

극저온 저장용기의 내부압력 거동에 대한 비정상해석

강권호 · 김길정 · 박영무*

한국원자력연구소 원자력환경관리센터, *이주대학교 기계공학과

Transient Analysis of Pressure Behavior of Cryogenics in Closed Vessel

Kweon Ho Kang, Kil Jeong Kim and Young Moo Park*

Korea Atomic Energy Research Institute, Nuclear Environmental Management Center

*Department of Mechanical Engineering, Ajou University

요 약

극저온 물질의 저장용기가 외부로부터 일정한 열유속을 받을 때 저장용기내의 압력상승을 해석하였다. 저장용기는 원통형 축대칭이고 윗벽과 아래벽은 단열되었으며 열유속은 옆벽에서 받는다. 유한차분법을 이용하여 저장용기내의 자연대류현상을 해석하였으며, 대상물질로는 산소, 수소 및 질소를 대상으로 하였다. 액체는 비압축성 유체, 기체는 virial 상태방정식을 만족하는 것으로 가정하였다. 기체의 2차 virial 계수는 Lennard-Jones 모형으로부터 구했다. 저장용기내의 압력상승에 미치는 주요한 인자는 외부 열유속과 저장용기벽의 열용량 그리고 기체의 초기 부피비였으며, 이들중 가장 중요한 변수는 외부 열유속이었다. 산소에 대해 기체를 이상기체를 가정했을 때와 virial 상태방정식을 만족하는 기체로 가정했을 때의 압력차이를 비교했다.

Abstract—Self-pressurization of cylindrical container of cryogen is numerically analyzed. The container is axi-symmetric and heated from side wall with constant heat flux. Natural convection by external heat flux is studied numerically using finite difference method. Oxygen, nitrogen and hydrogen are working fluids in this paper. Liquid is considered incompressible fluid and vapor is assumed to behave as gas meeting with virial equation of gas. The Second virial coefficients of gas are obtained from Lennard-Jones model. The important variables which have effects on self-pressurization are external heat flux, heat capacity of wall and initial ullage in container. The most important variable of them is external heat flux. The pressure rise calculated from the virial gas model is slightly different from that calculated using Ideal gas model for oxygen.

1. 서 론

산업체와 연구소 또는 병원 등에서 극저온 상태를 이용한 연구 및 극저온 물질의 사용이 증가하고 있다. 극저온 물질은 쉽게 휘발되는 (증기압이 낮은) 물질의 특성상 장시간 저장하는데 몇가지 문제가 발생한다. 즉 외부로부터 열을 받으면 극저온 물질은 다른 물질에 비해 쉽게 상변화를 일으키므로 저장 용기내의 압력이 높아지며, 높은 압력에서 안전한 저장을 위하여 저장용기의 구조적인 면을 보강해야 한다. 이때 외부 열유속에 따른 용기내의 압력변화에 대한 예측은 매우 중요하다. 외부

에서 열을 받은 저장용기의 압력변화는 액체, 증기, 그리고 저장 용기벽면 사이에 상호 작용하는 열 또는 물질전달 때문에 일어난다. 또한 2가지 이상의 혼합물질을 저장할 때에는 경계면의 온도 뿐만 아니라 각성분의 액체 및 증기의 농도역시 용기내부의 압력상승에 영향을 미친다. 밀폐용기내에서 자연 대류현상에 관한 적지 않은 연구가 수행되었다. Bejan과 Imberger²⁾는 서로다른 온도의 수직벽 사이에서 일어나는 대류유동을 실험적으로 연구하였다. Bejan and Tien³⁾는 양끝의 온도가 서로 다른 수평 Cavity내의 층류 자연대류현상을 연구하였으며, Gill⁴⁾은 사각 Cavity내에서 일어나는 경계층 영역내

의 대류 유체 거동을 연구하였다. Catton⁹⁾ 등은 밀폐공간내의 자연대류에 관한 해석적 연구를 하였고 Davis¹⁰⁾는 수치적으로 사각 Cavity내의 층류 자연대류에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Mohamad와 Viskanta⁷⁾는 Cavity내에서 낮은 Prandtl수의 유체에 대한 비정상 자연대류를 연구하였으며 Patterson과 Imberger⁸⁾는 사각 Cavity내의 비정상 자연대류에 관하여 연구를 수행하였다. Hellims과 Churchill¹¹⁾ 등은 밀폐용기내에서 비정상 상태의 자연대류를 수치적으로 연구하였다. Thomas와 Morse¹²⁾ 그리고 Knuth¹³⁾는 급격히 가압되는 단일성분 기-액 시스템의 상변화를 연구하였고 Yang 등^{12,14)}은 급격히 가압된 단일성분과 2성분 기-액 시스템에서 상변화 문제를 풀었다. 이들은 액체의 경계면을 x축의 원점으로 하고 반경방향의 변화는 무시한 1차원 모델을 사용하였다. O'Loughlin과 Glenn¹⁵⁾는 온도변화에 의한 물성 변화가 Yang 등의 결과에 미치는 영향을 연구하였다. Epstein 등¹⁶⁾은 유한차분법을 이용하여 가압과정을 해석하였다. 이 모델에서 반경방향의 온도 변화는 무시하고 축방향 변화만을 고려했다. 벽에서 유체로의 열전달은 유체와 벽사이의 유효 열전달 계수를 이용하여 계산된다. 스스로 가압되는 연료 저장조에서 액체 성층화에 관한 연구가 여러가지 해석적 모델링 이용하여 수행되었지만, 액체와 증기상 사이에서 동시에 일어나는 상호작용은 고려하지 않는다. 증기공간에서 압력과 온도 변화에 대한 대부분의 연구들은 실험적인 것이었으며 저장조 내부에서 압력증가에 영향을 미치는 인자들을 일부 확인하는데 기여했다. Huntley¹⁷⁾의 연구는 액체가 성층화됨으로써 평균 또는 혼합평균 액체 온도를 사용하여 계산된 것보다 더 높은 비율로 압력이 증가한다는 것을 보여준다. Liebenberg and Edescuty¹⁸⁾도 비슷한 결과를 보였다. Merte, Clark and Barakat¹⁹⁾ 등은 외부로부터 일정한 열유속을 받을 때 원통형 저장용기의 압력증가와 성층화에 대한 문제를 유한요소법으로 해석하였는데 액체는 비압축성 유체와 증기는 이상기체로 가정하고 산소를 대상으로 외부로부터 일정한 열유속을 받을 때 저장용기내의 압력증가를 계산했다.

본연구에서는 축대칭 원통형 저장용기내에서 단일성분의 기체와 액체 상호간의 열 및 물질전달에 의한 용기내의 압력상승을 해석하는 것이다. 원통형 밀폐용기가 외부로부터 일정한 열유속을 받을 때 저장용기내에서 일어나는 현상을 액체를 비압축성 유체, 기체를 Virial상태 방정식을 만족하는 기체로 가정하고 용기내의 유동은 층류로 가정하여 해석하였다. 저장용기내의 물질로는 산소, 수소 그리고 질소를 대상으로 했으며, 이들 물질의 상변화량, 온도 그리고 압력변동 등을 수치적으로 계산하였다. 이 계산을 위하여 Merte 등¹⁹⁾이 산소

를 대상으로 계산한 program을 수정하였으며 산소에 대해서는 증기를 이상기체로 가정하고 해석한 결과와 Virial 상태방정식을 만족하는 실제기체로 가정하고 해석한 결과를 비교하였다.

2. 이론 해석

해석을 위한 모델로서, Fig. 1과 같이 벽두께 δ , 높이 b , 직경 $2a$ 인 축대칭 원통형 용기에 액체가 부분적으로 채워져 있다. 액체의 초기 높이는 X_0 , 증기의 초기 높이는 $b-X_0$ 이다. 좌표계의 원점은 용기바닥의 중심이며 축방향을 양의 x 방향으로 삼는다. 임의시간 t 에서 액체-증기의 경계면 위치는 $X=X(t)$ 이다. 기체와 액체 두상은 초기에 균일압력 P_0 와 포화온도 T_0 의 평형상태에 있다. 이 초기상태로부터 밀폐용기의 측면은 임의의 열유속 $q_w(x, t)$ 를 받는다. 저장용기의 윗면은 단열되었다고 가정하고 원통형 밀폐용기 끝벽의 열용량은 무시한다.

2-1. 지배 방정식

축대칭 원통형 밀폐용기의 압력변화와 유동을 해석하기 위하여 용기벽과 액체 영역 및 증기영역에서 일어나는 현상에 대한 지배방정식을 구한다.

2-2. 용기벽

용기의 반경방향 온도변화를 무시하고 축방향만 고려하면 저장조 벽에서 시간에 따른 온도변화는 다음과 같다.

$$(\rho C_p \delta \frac{\partial T}{\partial t})_w = - (k \frac{\partial T}{\partial r})_r + (\delta k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2})_w + q_w(w, t) \quad (1)$$

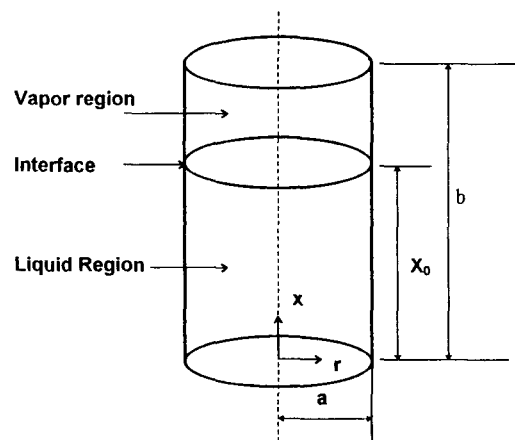


Fig. 1. Schematic diagram and coordinate of closed vessel.

여기서, 첨자 w와 f는 각각 벽과 유체를 나타낸다.

일반적으로 대류열전달의 열전달 계수 h를 결정하기 어렵기 때문에 벽에서 유체로의 열전달을 직접계산하여 과도과정동안 벽에서 액체로의 열전달율을 계산하고 이를 이용하여 열전달 계수값을 구하였다.

2-3. 액체영역

액체는 열전도 계수와 점도는 일정한 비 압축성 유체로 취급한다. 단 온도에 따른 유체의 밀도 변화는 Boussinesq 근사식으로 고려한다²⁰⁾.

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta(T_0 - T)] \tag{2}$$

여기서, $\beta = -(1/\rho)(\rho/T)$

• 축방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \tag{3}$$

• 반경 방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{v}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right) \tag{4}$$

• 연속 방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \tag{5}$$

• 에너지 방정식

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \tag{6}$$

• 초기조건

$$T(x, r, 0) = T_0 \tag{7}$$

$$u(x, r, 0) = 0 \tag{8}$$

$$v(x, r, 0) = 0 \tag{9}$$

• 경계조건

$$u(0, r, t) = 0 \tag{10}$$

$$u(X_{op}, r, t) = \frac{w_i}{\rho_1 \pi a^2} \tag{11}$$

$$u(x, a, t) = 0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial u(x, 0, t)}{\partial r} = 0 \tag{13}$$

$$v(x, a, t) = 0 \tag{14}$$

$$v(x, 0, t) = 0 \tag{15}$$

$$v(0, r, t) = 0 \tag{16}$$

$$\frac{\partial v(X, r, t)}{\partial x} = 0 \tag{17}$$

$$T(X, r, t) = T_s(t) \tag{18}$$

$$T(x, a, t) = T_w(x, t) \tag{19}$$

$$\frac{\partial T(0, r, t)}{\partial x} = 0 \tag{20}$$

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial r} = 0 \tag{21}$$

$T_s(t)$ 는 저장용기내의 포화온도이며 T_w 는 식 (4)의 벽 온도이다.

2-4. 증기영역

증기의 열전도 계수와 점도는 일정하다고 가정하며, 압축성 유체로 취급한다.

• 축방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} \right) = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \tag{22}$$

• 반경 방향 운동량 방정식

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{v}{r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right) + \frac{1}{3} \mu \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) \tag{23}$$

• 연속 방정식

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0 \tag{24}$$

• 에너지 방정식

$$\rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \rho \frac{D(P/\rho)}{Dt} = \frac{DP}{Dt} + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \tag{25}$$

• 상태방정식

$$P = z \rho RT$$

$$Z = \frac{Pv}{RT} = 1 + \frac{B(T)}{v} + \frac{C(T)}{v^2} + \frac{D(T)}{v^3} + \dots \tag{26}$$

여기서 z 는 압축성 계수이다.

• 초기조건

$$T(x, r, 0) = T_0 \tag{27}$$

$$\rho(x, r, 0) = \rho_0 \tag{28}$$

$$u(x, r, 0) = 0 \tag{29}$$

$$v(x, r, 0) = 0 \tag{30}$$

• 경계조건

$$u(b, r, t) = 0 \tag{31}$$

$$u(X_{top}, a, t) = u_{gi} \tag{32}$$

$$\frac{u(x, 0, t)}{r} = 0 \tag{33}$$

$$u(x, a, t) = 0 \tag{34}$$

$$v(b, r, t) = 0 \tag{35}$$

$$v(x, a, t) = 0 \tag{36}$$

$$v(x, 0, t) = 0 \tag{37}$$

$$\frac{\partial v(X, r, t)}{\partial x} = 0 \tag{38}$$

$$T(X, r, t) = T_s(t) \tag{39}$$

$$T(x, a, t) = T_w(x, t) \tag{40}$$

$$\frac{\partial T(x, 0, t)}{\partial r} = 0 \tag{41}$$

$$\frac{\partial v(b, r, t)}{\partial x} = 0 \tag{42}$$

2-5. 경계면

액체와 증기영역에서의 방정식들은 식 (18)과 (39)의 포화온도 T_s 와, 경계면에서 물질전달율과 관련이 있는 식 (32)의 u_{gi} 에 의해 연결된다.

액체-기체의 경계면에서 발생하는 증발이나 응축에 의한 물질 전달율은 경계면에서 각 상의 온도구배에 따른 열전달율의 상대적 크기에 따라 변한다.

경계면에서 에너지 보존 법칙을 적용하여 경계면의 위치와 상변화율을 계산한다.

$$h_{fg} w_i = \int_0^a [(k \frac{\partial T(X, r, t)}{\partial x})_l - (k \frac{\partial T(X, r, t)}{\partial x})_v] 2\pi r dr \tag{43}$$

w_i 는 경계면에서의 상 변화율이다. 식 (43)에 의해 w_i 는 응축이 일어날때 양의 값을 갖게 되며 경계면의 위치 변화율은 다음과 같다.

$$\rho_l \pi a^2 \frac{dX_i}{dt} = w_i \tag{44}$$

$$u_i = \frac{dX}{dt} = \frac{dX_i}{dt} \tag{45}$$

여기서, $\frac{dX_i}{dt}$ = 상변화에 의한 경계면의 변위율

식 (45)는 액체 표면이 평면을 유지한다는 가정으로부터 얻어진다. 이것은 표면장력과 벽근처에서 점성의 영향들을 무시한 근사적 해석이다. 이들의 영향은 중력이 매우 작고, 표면장력이 큰 경우 즉, Bond수($Bo = \Delta \rho g l^2 / \sigma$ = 중력/표면장력)가 작을 때에는 고려하여야 한다. 그렇지 않은 경우 즉, 중력이 표면장력에 비해 충분히 클 경우에는 무시할 수 있다.

경계면에서 증기 속도 u_{gi} 와 상변화에 의한 경계면의 변위율간에는 다음과 같은 관계가 성립한다. 즉,

$$u_{gi} = - \frac{\rho_l - \rho_{gs}}{\rho_{gs}} \frac{dX_i}{dt} \tag{46}$$

3. 계산 및 결과

3-1. 유한 차분 방정식의 안정성

유한 차분 방정식의 안정성은 시간 간격, 격자의 크기, 차분의 형태를 정하는데 중요한 기준이 된다. 안정성을 위한 필요한 조건은 다음과 같다²⁰⁾.

Prandtl 수가 1보다 적을 때

$$\Delta \tau \leq \frac{1}{\left(\frac{2a^2}{(\Delta x)^2} + \frac{2a^2}{(\Delta r)^2} + \frac{|U_{ij}|}{\Delta x} + \frac{|V_{ij}|}{\Delta r} \right)} \tag{47}$$

Prandtl 수가 1보다 클 때

$$\Delta \tau \leq \frac{1}{\left(\frac{2a^2 Pr}{(\Delta x)^2} + \frac{2a^2}{(\Delta r)^2} + \frac{|U_{ij}|}{\Delta x} + \frac{|V_{ij}|}{\Delta r} \right)} \tag{48}$$

3-2. 계산 과정

1) 원하는 정확도에 따라 격자의 크기를 정하고 액체의 증발이나 응축에 의해 경계면의 위치가 변할 때는 교점이 항상 액체 증기 경계면에 있게 하기 위하여 액체와 증기영역에서 격자의 크기를 변화시킨다.

2) 식 (47), (48)에 따라 초기의 시간증분을 선택한다.

3) 온도 분포는 한단계 앞선 시간의 속도, 온도, 압력을 사용하여 계산된다.

4) 3)에서 계산된 온도를 이용하여 와도를 계산한다.

5) 위에서 계산된 온도와 와도 그리고 한단계 앞에서 계산된 속도를 이용하여 유량함수를 계산한다.

6) 유량함수를 이용하여 속도를 계산한다.

7) 온도 구배를 이용하여 경계면에서의 상변화율을 계산한다.

8) 위에서 계산한 값들을 이용하여 압력증가를 구한다.
 9) 앞의 과정들이 원하는 시간이나 정상상태에 도달할 때까지 반복한다.
 수치계산에 적용한 격자는 Fig. 2와 같으며 시스템의 사양은 다음과 같다.

- 1) 격자: 21(반경방향), 31(축방향 교점)
- 2) 탱크의 직경: 1 m
- 3) 탱크의 높이: 5 m
- 4) 탱크의 벽: Aluminum-두께 1 cm
- 5) 유체: 액체와 기체의 산소, 수소, 질소

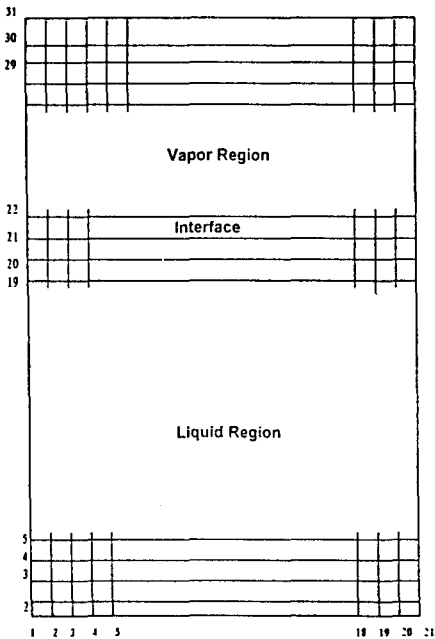


Fig. 2. Nodal Point of System.

Table 1. Thermodynamic Properties of Cryogen.

Properties	Oxygen	Nitrogen	Hydrogen
Sat. Temp (°K)	90.18	77.35	20.28
α (m ² /sec)	7.76×10^{-8}	9.90×10^{-8}	2.64×10^{-7}
α_v (m ² /sec)	1.99×10^{-6}	2.53×10^{-6}	6.76×10^{-6}
ν (m ² /sec)	1.51×10^{-7}	1.52×10^{-7}	3.77×10^{-7}
ν_v (m ² /sec)	1.96×10^{-6}	1.97×10^{-6}	4.88×10^{-6}
K_1 (W/m ² K)	4.03×10^{-2}	1.12×10^{-1}	1.19×10^1
K_g (W/m ² K)	2.42×10^{-3}	7.82×10^{-3}	3.00×10^2
C_p (J/kg°K)	1.674×10^3	1.96×10^3	9.65×10^3
C_{pv} (J/kg°K)	9.04×10^2	1.06×10^3	5.21×10^3
C_v (J/kg°K)	6.41×10^2	7.50×10^2	3.69×10^3
R (J/kg°K)	2.60×10^2	2.97×10^2	4.12×10^3
β (°K)	2.72×10^{-3}	5.50×10^{-3}	5.50×10^{-3}
ρ_1 (kg/m ³)	1.14×10^3	8.07×10^2	7.06×10^1

초기압력: 103.4 KN/m²

초기속도: 0

초기온도: 산소 90.18 K, 수소 28.3 K,
 질소 77.35 K

계산에 필요한 유체의 열역학적 물성은 Table 1과 같다.

3-3. 계산결과

극저온저장용기 내의 압력상승은 외부로부터의 열유속, 저장용기의 열용량, 극저온물질의 열역학적 성질 및 양에 주로 영향을 받는다. 저장용기의 온도상승은 저장용기의 열용량에 좌우되므로 저장용기의 열용량을 용기벽의 최대온도변화로 나타낼 수가 있다. Fig. 3은 저장용기내에 산소가 33% 채워져 있을 때 외부에서 가해지는 열유속이 높을 때(250 W/m²)와 상대적으로 외부열유속이 낮을 때(10 W/m²) 용기벽의 최대온도변화에 따른 압력변화를 나타낸다. 또한 Fig. 4는 열유속이 높을 때와 낮을 때 용기벽의 최대온도변화에 따른 산소의 증발량을 나타낸다. 외부열유속이 높을 때와 낮을 때 모두 압력상승에 미치는 용기의 열용량의 영향은 그리크지 않게 나타났으나 증발량에는 크게 나타나는 것으로 나타났다. Fig. 4에서 약 30분 후 증발량이 일정해 진 것은 액체가 증기로 증발되는 양과 저장용기내의 압력 상승으로 인해 증발된 증기의 응축이 평형을 이룬 것으로 생각된다. Fig. 3에서는 액체와 증기가 평형을 이룬 후에도 압력은 계속 증가하는 것으로 나타났다. 저장용기의 열용량을 나타내는 용기벽의 최대온도변화에 따른 압력변화와 증발량은 반비례하는 것으로 나타났다. 이

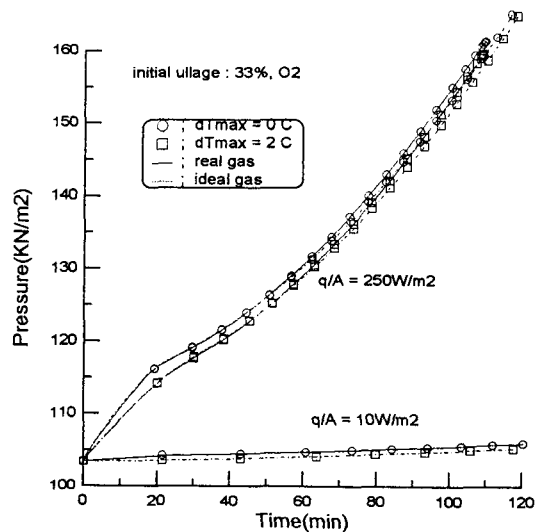


Fig. 3. Effect of heat capacity of wall on pressure rise.

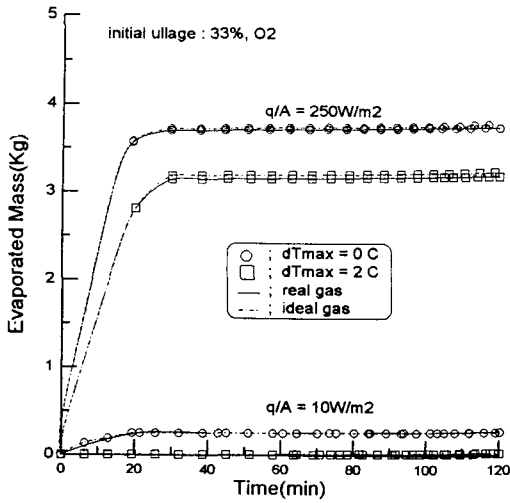


Fig. 4. Effect of heat capacity of wall on evaporated mass.

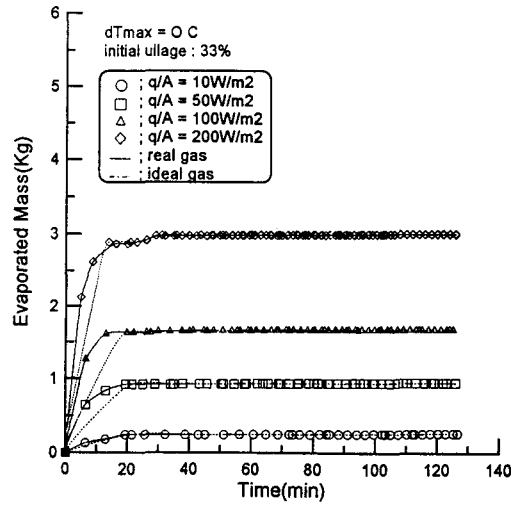


Fig. 6. Effect of heat flux on evaporated mass.

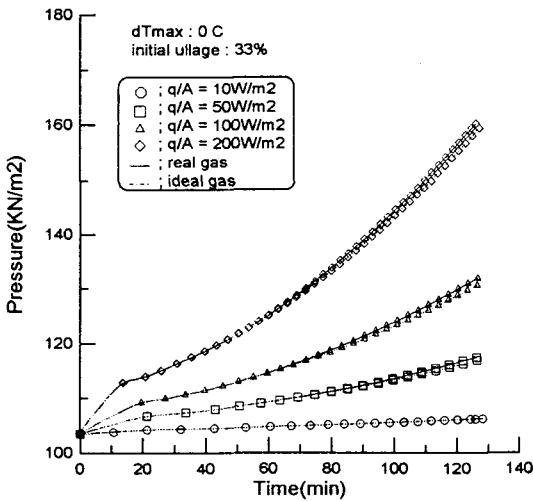


Fig. 5. Effect of heat flux on pressure rise.

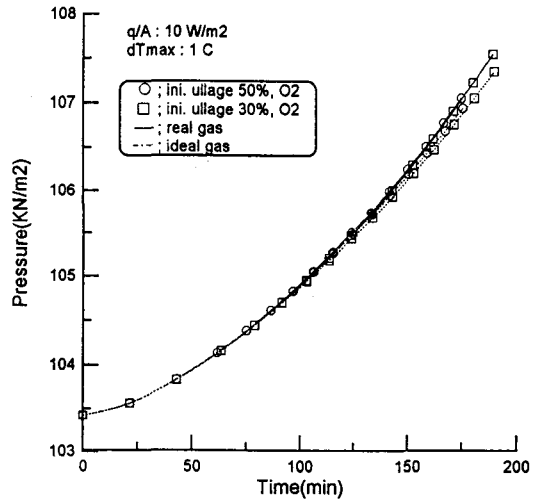


Fig. 7. Effect of initial ullage on pressure rise.

는 열역학 제 1법칙으로 간단히 예상되는 현상이다. 즉 압력상승과 증발에 필요한 에너지가 저장용기의 온도상승에 소모되었기 때문으로 생각된다. 산소를 이상기체로 가정했을 때와 실제기체로 가정했을 때 저장용기내의 압력이 낮고 증발량이 적은 초기에는 차이가 거의 없었으나 압력이 높아지고 증발량이 늘어남에 따라 차이를 보이는 것은 기체의 운동이론에 의해 압력이 높을 때 및 공간내의 기체양이 많아짐에 따라 기체간의 상호 운동에 따른 충돌 등으로 이상기체의 가정으로부터 벗어나기 때문으로 생각된다. 또한 이 때문에 이상기체로 가정했을 때보다 실제기체로 가정했을 때의 압력증가가

크게 나타났다. Fig. 5는 벽의 열용량을 무시할 때 외부의 열유속이 압력 상승에 미치는 영향을 나타낸다. 외부의 열유속이 적을 때 시간에 따른 압력의 변화는 약간 증가하는 것으로 나타나지만 외부의 열유속이 클 때는 용기내부의 압력상승이 급격히 일어나는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 벽의 열용량을 무시할 때 증발된 총 질량에 대한 외부 열유속의 영향을 나타낸다. 외부 열유속이 클수록 증발량은 증가하나 어느정도 시간이 지난 후에는 (약 30분) 증발된 질량이 일정하다는 것을 알 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8에서는 열유속이 낮을 때 (10 W/m²)일 때 압력상승과 증발된 총질량에 미치는 초기 증기공간의 영향을 나타낸다. 초기 증기공간의 변화에 따라 압력상

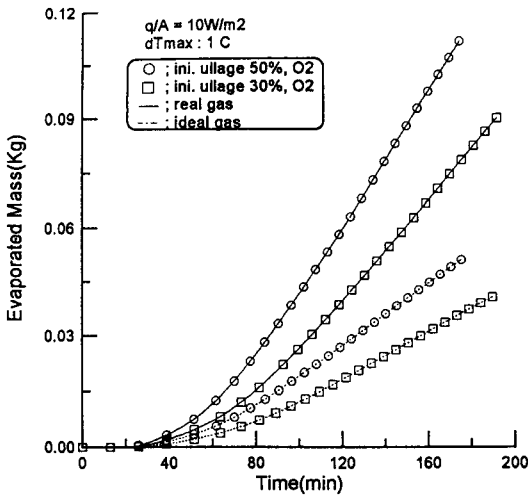


Fig. 8. Effect of ini. ullage on evaporated mass.

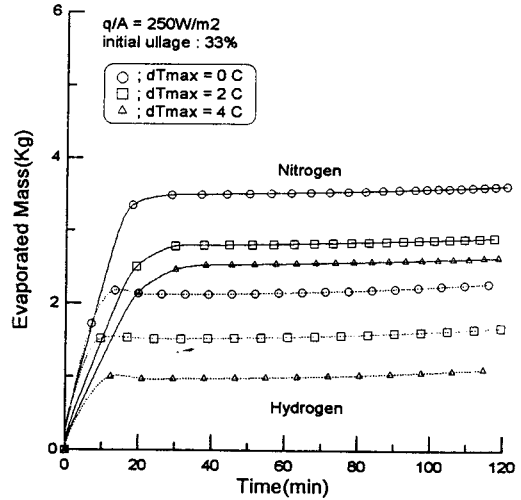


Fig. 10. Evaporated Mass under high heat flux.

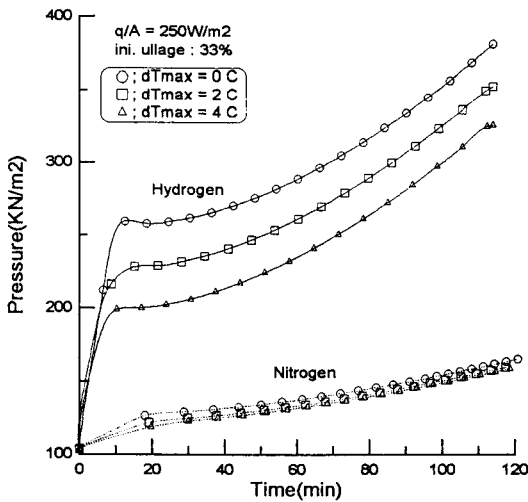


Fig. 9. Pressure rise under high heat flux.

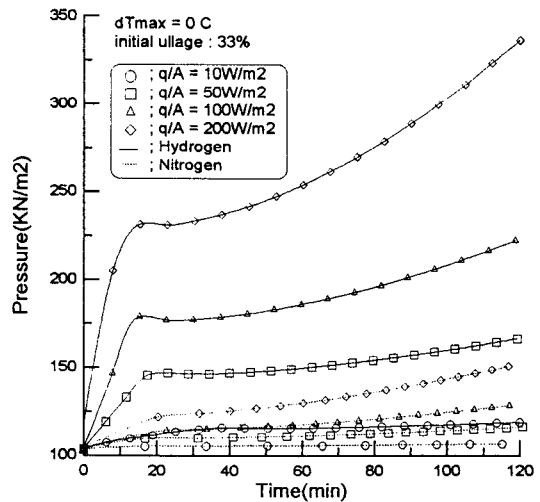


Fig. 11. Effect of heat flux on pressure rise.

승은 큰 차이가 없지만 증발된 총질량은 많은 차이가 있는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 외부의 열유속에서 높을 때 수소와 질소에 대해서 용기벽의 열용량에 따른 용기 내부의 압력상승을 나타내었다. Fig. 10은 용기벽의 열용량에 따른 증발량의 변화를 나타내었다. 수소가 질소보다 압력상승은 더크게 나타났으나 증발량은 질소가 수소보다 더 크게 나타났다. Fig. 11과 12는 외부열유속에 따른 압력변화와 증발량을 나타내었다. 여기서도 수소가 질소보다 압력상승은 더크게 나타났으나 증발량은 질소가 수소보다 더 크게 나타났다. 이상의 결과로부터 극저온 저장용기의 내부압력변화는 외부의 열유속에 의

해 가장 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 축대칭 원통형 밀폐용기에 저장되어 있는 극저온 물질의 기체와 액체 상호간 열 및 물질 전달현상에 의한 압력 변화를 해석하였다. 외부에서 열유속을 받음으로써 발생하는 자연대류현상을 유한차분법을 이용하여 수치적으로 해석하였고 극저온 물질은 산소, 질소, 수소이며 액체는 비압축성 유체, 가스는 Virial 상태식을 만족하는 기체로 보았다. 기체의 2차 Virial

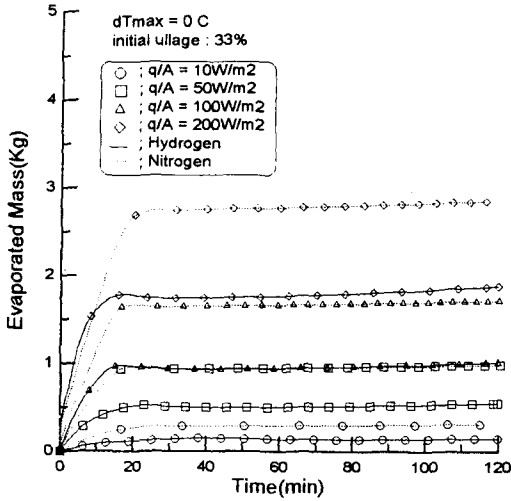


Fig. 12. Effect of heat flux on evaporated mass.

계수는 Lennard-Jones^{6,12)} 모형²⁵⁾으로부터 계산하였다. 밀폐용기가 받는 외부열유속, 밀폐용기의 열용량 등을 변수로 시간에 따른 압력 및 증발량 등을 계산했다. 외부 열유속이 높을 때는 밀폐용기벽의 열용량에 따라 압력 변화는 그리 크지않으나 외부 열유속이 적을 때는 용기벽의 열용량을 무시했을 때와 벽의 열용량이 있을 때는 압력 변화에 차이가 있는 것으로 나타났다. 물론 용기벽의 열용량이 적을 수록 압력변화는 큰 것으로 나타났다. 시간에 따라 압력은 계속 증가하나 일정시간 후에는 액체의 증발이 크게 일어나지 않는다. 이는 내부의 압력이 증가하면서 증발되는양과 응축되는 양이 평형을 이루기 때문이다. 증기를 이상기체로 가정했을 때와 실제기체로 가정했을 때 저장용기내의 압력이 낮고 증발량이 적은 초기에는 차이가 거의 없었으나 압력이 높아지고 증발량이 늘어남에 따라 약간의 차이를 보였다.

사용기호

- A : Area, m^2
- a : Radius of tank, m
- b : Height of tank, m
- C_p, C_v : 정압 및 정적비열, KJ/Kg-K
- E : Internal Energy, KJ
- h : 열전달 계수, $\text{KJ/m}^2\text{-sec-K}$
- h_{fg} : 잠열, KJ/Kg
- k : 열전도도, $\text{KJ/m}^2\text{ sec K}$
- q : 외부 열유속, $\text{KJ/m}^2\text{ sec K}$
- R : 기체 상수, J/mol K

- t : 시간, sec
- T : 온도, K
- ΔT_w : $T_{sat} - T_w$, K
- ΔT_{max} : ΔT_w 의 최대치, K
- u : 축방향 속도, m/sec
- v : 반경방향 속도, m/sec
- w : 질량유동율, Kg/sec
- X_0 : 저장조에서 경계면의 위치, m
- Δx : 축방향 격자 크기, m
- Δr : 반경방향 격자 크기, m
- Z : 압축성 계수
- ρ : 밀도, kg/m^3
- α : 열확산계수, m^2/sec
- Pr : Prandtl 수

참고문헌

1. Michael McClintock: "Cryogenics", Reinhold Publishing Corporation, 1-4 (1964).
2. Adrian Bejan and Jorg Imberger: J. Fluid Mech., **109**, 283-299 (1981).
3. Adrian Bejan and C. L. Tien: J. Heat Transfer, **100**, 641-647 (1978).
4. A.E. Gill: J. Fluid Mech., **26**, 515-536 (1966).
5. Catton: 6th International Heat Transfer Conference, Toronto, **6**, 13-43 (1979).
6. G. De. Vahl Davis: Int. J. Heat and Mass Transfer, **11**, 1675-1693 (1968).
7. A.A. Mohamad, and R. Viskanta: Int. J. Numerical Method in Fluid, **13**, 61-81 (1991).
8. John Patterson and Jorg Imberger: J. Fluid Mech., **100**, 65-86 (1980).
9. J.D. Hellums, and S.W. Churchill: AIChE J. **8**, 690-692 (1962).
10. P.D. Thomas, and F.H. Morse: Advances in Cryogenic Engineering, **8**.
11. E.L. Knuth: Journal of the American Rocket Society, **32**.
12. W.J. Yang: AIChE Paper No. 63-A48.
13. W.J. Yang and J.A. Clark: J. Heat Transfer, Trans. ASME, J. Eng. for Ind., **87**.
14. W.J. Yang, J.A. Clark and P.S. Larsen, Trans. ASME, J. Eng. for Ind., **87**.
15. J.R. O'Loughlin and H. Glenn: Proceedings of the Conference on Propellant Tank Pressurization and Stratification, NASA MSFC, Jan.
16. M. Epstein, H.K. Georgius, and R.E. Anderson: International Advances in Cryogenic Engineering, **10**.

17. S.C. Huntley: Advances in Crogenic Engineering, **10**.
George C. Marshall Space Flight Center, Contract No. NAS-8-20228, Huntsville Alabama.
18. D.H. Leibenberg and F.J. Edescuty: International Advances in Crogenic Engineering, **10**.
19. National Aeronautics and Space Administration
20. Wilkes. James Oscroft: The University of Michigan Ph. D Engineering, Chemical, 60-64 (1963).