

斜交叉 熔接構造物의 應力分布 및 疲勞強度에 관한 研究

(a study on the distribution of stress and fatigue strength of slanted cruciform welding structure under bending load)

엄 동 석* 강 성 원**

이 성 구*** 김 원 범****

1. 序論

최근에 보고되고 있는 다수의 損傷調査 結果[1-4]에 의하면 선체에 발생하는 손상의 상당수가 균열발생이고, 이들은 파랑하중의 반복과 추진기의 기진력등에 의한 피로균열이 많은 것으로 보고되고 있다. 따라서 선체에 작용하는 반복하중을 고려한 피로강도의 입장에서 충분히 검토할 필요가 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 먼저 선체구조에 많이 채용되고 있는 국산 조선용 연강재의 基礎試驗片에 대하여 疲勞強度 特性을 조사하였고 거기서 얻어진 變形率 - 疲勞龜裂 發生壽命 線圖로부터 공칭응력과 피로균열 발생부의 응력집중 계수를 이용하여 응력집중부의 疲勞龜裂 發生壽命 推定法을 검토하였다. 또한 double bottom skin 선체구조에서 횡강도 부재의 corner부를 대상으로 하여 模型試驗片을 제작하여 피로시험을 실시하고 본 연구에서 제안하는 疲勞壽命 推定法과 比較 檢討하였다.

2. 試驗片 및 實驗方法

notch재의 피로균열 발생수명을 추정하기 위해서 一定 變形率制御 疲勞試驗에 의하여 平滑材에 대한 각 재료정수를 구하였다. 이를 기초로 하여 본 연구에서는 2重底 構造의 縱強度 部材와 橫強度 部材의 交叉部를 검토대상으로 하여 Fig.1과 같은 模型試驗片을 제작하여 일정하중하의 疲勞試驗을 실시하였다. 사용강재의 기계적성질 및 화학성분은 Table 1과 같다. 사용한 試驗機는 용량 ± 20 ton의 油壓式 疲勞試驗機를 사용하였다. 시험편은 상하를 띤 고정으로 장착하였으며 상부축이 load cell이 부착된 고정점이고 하부지지점에서 피로하중을 가하도록 하였다. Fig.2와 같이 試片 각부위의 應力分布와 荷重負荷狀態를 檢證하기 위해 용접부 주변 및 평행부에 1축, 2축, 3축 3종류의 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 하중의 정상적 작용여부를 조사하기 위하여 Table 3과 같이 각 부위의 대칭위치의 스트레인값을 측정하였다. 시험편에는 가능한 굽힘모멘트 하중만 걸리게 하기 위하여 시험편의 상부와 하부를 스프링으로 보조지하였다. 疲勞荷重은 하중제어방식을 사용하였으며 하중파형은 Sine파로 하였고 부하속도 2Hz, 하중비는 0.1로 하였다.

3. 試驗結果 및 考察

模型試驗片에 대한 靜的荷重 負荷結果 얻어진 각 部位의 스트레인 測定值를 이용하여 단축응력으로 계산하여 Fig.2의 I-I 단면과 II-II 단면의 응력분포를 조사한 結果를 NO.3 시험편에 대하여 나타낸 것이 Fig.3 이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 종강도 부재가 교차하는 곳에서는 응력집중 계수가 약 2.7정도인 것을 알 수 있었다.

피로균열 발생위치는 Fig.2의 II-II 위치의 중앙부에서 발생하여 양측으로 용접 토우부를 따라서 전파하였고 III-III 위치에서는 II-II 단면의 피로균열이 상당히 (약 용접 비이드 길이의 1/2) 진전한 후에 중앙부에서 발생하였다. 본 실험결과로부터 문헌[5]에서 지적한 바와 같이 2重底 構造의 船殼構造에서도 종강도 부재와 횡강도 부재의 결합부인 交叉部材의 용접부재의 용접부에서 피로균열이 발생할 것을 예상할 수 있으며 본 실험결과에서는 용접부의 토우부에서만 疲勞龜裂이 발생하였으며, 필렛사이즈는 充分했음을 알 수 있다. Table 2에는 3개의 시험편에 대하여 평행부의 공칭응력 AS와 피로균열이 10mm 진전했을 때의 수명을 피로균열 발생수명으로 하였을 때의 피로균열 발생수명 N_c , 피로균열이 판의 1/2을 초과 하였을 때를 파단수명 N_f 로 하여 나타낸 것이다.

* 정회원 부산대학교 공과대학 조선공학과

** 정회원 부산대학교 공과대학 조선공학과

*** 한독 직업 훈련원

**** 부산대학교 공과대학 조선공학과 대학원

선체구조와 같이 각부재가 용접이음으로 형성된 응력집중부의 피로강도 해석에서는 재료의 피로특성 및 용접부의 형상에 대한 統計的 變動이 구조물의 피로강도에 미치는 影響을 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 선체 구조부재의 N_c 를 추정하기 위해서 Fig.4와 같이 평활시험편에 의한 본 연구결과와 외국연구자들에 의해 얻어진 56개의 실속치에 의한 $\Delta\epsilon$ 과 N_c 의 관계를, 統計的으로 구한 破壞確率에 대한 $\Delta\epsilon - N_c$ 곡선을 이용하여 조선용 연강재의 P-AS- N_c 곡선을 推定하였다. 위에서 얻은 56개의 실속치를 사용하여 얻은 표본본산을 모본산으로 해서 P-AS- N_c 곡선을 다음식으로 나타낼 수가 있다.

$$[\ln(\Delta\epsilon)]_p = E[\ln(\Delta\epsilon)] + u_p \{ \text{Var}[\ln(\Delta\epsilon)]^{1/2} \} \\ = \ln(0.0121N_c^{-0.137} + 0.4455N_c^{-0.542}) + 0.116u_p \quad (1)$$

상식의 u_p 는 다음 식에 의하여 구할 수가 있다.

$$(1/\sqrt{2\pi}) \int_{u_p}^{\infty} \exp(-u^2/2) du = p \quad (2)$$

용접이음의 토우부에서는 Fig.5에서 보는 바와 같이 구조의 幾何學的 形狀에 의하여 발생하는 2차응력 S_m 과 용접 이음부의 토우부의 형상에 의존하는 peak응력 S_p 가 重疊하여 작용하게되며[6], 구조의 幾何學的 應力集中 係數 K_{tD} 및 용접 토우부의 형상에 의한 彈性 應力集中 係數 K_{tW} 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$K_t = (S + S_m + S_p) / S = K_{tD} \cdot K_{tW} \quad (3)$$

용접 토우부에서의 $\Delta\sigma$ 를 統計的으로 推定하는 方法으로서는 다음식을 이용한다.

$$K_t = (\Delta\sigma/\Delta s \cdot \Delta\epsilon/\Delta\epsilon)^{1/2} \quad (4)$$

$$\Delta\sigma = m \cdot \Delta\epsilon^n \quad (5)$$

(5)식의 m 와 n 는 재료정수이고 재료의 원형 평활시험편에 의한 실험결과를 (5)식과 같은곡선으로 分布한다고 假定하여 최소자승법에 의하여 재료정수 m 와 n 를 推定하면 다음과 같다.

$$\Delta\sigma = 342.5\Delta\epsilon^{0.38} \quad (6)$$

(3)식과 (5)식을 (4)에 대입하여 대수를 취하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\ln(K_{tD} \cdot \Delta S) = \ln(\sqrt{mE}) + (n+1)\ln(\Delta\epsilon)/2 - \ln(K_{tW}) \quad (7)$$

아직 국내에서는 船體 構造部材의 필렛용접 이음부에서 토우부의 형상에 대한 자료가 부족하므로 선체구조부재의 필렛용접 이음부의 토우부의 응력집중계수 K_{tW} 에 대하여 Nagai등[7]이 정리한 자료인 기대치 $E[\ln(K_{tW})] = 0.876$ 과 분산 $\text{var}[\ln(K_{tW})] = 0.0623$ 을 이용하여 선체 구조부재의 疲勞強度 曲線을 推定하기로 한다.

$\ln(K_{tD} \cdot \Delta S)$ 의 기대치 및 분산은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[\ln(K_{tD} \cdot \Delta S)] = 7.018 + 0.69 \ln(0.0121N_c^{-0.137} + 0.4454N_c^{-0.542}) \quad (8)$$

$$\text{var}[\ln(K_{tD} \cdot \Delta S)] = 0.0687 \quad (9)$$

이상의 결과를 이용하면 선체 구조부재의 공칭응력 ΔS , 구조적 불연속에 의한 응력집중 계수 K_{tD} 와 피로균열 발생수명 N_c 의 각 파괴확률에 대한 P- $K_{tD} \cdot \Delta S - N_c$ 곡선은 다음식으로 구할 수 있다.

$$[\ln(K_{tD} \cdot \Delta S)]_p = 7.018 + 0.69 \ln(0.0121N_c^{-0.137} + 0.4454N_c^{-0.542}) + 0.262u_p \quad (10)$$

위 식을 이용해서 P=10, 50%에 대한 $K_{tD} \cdot \Delta S - N_c$ 곡선을 구해서 나타낸 것이 Fig.6이다.

Fig.6에서 보는바와 같이 본 실험결과와 (10)식에 의해서 추정된 파괴확률 50%의 S-N곡선보다도 안전 측에 있음을 알 수 있다. 이것은 추정곡선에 이용한 모재의 S-N곡선이 Fig.4에서 보는바와 같이 본 시험에 사용한 강재보다 피로강도가 낮은 강재에 대한 자료가 많이 포함되어 있으며 용접 토우부에 대한 K_{tW} 의 추정치의 오차에 기인한다고 생각된다.

4. 結論

- 1) 선체구조부재에서 종강도부재와 횡강도부재의 교차부에서는 용접토우부에서 피로균열이 발생함을 확인하였다.
- 2) 선박구조부재의 교차부에서의 피로강도에 대한 S-N곡선을 얻을 수 있었다.
- 3) 선체구조부재의 피로강도는 사용강재의 평활제에 의한 변형률 제어 실험결과와 용접 토우부 및 개구부의 응력집중계수에 대한 통계적 자료에 의하여 P-AS- N_c 곡선을 추정할 수 있음을 확인 하였다.

參 考 文 獻

- [1] 이일태 : 船體損傷의 實例에 따른 問題點 比較 檢討 및 이어따른 對策.

- (上). 技術現代, Vol.5, No.4, 1985.
- [2] 이일태 : 船體損傷의 實例에 따른 問題点 比較 檢討 및 이에따른 對策.
(下), 技術現代, Vol.6, No.1, 1986.
- [3] 寺田泰治 : 最近の船體損傷とその對策, 新い造船學, 日本造船學編, 1978.
- [4] 日本海事協會 : 1985年度の 船體損傷統計, 日本海事協會誌, No.196, 1986.
- [5] T.Okamoto et.al. : Strength Evaluation of Novel Unidirectional Girder System Product Oil Carrier by Reliability Analysis, SNAME, Annular Meeting, New York, 1985.
- [6] 砂本大造 外 : 溶接継手の疲勞強度に關する新しい評價法の檢討, 三菱重工業技報, 第16卷, 第3號, 1979.
- [7] 永井欣一 外 : 船體橫強度部材の溶接部における疲勞強度の統計的推定について, 關西造船協會誌, 第182號, 1981.
- [8] 日本造船研究協會第170研究部會 : 船體構造不連續部の疲勞設計法に關する研究, 研究資料, NO.316, 1979.
- [9] 長野健 外 : 船殼局部構造の疲勞強度に關する研究(第2報), IHI技報, 第17卷, 第5號, 1977.
- [10] 長野健 外 : 殼局部構造の疲勞強度に關する研究(第3報), IHI技報, 第18卷, 第6號, 1978.

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of mild steel used (사용장치의 기계적성질 및 화학성분)

Mechanical Properties			Chemical Composition(%)				
Y.S. kg/mm ²	U.T.S. kg/mm ²	Elong. (%)	C	Si	Mn	P	S
29.7	43.9	34.0	0.11	0.23	0.84	0.017	0.014

Table 2 Fatigue test results of model specimens (모형시험편의 피로시험결과)

Speci.No.	1	2	3
Nominal stress, ΔS (Kg/mm ²)	12.4	11.5	7.8
Fatigue crack initiation life, No (cycle)	104100	58500	122000
Fatigue fracture life, Nr (cycle)	113000	628000	137300

Table 3 Measured strains value strain gage of No.3 model specimen (x10⁻⁶) (스트레인속정결과)

Strain Gage No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	19	20	21	22	23	24	25	26	32	33	34
	3ton	370	1020	1010	360	295	260	330	635	595	525	495	595	590	565	540	435	440	-345	-385

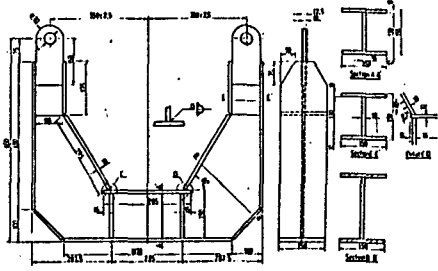


Fig. 1 Structure and configuration of hull structure model specimen
(선체구조부재의 모형시편의 형상 및 치수)

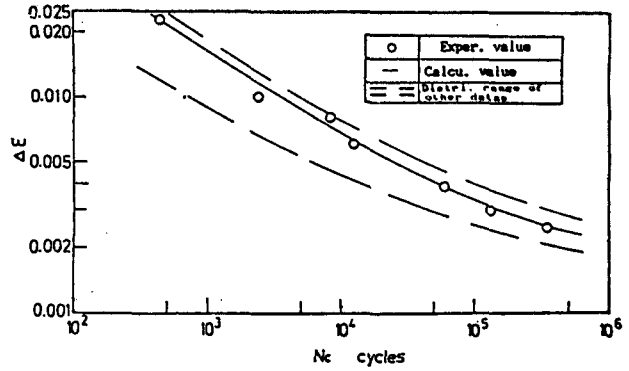


Fig. 4 $\Delta\sigma$ - N_c curve of mild steels for ship hull structure
(각종 조선통연강재의 $\Delta\sigma$ - N_c 곡선)

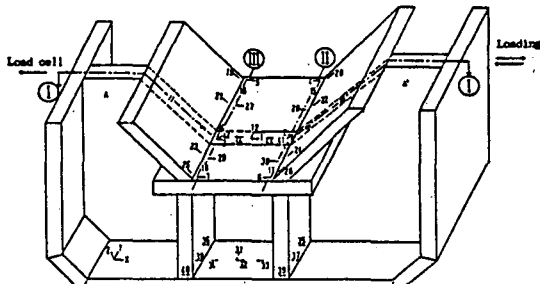


Fig. 2 Positions of strain gage (스트레인게이지의 부착위치)

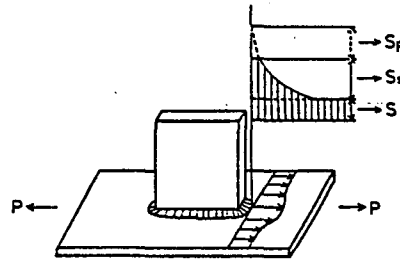


Fig. 5 Evaluation of stress classification induced in the weld of structures (용접이음부에서 발생하는 응력의 종류)

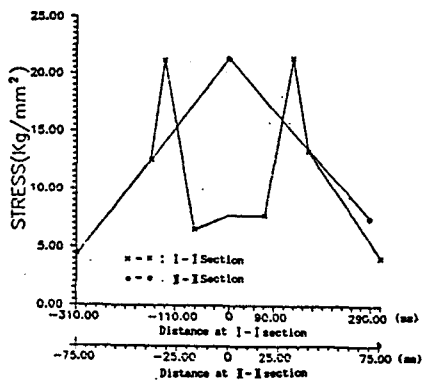


Fig. 3 Stress distributions measured by strain gage of No. 3 model specimen (모형시편의 응력분포)

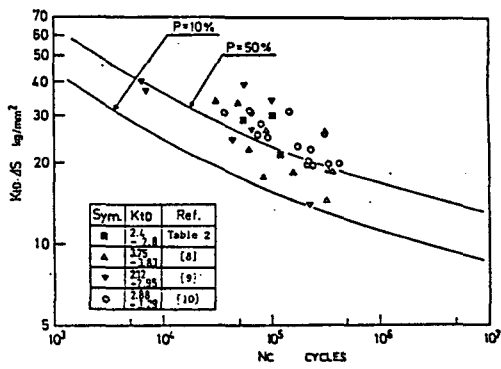


Fig. 6 Probability, stress and fatigue life relations in fatigue strength of ship hull construction
(선체구조부재의 P- $\Delta\sigma$ - N_c 곡선)