

우주발사체 액체산소 탱크 내에서의 열적 성층화 현상에 대한 해석적 연구

조남경*, 정용갑*, 길경섭*, 권오성*, 김영목*

The analytical research of thermal stratification phenomena in the LOX tank of launch vehicle

Nam-Kyung Cho*, Yong-Gahp Chung*, Gyoung-Sub. Kil*, Oh-Sung Kwon*, Young-Mog Kim*

ABSTRACT

Thermal stratification phenomena in the liquid oxygen tank of launch vehicle is caused by heat influx from ambient and non-equilibrium heat and mass transfer in the cryogenic tank. The thermal stratification study is needed for designing vent system, tank insulation, pump inlet. In this paper by investigating buoyancy driven boundary layer flow by side wall heating, one dimensional analysis of thermal stratification is performed. thermal gradient is described with time.

초 록

액체산소 탱크 내에서의 열적 성층화(thermal stratification) 현상은 대기로부터의 열 투입과 탱크 내에서의 극저온 액체의 열적 비평형에 의해 발생된다. 열적 성층화 현상은 벤트 시스템, 탱크 단열, 펌프 설계에 영향을 미치게 되므로 정교한 해석 및 시험적 검증이 필요하다. 본 논문에서는 side-wall에서의 열 투입에 의해 발생되는 경계층 유동을 해석적 방법으로 1차원 모델링하여 시간에 따른 성층화 부피의 증가 및 탱크 내에서의 높이에 따른 온도 분포를 묘사한다.

Key Words: Thermal Stratification(열적 성층화), Cryogenic propellant(극저온 추진제), Vapor Pressure(증기압), Buoyancy Driven Boundary Layer(자연대류 경계층 유동), Liquid Oxygen(액체산소)

1. 서 론

극저온 추진제 탱크 내에서의 열적 성층화는 외부로부터의 열투입에 의해 발생하게 된다. 대기로부터의 열투입에 의해 데워진 극저온 추진

제는 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

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

boundary layer flow)이 가장 지배적인 인자로 알려져 있다[1]. 이러한 열적 성층화 현상이 추진기관에 미치는 효과를 그림 1에 제시하였다. 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 캐비테이션(cavitation) 가능성이 증대되게 된다. 한편 고밀도화 추진과 같은 재순환 방식의 추진에서는 자연 대류 경계층 유동은 재순환을 촉진하게 하는 장점이 있다.

극저온 추진제에서의 열적 성층화 해석은 발사체 설계에 있어서 벤트 밸브 사이징, 터보펌프 입구 설계, 탱크 단열을 위해서 필요하며, 터보펌프의 입구에 유입될 수 있는 최대 온도를 예측하며, 고밀도화 기구 설계에 있어서 냉각 용량 산정 등을 위해 필수적이다. 본 논문에서는 열투입에 의해 LOX 내로 전달되는 열량을 벽면에서의 이상유동 열전달(two-phase flow) 계수를 고려하여 설정하였다. 또한 발사체 운용 단계를 고려하여 추진제 충전 단계, 대기 단계의 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 이론적 고찰

2.1.1. 열적 성층화 이론

통상적으로 열적 성층화 이론은 다음의 두 가지 가정 하에서 수행되어 왔다[1]. 첫 번째 가정은 외부로부터의 열 투입에 의해 추진제의 온도와 증기압이 균일하게 상승한다는 것이다. 두 번째 가정은 외부의 열 투입은 추진제 탱크 벽면 근처에 얇은 국부적인 포화 상태의 경계층을 형성시켜 이 경계층의 상부로 향하는 자연대류 현상에 의해 열적 성층화가 발전된다는 이론이다. 첫 번째 가정의 경우를 살펴보면 외부로부터의 열투입이 균일하게 이루어지게 되며 이 때 하부의 추진제가 상부의 추진제에 비해 수두가 높음으로 인해 열용량이 커지므로 상대적으로

높은 온도 상승이 있게 된다. 따라서 하부의 밀도가 상부 보다 적음으로 인해 불안정한 구조가 형성되며 convection cell의 bulk유동에 의하여 온도와 밀도를 균일화 하게하는 경향을 보인다 [2].

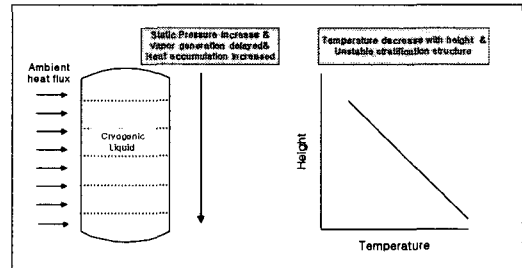


그림 1. 외부로부터의 열투입에 의해 bulk 추진제 온도가 균일하게 상승된다고 가정할 경우의 온도 분포

2.1.2 Buoyancy driven boundary layer의 현상적 고찰

두 번째 가정은 외부의 열 투입은 추진제 탱크 벽면 근처에 얇은 국부적인 포화 상태의 경계층을 형성시켜 이 경계층의 상부로 향하는 자연대류 현상에 의해 열적 성층화가 발전된다는 것이다. 그림 2에 자연대류 경계층 이론의 개략도를 제시하였다. 이 이론으로 해석을 하기 위하여 일반적으로 다음의 가정이 설정된다.

- (1) 초기의 액체의 온도는 균일하다.
- (2) 외부로부터의 모든 열은 경계층 유동에 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 적다.

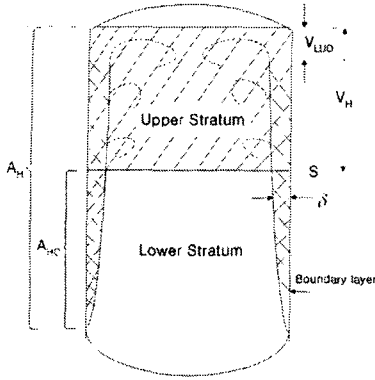


그림 2. 자연대류 경계층에 의한 열적 성층화 개략도

위의 그림에서 V_{LUD} 는 자연대류 경계층 유동이 분출이 되는 위치에서 액체의 수위까지의 부피를 의미한다. A_{HC} 는 열이 가해지는 cold layer로 정의된다.

앞의 (2)와 (5)의 가정에 의해 대기로부터의 열 침투에 의한 경계층 내에서의 온도상승은 (1)의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{q}{A} A_H = \pi D \int \rho C_p [T_{(y)} - T_i] u(y) dy \quad (1)$$

(1) 식에서 경계층 내의 특정위치의 온도에서 bulk 액체산소의 온도를 뺀 값인 θ 를 $\theta = T_{(y)} - T_i$ 로 정의하고 ρC_p 가 일정하다고 가정하면 (2) 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{q}{A} A_H = \pi D \rho C_p \int \theta(y) u(y) dy \quad (2)$$

이 때 "mixing cup temperature excess"를 (3) 식과 같이 정의하면

$$\bar{\theta} = \frac{\int \theta(y) u(y) dy}{\int u(y) dy} \quad (3)$$

(2) 식은 (4) 식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{q}{A} A_H = \pi D \rho C_p \bar{\theta} \int u(y) dy = \rho C_p \bar{\theta} \dot{V}_H \quad (4)$$

즉 경계층 유동을 통한 체적 유량은 (5) 식과 같이 표현된다.

$$\dot{V}_H = \frac{q}{A} \frac{A_H}{\rho C_p \bar{\theta}} \quad (5)$$

위식에서 q/A 는 외부로부터 전달되는 열량으로서 $(T_w - T_{sur})$ 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.

2.1.3 경계층 유동 및 열전달 계수의 설정

앞의 (5) 식에서 $\bar{\theta}$ 는 열 및 모멘텀 경계층에 의해 결정되는 값이며 본 논문에서는 (6)식과 (7)식과 같이 액체산소 탱크 내에서의 경계층 유동에 대한 측정치를 적용하였다[6].

$$u(y) = u_1 \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^4 \quad (6)$$

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

(6) 식과 (7)식에서

$$\frac{\bar{\theta}}{\theta_w} = \frac{u_1 \int \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^4 \left[1 - \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}\right] d\left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7}}{u_1 \int \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^4 d\left(\frac{y}{\delta}\right)} = \xi$$

이 되며 적분하면 의 $\xi = 0.25$ 가 된다.

$\frac{q}{A} = h\theta_w$ 이므로 (5)식은

$$\dot{V}_H = \frac{h A_H}{\rho C_p \xi} \quad (8)$$

식과 같이 표현된다. (8)식에서 열전달 계수 h

는 탱크 node의 온도(T_w)와 LOX의 포화온도 (T_{sat})를 비교하여 (9)식의 값을 기준으로 그림과 열전달 식을 적용한다.

$$\Delta T_{excess} = T_{wall} - T_{sat} \quad (9)$$

각 boiling 영역에 대한 이상유동 열전달 계수는 참조문헌을 활용하였다[4].

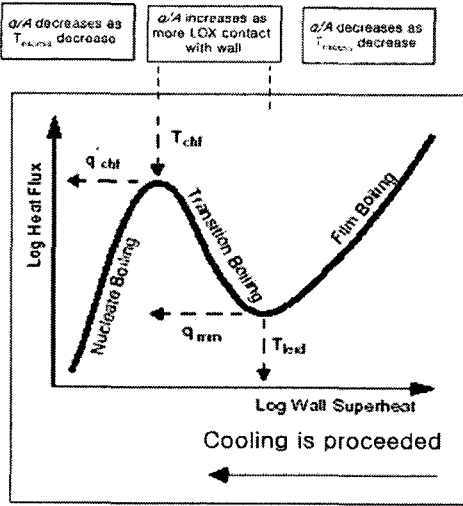


그림 3. 이상유동 열전달 계수 설정 scheme

2.2 계산과정

본 논문에 적용된 계산과정이 계산과정을 그림 (4)에 제시하였다. 먼저 충전된 액체산소를 10개의 sub-volume으로 나눈 후 각 sub-volume으로 유입되는 열량을 계산하였다. 투입된 열량을 바탕으로 벽면에서의 열전달에 의해 야기되는 자연대류 경계층 유동을 (10)식과 같이 계산하였다.

$$\dot{V}_{H,i} = \frac{h_i A_{H,i}}{\rho C_p \xi} \quad (10)$$

상부의 sub-volume에서는 하부의 sub-volume에서 유입된 경계층 유동과 합쳐져서 경계층 유동이 (11)식과 같이 성장하게 한다.

$$\dot{V}_{H,N-1} = \dot{V}_{H,N-2} + \frac{h_{N-1} A_{H,N-1}}{\rho C_p \xi} \quad (11)$$

경계층 유동은 최상부의 sub-volume으로 유입되어 최상부 층을 가열시킨 후 하부 층으로 침투하게 된다. 이 때 하부 층으로 침투하는 체적 유량은 경계층으로 유입된 유량과 동일하게 (12)식과 같이 설정하였다.

$$\dot{V}_{H,i} = -\frac{h_i A_{H,i}}{\rho C_p \xi} \quad (12)$$

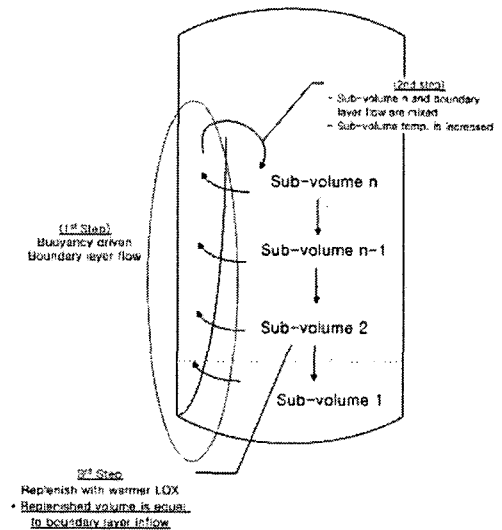


그림 4. 열적 성층화 계산과정

2.3 대상 사양

대상 추진기관 사양을 그림 5에 제시되어 있다. 액체산소 탱크는 직경 2.4 m 높이 4.7 m로 75% 충전 하는 것으로 설정하였다. 액체산소 탱크는 6mm의 우레탄폼으로 단열되어 있으며 대기로부터 대류열전달 및 복사 열전달이 이루어지게 하였다. 액체산소는 액체질소와의 열교환에 의해 과냉각된 상태로 78 K으로 탱크에 유입되는 것으로 설정하였다.

2.4 계산 결과

그림 6은 충전 시 열적 성층화 모델 적용에

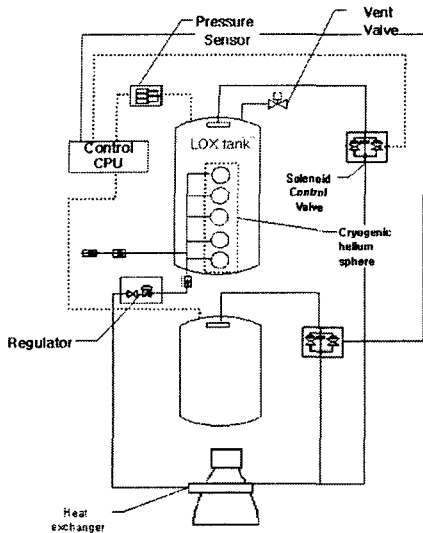


그림 5. 대상 추진기관 구성도
따른 최상부층의 시간에 따른 온도상승을 보인다. 열적 성층화 모델을 적용할 경우 최대 2 K 까지 온도가 높아지는 경향을 볼 수 있다.

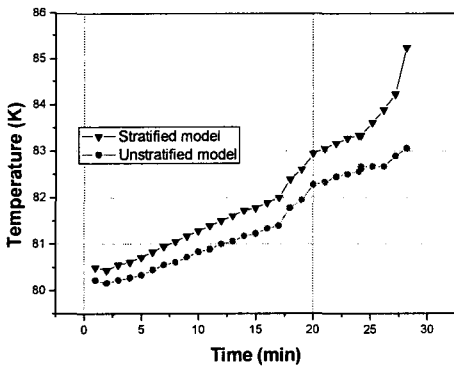


그림 6. 열적 성층화 모델 적용에 따른 최상부층의 시간에 따른 온도상승 (액체산소 충전 시)

그림 7은 대기 시(no vent hold) 열적 성층화 모델 적용에 따른 최상부층의 시간에 따른 온도상승을 보인다. 열적 성층화 모델을 적용할 경우 최대 2 K 까지 온도가 높아짐을 보인다.

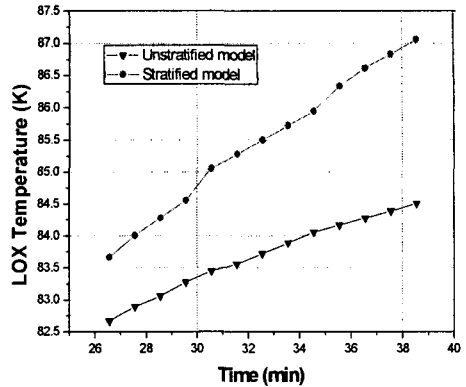


그림 7. 열적 성층화 모델 적용에 따른 최상부층의 시간에 따른 온도상승 (대기 시)

그림 8은 열적 성층화 모델 적용에 따른 최상부층의 시간에 따른 얼리지 압력상승을 보인다. 대기 후반에서는 열적 성층화 모델을 적용할 경우 얼리지 압력이 5기압까지 증가하는 것으로 예측되었다.

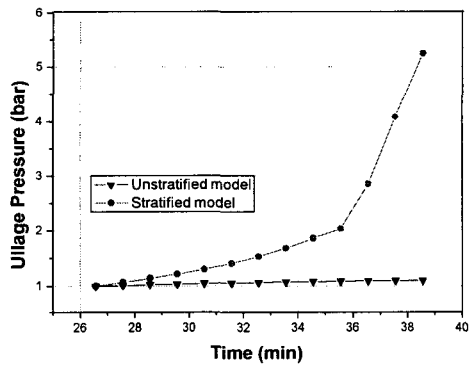


그림 8. 열적 성층화 모델 적용에 따른 최상부층의 시간에 따른 얼리지 압력 (대기 시)

그림 9는 충전 종료시점에서의 높이에 따른 온도분포를 보인다. 상부층이 하부층에 비해 약 3 K 정도 높게 형성됨을 볼 수 있다.

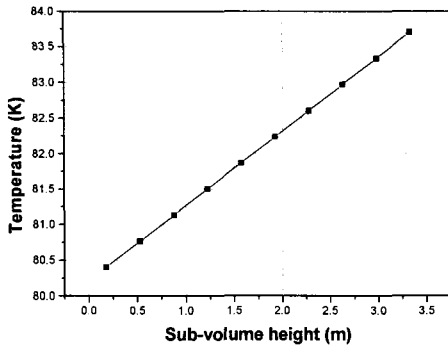


그림 9. 충전 종료시점에서의 높이에 따른 온도분포

그림 10은 대기(no vent hold) 종료시점에서의 높이에 따른 온도분포를 보인다. 상부층이 하부층에 비해 약 4 K 정도 높게 형성됨을 볼 수 있다.

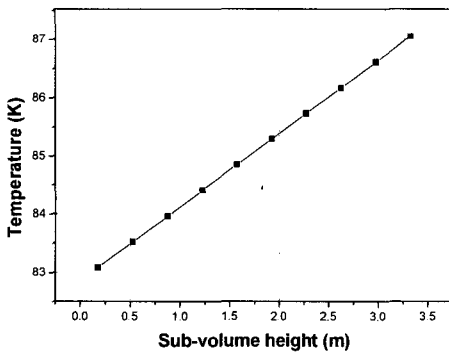


그림 10. 대기 종료시점에서의 높이에 따른 온도분포

3. 결 론

극저온 액체산소 탱크 내에서의 열적 성층화 해

석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 자연대류 경계층 유동에 의해 열적 성층화 해석을 수행할 경우 각 층이 균일하게 온도상승이 있다고 가정할 경우에 대하여 충전시에는 약 2K, 대기시에는 약 3 K의 온도상승이 있는 것으로 예측되었다.

둘째 상부층의 온도상승은 얼리지 압력을 증대시키며 대기 시에 이러한 압력상승을 저감시킬 수 있는 기구가 필요하다.

셋째, 열적 성층화 모델을 적용할 경우 하부와 상부층은 충전 시 약 3 K, 대기 시 약 4K의 온도 구배가 있는 것으로 예측되었다.

참 고 문 헌

1. *Rocket Propellant and Pressurization System*, Prentice-Hall, 1971
2. M. E, Nein et. al., *Experimental and analytical studies of cryogenic propellant tank pressure requirements*, NASA TN D-3177, 1966
3. V.V. Sychev et. al. *Thermodynamics of properties of Oxygen*, Hemisphere Publishing Corp. 1987
4. 이상용외, *이상유동 열전달*, 대영사, 1993,
5. Klaus et. al. *Cryogenic Process Engineering*, 1993
6. Williams H. Roudebush, *An analysis of the problem of tank pressurization during outflow*, NASA TN D-2585
7. John C. aydelotte et. al. *Venting of hydrogen tankage* NASA TN D-5263