

---

 論 文
 

---

大韓造船學會論文集  
 제 30 卷 第 4 號 1993 年 11 月  
 Transactions of the Society of  
 Naval Architects of Korea  
 Vol. 30, No.4, November 1993

## 독립구형 LNG 탱크의 구조안전성 평가(제 3 보)

### — 탱크시스템의 저온 안전성 검토 —

남용윤\*, 노인식\*, 이호섭\*\*

## Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (3rd report)

— Safety assessment of tank system against cryogenic temperature —

by

Yong Yun Nam\* , In Sik Nho\* and Ho Sup Lee\*\*

### 요 약

본고에서는 type B 독립구형 MRV 방식 LNG 탱크의 극저온에 대한 구조안전성 평가기법을 연구 하였다. 여기에는 다음과 같은 3가지의 검토과정이 포함 된다.

- 1) 탱크판을 관통하는 균열의 진전과정에서 누설되는 LNG의 양을 추정하고, 이에 따른 선체구조의 안전성을 보장하기 위하여 2차방벽의 설치범위를 결정한다.
- 2) 구형 LNG 탱크시스템에 대한 정상상태 열전달해석 모형을 이용하여 화물창 및 스커트에 대한 온도분포해석을 수행하였다.
- 3) (2)항의 해석결과 가장 급격한 온도변화를 보이는 탱크와 스커트시스템의 연결부에 대한 열응력의 분포를 해석하였다.

### Abstract

This paper describes structural safety assessment techniques against cryogenic temperature to design MRV type B LNG tank system. The following items are dealt with in detail.

- (1) Leakage estimation of LNG through the propagating cracks at tank plate was performed and design of the range of catch basin(2ndary barrier) was followed to ensure the safety of ship structures against leaked LNG.

---

발 표 : 1993년도 대한조선학회 춘계연구발표회('93. 4. 17)

접수일자 : 1993년 5월 17일, 재접수일자 : 1993년 7월 15일

\* 정회원, 한국기계연구원

\*\* 정회원, 삼성중공업, 조선해양사업본부

- (2) Temperature distribution analysis for cargo hold and skirt system was carried out using the steady state heat transfer analysis model for spherical LNG tank system.
- (3) Thermal stress distribution of skirt and tank system was calculated, where very stiff thermal variation was shown through item(2) analysis.

## 1. 서 론

LNG는 폭발적 가연성을 지닌 기체를 극저온으로 액화처리한 화물이기 때문에 만일 LNG 운반선에서 화물탱크가 파손된다면 엄청난 대형재난으로 이어질 가능성이 높다. 따라서 LNG 탱크구조의 설계 및 안전성 검증에는 엄밀한 강도평가와 절차가 요구된다. 이미 발표된 제 1, 2보 [7, 8]에서는 LNG 탱크의 구조설계에서 가장 핵심적인 내용인 구조 강도 평가 과정에 대해서 다루었으며 본 연구에서는 LNG 탱크의 구조 해석 과정을 바탕으로하여 LNG의 누설량 추정, 온도분포해석, 열응력해석 등 저온에 대한 LNG 탱크 시스템의 안전성 평가방법을 검토하였다.

LNG 누설량을 추정함으로써 전보[8]에서 설명한 LBF(Leak Before Failure)개념[8]에 따라 누설검지까지의 소요시간을 예측함으로써 피로균열의 진전에 대한 탱크의 구조안전성을 보증할 수 있으며, 계산된 잔류 누설량에 따라 부분이차방벽(catch basin)의 설치범위를 결정할 수 있다.

구형 LNG 탱크의 특성을 고려한 정상상태 열전달 모델을 개발하여 화물창 내부 및 선체구조에 대한 온도분포해석을 수행하였다. 온도분포 해석에 의하여 열침입량을 보다 자세하게 구할 수 있고 이에 따라 탱크단열재 두께가 최종 결정된다. 또한 각종 설계규칙에 주어지는 구조재료의 사용온도 제한과 비교검토함으로써 선체구조재의 저온에 대한 안전성을 확인할 수 있다.

급격한 온도구배에 의하여 탱크시스템 및 스커트 구조에 작용하는 응력을 정확히 평가하기 위하여 온도를 하중으로 한 정적구조해석 즉 열응력해석을 수행하였다. 선체중앙부 화물창의 전체적인 거동을 먼저 해석한 다음 고응력부인 스커트를 다시 상세히 모델링하여 해석하였다.

## 2. LNG 누설량 추정

### 2.1 개요

일반적으로 구조물의 안전성을 보증하기 위하여

수명동안 구조물이 파손되지 말아야 한다는 조건 즉 “not to fail”개념에 따라 구조설계가 이루어진다. 그러나 원자로, 항공기 등 절대적인 안전성이 요구되는 구조물에서는 만일 구조물에 부분적인 손상이 발생하더라도 전체적인 구조물의 안전성 관점에서는 문제점이 없어야 한다는 설계개념 즉 “fail safe”개념이 적용되고 있다.

LNG 탱크와 같은 유체저장 용기에서는 “fail safe” 개념의 응용된 형태인 LBF(Leak Before Failure)개념을 이용한다. 이것은 용기에 취성파괴가 발생되기 전에 내용물의 누설이 있다는 점에 착안한 것이다. 즉 누설유체의 존재를 모니터링으로써 용기의 손상여부를 검지하고 그로부터 적절한 조치를 취할 수 있을 때까지는 취성파괴가 일어나지 않아야 한다는 관점에서 구조설계가 이루어진다.

이러한 LBF개념의 설계를 위해서는 손상으로부터 누설검지까지 걸리는 시간을 예측할 수 있어야 한다. 또한 type B LNG 탱크에서는 적절한 조치를 취할 때까지 누설된 LNG를 안전하게 보관할 수 있는 catch basin의 설치가 요구된다. 따라서 화물창 내의 가스농도 계산 및 catch basin의 설치범위를 결정하기 위해서는 누설량 추정과정이 필요하다[5].

### 2.2 누설유량 추정 모델

#### (1) 관통균열 형상모델

실제의 관통균열을 그 형상대로 다루기가 어렵기 때문에 균열형상을 수식적인 취급이 가능한 모양으로 단순화하여 취급한다. Fig.2.1과 같이 관통균열 단면형상을 장축이 2a, 단축이 2b인 타원으로 모델링한다[6]. Fig.2.1에서 t는 탱크벽의 두께이고, x는 관통측으로부터 임의 단면까지의 거리이며 dx는 두께방향의 미소구간이다. 관통측으로부터 발생측으로의 균열단면의 형상변화는 다음식으로 가정한다.

$$a = a_1 \sqrt{a^*X + 1} \quad (2.1.a)$$

$$b = b_1 \sqrt{b^*X + 1} \quad (2.1.b)$$

여기서

$$a^* = \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 - 1$$

$$b^* = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^2 - 1$$

$$X = \frac{x}{t}$$

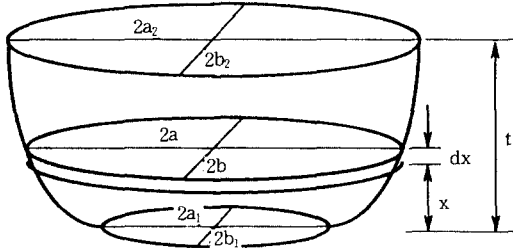


Fig. 2.1 The modelling of through crack configuration

(2) 유량추정식[6]

균열개구를 실질적인 LNG의 누설형태는 다음의 2가지로 나눌 수 있다.

- 개구크기가 그다지 크지않을 때의 층류 흐름 (laminar flow)
- 개구크기가 클 때인 난류흐름(turbulent flow)

여기서 층류와 난류의 구분은 다음과 같이 계산되는 Reynolds 수로서 개략적으로 판단한다.

$$Re = \frac{Q}{va_1} \quad (2.2)$$

여기서, Q는 유량이며  $Re \geq 10^4$ 이면 난류,  $Re < 10^4$  이면 층류로 간주한다.

층류인 경우의 유량 계산

깊이 방향으로 일정한 타원 단면의 개구로부터 점성유체 흐름의 유량은 다음식으로 주어진다.

$$Q = \frac{\pi}{4} \frac{\Delta P}{\mu t} \cdot \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2} \quad (2.3)$$

여기서  $\Delta P$ 는 개구양면의 압력차이고,  $\mu$ 는 유체의

점성계수이다. 균열에서는  $a \gg b$ 이므로 (2.3)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = \frac{\pi \Delta P}{4 \mu t} a b^3 \quad (2.4)$$

(2.4)식을 미소 구간 dx에 대하여 적용하면 유체가 미소구간 dx를 통과하면서 일어나는 압력저하를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta P_x = \frac{4 Q \mu}{\pi a b^3} dx \quad (2.5)$$

유체가 균열개구를 통과하면서 일어나는 전 압력저하는 (2.5)식을 적분함으로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \int_0^t \frac{4 Q \mu}{\pi a b^3} dx \\ &= \frac{4 Q \mu t}{\pi a_1 b_1^3} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{(a^* X + 1)(b^* X + 1)}^3} \\ &= \frac{4 Q \mu t}{\pi a_1 b_1^3} \frac{1}{k_1} \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서  $k_1$ 은 적분항을 적분한 것으로 균열형상변화에 따른 계수로 볼 수 있다[8]. 단위 시간당 유량은 (2.6)식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$Q = \frac{\pi a_1 b_1^3}{4 \mu t} \Delta p k_1 \quad (2.7)$$

난류인 경우의 유량계산

난류인 경우, 균열개구 단면의 유속분포가 균일하다고 가정하면 균열 양면에서의 압력차는 유체가 개구를 통과할 때 받는 마찰력과 같다.

$$A \Delta p = C_F \frac{1}{2} \rho S V^2 dx \quad (2.8)$$

여기서 A는 균열개구면적,  $C_F$ 는 표면마찰계수, S는 균열 표면적 V는 유속이다. 층류의 경우와 마찬가지로 (2.8)식을 미소구간 dx에 대하여 적용하여 적분하면 전 압력차  $\Delta P$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P = \int_0^t \frac{C_F \frac{1}{2} \rho S V^2}{A} dx \quad (2.9)$$

균열개구의 형상을 타원으로 가정하였으므로 유속 V와 개구단면적 A는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = \frac{Q}{\pi ab} = \frac{Q}{\pi a_1 b_1 \sqrt{a^*X+1} (b^*X+1)}$$

$$A = \pi ab = \pi \sqrt{a^*X+1} (b^*X+1)$$

이때 균열의 표면적 S는

$$S = 4a \, dx = 4a_1 t \sqrt{a^*X+1} dx$$

이므로 (2.9)식은 최종적으로 다음과 같이 정리된다.

$$\Delta P = \frac{\frac{1}{2} C_F \rho A a_1 t \left( \frac{Q}{\pi a_1 b_1} \right)^2}{\pi a_1 b_1} \int_0^1 \frac{dx}{(a^*X+1)(b^*X+1)^3}$$

$$= \frac{2\rho C_F t}{\pi^3 a_1^2 b_1^3} \frac{Q^2}{k_T} \quad (2.10)$$

여기서  $k_T$ 는 층류일 경우와 마찬가지로 의미를 갖는다. 유량은 (2.10)식으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$Q = \sqrt{\frac{\pi^3 a_1^2 b_1^3 \Delta P}{2 C_F \rho t}} K_T \quad (2.11)$$

(3) 균열개구량 계산

인장응력과 굽힘응력을 받을 때 균열개구량 b는 다음과 같이 주어진다[8].

$$b_1 = \frac{4\sigma_y (a_1 + a_2)}{\pi E} \cosh^{-1} \sec \left[ \frac{\pi(\sigma_m - 0.36\sigma_b)}{\sigma_y} \right]$$

$$b_2 = \frac{8\sigma_y a_2}{\pi E} \cosh^{-1} \sec \left[ \frac{\pi(\sigma_m + 0.37\sigma_b)}{2\sigma_y} \right] \quad (2.12)$$

여기서,  $a_1, a_2$ 는 각각 성장하고 있는 관통균열 양측의 길이를 의미하며 균열전파해석 과정에서 미리 계산된다[7].

(4) 변동응력하에서의 누설유량 추정

균열개구부로부터 유량은 개구크기에 민감하다.

개구의 크기는 균열길이와 응력의 함수로서 (2.12)식과 같이 주어진다. 이때 응력이 음(압축응력)이거나 0일 때는 균열이 닫혀 누설이 일어나지 않는다고 가정하면 응력의 변화와 균열개구량, 누설유량과 관계를 Fig.2.2과 같이 개략적으로 나타낼 수 있다. 누설유량은 실제 누설이 일어나는 기간  $T_1 - T_2$  사이를 적분하면 한 응력주기당의 누설량을 구할 수 있다. 층류와 난류의 구분은 한 응력주기에서 유속이 최대일 때를 기준으로 하여 판단한다.

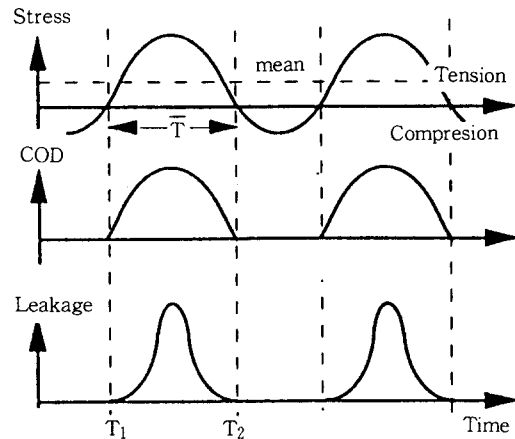


Fig. 2.2 Duty cycle of leakage

(5) 응력 및 압력 스펙트럼

작용응력의 스펙트럼은 제2보[8]의 관통균열 전파 해석에서 사용한 것과 동일하다. 균열위치에서 탱크 내외의 압력차이는 탱크설계압력  $P_o, P_s$  및 변동압력  $P_d$ 의 합으로 나타난다. 여기서  $P_o, P_s$ 는 탱크설계조건 및 탱크 크기로부터 바로 주어지는 값이지만 변동압력  $P_d$ 는 파랑중의 선체운동으로부터 기인되는 압력이다. 따라서 변동응력과 같이 장기분포해석을 거쳐 스펙트럼을 구하였다[7]. 두 스펙트럼을 동시에 적용하기 때문에 상대적인 위상이 문제시 되나 본 연구에서는 안전측의 설계를 위해서 응력과 압력이 같은 위상으로 작용한다고 가정하였다.

3. 온도분포해석

3.1 개요

온도분포해석은 LNG 선의 설계과정에서 탱크의

열침입량 평가, 열응력해석, 구조부재의 온도 등 LNG의 극저온에 대한 안전성평가를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 수행된다.

LNG선이 만재상태로 정상 항해할 때 열전달은 선체주위 환경으로부터 열이 선체구조와 탱크단열재를 거쳐 탱크내의 LNG로 침입하고 LNG의 기화열에 의하여 침입한 열을 흡수함으로써 거의 정상상태(steady state)가 유지된다. 따라서 본 해석에서는 정상상태의 열전달만을 대상으로 하였으며 탱크손상시와 비손상시 두경우를 고려하였다. 비손상조건은 열침입량 계산과 이와 관련된 단열재 두께 결정 및 열응력해석에 이용되고, 손상조건은 선체구조부재의 이상 저온에 대한 안전성 평가에 이용된다.

본 연구에서는 온도분포 해석모델을 구성하고 이에 대한 전산프로그램을 작성하였으며 prototype LNG선의 온도분포 해석에 적용함으로써 그 결과를 설계에 반영하는 과정을 보였다.

### 3.2 해석모델

#### (1) 기본가정

열전달 기구는 복사, 전도, 대류의 세가지 모드로 일어나고 있으나, LNG선에서는 대류와 전도에 의한 열전달이 지배적이므로 본 모델에서는 복사에 의한 열전달의 영향은 무시한다.

먼저 고체 경계면에서 대류에 의한 정상상태의 열전달은 다음식으로 표시된다.

$$q = hA(T - T_{\infty}) \quad (3.1)$$

여기서  $T_{\infty}$ 는 고체경계 주변온도,  $T$ 는 고체경계온도  $h$ 는 대류열전달계수이다. 해석의 정도(accuracy)는 대류열전달계수를 얼마나 정확히 산정하느냐에 따라 달라질 수 있다. 현재 실험 및 이론적인 해석과정을 통하여 대류열전달계수를 구하는 식들이 제안되어 있으나 대부분의 실제 문제에 있어 20% 정도의 오차 이내로 추정하기는 매우 어렵다[1]. 따라서 경계형상이 복잡한 경우 혹은 보다 정확한 값이 요구될 때는 실험에 의존해야 한다. 또한 LNG선과 같은 복잡대형구조물의 대류열전달문제에 있어서는 열전달에 영향을 미치는 선체동요, 보강재, 화물취급장치, 방열재의 경년변화 등의 영향을 정확히 파악하기가 사실상 거의 불가능하기 때문에 정교한 해석모델을 적용하는 것은 계산정도상 별의미가 없으며 따라서 간단한 모델의 사용이 권장되고 있다. 본 해석모델에

서도 다음과 같은 가정에 근거하여 선체단면구조를 크게 몇개의 구획으로 나눈 간단한 모델을 사용한다.

- 정상상태의 열전달
- 열전달은 경계면에 수직방향으로만 일어난다.
- 각 구획의 온도는 균일하다.
- 복사 효과는 무시한다.

#### (2) 열전달 평형방정식

본 열전달 모델은 각 구획을 기본단위로 한다. 각각의 구획은 유한개의 경계면으로 구성되어 있으며 정상상태 열전달을 가정하면 각각의 구획에서 열의 입출입은 평형을 이룬다. 이 상태를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\sum_{j=1}^n A_j K_{Ej} (T_j - T_i) = 0 \quad (3.2)$$

여기서  $A_j$ 는  $i$ 구획의  $j$ 경계면의 면적이고,  $T_i$ 는 구획의 온도,  $K_{Ej}$ 는  $j$ 경계면의 등가열전달계수로서 다음과 같이 계산된다.

$$K_{Ej} = \frac{1}{\frac{t_j}{K_j} + \frac{1}{h_{jR}} + \frac{1}{h_{jL}}} \quad (3.3)$$

여기서  $t_j$ 와  $K_j$ 는 경계면  $j$ 의 두께와 열전도계수이고,  $h_{jL}$ 와  $h_{jR}$ 는 경계면  $j$  양면의 대류열전달계수이다. 여기서 등가열전달계수는 상수가 아니고 온도에 따라 변한다는 사실에 주목할 필요가 있다.

#### (3) 구획분할 및 경계조건

선체중앙부 화물창을 모델링 대상으로 한다. 이때 아웃 화물창 사이에는 열전달이 없는 것으로 간주한다. 따라서 선체 횡단면에서 구획을 분할 한다. 구획분할은 선체단면의 폐공간을 기준으로 하여 하는데, 총 7개의 구획과 22개의 경계면으로 분할 하였다. 경계조건은 대기온도, 선체물수부의 해수온도 및 탱크내의 온도로 주어진다. 탱크 내벽의 경계조건은 LNG의 온도(-162℃)로 주어진다. 실제로는 탱크내에서 대류가 일어나기 때문에 탱크내벽의 온도가 LNG의 온도와 정확히 일치하지는 않으나 여기서는 그 차이를 무시한다. 이 방법은 방열재두께 계산을 비롯한 온도와 관련된 제반문제에 안전측의 결과를

주게 된다.

선체와 그 주변 대기 및 해수 사이에는 대류를 고려해야 하기 때문에 선체 주변온도뿐만 아니라 유속도 함께 주어져야 한다. 선체주변의 온도와 유속은 IMO, USCG, 각 선급규칙 등에서 규정되어 있다. 이들 규정에서는 선체주변의 온도가 저온측과 고온측으로 구분하여 주어지는데 고온측의 조건은 열침입량계산시, 저온측은 선체구조부재의 저온에 대한 안전성평가지 적용 한다.

(4) 고체경계온도

고체경계 양면의 온도가 주어졌을 때 Fig.3.1의 고체경계 각층의 다음식으로 계산할 수 있다.

$$T_{s,1} = T_L - \frac{K_E(T_L - T_R)}{h_L} \quad (3.4.a)$$

$$T_{s,k} = T_{s,k-1} - \frac{K_E(T_L - T_R)}{t_k / K_k}, k=2,n \quad (3.4.b)$$

$$T_{s,n+1} = T_R + \frac{K_E(T_L - T_R)}{h_R} \quad (3.4.c)$$

여기서  $K_E$ 는 등가열전달계수이다. 대류열전달계수 및 고체경계 재료의 열전도계수가 온도 의존성을 나타내기 때문에 각 경계온도를 초기가정하고 반복 계산에 의하여  $K_E$  및 경계온도를 구해야 한다.

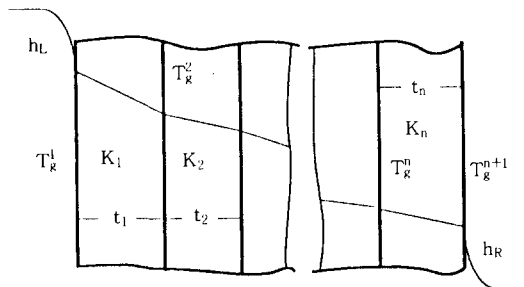


Fig. 3.1 Solid surface temperature calculation

(5) 전산프로그램

Fig.3.2은 온도분포해석을 위하여 작성된 전산프로그램의 유통도이다. 입력자료는 경계정의, 경계조건, 구획의 초기온도 지정 등이 된다. 경계는 형태와 재질 및 경계와 관련된 구획으로 정의 된다. 경계형태는 복합층판, 단판, 경계면에서의 대류여부/대류형태, 이차방벽 고려 등에 따라 5가지 형태로 나누었다.

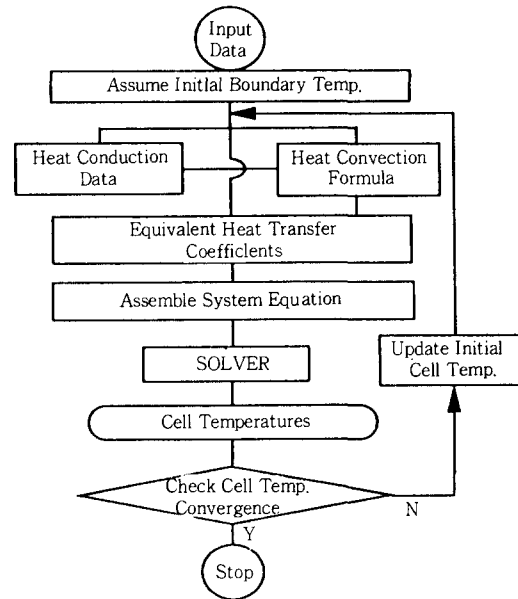


Fig. 3.2 The flow chart of temperature analysis

경계조건은 IMO의 주변조건에 관한 규정에 따라 선 택적으로 부여할 수 있게 하였고 탱크내벽의 온도는  $-162^{\circ}\text{C}$ 로 고정 하였다. 손상시의 열전달에서 누설 LNG의 영향은 이차방벽의 온도를  $-162^{\circ}\text{C}$ 로 하여 화물창내로는 자연대류를 의하여 선저 내저판 쪽으 로는 이차방벽 단열재를 통한 열전도에 의하여 고려 되었다.

구체적인 계산과정은 다음과 같다. 먼저 초기 입력 된 구획온도로써 경계온도와 등가열전달계수를 계산 한다. 이때 등가열전달계수는 이미 프로그램에 포함 되어 있는 각종 열전도자료와 대류열전달계수의 계 산수식으로 결정 된다. 등가열전달계수를 이용하여 각 구획의 열전달 평형방정식을 세우고 전 구획에 대 하여 열전달 평형방정식을 모으면 구획의 온도를 미 지수로 하는 연립방정식이 얻어진다. 이 연립방정식 을 풀어 구획의 온도를 구하는데 해가 수렴될 때까지 전과정을 반복하여 계산한다. 이때 구획 및 경계의 초기온도는 바로 전 단계 계산에서 얻어진 온도를 사 용 한다.

4. 열응력해석

4.1 개요

IMO규칙[4]에 의하면 LNG선에서 고려해야 할

열하중은 정상상태와 예냉시의 열하중으로 구분 된다. 이중에서 설계의 대상이 되는 것은 정상상태의 열하중이므로 본 연구에서는 LNG를 적재한 통상 항해시의 정상상태에 대한 열응력 해석을 수행 하였다.

정상상태의 열응력해석은 작용하중으로 힘 대신 온도가 사용되는 점만 다를 뿐 통상의 정적구조해석 과정과 동일 하다. 전체 구조해석시에는 탱크와 선체의 일체 모델을 사용하였고, 상세한 응력해석을 위하여 축대칭 요소로써 스커트와 탱크의 일부를 모델링 하였다.

4.2 스커트의 온도분포해석

탱크지지 구조인 스커트는 탱크와 선체구조에 직접 연결되어 있어 큰 온도구배가 존재하고 따라서 열응력이 크게 발생 한다. 일반적으로 스커트는 크게 세부분으로 구성되어 있다. 선저구조와 연결된 보통강 부분과 탱크구조에 연결된 알루미늄 합금강 부분, 그 사이를 연결하는 스테인레스강 부분으로 구성되어 있고, 방열재는 스커트 상부인 알루미늄합금강 부분에만 있다. 이러한 구조배치는 스커트 부분의 완만한 온도구배 상태를 유지함으로써 열응력의 발생을 최소화하는 동시에 강이나 알루미늄에 비하여 열전도도가 훨씬 낮은 스테인레스강의 특성을 이용하여 스커트를 통한 열침입을 가능한 억제하기 위한 것이다. 스커트의 온도 구배는 알루미늄 합금강 부분에 부착된 방열재의 두께와 길이를 조정함으로써 어느 정도 제어 가능한데 여기서는 계산으로서 스커트의 방열재 두께가 탱크방열재 두께와 동일한 경우에 대한 해석을 수행 하였다.

스커트의 원주방향으로 열전달이 없다고 가정하고, 보강재와 곡률효과도 무시하면 스커트에서의 열전달은 일차원 열전달문제에 모델링할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 스커트를 세부분으로 나누면 각 구간에서의 열전달 지배방정식은 다음과 같다[1].

$$K_j t_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} - K_{Ej}(T_j - T^i) - K_{Ej}(T_j - T^o) = 0 \quad (4.1)$$

여기서 하첨자 j는 구간을 나타내고 상첨자는 스커트의 안밖을 의미한다. (4.1)식을 간단한 형태로 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 \theta_j}{\partial x^2} - (m_j)^2 \theta_j = 0 \quad (4.2)$$

여기서,  $m_j$ 와  $\theta_j$ 는 다음과 같다.

$$m_j = \sqrt{\frac{h_j^o + h_j^i}{k_j t_j}}, \quad \theta_j = (T_j - \frac{h_j^o T^o + h_j^i T^i}{h_j^o + h_j^i}) \quad (4.3)$$

(4.2)식의 해는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\theta_j = C_1^j e^{-m_j x} + C_2^j e^{-m_j x} \quad (4.4)$$

여기서 상수  $C_1^j, C_2^j$ 는 경계조건에 의하여 결정되는 것으로 구간이 세개이므로 총 여섯개이며 따라서 여섯개의 조건이 필요 하다. 스커트의 양끝에서 온도  $T_E, T_S$ 와 구간1과 2, 2와 3의 경계점에서 양구간에서 계산되는 온도와 열전달량이 같다는 조건으로부터 여섯개의 조건이 얻어진다.

화물창내의 열전달 문제에서와 마찬가지로 방열재의 열전도계수와 대류열전달계수가 온도 의존적이기 때문에 반복계산에 의하여 온도분포를 계산한다. 단, 열전도도와 대류열 전달계수 산정은 각 구간의 평균 온도를 기준으로 한다.

5. 수치계산 및 고찰

5.1 Prototype LNG선의 누설량 추정

제2보[8]의 관통균열 전파해석 과정에서 응력스펙트럼 이산화와 각 블록에 대한 균열길이를 미리 계산한 다음 각 이산화 블록의 균열길이 응력 및 압력을 (2.7)-(2.13)식에 적용하여 한 변동주기에 대한 누설량을 구하고 반복횟수에 따라 누적함으로써 누설량을 계산 하였다. LNG의 점성계수는 주성분인 메탄의 0.00012kg/m를 사용 하였다. 마찰계수  $C_F$ 는 실제 실험을 통하여 구하는 것이 바람직하지만 여기서는 Prandtl과 von-Karman의 난류시의 마찰계수 계산식을 이용 하였다. 균열의 위치와 초기 크기는 제2보의 균열전파해석과 동일하게 탱크바닥과 적도부 2 곳을 선정 하였다.

Fig. 5.1은 계산된 누적누설량을 보여 준다. 스펙트럼을 적용하는 방향에 따라 누설량에서 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이것은 정방향 계산에서는 스펙트럼의 이산화 블록 중 응력의 진폭이 작은쪽부터 적용되기 때문에 균열진전이 주로 대상기간의 마지막 부

분에 집중됨으로써[7]누적누설량이 상대적으로 적게 계산되어 하한치를 주는 반면 역방향 계산에서는 상한치가 계산 된다. 따라서 누설검지까지의 시간추정을 위해서는 상대적으로 시간이 긴 것으로 계산되는 정방향에 안전측의 계산법이 되며 catch basin 설치의 관점에서 보면 누설량이 많은 것으로 추정되는 역방향계산이 안전측이 된다.

열전달 계산에 의하면 누설된 LNG는 즉시 전량 증발하는 것으로 판단 된다. 따라서 탱크로부터 누설된 LNG가 전량 증발되어 탱크와 화물창 사이의 공간에 고루 확산된다고 가정하고, 가스검출조건으로 LEL (Lower Explosion Limit) 의 5%로 설정하면 가스검출에 필요한 LNG의 양은 다음식에 의하여 구할 수 있다.

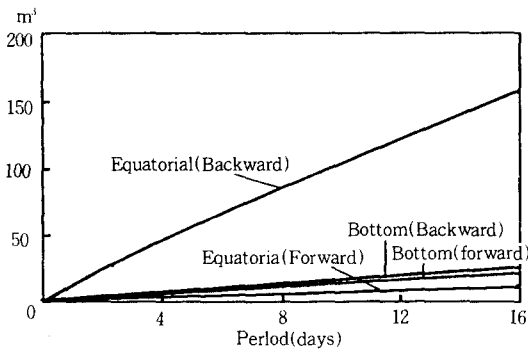


Fig. 5.1 Accumulated leakage

$$V = [V_H \times LEL \times 0.05 \frac{\rho_V}{\rho_L} + V_I] \quad (5.1)$$

여기서,  $V_H$ 는 가스확산공간의 총부피이고,  $V_I$ 는 탱크와 방열재 사이에 누적되는 LNG의 부피이다. 본 prototype LNG선의 경우는 각각 15,000m³, 0.52m³으로 주어진다.  $\rho_V$ ,  $\rho_L$ 은 기화가스의 비부피 (specific volume)와 LNG의 밀도로 각각 1.0, 425kg/m³이다. 천연가스의 LEL은 보통 총부피의 5%정도로 간주되므로 가스검지에 필요한 누설량은 0.6m³이 된다. 이러한 조건하에서 누설량을 계산한 결과 가스검지까지의 시간은 정방향의 경우 약 22시간이 소요 된다. 부분이차방벽(catch basin)의 설치 범위는 역방향에서 추정된 누설량으로 결정 된다. 누설된 LNG는 증발되지만 전량 탱크와 화물 창 사이의

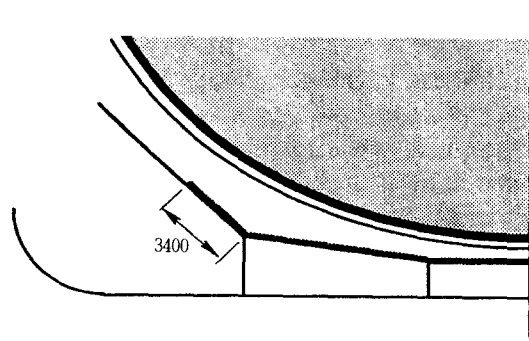


Fig. 5.2 The range of secondary barrier

공간에 누적된다고 가정하여 그 범위를 설계규칙에 따라 Fig.5.2와 같이 결정 하였다.

5.2 화물창 내부의 온도분포해석

IMO규칙[4]과 손상, 비손상 경우를 조합하여 6가지 주변조건에 대한 계산을 수행하였으나 본고에서는 열침입량을 계산하기 위한 고온측 주변조건과 선체구조부재 안전성을 확인하기 위한 탱크손상시에 저온측 주변조건에 대한 결과만 보인다.

Fig.5.3은 고온측의 계산결과이고 Fig5.4는 저온측의 계산결과를 나타낸다. 고온측은 선속을 19Knot로 간주하였고 저온측에서는 선속을 고려하지 않았다.

본 해석대상 LNG선의 1일 증발량을 0.25%로 가정하면 이에 해당하는 증발열은 52.9kcal이다. 여기서 스커트를 통한 열침입량과 선체동요등에 의한 열침

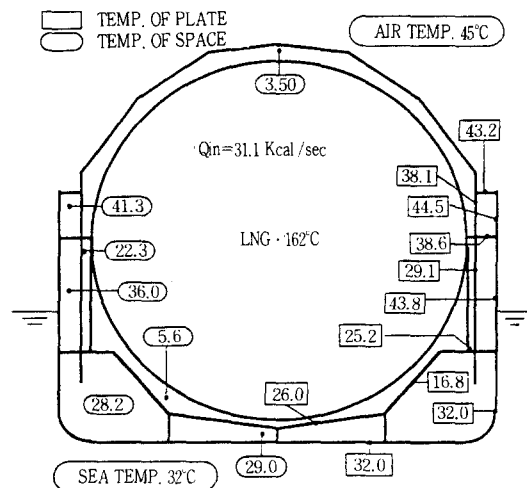


Fig. 5.3 Temperature distribution (high temperature condition)



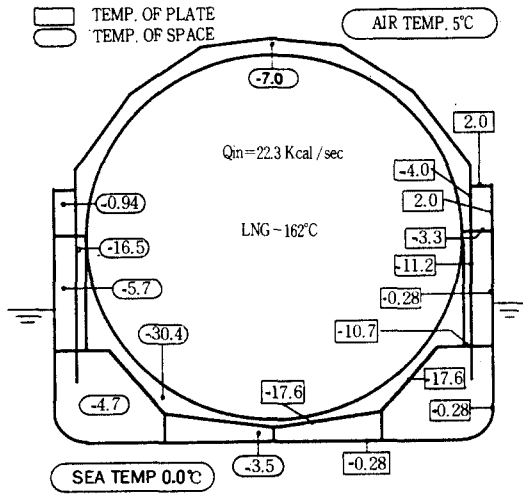


Fig. 5.4 Temperature distribution (low temperature condition)

입량 증가를 경험적으로 고려하면[8] 탱크방열재를 통한 열침입을 32Kcal로 제한하는 것이 방열재 설계 요구조건이 된다. 본 prototype LNG선의 방열재 치수는 Fig.5.3의 고온측 경우에 열침입량이 31Kcal이므로 설계조건을 만족 한다. 최종방열재 두께는 방열재의 경년변화에 의한 단열효과감소를 고려하여 적당량 증가시켜야 한다.

선체구조재질에 따른 허용온도는 선급규칙 또는 IMO code의 규제에 따른다. 저온측 온도계산결과 내저판의 온도가  $-17.6^{\circ}\text{C}$ 가 됨을 Fig.5.4에서 확인할 수 있다. IMO code에 의하면 "E"급강의 저온 허용온도가  $-25^{\circ}\text{C}$ 이므로 내저판에 "E"급강을 사용하면 안전한 설계가 될 수 있다.

5.3 열응력 해석

온도구배가 큰 곳에서 열응력이 크게 발생 한다. 앞에서 계산한 예와 같이 MRV형 LNG탱크는 스커트 상부에 큰 온도구배가 있고 따라서 이곳에 큰 열응력이 발생 한다.

먼저, 화물창내온도분포 해석시 고온측 조건에서 스커트에 가장 큰 온도구배가 발생될 것으로 예상되므로 이때 스커트부근에서의 상세한 온도분포를 계산하고 그 결과를 Fig.5.5에서 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 보통강으로 된 구역이전에서 경계온도  $T_s$  정도로 온도가 상승하고 있어 스커트구조가 저온에

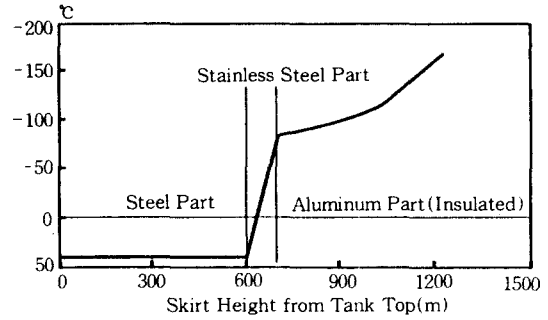


Fig. 5.5 Temperature distribution of skirt

대하여 안전함을 확인할 수 있고, 열응력은 온도구배가 큰 스커트의 상부에서 집중적으로 발생됨을 예상할 수 있다.

이 부분의 응력을 상세히 계산하기 위하여 선체구조와 탱크구조를 함께 해석하는 전체해석과 고응력부를 중심으로 하는 상세해석의 두단계로 나누어 해석을 수행 하였다.

1단계해석에서는 스테인레스강 부분과 보통강 부분의 경계면 즉 스커트의 상세해석을 위한 경계면의 변위를 계산 한다. 이때는 제1보에서 탱크의 응력해석에 사용한 구조해석모델을 그대로 이용 한다. 경계

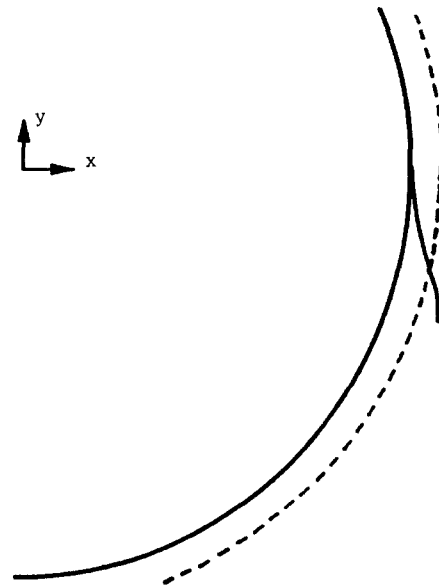


Fig. 5.6 Deformed shape of tank and skirt system due to thermal loading

조건은 좌우 대칭조건과 화물창 양단 선저를 단순지지로 하였다. 하중은 제5.2절에서 구한 온도분포를 사용 하였다.

상세해석모델은 스커트의 상반부와 탱크를 대상으로 축대칭 solid 요소를 사용 하였다. 탱크의 두께가 두꺼운 적도부는 두께방향으로 삼분하여 모델링하였고 두께가 얇은 곳은 분할하지 않았다. 스커트의 원주방향 링보강재는 축대칭 셀 요소로써 모델링 하였으며 총 요소수는 1,200개이다. 경계조건은 앞에서 따로 구한 스커트 부분의 온도분포와 탱크판의 온도  $-162^{\circ}\text{C}$  및 1단계해석에서 구한 스커트 절단면의 변위가 강제변위로 사용 된다.

Fig.5.6는 2단계 상세해석에서 계산된 스커트의 변형형상이다. 탱크적도부의 응력수준은 미미하여 탱크적도부와 바로 연결되어 있는 스커트 상반부에서 약  $1.4\text{kg}/\text{mm}^2$ , 스테인레스강 부분이 약  $11\text{kg}/\text{mm}^2$ 의 응력수준을 보이고 있다.

## 6. 결 론

본 보에서는 주로 저온에 대한 탱크 및 선체구조의 안전성을 평가하기 위한 각종 해석기법에 대하여 연구를 수행하였으며 다음과 같은 몇가지 결론을 얻었다.

- 1) 누설량 추정모델을 개발함으로써 균열 진전시 예상되는 LNG의 누설량 추정절차를 정립 하였다. 그러나 본 누설량추정 모델의 실용화를 위해서는 실험을 통하여 균열개구량 계산모델의 오차범위나 난류마찰계수를 정확히 산정하기 위한 연구가 추후 보완되어야 할 필요가 있다.
- 2) 화물창 내부의 온도분포해석 모델을 개발 하였다. 온도분포해석에서는 정밀한 해석모델보다는 간단한 계산모델이 유효하고 정도높은 해석을 위해서는 실선계측과 실험을 통하여 복잡구조물의 대류열전달 계수를 정확히 산정하는 것이 보다 효과적이다.
- 3) MRV형 LNG선의 탱크구조에서는 열응력이 미미하지만 스커트에서는 급격한 온도 구배가 존재하기 때문에 큰 열응력이 발생 한다. 따라서

스커트 설계시 방열재 설치 범위 및 구조배치에 주의를 요한다.

## 후 기

본 연구는 과학기술처 특정연구개발사업의 일환으로 수행된 연구결과에 일부입니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Hloman, J. P., *Heat*, McGraw-Hill Book Company, pp 101, 1986.
- [2] 日本機械學會, 傳熱工學資料, 1975.
- [3] Kee, R. J., "Natural Convection of a Heat Generating Fluid with closed Vertical Cylinders and Spheres", *Journal of Heat Transfer, ASME*, Feb. 1976.
- [4] IMO, "Code for Construction and Equipment of Ship Carrying Dangerous Chemicals Bulk, Including Its Amendments No.1-7", Resolution A 212(VII).
- [5] Nagmoto, R., et al, "On the Study of the Tank System of a 125,000m<sup>3</sup> MRV Type LNG Carrier(Thermal, Leak before Failure and Buckling Analysis)", *GASTECH* 82, 1982.
- [6] Susuki, M., et al, "An Investigation on Fluid Flow through a Samall Crack", *日立船舶技報*, Vol.39, No.2, 1978.
- [7] 노인식, 남용윤, 이호섭, "독립구형 LNG 탱크의 구조안전성 평가(제1보)"-피로균열 발생수명 예측-, 대한조선학회 논문집 제30권 2호 1993. 5.
- [8] 노인식, 남용윤, 이호섭, "독립구형 LNG 탱크의 구조안전성 평가(제2보)"-피로균열 진전해석-, 대한조선학회 논문집 제30권 4호 1993. 11.
- [9] 이호섭 외, "LNG선의 구조해석 기술 개발(III)", 해사기술연구소 연구보고서, BCN254-1503, D, 1991.