
 論 文

大韓造船學會論文集
 제 30 卷 第 2 號 1993 年 5 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 30, No. 2, May 1993

독립구형 LNG 탱크의 구조안전성 평가 (제1보)

- 피로균열 발생수명 예측 -

노인식*, 남용윤*, 이호섭*

Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank
 (1st Report)
 - Fatigue Strength Analysis Based on the S-N Approach -

by

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

요 약

LNG선은 극저온의 위험한 화물을 안전하게 격납, 운송해야 하기 때문에 일반 선박에 비해서 고도의 구조설계/해석 기술이 요구된다. 따라서 본고에서는 독립형 LNG탱크의 총체적인 구조안전성 평가과정을 다루었으며 구체적으로 다음과 같은 연구내용들을 포함한다.

- 1) 파랑하중의 직접계산, 선체 및 탱크의 응력해석 그리고 통계해석과정을 포함하는 파랑 응력의 장기분포해석.
- 2) S-N approach에 의한 피로강도 평가.
- 3) 피로균열 전파해석 및 LBF개념에 의한 구조안전성 평가.

본 제1보에서는 (1)(2)항에 중점을 두어 시설계 LNG선에 대한 예제계산을 수행하였으며 나머지 부분은 이어지는 제2보에서 상세히 다루어질 예정이다.

Abstract

The design of LNG ship needs very high level structural design/analysis technology compared with conventional ship types because it requires perfect security against the extremely dangerous and cryogenic cargo. Hence, present paper describes the general procedure of the structural safety assessment for independent tank type LNG ship, which contains following items.

접수일자 : 1992년 12월 3일, 재접수일자 : 1993년 1월 28일

*정회원, 해사기술연구소 구조연구실

- 1) Long term prediction of the wave induced stresses including ship motion analysis, structural analysis of hull and tank and stochastic analysis process of ocean waves.
- 2) Fatigue strength analysis of a tank structure based on the S-N approach.
- 3) Structural safety assessment against the fatigue crack propagation based on the LBF (Leak Before Failure) concept.

The first report focused on the item (1) (2) and example calculation was performed on a prototype LNG ship. The remained part will be covered by the second report.

1. 서 언

LNG선은 오늘날 고기술, 고부가가치선의 대명사로 인식되어 있을 뿐만 아니라 실제 그 설계, 건조공정에 필요한 기술들은 조선공업 전반에 관한 최고수준의 know-how를 거의 망라하고 있다. 특히 LNG 자체가 극히 위험한 극저온의 화물이기 때문에 구조설계와 관련된 각종 구조해석을 위해서는 구조공학 분야에서의 최첨단 기술이 요구된다. 따라서, LNG선의 구조설계 및 해석기술을 개발한다는 의미는 선체구조의 안전성 평가 기술을 비약적으로 향상시킬 수 있으며 조선설계의 고기술 고부가가치화와 직결되기 때문에 여타 고급선종의 설계능력을 자연적으로 확보할 수 있다는 것이다. 최근 우리나라에서도 무공해 청정에너지원인 LNG의 도입확대와 아울러 국적선 LNG선 건조사업이 진행중에 있어 앞으로 LNG 선에 관한 보다 다양한 연구개발이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 이와같은 LNG선 구조설계와 관련된 여러분야의 요소기술들을 분석, 정리 또는 개발하고 이를 유기적으로 연결함으로써 LNG선 구조해석 과정의 표준되는 절차를 확립하는데 그 목적을 두었다. 본 논문의 제1보에서는 LNG 탱크에 작용하는 파랑응력 장기분포의 결정과정과 S-N approach에 의한 피로균열 발생수명의 예측과정을 중점적으로 다루었으며 이어지는 제2보에서는 피로균열 진전 해석수법에 의한 탱크의 구조안전성평가 기법을 중심으로 기술할 예정이다.

대상선종으로는 건조공정, 실험쪽으로 know-how가 많이 필요한 membrane 방식보다는 설계과정에서 이론적, 해석적 know-how가 절대적으로 요구되는 독립형 탱크 방식을 택하였으며 그중에서도 특히 가장 건조실적이 많은 MRV(Moss-Rosenverg-Verft)구형 탱크 방식을 선정하였다.

2. MRV독립 구형 탱크의 안전성 평가

독립형 탱크는 탱크 구조, 지지구조, 선각의 구조가 서로 독립인 구조시스템으로서 탱크자체 만으로도 외력에 대하여 충분한 강도를 갖고 있다. MRV 시스템은 구형탱크의 적도부에 skirt를 설치하여 선체에 연결지지하는 방식이다. 이때 skirt는 탱크의 열수축에 의하여 굽힘 모멘트를 받게되므로 열을 적절히 방출함으로써 급격한 열균배로 인한 열응력의 발생을 최소화한다. 선체와 탱크가 직접 연결된 구조이기 때문에 열손실이 비교적 많고 화물적재 위치가 높기 때문에 선박의 복원성 확보에 어려움이 있다. 그러나 이론적인 응력해석이 용이하여 탱크구조의 안전성을 비교적 정확하게 평가할 수 있으므로 2차방벽의 생략 또는 부분적인 설치가 용인되는 IMO type B방식의 설계가 가능하다[1][2][3].

Type B 방식은 완전한 2차방벽이 요구되는 type A 방식과는 달리 파랑하중계산, 응력해석, 피로균열 발생해석, 파괴역학해석, 열응력해석등 최첨단의 이론적, 실험적 강도평가를 통하여 취성파괴가 일어나지 않는다고 증명된 탱크로서, 탱크의 부분적인 파괴로 인하여 누출된 LNG를 일정기간 동안 저장할 수 있는 부분 2차방벽만 설치하는 것이 허용된다. 따라서 type B 탱크로서 인정받기 위해서는 다음과 같은 안전성 평가과정이 필수적으로 요구된다[2].

2.1 파랑응력의 장기분포해석

액화가스 운반선의 안전성을 보장하기 위해서는 여러가지 하중조건들에 대한 면밀한 검토가 이루어져야 한다. 특히 탱크의 안전성 평가를 위한 구조해석시에는 유체역학적인 선체운동 직접계산 및 해양파의 통계적 처리기법등을 이용하는 정밀한 파랑하중계산수법이 요구된다[3].

구조해석은 2 cargo hold 정도를 대상으로 한다. 피로강도 해석시 탱크 응력집중 부위의 working stress를 결정하는 것이 주목적이며 MRV 방식에서

는 탱크의 적도(equatorial ring)부근이 가장 중요하게 취급되고 있다.

2.2 피로균열 발생수명 예측

선체구조는 파랑하중과 같은 불규칙적인 외력하에서 거동하기 때문에 발생하는 응력도 복잡하고 불규칙하다. 이러한 구조물에서의 피로수명을 평가하기 위한 방법으로서 구조물이 설계수명동안 받는 모든 변동하중에 의한 영향을 계수화한 다음 이를 선형적으로 합산한 값을 평가하는 이른바 누적피해도(cumulative damage)이론이 설계목적으로는 비교적 합리적이며 편리하게 적용될 수 있기 때문에 가장 보편적으로 받아들여지고 있다[3].

2.3 균열전파해석

피로발생수명해석을 통하여 LNG 탱크에서 피로균열이 발생되지 않음을 증명할 수 있다. 그러나 혹시 피로균열이 발생하는 경우 또는 검사과정에서 미처 발견되지 못한 초기결합이 이미 존재하는 경우에는 이 미소균열의 진전에 의하여 LNG의 누출 또는 탱크에 치명적 손상이 발생할 우려가 있으므로 이러한 초기균열의 진전이 강도기준상 허용치 이내로 제한될 수 있을 것인지를 검증한다[4].

2.4 LNG 누설량,증발량 및 GAS농도 계산

추정된 크기의 균열에서 누설되는 LNG의 양을 계산한다. 관통균열의 전파해석을 수행하는 과정에서 각 step 마다 균열의 크기에 따른 LNG의 누설량과 증발량 그리고 그때의 가스농도를 계산하여 균열전파해석과 결과평가의 지표로 삼는다. 또한 최종적인 LNG 잔액량을 계산하여 2차방벽 즉 catch basin 설계에 적용한다[4][5].

3. 파랑응력의 장기분포

LNG선 설계시 고려되는 특징적인 하중으로는 열하중, sloshing 하중등을 들 수 있으나 역시 일반 선박에서와 마찬가지로 파랑하중이 주관심의 대상이 되며 이 파랑하중에 의해 발생하는 응력의 장기분포는 탱크의 피로과피강도 평가와 직접 연관된다. Fig.3.1에 파랑응력 장기분포의 계산과정을 요약하였으며 이하 단계별 계산과정을 간략히 설명한다[6][7].

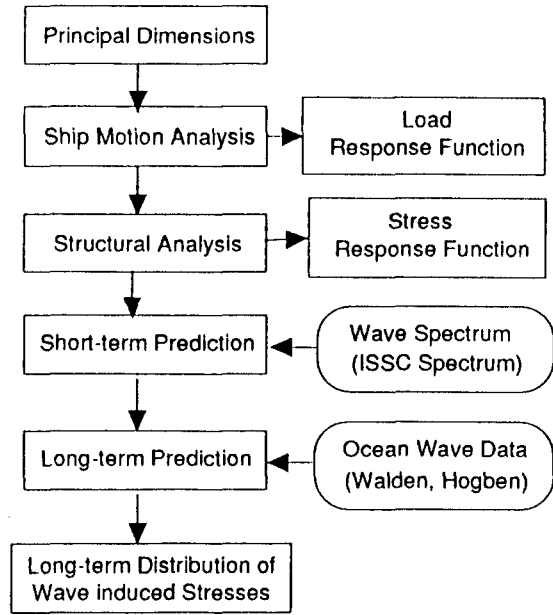


Fig.3.1 Flow of the long-term prediction of wave induced stresses.

3.1 선체운동해석

단위파고의 규칙파에 대한 선체의 응답 즉, RAO 함수를 구하기 위하여 선체운동해석을 수행한다. 본 연구에서는 strip이론을 바탕으로 한 STF (Salvesen-Tuck-Faltinsen)법을 이용하여 선체의 파랑운동 응답을 계산하였다.

3.2 해양파 스펙트럼

해양파의 불규칙성을 수학적으로 처리하기 위하여 random process의 통계적 처리방식이 도입되고 있다. 즉 불규칙한 해면은 주기, 파랑, 진폭 및 진행방향이 서로 다른 성분 규칙파들의 선형중첩으로 표시 가능하며 각 성분파의 특성은 선형중력과 이론으로 수학적인 모델링이 가능하다는 것이다. 이때 각 성분파의 기여도 즉 각 성분파의 에너지를 주파수 축에 따라 표시한 것이 해양파 스펙트럼이며 이에 따라 해양파의 통계적 특성이 결정된다. 해양파 스펙트럼은 실제 해상상태에서 계측된 해양파고의 시계열을 Fourier변환하여 얻을 수 있다. 그러나 실제 적용상의 편의를 위하여 이러한 계측자료를 바탕으로 하여

해상상태를 몇가지 parameter들로써 여러단계로 분류한 다음 수학적으로 간편하게 모형화한 해양파 스펙트럼들이 여러 연구자들에 의해 제안되고 있다. 본 연구에서는 ISSC 표준스펙트럼[2]을 이용하여 수치 계산을 수행하였다.

3.3 단기에측

20-30분 지속되는 단기적인 해상상태에 대한 선체 응답을 예측하는 것을 단기에측이라고 한다. 어떤 확률변수의 분포가 zero mean의 정규분포에 따른다면 그 확률변수의 peak치는 Rayleigh 분포에 가깝다는 사실이 잘 알려져 있으므로 파랑 응답의 peak치도 Rayleigh 분포로 가정할 수 있다. 따라서 파랑변동응력의 peak치가 σ 일 확률 $p(\sigma)$ 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$p(\sigma) = \frac{2\sigma}{R} \text{Exp}(-\sigma^2/R) \quad (3.1)$$

이때, R은 파랑응력의 누적에너지 밀도이며 다음 식과 같이 표시된다.

$$R = \int_0^\infty [f(\omega)]^2 d\omega = \int_0^\infty [S(\omega)][A(\omega)]^2 d\omega \quad (3.2)$$

여기서,

- $[f(\omega)]^2$: 파랑응력 스펙트럼
- $[S(\omega)]$: 해양파 스펙트럼
- $[A(\omega)]$: 응력응답함수

(3.1)식을 이용하면 응력수준이 σ_1 을 초과할 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$q(\sigma > \sigma_1) = 1 - \int_0^{\sigma_1} p(\sigma) d\sigma = \text{Exp}(-\sigma_1^2/R) \quad (3.3)$$

3.4 장기예측

(3.3)식으로 계산된 단기 파랑응력의 확률분포와 해상관측자료로 주어지는 각 해상상태의 발현확률을 적분하여 파랑응력의 장기분포를 예측하다. 일반적인 해상관측자료는 유의파고 (H)와 평균파주기 (T)를 기준으로 해상상태를 몇단계로 분류하고 이에 대한 각각의 발현확률을 제시하고 있다. 따라서 선박의 운항항로에서의 해상관측자료로부터 구한 각 해상상태의 발현확률을 $p(H, T)$ 라 하면 선박과 파의 조

우각에 대한 확률 p_θ 고려하여 파랑응력의 장기분포는 다음식과 같이 계산할 수 있다.

$$Q(\sigma > \sigma_1) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty q(\sigma > \sigma_1) p(H, T) p_\theta dHdTd\theta \quad (3.4)$$

4. 피로균열 발생수명 해석

재료가 장시간 반복적인 응력을 받게되면 1회 하중에서의 파괴 응력보다 훨씬 낮은 응력상태 하에서도 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 파괴를 피로파괴라고 하며 일반적으로 자동차, 항공기, 선박 등 반복하중에 장기간 노출되는 구조물에서 흔히 관찰되고 있다. 피로파괴는 낮은 응력수준에서 사전 조짐없이 갑작스럽게 불안정 취성파괴로 이어지기 때문에 구조물에 심각한 손상을 가져오는 경우가 많다. 일반적으로 피로강도의 평가과정은 다음과 같은 2단계로 구분할 수 있다[5].

첫 단계는 피로균열이 발생할 때까지의 수명을 평가하는 과정이며 흔히 S-N approach를 이용한다. 두 번째 단계는 이렇게 발생한 균열 또는 초기부터 존재 하던 균열의 진전과정을 예측하여 구조물의 잔존수명 또는 다음 검사기간까지 불안정 취성파괴로 이어질 가능성 등을 검토한다. 본고에서는 첫단계 피로균열 발생수명 해석분야를 중점적으로 다루었으며 나머지 부분은 이어지는 제2보에서 상세히 다룰 예정이다.

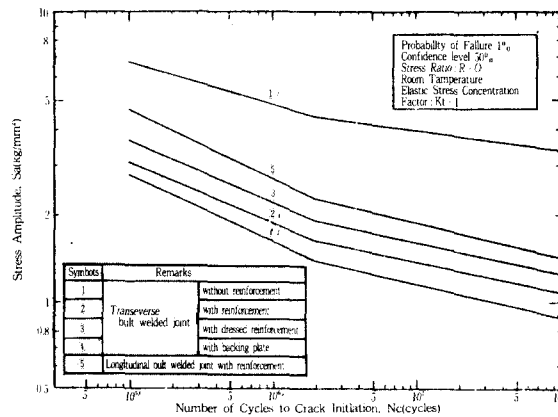


Fig.4.1 Design S-N curves for Al 5083-O alloy[9]

4.1 S-N 선도

오래전부터 금속재료의 피로파괴 현상은 잘알려져 있었다. 1850년대 Wöhler는 이미 작용응력의 크기와 파괴가 일어날때까지의 반복 작용회수 사이에는 상호 밀접한 관계가 존재한다는 사실을 밝혔으며 S-N 선도와 피로한도의 개념을 도입하였다. Fig.4.1은 탱크재로 쓰이는 알루미늄 합금 A1 5083-O의 설계 S-N 선도를 보여주고 있다. 응력작용 cycle과 응력의 크기를 대수좌표축에서 대비하고 있는데, 이와같은 양대수 좌표계에서 거의 직선적인 분포를 보이고 있다. 응력이 작아질수록 파괴에 이르는 cycle수가 지수적으로 증가하게 되며 어떤 한계이하로 응력을 감소시키게 되면 아무리 cycle수가 많더라도 파괴가 일어나지 않는다. 이 응력한계를 피로한도라고 한다. 그러나 Al합금을 비롯한 대부분의 비철합금에서는 피로한도를 보이지 않는다.

S-N 곡선을 구하기 위한 피로시험방법에 대해서는 특별히 통일된 기준이 없다. 그러나 대체로 파괴확률 50%의 균열발생시점을 기준으로 하고 있으며 단순인장 혹은 굽힘 응력 상태에서 실험한다. 완전양진 응력상태($R = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} = -1$)가 표준이 되지만 응력비 R값을 변화시킨 실험결과가 이용될 수도 있다. 상온과 저온에서의 피로시험결과를 비교해보면 탱크 재료와 같이 저온파괴인성치가 극히 큰 재료에서는 오히려 저온에서의 피로특성이 더 양호한 결과를 주고 있다는 사실을 알 수 있다[9]. 따라서 안전측 설계로써 상온의 실험 data가 사용되고 있다.

이러한 조건하에서 실험된 결과를 양대수 좌표계에 표시해 보면 대체로 상당히 분산된 분포를 보이고 있으나 Fig.4.1과 같이 거의 직선적으로 근사된다는 사실을 알 수 있다. 따라서 이실험 data 들을 이용하여 다음과 같은 직선식(양변에 log를 취하면 직선방정식이 됨)으로 근사한다[9].

$$N \cdot S^k = C \quad \text{for } N \leq 2 \times 10^6 \quad (4.1)$$

이때 상수 k, C는 실험결과로부터 least square fitting 하여 구해진다. 또한 변동응력 level이 낮아지면 피로한도에 가까워짐에 따라 2×10^6 회를 초과하는 반복응력에 대응하는 응력범위에 대해서는 다음과 같이 직선의 기울기를 약 1/2로 감소시킨다. 이것을 Heibach의 수정이라고 한다.

$$N \cdot S^{2k-1} = C' \quad \text{for } N > 2 \times 10^6 \quad (4.2)$$

여기서,

$$C' = C^{(2-\frac{1}{k})} / (2 \times 10^6) \cong C^2 / (2 \times 10^6) \quad (4.3)$$

4.2 평균응력의 영향

대부분의 피로시험 data들은 변동응력의 완전 양진조건($R = -1$)에서 결정된 것들이다. 그러나 일반적으로는 평균응력이 어떤값으로 존재하는 경우가 많으므로 평균응력의 영향을 합리적으로 고려할 필요가 있다. 즉, 대체적으로 평균응력이 양의 방향(인장 축)으로 커질수록 작은 응력진폭에서도 파단이 발생되기 때문에 변동응력 진폭만으로 피로파괴 발생수명을 합리적으로 추정하기는 어렵다. 그러나 여러 가지 평균응력 level에 대한 실험 data를 모두 제공하는 현실적으로 거의 불가능하기 때문에 실제 실험치 대신에 평균응력이 zero인 완전 양진응력의 경우에 대한 실험 data로부터 근사적으로 추정하는 방법이 몇가지 제안되고 있다[2]. 본연구에서는 다음과 같은 Smith의 타원식을 이용하여 등가 응력 진폭을 결정하였다.

$$(S_a / S_e)^2 + (S_m / S_u)^2 = 1 \quad (4.4)$$

여기서,

S_a : 변동 응력 진폭

S_e : 등가 응력 진폭

S_m : 평균 응력

S_u : 재료의 인장강도

4.3 누적피해도 법칙

불규칙적인 응력상태하에서 거동하는 경우에는 S-N곡선을 그대로 적용하기는 어렵기 때문에 Palmgren-Miner가설에 의한 누적피해도 법칙을 적용하여 피로수명을 예측한다. IMO Gas Code[3]에서는 다음과 같이 누적피해도 D를 정해진 값 C_w 이하가 되도록 규정함으로써 LNG탱크의 피로강도에 대한 기준을 제시하고 있다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} + \frac{10^3}{N_j} \leq C_w \quad (4.5)$$

여기서,

N_i = 변동 응력 진폭 S_i 일때 S-N 곡선에서 구한

파괴까지의 cycle 수
 n_i = 작용응력의 빈도분포로부터 추정된 작용응력의 반복 cycle 수
 N_j = 적, 양하시의 변동응력진폭에 의한 파괴까지의 cycle 수

IMO Gas Code에서는 C_w 값에 대하여 0.5를 표준으로 택하고 있으나 사용되는 S-N 곡선, 피로시험 방법 등에 따라 1.0 까지도 허용하고 있다.

4.4 작용응력의 빈도분포

구조물의 수명동안 불규칙적으로 작용하는 응력 크기에 대한 발현확률 또는 발생 빈도수 분포를 나타낸 것이 작용응력의 빈도분포이다. 선박 또는 해양구

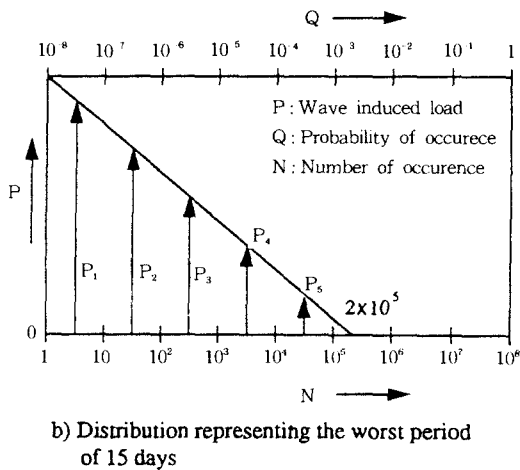
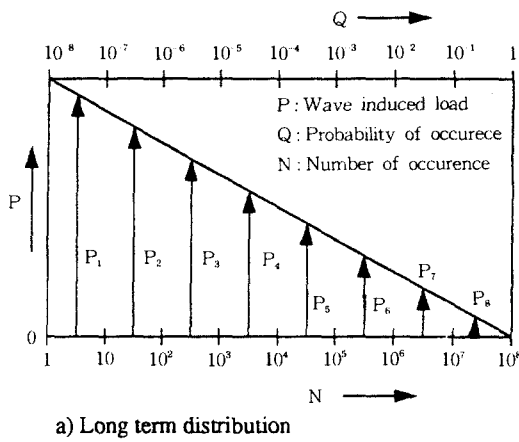


Fig.4.2 Wave induced load distribution

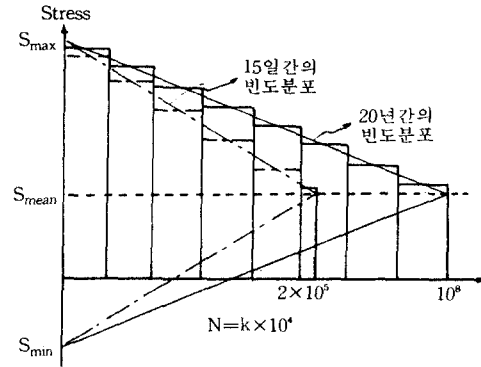


Fig.4.3 Discretization of load distribution

조물의 경우에는 파랑하중에 의한 장기응력의 빈도분포가 편대수 좌표계에서 거의 직선적으로 표시된다는 사실이 이미 잘 알려져 있기 때문에 파랑응력의 직접계산 절차에 따라 어떤 기준확률 level(대개 10^{-6})의 최대 기대치를 계산한 다음 Fig.4.2와 같이 직선적으로 근사하는 방법이 통용되고 있다. 이렇게 구해진 파랑응력의 장기빈도분포를 S-N 선도와 연결하여 실제계산에 적용하기 위해서 Fig.4.3와 같이 이산화 한다. Block 수를 m개로 분할했을 경우, i번째 응력진폭 S_i 와 응력 반복 cycle 수 n_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_i = \frac{(2m+1) - 2i}{2 \log N_{all}} (S_{max} - S_{min}) \quad (4.6)$$

$$n_i = (1 - 10^{-\log N / m}) \times 10^i \log N / m \quad (4.7)$$

여기서,

$$N_{all} = \text{total number of cycles} (= 10^8) \quad (4.8)$$

5. Prototype LNG선에 대한 수치계산 및 고찰

Table 5.1 Principal particulars and design conditions of prototype LNG ship.

주요요목		설계조건	
Length	248m	선급	L, R
Breadth	48m	Tank 재료	AL5083O
Depth	27m	설계온도	-163°C
Draft	11.3m	설계증기압	0.25kg /cm ²
Capacity	130,000m ³	화액비중	0.43, 0.5
C_b	0.765		
Speed	19Knot		

시설계된 Prototype LNG 선을 대상으로 하여 Fig.3.1와 같은 수치계산 수순을 적용, 파랑응력의 장기분포를 계산하였으며 이를 바탕으로 탱크 관심부위에서의 누적피해도를 평가하였다. 대상선의 주요 요목 및 설계조건은 Table 5.1과 같다.

5.1 파랑응력의 장기분포해석

피로균열발생 수명해석, 피로균열 진전해석등 탱

Table 5.2 Loading conditions

	Description	Probability
LC-1	Full load(LNG비중:0.43)	0.25
LC-2	Full load(LNG비중:0.5)	0.25
LC-3	Ballast	0.5

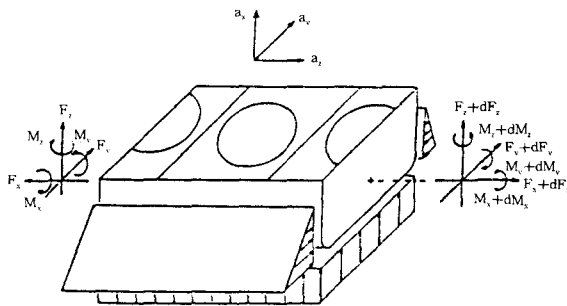


Fig.5.1 Load components acting on hull segment

Table 5.3. Load cases for wave load components[2]

Loading type (unit load)	Load case
Vertical bending moment at end	1
Vertical shear force at end	2
Horizontal bending moment at end	3
Horizontal shear force at end	4
Torsional moment at end	5
Forced warping displacement at deck	6
Forced warping displacement at bilge	7
Inertia force due to acceleration x,y,z,dir.	8-10
Water pressure acting on hull bottom -uniform, anti-symmetric components about centerline and midship section	11-14
Water pressure acting on hull side -uniform, anti-symmetric components about centerline and midship section	15-18
Pressure load vat tank -unifrom, anti-symmetric components about x,y,z direction	19-22

크의 구조안전성 평가에 필요한 작용응력(working stress)을 결정하기 위하여 관심대상 부위에 작용하는 파랑응력의 장기분포를 계산한다. 이때 대상선의 적재상태와 각각의 운항확률을 Table 5.2와 같이 가정하였다. 일반적으로 RAO함수 계산시 λ/L 을 0.5-3.5의 범위에서 적당한 간격으로 약15개 정도의 파장을 선택하면 충분하지만[6]본 연구에서는 좀더 정밀한 계산을 위하여 λ/L 이 0.1-5범위에서 50개의 파장을 선택하였으며 입사파의 각도는 0°-180°범위에서 30°간격으로 분할하여 7개 조우각을 대상으로 하였다. 따라서, strip 이론을 이용하여 적재조건, 파장 및 조우각을 조합한 총 $3 \times 50 \times 7 = 1050$ 개의 단위파고의 규칙파에 대한 계산을 수행하여 굽힘모멘트, 전단력, 파랑외압의 분포 및 동요가속도 등 파랑하중의 RAO를 계산하였으며 이를 작용하중으로 하여 파랑응력의 RAO를 계산하였다.

파랑응력 자체를 통계해석하는 이러한 방식은 파랑하중의 RAO를 이용하여 수백가지 이상의 하중조건에 대한 구조해석을 수행해야하는 문제점이 있기 때문에 일반선박에서는 잘 적용되지 못하고 있으나 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 채택함으로써 이러한 문제점을 극복하였다.

먼저 각 규칙파중에서의 구조해석 대상부위에 작용하는 각종외력은 Fig.5.1과 같이 정리할 수 있다. 이것은 다시 각 단위하중 별로 분류하면 Table 5.3과 같이 22개의 성분하중조건들을 도출할 수 있고 이 22개의 성분하중들에 대한 구조해석결과를 선형합산함으로써 Fig.5.1과 같은 1050개의 임의 하중상태에 대한 선체의 구조거동을 계산할 수 있다. 이때 구조해석 범위는 선체중앙부 2 Cargo hold를 대상으로 하였다(Fig.5.2).

다음 단계로서 각 단위파고의 규칙파에 대한 구조해석결과를 바탕으로 하여 통계응력해석을 수행한다. ISSC표준 스펙트럼과 Walden의 복대서양 관측자료[2]를 이용하였다. 관심대상 부위로는 가장 큰 응력이 작용될 것으로 예상되는 탱크적도부

Table 5.4. Long-term distribution of wave induced stresses in tank

(unti: kg/ mm²)

	Membrane		Bending	
	Mean	Ampl.	Mean	Ampl
equatorial	2.25	7.20	0.015	0.21
Bottom	3.90	1.47	0.292	0.08

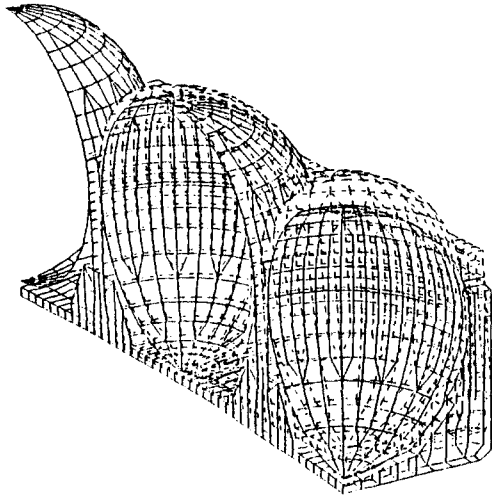


Fig.5.2 Deformed shape of structural analysis model

(equatorial)와 누설량이 가장 많은 것으로 예상되는 탱크 bottom부 두곳을 선정하였으며 이 부위들에서 계산된 파랑응력과 변동응력으로 구분하여 Table 5.4에 정리하였다. 또한 이 응력들의 탱크깊이 방향, 적도방향분포를 Fig.5.3에 도시하였다.

5.2 누적피해도에 의한 피로강도 평가

피로균열의 발생수명을 평가하기 위하여 Miner법

칙에 따른 누적피해도를 계산하여 IMO 기준과 비교 검토 하였다. 이때 파랑응력의 빈도분포는 Fig.4.3과 같은 방법으로 20개 block으로 이산화하였고 평균응력의 영향은 Smith의 타원방정식에 따라 변동응력진폭을 수정함으로써 고려하였다. 그리고 탱크재료 Al 5083-O재에 대한 설계 S-N곡선은 Fig.4.1로 주어지는 참고문헌[9]의 결과를 이용하였다. 이때 탱크구조는 전혀 보강이 없는 구형 Shell이므로 ①번 곡선을 적용하며 따라서 (4.2)식의 상수 k와 C는 각각 다음과 같이 주어진다.

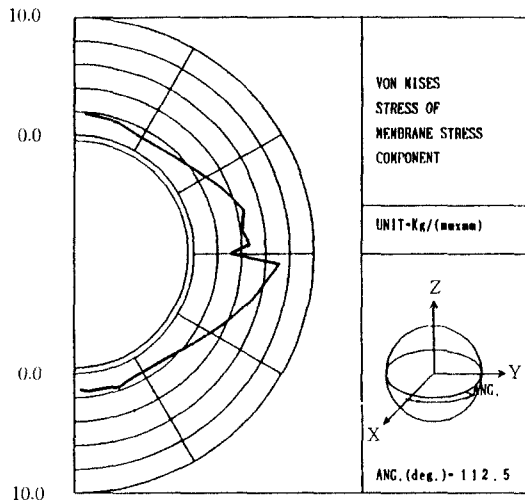
$$(K = 0.526, C = 3.36 \times 10^8)$$

최종적인 계산결과를 IMO 기준과 비교하여 Table 5.5에 정리하였다. 탱크 각 부분에서의 누적 피해도가 기준치보다 훨씬 작은 범위에 머무르고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 탱크의 구조형상이 응력집중부위가 없는 구형이며 작용응력의 크기가 극히 낮은 수

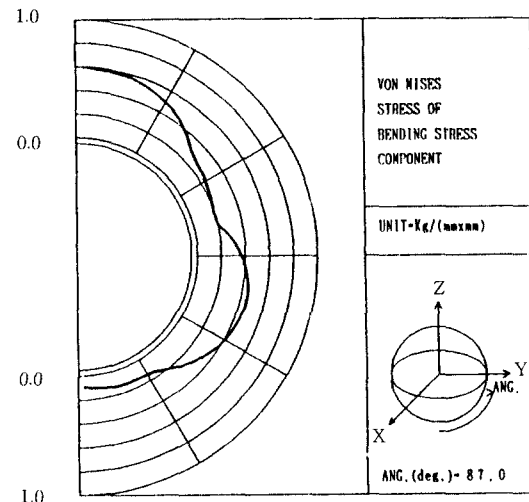
Table 5.5. Cumulative damage in tank

(unit : kg / mm²)

	변동응력	평균응력	D	C _w
equatorial	7.41	2.27	0.00488	0.5
Bottom	1.55	4.19	0.0001	0.5



a) Vertical distribution of membrane stress(amplitude)



b) Circumferential distribution of bending stress(amplitude)

Fig.5.3 Long term wave stresses in tank structure

준을 유지할 수 있도록 설계되었기 때문이며 또한, AI 5083-O 합금의 피로특성이 뛰어난을 입증하고 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 MRV 구형독립형 탱크방식 LNG 선의 전체적인 구조안전성 평가과정을 조명하는데 그 목적을 두었으며 시설계 선박에 대한 수치계산을 통하여 세부적인 문제들을 고찰하였다.

일반적으로 파랑응력 자체를 통계처리하여 장기분포를 결정하는 방식은 합리적인 피로, 파괴강도평가를 위해서는 필수적인 과정이기는 하나 수백개의 규칙파에 대한 구조응답을 모두 계산해야 하기 때문에 선박설계 분야에서는 적용하기가 비교적 어렵다는 단점이 있다. 본 연구에서는 임의 규칙파에서의 작용하중을 다시 22개의 하중요소로 분할, 선형합산하는 방식을 취함으로써 이러한 문제점을 극복할 수 있었으며 이러한 접근 방식은 일반선박 및 해양구조물의 구조안전성 평가에도 별다른 수정없이 그대로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 제1보에서는 파랑하중의 직접 계산 및 통계처리 기법에 바탕을 둔 파랑응력의 장기분포 계산기법, 탱크의 피로강도평가 분야에 중점을 두었으며 이후 피로균열진전해석, 온도분포해석 및 누설량, 증발량 추정기법등 LBF(Leak Before Failure)이론에 바탕을 둔 요소기술들을 계속 다룰 예정이다.

후기

본 연구는 과학기술처 특정연구개발사업의 일환으

로 수행된 연구결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- [1]Ffooks,R., *Natural Gas by Sea*, Gentry Books. London, 1979.
- [2]이호섭 외, "LNG 선의 구조해석 기술개발(I) (II),"한국기계연구소 연구보고서, 1989,1990.
- [3]IMO, "Code for Construction and Equipm ent of Ship Carrying Dangerous Chemicals Bulk, Including Its Amendments No.1-7," Resolution A 212(VII).
- [4]Okamoto, T., et al, "Safety Assessment of a LNG Tank System by Means of LBF Concept," 日立造船枝報, Vol.39, No.2,1978.
- [5]Kano, M., "Outline of the Hitachi Zosen-CBI Spherical Tank LNG Carrier," 日立造船枝報, Vol.39, No.2,1978.
- [6]신종계, 노인식, 신병천, 이호섭, 직접해석법에 의한 선체의 종강도 해석," 대한조선학회지, 제 21권 4호, 1984.
- [7]Harata,K.,et al, "Statistical Estimation of Tank Stress by Total System Analysis for Spherical Tank LNG Carrier (phase I, II)," 日立造船枝報, Vol.39, No.2,1978.
- [8]惠美洋産, 伊東利城, "LNG船(材料.溶接 あよび 破壊力學), (1)-(35),"船舶, Vol.47, No.9-Vol.50, No.10, 1974-1977.
- [9]日本造船研究協會 第8基準 研究部會, "LNG 運搬船の安全基準に關する調査研究報告書," 研究資料 NO.51,昭和 51年3月.