
 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 Architects of Korea
 Vol. 34, No. 2, May 1997

D/H VLCC의 피로강도해석과 피로 신뢰성해석

양박달치*, 이주성*, 윤장호**, 서영석***

Fatigue Strength Analysis and Reliability Analysis of D/H VLCC

by

P.D.C. Yang* , J.S. Lee* , J.H. Yoon** and Y.S. Seo***

요 약

선박의 구조설계 기술의 발전과 고장력강 사용 비율이 증가함에 따라 변동하중에 의한 피로 파괴에 대한 필요성과 중요성이 강조되고 있으며, 특히 VLCC와 같은 대형선박의 경우에 더욱 중요하게 고려할 점으로 널리 인식되고 있다. 따라서 설계단계에서 피로강도해석을 수행하고 이에 대한 안전성평가를 수행하여, 그 결과를 구조설계에 반영함으로써, 피로현상에 의한 구조적 파괴를 미연에 방지할 수 있도록 해야 할 것이다.

본 논문에서는 효율적인 피로강도해석을 위해, 응력영향계수의 개념을 도입한 확률적 하중해석, 응력범위의 장기분포, 스펙트럼 피로강도 해석법을 적용한 피로수명의 예측에 대해 기술하였고, 개발한 전산 시스템을 이중선각 초대형 유조선 (D/H VLCC)에 적용한 결과를 다루고 있다. 또한 설계변수들의 불확실성을 고려한 피로강도에 대한 신뢰성 해석도 포함하고 있다.

Abstract

The necessity and importance of fatigue failure to variable load has been appreciated as the structural design technique develops and use of high tensile steel is increasing. This is much more appreciated for a large ship such as VLCC. The rigorous fatigue analysis and safety assessment should be, hence, carried out at the design stage to avoid the possibility of fatigue failure and to achieve the design result having a sufficient structural safety to fatigue strength.

발 표 : 1996년도 대한조선학회 춘계연구발표회('96. 4. 18)

접수일자 : 1996년 5월 31일, 재접수일자 : 1997년 4월 10일

* 정회원, 울산대학교 조선해양공학과

** 정회원, 삼성중공업 선박해양연구소

*** 삼성중공업 선박해양연구소

This paper deals with an efficient spectral fatigue analysis of ship structures by introducing the concept of stress influence coefficient. In the process included are probabilistic loading analysis, evaluation of long-term distribution of stress range and estimation of fatigue life applying the spectral fatigue analysis. An integrated computer program has been developed in which reliability analysis to fatigue strength is also included and has been applied to D/H VLCC.

1. 서 론

선박 및 해양구조물의 설계시 중요하게 고려되는 과량하중은 특성상 반복적으로 작용하므로 그로인해 발생할 수 있는 피로파괴는 설계자의 주요 관심사로 되어 왔다. 과거의 설계과정에서는 피로파괴에 대해 엄밀한 해석을 수행하지는 않았으나, 최근 구조적 안전성이 보장된 선박의 설계와 건조를 위한 규정의 강화로 고강도, 경량화 재료의 사용이 증가함에 따라 피로파괴에 대한 관심이 높아지게 되었다[1]. 선박해양구조물에 가장 빈번히 발생하는 파괴양식 중의 하나인 피로파괴에 대한 해석은 그 불확실성이 매우 높으며, 피로해석 결과에 오차를 유발시키는 요인은 크게 하중추정과 피로강도 모델의 불확실성으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 이중선체구조의 대형유조선에 대상으로 하여 피로강도를 보다 합리적으로 추정할 수 있는 스펙트럼 피로강도해석법의 적용을 다루었다.

선박의 운항 실패역의 스펙트럼 해석을 통한 피로해석은 충분한 이론적 배경에 근거하여 검토부위에 작용하는 응력범위의 장기분포를 구한다는 점에서 과거의 방법보다는 합리적인 것으로 최근에 각 선급협회에서 개발된 바 있다[1-3]. 그러나 이러한 기존의 스펙트럼 피로해석법을 선박에 적용하는 경우에는 선체구조전체를 해석모델로 하여 많은 파주파수의 운동응답과 과량하중 추정결과에 대한 구조해석을 수행하여야 하므로 많은 계산시간과 노력이 필요하다는 결점이 있다. 이러한 결점때문에 IACS에서는 단일화된 과정 (unified procedure)의 피로강도해석법을 제안한바 있고, 이에 따라 각 선급별로 단순화된 피로해석법을 제시

하고 있다[1,4].

본 연구에서는 이러한 종래의 방법을 개선하기 위하여 선박의 운항 실패역에 대한 운동해석과 과량하중을 추정하고 응력영향계수 (stress influence coefficient) 의 개념을 도입한 효율적인 구조해석을 수행하고, 응력범위에 대한 통계적인 분포를 구하여 피로손상을 구하는 일관된 피로강도해석법을 개발하였으며 이를 이중선각 초대형 유조선 (D/H VLCC) 구조에 적용하였다. 또한 피로강도에 대한 안전성 평가의 일환으로서 이에 포함되는 변수들의 불확실성을 합리적으로 고려할 수 있는 피로신뢰성해석에 관한 내용도 포함하였다.

2. 스펙트럼 피로강도 해석법

2.1 개 요

본 연구에서 개발한 스펙트럼 피로해석시스템은 운동응답 및 과량하중해석, 구조해석, 피로손상해석 등 크게 세 부분으로 구성되어 있다. 운동응답 및 과량하중해석에서는 규칙파 중에서 선체에 작용하는 운동응답 및 과량하중을 구하기 위하여 2차원 스트립이론을 적용하였고 이로 부터 구조해석을 위한 단면하중과 압력분포가 도출된다. 구조해석은 피로강도를 검토하고자 하는 부위에서의 1.5 Hold의 단위구조를 해석모델로 하여 응력영향계수의 개념을 도입하여 수행하였다. 응력영향계수의 개념을 도입하는 구조해석과정은 스펙트럼 피로강도 해석과정을 크게 단순화시킬 뿐만 아니라 구조해석을 과량하중 해석과는 별도로 수행할 수 있다는 장점이 있다. 피로손상해석은 하중 및 압력분포 RAO 와 응력영향계수를 종합하여 구조

각 부위의 응력전달함수를 구하고 응력범위의 장기분포를 구하여 피로손상율과 수명을 구하는 과정이다.

2.2 피로강도 모델

다양한 해상상태에서 운항하는 선박의 피로손상은 서로 다른 크기의 응력범위에 의한 손상결과의 누적으로 파괴에 이르는데, Palmgrens-Miner 법칙에 따르면 피로손상율, D는 아래의 (1)식과 같이 정의된다.

$$D = \sum_{i=1}^M \frac{n_i}{N_i} = \int_0^{\infty} \frac{N_o f(s)}{N(s)} ds \quad (1)$$

여기에서 S는 응력범위, M은 응력범위불러의 수, No는 해당 기간동안 작용하는 사이클 수, N(s)는 일정 응력범위 S에 대한 피로파괴횟수이고, f(s)는 응력범위 S의 확률밀도함수이다. 이 식에 S-N 곡선의 식을 대입하면

$$N(s) S^m = A \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^M n_i S_i^m = \frac{N_T}{A} E(S^m) \quad (3)$$

여기에서 NT는 선박이 일생동안 경험하는 총 사이클 수이고, E(S^m)은 S^m의 기대값이다.

S-N 곡선의 자료로서는 현재 선박해양구조분야에서 가장 많이 사용되고 있는 영국의 해양구조물 설치에 대한 피로설계규정[5]의 S-N 자료를 이용하였다.

2.3 응력범위의 전달함수

응력범위 전달함수는 단위파고에 대하여 선체구조응답인 특정 부위에 작용하는 응력범위로 정의한다. 응력범위 전달함수는 특정 파입사각, 파주파수에 따라 달라지고, 그 크기는 하중전달함수로부터 얻어지는 각 하중성분에 대한 구조해석 결과를 조합하여 얻어진다. 근래에는 전-후처리 기능을 갖춘 유한요소해석 프로그램을 적용하여 구조해석을 효율적으로 수행하고 있으나, 파입사각과 파주파수의 변화에 따른 많은 횡수의 구조해석을 수행해야 하므로, 보다 효율적인 구조해석방법이 요구된다.

최근에 발표된 ABS의 피로해석방법[3]에서는

최대하중이 나타나는 대표적인 파주파수 근처의 3개 정도의 주파수에 대하여 해석하고, 나머지 주파수에 대해서는 비례적으로 결과를 구하는 방법을 제안하고 있다. 그러나 이와같이 단순화된 과정으로 얻어지는 응력범위 전달함수는 실제와는 차이가 있다. 본 연구에서는 Fig.1에서와 같이 선박 종방향으로의 부분구조를 해석모델로 정해서 모델구조의 한단면에서는 운동응답해석 결과로 주어지는 단면하중을 가하고, 다른 단 까지 작용하는 압력분포를 분포하중으로 가해 단면내 국부위치에서의 응력을 구하는 방법을 사용한다. 그리고 다른 단을 고정단으로 취하면 정적인 평형상태를 이루게 된다. 이 개념을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_{iR} &= \sum_{j=1}^{n+5} K_{ij} R_{jR} \\ &= \sum_{j=1}^{n+5} K_{ij} (R_{jR})_o \text{Re}[e^{i\omega_e t}] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{iI} &= \sum_{j=1}^{n+5} K_{ij} R_{jI} \\ &= \sum_{j=1}^{n+5} K_{ij} (R_{jI})_o \text{Im}[e^{i\omega_e t}] \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 σ_i 는 응력 성분으로서 $i=1, 2, 3$ 은 각각 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 에 해당되고, 하첨자 R과 I는 각각 실수항과 허수항을 표시하며, n은 압력분포를 이상화 할 때 필요한 항의 수이다[6,7]. K_{ij}는 j번째 단위하중성분에 대한 응력값으로, 이를 응력영향계수라고 정의하는데 이를 적용하면 응력범위 전달함수를 구하기 위해 여러 주파수에 대한 구조해석을 수행할 필요가 없기 때문에 응력범위 전달함수를 효율적으로 구할 수 있다. 또한 한번의 구조해석으로 응력영향계수가 구해지면, 여러 진진각에 대해서 별도의 구조해석을 수행할 필요 없이 그대로 적용이 된다.

다축응력상태에서의 피로해석을 위한 유효응력범위는 일반적으로 최대주응력범위, DsP가 사용되고 있다[8].

$$\begin{aligned} \sigma(\omega_e, \delta) &= \Delta \sigma_p \\ &= \frac{(\sigma_1 + \sigma_2) + 2\sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)/2]^2 + \sigma_3^2}}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

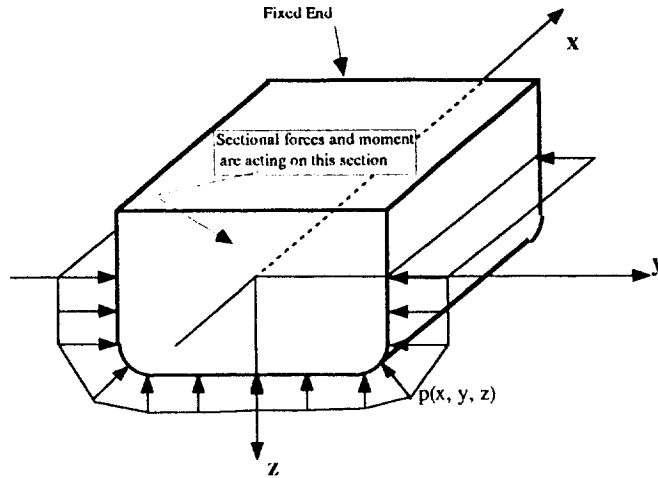


Fig.1 Sectional forces and pressure distribution for the structural unit of midship

운동방정식의 해는 파의 절대 주파수 (ω)를 변화시키면서 해석되므로 (6)식의 응력범위 전달함수를 절대주파수 (ω)로 표시하면 다음과 같다.

$$\sigma(\omega_e, \delta) = \sigma(\omega, U, \delta) \quad (7)$$

2.4 응력범위의 장기분포와 피로손상을

선박이 단기간 동안 불규칙파 중에서 일정한 속도와 전진각을 가지고 움직일 때 구조응답 결과인 응력범위 스펙트럼은 파 스펙트럼과 응력범위의 전달함수의 조합으로서 아래의 식과 같이 표시된다[9].

$$S_{\sigma}(\omega_e, \delta) = S(\omega_e) \sigma^2(\omega_e, \delta) \quad (8)$$

여기에서 $S(\omega_e)$ 는 파 스펙트럼으로서 본 연구에서는 ITTC 스펙트럼 (ITTC 1972)을 사용하였다. ω_e 는 입사파의 주파수이고, δ 는 평균파 방향과 파 성분사이의 각을 표시한다.

2.2절에서 언급한 바와 같이 변동진폭하에서의 피로손상은 Palmgrens-Miner의 법칙에 의해 구한다. 이를 위해 (1)과 (3)식에서 보는 바와 같이 응력범위의 확률밀도함수가 정의되어야 하는데, 단기해석 시 응답이 Rayleigh 분포를 따른다는 가정하에 응력범위의 장기분포를 나타내는 확

률밀도함수 $f(s)$ 는 아래의 식과 같이 표시될 수 있다[10].

$$f(s) = \frac{\sum_j \sum_k \sum_l n^* p_j p_k p_l (s / V_T^2) \exp[-s^2 / (2 V_T^2)]}{\sum_j \sum_k \sum_l n^* p_j p_k p_l} \quad (9)$$

이식에서 V_T^2 는 응력범위분포의 분산으로 응력범위 스펙트럼의 0차 모멘트이다. p_j 는 해상상태에 대한 가중치로서 특정 유의파고와 파주기에 대한 발현확률로 파산포도 (wave scatter diagram)의 자료로부터 구하게 되는데 본 연구에서는 북대서양의 파산포도를 이용하였다. 또한 p_k 는 특정 파입사각에 대한 확률이고 p_l 는 특정 선박 속도에 대한 확률인데, p_k 는 모든 입사각에 대해 동일한 값을 부여하였고, p_l 에 대한 값은 잠정적으로 Table 1의 값을 사용하였다. n^* 는 특정 선속, 파입사각, 파주파수에 대한 응답 (응력범위)의 단위시간당 평균 사이클수이다.

Table 1 Probability of ship speeds, p_l

Froude number	0.0	0.05	0.10	0.1408
probability	0.05	0.15	0.40	0.40

(9)식을 (3)식에 대입하면 피로손상율을 구할 수 있는데, Wirshing[11,12]과 Zao[13]의 연구결과에 의하면 응력범위의 단기분포로서 Rayleigh 분포를 사용하는 것은 너무 안전한 결과를 주므로 rain-flow 수정계수를 적용하면 피로손상율은 다음 식과 같이 된다.

$$D = \frac{3600}{A} T 2^{m/2} \Gamma(m/2 + 1) p_l V_T^m \sum_j \sum_k \sum_l \lambda(m, \epsilon) n^* p_j p_k \quad (10)$$

여기에서 T는 선박의 수명동안 운항시간, $\Gamma(-)$ 는 Gamma 함수, $\lambda(m, \epsilon)$ 는 rain-flow 수정계수이고 [11], ϵ 은 응력범위 스펙트럼의 폭계수이다.

2.5 구조해석

피로손상은 선체구조의 매우 국부적인 부위에 현상이므로 해당부위 또는 연결부의 실제적인 응력추정이 가능하도록 유한요소해석 모델이 설정되어야 한다. 이러한 모델링에는 구조의 강성도(stiffness)가 적절히 포함될 수 있어야 할 뿐만 아니라 피로손상이 장시간에 걸쳐 누적되는 파손이므로 부식의 영향 등 피로 외적인 요소의 영향을 고려해야 하지만 여기에서는 구조물의 초기상태가 피로외적인 요소에 영향을 받지 않는다고 가정하였다.

구조해석에서 사용되는 하중은 2.3절에서 언급한 바와 같이 응력영향계수를 구하기 위하여 하중의 성분별로 단위크기에 대한 각각을 고려하면 된다.

DEn[5]의 S-N자료에서는 용접연결부의 형상별로 등급이 정해지는데 이는 용접부의 용접 시임(weld seam)으로 인한 국부적인 응력집중효과는 포함되어 있으므로 용접부 근처의 공칭응력의 크기를 구하기 위해 적절한 유한요소의 분할이 채택되어야 한다. 다만 용접부 근처 구조물의 기하학적 형상 변화로 인한 응력집중은 고려될 수 있도록 요소분할이 되어야 한다.

선체의 피로해석을 위한 구조해석 모델은 본 연구에서 제안한 중앙부의 단위구조로 택할 수 있는

데 최소한 한개의 화물창은 포함되어야 한다. 이에 대한 구조해석에서는 상세구조요소의 분할을 국부적으로 수행하여야 하는 어려움이 있다. 또한 국부적인 요소의 크기에 대한 설정이 중요한데 이는 S-N 곡선자료를 얻는데 사용한 실험모델과 연계하여 결정되어야 한다. ABS[3]에서는 상세구조해석을 사용하여 응력을 구하는 경우의 적정 요소분할에 대하여 제안한 바 있다. 본 연구에서는 중앙부 단위구조에 대하여 상대적으로 큰 요소를 사용한 1단계 구조해석과 그 결과를 이용하여 국부구조의 상세구조해석을 수행하는 2단계 해석과정을 사용하였다.

3. 피로 신뢰성해석

피로강도해석에는 피로강도 자체 뿐만 아니라 이에 적용하는 방법, 하중해석방법 등에 많은 불확실성이 필연적으로 내포되며, 이러한 경우에는 안전계수를 기준으로 피로강도에 대한 안전성을 평가하기 보다는 구조 신뢰성 해석법을 적용하여 피로강도에 대한 구조적 안전성을 평가하는 것이 보다 합리적이다 [14].

누적피로손상의 정도는 전절에서 기술한 바와같이 S-N 곡선을 이용하고 Palmgren-Miner의 법칙에 의거하여 식(3)으로부터 추정할 수 있는데, 응력범위, S의 편중계수(bias factor)를 고려하면 피로손상율은 아래의 식과 같이 유도된다[14].

$$D = \frac{N_T}{A} B^m s_o^m [(\ln N_T)^{-m/h} \Gamma(1 + m/h)] \quad (11)$$

이식에서 B는 응력범위의 편중계수로서 하중해석에 포함되는 불확실성을 반영하는 변수이다. so는 특정응력범위(design stress range)로서 선박이 일생동안 경험하는 총 사이클 수 NT 동안 단 한번 발생하는 응력범위이고, 이는 응력범위의 장기분포 결과에서 구한다. 허용 피로손상지수를 Δ 라고 하면, 피로손상의 누적으로 인한 파괴는 $\Delta < D$ 일때 발생하며, 따라서 피로강도를 기준으로 신뢰성 해석을 위한 안전여유식은 다음 식과

같다 [14].

이식에서 보는 바와같이 피로신뢰성해석에 포함되는 확률변수는 허용 피로손상지수, Δ 와 응력범위의 편중계수, B와 S-N 곡선의 피로강도계수, A로서 세개의 변수가 포함된다. 이들 확률변수의 불확실성의 정도는 상당히 큰 값을 갖으며 또한 일반적으로 넓은 범위에서 변화하는데, 본 연구에서의 불확실성 모델링은 확률변수의 분포형태를 포함해서 Table 2에 정리한 것을 이용하였다[14].

$$g = \Delta - D$$

$$= \Delta - \frac{N_T}{A} B^m s_o^m \quad (12)$$

$$[(\ln N_T)^{-m/h} \Gamma(1 + m/h)]$$

Table 2 Uncertainty modelling of random variables for fatigue reliability analysis

variable	mean	COV	distribution type
Δ	1.0	0.20	log-normal
B	1.0	0.16	log-normal
A	refer to S-N curve [5]	0.15	extreme type-I

4. 계산결과

4.1 대상선박

본 연구에서 해석 대상선으로서 이중선각 유조선을 채택하였으며 그 주요 요목은 Table 3과 같다.

Table 3 대상선박의 주요치수

Length overall, LOA	330 m
Length water-line, Lpp	318 m
Breadth moulded, B	58 m
Depth moulded, D	31.2 m
Scantling dtaft, d	22.6 m
Design Speed, V	15.3 Knots

4.2 해석대상 부위와 구조해석

구조해석은 NASTRAN (Version 68.0)을 사용하여 수행하였고 그 결과는 각 하중 성분의 단위 크기에 대한 응답으로 응력영향계수로서 정리되었다. 구조해석모델은 1단계의 선체중앙부모델과 2단계의 부분상세모델을 사용하였다. Fig.2은 대상선박의 중앙부 1.5-hold에 대한 1단계 구조해석모델의 유한요소 분할형상이다. 구조해석시 지지조건은 모델의 우측단면을 고정단으로 하였다. 구조해석에 사용되는 하중은 2.3절에서 언급한 바와같이 5개의 단면하중 성분과 모델의 길이 방향으로 5개의 station이 걸치므로 각 station 별 선체 작용하는 이상화된 압력분포의 4개항을 사용하여 전체 25개의 단위크기의 하중성분으로 구성된다.

피로강도 검토부위로서는 중통부재가 외측관을 관통하는 수선의 상부 위치 (side-1)와 수선의 하부 위치 (side-2)를 선택하였고, Fig.3은 피로강도 검토부위로서 선측구조의 중통부재가 관통하는 부위에 대한 상세요소분할 형상을 보여준다. 각 위치 별 요소에 대한 응력영향계수의 결과는 피로강도해석에서 직접 사용되는 것으로 NASTRAN의 구조해석 결과의 각 요소에 대한 응력값으로부터 선택하여 화일을 구성하는 프로그램을 이용하여 생성된다.

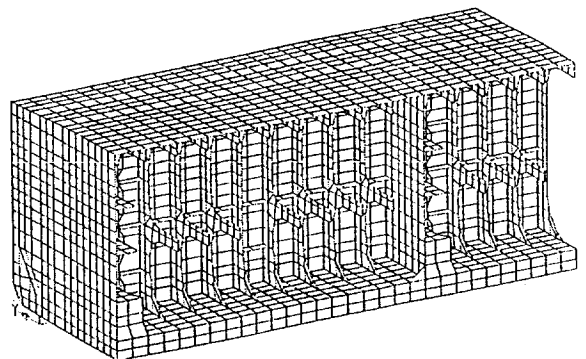
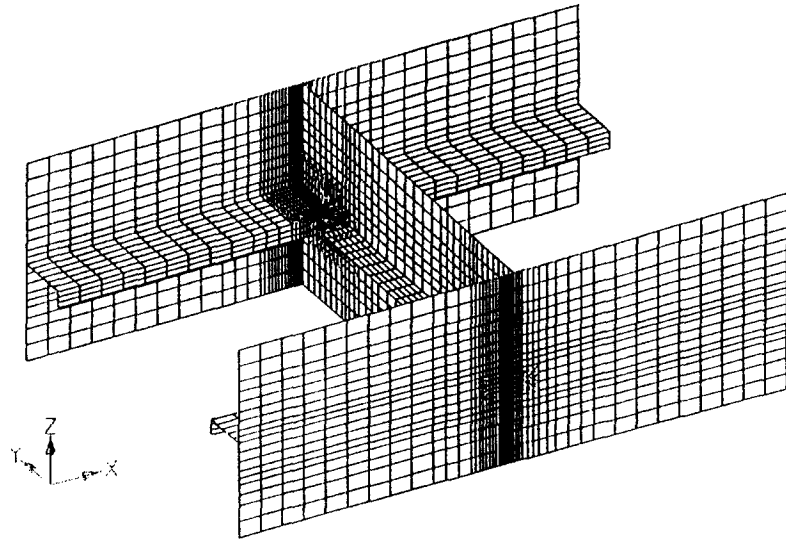
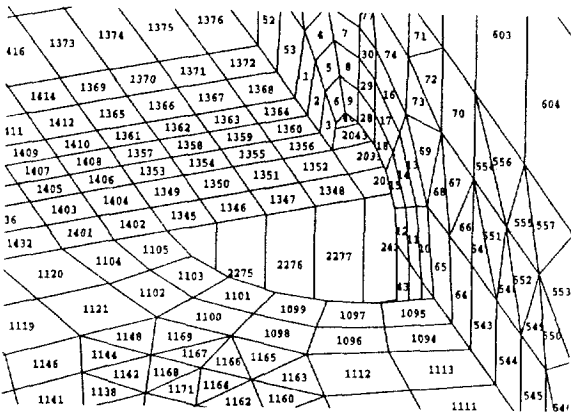


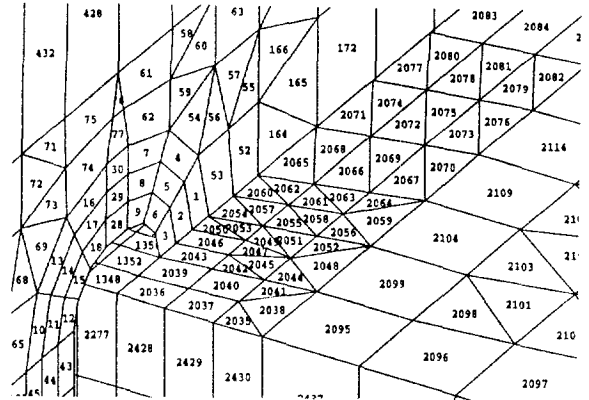
Fig.2 Finite element coarse mesh model of ship structure



(a) side structure



(b) detail of fine mesh model
: upper forward view



(c) detail of fine mesh model
: upper backward view

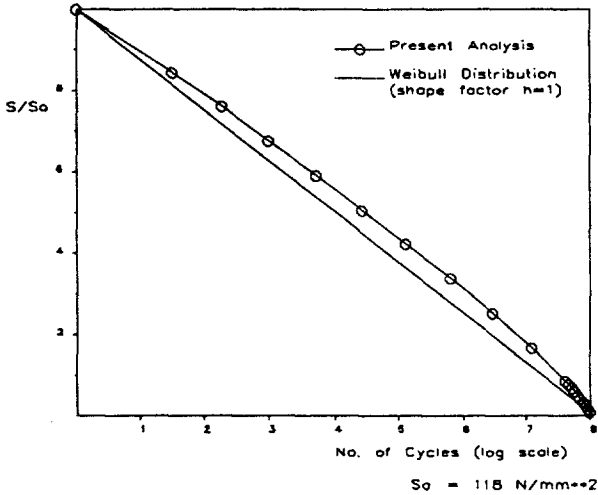
Fig.3 Finite element fine mesh model

4.3 응력범위의 장기분포 결과

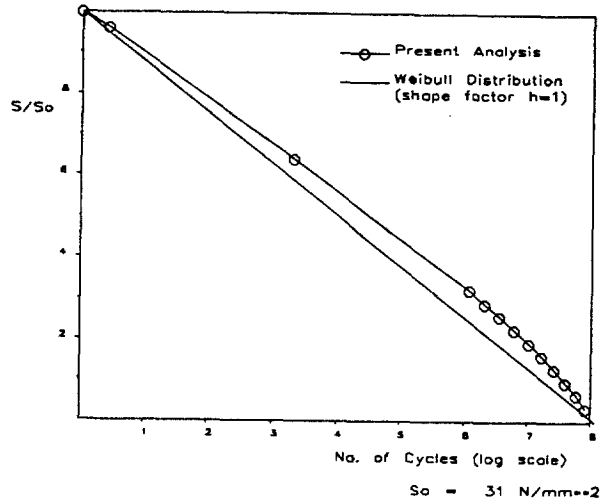
운동해석을 통한 파랑하중의 추정은 4가지 경우의 선속(Froude No. 0.0, 0.05, 0.1, 0.1408)과 단위 파고에 대하여 파입사각 0o, 30o, 60o, 90o, 120o, 150o, 180o 의 7가지 경우와 파 주파수 $\omega\sqrt{L/g} = 1.0\sim 10.0$ 에 대하여 0.2 간격으로 46개와의 조합, 즉 1288개의 경우에 대한 해석을 수행하였다.

선박의 전 수명을 20년으로 하고 Table 2의 운항조건을 가지는 경우 구조의 검토부위에 작용하는 응력의 총 사이클수는 약 1.13×10^8 으로 계산되었다. 응력범위의 장기분포의 예로서, 검토구조부위에 포함된 element no.3과 1356의 경우에 대해 Fig.4에 예시하였다. Fig.4에서 대각선은 Weibull shape parameter $h = 1.0$ 인 경우의 Weibull 분포

곡선이다.



(a) element no. = 3



(b) element no. = 1356

Fig.4 Example of long-term distribution of stress range

4.4 피로손상의 계산결과

검토투부의 피로특성은 판과 보강재의 용접부와 판과 면재 또는 측판과의 용접부위를 포함하는 것으로 하중 방향에 따라 F와 F2 등급의 것을 사용해야 한다. 해당부위에 작용하는 주응력의 방향은 응력성분들의 조합으로 구하게 되는 것인데 각 응력성분들의 크기가 시간에 따라 변하게 되고 여러 파주기에 대한 조합을 고려하면 일정 방향을 가지지 않는다는 것은 명확하다. 따라서 적용할 S-N 곡선의 등급을 결정하는 것이 문제가 되는데 이에 대해서는 앞으로 실험연구를 포함하는 추가연구가 필요한 부분이라고 볼 수 있다. 본 연구에서는 B, C, D, E, F, F2, G의 7개 등급에 대하여 모두 피로수명을 계산하였다. 선측 구조부위의 2위치 (side-1, side-2)에 대하여 피로손상을 계산한 결과 중통부재를 관통시키기 위해 측판에 뚫린 구멍 주위가 상대적으로 피로강도가 낮은 것으로 알 수 있었는데, 특히 수선 상부 위치에서 보다 수선 하부 위치에서의 피로손상이 높은 것으로 밝혀 졌다.

검토투부 중 side-2 즉, 수선 하부 위치에서 중

통부재가 외측판을 관통하는 부위에서의 피로수명을 Table 4에 보였다 (Fig.3 참고). Table 4에서 보는 바와 같이 다른 위치의 피로수명은 선박의 수명인 20년을 초과하고 있는 반면 중통부재가 외측판과 연결되는 위치 (element no. = 3)에서의 피로수명이 20년 미만으로서 피로강도가 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있다.

4.5 피로신뢰성 해석 결과

3절의 안전여유식 (12)식에서 보는 바와같이 신뢰성 해석을 위한 안전여유식은 비선형이고 또한 확률변수가 비정규분포를 갖으므로, Advanced Level-II Method를 적용하여 신뢰성해석을 수행하였다. 피로신뢰성해석은 피로강도해석의 경우와 마찬가지로 S-N 곡선의 7개 등급에 대해 수행하였고, 그 결과를 Table 5에 정리 하였다. 최근에 발표된 DnV의 보고서[1]에서는 간이 피로강도 해석법과 이의 결과를 이용하는 피로 신뢰성 해석법과 이의 적용에 관해 소개하고 있는데, Tanker에 의 적용 결과에 의하면 선박의 수명 20년을 기준

Table 4 Fatigue life at critical area of side-2 position

element no.	fatigue life in year						
	B	C	D	E	F	F2	G
3	472.4	84.8	58.6	35.3	23.9	13.7	8.9
1348	-	-	809.0	487.4	329.6	189.6	122.4
1352	-	-	825.2	497.3	336.2	193.5	124.9
1356	-	-	801.2	482.8	326.4	187.8	121.3
1360	-	-	727.5	438.4	296.4	170.6	110.1
1364	-	-	716.7	431.9	292.0	168.0	108.5
1368	-	738.8	511.1	308.0	208.2	119.8	77.4
1372	-	369.0	255.3	153.8	104.0	59.8	38.6
2036	-	-	865.6	521.6	352.6	202.9	131.0
2039	-	-	783.9	472.4	319.4	183.8	118.7
2043	-	-	694.0	418.2	282.7	162.7	105.0
2046	-	980.8	678.6	408.9	276.4	159.1	102.7
2050	-	933.8	646.1	389.3	263.2	151.4	97.8
2053	-	945.3	654.0	394.1	266.4	153.3	99.0
2054	-	808.8	559.5	337.2	227.9	131.2	84.7
2057	-	911.7	630.7	380.1	257.0	147.9	95.5
2062	-	247.9	171.5	103.3	69.9	40.2	26.0

(note) "-" means fatigue life over 999.9 years.

으로 Tanker의 피로강도에 대한 신뢰성 지수가 0.66 (과괴확률 = 약 0.25) 으로 얻어지고 있다. 이를 참고한다면 Table 5에 정리한 해석 대상부위의 신뢰성 지수는 모든 S-N 곡선 등급에 대해 대부분 참고문헌 [1]에서 허용값을 넘어서고 있으며, 전철에서 기술한 바와같이 수선 하부 위치에서 중통부재와 외측판이 연결되는 위치에서 (element no=3) 의 신뢰성지수는 F, F2, G 등급에 대해 피

로신뢰성이 낮은 것을 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 실 해상 상태와 선박의 운항조건을 고려하는 스펙트럼 피로강도 해석법과 이의 적용을 다루었다. 이 방법의 적용을 통해 종래의 피로해석법에서 불확실성이 높은 부분인 응력범위의

Table 5 Results of fatigue reliability analysis

element no.	reliability indices for 20 years						
	B	C	D	E	F	F2	G
3	1.58	1.21	0.76	0.65	0.50	0.39	0.23
1348	-	-	2.14	1.99	1.76	1.62	1.43
1352	-	-	2.15	2.00	1.77	1.63	1.43
1356	-	-	2.04	1.85	1.67	1.54	1.34
1360	-	-	2.02	1.83	1.65	1.51	1.32
1364	-	-	2.00	1.81	1.64	1.50	1.31
1368	-	2.54	1.78	1.64	1.47	1.34	1.15
1372	-	2.16	1.49	1.36	1.20	1.07	0.89
2036	-	-	2.09	1.95	1.72	1.58	1.38
2039	-	-	1.94	1.75	1.58	1.44	1.25
2043	-	2.55	1.79	1.66	1.48	1.35	1.16
2046	-	-	1.88	1.70	1.53	1.40	1.21
2050	-	2.55	1.79	1.65	1.48	1.35	1.16
2053	-	2.52	1.77	1.63	1.46	1.33	1.14
2054	-	2.44	1.71	1.57	1.40	1.27	1.08
2057	-	2.47	1.73	1.60	1.42	1.29	1.10
2062	-	1.95	1.32	1.20	1.04	0.92	0.60

(note) "-" means non-failure.

크기와 그에 대한 장기분포의 추정법을 크게 개선할 수 있었으며, 또한 방대한 양의 구조해석 과정을 응력영향계수의 개념을 도입하여 구조해석 결과를 피로강도해석이 활용하는 과정의 효율성을 증대시켰고 이로써 피로강도해석의 전 과정이 단 시간 내에 수행할 수 있도록 일관된 전산시스템을 개발하였고, 이에는 피로강도에 대한 안전성 평가로서 피로 신뢰성해석 부분도 포함시켰다.

개발된 전산시스템을 이중선각 초대형 유조선을 대상으로 피로파괴 가능성이 높을 것으로 예상되는 선측구조부위에 대해 적용하였다. 결과에서 보는 바와 같이 개발한 전산시스템에 의하면 검토 구조부위의 피로수명은 선박의 수명을 대체로 초과하는 반면, 수선 하부 위치에서 중통부재가 외측판과 연결되는 부위에서 피로수명이 상당히 낮은 것으로 밝혀졌고 또한 피로강도에 대한 신뢰성

해석 결과 역시 이러한 경향을 반영하고 있다.

이 논문에서는 부식과 구조물 작동상에서 오는 파손 등 피로 외적인 요소의 영향을 고려하지 않았는데, 이러한 피로외적인 요소의 영향은 추가로 피로강도를 감소시키는 요인이 된다. 그러나 부식의 영향에 대해서는 아직까지 연구가 미흡한 실정이고, 구조물 작동상의 파손 또한 불확실성이 많은 부분이어서 구조물의 보수유지, 수리계획을 포함하는 피로강도해석을 수행하고 이를 설계에 반영하기 위해서는 추가의 연구가 필요한 부분이다.

참 고 문 헌

- [1] DnV : "Fatigue Assessment of Ship Structures", Technical Report No. 93-0432, Jan. 1995
- [2] Lloyd's Register : "Fatigue Design Assessment Procedure", in structural detail design guide, 1994
- [3] ABS : "Guide for the Fatigue Strength Assessment of Tankers", June 1992
- [4] 송재영, 신찬호, 전영기 : "국제 선급기술동향과 KR강선규칙개발현황 - Status Report on the Development of a Unified procedure for Fatigue Design of Ship Structures", 대한조선학회 선체구조연구회 연구발표회, 서울대학교, Aug. 1994
- [5] Department of Energy, U.K. : "Offshore Installations, Guidance on Design and Construction", HMSO, London, April 1984
- [6] 김정제, 윤범상, 양박달치 : "선체의 스펙트럼 피로해석에 대한 효율적인 계산 방법", 대한조선학회지 제30권 제4호 pp93~101, 1993
- [7] 이주성, 양박달치 : "D/H VLCC 의 피로신뢰성 해석법 개발", 울산대학교-삼성중공업 공동 연구 보고서, 1995
- [8] Almar-Nass, A. : "Fatigue Handbook - Offshore Steel Structures", Tapir, 1985
- [9] Bhattacharyya, R. : "Dynamics of Marine Vehicles", A Wiley-Interscience Pub. 1978
- [10] Ochi, M. K. : "Wave Statistics for the Design of Ships and Ocean Structures", Trans. SNAME Vol.86, pp47~76, 1978
- [11] Wirshing, P.H. and Chen, Y.N. : "Fatigue Design for Marine Structures", J. Marine Structures Vol.1, no.1, pp.23-45, 1988
- [12] Wirshing, P.H. : "Fatigue Reliability for Offshore Structures", J. Structural Engineering ASCE Vol.110, No.10 1984
- [13] Zhao, W. : "Reliability Analysis of Fatigue and Fracture under Random Loading", Ph.D. Thesis, Imperial College, Univ. of London, 1989
- [14] Lee, J.S. and Yang, P.D.C. : "On the Reliability Assessment of Double Skinned Hull Structures against Ultimate Bending and Fatigue Strengths", Proc. PRADS'92, Univ. of Newcastle Upon Tyne, U.K., vol.2, pp.834-846, 1992