
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 34 卷 第 2 號 1997 年 5 月
 Journal of the Society of
 Naval Architecture of Korea
 Vol. 34, No. 2, May 1997

영향계수법과 스펙트럼 해석법을 이용한 선체의 피로강도평가

노인식*, 김재균**, 윤장호**

Fatigue Strength Assessment of a Ship Structures using the Influence Coefficient Concept and Spectral Analysis Technique

by

I. S. Nho*, J. K. Kim** and J. H. Yoon**

요 약

본 연구에서는 스펙트럼 해석법에 기초한 새로운 개념의 정밀한 선체구조 피로강도평가 시스템을 개발하였으며 membrane 방식 LNG 운반선을 대상으로 하여 수치계산을 수행함으로써 그 효용성을 검증하였다.

선체에 작용하는 파랑하중을 스트립 이론으로 직접계산하고 3차원 정밀 구조해석과 영향계수 개념을 도입함으로써 직접 해석법에 의한 파랑용력의 장기분포 예측을 실현하였다. 이를 바탕으로 Miner 법칙에 의한 누적손상도를 계산하여 설계기준과 비교, 검토하였다.

Abstract

The up-to-date fatigue strength assessment system for ship structures was developed based on the spectral analysis method and numerical calculation for a membrane type LNG carrier was carried out to verify the effectiveness of the developed system. The wave induced loads acting on the ship's hull were calculated based on strip theory. And introducing the concept of influence factor and 3-D fine mesh structural analysis, direct calculation of long-term distribution of wave induced stress components was realized. Using the derived long term distribution of stress components and Miner-Parmgren's linear damage accumulation rule, fatigue strength of structural components were investigated.

발 표: 1995년도 대한조선학회 춘계연구발표회('95.4.21)

접수일자: 1996년 8월 17일, 재접수일자: 1997년 3월 12일

* 정회원, 충남대학교 선박해양공학과

** 정회원, 삼성중공업(주) 선박해양연구소

1. 서 언

선박이 계획된 수명동안 주어진 기능을 다하기 위해서는 작용하는 하중으로부터 심각한 손상이 발생되지 않도록 구조적인 안전성을 확보하는 문제가 가장 중요하게 고려되어야 할 것이다. 최근에는 경제성 추구에 따른 선체 구조설계의 최적화, 경량화 경향과 더불어 고장력강이 대폭적으로 사용되고 있기 때문에 용접 연결부 등의 피로균열에 의한 손상발생 사례보고가 늘어나고 있으며 각 조선사 및 선급에서도 자체적인 피로강도 평가를 위한 지침서를 발간하는 등 관심이 고조되고 있다. 그러나 아직 일반적으로 수용될 수 있는 통일적인 규칙은 마련되지 못한 상태이며 기 발표된 지침서들도 파랑응력의 장기분포를 Weibull 분포로 가정하는 경험적인 단순해석법에 바탕을 두고 있기 때문에 좀더 신뢰성 있는 안전성 평가방법이 요구되고 있다. 파랑응력의 장기분포를 통계해석을 통하여 직접 결정하는 스펙트럼 해석법이 좀더 합리적인 방법으로 평가되고 있으나, 수백 가지에 달하는 파랑하중의 RAO에 대한 구조해석을 수행해야 하는 문제점이 있기 때문에 일반 선박에서는 잘 적용되지 못하고 있다.

따라서 본 연구에서는 선체에 작용하는 파랑하중의 성분을 분석하여 21개의 단위 하중성분으로 분해하고 각 파랑하중의 RAO 성분에 대한 구조응답을 이 단위하중에 의한 구조응답의 선형 합으로 나타내는 영향계수 개념을 도입함으로써 파랑응력의 장기분포를 직접 계산하는 방법을 개발하였다. 또한 membrane 형 LNG 운반선의 갑판 중통 보강재를 대상으로 스펙트럼 해석법에 의한 시계산을 수행하여 이 방법의 타당성과 수반되는 문제점들을 고찰하였다.

2. 선체구조의 피로강도 평가

2.1 스펙트럼 해석법에 의한 피로강도 평가

선체의 피로강도 평가방법은 파랑응력 장기분포의 해석방법에 따라 스펙트럼 해석법(spectral analysis)과 단순 해석법(simplified analysis) 2가

지로 구분할 수 있다.

스펙트럼 해석법에서는 스트립 이론을 이용하여 정밀하게 구해진 파랑하중을 이용하여 선체 각 부위에 작용하는 파랑응력의 응답함수를 3차원 유한요소해석으로 직접 계산한 다음, 해양파 스펙트럼, 통계해석 기법을 이용하여 파랑응력의 장기분포를 결정한다. 그러나 이 방법은 모든 파랑하중의 RAO 즉, 수백 가지 이상의 하중조건에 대한 구조해석을 수행해야하기 때문에 실제 적용에는 상당한 문제점이 있다.

따라서 각 선급에서는 좀더 간편한 방법으로 작용응력의 장기분포를 결정하는 단순해석법을 제안하고 있다[1]. 단순해석법에서는 기준 되는 발현확률 level의 설계파를 이용하여 구조해석을 수행하고 구해진 선체 굽힘응력과 국부변동압력 분포로부터 파랑응력의 장기분포를 결정하는 방식이다. 구조해석의 하중조건이 줄어들어 상당히 현실적인 방법이나 극한상태를 나타내는 설계파 몇 개의 영향만 고려되기 때문에 실제 선박의 운항시에 발생하는 다양한 파랑응력의 영향이 반영되지 못하고 있으며 Weibull 형상계수에 따라 장기분포를 경험적으로 결정해야 한다는 한계가 있다. 특히 대부분의 선체구조 피로손상은 극한의 대형파 때문이 아니라 빈번히 조우하는 보통 크기의 파도의 영향이 더욱 크다는 사실을 감안한다면 이 방법의 단점은 더욱 분명해진다. 따라서 좀더 합리적인 피로강도 평가를 위해서는 정밀한 스펙트럼 해석법이 요구된다.

이하 파랑하중의 직접해석을 통한 스펙트럼 해석법의 개요에 대하여 간략히 기술하였다.

2.2 파랑응력 장기분포의 직접계산

대부분의 선박에서는 파랑하중이 주관심 대상이 되며 이 파랑하중에 의해 발생하는 응력의 장기분포는 선체의 피로강도 평가에 직접 적용된다[2].

선체운동해석

여러 가지 경우의 단위파고 규칙파들에 대한 선체의 응답 즉, RAO 함수를 구하기 위하여 선체운동해석을 수행한다. 본 연구에서는 2-차원 스트립 이론을 이용, 선체의 파랑운동 응답을 계산하였다.

파랑응력의 응답함수

각 단위파고의 규칙파에서 파랑하중 응답함수(RAO)에 대한 선체의 구조응답 즉, 파랑응력의 응답함수를 계산하기 위하여 3차원 유한요소해석을 수행한다. 이때 응답의 peak 치를 구하기 위하여 선체와 파의 상대적 위치에 따라 in-phase인 경우(real part)와 out-of-phase(imaginary part)인 경우를 각각 계산하여 조합한다[3].

단기예측

20-30분 지속되는 단기적인 일정한 해상상태에 대한 선체응답을 예측하는 것을 단기예측이라고 한다. 파랑응답의 peak치를 Rayleigh 분포로 가정하면 파랑변동응력의 peak 치가 σ 일 확률 $p(\sigma)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p(\sigma) = \frac{2\sigma}{R} \text{Exp}(-\sigma^2/R) \quad (1)$$

이때, R 은 파랑응력의 누적에너지 밀도이며 다음 식과 같이 표시된다.

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

$$= \int_0^\infty [S(\omega)] [A(\omega)]^2 d\omega$$

여기서, $[f(\omega)]^2$ 과 $[S(\omega)]$ 는 각각 파랑응력 및 해양파 스펙트럼을 나타내며 $[A(\omega)]$ 는 응력 응답함수를 의미한다. (1)식을 이용하면 응력수준이 σ_1 을 초과할 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$q(\sigma > \sigma_1) = 1 - \int_0^{\sigma_1} p(\sigma) d\sigma = \text{Exp}(-\sigma_1^2/R) \quad (3)$$

장기 예측

(3)식으로 계산된 단기 파랑응력의 확률분포와 해상관측자료로 주어지는 각 해상상태의 발현확률을 적분하여 파랑응력의 장기분포를 예측한다. 일반적인 해상관측자료는 유의파고와(H) 와 평균파주기(T)를 기준으로 해상상태를 몇 단계로 분류하고 이에 대한 각각의 발현확률을 제시하고 있다.

따라서 선박의 운항항로에서의 해상관측자료로부터 구한 각 해상상태의 발현확률을 $p(H, T)$ 라 하면 선박과 파의 조우각에 대한 확률 p_θ 를 고려하여 파랑응력의 장기분포는 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$Q(\sigma > \sigma_1) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty q(\sigma > \sigma_1) p(H, T) p_\theta dHdTd\theta \quad (4)$$

2.3 피로수명 해석

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

S-N 선도

금속재료가 반복적으로 작용하는 응력을 받게되면 피로파괴가 발생할 수 있다. 이때 작용응력의 크기와 파괴가 일어날 때까지의 반복 작용회수 사이에는 상호 밀접한 관계가 존재한다. 주지하다시피 주어진 하중조건에서 실험적으로 구한 작용응력의 크기와 파단까지의 응력작용 cycle 수를 대비한 도표가 S-N 선도이다. 따라서 어떤 재료에 작용하는 반복응력의 크기를 안다면 S-N 선도를 이용하여 파손까지의 수명을 유추할 수 있게 된다. 실험된 결과를 양대수 좌표계에 표시해 보면 대체로 상당히 분산된 분포를 보이고 있으나 대체로 다음과 같은 직선식으로 근사한다[3].

$$\log N = \log C - m \log \Delta\sigma \quad (5)$$

이때 상수 m, C 는 실험결과로부터 적절한 확률 level로 fitting 하여 구해진다. 또한 변동응력의 크기가 작아지면 피로한도에 가까워짐에 따라 $10^6 \sim 10^7$ 회를 초과하는 반복응력 범위에 대해서는 직선의 기울기를 감소시키는 Heibach의 수정을 적

용한다.

평균응력의 영향

S-N 선도들은 완전 편진조건(R=0)의 변동응력 하에서 결정된 것들이 많다. 그러나 일반적인 구조물에서는 평균응력이 어떤 임의의 값으로 존재하는 경우가 대부분이므로 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 S-N 선도를 모두 제공하기는 현실적으로 거의 불가능하기 때문에 실제 실험치 대신에 평균응력이 zero 인 완전 양진응력의 경우를 기준으로 하여 근사적으로 추정하는 방법이 몇 가지 제안되고 있다[3]. 본 연구에서는 다음과 같은 Smith의 타원식을 이용하여 등가 응력 진폭을 결정하였다.

$$\Delta\sigma_e = \frac{\Delta\sigma}{[1 - (\sigma_m/\sigma_u)^2]^{1/2}} \quad (6)$$

여기서, $\Delta\sigma$, $\Delta\sigma_e$ 는 각각 변동응력진폭과 응력의 등가진폭을 표시하며(진폭은 peak-tp-peak치를 의미) σ_m 는 평균응력, σ_u 는 재료의 인장강도(일 반강 : 54 kg/mm²)이다.

누적손상도 법칙

선체구조와 같이 불규칙적인 응력상태하에 놓인 구조물의 피로강도 평가문제에 있어서는 S-N 곡선을 그대로 적용하기가 불가능하다. 따라서 이러한 구조물의 피로수명을 합리적으로 평가하기 위한 방법으로서 이른바 Palmgren-Miner 가설에 의한 누적손상도(cumulative damage) 이론이 가장 보편적으로 사용되고 있다[1]. 누적손상도 이론은 다음 식에서 보는 바와 같이 각 작용응력의 크기 별로 산출된 cycle 수를 이용하여 손상도를 계산하고 이를 선형적으로 합산한 누적손상도 D 가 어떤 값 η 를 넘어서게 되면 파손이 발생된다는 개념이다.

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq \eta \quad (7)$$

여기서, N_i 는 변동응력 진폭이 $\Delta\sigma_i$ 일 때 S-N 곡선에서 구한 파괴까지의 cycle 수이며 n_i 는 작용응력의 빈도분포로부터 추정된 σ_i 의 반복 cycle 수이다. D 가 1에 이르면 파손이 발생되는 것으로 생각하며 그때까지의 예상시간을 그 부재의 피로 수명으로 간주한다

응력의 빈도분포 및 이산화

파랑하중에 의한 장기응력의 빈도분포는 (4)식으로부터 직접 결정될 수 있다. 이렇게 구해진 파랑응력의 장기응력의 빈도분포를 S-N 곡선과 연결하여 실제 계산에 적용하기 위해서 Fig.1과 같이 이산화한다. 이때, block 수는 최소한 20개 이상 분할하는 것이 바람직하다. Fig.1에서 보는 바와 같이 block 수를 m 개로 분할했을 경우, 1 block의 폭은 log scale에서 $\log N_{all}/m$ 로 주어진다. 이것을 일반 scale로 나타내면, i 번째 응력진폭 $\Delta\sigma_i$ 에 대응되는 반복 cycle 수 n_i 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

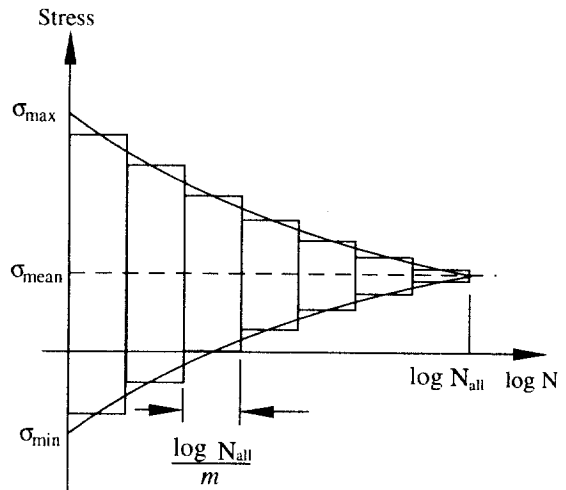


Fig.1 Discretization of stress distribution

$$n_i = (1 - 10^{-(\log N_{all})/m}) \times 10^{(i \log N_{all})/m} \quad (8)$$

여기서,

N_{all} = total number of cycles

3. 영향계수법에 의한 파랑응력의 응답함수 계산

3.1 개요

스펙트럼 해석법에서는 파랑응력 자체를 통계해석 하기 위하여 먼저 파랑하중 성분의 RAO 들에 대한 모든 구조응답을 계산하여 파랑응력의 응답함수를 도출할 필요가 있다. 앞서 밝힌 바와 같이 수많은 하중조건에 대한 구조해석을 수행해야하는 어려움이 있으나 본 연구에서는 다음과 같은 영향계수법을 적용함으로써 이러한 문제점을 극복하였다. 선체구조 중에서 가장 대표적이며 가장 큰 관심의 대상이 되는 부분은 중앙단면 부근이 되므로 중앙부 2 hold(1/2+1+1/2) 만을 대상으로 하여 구조해석을 수행한다. 먼저 각 규칙과 중에서 구조해석 대상부위에 평형상태를 이루며 작용하는 각종 파랑외력은 Fig.2와 같이 정리할 수 있다. 이 하중상태를 다시 성분별로 분해하여 각 하중성분

의 단위하중에 대한 구조응답을 구한 다음 이 성분별 단위하중에 대한 구조응답 즉 영향계수 (influence factor)들의 선형 합으로써 전체 하중상태에 대한 구조응답을 간단하게 표현할 수 있다.

3.2 하중성분의 분해

이 하중성분들은 파와 선체의 상대적인 위치에 따라 시간영역에서 정현파형으로 변화하는 변동하중 성분과 평균적으로 작용하는 정하중 성분의 합으로 간주할 수 있다. 따라서 파랑변동응력을 구하기 위해서는 변동하중만에 의한 구조응답을 추출해야 한다. 이때 가속도성분에 의한 관성력이나 양단의 단면력 등은 선체운동해석으로부터 계산된 값을 쉽게 사용할 수 있으나 선체에 작용하는 수압성분이나 탱크내부의 액체화물에 의한 압력성분

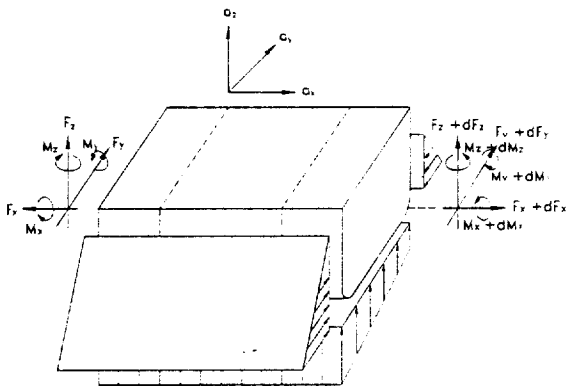


Fig.2 Wave loads acting on hull segment

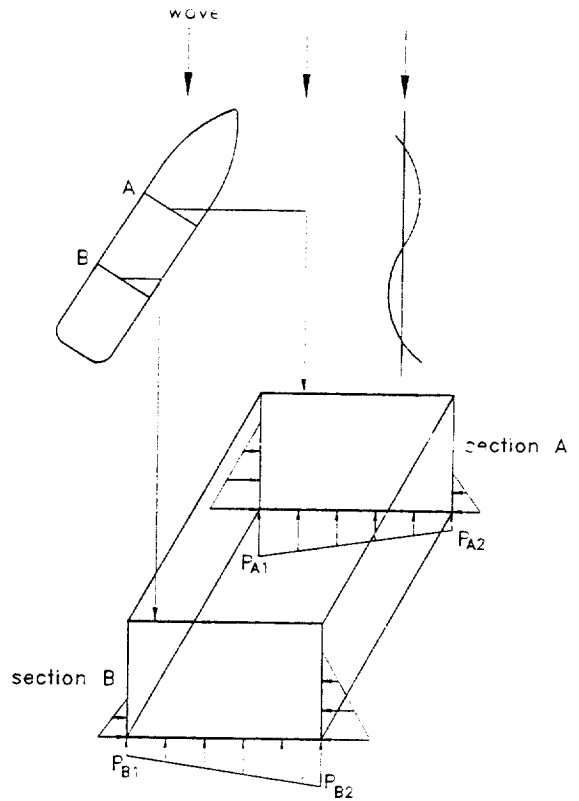


Fig.3 Pressure distribution of ship's hull in waves

은 비선형성을 보이고 있기 때문에 약간의 이상화 과정이 필요하다.

파랑외압의 비선형성과 선형화

대부분의 변동하중들이 정현파형으로 진동하고 있으나 선측에 작용하는 파랑외압은 홀수선 부근에서 수선면의 위치와 수압 작용범위의 변화에 따른 비선형성을 보이고 있고 파고가 커질수록 이러한 현상은 두드러진다[7].

Fig.3에서 보는 바와 같이 선체가 파도에서 운항할 경우, 임의 단면 A에서의 수압분포와 변동압력 성분은 Fig.4 처럼 나타낼 수 있다. 이때 홀수선 부근에서는 파저에서 수면위로 드러나거나 파정에서만 침수되는 부분이 존재한다. 이 부분의 범위는 파고에 따라서 결정되며 여기에 작용하는 수압은 정현파형이 아니다. 따라서 이 부분의 응력 또한 파고에 선형적으로 비례하는 것으로 간주하기는 어렵다. 그러나 기본적으로 스펙트럼 해석법의 응답함수 개념은 하중과 응답의 크기가 선형적인 비례관계를 유지한다는 가정 하에 성립되므로 이 비선형성을 적절한 방법으로 선형화할 필요

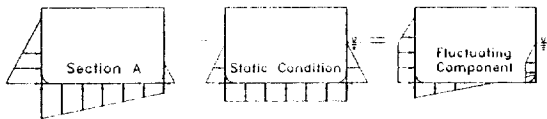


Fig.4 Fluctuating pressure at section A

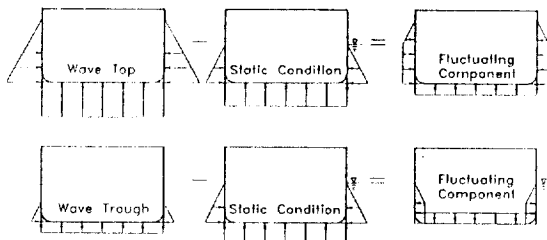


Fig.5 Fluctuating pressure distribution in wave top and trough

성이 있다. 예를 들어, 선체가 정면파에서 heave 운동을 하는 경우, 유체력의 동적 효과를 무시하고 수두에 의한 정수압 성분만 고려한다면 파정과 파저에서의 변동압력 성분은 Fig.5와 같이 나타낼 수 있다. 이때 선측의 홀수선을 기준으로 한 아래, 위 부근에서는 수압이 미치는 범위가 매시각 변화하기 때문에 삼각형 형상의 비선형성을 보이는 구간이 발생한다. 이 구간의 범위는 파고의 크기에 비례하므로 대파고가 아닌 경우에는 이 비선형성은 그다지 큰 영향을 미치지 않는 것으로 간주할 수 있고 따라서 Fig.6과 같은 이상화가 가능하다. 이때 선측의 변동수압은 깊이방향으로는 균일 분포가 됨을 유의할 필요가 있다. 앞서 밝힌 바와 같이 극한상태 대파고의 파가 선체의 피로강도에 큰 영향을 미치는 것은 아니라는 사실을 감안한다면 이와 같은 이상화 과정은 충분한 합리성을 갖는 것으로 보여진다.

결국 선저와 선측의 단위하중 성분들은 Fig.7, Fig.8과 같이 x, y 축에 대한 대칭성분과 역대칭 성분들로 분해할 수 있고 이 하중성분들의 합으로써 임의 형태의 파랑외압을 구현할 수 있다. 이때 선저에 작용하는 Fig.7(a)-(d)의 압력성분들은 각각 선측에 작용하는 Fig.8(b)-(e)성분들에 대응됨을 확인할 수 있다.

이와 같은 수압의 분해방법은 파장이 구조모델의 범위보다는 충분히 길어 이 범위내에서 수압의 변화가 거의 직선적으로 표현될 수 있다는 가정에 성립한다. 따라서 파장이 짧은 파에서는 정확도가 떨어질 수 있다. 또한, 일반적으로 선체운동 해석에서 계산된 선체외압의 분포는 선체 및 화물의 자중과 관성력에 평형을 이루는 결과를 주지 못하기 때문에 선체구조해석에서는 통상 선체외부에 작용하는 수압의 분포를 전체적인 힘의 평형을 유지할 수 있도록 적절히 조절하는 방법을 쓰고 있다. 본 연구에서도 각 수압성분의 크기는 각 하중조건별(파장, 입사각, 적재조건 등) 전체적인 힘의 평형을 고려하여 결정하였다. 이와 같은 방법을 이용하면 나머지 유체동역학적 힘들의 영향을 한꺼번에 등가 수압으로 간단히 처리할 수 있다는 장점이 있다.

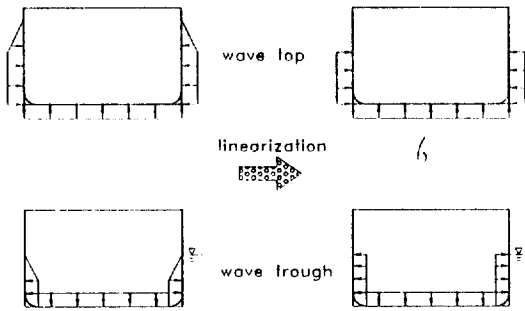


Fig.6 Linearization of fluctuating pressure distribution

액체화물탱크의 변동내압

선체의 운동에 의한 가속도는 구조부재 자체의 파도에 의한 정적수두 이외에도 관성력으로 변환될 뿐만 아니라 액체화물탱크의 내벽에서는 액체의 수두에 따른 압력으로 나타난다. x, y, z 방향의 가속도에 의한 변동압력을 과랑외압과 마찬가지로 x, y 축에 대한 대칭성분과 역대칭 성분들로 분해하게 되면 Fig.9와 같이 4개의 성분으로 분해할 수 있다. 이때 균일압력성분은 항상 양의 값을 보이며 변동주파수가 다른 성분의 2배수 값을 갖는다.

이와 같은 분해과정을 거치게 되면 결국 Table 1에서 보는 것과 같은 21개의 성분하중조건들을 도출할 수 있고 이 21개의 성분하중들에 대한 구조해석 결과 즉 영향계수들을 선형 합산함으로써 Fig.2와 같은 임의 하중상태에 대한 선체의 구조 거동을 계산할 수 있다.

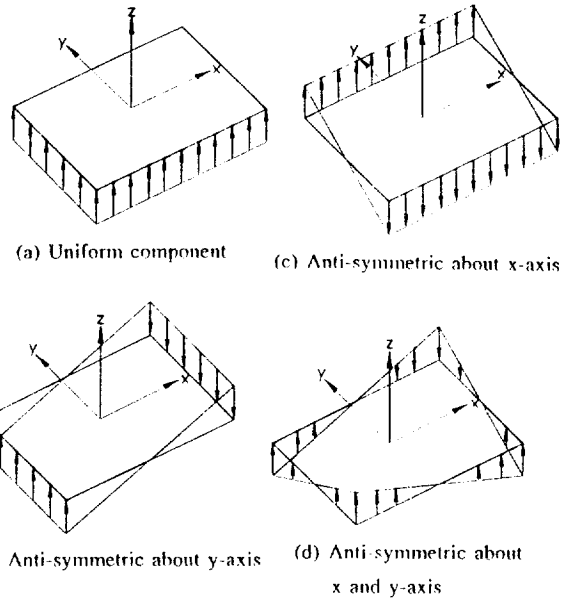


Fig.7 Load components on hull bottom

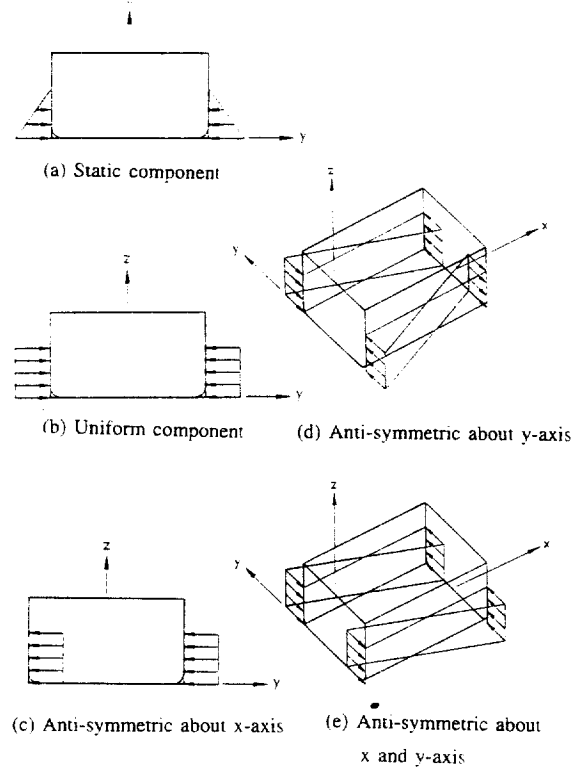


Fig.8 Load component acting on side shell

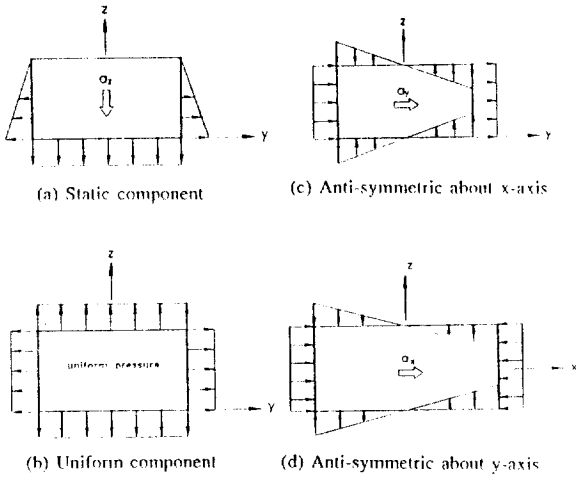


Fig.9 Pressure components acting on inside of cargo tank

Table 1 Load cases for wave load components

| 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 |
| • Inertia force due to x,y,z dir. acc. | 6-8 |
| • Water pressure on hull bottom -uniform, anti-sym components about centerline and midship | 9-12 (Fig.7) |
| • Water pressure acting on hull side -uniform, anti-sym components about centerline and midship | 13-17 (Fig.8) |
| • Pressure load at tank -uniform, anti-sym components about x,y,z direction | 18-21 (Fig.9) |

4. Membrane형 LNG 선에 대한 수치 계산 및 고찰

시설계된 Membrane형 LNG 선을 대상으로 하여 파랑응력의 장기분포를 계산하였으며 이를 바탕으로 관심부위에서의 누적손상도를 평가하였다. 대상선의 주요요목과 설계조건은 Table 2와 같다.

4.1 파랑응력의 장기분포

선체의 피로강도 평가에 필요한 작용응력을 결정하기 위하여 관심대상 부위에 작용하는 파랑응력의 장기분포를 계산한다. 이때 대상선은 만재상태와 발라스트상태에서 각각 50%의 운항확률을 갖는 것으로 가정하였다.

먼저 3.2절에서 설명한 영향계수를 구하기 위하여 선체의 중앙부 2 화물창을 Fig.10과 같이 모델링 하여 Table 1의 21개 하중성분에 대한 전체 구조해석을 수행하였다. 관심대상 구조를 갑판 중통재가 횡늑골을 관통하는 부위로 한정하고 이 부분을 다시 zooming하여 상세히 모델링 하였다. 21개 하중조건에 대한 전체구조해석의 결과를 경계조건으로 하여 상세해석을 수행함으로써 영향계수를 도출하였다.

Table 2 Principal particulars and loading conditions of membrane type LNG carrier

| Principal particulars | Ballast | Full load |
|-----------------------|---------|-----------|
| LOA(m) | 271 | " |
| LBP(m) | 260 | " |
| Breadth(m) | 42.6 | " |
| Depth(m) | 26.0 | " |
| Design speed(knots) | 19.5 | " |
| Draught Midship(m) | 9.69 | 10.55 |
| Displacement(ton) | 80,664 | 88,744 |
| LCG from AP(m) | 134.0 | 132.7 |
| VCG from BL(m) | 10.875 | 16.0 |
| Block Coefficient | 0.733 | 0.74 |

다음 단계로서 RAO 함수 계산을 위하여 λ/L 을 0.5~3.5 의 범위에서 적당한 간격으로 26개의 파장을 선택하였고 입사파의 각도는 $0^\circ \sim 180^\circ$ 범위에서 30° 간격으로 분할하여 7개 조우각을 대상으로 하였다. 따라서, 적재조건, 파장 및 조우각 그리고 in-phase와 out-of-phase의 경우를 조합한 총 $2 \times 26 \times 7 \times 2 = 728$ 개의 단위파고의 규칙파에 대하여 스트립 이론에 의한 선체운동해석을 수행하여 굽힘 모멘트, 전단력, 파랑 외압의 분포 및 동요가속도 등 파랑하중의 RAO 를 계산하였다. 이를 작용하중으로 하여 통계응력해석을 위한 파랑응력의 응답함수를 계산하였으며, 이때 해석 대상으로는 갑판중통재(150×90×12/12) 및 이에 접하는 횡늑골(12t) 부위를 선택 하였다.

통계해석에서는 ISSC 표준 스펙트럼과 BMT (British Maritime Technology)의 북대서양 파관측자료[1]를 이용하였다.

4.2 누적손상도에 의한 피로강도 평가

피로균열의 발생수명을 평가하기 위하여 Miner 법칙에 따라 누적손상도를 계산하였다. 파랑응력의 빈도분포는 Fig.1과 같은 방법으로 20개 block 으로 이산화하였고 평균응력의 영향은 Smith 의 타원방정식에 따라 변동응력진폭을 수정함으로써 고려하였다. 그리고 선체구조용 강재에 대한 S-N 곡선은 참고문헌[4]의 BS5400 선도를 이용하였다. 이때 갑판 중통재의 용접상세를 고려하여 F2 class 곡선을 적용하였으며 따라서 (5)식의 상수 m 과 $\log C$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

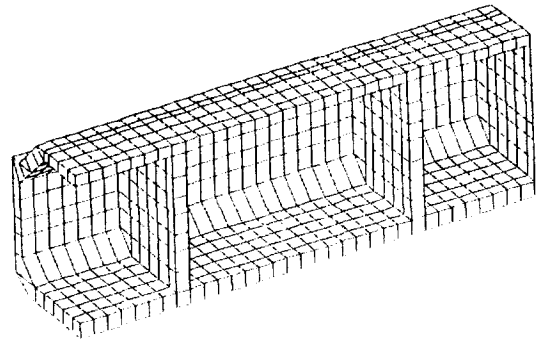
$$m = 3.0, \log C = 11.63 \quad \text{when } N < 10^7$$

$$m = 5.0, \log C = 14.72 \quad \text{when } N > 10^7$$

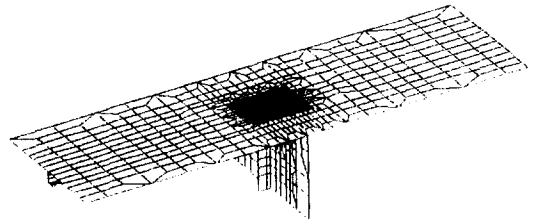
최종적인 계산결과를 Table 3에 정리하였다. 선체의 수명은 20년으로 간주하였고, 응력작용회수는 LACS rule에 따라

$$N_{all} = 5.35 \times 10^8 / 4 \log L \quad (9)$$

로 계산하였다. 대상 부위에서 계산된 10^8 발생확



(a) Global analysis



(b) Zooming analysis

Fig.10 Structural analysis model of 2-hold and zooming of deck longi. structure

Table 3 Results of fatigue analysis (cumulative damage)

| Position | $\Delta\sigma$ | σ_{mean} | D |
|--------------------------------|----------------|-----------------|--------|
| Trans. Web Stiffener Flange | 22.9 | 18.1 | 0.0002 |
| | 182.0 | 143.7 | 0.238 |
| | 132.1 | 103.4 | 0.084 |
| | 148.8 | 117.3 | 0.126 |
| Stiffener Web | 189.2 | 149.5 | 0.271 |
| | 219.2 | 173.2 | 0.442 |

(stress unit : N / mm^2)

물의 파랑변동응력(peak-to-peak치)의 장기분포를 평균응력과 구분하여 정리하였고 이에 따른 누적손상도를 나타내었다. 종통보강재가 관통하는 횡능골의 슬롯부분과 종통보강재의 web 및 flange에서 전체적인 응력수준은 상당한 크기에 이르고 있으나 누적손상도는 기준치 1 보다 상당히 작은 범위에 머무르고 있어 피로강도의 측면에서 별다른 문제점이 없을 것으로 보인다.

5. 결론

합리적인 선체의 피로, 파괴강도평가를 위해서는 파랑응력 자체를 통계 처리하여 장기분포를 결정하는 스펙트럼 해석법의 적용이 필수적이다. 그러나 수백 개의 규칙파에 대한 구조응답을 모두 계산해야하기 때문에 손쉽게 적용하기가 어려운 여러 가지 제약이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로서 영향계수를 이용하는 방법을 제안하였으며 Membrane 형 LNG 선을 대상으로 수치계산을 수행하여 이 방법의 적용성을 실증하였다.

임의 규칙파에서의 작용하중을 다시 21개의 하중성분으로 분해하여 이들에 대한 구조응답 즉 영향계수를 선형합산하는 방식을 취함으로써 수많은 하중조건에 대한 구조해석을 손쉽게 수행할 수 있었다.

본 해석 과정의 문제점은 다음과 같은 두 가지가 지적될 수 있다. 첫째, 스펙트럼 해석법의 적용을 위하여 선측에 작용하는 파랑변동수압의 비선형성을 단순한 형태로 선형화하였기 때문에 흡수선 부근에서 직접 수압의 영향을 받는 구조부재에 이 방법을 적용하는 것은 상당한 오차를 보일 수 있을 것으로 생각된다. 두 번째, 구조해석 모델링의 범위가 파장에 비해 비교적 짧은 것으로 가정하고 선체 길이방향으로 수압의 분포가 직선적으로 변화하는 것으로 이상화하였다. 그러나 이것은 입사파의 형상을 실제적으로 나타내기 어렵다는 문제점이 있고 파장이 짧을수록 정도는 더욱 떨어질 가능성이 있다.

이와 같은 몇 가지 문제점에도 불구하고 본 연구에서는 선체구조와 같은 복합하중을 받는 대형 구조물의 피로강도해석에 좀더 합리적인 스펙트럼 해석법을 적용할 수 있는 가능성을 제시하였으며, 지적된 문제점들은 추후 연구를 통하여 좀더 깊이 있게 검토되고 보완될 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

- [1] Det Norske Veritas, "Fatigue Assessment of Ship Structures", DNV Technical report 93-0432, 1994.2.
- [2] 노인식, 남용운, 이호섭, "독립구형 LNG 탱크의 구조안전성 평가 (제1보) -피로균열 발생수명 예측", 대한조선학회 논문집, 제30권 제2호, pp132-140, 1993.5.
- [3] 이호섭 외, "LNG 선의 구조해석 기술개발(II)," 해사기술연구소 연구보고서, 1989. 10.
- [4] British Standard, "Steel, Concrete and Composite Bridges", BS5400:Part 10, 1980.
- [5] 신종계, 노인식, 신병천, 이호섭, "직접해석법에 의한 선체의 종강도 해석," 대한조선학회지, 제21권 4호, pp40-48, 1984.
- [6] 김정제, 윤범상, 양박달치, "선체의 스펙트럼 피로 해석에 대한 효율적인 계산방법", 1993년도 대한조선학회 춘계연구발표회, pp201-207, 1993.4.
- [7] IMO, "Code for Construction and Equipment of Ship Carrying Dangerous Chemicals Bulk, Including Its Amendments No.1-7," Resolution A 212(VII).
- [8] Nakajima, Y. and et al, "Fatigue Strength Design of Ship Structure", 石川島播磨技報, 第32卷5號, pp339-345, 1992.9.
- [9] Hughes, O.F., Ship Structural Design - A Rationally -Bsed, Computer-Aided, Optimization Approach, 1983, John Wiley & Sons, Inc.
- [10] 삼성중공업(주), "Sea Load를 고려한 선체구조 해석 시스템 사용자 지침서", SHI Report No. XD-0012
- [11] 신찬호 외, "선체구조의 피로강도평가 지침", 한국선급, 1996. 3.