

## Moss형 LNG수송선 탱크내 Vapor space의 온도 분포에 관한 연구

윤 상 국  
한국해양대학교  
냉동공조공학과

백 영 순  
한국가스공사  
연구개발원

### A Simulation for the Temperature Profile of the Vapor Space in the Moss-type LNG Carrier Tanks

Yun, Sangkook \*

Pack, Youngsoon \* \*

\* Department of Refrigeration & Air Conditioning Engineering, Korea Maritime University.

\* \* R&D Center, Korea Gas Corporation, Ansan, Korea

#### Abstract

During LNG unloading process from carrier's tanks, the BOG (Boil-off-gas) returns from the terminal to ship tanks to prevent the tank's pressure drop. After finishing the unloading procedure, the total amount of LNG imported is evaluated by measuring the unloaded amount of LNG, BOG returned, and remaining LNG in carrier's tanks.

In estimating the BOG quantity of vapor space in tank, it would be valuable to have more accurate framework based on the simulation method for the temperature profile, rather than temperature average method three points. This paper presents more adequate evaluation method, which is the simulation for the temperatures of vapor space actually measured in the Moss-type LNG carrier's tank.

#### 1. 서 론

LNG는  $-160^{\circ}\text{C}$ 의 정도의 메탄을 주성분으로 하는 다성분 탄화수소류 저온

액체로, LNG수송선에 의하여 운반되는 동안 LNG는 대기압하 포화액 상태에서부터 외부 침입 열에 의하여 가스 상태인 BOG(Boil-off-gas)로 일일 약 0.1% 정도가 기화된다.

본 연구는 LNG 선박이 인수기지에 임항하여 LNG가 하역될 때 선박의 LNG 탱크내 압력 강하를 방지하기 위하여 인수기지로 부터 BOG가 반송되는데, 이 반송 BOG량 산정의 정확도를 기하기 위한 적정 해석 모델을 제시함에 있다. 현재 대부분의 LNG 선박 1척 당 LNG 수송량은 약 125,000m<sup>3</sup> 정도이며 인수기지 하역 LNG량 즉 도입 LNG량은 하역 LNG 총량에서 반송한 BOG량을 감하여 산정하고 있다. 이중 반송 BOG량 측정은 직경 약 36m의 구형 탱크 내부의 3개 지점의 온도에 의존하고 있어 오차를 유발할 수 있는 요인을 내포하고 있으며 이에 따른 외화낭비도 우려되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이의 정확도를 기하기 위하여 현재 인도네시아로 부터 LNG를 운반하고 있는 Moss-type Golar Spirit호와 Hoegh Gandria호 탱크 내부의 BOG온도를 실측하여 외부 열 유입에 따른 내부 Vapor 온도장 분포 모델링을 수행하였으며 이에 따른 BOG량을 산정, 비교검토하였다.

본 연구의 결과는 LNG 저장탱크의 층분리(Stratification), 열유입율, 탱크운전 압력에의 영향 등의 운전기술과 2000년대까지 약 10척에 해당하는 국적선과 Membrane-type LNG선박에 적용하므로써 LNG도입물량 산정 정확도에 기여하게 될 것으로 기대된다.

## 2. Moss형 LNG수송선의 구조.

Moss형 LNG 수송선은 노르웨이의 Rosenberg사가 개발한 독립 구형 탱크 방식으로서 그림1과 같이 선저 및 선측면은 2중방벽 구조로 되어 있고 외벽에 단열이 시공된 직경 36m의 탱크가 Skirt에 끼워져 지지되고 있다. 1차방벽인 LNG 저장탱크 재료로는 약 150mm의 Al-5083-0이 주로 사용되고 있다. LNG 선에서는 탱크내의 저온이 선체로 전달되는 것을 막고 또 외부의 고온이 탱크 내부로 유입되는 것을 막기 위한 효과적인 단열구조로서 250mm두께의 Polystyrene foam으로 시공되어 있다. 탱크 하중은 skirt에 의하여 지지되며 skirt의 온도분포를 보면 상단은 탱크 적도부와 동일한 온도상태이며 하부로 내려가면 온도는 높게되고 skirt 최하단 선체에 용접된 부위는 선체와 동일한 온도로서 상부는 단열시공되어 있으며 극저온에 의한 탱크 전체의 수축이 skirt의 신축에 의하여 흡수되어진다. 탱크 내부는 LNG의 송출을 위한 LNG Submerged pump, cooldown용 Spray pump등이 주입되어 있다.

표 1은 Golar Spirit호와 Hoegh Gandria호 탱크의 대표적 사양과 LNG 하역 후 BOG의 온도 측정을 위한 온도 감지기가 설치된 위치를 보여준다.

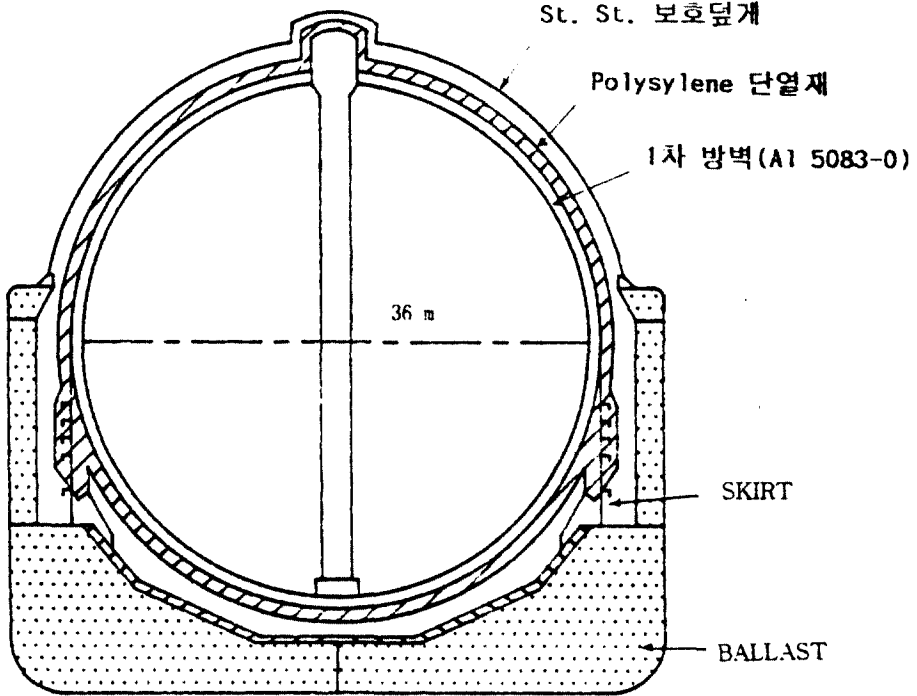


그림 1. Moss형 LNG 수송선의 구조

| 수송선명          | 탱크 체적(m <sup>3</sup> ) | 직경(m) | 감지기 위치(m)                 |
|---------------|------------------------|-------|---------------------------|
| Golar Spirit  | 23,345                 | 35.5  | 0.14, 17.74, 32.84, 34.28 |
| Hoegh Gandria | 25,172.4               | 36.3  | 0.11, 17.26, 29.03, 34.67 |

표1. 각 수송선 탱크의 대표적 사양

### 3. 현행 BOG산정식

현행 LNG 매매 계약서상의 BOG발열량 산정식은 식 (1)과 같고 거래 단위는 열량 단위인 Btu/N m<sup>3</sup>이다.

$$Q_1 = V_1 \left( \frac{P_1}{760} \right) \left[ \frac{288.8}{(273 + T_1)} \right] \times 35668 \text{ Btu/m}^3 \quad (1)$$

여기서 T<sub>1</sub>은 LNG 하역후 수송선 탱크 중심축을 따라 약 0%, 50%, 85%,

100% 높이에 설치된 온도계에 나타난 온도중 액체에 잠긴 온도 센서값을 제외한 기체만의 온도를 산술평균하여 계산한 것이다.

$$T_1 = \frac{T_a + T_b + T_c}{3} \quad (2)$$

또한 35,668 Btu/N m<sup>3</sup>은 60°F, 760mmHg에서 천연가스 1 N m<sup>3</sup>의 발열량을 나타낸다.

#### 4. LNG 하역 절차

BOG 온도 측정을 수행하는 시기는 하역 펌핑이 끝나고 2시간 동안의 Purging 작업이 완료된 후로서 LNG 하역 절차는 다음과 같다.

- (1) LNG하역 전 1시간동안 하역 Arm의 Flanging작업실시.
- (2) 선박과 인수기지 LNG Line을 약 40분간 Purging실시.
- (3) LNG송출 Line의 Cooldown 1시간 실시.
- (4) LNG Pumping leak test 실시 후 Pumping시작 및 1시간동안 Pumping Rate 증가.
- (5) 최대 Pump rate(약 1200 m<sup>3</sup>/hr)로 약 10시간하역.
- (6) LNG 잔류량 감소에 따른 1시간 Rate down pumping .
- (7) Ship & shore Line 을 2시간동안 purging
- (8) Purging후 BOG의 온도측정 등 Final gauging실시.
- (9) Unflanging으로 하역 종료.

#### 5. 탱크내 BOG 온도분포 산정 모델.

LNG하역 후 Ship & shore line purging 이 약 2시간 동안 이루어지므로 탱크 내 Vapor와 하부층 잔여 LNG는 탱크내 각 지점에서 균일한 유동 patten을 보이는 Steady state로 간주된다.

Vapour Space의 유동현상은 충분한 단열에 의한 적은 양의 열유입(일 BOG 생성을 0.15%)으로 저층류의 자연대류가 일어나며 크게 저온 기화영역(I), 안정 대류영역(II), 불안정 혼합영역(III), 고온 안정영역(IV)의 4개 유동 영역으로 나뉘고 온도측정 결과 그림 2와 같은 온도구배를 갖는 것으로 예측되어 진다.

실측된 Vapor 공간내 온도분포의 Simulation을 위하여 Liquid 상층 Layer에서 Vapor공간의 y축 방향으로 Energy balance를 취하였으며 밀도 계산은 다성

본 탄화수소계에 정밀도가 매우 높은 COSTALD식을 사용하였다. LNG 상부로부터 BOG 공간을 N개의 Layer로 나누어 Energy balance를 취하면 시간  $dt$ 에 있어

Layer 1

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t \partial r} [D_1(j) L_1 C_1(j) (T_1 - T_0)] \\ = \frac{d}{dt} [M_{v_1} (T_{v_1} - T_{v_0})] + \frac{d}{dt} [m_v \lambda] + \frac{\partial^2}{\partial t \partial r} hA (T_1 - T_w) \end{aligned} \quad (3)$$

Layer  $i = 2 \sim N-1$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t \partial r} [D_i(j) L_i C_i(j) (T_i - T_0)] \\ = \frac{d}{dt} [M_{v_i} (T_{v_i} - T_{v_{i-1}})] + \frac{d}{dt} [m_v \lambda] + \frac{\partial^2}{\partial t \partial r} hA (T_i - T_w) \end{aligned} \quad (4)$$

Layer  $i = N$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial t \partial r} [D_N(j) L_N C_N(j) (T_N - T_0)] \\ = \frac{d}{dt} [M_{v_N} (T_{v_N} - T_{v_{N-1}})] + \frac{d}{dt} [m_v \lambda] + \frac{\partial^2}{\partial t \partial r} h_w A_w (T_N - T_w) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $dh$ 은 반경에 따른 미분항이며  $\Delta M_{v_i}$ 은 시간에 따른 layer  $i$ 의 Mass 출입량임.

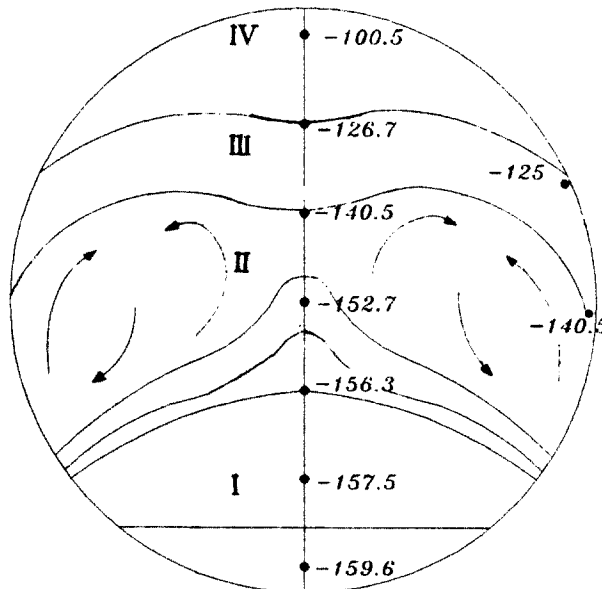


그림 2. 탱크내 Vapor space의 온도구배

## 6. 측정결과 및 결론

Vapor Space의 온도 구배 Simulation을 위하여 Moss형 수송선 탱크내부의 BOG온도를 실측한 결과를 그림 3, 4에 도시하였으며, 표 2는 현행 계약방식에 의한 BOG량과 본 연구의 모델식에 의하여 산정한 BOG량의 차이를 나타내었다. 수송선에 따라 BOG량이 상이한 것은 Hoegh Gandria호에 비해 Golar Spirit호의 온도감지기가 높게 설치되어 있어서 평균온도를 산출할 때 BOG량이 적게 산정 되는 것으로 Golar spirit호의 상부에서 2번째 온도감지기의 위치가 적절하지 않음을 알 수 있다.

| LNG선박명       | Simulation<br>BOG량(MMBTU) | 현계약 방식<br>BOG량 | 차이점    |
|--------------|---------------------------|----------------|--------|
| Hoegh Gandia | 190,134                   | 175,677        | 14,457 |
| Golar Spirit | 184,277                   | 156,007        | 25,270 |

표 2. Simulation 방식과 계약방식의 BOG량 차이

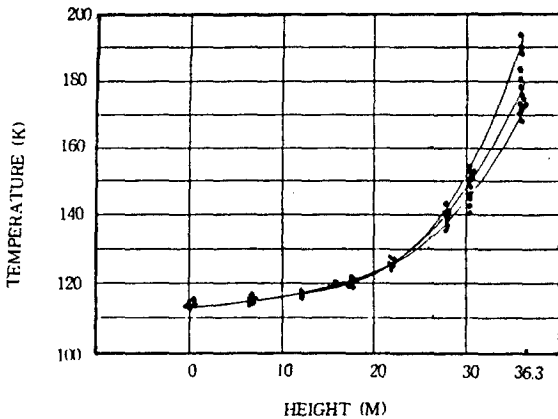


그림 3. HOEGH GANDRIA호의 탱크 높이에 따른 온도구배

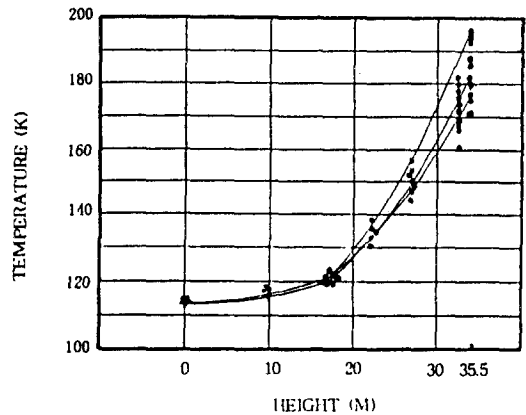


그림 4. GOLAR SPIRIT호의 탱크 높이에 따른 온도구배

그림 5은 LNG 하역 후 BOG 온도측정 시기에 따른 Vapor공간내 온도 변화를 측정된 것이며, 하역 후 100분이 경과한 다음 Vapor space의 온도구배는 균일한 값을 나타내며, 표 3은 한 개의 탱크에 대한 측정시기 별 BOG 산정량의 차이이다.

| 하역후 온도 측정(분) | BOG(MMBtu) |
|--------------|------------|
| 0            | 9,892      |
| 30           | 9,804      |
| 100          | 9,611      |

표 3. 하역후 온도측정 시기별 BOG량

| 입항시기 | BOG량(Btu) |
|------|-----------|
| 7~8월 | 2147.5    |
| 1~2월 | 2171.5    |

표 4. 입항계절에 따른 BOG량 비교

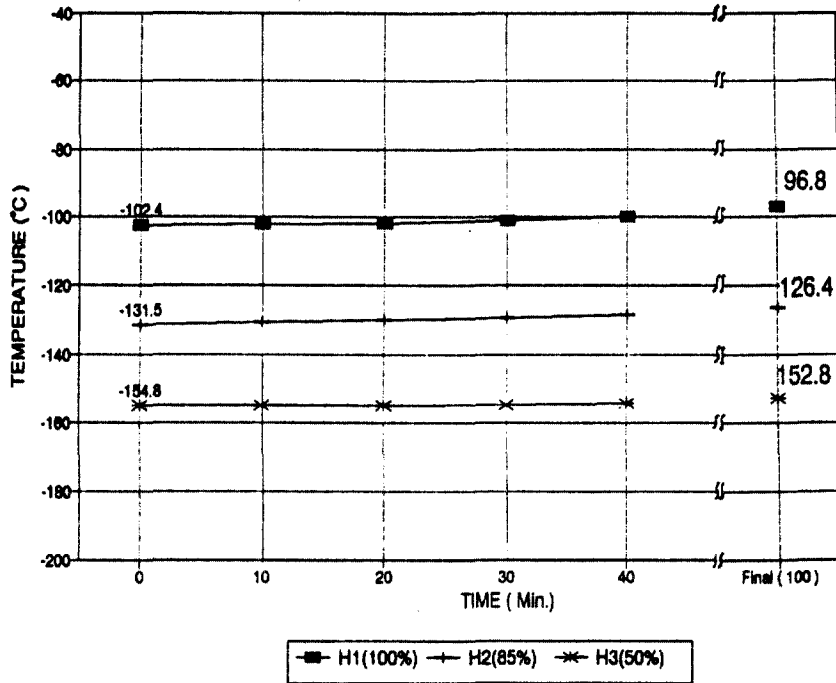


그림 5. 하역 종료 후 측정시간 간격별 BOG 온도변화

그림 6, 7은 각기 Golar Spirit호와 Hoegh Gandria호의 입항 계절에 따른 탱크내 4개 지점의 BOG온도차이를 도식화한 것으로 탱크내 level 1, 2에 위치한 상부 BOG가 6~9월에 높은 온도를 갖는다. 또한 7~8월 입항과 1~2월 입항시 온도 차이는 약 10℃정도이나 BOG량의 차이는 표4에서 볼 수 있는 바와 같이 약 1%정도로 큰 영향인자가 되지 않는 것을 알 수 있다. 이는 탱크 상단 부위는 BOG밀도가 작기 때문이며 적도부근과 탱크하반구 온도가 BOG산정에 중요한 인자가 된다.

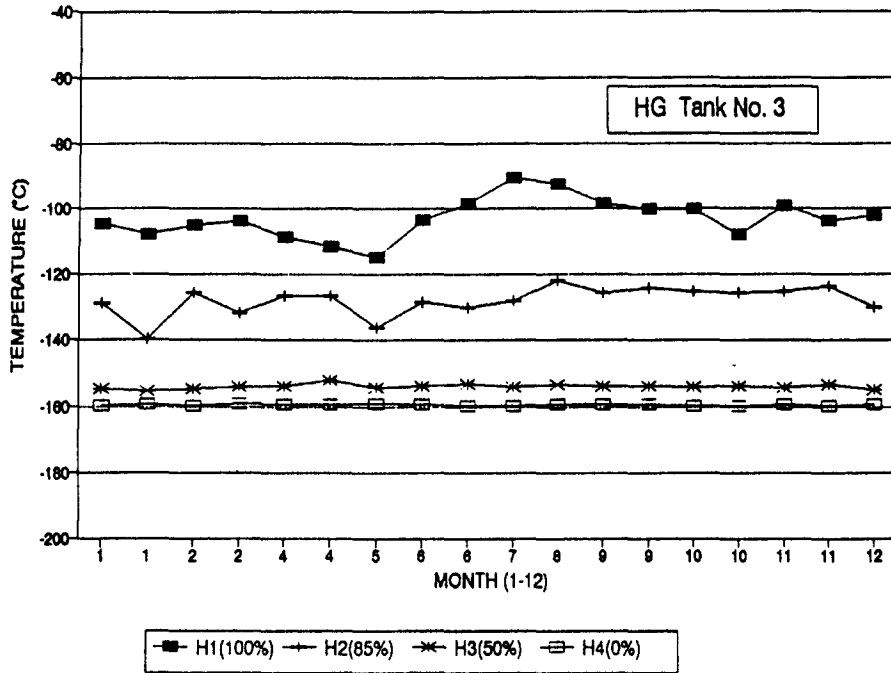


그림 6. HOEGH GANDRIA호 입항 월별 BOG내 온도차이

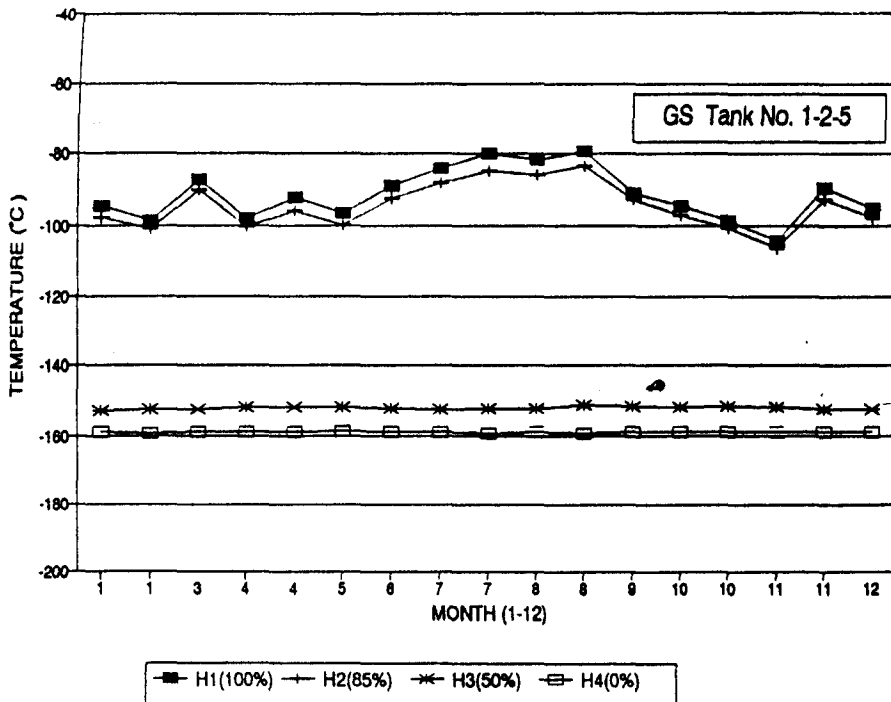


그림 7. GOLAR SPIRIT호 입항 월별 BOG내 온도차이



결론적으로 현행 온도감지기에 의한 BOG산정방법을 본 연구의 실측온도에 대한 Simulation 산정량보다 8~15%오차를 유발하고 있는 바, 향후 국내 국적 선 LNG선박 건조시 온도 감지기 위치 및 갯수는 탱크 적도 부근부터 하단까지 일정한 간격으로 10~15개 설치가 바람직할 것이다. 또한 Moss형 구형탱크와 Membrane형 탱크내 온도구배 Simulation model의 정확도를 향상하기 위한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 사료된다.

### Nomenclature

|          |   |  |
|----------|---|--|
| $A_i$    | : | LNG Layer의 단면적, $m^2$                    |
| $A_w$    | : | 탱크의 외 표면적, $m^2$                         |
| $C_i(j)$ | : | Vapor i layer 내 j 종의 몰비열, J/kgmole k     |
| $D_i(j)$ | : | Vapor i layer 내 j 종의 몰농도, kgmole / $m^3$ |
| $h_w$    | : | 내벽 열전달 계수, W/ $m^2K$                     |
| $L_i$    | : | Layer의 높이, m                             |
| $M_{vi}$ | : | Layer i와 layer i-1의 물질량, kgmole          |
| $m_v$    | : | LNG 표면에서 기화율, Kgmole/s                   |
| $P_1$    | : | 탱크내부의 압력, K                              |
| $T_a$    | : | 탱크내 50%높이에서의 온도, K                       |
| $T_b$    | : | 탱크내 85%높이에서의 온도, K                       |
| $T_c$    | : | 탱크내 100%높이에서의 온도, K                      |
| $T_o$    | : | Reference temperature of LNG, K          |
| $T_v$    | : | Vaper space의 온도, K                       |
| $T_w$    | : | 탱크내벽의 온도, K                              |
| $V_1$    | : | 탱크내부의 체적, $m^3$                          |

### 참 고 문 헌

1. R.G Scurlock and M.S. Islam., *Qualitative Details of the Complex Flow in Cryogenic Vapor Columns*, Cryogenics,(1977),655
2. H.Bcuchberg and Edwards., *Natural Convection in Enclosed*

- Spaces - A Review of Application to Solar Energy Collection*,  
Transactions of the ASEM., (1976), 182
3. A.V.Asafov., *Calculation of Unsteady Heat Transfer in a Layer of a Thermally Insulated Cryogenic Reservoir with Forced Cooling of a Large Screen*, Plenum Press (1990)
  4. McGuire and White., *Liquefied Gas Handling Principles on Ships and in Terminals*, Marine Publishing (1980)
  5. P.Lynam and R.G.Scurlock., *Reduction of the Heat Flux into Liquid Helium in Wide Necked Metal Dewars*, *Cryogenics*,(1969), 242
  6. M.H Suh and K.J.Lee., *A Numerical Simulation of Natural Convection in a Room Heated from Below*, *J. KICE.*, 16(1978), 201
  7. M.H Suh., *Multicellura Convection in a Fluid - Saturated Porous Medium*, *J. KICE.*, 20(1982), 377
  8. Yogesh Jaluria., *Natural Convection*, Vol.5, HMT (1980)
  9. G.H Thomsin., R.W Hankinson., *AICHE J.*, 28(1982), 671
  10. G.Soave., *Chem Eng. Sci.*, 27(1972), 1197