

# 解析과 計測을 利用한 構造物의 疲勞 壽命豫測

金 外 鉉

현대중공업 선박해양연구소



● 1952년생  
● 조선 및 기계공학을 전공하고 최근에는 구조물의 계측을 통한 강도 감지 시스템 개발에 관심을 갖고 있다.

## 1. 머리 말

경제적이고 안전한 구조물의 설계를 위하여 설계 과정에서 검토되고 고려되어야 할 요소들 중에서 동적 하중을 받는 구조물의 경우 원래 목적하는 기능을 만족하기 위해서는 적절한 피로수명 해석이 수반 되어야 한다. 특히 기계부품, 건설장비, 차량, 항공기, 선박 등 끊임없이 외부로부터 변동하중이 작용할때는 반드시 고려되어야 할 중요한 요소이며 이미 피로해석에 대한 많은 연구들이 진행되어왔다. 특히 설계부문에서도 이에 대한 관심이 높아지고 있으나 그 적용이 번거롭고 복잡해서 사실상 아직까지는 설계 단계에서 거의 고려되고 있지 못한 실정이다. 따라서 여기에서는 해석과 계측을 이용한 피로수명 예측을 사례 중심으로 현업의 설계단계 또는 제작후 시운전 과정에서 적용 할 수 있도록 설명 하고자 한다.

## 2. 피로 해석 기법

피로 설계는 피로시험 곡선(S-N curves)을 이용한 방법이나 파괴역학(fracture mechanics)을 사용하여 수행할 수가 있다. 일반적인 설계 목적으로는 S-N 곡선을 이용하여 피로 해석을 수행하는 것이 보통이다. 그러나 정기적인 검사 이전 또는 수리시까지의 이

미 발생된 균열 평가와 관련한 균열 전파를 파악하기 위해서는 파괴 역학적 기법을 이용하여야 한다. 여기서는 피로시험 곡선을 이용한 방법만 설명 한다.

### 2.1 피로 시험곡선을 이용한 피로해석

피로 수명은 다음의 세 단계로 구성된다. 즉 균열 발생, 균열전파, 그리고 최종 균열 단계로 이루어진다. S-N 곡선을 이용한 피로수명 해석에서는 균열 발생과 전파수명이 구분되지 않은 최종 균열단계까지의 총수명을 예측할 수 있다. 특히 용접부에 대해서는 흔히 초기결합들이 내재해 있으므로 균열 발생 단계수명은 일반적으로 무시 할만 하다.

본 방법에 의한 피로 수명 예측을 위해서는 S-N 곡선을 필요로 하는데 이는 실험이나 또는 기존의 곡선 중 적절한 것을 택하여 사용할 수 있으나 실험으로는 많은 시간과 경비가 소요됨으로 일반적인 경우에는 기존의 발표된 S-N 곡선을 이용한다. 로그-로그 좌표계에 표시된 S-N 곡선의 직선은 다음식으로 표현이 가능하다.

$$N = c/S^m \quad (1)$$

여기서  $c$ 와  $m$ 은 부재의 피로 시험을 통하여 얻어지는 상수로서  $m$ 은 S-N 곡선의 기울기를 나타낸다. 그리고 피로 시험 결과는 그림 1과 같이 확산 현상이 나타나는데 이를 고려

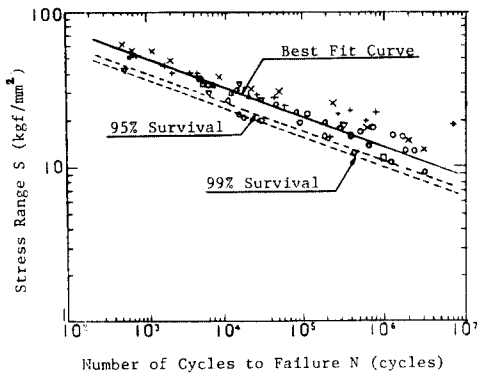


그림 1 실험으로 부터 얻은 S-N 곡선

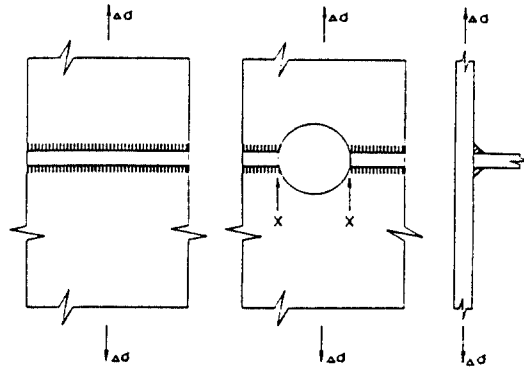


그림 2 기하학적 응력 집중

하기 위해서 '평균 S-N 곡선'보다 아래쪽에 놓이게 되는 '실제 S-N 곡선'을 사용할 필요가 있다. 일반적으로 선박의 경우는 97.7%의 잔존 확률(probability of survival)을 갖는 S-N 곡선을 설계 곡선으로 사용하고 극히 중요한 부재의 경우는 99.9%의 잔존 확률에 해당하는 S-N 곡선을 이용한다<sup>(1~3)</sup>.

즉,  $\log c = \text{mean}(\log c) - 2(\text{standard deviation})$  : 97.7% probability of survival

$\log c = \text{mean}(\log c) - 3(\text{standard deviation})$  : 99.9% probability of survival

그러나 만일 표준 편차를 알 수 없는 경우는 표준편차 0.25를 사용할 것을 추천한다. 피로 수명은 잘 알려진 Miner-Palmgrens 법칙에 의하면 선형 누적 손상률(linear cumulative damage ratio)  $D$ 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

여기서,

$k$  = Number of stress blocks

$n_i$  = Number of stress cycles in stress block with constant stress range

stress range

$N_i$  = Number of cycles to failure at constant stress range

대부분의 피로해석에는 누적 손상률,  $D$ 가 1에 달하면 피로에 의한 파괴가 일어난다고 간주하며 그때 까지의 예상시간을 피로 수명으로 정의한다. 그러나 실제 피로 설계를 위해서는 하중추정, 해석방법 및 기타 피로수명 예측과 관련한 불확실성과 안전도 등을 고려하여 1보다 작은 값을 흔히 채택한다. 특히 계측 등을 통하여 식 (2)에 의해 누적 손상률을 구할때는 stress block,  $k$ , 의 수를 20 이상으로 하여 필요한 계산 정도를 확보할 수 있도록 한다.

● 사용응력

S-N 곡선을 적용하기 위해서는 어떤 응력을 사용할 것인가 하는 것이 먼저 결정 되어야 한다. 필요한 S-N 곡선을 실험을 통해 직접 얻는 경우나 또는 특별히 명시된 경우는 별 문제가 없으나 보통은 S-N 곡선을 적용함에 있어서는 용접부 윤곽등으로 인한 국부응력집중은 고려하지 않고 구조물의 기하학적 형상으로 인한 응력집중만 고려한다. 즉 그림 2에서 볼 때 구멍이 없는 경우는 사용응력이 인장응력  $\Delta\sigma$ 이고 구멍이 있을 때는 구멍으로 인한 응력 집중 계수  $K_t$ 를 고려한  $K_t \cdot \Delta\sigma$ 를 사용응력으로 한다. 그리고 일반적으로는 주응력을 적용하는 것이 보통이다.

● S-N 곡선과 결합부 분류

일반적으로 S-N 곡선은 용접 결합부형태, 하중의 종류 등에 따라 분류해서 작성되고 있다. 그리고 재질, 부식환경, 모재두께 등에 따

라 S-N 곡선의 특성은 달라진다. 그러나 부식환경이나 모재두께는 별로 중요한 요소가 아니나 재질에 따라서는 그 특성이 매우 달라지므로 S-N 곡선을 기존의 자료들로부터 선택할 때는 다음 사항을 특별히 유의한다.

- (1) 재질
- (2) 결합부 형태(용접 경우)
- (3) 잔존 확률
- (4) 사용응력의 종류
- (5) 부식환경
- (6) 모재 두께

### 3. 피로 수명 예측시 추가 고려 사항

#### ● 평균 응력

실험을 통해서 S-N 곡선을 얻거나 기존의 발표된 곡선을 이용할때 이들 대부분의 곡선은  $R(S_{min}/S_{max})$ 이 0.0~0.1 범위의 단순 반복 하중에 대한 것이다. 일반적으로 평균응력이 인장의 경우는 피로 강도를 줄이고 압축의 경우는 늘려 준다. 평균응력을 고려하기 위해서는 다음의 수정식들이 제안되고 있다<sup>(3)</sup>.

Modified Goodman relation :

$$S_a = S_{a,N} (1 - S_m/S_u)$$

Gerber relation ;

$$S_a = S_{a,N} [1 - (S_m/S_u)^2] \quad (3)$$

Soderberg relation

$$S_a = S_{a,N} [1 - (S_m/S_y)]$$

여기서

- $S_a$  : 평균응력이  $S_m$ 일 때 수정응력
- $S_{a,N}$  : 평균 응력이 0일때 피로 수명이  $N$  사이클인 단순 변동응력
- $S_m$  : 평균응력
- $S_u$  : 재료의 ultimate strength
- $S_y$  : 재료의 yielding stress

#### ● 두께영향

용접부의 피로강도는 모재두께에 따라 다소 영향을 받는다. 두께를 증가 하면 강성의 증가로 응력이 감소하여 피로수명을 연장시키지만

피로강도는 두께증가에 따라 감소하게 됨을 다음식에서 보여주고 있다<sup>(1)</sup>.

$$\log N = \log c - m \log S - \frac{m}{4} \log \left( \frac{t}{22} \right) \quad (4)$$

여기서,

$t$  = thickness through which the potential crack fatigue will grow, mm

#### ● 조립오차 영향

용접시 부재의 misalignment 등은 추가적인 응력 집중을 유발하게 된다. 그러나 'mean-2 standard dev.'의 S-N 곡선등을 쓰게되면 허용오차 내에 있는 통상 tolerances는 특별히 고려할 필요가 없다.

#### ● 그라인딩 영향

일반적으로 그라인딩으로 인해서 피로 수명이 약 2배 정도 증가된다. 그러나 피로설계 단계에서는 이 영향은 고려하지 않고 부재 제작 중 피로 강도 향상을 위한 수단으로 이용한다.

#### ● 피로 수명예측의 불확실성

피로 수명예측에는 응력, S-N 곡선, 피로 이론등 많은 불확실성이 있음을 염두에 두고 본 계산을 수행 및 결과 평가를 해야 한다. 특히 계산된 피로수명은 작용응력에 따라 매우 민감함을 S-N 곡선의 특성으로 부터 알 수 있다. 그리고 'mean S-N 곡선'과 'mean-2 standard dev. S-N 곡선'에 의한 피로 수명은 매우 다르다.

참고로 주요 요소별 피로수명에 미치는 영향을 정리하면 다음과 같다.

- 일반적인 구조해석의 경우 약 ±20% 정도의 응력차이가 해석 방법등에 따라 발생한다면 피로수명은 대략 2배정도 차이가나며 경우에 따라서 6~7배 정도 차이가 발생한다.
- 'mean S-N 곡선'을 사용하여 피로수명 예측하면 'mean-2s S-N 곡선'을 이용한 피로 수명보다 약 3배 정도 길에 예측된다.
- 고응력 범위에 대한 S-N 곡선 수정방법에 따라서 약 1.5배정도 차이난다.
- 일반적으로 실험의 경우 선형 누적 손상

를,  $D$ 가 1보다 작은 범위에서 피로손상이 많이 발생하는데 피로파괴를 손상률이 1에 달하면 일어난다고 가정하고 피로수명 해석을 하게 되면 대략 1.25~2.5배정도 수명을 과대 평가할 경우도 있다.

#### 4. 피로 수명 예측 예

##### 4.1 구조해석에 의한 수명 예측

구조 해석에 의한 피로 수명 예측을 위해서는 먼저 동적 응력 계산을 위한 하중 설정과 그리고 구조해석 작업을 수행 해야 한다.

여기서, 작용동하중이 단순 반복 하중이라면 예상되는 최대동하중에 대해서 구조해석을 수행하여 필요한 동적응력을 구하면 될 것이다. 그러나 일반적으로는 작용동하중으로 인한 응답은 random process가 되고 따라서 임의 하중이라면 동적 응력의 분산화를 분포를 고려할 필요가 있다. 이때 누적 손상률  $D$ 는 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$D = \frac{T}{\tau_{av}} \int_0^{\infty} \frac{p(S)}{N(S)} dS \quad (5)$$

여기서

$T$  = time duration of the random stress process

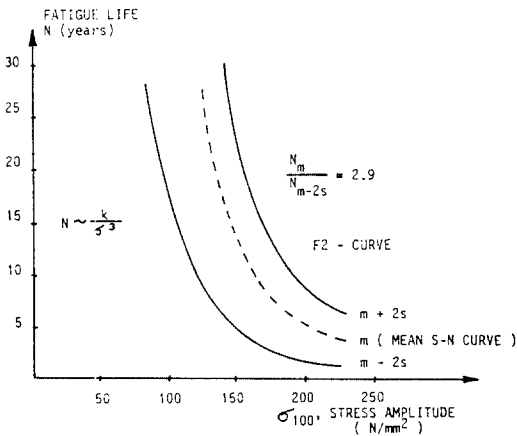


그림 3 S-N 곡선 선택에 따른 피로수명 변화

$\tau_{av}$  = average period of stress variation in the random process

$p(S)$  = probability density function of stress range

$N(S)$  = average no. of cycles to failure at a stress range  $S$

구조해석을 행함에 있어서는 통상의 유한 요소법에 의한 구조해석 방법을 이용하며 피로 수명을 구하고자 하는 위치에서 element size는 기하학적 응력집중이 해석 결과에 반영될 수 있도록 fine mesh를 적용하여야 하는데 구조 응력해석을 위한 fine mesh 보다 약 3배정도 fine 하게 하고 higher order element를 쓰는 것이 바람직하다. 특히 해석결과가 single amplitude 인지 double amplitude 인가를 확인

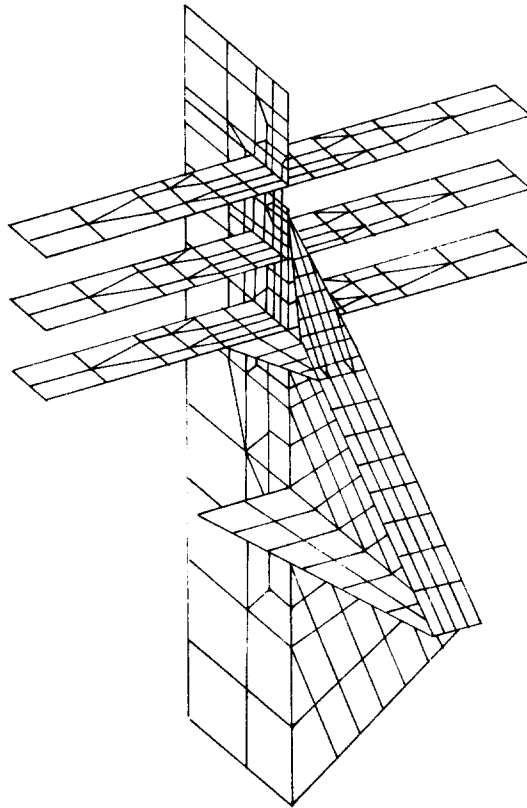


그림 4 피로해석을 위한 유한요소 모델에



라서 결정 되어야 한다. 즉 엔진이나 모터 등과 같이 비교적 항상 일정한 외력원에 의해서 변동 응력이 발생 할때는 정상 작동 속도에서 단시간 즉 약 10분 정도 계측하여 결과 분석을 하면되고 외력원이 파도, 바람, 조류등과 같이 항상 변하는 경우는 정기적으로, 예를 들면 1일 2회 또는 4회, 약 10~20분간씩 정기적으로 장기간 계측해서 통계 처리한다. 이때 계측시간 동안 얻은 동응력을 해당 interval 동안을 대표하는 값으로 한다. 그리고 계측된 signal의 cycle counting 방법에는 Range pair method, Rainflow method, Racetrack method 등 여러 가지가 있으나 Rainflow counting method가 흔히 사용된다. 계측자료의 통계처리, cycle counting 및 damage ratio 계산등은

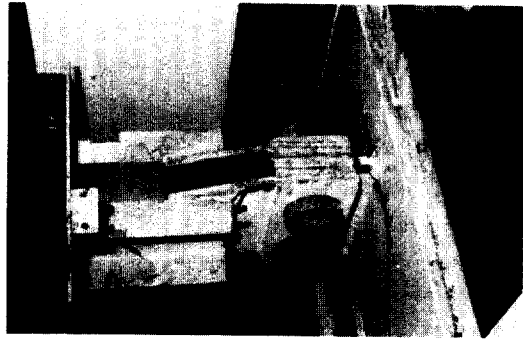


그림 7 주기관의 sway bracing 및 게이지 배치

일반적으로 퍼스널 컴퓨터 등을 이용하여 처리한다. 전체 시스템의 구성은 그림 6과 같다. 적용예로써 그림 7과 같은 선박의 main engine bracing member에 대한 피로 수명 예

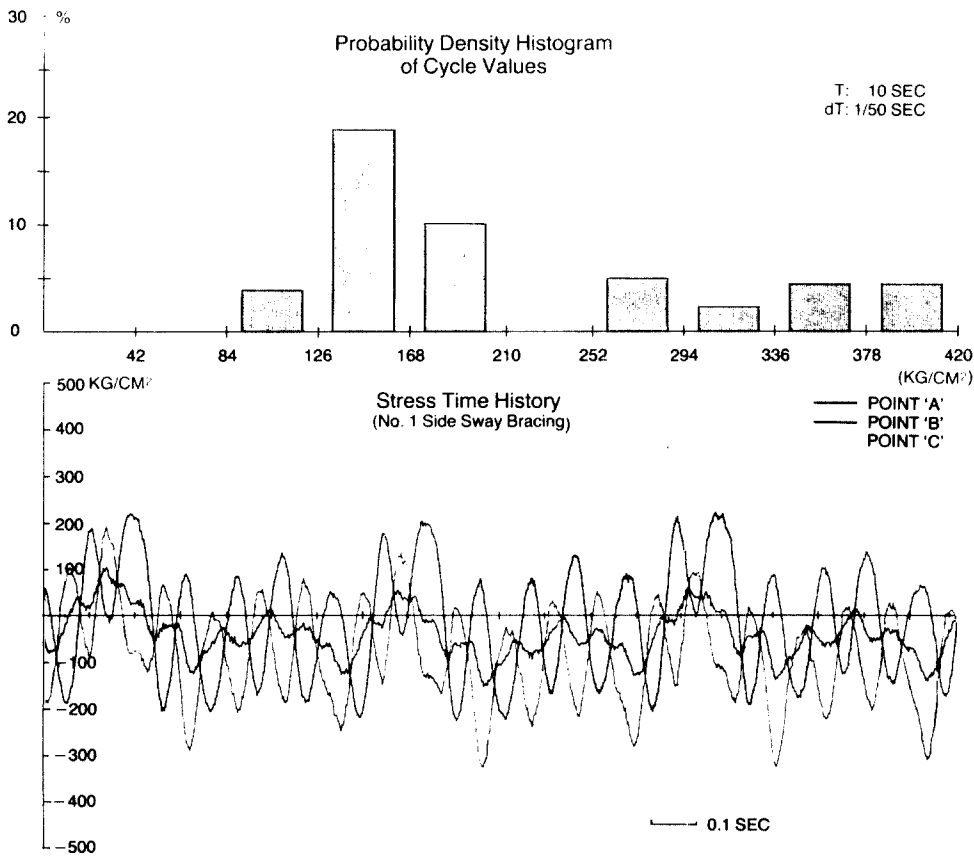


그림 8 계측응력 및 빈도분포도

\*\*\*\* FATIGUE LIFE ESTIMATION \*\*\*\*

: H350 FWD. SWAY BRACING (94 RPM)

CONTROL DATA

MEASURING DURATION = 10 SEC  
 A/D CONVERT INTERVAL = 1/100 SEC  
 YOUNG'S MODULUS = 210000 KG/CM\*\*2  
 GAGE FACTOR = 2.05  
 CALIBRATION FACTOR = 0.3 x10E-5 STRAIN/μV  
 SAFETY FACTOR = 1  
 PROBABILITY OF SURVIVAL = 97.7 %  
 S-N CURVE TYPE = DNV 'F2' TYPE

RESULTS

MAX. STRESS FOR MEASURED PERIOD = 173 KG/CM\*\*2  
 MIN. STRESS FOR MEASURED PERIOD = -379 KG/CM\*\*2  
 NUMBER OF PEAK VALUES = 195  
 NUMBER OF CYCLE VALUES = 97  
 DAMAGE RATIO FOR MEASURED PERIOD = 0.603402E-6  
 FATIGUE LIFE BASED ON MINER RULE = 0.5 YEAR

그림 9 피로수명 해석 결과

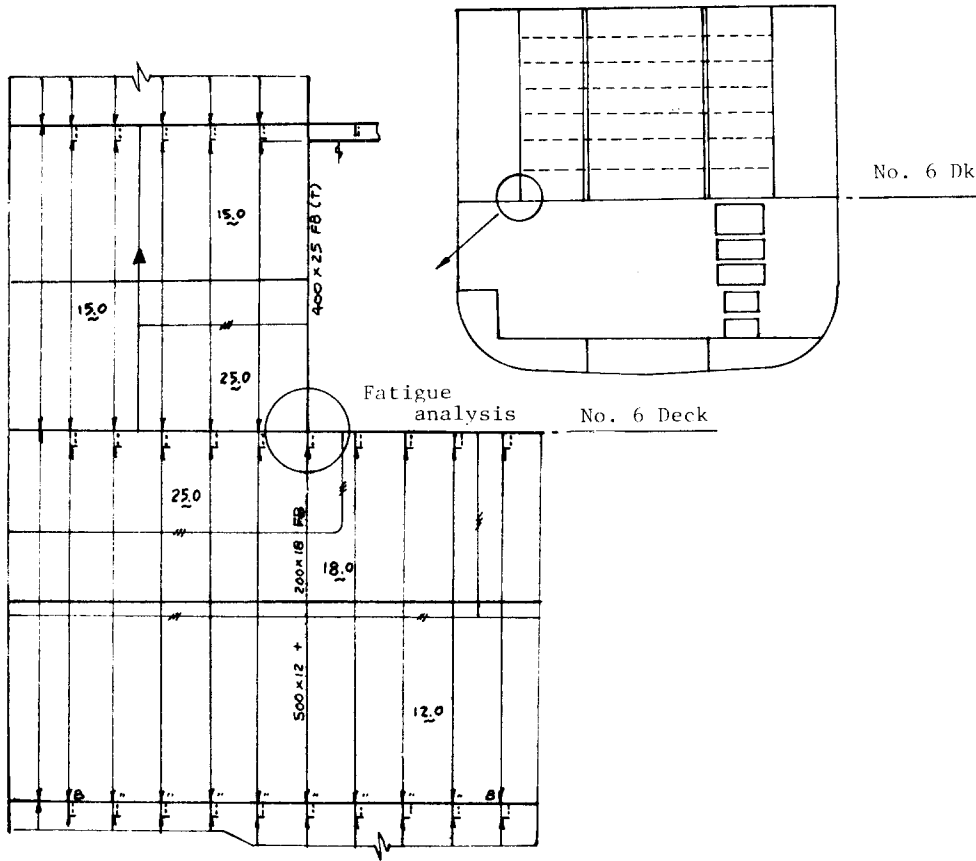
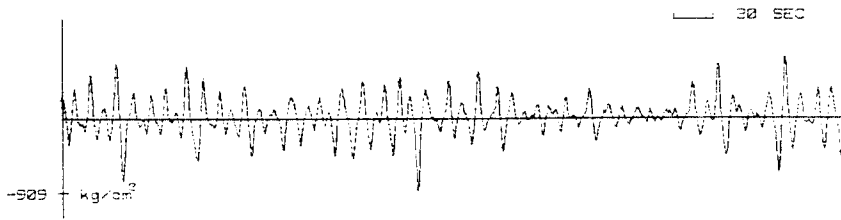
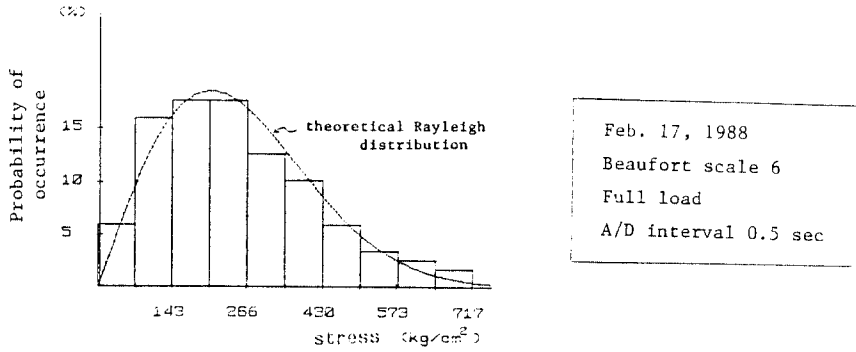


그림 10 자동차 운반선의 중앙단면도



(a) Time history of measured stress



(b) Distribution of stress amplitude

그림 11 계측응력 및 빈도분포도

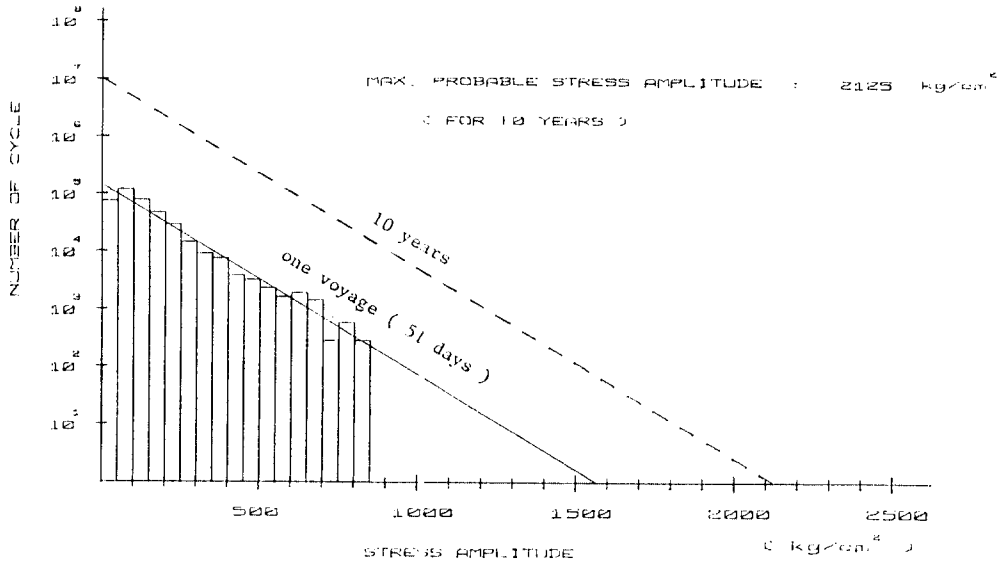


그림 12 계측응력의 장기 분포해석 결과



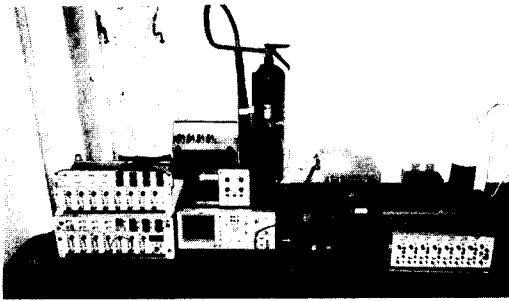


그림 13 동적응력 계측 장비

측 과정을 살펴본다.

그간의 유사선박의 손상 보고 등에 따라서 스트레인 게이지의 위치를 그림 7과 같이 결정하여 5mm 길이의 온도보상 게이지를 취부하였다. 그리고 계측은 상용 rpm에서 약 5분간 실시하였고 분석을 위해서는 약 2분간의 자료를 추출 하였다. 전체 흐름은 그림 5와 같다. 분석에 있어서는 Rainflow cycle counting method와 Det Norske Veritas의 S-N 곡선 (97.7% probability of survival)를 이용하여 피로 수명을 예측하였다. 계측 신호 및 분석결과 는 그림 8 및 그림 9와는 같다. 여기서 예측된 피로 수명은 상용 rpm으로 엔진이 연속 작동시의 수명이다.

외력원이 항상 변하는 경우에 대한 적용 예로써 선박이 실선 항해중에 발생하는 변동응력에 대해서 살펴 본다.

대상 선박은 울산항과 미국동부를 정기적으로 운항하는 승용차 4800대 적재 가능한 자동차 전용 운반선으로써 그림 10의 web frame toe 위치의 변동응력을 51일간 주기적으로 1일 4회 20분간씩 측정 하였다. 이에 대해서 long-term 해석을 수행하면 그림 12와 같이 51일 운항시 ( $N=5 \times 10^5$  사이클) 최대 변동 응력 예측치는  $3120\text{kg/cm}^2$ 이 됨을 알 수 있다. 또한 동적응력의 분포는 Weibull 분포를 따름을 알 수 있었다. 여기서 web frame toe에 대해서 joint type 'W'를 적용하면  $c=1.583 \times 10^{11}$  (97.7% probability of survival) 그리고  $m=3.0$ 과 같이 필요상수를 구할 수 있다. 그러면

51일 항해에 대한 누적 손상률  $D=0.25$ 가 되고 피로수명 예측치는 약 204일이 된다. 그러나 여기서 예측된 피로 수명은 실선 계측을 수행할 당시의 계측조건 즉 항해상태, 해상조건 등이 변하지 않는다는 가정하에서 예측된 것이다. 참고로 대상선박은 약 1~2개월 항해후 본 예제에서 검토한 위치에서 매우 큰 크랙이 발견되었다.

## 5. 맺음말

앞에서 피로 해석과 관련한 기초적인 사항과 실제 현업에서 해석 혹은 계측을 통하여 피로 수명을 예측 하고자 할 때 고려할 점들과 적용 예를 설명하였다. 설계단계에서 부터 피로해석이 실용화 되고 계측등을 통한 자료축적으로 높은 신뢰도의 구조물이 설계·제작 되었으면 한다.

## 참 고 문 헌

- (1) Det Norske Veritas, 1984 "Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units", Classification Notes No. 30.2
- (2) British Standard Institution, 1980, "Steel, Concrete and Composite Bridges-Part 10, Code of Practice for Fatigue," BS 5400 : Part 10
- (3) A. Alman-Naess, "Fatigue Handbook-Offshore Steel Structures", Tapir.
- (4) H.O. Fuchs, 1980, "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons.
- (5) Fatigue Analysis of Bracket Toe of Bottom Transverse Web for 250,000 DWT VLCC, Hyundai Maritime Research Institute Report SVR87056 (Mar. 1987).
- (6) 김의현, 1988 "선체 구조의 피로수명 예측을 위한 약산법", 현대기보, Vol. 8, No. 4.
- (7) O. Ushirokawa, 1981, "Fatigue Strength of Ship Structures: Practical Application for Design", RINA Trans.