논문에 적용된 해석적 고찰 기법들에 대한 정확도와 타당성 입증을 위하여 추후 시험이 수행되어 비교 검토되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 특정연구개발사업인 소형위성발사체(KSLV-I) 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Brent, A. C. and David, A. J., "Control Volume Interfaces: A Unique Tool for a Generalized Fluid Network Modeler", AIAA 2000-2503, 2000
2. Brent, A. C. et. al, "SINDA/FLUINT user manual version 4.7", 2004
3. Lin, C. S. and Hasan Mohammad. M., "Numerical investigation of the thermal stratification in cryogenic tanks subject to wall heat flux", NASA TM103194, AIAA-90-2375, 1990
4. Elliot Ring et. al., "Rocket propellant and pressurization systems", Prenticehall, 1967
5. R. W. Arnett and R. O. Votb, "A computer program for the calculation of thermal stratification and self pressurization in a liquid hydrogen tank", NASA CR2026, 1972
6. Incropera, F.P., and D.P. Dewitt., "Introduction to Heat Transfer. 3rd ed.", New York: John Wiley and Sons, 1996
7. Kays, W.M. and M.E. Crawford, "Convective Heat and Mass Transfer. 3rd ed.", New York: McGraw-Hill Book Company, 1993
8. Barron, R.F., "Cryogenic Heat Transfer", Philadelphia: Taylor & Francis, 1999