

鋼構造物 맞대기 鎔接連結部の 疲勞破壞舉動에 관한 研究

A Study on the Fatigue Fracture Behavior in Butt Welded Joints of Steel Structures

朴	濟	善*
Park,	Je	Seon
鄭	榮	和**
Chung,	Yeong	Wha
金	正	泰***
Kim,	Jeong	Tae

Abstract

For the research on the fatigue fracture behavior in the welded joints of steel structures, base metal specimens and welded ones were selected, and the direct fatigue tests were carried out. Thereafter, fatigue-life ($S-N$) curves, plastic strain-number of cycles (ϵ_p-N) curve, the extrapolated fatigue-life (ϵ_p-N_c) curve, and $da/dN-\Delta K$ curves were plotted.

By these results the followings were obtained.

It was shown that the ratio of fatigue strength at $2 \cdot 10^6$ cycles of the welded specimen to that of the base metal one was 0.6, and that 0.72 for the base metal and 0.65 for the welded one were the ratio of fatigue strength at $2 \cdot 10^6$ cycles to yielding stress.

The $S-N$ curve for the welded specimen was separated into two sections, the low gradient section and the steep section. As this result, it was shown that the more stress became to reduce, the more the reduction of fatigue strength became to be great. It was shown that fatigue strength at $2 \cdot 10^6$ cycles from this case was about 83 % of that from the $S-N$ curve plotted with one section. It was thought that the reason was that weld flaw acted greatly on the fatigue strength within the low stress range.

It was shown that at the instart of crack initiation plastic strain increased abruptly in the case of the welded specimen more than the case of the base metal specimen, and increased abruptly in the upper stress range in both cases.

It was shown that the experimental constant α , 0.42, in the base metal nearly accorded with Manson-Coffin's result, but this made a great difference with the case in the welded specimen. It was thought that it was due to the abrupt change of plastic strain and the influence of weld flaw.

* 正會員 · 江原大學校 工科大學 教授, 土木工程科

** 正會員 · 江原大學校 工科大學 副教授, 土木工程科

*** 正會員 · 江原大學校 大學院 碩士

要 旨

素材試驗片과 맞대기 용접試驗片을 對象으로 疲勞試驗을 行하여 作用最大應力—疲勞壽命($S-N$)線圖, 塑性變形率—荷重反復回數(ϵ_p-N)線圖, 初期龜裂發生時의 塑性變形率—疲勞壽命(ϵ_p-N_c)線圖 및 龜裂成長率—應力擴大係數變動範圍($da/dN-\Delta K$)線圖을 그려서 鋼構造物 鎔接部에서의 여러가지 疲勞舉動을 檢討하였다.

本 研究에서 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

荷重反復回數 2×10^6 cycle에서의 疲勞強度는 鎔接部가 素材部の 約 60%였으며 降伏應力에 대한 疲勞強度의 比는 素材부와 鎔接部가 各各 0.72, 0.65로 나타났다.

鎔接試驗片의 $S-N$ 線圖는 疲勞強度의 減少가 緩慢한 區間과 疲勞強度의 減少가 큰 區間으로 分類되어 作用最大應力이 작을 수록 疲勞強度의 減少가 커지는 現象을 보였다. 두 區間으로 區分되지 않은 $S-N$ 線圖에 의한 疲勞強度에 비해 2×10^6 cycle에서의 疲勞強度가 約 83%에 該當하였다. 이는 낮은 應力에서 鎔接部 內部缺陷의 影響이 크게 作用하는 때문이 아닌가 생각된다.

鎔接試驗片의 境遇 素材試驗片에 비해, 또 作用最大應力이 클 수록 初期龜裂發生이 빠르고 龜裂發生直前의 塑性變形率의 增加가 急激한 것을 알 수 있었다.

素材試驗片에서 ϵ_p-N_c 關係式의 常數 α 값이 0.42로 Manson, Coffin의 研究結果와 거의 一致하였고 鎔接試驗片에서는 이 값이 0.28로 이들의 研究結果와 큰 差異를 나타내었는데, 이는 疲勞에 의한 鎔接部 塑性變形의 急激한 變化와 內部缺陷의 影響이 作用했기 때문이 아닌가 생각된다.

이와 같은 結果로 볼 때 既存의 鋼構造物 및 向後 新設될 鋼構造物 鎔接部의 品質 및 疲勞에 대한 安全性에 適切한 對策이 要望되며, 이 分野에 관한 더 많은 研究가 行해져야 되리라고 思料된다.

1. 서 론

1960年代 以後 鋼構造物의 高強度化 및 輕量化 추세에 의해 鎔接이음方法이 과감히 채택되면서 鎔接이음에 起因한 疲勞破壞事故 및 疲勞龜裂發生事故에 대한 報告가 잇따르고 있다^(1,2).

가로方向 맞대기 용접의 경우만 보더라도 外國에서는 鎔接補強덧붙이기部의 形狀 및 크기, notch 등에 起因한 應力集中이 疲勞舉動에 미치는 影響^(3,4), 鎔入量 不足이 疲勞舉動에 미치는 影響⁽⁵⁾, 鎔接部 內部不連續이 疲勞舉動에 미치는 影響^(6,7), 鎔接熱影響에 의한 殘留應力이 疲勞舉動에 미치는 影響^(8,9)等 細部的인 事項에 까지 많은 研究가 行하여지고 있다. 그러나 國內에서는 小引張(compact tension; CT) 試驗片에서 鎔接方向과 鎔接入熱量, 鎔接材料의 差異等 이 疲勞舉動에 미치는 影響에 관한 研究⁽¹⁰⁾ 以外에는 鎔接部의 疲勞破壞에 대한 이렇다할 研究

가 없는 實情이다. 더욱이 實部材形 試驗片에 대한 研究는 全無하다.

이제, 우리도 우리의 材料나 鎔接技術의 水準을 고려하여 우리대로 鎔接連結部에 대한 疲勞舉動을 밝혀 鋼構造의 疲勞設計 指針을 마련해 나가야 할 때라고 생각된다.

本 研究는 이에 착안하여 鎔接連結部의 疲勞舉動을 밝히는데 조금이라도 도움을 줄 수 있을까 하여 行해졌다. 우선 今回에는 가장 기본적인 것으로서 가로方向 맞대기 용접連結部를 갖는 板試驗片을 保有中인 疲勞試驗機 容量에 맞는 치수로 製作하여 引張脈動荷重에 대한 疲勞試驗을 行하고, 作用最大應力—疲勞壽命($S-N$)線圖, 塑性變形率—荷重反復回數(ϵ_p-N)線圖, 初期龜裂發生時의 塑性變形率—疲勞壽命(ϵ_p-N_c)線圖, 疲勞龜裂成長速度—應力擴大係數의 變動範圍($da/dN-\Delta K$)線圖 等を 그려서 疲勞舉動을 檢討해 보았다.

표 2-1. Chemical Composition of Base Metal and Electrode.

	Chemical Composition (%)				
	C	Si	Ni	T	S
Base Metal	0.20	0.55	1.50	0.040	0.040
Electrode	0.13	0.03	0.60	0.020	0.023

표 2-2. Mechanical Properties of Base Metal and Welded Metal.

	Yielding Stress (kg/mm ²)	Ultimate Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Shore Hardness (Hs)
Base Metal	43.2	68.1	18.3	40.9	31.5
Electrode	28.7	43.1	21.5	43.7	29.5

2. 實 驗

2.1 材 料

本 實 驗에 使用된 鋼材는 市 中에서 購 入한 것 으로 成 分을 分 析하여 본 結 果 材 質 및 化 學 成 分이 KSD 3506 鎔 接 構 造 用 壓 延 鋼 材 SWS 53 과 거 의 一 致 하 였 다. 鎔 接 棒 은 KSD 7004 와 KSD 3508 을 따 랐 으 며 低 水 素 系 E 4316 이 다.

材 料의 化 學 成 分 및 機 械 的 性 質 은 표 2-1, 표 2-2 와 같 다.

2.2 試 驗 片의 形 狀 및 치 수

2.2.1 靜 的 引 張 試 驗 片

KSB 0801 5 號 에 따 라 그 립 2-1 과 같 이 製 作 하 였 다.

2.2.2 疲 勞 試 驗 片

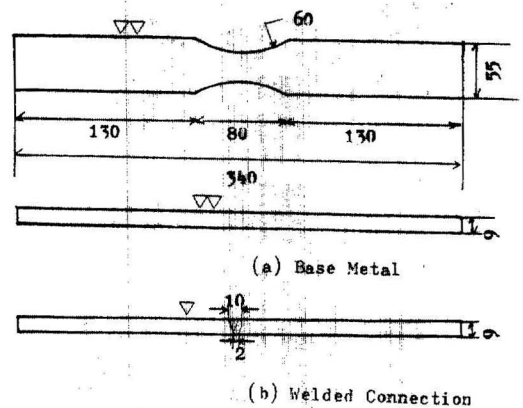
그 립 2-2 와 같 이 製 作 하 였 다.

疲 勞 舉 動 部 를 局 限 하 기 위 하 여 曲 率 을 크 게 하 여 曲 率 半 徑 을 60 mm 로 하 였 다.

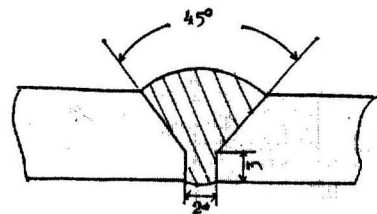
鎔 接 部 斷 面 形 狀 은 그 립 2-3 과 같 다.

2.3 鎔 接 方 法 및 다 姆 질

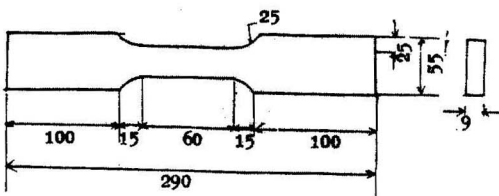
鎔 接 方 法 은 手 動 式 被 覆 아 아 크 鎔 接 (manual arc covered welding) 法 을 使 用 하 였 으 며 鎔 接 棒 은 軟



그 립 2-2. The Shape of Specimen for Fatigue Test.



그 립 2-3. Welded Section.



그 립 2-1. The Shape and Size of Tension Specimen.

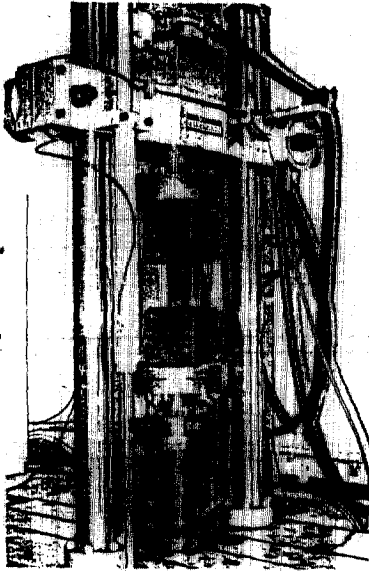
鋼 用 被 覆 아 아 크 鎔 接 에 利 用 되 는 低 水 素 系 E 4316 을 使 用 하 였 다.

素 材 試 驗 片 의 表 面 은 sand paper 800 까 지 使 用 하 여 表 面 處 理 하 였 고, 鎔 接 試 驗 片 은 補 強 덧 붙 이 기 部 를 grinding 하 고 sand paper 800 까 지 使 用 하 여 試 驗 片 表 面 上 에 서 發 生 할 수 있 는 外 部 缺 陷 要 因 이 最 小 化 되 도 록 하 였 다.

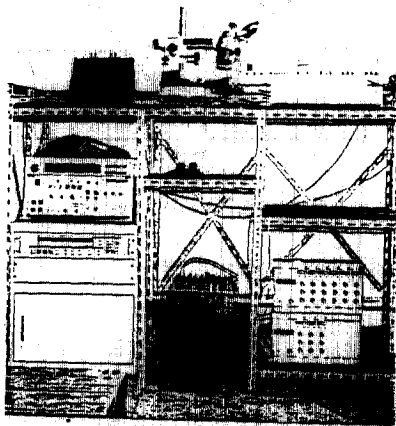
2.4 試驗機

素材試驗片的 靜的引張強度試驗은 200 ton 容量構造用 萬能試驗機(universal testing machine)을 사용하여 行하였으며, 疲勞試驗에는 25 ton 用 5 ton 兼用 構造用 疲勞試驗機 및 dynamic strain amplifier 와 X-Y recorder, multi-corder 가 사용되었다.

이 試驗機들은 本 江原大學校 土木工學科內 構造實驗室에 設置되어 있는 것들로 寫眞 2-1 과



寫眞 2-1. Fatigue Testing Machine.



寫眞 2-2. Control Box, Multi-corder, X-Y Recorder, and Dynamic Amplifier.

寫眞 2-2 와 같다.

2.5 疲勞試驗

2.5.1 準備

疲勞試驗은 25 ton 用 load cell 과 controller 에 의해 荷重을 一定하게 維持시키는 荷重制御方法을 擇하였다. 應力과 變形率과의 關係를 檢出하기 위하여 그림 2-4 와 같이 試驗片의 危險斷面中央部에 strain gauge 을 附着시켰으며, 龜裂 길이(crack length)를 觀察하기 위하여 그림 2-5 와 같이 試驗片 表面에 crack gauge 를 附着시켰다.

이들 gauge 들의 附着은 gauge 用 bond 를 사용하여 試驗片 表面과 一體가 되도록 하였다.

2.5.2 荷重

① 素材試驗片

使用된 鋼板의 降伏應力이 43.2 kg/mm^2 이다. 作用最大應力을 降伏應力보다 크게 하여 $43.2 \text{ kg/mm}^2 \times 9 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} = 9.72 \text{ ton}$ 의 約 12% 인 11.5 t (應力: 51.5 kg/mm^2 , 降伏應力의 118%) 로부터 始作하여 10.75 t (47.7 kg/mm^2 , 110.6%), 10.0 t (44.4 kg/mm^2 , 102.8%), 8.75 t (38.8 kg/mm^2 , 90.02%), 7.5 t (33.3 kg/mm^2 , 77.1%) 로 하였다.

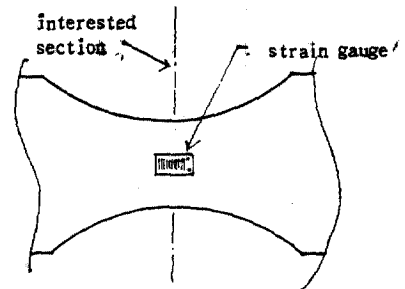


그림 2-4. Bond and Location of Strain Gauge.

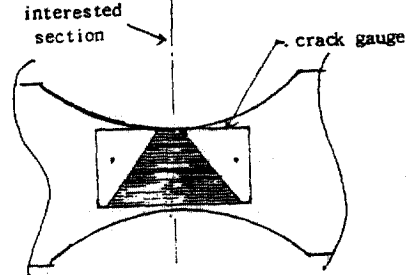


그림 2-5. Bond and Location of Crack Gauge.

② 鎔接試驗片

鎔接棒的 降伏應力이 28.7 kg/mm²이다. 作用最大應力을 降伏應力보다 크게 하여 28.7 kg/mm²×9 mm×25 mm=6.46 t의 約 145%인 9.37 t(應力: 41.67 kg/mm², 降伏應力의 145%), 9.11 t(40.51 kg/mm², 141.1%), 8.73 t(38.8 kg/mm², 132%), 8.38 t(37.1 kg/mm², 129.3%), 7.81 t(34.72 kg/mm², 120.9%), 7.92 t(32.41 kg/mm², 112.9%), 6.77 t(30.10 kg/mm², 104.8%), 6.25 t(27.78 kg/mm², 96.8%), 5.75 t(25.55 kg/mm², 89.0%), 4.99 ton(22.22 kg/mm², 77.4%)로 하였다.

2.5.3 測定

應力—變形率線圖는, 應力은 controller 및 load-cell에 의하여 制御하고 變形은 strain gauge에 檢出된 전기저항을 dynamic strain amplifier로 증폭하여, X-Y recorder上에서 σ - ϵ hysteresis loop로 측정하였다. σ - ϵ hysteresis loop를 그릴 때는 高-사이클 荷重反復을 一時 中止하고 手動操作에 의해 1 cycle/sec 以下の 速度로 荷重을 가하였다. 疲勞龜裂은 crack gauge를 위험부에 附着하여 dynamic strain amplifier를 통해 증폭된 전기저항을 multi-corder上에서 ϵ - t 線圖로 測定하였다.

3. 實驗結果 및 整理方法

3.1 疲勞強度

3.1.1 作用最大應力—疲勞壽命(S-N)線圖
Wöhler는 다음과 같은 式을 提案하였다⁽¹¹⁾.

$$\sigma = a - m \cdot \log N \quad (\sigma > \sigma_w) \quad \dots\dots(3-1)$$

σ_w = fatigue endurance limit

素材試驗片 및 鎔接試驗片의 作用最大應力과 初期龜裂發生壽命(N_c) 및 作用最大應力과 疲勞破斷壽命(N_f)과의 關係를 log-normal上에 圖示하여 Wöhler의 式을 利用하여 2×10^6 cycle의 疲勞壽命(日本 網道路橋 標準示方書)을 推定하였다.

3.1.2 塑性變形率—荷重反復回數(ϵ_p - N)線圖

塑性變形率 ϵ_p 는 本疲勞試驗 結果인 應力—變形率 履歷曲線上에서 求할 수 있다. 荷重을 加하기 始作하여 疲勞試驗을 行하면서 여러 段階

로 나누어 σ - ϵ hysteresis loop를 그린다.

그림 3-1은 疲勞試驗 結果인 σ - ϵ 線圖의 例를 나타낸 것이며, 그림 3-2는 應力—變形率 關係線圖를 分析하여 ϵ_p 를 求하는 例를 보인 것이다. 그림 3-2의 ϵ_t 는 全變形率(total plastic strain)이다. 이들 사이에는 다음의 關係가 成立한다⁽¹²⁾.

$$\epsilon_t = \epsilon_s + \epsilon_p \quad \dots\dots(3-2)$$

$$\epsilon_s = \epsilon/E \text{ 이므로}$$

$$\epsilon_p = \epsilon_t - \epsilon/E \quad \dots\dots(3-3)$$

初期龜裂이 發生할 때 까지를 여러 段階로 나누어 위와 같이 求한 ϵ_p 와 그때의 荷重反復回數(N)와의 關係曲線, 即 ϵ_p - N 線圖를 그린다.

3.1.3 初期龜裂發生時의 塑性變形率과 疲勞壽命과의 關係(ϵ_p - N_c)線圖

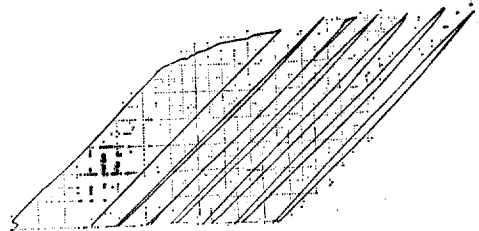


그림 3-2. An Example of Stress-Strain Hysteresis Loop

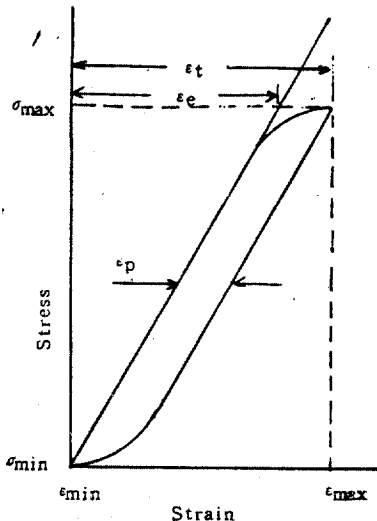


그림 3-3. Analysis of Stress-Strain Curve.

初期龜裂發生時的 塑性變形率과 疲勞壽命과의 兩對數紙上的 關係에는 Manson-Coffin 의 다음 의 式을 適用하였다⁽¹³⁾.

$$\epsilon_p \cdot N^\alpha = C \quad \dots\dots(3-4)$$

여기서, α =inverse of fatigue ductility exponent

C =fatigue ductility coefficient

이 式에서의 常數 α , C 를 素材試片과 鎔接試驗片의 結果에서 求하여 低-사이클 領域에서의 疲勞舉動을 豫測하였다.

3.2 疲勞龜裂成長舉動

multi-corder 上에서 檢出한 $\epsilon-t$ curve와 作用荷重과의 關係를 $da/dN-\Delta K$ 線圖로 圖示하여 龜裂成長舉動을 解析하였다.

Paris와 Erdogan은 龜裂成長率—應力擴大係數變動範圍에 關하여 다음과 같은 式을 提案하였다⁽¹⁾.

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad \dots\dots(3-5)$$

여기서, $\begin{cases} da/dN = \text{crack growth rate} \\ \Delta K = \text{range of stress intensity factor} \\ C, m = \text{material constants} \end{cases}$

應力擴大係數 K_I 는 다음과 같다⁽¹⁴⁾.

$$K_I = \sigma(\pi \cdot l)^{\frac{1}{2}} \cdot \xi(\alpha) = \sigma \sqrt{\pi \cdot l} \cdot [1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha^2 - 1.72\alpha^3 + 30.39\alpha^4] \dots\dots(3-6)$$

단, $\begin{cases} \alpha = l/b \\ l = \text{crack length} \\ b = \text{specimen width, } \alpha < 0.6 \end{cases}$

$da/dN-\Delta K$ 線圖를 computer에 의해 計算하고 圖示하였다. 이에 대한 flow chart는 그림 3-3과 같다.

4. 結果 및 考察

4.1 疲勞強度

4.1.1 應力—疲勞壽命 關係

完全引張脈動疲勞試驗(stress controlled fatigue test)을 實施하여 求한 S-N線圖는 그림 4-1과 같다.

日本 鋼道路橋 標準示方書에 의한 疲勞限界壽命 $2 \cdot 10^6$ cycle을 基準으로 하면 그림에서 素材試驗片과 鎔接試驗片의 疲勞強度 推定式은 式(4-1) 및 式(4-2)와 같다.

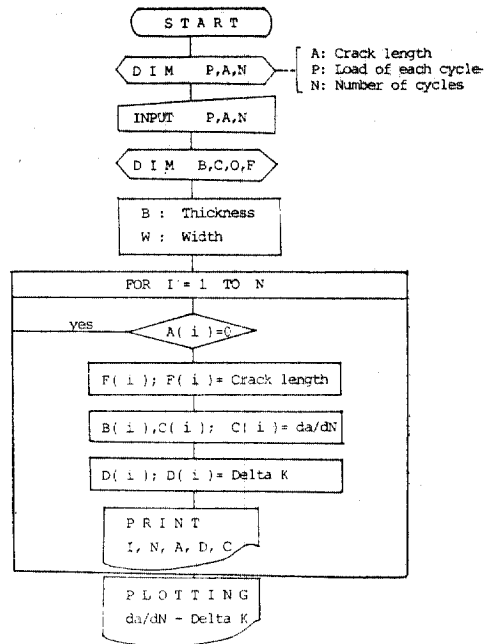


그림 3-3. Flow Chart for the Calculation of ΔK and Plotting $da/dN-\Delta K$ Relation.

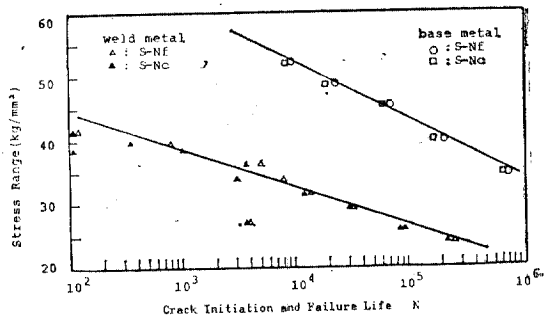


그림 4-1. Relation between Stress and Crack Initiation and Failure Life for Base Metal and Welded Metal.

$$\sigma = 85.2 - 8.38 \log N \quad \dots\dots(4-1)$$

$$\sigma = 57.5 - 6.03 \log N \quad \dots\dots(4-2)$$

그림 4-1 및 式(4-1), (4-2)를 土臺로 한 $2 \cdot 10^6$ cycle의 疲勞強度는 素材 및 鎔接部에서 各各 32.39, 15.50 kg/mm² 이었다. 표 4-1은 素材와 鎔接部の 疲勞強度와 降伏應力과의 關係를 나타낸 것이다.

素材部와 鎔接部の 降伏應力の 比가 1:0.66이고 疲勞強度의 比가 1:0.6으로 나타났다. 이

표 4-1. Correlation between Yielding Stress and Fatigue Strength.

	Yielding Stress (σ_y) (kg/mm ²)	Fatigue Strength (σ_f) (kg/mm ²)	σ_f/σ_y	σ_{y2}/σ_{y1}	σ_{f2}/σ_{f1}
Base Metal (1)	43.2	31.0	0.72		
Weld Metal (2)	28.7	18.7	0.65	0.66	0.60

와 같은 결과로 疲勞試驗中 鎔接部 疲勞強度의 減少를 誘發시켰다는 것을 알 수 있다.

疲勞強度와 降伏應力의 比는 素材部에서 72%, 鎔接部에서 65%로 鎔接部가 疲勞荷重에 대하여 더욱 脆弱하다는 것을 보여준다.

鎔接試驗片의 作用最大應力-疲勞破斷壽命($\sigma-N_f$)關係를 그림 4-2와 같이 圖示하였다.

S-N線圖上에서 기울기가 緩慢한 AB區間과, 기울기가 急해지는 BC區間으로 나뉘어지는 現象이 나타나고 있다. 이는 鎔接試驗片의 境遇 作用最大應力이 작을수록 疲勞強度의 減少가 커지는 것을 意味한다. 線圖 B-C에 의한 2×10^6 cycle의 疲勞強度는 15.5 kg/mm^2 으로 두 區間으로 區分하지 않은 그림 4-1 및 式 (4-2)에 의한 鎔接部의 疲勞強度 18.7 kg/mm^2 의 約 82.9%를 보이고 있다.

이는 鎔接缺陷의 影響이 試驗結果에 크게 作用한 때문이라고 생각되지만 그 양상이 既存 研究報告⁽¹⁵⁾와는 不一致하는 경향을 보이고 있어, 本 結果에 미흡한 점이 있다고 생각된다.

4.1.2 塑性變形率-荷重反復回數(ϵ_p-N)線圖

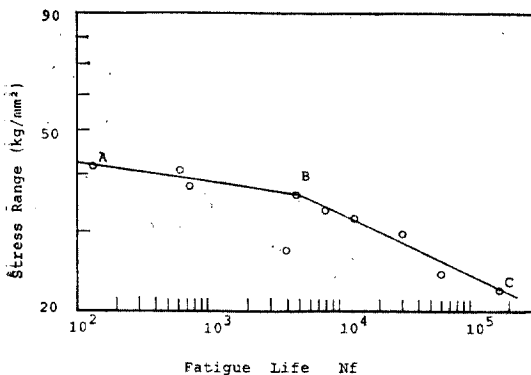


그림 4-2. Relation between Stress Range and Fatigue Life for Welded Specimen.

素材와 鎔接部의 疲勞에 대한 塑性變形率의 變化를 檢討하기 위하여 素材試驗片 2個와 鎔接試驗片 2個에 대하여 塑性變形率(ϵ_p)과 荷重反復回數(N)와의 關係圖를 그림 4-3과 같이 圖示하였다.

素材試驗片에서는 10^3 cycle까지 荷重反復回數의 變動에 따라 塑性變形이 조금씩 減少하는 一種의 加工硬化現象을 보이다가 塑性變形이 增加하여 初期龜裂에 이르게 됨을 보여주고 있다. 이에 비해 鎔接試驗片에서는 初期에 높은 變形을 가지고 出發하여 荷重反復回數의 增加에 따라 그 變形이 急激히 減少된 다음 素材에서와 같은 傾向을 보이고 있다. 初期에 높은 變形을 가지는 것은 鎔接熱影響으로 인하여 引張方向의 殘留變形이 介在한 때문으로 생각된다.

鎔接部와 素材部에 있어서 다같이 試驗最大應力이 클 수록 加工硬化現象이 짧게 持續된 後, 塑性變形이 짧은 反復回數동안 急激히 增加되어 높은 塑性變形에서 破斷에 이르게 되며, 試驗最大荷重이 작을 수록 反對現象을 나타내고 있다. 또한 素材試驗片에 비해 鎔接試驗片에서 이와 같은 現象이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있다.

4.1.3 初期龜裂發生時의 塑性變形率과 疲勞壽命과의 關係(ϵ_p-N_c)線圖

塑性變形率 ϵ_p 와 疲勞壽命 N_c 와의 關係를 그

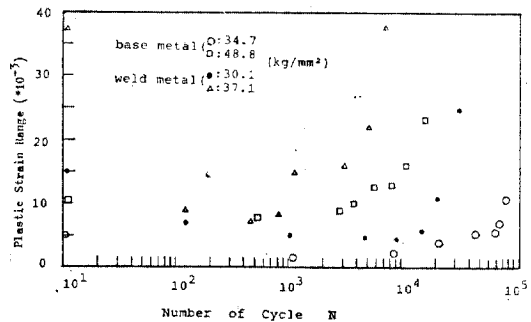


그림 4-3. Relation between Plastic Strain and Number of Cycles.

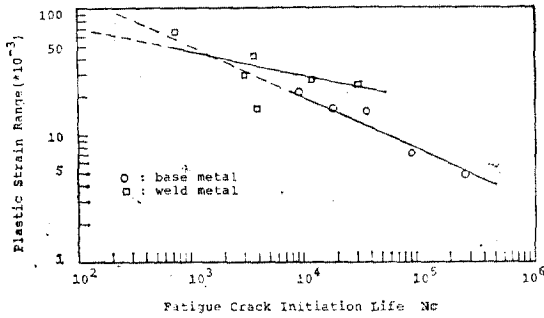


그림 4-4. Relation between Crack Initiation Life and Plastic Strain Range for Base Metal and Welded Metal.

림 4-4로 圖示하였다. 또한 이 結果를 Manson-Coffin 의 ϵ_p 와 N_c 의 關係式으로 整理하여 荷重 反復回數 $10 \sim 10^5$ cycle 의 低-사이클領域에서의 疲勞舉動을 推定하였다.

이 式들은 다음과 같다.

素材 :

$$\epsilon_p \cdot N_c^\alpha = 0.68 ; \quad \dots\dots(4-3)$$

鎔接部 :

$$\epsilon_p \cdot N_c^\alpha = 0.41 \quad \dots\dots(4-4)$$

Manson, Coffin, Morrow^(13,16) 등은 一般의 인 炭素鋼에 대해 α 가 約 1/2 임을 發表하였다. Miki⁽¹⁷⁾, Tanaka⁽¹⁸⁾, 和田⁽¹⁹⁾ 등은 本 研究에서와 비슷한 強度를 지닌 素材에 대해 $\alpha=1/2$ 임을 發表하였다. 素材部の α 값은 0.42 로 이들의 結

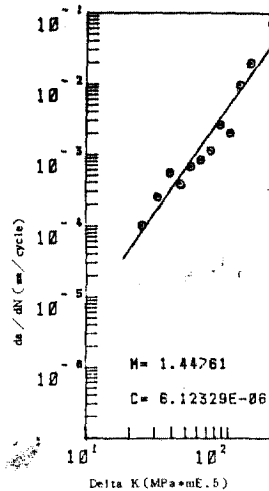
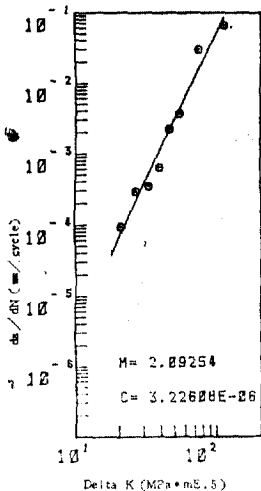


그림 4-5. Relation of $da/dN-\Delta K$ for Base Metal.

과와 거의 一致하지만 鎔接部에 대한 α 값은 0.28 로 이들이 提案한 값과 큰 差異를 보이고 있다.

4.2 疲勞龜裂成長舉動

4.2.1 素材部の 龜裂成長率-應力擴大係數 變動範圍($da/dN-\Delta K$)線圖

素材部の 龜裂成長率을 그림 4-5 의 $da/dN-\Delta K$ 線圖에서 檢討하였다.

線圖를 回歸分析한 結果 C 값은 $6.1 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-6}$ 의 範圍이며, m 값은 1.45~2.1 의 範圍에 들었다. Paris 는 $m=4$ 일때 實驗結果가 가장 廣範圍하게 整理된다는 4 乘則을 發表하였으나, 여러 材料를 對象으로 研究者들이 行한 實驗結果를 整理하여 보면 $m=0.5 \sim 8$ 程度의 값을 取할 수 있는 것으로 되어 있다⁽²⁰⁾. C 값이 큰 原因은 初期龜裂發生 後 硬度過大[本 研究에서 使用한 素材의 硬度 $H_v=31.5$]에 起因한 破壞靱性의 低下로 疲勞龜裂成長速度가 빨라졌기 때문 이라고 생각된다⁽²¹⁾.

4.2.2 鎔接部の $da/dN-\Delta K$ 關係와 이에 미치는 缺陷의 影響

鎔接部の 龜裂成長舉動을 그림 4-6 에 세가지 境遇에 대해 圖示하였다.

세 境遇의 鎔接部 破斷面形狀 및 이들의 內部 缺陷率을 各各 寫眞 4-1 과 표 4-2 에 圖示하였다.

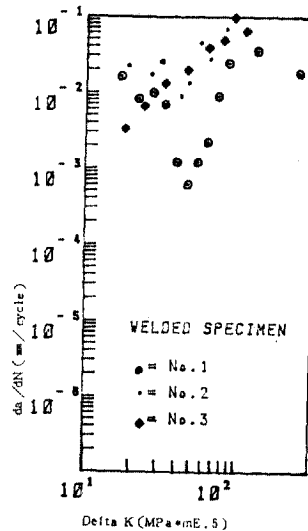
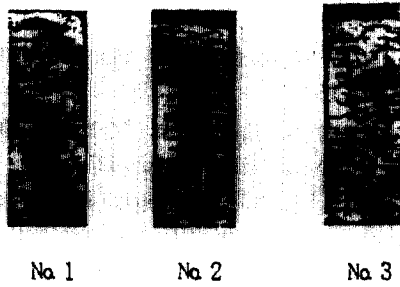


그림 4-6. Relation between $da/dN-\Delta K$ for Welded Metal.



高眞 4-1. Figure of Rupture Section for Weld Metals.

표 4-2. Flaw Ratio in Welded Section Related to Fig. 4-6.

No.	Flaw Area (mm ²)	Flaw Rate (%)	Stress (kg/mm ²)
1	32.3	14.7	34.72
2	65.1	29.4	40.5
3	58.0	26.0	37.10

$da/dN-\Delta K$ 線圖上의 回歸分析 結果 $C=7.05 \times 10^{-4} \sim 2.89 \times 10^{-3}$ 의 範圍를 보였고 $m=0.22 \sim 1.13$ 의 範圍를 나타내었다.

缺陷率이 가장 작은 No.1은 初期龜裂發生後 crack 이 7 mm 까지 進行하는 동안 龜裂成長率動이 不規則的이며, crack 길이 7 mm 以後 龜裂成長速度가 增加하였다. 缺陷率이 가장 큰 No.3 은 初期龜裂發生 以後 成長速度가 連續的이며 빠르게 나타났다. No.2의 境遇에 있어서는 龜裂成長率動이 初期龜裂發生後 crack 이 約 5 mm 까지 成長하는 동안 龜裂成長速度에 있어서 不連續 및 不規則이 發生하였다.

以上の 結果에서 다음과 같은 點을 發見할 수 있었다.

첫째, 缺陷率의 크기는 作用應力의 크기에 影響을 미쳐서 應力擴大係數 K_I 의 變化를 誘發시키고 이 K_I 에 의하여 龜裂成長率 da/dN 이 相對的인 影響을 받는다. 둘째로, 缺陷이 不連續的이며 不規則的으로 分布할 수록 龜裂成長率動은 抑制(detention)現象과 成長速度의 不連續이 發生하였다.

이 같은 缺陷의 分布 및 量에 대해 보다 定量的인 解析이 要求된다^(8, 22).

5. 結 論

素材試驗片과 맞대기 銲接試驗片을 對象으로 疲勞試驗을 行하여 作用最大應力-疲勞壽命($S-N$)線圖, 塑性變形率-荷重反復回數(ϵ_p-N)線圖, 初期龜裂發生時의 塑性變形率-疲勞壽命(ϵ_p-N_c)線圖 및 龜裂成長率-應力擴大係數變動範圍($da/dN-\Delta K$)線圖를 그려서 鋼構造物 銲接部에서의 여러가지 疲勞舉動을 檢討하였다.

本 研究에서 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

荷重反復回數 2×10^6 cycle에서의 疲勞強度는 銲接部가 素材部の 約 60%였으며 降伏應力에 대한 疲勞強度의 比는 素材부와 銲接部가 各各 0.72, 0.65로 나타나 銲接部가 疲勞에 대해 더욱 취약함을 알 수 있었다.

銲接試驗片의 $S-N$ 線圖는 疲勞強度의 減少가 緩慢한 區間과 疲勞強度의 減少가 큰 區間으로 分類되어 作用最大應力이 작을 수록 疲勞強度의 減少가 커지는 現象을 보였다. 두 區間으로 區分되지 않은 $S-N$ 線圖에 의한 疲勞強度에 비해 2×10^6 cycle에서의 疲勞強度가 約 83%에 該當하였다. 이는 낮은 應力에서 銲接部 内部缺陷의 影響이 크게 作用하는 때문이 아닌가 생각된다.

銲接試驗片의 境遇 素材試驗片에 비해, 또 作用最大應力이 클 수록 初期龜裂發生이 빠르고 龜裂發生直前의 塑性變形率의 增加가 急激한 것을 알 수 있었다.

素材試驗片에서 ϵ_p-N_c 關係式의 常數 α 값이 0.42로 Manson, Coffin의 研究結果와 거의一致하였고 銲接試驗片에서는 이 값이 0.28로 이들의 研究結果와 큰 差異를 나타내었는데, 이는 疲勞에 의한 銲接部 塑性變形의 急激한 變化와 内部缺陷의 影響이 作用하였기 때문이 아닌가 생각된다.

이와 같은 結果로 볼 때 既存의 鋼構造物 및 向後 新設될 鋼構造物 銲接部의 品質 및 疲勞에 대한 安全性에 適切한 對策이 要望되며, 이 分野에 관한 더 많은 研究가 行해져야 되리라고 思料된다.

참 고 문 헌

1. Rolfe, S.T. and Barsom, J.M.; "Fracture and Fatigue Control in Structures", Prentice-Hall, 1977.
2. Fisher, J.W.; "Fatigue and Fracture in Steel Bridge", John Wiley & Sons, 1984.
3. Munse, W.H. and Grover, L.; "Fatigue of Welded Structures", Welding Research Council, N.Y., 1964.
4. Munse, W.H.; "Fatigue Behavior of Plain Plate and Bolt Welded Joints in T-1 and T-1A Steel," University of Illinois, 1963. 3
5. Gurney, T.R.; "Fatigue of Welded Structures", Cambridge University Press, 1968
6. Radziminski, J.B. and Lawrence, F.V.; *Welding Journal*, Vol. 49, No. 8, 1970. 8
7. Boulton, C.F.; *Welding Journal*, Vol. 56, No. 1, 1977. 1, pp. 13~22
8. Lawrence, F.V.; *Welding Journal*, Vol. 52, No. 5, 1973. 5, pp. 212~220
9. Mori, T. and Horikawa, K.; "The Effect of Welding Residual Stress on Fatigue Crack Propagation Rate", *JSCE*, 1984, pp. 134~141
10. 張東一, 鄭榮和, "鎔接이음한 鋼構造의 小引張試驗片에서의 疲勞龜裂傳達舉動", 大韓土木學會論文集, Vol. 4, 1984. 6, pp. 133~142
11. 河本實, ; "金屬の疲勞と設計", コロナ社, 1972, pp. 33~37, 61~75
12. Langraf, R.W., Morrow, JoDean, and Endo, T.; "Determination of the Cyclic Stress-Strain Curve", *Journal of Materials, JMLSA*, Vol. 4, No. 1, 1969
13. Coffin, L.F.; *Trans. ASME*, 76, 1954, p. 924
14. 白鳥正樹, "數値破壊力學", 實教出版株式會社, 1980. 5, p. 75
15. 日本金屬學會 強度編纂委員會, "金屬材料の強度と破壊", 丸善株式會社, 1964, pp. 427~437
16. Manson, S.S. and Hirschberg, M.; "Fatigue Behavior in Strain Cycling in Low and Intermediate-Cycle Range", *Fatigue An Interdisciplinary Approach*, 1964
17. Miki, C. and Nishijima, T.; "Strain-Controlled Low Cycle Fatigue Behavior of Structural Steels", *Proc. JSCE*, No. 279, 1978. 11
18. Tanaka, K. and Nishijima, S.; "Low and High Cycle Properties of Various Steel Specified in JIS for Machine Structural Use", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 4, No. 1, 1981
19. 和田知之, 三嶋俊作, "低サイクル疲れにおける切欠き効果について", 東京大學校研究報告, 268號, 1968
20. Nishijima, S. and Miki, C.; "Fatigue Crack Growth Rates in Structural Steel", *Proc. JSCE*, No. 332, 1982
21. Miki, C., Mori, T., Chang, D.I., and Chung, Y.W.; "Fatigue Crack Growth Rate in Welded Metal", *Technical Report of Tokyo Institute of Technology*, No. 31, 1983. 8
22. Fuch, H.O. and Stephens, R.I.; "Metal Fatigue in Engineering", John Wiley & Sons' 1980

(接受: 1986. 7. 15)