

한계 누적 피로 피해도에 의한 피로 강도 해석

김 현 철

On the Critical Damage Factor for Fatigue Strength Analysis

H.C. Kim

Key Words : 와이블 분포(Weibul distribution), 응집 집중점(Hot-Spot stress), 마이너식(Miner-Palmgren's equation), 高張力鋼(TMPC), 하중-반복회수선도(Stress-Numbers(S-N) curves), 누적 피로피해도(Accumulated Damage Factor), 굿맨선도(Goodman's Curve), 필렛용접 이음부(Fillet welding joint), 비주기 하중(Random load)



Abstrat

Fatigue strength analysis is one of the most important themes of ship structure design, as fatigue damages are reported on ship structures even now. But, there are many problems to be investigated in present fatigue strength analysis. Some of these need basic research workes which will take time. The others are the problem to apply fatigue strength analysis in design and have to be investigated in parallel with basic researches. The one of major items in the latter is the critical damage factor to define with S-N curve for fatigue strength analysis of ship structure design.

1. 서 론

항만 시설이나 선박에 있어서도 신기종의 개발, 신구조나 신재료의 채용이 활발하게 행하여 지고 있어서 충분한 판정 방법의 확립이 필요해지고 있다.

한편 항만 시설이나 해양 구조물의 손상 사례를 보면 피로에 의한 손상이 적지 않다.

지금까지의 여러연구에 의해 전반적으로는 손상이 감소되고 있는데도 불구하고 피로에 의한 손상은 아직도 끊기지 않고 있다.

해양 구조물중 선박의 피로 강도 설계는 용접 구조의 채용과 함께 주목되어 재빨리 도입되었으

나 피로 강도 해석을 하면서 설계를 진행하는 것이 아니라 피로 손상이 발생되기 쉬운 상세 구조의 표준을 만들어서 이것을 새로운 설계에 반영해 가는 방법에 주체를 두고 있었다.

그렇지만 상술한 대로 새로운 구조재료, 선체 구조나 새로운 공작법이 잇달아 채용되고 있으므로 종래의 수법으로는 불충분하다고 생각하게 되어, 피로 강도 설계법이 널리 선박의 설계 뿐만 아니라 높은 신뢰성이 요구되는 항만 구조물 등에도 규칙적으로 적용이 요구되어 지고 있다.

이렇게 피로 강도 해석이 널리 채용됨에 따라 현재의 피로 강도 해석법에는 많은 문제점이 있는 것이 밝혀 지고 있다. 현재 많은 피로 강도에

관한 연구가 진행되어 또 새로운 피로 강도 해석법도 제안되고 있지만 현재의 누적 피로 피해도에 의한 피로 강도 해석법은 설계의 흐름에 반영해서 간편하게 사용되고 있으므로 현재의 피로 강도 해석법을 개량해 가는 연구도 필요하다고 생각된다.

상기와 같이 현재 행하고 있는 피로 강도 해석법의 문제점은 여러 가지 지적되고 있지만 문제점이 본질적으로 명확화 되어 있지 않다. 선박이나 항만 구조물 등은 불규칙한 파랑 하중을 받고 있기 때문에 더욱 문제가 복잡하다.

여기서는 실적 자료 DATA가 많은 선박의 경우를 설계로 해양 구조물의 강도 해석기법을 설명하고자 한다. 따라서 파랑 하중의 문제와 불규칙한 변동 하중하에서의 피로 강도의 문제로 크게 나누어 연구를 진행시킬 필요가 있을 것이다.

2. Program 피로시험의 부하하중

2.1 해상의 분석 · 폭풍의 발현 빈도

선박에 작용하는 실제하중에 대한 표준 변동 하중 MODEL을 찾아 내기 위해 북태평양 항로를 장기간(1976년부터 1989년까지의 14년간 중 7년 이상)에 걸쳐 항행하고 기상 상태를 통보해 온 38척의 일본 국적 선박의 조우 해상을 조사 분석해서 아래와 같이 정리하고 있다.

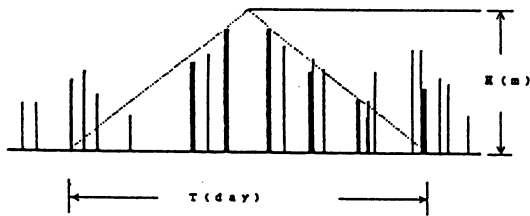


Fig.2.1 Diration time T and maximum wave height H .

우선 이러한 선박의 조우 해상의 기록에서 파도 높이(이하 波高라 부름)가 5M 이하의 상태에서는 폭풍인지 뭔지 판별이 안 되는 경우가 많으며 저파도의 상태에서는 파고가 독립으로 Random으로 발

생하고 있다고 가정한다.

파고가 5M 이상의 고파고인 상태를 폭풍이라고 부르기로 하면 폭풍의 상태는 파고가 서서히 증가해 가며 최대 파고 상태가 되고 그후 서서히 파고가 감소해가는 경향이 보이므로 Fig. 2.1과 같이 그래프화할 수 있다고 생각된다.

최고 파고를 H, 폭풍의 접촉 시간을 T로 한다. 이같은 전제아래 더욱 분석을 진행시켜서

(I) 선박의 일생을 20년간으로 하면 한척의 선박이 당하는 폭풍의 수는 표에 나타낸 바와 같다. 여기서 폭풍을 6종류의 최대 파고를 가지는 폭풍으로 분류하면 선박이 20년간에 만나는 파고의 최대치(이하 극대 파고라고 부름)는 15m 이므로 6종류의 폭풍을 이하의 A~F 폭풍과 같이 정리한다.

A폭풍: 0-6M B폭풍: 0-7M C폭풍: 0-8M
D폭풍: 0-9M E폭풍: 0-11M F폭풍: 0-15M

(II) 선박이 20년간에 당하는 파고의 확률 분포는 Weibul 분포이다.

또, 파도의 총 회수는 10^8 회이다.

(III) 극대 파도(15M) 이상의 파고에 당하는 확률은 10^{-8} 이다.

이상 (I)~(III)에서 선박이 20년간 당하는 A~F 폭풍의 회수와 각 폭풍의 최대 파고의 출현 빈도를 구한다. 파고의 확률 분포 형상 PARAMETER를 여기서는 1.0(지수 분포)로 한다. 또 이러한 선박의 기록에 의하면

(IV) 선박이 만나는 폭풍의 접촉 시간은 폭풍의 최대 파고에 불구하고 일정하며 약 3.5이다.

(V) 20년간에 10^8 회 이므로 평균 파주기는 6.3초 이다.

따라서 (IV),(V)에서 하나의 폭풍에 포함되는 파도의 수는 $3.5 \times 24 \times 3600 \div 6.3 = 48000$ (개)가 된다.

이러한 기록에서

(VI) 선박이 만나는 5M 이상의 폭풍의 수는 20년간에 93.4개 이다.

따라서 10^8 회의 파고중 폭풍 상태의 파도의 총수는 $48000 \times 93.4 = 4483200$ (회)가 되며 평온시에 있어서의 파도의 수는 $10^8 - 4483200 = 95516800$ (회)가 된다.

한계 누적 피로 피해도에 의한 피로 강도 해석

(VII) 각 폭풍(A~F) 중 파고의 밀도 분포는 단 기 분포로 간주한다.

(VIII) 20년간에 한척의 선박이 만나는 A~F 폭풍의 수는 Table 2.1에 나타낸 바와 같다.

이상의 조건 아래서 A~F 폭풍에 포함되는 5M 이상의 각 파고의 파도의 총수가 Weibul 분포에近似되도록 각 폭풍의 파고의 빈도를 결정한다.

상기 해석 결과를 바탕으로 구조 부재에 유기되는 응력의 빈도 분포를 구하는 방법을 다음 항목에서 정리한다.

Table 2.1 Number of Storm encountered by a ship during 20 years

Type of storm	Wave height	No. of storm	Probability of max. wave height
A	0-6	42.2	6.31×10^{-4}
B	0-7	24.9	1.85×10^{-4}
C	0-8	12.3	5.41×10^{-4}
D	0-9	7.0	1.58×10^{-4}
E	0-11	6.2	1.36×10^{-4}
F	0-15	0.8	1×10^{-4}

2.2 선체에 유기되는 응력의 빈도 분포법

각 폭풍에 있어서의 응력의 빈도 분포는 이하의 가정에 기초하여 결정한다.

(1) 20년간의 유의 파고의 빈도 분포는 지수 분포이며, 빈도 분포 :

$$P(x) = a \cdot x^{h-1} \cdot \exp(-a \cdot x^h) \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

누적 빈도 :

$$F(x) = 1 - \exp(-a \cdot x^h) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

로 표현된다. x 는 유의 파고, 또 여기서 $h = 1$ 로 한다.

(2) 20년간에 있어서의 최대 유의 파고는 15m 이며 그 초과 확률 Q 는 10^{-8} 로 한다.

(3) 각 폭풍에 있어서의 유의 파고의 빈도 분포는

Weibul 분포이며

빈도 분포 :

$$Ps(x) = 2 \cdot \beta s \cdot x \cdot \exp(-\beta s \cdot x^2) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

누적 빈도 :

$$Fs(x) = 1 - \exp(-\beta s \cdot x^2) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

여기서 붙인 s 는 폭풍의 RANK를 나타낸다.

(4) 폭풍은 최대 유의 파고마다 A~F의 6종류로 하고 각각 폭풍의 최대 유의 파고는 6,7,9,11, 15m 로 한다.

(5) 5m 이상의 유의 파고는 폭풍 중에서만 출현하고 각 폭풍 중에서는 그 폭풍에 대한 최대 유의 파고를 넘는 파고는 출현하지 않는 것으로 한다.

(6) 폭풍 하나에 포함되는 파도수는 폭풍의 종류를 불문하고 48000 cycle로 한다.

(7) 20년간에 있어서의 각 폭풍의 출현수는 Table 2.1에서 A폭풍 42.2개, B폭풍 24.9개, C폭풍 12.3개, D폭풍 7.0개, E폭풍 6.2개, F폭풍 1개로 한다.

(8) 선체에 유기되는 응력은 유의 파고에 비례하는 것으로 한다.

상기 가정하에서 $\beta_F, \beta_E, \beta_D, \beta_C, \beta_B, \beta_A$ 는

$$F\text{폭풍} : \beta_F = 4.7907 \times 10^{-6}$$

$$E\text{폭풍} : \beta_E = 7.6735 \times 10^{-6}$$

$$D\text{폭풍} : \beta_D = 4.7907 \times 10^{-6}$$

$$C\text{폭풍} : \beta_C = 1.0704 \times 10^{-6}$$

$$B\text{폭풍} : \beta_B = 4.7907 \times 10^{-5}$$

$$A\text{폭풍} : \beta_A = 1.5973 \times 10^{-5}$$

로 해서 구할 수 있다.

2.3 Random 폭풍 피로 시험의 부하 응력의 결정

前述한 바와 같이 선체에 유기되는 응력이 구해졌기 때문에 시험시에 부하해야될 응력 및 그 부하 회수를 결정한다.

(1) 하나의 폭풍 속에서 응력은 최대치까지 단계적으로 증가하고 최대치 이후는 단계적으로 감소된다.(최대치 이하의 응력의 부하 회수는 최대치의 전후에 등분됨)

(2) 하나의 폭풍이 종료될 때까지는 他 폭풍에는 만나지 않는다.(폭풍은 중복되지 않음)

예를 들어서 D의 폭풍에 대해서는 이하와 같이 각 응력의 부하 회수를 결정한다.

- ① F 폭풍의 최대 하중, 유의 파고 15m로 인해 선체에 유기되는 응력을 상세한 응력 해석에 의해 구하고 이 응력을 20년간의 극대 응력으로 해서 설정한다.(여기서는 예를 들어 250MPa로 함)
- ② 부하하는 최대 응력을 설정한다.(여기서는 예를 들어 10MPa로 함)
- ③ 응력의 간격을 설정한다.(여기서는 10MPa로 함)(D의 폭풍으로 부하되는 응력은 10,20,⋯, 150MPa의 15종류가 된다)
- ④ 각 응력에 대한 부하 회수를 구한다.

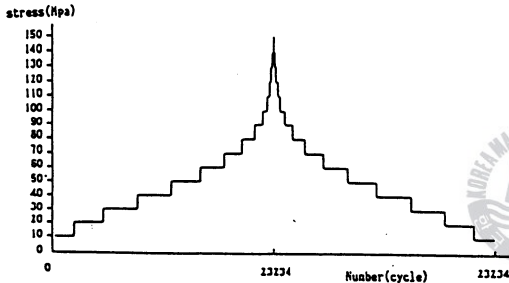


Fig. 2.2 Stress pattern of D-storm for Fatigue test.

2.2.항에서 얻은 계수 $\beta_D=9.005010 \times 10^{-6}$ 을 이용하기 위해 응력을 유의파고로 변환하면 10MPa=0.6m, 20MPa=1.2m,⋯, 140MPa =8.4m, 150MPa=9m가 되고 각 응력(유의 파고)에 대한 부하 회수는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 &N(D10) \\
 &= (\exp(-\beta_D \times 60^2) - \exp(-\beta_D \times 120^2)) \times 48000 \\
 &= 4306(\text{cycle}) \\
 &N(D20) \\
 &= (\exp(-\beta_D \times 120^2) - \exp(-\beta_D \times 180^2)) \times 48000 \\
 &= 6309(\text{cycle}) \\
 &N(D140) \\
 &= (\exp(-\beta_D \times 840^2) - \exp(-\beta_D \times 900^2)) \times 48000 \\
 &= 51(\text{cycle}) \\
 &N(D150)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= (\exp(-\beta_D \times 900^2) - \exp(-\beta_D \times \infty^2)) \times 48000 \\
 &= 33(\text{cycle})
 \end{aligned}$$

⑤ ④에서 구해진 ③의 각 응력에 대한 부하 회수를 (1)에 따라서 배열해서 D폭풍의 부하 패턴을 결정하면 Fig 2.2를 구할 수 있다.

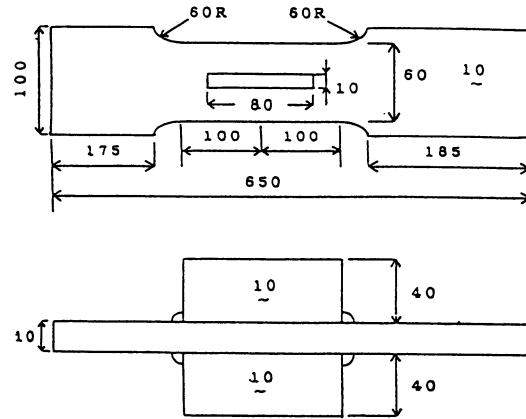
3. 피로 시험

本章에서는 前章2에서 전술한 Program 피로 시험으로서 실시한 폭풍 하중 피로 시험의 개요와 결과를 정리한 것이다.

3.1 폭풍 하중 피로 시험의 개요

실험 Plate 형상은 VLCC의 OUT SIDE 외판 GIRDER의 面材와 WEB STIFFENER의 결합부를 피로 시험기에 맞춰서 아래의 그림처럼 MODEL화시킨 것이다.

C-Type 실험 Plate를 Fig. 3.1에 나타낸다.본 실험 Plate를 이하 Rib Model라고 부르기로 한다.



C-type
Fig.3.1 Test piece

3.1.1 실험 Plate 재질

실험 Plate는 일본 해사 협회 규격 KA36高張力 鋼을 사용해서 제작했다.

재료의 화학성분 및 기계적 성질을 Table 3.1에 나타낸다.

Table 3.1 Chemical composition and mechanical properties of test piece material

Mterial	Thickness	C	Si	Mn	P	S	Yield point N/mm ²	Tensile strengthN/ mm ²	Elongation
		0.16	0.18	1.08	0.018	0.004			
KA36	10	Cu	Ni	Cr	Mo	A1	460	538	24
		0.01	0.02	0.02	0.02	0.032			

3.1.2 시험 항목

- (1) 정하중 피로시험 : 1990년도 실시
S-N선도 제작을 위해 정하중 피로 시험을 행했다. 실험 Plate에 용접된 채로 되어 있는 것과 응력 제거를 한 것의 양쪽 그룹에 대해서 또 평균 응력이 0 MPa인 경우에 대해서 평균 응력을 중심으로 나누어 피로 실험을 했다.
- (2) 폭풍 하중 피로시험 : 1990 및 1991년도 실시
폭풍 하중 피로시험은 前章에서 설정한 폭풍하중을 부하하고 있다. 동일한 폭풍이 거듭해서 부하된 경우(이하 동일 폭풍 하중 피로시험이라 부름)와 A~F 폭풍을 난수표에 의해 결정한 순서에 따라 랜덤으로 부하한 시험(이하 랜덤 폭풍 하중 피로시험이라 부름)을 실시했다. 이 경우도 평균 응력이 0 MPa인 경우와 100MPa인 경우에 대해서 시험을 실시했다.

3.1.3 부재 계측 사항

- (1) 변형(응력) 계측
정하중 시험 및 피로 시험시에는 모든 변형 Gauge로 계측을 실시했으나 결과의 기재는 생략한다. 균열의 발생은 육안과 동시에 변형 Gauge로 연속적으로 기록했으나 변형이 5% 이하하는 부하 하중이 거듭되는 수를 균열의 발생점으로 했다.
- (2) HOT SPOT 응력을 구하기 위한 정하중 응력 분포 계측, 시험편의 초기 변형의 계측 용접 비트 형상의 계측과 응력 집중 계수의 계산 등도 했으나 상세한 내용은 생략한다.

3.2.1 定하중 피로 시험

시험 결과는 S-N 선도에 정리하여 다음 장의 4.1의 A_{0c}, A_{0r}, A_{1c}, A_{1r} 로서 나타내고 있다.
본 시험의 시험편은 용접된 채인 시험편이라고도 잔류 응력이 통상의 1/2이하인 약 10kgf/mm² 정도이었기 때문에 용접된 채인 것과 ANNEALING이 된 것의 定하중 피로시험의 결과에는 거의 차이가 없었다. 따라서 ANNEALING된 것도 용접처리만된 것도 공히 동일한 S-N 선도에 포함하고 있다.

3.2.2 폭풍 하중 피로시험

- (1) 동일 폭풍 하중 피로시험
극대 하중 200MPa, 평균 응력 100MPa인 경우의 동일 폭풍 하중 피로 시험의 결과를 Table 3.2에, 극대 하중 200MPa, 평균 응력 0 MPa인 경우의 동일 폭풍 하중 피로 시험의 결과를 Table 3.3에 나타낸다.
극대 하중 250MPa, 평균 응력 100MPa인 경우의 동일 폭풍 하중 피로시험의 결과를 Table 3.4에, 극대 하중 250MPa, 평균 응력 0 MPa인 경우의 동일 폭풍 하중 피로시험의 결과를 Table 3.5에 나타낸다.
극대 하중 300MPa, 평균 응력 100MPa인 경우의 동일 폭풍 하중 피로시험의 결과를 Table 3.6에, 극대 하중 300MPa, 평균 응력 0 MPa인 경우의 동일 폭풍 하중 피로시험의 결과를 Table 3.7에 나타낸다.
- (2) RANDOM 폭풍 하중 피로시험
극대 하중 300MPa, 평균 능력 0 MPa인 경우의 랜덤 폭풍 하중 피로시험의 결과를 Table 3.7의 하단에 나타낸다.
극대 하중 325MPa 및 390MPa, 평균 능력

3.2 피로 시험 결과

Table 3.2 Storm load fatigue test results.

(Extreme max. stress amplitude=200Mpa, Mean stress=100Mpa)

Storm load	Max.atress amplitude Mpa	Crack initiation life N_f	Fractured life N_f	Stress concentrate factor	Test piece number
C	107		164.5	5.64	B-04
D	120		70.5	5.68	B-03
E	147		62.5	5.01	B-05
F	200		49.5		C-07

Table 3.3 Storm load fatigue test results.

(Extreme max. stress amplitude=200Mpa, Mean stress=0Mpa)

Storm load	Max.atress amplitude Mpa	Crack initiation life N_f	Fractured life N_f	Stress concentrate factor	Test piece number
C	107		609.0		BA-27
D	120		379.0		BA-23
E	147		276.5		BA-22
F	200		74.4		BA-21

Table 3.4 Storm load fatigue test results.

(Extreme max. stress amplitude=250Mpa, Mean stress=100Mpa)

Storm load	Max.atress amplitude Mpa	Crack initiation life N_f	Fractured life N_f	Stress concentrate factor	Test piece number
A	100	32.0	85.5	4.38	A-08
B	116	17.0	57.5	2.96	A-02
C	133	12.0	40.5	3.04	A-05
D	150	11.0	39.5	3.89	A-11
E	250	3.0	13.5	3.33	A-03

Table 3.5 Storm load fatigue test results.

(Extreme max. stress amplitude=250Mpa, Mean stress=0Mpa)

Storm load	Max.atress amplitude Mpa	Crack initiation life N_f	Fractured life N_f	Stress concentrate factor	Test piece number
D	150	21.0	104.5	3.75	A-084
F	250	3.0	16.5	4.18	A-09

한계 누적 피로 피해도에 의한 피로 강도 해석

Table 3.6 Storm load fatigue test results.

(Extreme max. stress amplitude=300Mpa, Mean stress=100Mpa)

Storm load	Max.atress amplitude Mpa	Crack initiation life N_f	Fractured life N_f	Stress concentrate factor	Test piece number
A	120		54.5		BA-27
B	140		29.5		BA-28
C	160		23.0	4.28	B-02
D	180		21.5	4.28	B-01
E	220	1.5	10.5		C-04
F	300	0.6	4.5		C-06

Table 3.7 Storm load fatigue test results.

(Extreme max. stress amplitude=300Mpa, Mean stress=100Mpa)

Storm load	Max.atress amplitude Mpa	Crack initiation life N_f	Fractured life N_f	Stress concentrate factor	Test piece number
A	120	7.5	41.5		C-11
B	140	5.8	26.5		C-10
C	160	3.9	24.6		C-09
D	180	2.0	17.5		C-08
E	220	1.6	11.6		C-14
E	220	2.4	35.5		C-05
F	300	2.8	7.3		C-03
F	300	1.6	5.7		C-02
Random	300		35.5		C-12
Random	300		30.0		C-13
Random	300		30.0		C-16

Table3.8 Storm load fatigue test results.

(Extreme max. stress amplitude=325Mpa & 390 Mpa, Mean stress=100Mpa)

Storm load	Max.atress amplitude Mpa	Crack initiation life N_f	Fractured life N_f	Stress concentrate factor	Test piece number
Random	325	1.6	28.0		CA-09
Random	325		24.0		CT-07
Random	390		19.0		BT-14
Random	390		16.0		CT-06

4. 용접 이음부의 S-N 선도

선박이나 해양 구조물은 용접 구조를 전면적으로 채용하고 있으며 용접 이음부는 용접 처리만 된 상태로 사용되고 있다. 또 취항후의 피로 손상은 거의 용접 이음부에서 발생하고 있다.

따라서 피로 강도 해석의 주체는 이 용접 이음부의 해석이다. 용접 이음부의 피로 강도에 대해서는 잔류 응력, 용접 끝부분의 응력 집중 등 여러 가지 연구 과제가 남아 있으나 이러한 전제에 입각하여 현재 피로 강도 해석법을 어떻게 실용적으로 정도 있게 합리적으로 개량해 나가느냐가 본 연구의 과제이다.

누적 피로 피해도의 계산법에도 여러 가지 논의는 있으나 여기서는 마이너식에 의한 것으로 한다. 따라서 누적 피로 피해도 D는

$$D = \sum \frac{n(\delta)}{N(\delta)}$$

여기서 $n(\delta)$: 대상으로 하는 구조 부재에 작용되는 응력 폭 δ 의 거듭되는 수

$N(\delta)$: 응력 폭 δ 에 의해 구조 재료에 피로 균열이 발생할 때까지 거듭되는 수(응력 폭이 δ 일 때 S-N 선도에서 구할 수 있는 거듭되는 수)

이 $n(\delta)$ 은 Program 피로 시험의 해석인 경우에는 설정한 하중으로 자동적으로 결정되고 있지만 $N(\delta)$ 의 수치는 S-N 선도의 선정에 의해 결정되므로 前章3.1.3(1)의 정하중 피로시험에서 구한 S-N선도와 이것에 유사한 피로시험 DATA를 모아 비교 검토해서 누적 피로 피해도의 계산에 사용하는 S-N 선도의 검토를 하고자 한다.

4.1 용접 이음부의 S-N 선도의 조사

(1) 정하중 피로시험에서 구한 S-N 선도

평균 응력 0 MPa

$$N_c = 1.616 \times 10^{22} \delta^{-8.190}$$

$$N_f = 3.468 \times 10^{16} \delta^{-5.316}$$

평균 응력 100MPa

$$N_c = 1.617 \times 10^{14} \delta^{-4.515}$$

$$N_f = 4.335 \times 10^{12} \delta^{-3.618}$$

이러한 S-N선도를 본 논문에서는 각각 A_{oc} , A_{of} , A_{lc} , A_{lf} 선도라고 칭한다.

(2) Hotspot Stress-F법에 의해 정리한 SRF 선도

$$N_f = 1.445 \times 10^{12} \Delta \delta_h^{-2.907}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 B 선도라고 칭한다.

(3) RIB MODEL의 피로시험에서 (1)이외의 DATA를 수집해서 구한 S-N선도

$$N_f = 4.710 \times 10^{12} \Delta \delta^{-3.201}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 C 선도라고 칭한다.

(4) RIB MODEL (降伏점 32kgf/mm² 高張力鋼을 사용)의 피로시험 DATA를 수집해서 구한 S-N 선도

$$N_f = 4.710 \times 10^{13} \Delta \delta^{-3.723}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 D선도라고 칭한다.

(5) RIB MODEL(軟鋼을 사용)의 피로시험 DATA를 수집해서 구한 S-N선도

$$N_f = 3.538 \times 10^{13} \Delta \delta^{-3.663}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 E선도라고 칭한다.

(6) 비하중 전달형 십자 필렛 이음부의 S-N선도

$$N_f = 7.910 \times 10^{11} \Delta \delta^{-2.754}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 F선도라고 칭한다.

(7) 비하중 전달형 십자 필렛 이음부(高張力鋼을 사용)의 S-N선도

$$N_f = 1.380 \times 10^{16} \delta^{-5.028}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 G선도라고 칭한다.

$$N_f = 9.100 \times 10^{29} \delta^{-11.468}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 H 선도라고 칭한다.

(9) 일본 조선연구협회 제200 연구부회 제2분과회에서 정리한 하중 전달형 십자 필렛 이음부의 S-N선도

$$N_f = 1.345 \times 10^{16} \delta^{-5.291}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 I선도라고 칭한다.

(10) 금속재료 연수소의 하중 전달형 십자 필렛 이음부의 피로시험 DATA에서 구한 S-N선도

$$J_R : N_f = 2.397 \times 10^{13} \Delta \delta^{-3.742}$$

$$J_T : N_f = 5.969 \times 10^{12} \Delta \delta^{-3.312}$$

$$J_F : N_f = 1.509 \times 10^{13} \Delta \delta^{-3.416}$$

이러한 S-N선도를 본 논문에서는 각각 J_R , J_T

J_F 선도라고 칭한다.

$$J_N : N_f = 9.072 \times 10^{13} \Delta \delta^{-3.629}$$

이 S-N선도를 본 논문에서는 J 선도라 칭한다.

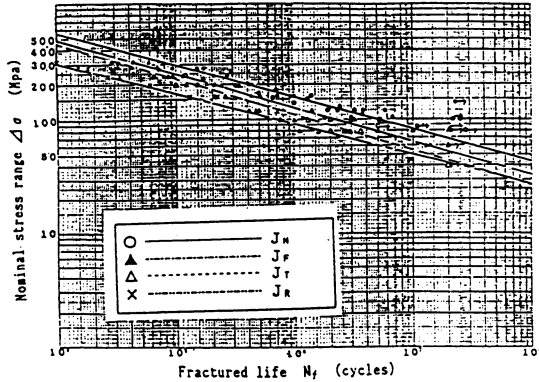


Fig. 4.1 S-N Curve (J_R, J_T, J_F, J_N Curve)

4.2 S-N 선도의 비교 검토

이상 최근에 정리된 S-N선도 및 이것과 유사한 履歷이 명확한 S-N선도를 정리하여 제시했는데 이것들은

- (1) 응력을 공칭 응력 진동폭 δ 로 한 것, 공칭 응력 범위 $\Delta \delta$ 로 한 것, HOT SPOT 응력 범위 $\Delta \delta_h$ 로 한 것,
- (2) R (= 최소 응력/최대 응력)이 R = 0인 것, R = -1인 것, 평균 응력 δ_m 를 일정으로 해서 평균 응력을 중심으로 正負의 응력 진동폭을 부하한 것.
- (3) 거듭된 수에 피로 균열 발생 회수 N_c 를 택한 것, 시험편의 파단 수명 N_f 를 택한 것.
- (4) 시험편 형상도 RIB MODEL, 십자 필렛 MODEL과 틀린다.

따라서 이것들을 그대로 비교할 수 없으므로 이하의 방침 아래 다시 정리해서 비교 검토해 보기로 했다.

그리고 4.1에서 수집한 DATA는 거의 절단 수평 N_f 로 정리되어 있어서 누적 피로 피해도의 계산도 N_f 에서 정리한 S-N선도를 사용하는 일이 많으므로 이하 절단 수명에 대해 비교 검토를 하고자 한다.

본 논문의 한계 누적 피로 피해도 검토의 기초가

되는 S-N선도가 되도록 RIB MODEL의 평균 응력을 중심으로 공칭 응력 진동폭을 부하한 S-N선도로 환산한다.

환산 방법으로는

① 공칭 응력 범위는 $\delta = 0.5 \times \Delta \delta$ 로서 공칭 응력 진동폭으로 변환한다.

② HOT SPOT 응력 진동폭 δ_h 도 $\delta_h = 0.5 \times \Delta \delta_h$ 로 해서 HOT SPOT 응력 범위에서 변환한다.

③ HOT SPOT 응력 진동폭을 공칭 응력 진동폭으로 변환하기 위해서는 RIB나 STIFFENER 선단의 용접 이음새 끝단부의 국부 최대 응력 δ_p 는

$$\delta_p = K_{th} \times K_{tw} \times \delta = K_{tw} \times \delta_h \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

K : 용접 이음새 끝단부의 응력 집중 계수와 같이 표현할 수 있으므로

$$\delta = \delta_h / K_{th} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

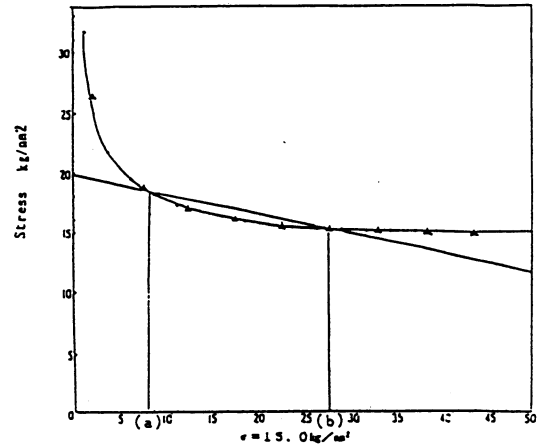


Fig. 4.2 Stress distribution of rib model (on rib line)

이 연구 결과를 토대로 검토한 $K_{th} = 1.25$ 로 한다.

④ R=0, R=-1인 경우의 응력 진동폭, 응력 범위를 중심으로 한 응력 진동폭 δ 에 변환하기 위해서는

R = -1인 경우의 응력 범위를 $\Delta \delta_e$, 응력 진동폭을 δ_e 로 하면

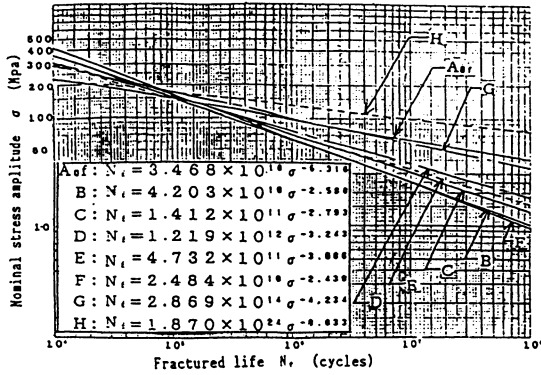


Fig. 4.3 $S(\sigma) - N_f$ curve (comparison among A_0 , H curve. $\sigma_m = 0$)

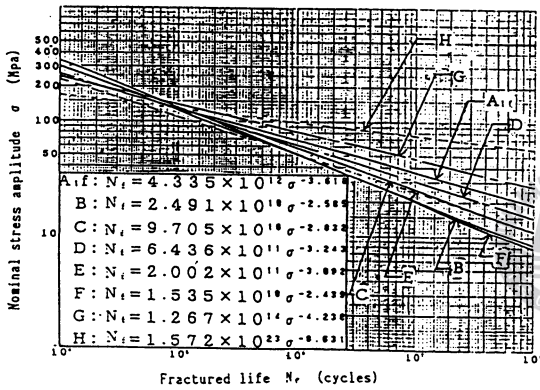


Fig. 4.4 $S(\sigma) - N_f$ curve (comparison among A_1 , H curve. $\sigma_m = 100\text{MPa}$)

$$\frac{\delta}{\delta_e} + \frac{\delta m}{\delta_b} = 1 \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

(4.3)식의 수정 Goodman 선도의 고찰로 인해

$$\delta = \delta_e \left(1 - \frac{\delta m}{\delta_b}\right) \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

로 해서 환산한다.

R=0인 경우의 응력 범위를 $\Delta \delta_{R=0}$ 으로 하고 이 경우의 평균 응력을 δ_{ep} 라고 하면 응력 진동폭도 δ_{ep} 이 되며

$$\delta_{ep} = 0.5 \times \Delta \delta_{R=0} = 0.5 \times \Delta \delta_b / K_{th} \quad \dots\dots (4.5)$$

(4.3)식에서

$$\frac{\delta_{ep}}{\delta_e} + \frac{\delta_{ep}}{\delta_b} = 1 \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

따라서 (4.4)식과 (4.6)식에서

$\delta = \delta_{ep} \times (\delta_b - \delta_m) / (\delta_b - \delta_{ep})$ 로 해서 환산한다.

⑥ 십자 필렛 MODEL의 실험 결과에서 십자 필렛 MODEL의 (4.1)식의 K_{th} 은 거의 1.0 으로 해도 좋다고 생각되기 때문에 여기서는 $K_{th} \approx 1.0$ 으로 해서 검토를 한다.

정리한 결과는 Fig. 4.3, 4.4, 4.5에서 볼수있다.

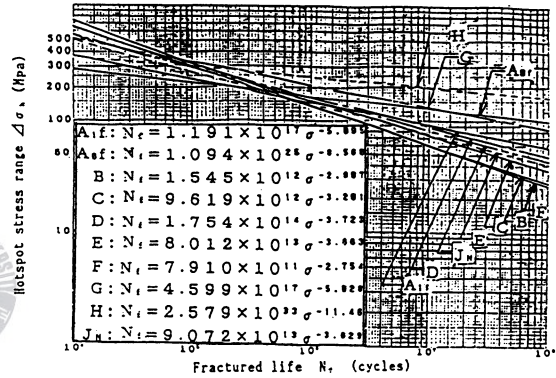


Fig. 4.5 $S(\Delta\sigma_n) - N_f$ curve (comparison among $A_0, \sim H$ & J_n curve)

4.3 비교 검토 결과에 대한 고찰

누적 피로 피해도를 계산하는 기초가 되는 S-N 선도에 이러한 차이가 있기 때문에 당연히 누적 피로 피해도에도 큰 차이가 나올 거라고 생각된다. 따라서 설계 S-N선도의 설정이 중요한 과제가 된다.

4.4 설계 S-N선도

4.2의 검토 결과가 나타내듯 Aof 선도와 B선도의 사이에는 큰 차이를 볼 수 있다.

이것을 상세하게 보면 A 선도의 그룹에 속하다고 생각 되는 것은 강재의 종류는 틀리지만 G 및 H 선도, B 선도의 그룹에 속하다고 생각되는 F선도, C선도의 그룹에 들어간다고 생각되는 D, Jn 및 E 선도의 3개 그룹으로 나누어진다.

A 선도와 B 선도의 차이는 여러 가지 요인을 생

각할 수 있지만 주된 요인으로서 잔류 응력이 생각된다. C, D 및 E 선도는 鋼 종류도 틀리지만 여러 가지 시험 DATA를 모은 것이기 때문에 이 중간에 위치하는 그룹이 되었다고 생각된다.

따라서 잔류 응력을 비롯하여 여러 가지 요소가 포함되어 있는 대표적인 평판 조립 구조의 피로 시험 결과에서 구한 B선도가 가장 기준 S-N 선도로써 사용하는데 적당하다고 생각된다.

5. 한계 누적 피로 피해도

前章3에서 하중 이력이 명확한 폭발 하중 피로 시험의 DATA를 얻었기 때문에 前章4에서 정리한 S-N선도를 이용해서 이 피로 시험의 누적 피로 피해도(DAMAGE FACTOR)를 계산해 본다.

S-N선도로서는 비교 검토를 위해 前章4.1의 선도 안에서 A_{of} 및 A_{if} 선도, C선도 및 B선도를 대표 선도에 선정하여 C선도 및 B선도는 각각 C_{of} 및 C_{if} , B_{of} 및 B_{if} 선도에 환산해서 계산한다. 여기서 C_{of} 및 B_{of} 선도는 前章 4.2에 나타난 방법으로 C 및 B선도를 평균 응력 0 MPa의 응력 진동폭에 의한 S-N선도에 환산한 Fig. 4.3의 C 및 B선도이다. 마찬가지로 C_{if} 및 B_{if} 선도는 4.2에 나타난 방법으로 C 및 B선도를 평균 응력 100MPa의 응력 진동폭에 의한 S-N선도에 환산한 것이며 누적 피로 피해도 D의 계산은 前章4에서 서술했듯이 마이너식에 의한 것으로 하고 전기(4.1)식을 사용한다. 동일 폭발 하중 피로 시험의 누적 피로 피해도의 계산 결과를 Table 5.1(a)에 Random 폭발 하중 피로 시험의 계산 결과를 Table 5.1(b)에 나타낸다.

누적 피로 피해도로 해서 b선도에 의한 계산 방법을 그림에 정리한 것을 Fig. 5.1에 나타낸다.

5.1 기준 S-N선도

A_{of} , A_{if} 선도를 이 선도를 구한 피로 시험의 실험 Plate의 잔류 응력이 상당히 적은 것 등에서 누적 피로 피해도를 계산하는 S-N선도로서 사용하는데는 적당하지 않은 것 같다. 평균적인 피로 강도를 나타내고 있는 C선도를 기준 S-N선도로 하

는 생각도 있으나, 역시 실제로 구조물의 잔류 응력 등의 제반 조건을 반영한 B선도를 누적 피로 피해도를 계산하기 위한 기준 S-N선도로서 사용하는 것이 적당하다고 생각된다.

5.2 한계 누적 피로 피해도 D_{CR}

동일 폭발 하중 피로 시험의 계산 결과를 나타내는 Table 5.1(a)를 보면 누적 피로 피해도 D는 일반적으로 1 이하의 수치를 나타내고 있으나 피로 시험을 한 C-2, C-8, C-10, C-11 및 C-14는 1 이하의 수치가 되고 있다.

또 Random 폭발 하중 피로 시험의 계산 결과를 나타내는 Table 5.1(b)의 누적 피로 피해도 D는 모두 1 이상의 수치가 되고 있다. 따라서 이 C Series의 실험 Plate의 잔류 응력을 측정해 보니 이러한 실험 Plate의 잔류 응력도 작아 약 10kgf/mm² 이었다.

용접 잔류 응력이 피로 강도에 미치는 영향은 일반적으로 평균 응력과 같은 영향으로서 취급해 도 되도록 되어 있다.

그렇지만 취급의 구체적 방법에 대한 정설은 아직 확고되어 있지 않다.

초기 잔류 응력으로 동일한 크기의 평균 응력에 바꿔 놓아도 된다는 피로 강도 평가의 생각도 있고, 또 잔류 응력과 평균 응력 및 거듭되는 응력의 합계가 降伏 응력을 넘으면 변형에 의해 잔류 응력이 완화된다는 생각도 이해할 수 있다. Fig. 4.3 - Fig. 4.5를 보면 잔류 응력의 영향은 수명이 긴 것만큼 현저하고 이러한 점을 고려해서 잔류 응력의 약 25%~75%를 평균 응력에 가산하여 피로 강도 평가를 진행 시킬 필요가 있다고 생각된다.

한편 Fig. 5.1을 보면 평균 응력 100MPa의 경우와 0MPa의 경우의 누적 피로 피해도에는 분명히 차이가 있으며, 평균 응력 100MPa의 경우와 누적 피로 피해도는 평균 응력이 0MPa의 경우에 비해 상당히 큰 수치를 나타내고 있다.

일반적으로 용접 구조물에는 降伏 응력 정도의 잔류 응력이 남아 있다. 지금 C Series 에도 일반

Table 5.1(a) Damage factors versus various S-N curves(constant storm fatigue test)

Test piece Number	storm	Mean stress MPa	Nominal stress amplitude MPa	Min stress amplitude MPa	Fracture life number of storm	Damage factor (A _{0f} &A _{1f})	Damage factor by B-curve	Damage factor by C-curve
A-04	D	0	150	50	104.50	0.80	3.35	2.44
A-09	F	0	250	50	16.50	0.74	1.36	1.06
A-08	A	100	100	50	85.50	0.72	1.63	1.18
A-02	B	100	116	50	57.50	0.77	1.63	1.19
A-05	C	100	133	50	40.50	0.82	1.63	1.21
A-11	D	100	150	50	39.50	1.15	2.10	1.60
A-03	F	100	250	50	13.50	1.36	1.86	1.51
BA-24	C	0	107	50	603.00	0.77	3.35	4.44
BA-23	D	0	120	50	378.00	0.79	5.56	3.93
BA-22	E	0	147	50	276.50	0.90	5.45	3.19
BA-21	F	0	200	50	74.40	0.79	3.19	2.37
B-04	C	100	107	50	165.50	1.24	2.86	2.05
B-03	D	100	120	50	70.50	0.79	1.72	1.25
B-05	E	100	147	50	62.50	1.00	2.05	1.51
C-7	F	100	200	50	49.50	2.10	3.50	2.72
C-11	A	0	120	50	41.50	0.18	0.94	0.88
C-10	B	0	140	50	26.25	0.20	0.85	0.62
C-9	C	0	160	50	24.55	0.32	1.06	0.70
C-8	A	0	180	50	17.51	0.38	0.99	0.74
C-14	E	0	220	50	11.83	0.30	0.83	0.63
C-5	E	0	220	50	35.50	1.13	2.52	1.90
C-3	F	0	300	50	7.24	0.88	1.00	0.80
C-2	F	0	300	50	5.60	0.69	0.79	0.63
BA-27	A	100	120	50	54.50	1.03	2.05	1.53
BA-28	B	100	140	50	20.50	0.85	1.86	1.18
B-02	C	100	160	50	23.00	0.98	1.86	1.28
B-01	D	100	160	50	21.50	1.29	2.01	1.58
C-4	E	100	220	50	10.50	0.86	1.24	0.99
C-6	F	100	300	50	4.50	0.90	1.03	0.88

한계 누적 피로 피해도에 의한 피로 강도 해석

Table 5.1(b) Damage factors versus various S-N curves(random storm fatigue test)

Test piece Number	Mean stress MPa	Max. stress	F storm	E storm	D storm	C storm	B storm	A storm	Total storm	Damage factor (A ₀ f&A ₁ f)	Damage factor by B-curve	Damage factor by C-curve
		Number										
C-12	0	Max. stress	300	220	180	160	140	120		0.28	1.09	0.08
		Number	0	1	2.5	3	3	19	35.5			
C-13	0	Max. stress	300	220	180	160	140	120		0.37	1.10	0.82
		Number	1	1.65	2	5	7	13	29.65			
C-16	0	Max. stress	300	220	180	160	140	120		0.84	1.51	1.15
		Number	0	1	2	2	9	15.6	29.60			
CA-9	100	Max. stress	325	238	195	173	152	130		1.12	1.87	1.44
		Number	0	1	2	2	9	14	28.0			
CT-7	100	Max. stress	325	238	195	173	152	130		0.89	1.52	1.16
		Number	0	1	0	2	8	13	24.0			
BT-14	100	Max. stress	390	286	234	208	182	156		1.43	2.07	1.65
		Number	0	1	0	1	6	11	19.0			
CT-6	100	Max. stress	390	286	234	208	182	156		1.17	1.71	1.36
		Number	0	1	0	1	5	10	16.0			

용접 구조물과 동공한 잔류 응력이 남아 있다고 해서 상기 생각에 따라서 평균 응력으로 바뀌어 누적 피로 피해도를 계산하면 상기 C-2,C-8,C-10, C-11 및 C-14의 누적 피로 피해도는 모두 1 이상이 된다. 따라서 한계 누적 피로 피해도는 $D_{CR} \leq 1$ 로 해도 좋을 것 같다. 상기 검토에 기초하여 「설계 S-N선도로서는 B선도를 사용해서 한계 누적 피로 피해도는 $D_{CR} = 1$ 로 해서 (4.1)식에 의해 구하는

누적 피로 피해도 D를 $D_{CR} \leq D$ 로 한다」를 제안

해서 정리하도록 하겠다.

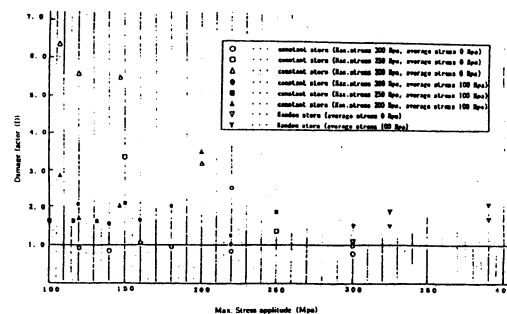


Fig. 5.1 Damage factor and max. stress by random load for fatigue tests.

6. 맺음말

참고문헌

피로 강도 해석이 널리 채용됨에 따라 현재의 피로 강도 해석법에는 많은 문제가 있는 것이 밝혀지고 있으며 피로 강도에 관한 제반 연구가 진행되어 새로운 피로 강도 해석법도 제안되고 있다. 그렇지만 현재 누적 피로 피해도에 의한 피로 강도 해석법은 설계에서 간편하게 사용할 수 있고, 특히 피로해석의 중요도가 큰 비중을 차지하고 영구적으로 wave와 접하는 항만시설에 적용할 수 있는 이점도 있어 현재 피로강도 해석법을 개량해가는 연구도 필요하다고 생각된다.

본 논문은 현재 행해져 있는 피로 강도 해석법의 큰 문제점의 하나인 한계 누적 피로 피해도의 설정에 관한 연구를 진행시켜 정리한 것이다.

다행히 Program 하중 피로 실험기가 새로 설치되었으므로 변동 하중 피로 시험을 실시해서 하중 이력이 명확한 경우의 피로 피해도의 해석에서 이 문제의 연구를 한 결을 진척시킬 수 있었다.

이러한 검토 결과에서 실험 Plate 제작시의 응력 등에 의해 S-N선도에는 꽤 큰 차이가 생기는 것을 밝혔다.

따라서 S-N선도를 비교 검토하여 누적 피로 피해도를 계산하기 위한 기준 S-N선도로서 SRF선도(본 논문의 B선도 여기서 평균 응력 0 및 100 MPa의 공칭 응력 선도에 변환해서 사용)를 이용하기로 하고 한계 누적 피로 피해도는 $D_{CR}=1$ 로 하는 것을 제안한다.

- 1) 金屬材料技術研究所：“疲れデータシート”，No.5 (1978), No.11~13(1979), No.18~20 (1980), No.27(1981), No.34(1983), No.54(1986).
- 2) 富田康光・河邊 寛・福岡哲二(1991)：“波浪荷重の統計的性質と疲労強度評價のための 波浪荷重シミュレーション法(その1)”，日本造船學會論集 第170號.
- 3) 永元隆一(1993)：“疲労強度解析に用いる評價應力-ホットスポット應力” 東海大學紀要 海洋學部 第35號
- 4) 永元隆一(1991)：“溶接継手部の余盛形状と疲労強度”，東海大學紀要 海洋學部 第32號
永元隆一・的場正明・川崎哲郎・井上克明・堀
- 5) 徹・飯野 暢・福岡哲治(1991)：“溶接 構造要素のモデル疲労試験結果と疲労設計法の提案”，日本造船學會論集 第170號.
- 6) 永元隆一(1990)：“海洋構造物の疲労設計の形状と研究の動向”，造船研究 Vol.21, No.4.
- 7) 日本造船研究協會第207研究部會(1993)：“船殻構造の強度評價と管理目標の定量化の 調査研究”，日本造船研究協會第207研究部會綜合報告.
- 8) 日本造船研究協會第202研究部會(1991)：“海洋構造物の疲労設計及び溶接部の品質に関する研究”，日本造船研究協會第202研究部會綜合報告書 研究資料 No.395.
- 9) 日本造船研究協會第200研究部會第2分科會(1978)：“船體構造部材の疲労強度”，日本造船研究協會報告 第86號.
- 10) 八木順吉・町田 進・富田康光・的場正明・川崎哲郎(1991)：“ホットスポット應力基準による平板構造の疲労強度評價(第1報)”，日本造船學會論文集 第169號.