

特輯 : 선체구조의 피로강도 평가기술

선체구조 피로평가기술의 최근 동향

김 재 동

Fatigue Assessment of Ship Structures : Recent State of the Art

J. D. Kim



김재동/한국기계연구원/ 1952년생/피로·파괴, 수명평가 및 구조진전성 모니터링

1. 서 언

대양을 항해하는 선박은, 그 구조형상, 조립· 건조과정, 해양이라는 작용하중 및 운항조건 등의 측면에서 매우 복잡한 시스템이라 할 수 있다. 최근, 선체구조 설계기술의 발전, 경량화에 따른 과도한 고장력강 (HTS)의 사용 및 가혹한 운항조건으로 인하여 선체피로손상이 급증하고 있는 실정이다<sup>1)</sup>.

실선운항실적에 의하면, 선박 수명중 선체구조가 피로손상을 입을 확률이 1/100로 추정된 바 있으며<sup>2)</sup>, 1990년 5월 일본해사협회 (NK)는 HT32 및 HT36을 사용한 48척의 제 2세대 초대형 유조선 (VLCC)에서 손상선박당 10개 이상의 피로균열 (Fig. 1) 이 발생하였음을 보고하였다<sup>3,4)</sup>. 또한, Fig. 2에 보인 바와 같이 산적화물선의 하부 스톨 (stool) 과 이중저의 연결부에서도 피로균열이 지속적으로 발생되고 있다<sup>5)</sup>. 이를 계기로, 세계 주요 조선국은 선급협회를 중심으로 선체구조 피로평가 관련연구에 박차를 가하여 괄목할 만한 성과를 보였는데, 그 대표적 사례는 다음과 같다.

- 1992, 미국 ABS: "유조선의 피로강도 평가지침"<sup>6)</sup>
- 1995, 일본 NK: "선체 피로설계 지침서"<sup>7)</sup>

• 1996, 노르웨이 DnV: "선체구조 피로 평가지침"<sup>8,9)</sup>

- 1996, 한국 KR: "선체구조 피로강도 평가지침"<sup>10)</sup>
- 1997, 국제선급연합 (IACS): "선체구조 피로 설계를 위한 단일절차"<sup>11)</sup>

선체구조 피로평가의 목적은, 해상 변동하중을 받는 선체 각 상세부의 적합한 피로수명을 보장하는데 있으며, 이러한 목적을 달성하기 위하여는 이들 각 부위에 대한 피로평가가 필수적이다. 이는 각각의 용접이음부 및 부가물 또는, 기타 응력 집중부 등이 잠재적 피로균열의 요인이 되기 때문

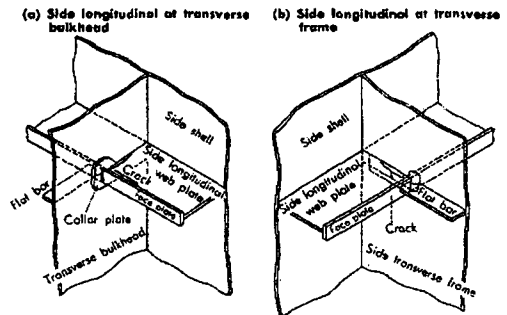


Fig. 1 Cracks inside longitudinals

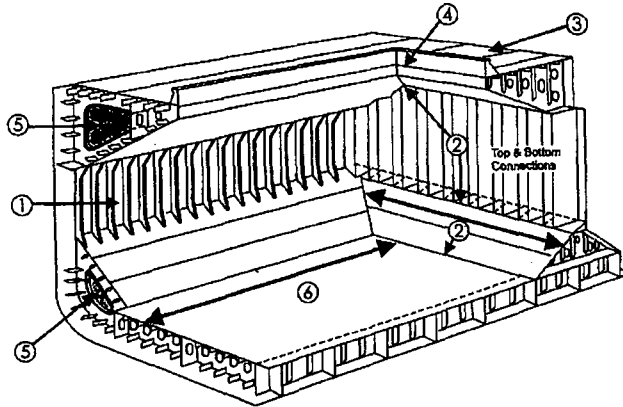


Fig. 2 Bulk carrier cracking areas

이다. 추정된 피로수명은, 강재선형, 상세부 치수 결정 및 모델링 등 선체구조설계의 바탕이 되며 나아가서는, 효율적인 검사, 유지 및 보수를 위한 기초자료가 된다.

이하에서는 먼저, IACS의 단일절차를 중심으로 하여 피로평가기법, 선체 구조해석, 평가응력, S-N 곡선, 피로영향인자 및 피로손상제어의 순서로 선체 구조 피로평가 절차 전반을 살펴 본 후, 끝으로 이해를 돕기 위한 실선적용예를 보이기로 한다.

## 2. 피로평가 절차

### 2.1 피로평가법<sup>12)</sup>

선체구조의 피로평가절차는 선체에 작용하는 장기응력분포의 산출방법에 따라, 스펙트랄법, 결정론적 방법 및 간이법의 3가지로 구분할 수 있으며, 첫째 및 둘째 방법은 실제 해상상태 자료로부터 장기응력분포를 구하는 반면, 간이법은 장기응력분포를 가정하는 것이 특징이다. 즉, 피로평가를 위하여는 장기응력분포자료와 선체구조 상세부에 대한 피로실험자료 즉, S-N 곡선이 필요하며, 이들 자료를 이용하여 Palmgren-Miner의 선형누적손상 법칙에 따라 선박 수명중 가해지는 손상(damage)을 계산함으로써 피로수명을 예측한다. 이하에서는 이들 3가지 방법에 대하여 간략히 살펴보기로 한다.

#### 2.1.1 스펙트랄법 (Spectral Method)

상기 방법들중 가장 정선되고 논리적인 방법이

기는 하나, 응력에 대한 전달함수를 구하는 과정에서 계산량이 방대하여 실제 선박설계에 적용하기에는 어려움이 있다. 본 방법은 피로평가부위마다, 각 파도의 입사각 (heading angle) 별 집중응력 범위 전달함수 (hot spot stress range transfer function) 와 해상상태자료 (wave scatter diagram) 및 S-N 곡선이 필요하며, 그 평가절차는 다음과 같고, Fig. 3에 절차의 흐름을 보인다.

- ① 선체 운동해석을 통하여 파랑하중에 대한 전달함수를 구한다.
- ② 구조해석을 수행하여 관심부위에 대한 응력 전달함수를 계산한다.
- ③ 국부구조해석 또는 경험치를 이용하여 응력

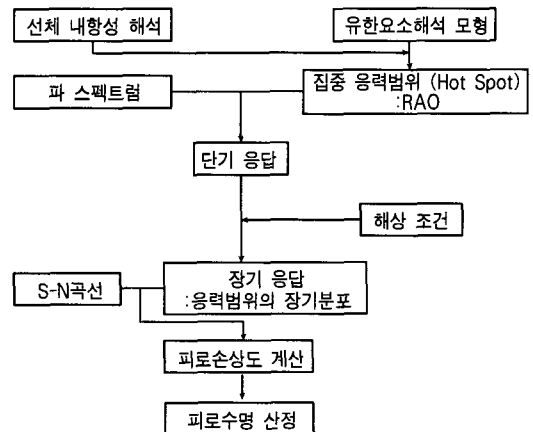


Fig. 3 Spectral method

집중계수 (SCF)를 구하고, 이로부터 집중응력범위 전달함수를 도출한다.

④ 각 해상상태별 단기응답 (short term response)을 계산한다.

⑤ ④의 자료를 해상상태도와 연계하여 응력범위의 장기분포 예상치를 산출한다.

⑥ 끝으로, Palmgren-Miner 법칙에 따라, S-N 곡선과 ⑤의 값을 이용, 각 집중응력부 (hot spot)별 피로수명을 산정한다.

2.1.2 결정론적 방법 (Deterministic Method)

본 방법도 스펙트럼법과 마찬가지로 해상상태도로부터 구조해석용 입력 데이터를 구하는 것으로, 설계과를 이용한 구조해석의 개념과 유사하게 스펙트럼법의 난점인 방대한 계산량 문제를 해결하고자 한 것이다. 이때, 요구되는 자료는 해상상태도, 블록별 규칙과 상태에서의 구조해석결과 및 S-N 곡선 등이며, 그 절차는 다음과 같다.

① 해상상태도로부터 입사각별 파고발현도를 구한다.

② ①을 원하는 블록으로 나누어, 각 블록별로 대표파고 및 주기를 설정하고, 이들 규칙과들에 의한 파랑하중 하에서 구조해석을 수행하여 대상 부위의 응력범위를 산출한다.

③ ②의 응력범위와 응력집중계수로부터 집중응력범위 (hot spot stress range)에 대한 장기분포를 구한다.

④ ③을 적합한 S-N 곡선에 적용하여 피로수명을 예측한다.

2.1.3 간이법 (Simplified Method)

이전의 두 가지 방법에서는 해상상태도로부터 응력범위의 장기분포를 도출하는 반면, 본 방법의 핵심은 장기분포를 Weibull 분포로 가정하는 것으로 Weibull 분포자료와 S-N 곡선이 필요하며, 계산량이 대폭 감소하는 장점이 있다. 따라서, 실제 선체구조설계시 주로 이용되고 있는 방법이기도 하며, 개략적인 절차는 아래와 같다. Fig. 4에 그 흐름을, Fig. 5에는 Weibull 형상계수 예를 각각 나타내었다.

① 선체 구조해석으로부터 수명동안 발생하는 최대응력범위를 구한다.

② 구조형식 및 해상상태를 종합하여 적합한 Weibull 계수를 설정함으로써 응력범위의 장기분포를 가정한다.

③ Palmgren-Miner 선형누적손상법칙에 근거하

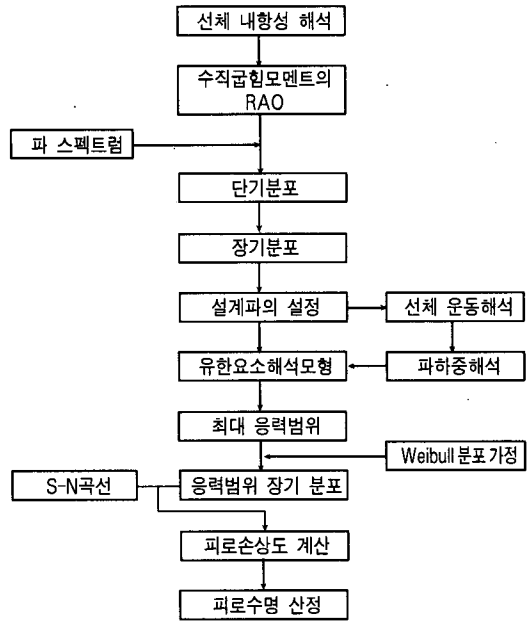


Fig. 4 Simplified method

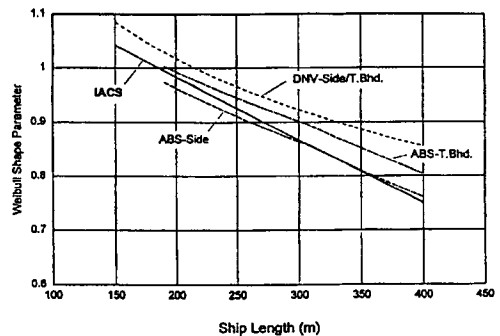


Fig. 5 Weibull shape parameters

여 피로수명을 예측한다.

2.2 선체구조해석

2.2.1 구조해석모형

선체구조 피로평가시, 정확한 응력응답을 얻기 위하여 유한요소모형을 이용하는 것이 일반적이며, 이들은 전선해석, 부분구조해석 및 국부응력해석 등 3가지로 구분할 수 있다. 또한, 정확한 응력산정을 위하여는 피로시험결과 및 관련 S-N 곡선에 분명하게 포함되지 않은 각종 응력집중인자들을 고려

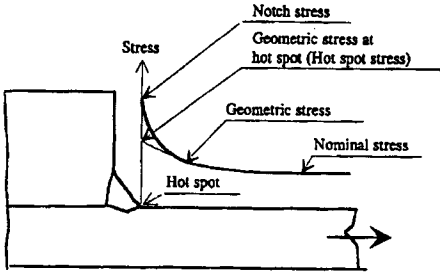


Fig. 6 Definition of stress categories

해야 하며, Fig. 6에 보인 다양한 응력들에 대한 명확한 정의가 필요하다. 일반적으로, 이들 응력은 아래와 같이 정의되며 또한, 하기 2.2.3항에서의 관련 응력집중계수에 대한 산출 근거가 된다.

(1) 공칭응력 (nominal stress) :  $\sigma_n$

보 (beam) 요소 모형 또는, 1차 메쉬 (mesh) 유한요소모형으로부터 도출된 응력으로, 전체적인 구조형상에 기인하는 응력집중이 포함된다.

(2) 기하학적 응력 (geometric stress) :  $\sigma_g$

공칭응력, 구조적 불연속 및 부가물 등에 기인하는 응력으로서, 용접부에 의한 응력은 제외되며, 정밀 메쉬 유한요소모형에 의한 응력이 이에 속한다. 구조부재의 배치상 불일치와 같은 시공오차는 보통, 유한요소 해석시에 포함되지 않으며, 별도의 고려가 필요하다. 특히, 용접부 형상에 의한 영향역 직외부의 기하학적 응력분포를 용접 토우까지 외삽한 최대치를 집중응력 (hot spot stress) 으로 정의한다.

3) 노치응력 (notch stress) :  $\sigma_n$

용접 토우 즉, 집중응력부 위치에서의 전체응력으로서, 기하학적 응력과 용접부의 존재에 의한 응력이 포함된다.

2.2.2 전선해석

전선해석의 목적은 선박 전체의 강성도 및 응력 분포를 구하는데 있으며, 이때 다음과 같은 하중들

을 고려하여야 한다.

- 선체 연직 종굽힘 모멘트
- 선측과 횡격벽간의 종방향 전단력
- 선체 수평굽힘 모멘트
- 선체 비틀 모멘트 (특히, 컨테이너선과 같은 개단면 선박의 경우)
- 횡굽힘 및 전단력

작용하중은 선체운동해석으로부터 산출하거나 또는, 선급규칙을 이용할 수 있다. 전선해석시에는 크기가 비교적 큰 요소를 사용하며, 보강판은 이방성 요소로 치환하거나, 판 요소와 보 요소를 조합한다. Fig. 7에 컨테이너선의 전선해석모형을 보였다.

해석 모형의 범위는 선체응답의 형태 및 선박의 구조배치에 따라 결정되는데, 대표적인 몇 가지 예를 들면 다음과 같다.

• 컨테이너선처럼 갑판에 열린 창구를 갖는 선박의 경우, 비틀 및 수평굽힘 거동을 파악하기 위해서는, 선박 전체 (즉, 길이, 폭 및 깊이)의 모형이 요구된다.

• 여객선 등과 같이 복잡한 상부구조를 또는, 쌍동선과 같이 복잡한 단면 형상을 갖는 선박의 선체 종굽힘 평가를 위해서는 이들 부분을 포함하는 모형이 필요하다.

• 자동차 운반선에 대한 횡방향 변형 및 응력상태를 파악하기 위하여는 선박 길이 방향으로의 전체 모형이 필요하다.

2.2.3 국부해석

선체 국부해석은 응력집중계수를 산정하기 위한 것으로, 이때에는 브래킷부 및 보강재 연결부 등과 같은 상세구조부위에 대하여 Fig. 8에서와 같이 정밀 메쉬를 이용한다. 기하학적 형상에 기인하는 응력집중계수  $K_g$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$K_g = \frac{\sigma_g}{\sigma_n} \tag{1}$$

여기서,  $\sigma_g$ 는 부가물의 존재에 기인하는 용접 토

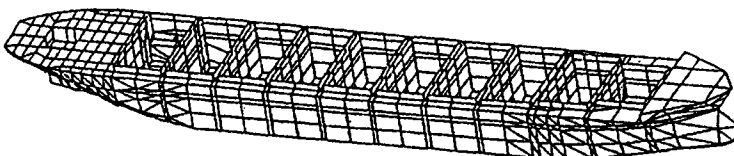
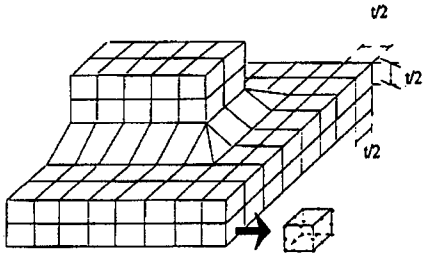


Fig. 7 Global hull model of container ship



Model with 20-node solid elements (size:  $t/2 \times t/2 \times t/2$ )

Fig. 8 Fine mesh modeling

우에서의 응력이고,  $\sigma_N$ 은 공칭응력이다. 한편, Fig. 6를 참고로 하면 최종 응력집중계수는 다음 식 (2)와 같이 정의할 수 있는데, 여기서  $\sigma_n$ 은 노치응력이다.

$$K = \frac{\sigma_n}{\sigma_N} \tag{2}$$

또한, 용접부만에 의한 응력집중계수  $K_w$ 는 식 (3)과 같다.

$$K_w = \frac{\sigma_n}{\sigma_g} \tag{3}$$

따라서, 최종 응력집중계수는 식 (1), (2) 및 (3)

으로부터 아래와 같이 구해진다.

$$K = K_g \cdot K_w \tag{4}$$

### 2.3 S-N 곡선

선체구조 피로평가를 위한 S-N 곡선은 매우 다양하나, 현재 영국 에너지성의 DEn 기본 S-N 곡선이 주로 사용되고 있다. 본 곡선은 원래 1990년에 영국 에너지성이 발간한 "해양설치: 설계, 건조 및 인증에 관한 지침"<sup>13)</sup>에서 비접점 (non-nodal) 이음부에 대한 것이다. 이는 원통형 부재 및 판 이음부에 대한 광범위한 실험 및 이론 연구 결과에 기초한 것으로, 항복응력  $400N/mm^2$  미만의 구조강에 대해 적용된다.

용접부는 기하학적 배치, 변동응력의 방향과 제작 및 검사방법에 근거하여 B, C, D, E, F, F2, G 및 W 등 8개의 등급으로 구분되고 또한, 이들 곡선은 관련 실험결과를 통계처리하여 (평균-2배의 표준편차)를 나타낸 것으로 다시 말하면, 계산된 피로수명에서 유한과손확률을 의미한다.

Fig. 9에 보인 바와 같이, 본 곡선은 응력범위  $\log S$  및 피로수명  $\log N$ 이 선형적 관계를 갖는 2개의 구간으로 구성되며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다. 또한, 이들 8개 곡선은 모두  $N=10^7$  사이클에서 경사가 바뀌며, 이때 각 곡선은  $m$  및  $K$

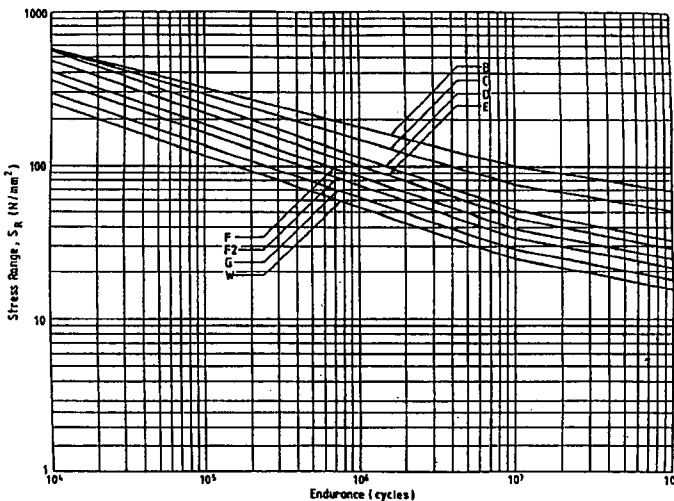


Fig. 9 DEn basic design S-N curves

값을 달리한다.

$$\log N = \log K - m \log S \tag{5}$$

$$\text{즉, } N = K \cdot S^{-m} \tag{6}$$

여기서,  $\log K = \log K_1 - 2\sigma$

$S$  : 응력범위 또는, 변동응력의 크기

$N$  : 응력범위  $S$  에서의 파손반복수

$K_1$  : 평균 S-N 곡선에 관한 상수

$\sigma$  :  $\log N$  의 표준편차

$m$  : S-N 곡선의 역경사

최근, DEn은 “피로치침에 대한 수정 제안”을 발표한 바 있는데, 이는 각각 공기중, 부식하 및 음극방식 이음부에 적용 가능한 3종의 S-N 곡선을 포함하고 있다. 또한, 상기 S-N곡선들은 Table 1. 과 같은 등급계수를 도입함으로써 D-곡선과 관련지을 수 있다.

### 2.4 피로강도 영향인자

피로강도에 영향을 미치는 인자들은 여러 가지가 있으나, 이들 중 선체구조와 관련하여 평균응력, 잔류응력, 부식효과 및 작업정도 등에 관하여 살펴보기로 한다.

#### 2.4.1 평균응력 효과

평균응력 효과는 부분적으로 S-N 곡선에 포함 되어 있는데, 이는 대부분의 피로시험이 응력비  $R=0$  또는, 약간 높은 값의 양진 인장하중 하에서 수행되기 때문이다. 그러나, 실제 대부분의 선체 구조에는 일정한 정적하중이 작용하고 있어, 압축인 경우에는 피로손상이 과대 추정되는 반면, 인장일 때에는 피로수명이 비 보수적으로 산정된다. 결과적으로, 이와 같은 정적하중으로 인해 높은 인장응력이 발생하는 경우, 반복하중이 지속적으로 작용하고 있는 선체구조는 피로손상에 대하여 더욱 민감하게 된다.

선체구조의 경우, 평균응력 효과를 고려하는 대표적인 식들은 다음과 같다.

- 수정 Goodman식 :  $S'_R = S_R(1 - \sigma_m / \sigma_N)$

- Gerber식 :

$$S'_R = S_R \{ 1 \pm (\sigma_m / \sigma_N)^2 \}; \quad +: \sigma_m \leq 0, -: \sigma_m > 0$$

- Soderberg식 :  $S'_R = S_R(1 - \sigma_m / \sigma_y)$

- Munse식 :  $S'_R = S_R(1 - 0.25R)$ ;  $-1 \leq R < 1$

여기서,  $S_R$  : 주어진 반복수에서의 S-N 응력범위

$S'_R$  : 수정된 S-N 응력범위

$\sigma_m$  : 평균응력

$\sigma_N$  : 인장강도

$\sigma_y$  : 항복강도

$R$  : 응력비

#### 2.4.2 잔류응력 영향

선체구조의 피로평가에 있어 잔류응력의 영향 특히, 그 크기, 두께방향 분포, 수명기간중의 변화 및 임의 해상하중의 영향 등에 관하여는 현재까지 거의 알려진 것이 없는 실정으로, 많은 연구가 요구되고 있다. 그러나, 실제 대부분의 피로시험이 상술한 바와 같이 응력비  $R=0$  또는, 이보다 약간 높은 값의 양진 인장하중 하에서 수행되므로, 피로강도를 감소시킬 가능성이 있는 잔류응력의 영향은 이미 S-N 곡선에서 고려되고 있고 따라서, 선체구조 피로평가시에 이들 영향을 무시할 수 있는 근거가 된다.

#### 2.4.3 부식효과

해수중 피로시험 결과, 방식되지 않은 시편의 경우에는 해수가 피로수명에 해로운 영향을 주는 반면, 음극방식된 시편에 대한 해수영향은 그리 크지 않다는 사실이 알려진 바 있다. 영국 에너지성은, 해수 환경하 선체구조의 피로평가와 관련하여 다음과 같은 권장사항을 제시하고 있다.

- 음극방식된 경우에는, DEn 기본 S-N 곡선 즉, 공기중 곡선을 그대로 사용할 수 있고, 이는 피복이나 도장의 경우에도 적용 가능하다. 이때, 적용범위

Table 1. Classification Factor

S-N curve	B	C	D	E	F	F2	G	W
Classification Factor	0.64	0.76	1.00	1.14	1.34	1.52	1.83	2.13

는 항복강도  $400N/mm^2$  (HT32 및 HT36 포함) 미만의 강재에 국한되며, 이보다 고강도 재료에서는 해수환경 영향이 좀 더 치명적일 수 있다.

- 방식이 안된 경우에는, 공기중 곡선에 대해 계수 2만큼 피로한도를 줄여 수정하여야 하며 또한, S-N 곡선의  $10^7$  사이클 위치에서 경사 변화를 주어서도 안된다. 한편, 항복강도가  $400N/mm^2$  이상일때, 상기 피로수명에 대한 감소계수 2는 적합하지 않을 수 있다.

2.4.4 작업정도

선체구조 용접이음부의 피로강도는, 용접불연속 및 기하학적 편차 등 건조과정에서의 표면결함으로 인한 국부적인 응력집중에 크게 좌우된다.

용접불연속이란 용접 토우, 언드컷, 균열, 오버랩, 기공, 슬래그 개재물 및 불완전 용입을 말하며, 기하학적 결함이란 배열 불일치, 각 일그러짐, 과다 용접덧살 및 기타 잘못된 용접형상 등으로 정의된다. 평균이하의 작업정도에서도 기공이나 슬래그 개재물과 같은 내재형 용접 불연속은 피로강도에 유해하지 않다.

국부적인 용접형상 및 맞대기 이음과 십자이음의 제작 허용치별 응력집중계수 산정을 위한 경험식들이 제시되고 있다. 특별한 경우, 더 높은 작업정도에 근거하여 응력집중계수를 산출할 수도 있으나, 그 정도가 실제 조립 및 건조과정에서 수행 곤란하거나 불가능한 수준일 때에는 응력집중계수가 과소 추정되게 된다. 일반적으로, 기하학적 결함에 대하여는 별도의 지시가 없으면 선박 건조시 작업관행상의 허용기준을 따르는 것이 상례이다.

2.5 피로손상 제어<sup>14)</sup>

선체구조에 대한 피로내구성, 초기설계단계에서의 세심한 주의뿐만 아니라, 적절한 제작·건조작업 및 효율적인 검사, 유지 및 수리계획을 통해서만이 확보 가능하다. 물론, 이들 중 초기설계 단계에서의 배려가 가장 중요하고도 확실한 방법으로, 구체적으로는 응력집중부로부터 용접부를 가능한 멀리 배치한다든가, 절단부 (cut-out) 및 연성 토우 (soft toe)를 이용하여 국부응력수준을 낮추는 방법 등을 들 수 있다.

피로성능 개선을 위하여 제안된 대표적인 선체 구조 상세부 설계기법들 중 선측 중통재의 경우를 예로 들면 다음과 같다 (Fig. 10).

- 부재 치수를 증가시켜 공칭응력을 낮춘다.
- 종방향 대칭단면을 채택하여, 비틀에 의한 추가적인 국부응력을 방지한다.
- 부재 폭을 길게 테이퍼 (taper)하거나, 기하학적 불연속부를 줄인 부재를 사용한다.
- 평판 보강재의 뒷면에 뒷받침 (backing) 브래킷을 대거나, 트랜스버스 웨브의 횡변형으로 인한 부가응력을 저감하기 위한 트리핑 (tripping) 브래킷을 취부한다.
- 국부적인 응력집중을 완화하기 위하여, 평판 보강재의 힐 (heel)부에 연성 스킵 (scallop) 또는, 트리핑 브래킷을 설치한다.
- 응력수준의 저감을 위하여, 연성 토우 또는, 평판 보강재의 토우쪽에 브래킷을 취부한다.
- 응력집중을 완화하기 위하여, 브래킷 토우 및 힐 근처의 용접부를 그라인딩한다.

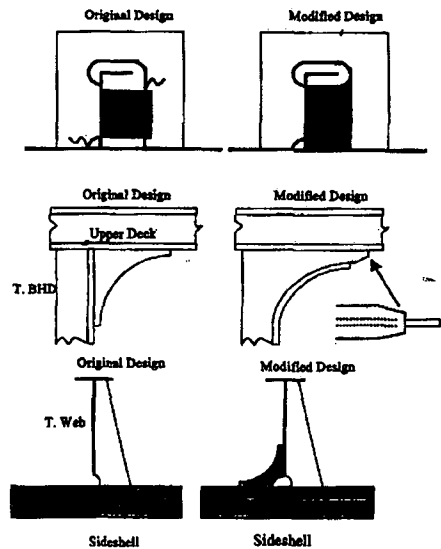


Fig. 10 Improved fatigue design for ship structural details

그러나, 설계가 제대로 수행되었는가의 여부는 제작, 건조과정에서의 품질관리 (Q.C.) 및 품질 보증에 의해 결정된다. 즉, 기대하는 고품질 내구성 선박은 설계와 제작·건조현장이 하나의 목적 하에서 긴밀히 협력하는 경우에만 가능케 된다.

따라서, 피로강도의 관점에서 용접시 제어가 필요한 구조상세 부위는 초기설계단계에서 구체적으로 지시하여 제작·건조과정에서 특별히 주의토록

하는 한편, 용접후 확인 및 수정이 필요하다. 즉, 중요 구조상세부에서의 용접 단면형상이 설계 요구조건을 만족하여야 하며, 이때, 그라인딩, 피닝, 티그 (TIG) 드레싱 및 기타 용접기법을 이용할 수 있다.

실제 운항중인 선박의 경우, 이상의 절차에도 불구하고 검사, 유지 및 보수와의 연계 없이는 그 피로내구성을 궁극적으로 보장할 수 없다. 예를 들면, 검사로부터 발견된 균열이 최소 수리요구 균열보다 작을 때에는 이른바, 운항상태에서의 균열진전해석 (fitness for purpose) 이 요구되며 반면, 이보다 클 경우에는 수리와 함께 수리후 수명해석을 수행하여야 한다.

최근, 선박 검사분야 기술이 크게 발전하였으나, 아직 그 수준은 뚜렷한 준균열을 검출하는 정도에 그치고 있는 실정이며, 결국 이상을 종합하여 볼 때, 선박구조는 손상허용의 개념하에서 설계, 건조 및 유지되어야 할 것으로 판단된다.

### 3. 실선적용예<sup>15)</sup>

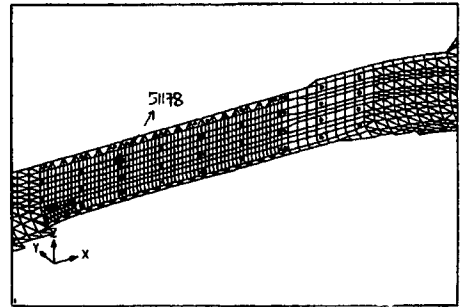
피로평가 대상선박은 선속 14.8노트의 127,000톤급 유조선으로, 그 제원을 Table 2에 보였으며, 피로평가 대상 구조상세부인 선측부의 상세 모델링을 Fig. 11에 나타내었다.

다음, 파진동수  $\omega = 0.2 \sim 1.8$  (rad/sec) 및 8개의 침로각에 대하여 만재 (full load) 및 발라스트(ballast) 상태에서의 선체운동해석을 수행하였으며, Fig. 12에 정규화된 선체 수직굽힘모멘트의 진폭응답함수 (response amplitude operator: RAO)를 보였다.

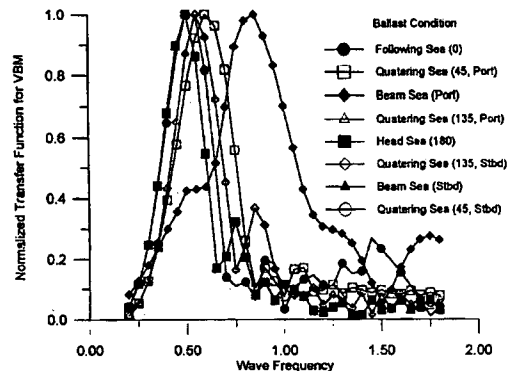
스펙트랄 피로평가법의 첫 단계로 정밀 메쉬가 필요한 위치를 찾기 위하여, 3차원 전선모형에 대한 피로해석을 수행하여, 피로수명이 최소인 요소 즉, 요소번호 13102 및 51178을 선정하였다. 정밀 메쉬 모형에 대한 경계조건은, 전선해석결과를 이용하여 강제변위의 형태로 주었으며, 작용하중으로는 내부

**Table 2.** Principal dimensions of global model and longitudinals

L×B×D×T = 258×46×22.6×15.3 (m)	
Vertical section modulus	: $Z_D = 40.324 \text{ m}^3$ at deck : $Z_B = 49.195 \text{ m}^3$ at bottom
Horizontal section modulus	: $Z_H = 68.08 \text{ m}^3$
Neutral axis above keel	: $Z_{NA} = 10.18 \text{ m}$
Block coefficient	: $C_b = 0.8237$
Deck longitudinal	: 300×11+90×16  e=0.439 distance above keel : 21.9m spacing : 0.84m span : 4.47m section modulus : $872.4 \text{ cm}^3$ upper deck plate : 19.5mm
Side longitudinal	: 250×12 (BP)  e=0.2333 distance above keel : 15.3m spacing : 0.6m span : 4.47m section modulus : $363.98 \text{ cm}^3$ side shell plate : 23.5mm



**Fig. 11** Potential location for fatigue in side shell



**Fig. 12** Normalized transfer function for vertical bending moment



의 화물하중과 외부 유체 동압력을 고려하였다. 또한, 동일한 발현확률을 갖는 만재 및 발라스트 상태의 2가지 하중조건에 대해 해석하였다.

Fig. 13은 선측 중통재 요소번호 4902에서의 응력범위에 대한 진폭응답함수를 보인 것이고, Fig. 14에 응력범위의 장기분포를 나타내었다. 다음, Palmgren-Miner 선형누적손상법칙과 적합한 S-N 곡선을 이용하여 누적피로손상도 D를 계산할 수 있다. 이상의 과정을 거쳐 최종적으로 산출된 피로수명은 72.4년으로, 이를 간이법에 의한 결과인 151년과 비교하면 후자의 경우가 약 2배의 값을 주고 있다.

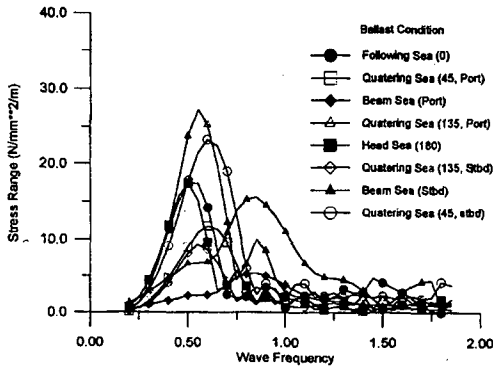


Fig. 13 Stress range transfer function for side longitudinal

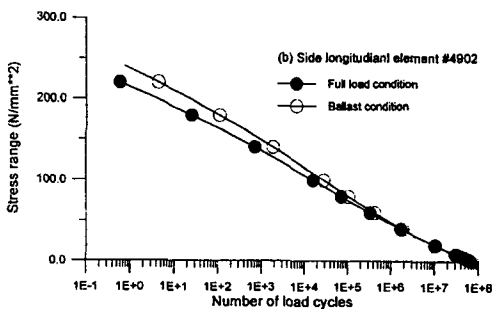


Fig. 14 Long term stress range distribution

#### 4. 결 언

이상에서 선체구조 피로평가기술의 현황에 대하여 개괄적으로 살펴본 바와 같이, 현재 피로평가

절차 자체는 어느 정도 정립되어 실제 적용되고 있음을 알 수 있다. 그러나, 선체구조형상, 작용하중과 제작, 조립 및 건조과정의 복잡성과 다양성으로 인한 각종 불확실성을 해결하기 위해서는 지속적인 연구와 노력이 필요하다. 즉, 평가절차 자체의 단순화를 포함하여 하중추정 및 구조해석기법의 고도화와 평가응력의 명확한 정의 또한, 평균응력, 잔류응력, 부식 및 손상 등의 영향 특히, S-N 곡선과 관련하여 임의하중 및 하중이력효과와 함께, 대형구조모형에 대한 피로시험 결과 등이 요구된다. 아울러, 파과역학에 기초한 손상후 피로평가법, 확률론적 평가 및 피로신뢰성 해석분야에서의 진전도 기대되는 바이다.

#### 참 고 문 헌

1. D. Liu, A. Thayambali : The Durability of Ships considering Fatigue Cracking, Journal of Ship and Ocean Technology, Vol. 1, No. 1 (1997), pp. 57-72
2. American Bureau of Shipping : Lessons learnt from Structural Reliability Applications in Marine Structures, Proc. SSC-SNAME Marine Structural Reliability Symposium, Arlington, VA (1987)
3. 高張力鋼構造檢査會 : VLCC船側縱通材の損傷について, 日本海事協會誌, No. 218 (1992), pp. 18-38
4. (社) 日本造船研究協會 : 第216研究部會-大型船縱通肋骨材の強度に關する研究, 研究資料 No. 405 (平成 6年 3月)
5. Lloyd's Register : Breaking the Back of the Bulker Problem, 100A1, The Magazine of the LR Group, Issue 1, No. 109 (1995)
6. American Bureau of Shipping : Guide for the Fatigue Strength Assessment of Tankers (1992)
7. 日本海事協會: 船體疲勞設計ガイダンス (1995)
8. E. H. Cramer, R. L. Seth and K. Olaisen : Fatigue Assessment of Ship Structures, Marine Structures-Special Issues on Fatigue and Fracture, Vol. 8, No. 4 (1995), pp. 359-383
9. Det norske Veritas : Fatigue Assessment of

- Ship Structures, Technical Report, Report No. 93-0432 (1996)
10. (사) 한국선급 : 선체구조의 피로강도 평가 지침 (1996)
  11. International Association of Classification Societies : Report on the Development of a Unified Procedure for Fatigue Design of Ship Structures, Final Report (1997)
  12. 손희 외 3명 : 선박 및 해양구조물의 피로해석에 관한 연구(I), 대우조선기술, No. 21 (1989), pp. 39-55
  13. U. K. Department of Energy : Offshore Installation : Guidance on Design, Construction and Certification ; Section 21:Steel, 4th Ed. (1990)
  14. T. Xu : Fatigue of Ship Structural Details - Technical Development and Problems, Journal of Ship Research, Vol 41, No. 4 (1997), pp. 318-331
  15. Jangho Yoon, Yongsuk Suh : A Comparative Study on Fatigue Analysis, 대한조선학회 선박해양구조연구회 연구발표 논문집 (1996),