

論 文

大韓造船學會誌
第20卷 第4號 1983年 12月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 20, No. 4, December 1983

두꺼운 軟鋼板 필렛 熔接이음부의 殘留應力分布에 대한 研究

嚴 東 錫* · 康 聖 原*

A Study on the Distribution of Residual Stress in Fillet Welds for Thick Mild Steel Plate

by

Dong-Suk Um* · Sung-Won Kang*

Abstract

In this study, it was investigated the distribution of residual stress in the direction of loading between the root and toe the load carrier fillet welds for thick mild steel plate.

Residual stress distributions are measured by sectioning method which is one of stress-relaxation technique in welded joint, and analyzed by two dimensional finite element method on thermo-elasto-plastic theory under plane stress condition.

There are compared the results of F.E.M analysis with the experimental result by stress-relaxation techniques.

As a results, the following conclusions were obtained.

- (1) In the no penetration fillet welded joint specimen using the mild steel plate with 25mm in thickness, the residual stress of loading direction near the root was about 10kg/mm² tensile.
- (2) The tensile residual stress has been observed in fillet region of the fillet joint by F.E.M. analysis method.
- (3) The range of compressive residual stress distribution from the root was largest in the case of 5mm root penetration.

1. 緒 論

熔接熱에 의해서 部材는 加熱되어 膨脹하게 되고 이어서 곧 冷却에 의하여 收縮이 생기게 된다.

특히 熔接構造物에 發生하는 殘留應力은 脆性破壞強度, 疲勞強度 및 座屈強度를 감소시킬 뿐만 아니라 振動 腐蝕抵抗등에도 영향을 미치는 主要因子로서 지적되고 있다.

그러나 熔接構造에 대한 殘留應力의 發生機構 및 그

種類와 크기 등에 대한 資料는 그 대상이 다양하므로 아직 미흡한 상태에 있고, 構造部材의 強度나 使用性能에 미치는 영향에 대해서도 명확치 않은 점이 많다.

특히 大型構造物에 많이 채용되고 있는 두꺼운 板의 多層 필렛 熔接이음부에 發生하는 殘留應力 分布에 대한 研究는 최소한 상태이다. 그 이유로서는 多層필렛 熔接이음부의 殘留應力發生에 대한 이론적 해석방법이 아직 확립되어 있지 않고, 實構造物에 대하여 적용할 수 있는 신뢰성 높은 非破壞的 殘留應力測定法이 아직 開發되지 않았기 때문이다.

接受日字: 1983年 11月 2日.

* 正會員, 釜山大學校 工科學科 造船工學科

따라서 熔接構造物의 強度 및 破壞特性에 큰 영향을 미칠 것으로 기대되는 殘留應力分布狀態를 알수 있다면 熔接構造物의 設計 및 工作上 유익한 資料가 될 것이다. 따라서 本研究에서는 大型構造物에 많이 채용되고 있는 두꺼운 軟鋼板의 필릿熔接이음을 대상으로 하여 疲勞균열의 發生 및 傳播經路가 되는 熔接이음 루트部 延長線上的 殘留應力 分布를 實物試驗片에 의한 測定과 有限要素法에 의한 熱彈塑性解析에 의하여 調査 검토하였다.

릿熔接이음재를 제작하였다.

第一層용접은 가능한한 용입량을 줄이기 위하여 가느 熔接棒으로 낮은 電流를 사용하였으며, 角變形 및 中心線틀림이 일어나지 않도록 구속하여 對稱法으로 시공하였다. 이와같이 하여 제작한 이음材에서 구속이 비교적 크리라고 예상되는 中次部로 부터 Fig. 1에 표시한 치수를 갖는 試驗片을 채취하여 熔接그대로인 것과 應力除去 풀림을 실시한 것에 대하여 루트部의 殘留應力의 殘留應力을 測定하였다.

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of steel used

| Mechanical properties* | | | composition* chemical % | | | | |
|---------------------------|------------------------------|-----------|-------------------------|------|------|-------|-------|
| Y.S.(kg/mm ²) | U.T.S. (kg/mm ²) | Elong.(%) | C | Si | Mn | P | S |
| 28.2 | 41.9 | 37.0 | 0.13 | 0.23 | 0.78 | 0.012 | 0.011 |

*Referred from mill sheet

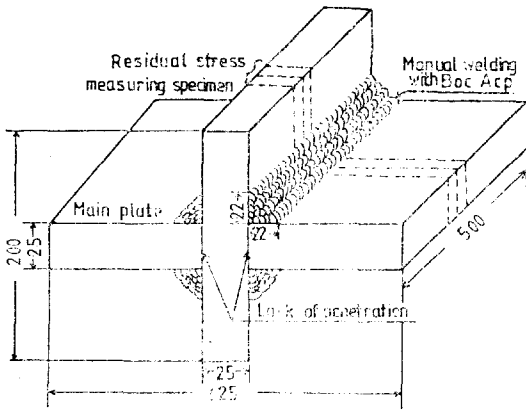
2. 實驗 및 結果

2.1. 試驗片

Table 1에 나타난 機械的性質 및 化學的成分을 갖는 薄板製鐵 製品의 두께 25mm의 軟鋼板을 사용하여 Fig. 1과 같은 熔接條件에 의하여 용입이 거의 없는 多層

2.2. 殘留應力測定 및 結果

殘留應力測定法에서 弛緩法, 脆性塗料法, 光彈性塗膜法, X線法 等 여러가지가 있으나 여기서는 平板의 殘留應力測定에 일반적으로 사용되고 있는 스트레인게이지에 의한 切斷弛緩法을 채택하였다. 스트레인게이지는 耐熱性を 고려하여 100°C까지 보상되는 日本共和 電業製의 게이지 길이 1mm인 3軸게이지 KFC-1-D17-11을 사용하였다. 이스트레인 게이지를 Fig. 2에서 보는바와 같이 루트부 선단 2mm 에서부터 9mm간격으로 토우부까지 3매씩 좌우 및 앞뒷면에 전부 12枚를 첨부시켜 그 위치를 엔드 필에 의하여 길이 8mm로 切斷하고 절단전과 절단후의 스트레인좌에 의하여 절단



| NO. of layer | Electrode size (mm) | Current A | Arc. V | Travel speed cm/min |
|--------------|---------------------|-----------|--------|---------------------|
| 1 | 3.2 | 140 | 22 | 18 |
| 2 | 4.0 | 185 | 26 | 22 |
| 3 | 4.0 | 185 | 26 | 20 |
| 4 | 4.0 | 185 | 26 | 20 |
| 5 | 4.0 | 185 | 26 | 20 |

Fig. 1 Dimensions and welding conditions of fillet welded joint

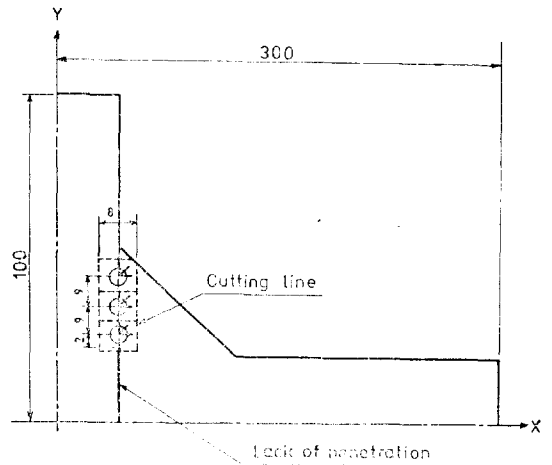


Fig. 2 Quarter dimension of specimen and measuring position

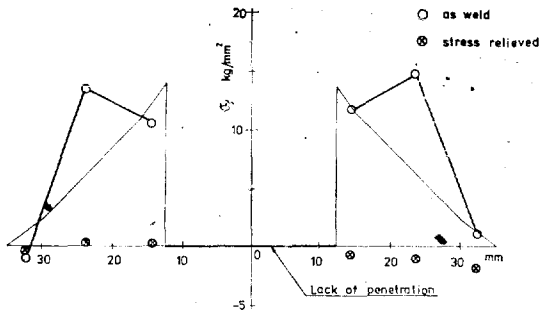


Fig. 3 Distribution of measured residual stress in x direction

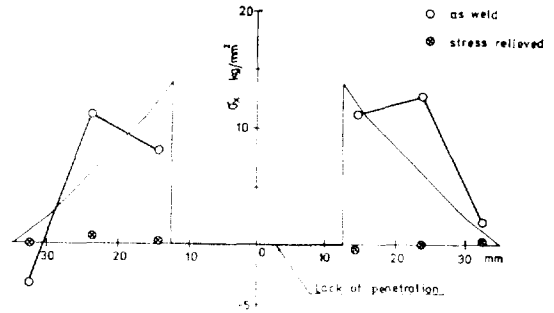


Fig. 4 Distribution of measured residual stress in y direction

해방 스트레인을 구하여 殘留應力을 계산하였다. 本實驗을 하기전에 絶단으로 인한 熱 및 塑性스트레인의 영향을 조사하기 위하여 응력 제거 풀링을 실시하여 殘留應力이 충분히 제거되었다고 생각되는 同一軟鋼板에 대하여 上記와 같은 方法으로 스트레인을 측정하고 絶단에 의한 영향은 최대 $\pm 50 \times 10^{-6}$ 스트레인 정도였으므로 絶단에 의한 영향은 무시하여도 무방하다고 생각된다. 絶단시에는 압축공기로 絶단칠을 계속해서 불어내어 絶단에 의한 발열을 줄이고 게이지 표면에는 파라핀왁스를 도포하여 發熱량을 확인하면서 작업을 하였다. 이와같은 방법으로 측정된 시험편 표면의 해방스트레인 값으로부터 $\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y)$ 에 의하여 荷重作用方向(主板方向)의 殘留應力을 계산하여 Fig. 3에 나타내었다. 그리고 이들 測定値는 앞편의 平均值이다. Fig. 3에 의하면 루트 근방에는 약 9~10kg/mm² 루트에서 10mm정도 떨어진 표면에서는 12~14 kg/mm² 정도의 引張應力이 殘留하고 있으며 루트 근방에서는 留殘應力이 거의 없음을 알 수 있다. Fig. 3, Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 荷重傳達形 필렛熔接이음에서 루트부에 疲勞균열 傳播經路에는 引張殘留應力이 作用하고 있으므로 主板方向에 引張荷重을 받는 疲勞荷重下에서는 루트부의 疲勞균열의 發生 및 傳播에 나쁜 영향을 미치게 될 것이 예상된다.

또 Fig. 3, Fig. 4에는 문헌[1]의 條件에 따라 應力除去풀링처리한 試驗片에 대하여 측정된 결과도 같이 표시하였다. 이 결과에 의하면 應力除去풀링처리에 의하여 熔接時에 발생하였던 殘留應力이 거의 除去되는 것이 다시 확인되었으므로 本實驗結果로 충분히 신뢰할 수 있음을 알 수 있었다.

3. 有限要素法에 의한 熱彈塑性 解析

熔接部の 殘留應力을 有限要素法에 의하여 解析한 大韓造船學會誌 第20卷 第4號 1983年 12月

結果는 이미 많이 발표되어 있으나[2~5], 이들은 모두 맞대기 熔接이음을 대상으로 하여 解析한 것이고 多層필렛이음에 대한 解析은 드물다.

本 研究에서는 熱傳導 및 熱彈塑性理論에 의하여 Ueola[5]등이 開發한 熱彈塑性解析 프로그램을 多層필렛 熔接이음에 적용시킬 수 있도록 수정한 프로그램에 의하여 解析하여 殘留應力을 구하였다. 熱傳導계산에는 熔融潛熱 및 板 표면에서의 熱放出을 고려하였고 中央差分法을 이용하여 계산하였다. 대상모델은 平面應力狀態로 하여 bauer 效果 및 變態의 영향등은 무시하였다.

3.1. 非定常狀態에 있어서 熱傳導微分方程式 및 汎函數

一般的으로 二次元的 非定常熱傳導微分方程式은 다음과 같이 된다.

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + q - \alpha \cdot \frac{2}{h} \cdot T - c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3-1)$$

- 여기서 T: 溫度(°C),
- λ: 熱傳導率(cal/cm·sec·°C)
- q: 單位體積當의 入熱量(cal/cm³·sec)
- α: 熱傳達率(cal/cm²·sec·°C)
- h: 板厚(cm)
- cρ: 熱容量(cal/cm³·°C)

또, l_x, l_y 를 境界面上에 있어서 外向法線의 方向餘弦, \bar{q} 를 單位面積單位. 時間當의 放熱量이라 할때 表面의 熱的 境界條件은 一般的으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot l_x + \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \cdot l_y + \bar{q} + \alpha \cdot T = 0 \quad (3-2)$$

지금 未知의 汎函數를 $T(x, y)$ 라 할때 다음 두式 즉

Euler의 方程式:
$$\frac{\partial f}{\partial T} - \frac{\partial \theta}{x} \cdot \frac{\partial f}{\partial(\partial T/\partial x)} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial(\partial T/\partial y)} = 0 \quad (3-3)$$

自然境界條件式:
$$\frac{\partial f}{\partial(\partial T/\partial x)} \cdot l_x + \frac{\partial f}{\partial(\partial T/\partial y)} \cdot l_y + \frac{\partial g}{\partial T} - \frac{d}{dS} \frac{\partial g}{\partial(\partial T/\partial S)} = 0 \quad (3-4)$$

를 만족하는 T 를 구하는 것은 다음汎函數,

$$\chi = \iint f(x, y, T, \frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}) dx dy + \int_c g(S, T, \frac{\partial T}{\partial S}) dS \quad (3-5)$$

를 停留로 하는 T 를 구하면 變分問題와 等價이다 바꾸어 말하면 (3-3)식과 (3-4)식의 條件下에서 分다는 것은 汎函數(3-5)식을 最小로 變이 필요 충분 조건이다. 그래서 (3-1), (3-2)식과 等價로서 最小化를 必要로 하는 汎函數는 다음 式과 같이된다.

$$\chi = \iint \left[\frac{1}{2} \cdot \left\{ \lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \alpha \cdot \frac{2}{h} \cdot T^2 \right\} - qT + c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot T \right] dx dy + \int_c \bar{q} T dS + \int_c \frac{1}{2} \alpha \cdot T^2 \cdot dS \quad (3-6)$$

3.2. 有限要素法에 의한 非常常 熱傳導의 解析

(3-6)식을 有限要素法에 적용을 시키면 지금 T 를 나타내는 函數로 領域全體로서 定義되는 것이 아니고 各要素마다 定義된 $T^{(e)}$ 라 하면 (3-6)식의 積分은 各要素마다의 積分으로 分割된다. 즉

$$\chi = \sum_{e=1}^N \iint \left[\frac{1}{2} \left\{ \lambda \left(\frac{\partial T^{(e)}}{\partial x} \right)^2 + \lambda \left(\frac{\partial T^{(e)}}{\partial y} \right)^2 + \alpha \cdot \frac{2}{h} \cdot T^{(e)2} \right\} - qT^{(e)} + c_p \cdot \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \cdot T^{(e)} \right] dx dy + \int_c \frac{1}{2} \alpha \cdot T^{(e)2} \cdot dS \quad (3-7)$$

$$\chi = \iint \left[\frac{1}{2} \left\{ \lambda \cdot ((B_x)[A]^{-1}\{T^{(e)}\})^2 + \lambda \cdot ((B_y)[A]^{-1}\{T^{(e)}\})^2 + \alpha \cdot \frac{2}{h} \cdot ((M)[A]^{-1}\{T^{(e)}\})^2 \right\} - q \cdot (M)[A]^{-1}\{T^{(e)}\} + c_p \cdot \left\{ (M)[A]^{-1}\left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\} \right\} \cdot ((M)[A]^{-1}\{T^{(e)}\}) \right] dx dy + \int_c \frac{1}{2} \alpha \cdot ((M)[A]^{-1}\{T^{(e)}\})^2 \cdot dS \quad (3-14)$$

여기서 $\{T\} \cdot \left\{ \frac{\partial T}{\partial x} \right\} \cdot \left\{ \frac{\partial T}{\partial y} \right\}$ 는 symmetric matrix이므로 (3-14)식은

$$\chi = \frac{1}{2} \left[\lambda \cdot \{T^{(e)}\}^T ((A)^{-1})^T \iint ((B_x)^T [B_x] + [B_y]^T [B_y]) dx dy \cdot (A)^{-1}\{T^{(e)}\} + \alpha \cdot \frac{2}{h} \cdot \{T^{(e)}\}^T ((A)^{-1})^T \iint [M]^T [M] dx dy (A)^{-1}\{T^{(e)}\} - q \cdot \{T^{(e)}\}^T ((A)^{-1})^T \iint [M]^T dx dy + c_p \cdot \{T^{(e)}\}^T ((A)^{-1})^T \iint [M]^T [M] dx dy (A)^{-1}\left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\} + \frac{\alpha}{2} \cdot \{T^{(e)}\}^T ((A)^{-1})^T \int [M]^T [M] dS \cdot (A)^{-1}\{T^{(e)}\} \right] \quad (3-15)$$

단 여기서는 強制루열은 되지 않는 것으로 하여 $\bar{q} = 0$ 로 한다. 또 N 는 全要素數이다.

(3-7)식을 기호로써 다음과 같이 쓴다.

$$\chi = \chi^{(1)} + \chi^{(2)} + \dots + \chi^{(N)} = \sum_{e=1}^N \chi^{(e)} \quad (3-8)$$

여기서 $\chi^{(e)}$ 는 各要素의 χ 값이다.

여기서 구하는 節點量 $\{T\}$ 는 汎函數 χ 의 最小化, 즉 (3-7)식을 $\{T\}$ 로써 偏微分하고 이것을 0으로 等으므로 하여 얻어진다. 즉

$$\frac{\partial \chi}{\partial \{T\}} = \frac{\partial}{\partial \{T\}} \sum_{e=1}^N \chi^{(e)} = \sum_{e=1}^N \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial \{T\}} = 0 \quad (3-9)$$

여기서 (3-7)식의 積分을 $\{T\}$ 로써 나타낼 것을 생각한다.

지금 要素內의 溫度 $T^{(e)}$ 는 x 및 y 의 函수로써 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$T^{(e)} = \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot y = [1, x, y] \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} \therefore \{T\} = [M] \cdot \{\theta\} \quad (3-10)$$

\therefore 要素의 3節點 i, j, k 點의 節點온도 $T^{(e)}$ 는

$$\{T^{(e)}\} = \begin{Bmatrix} T_i \\ T_j \\ T_k \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{Bmatrix} = [A] \cdot \{\theta\}$$

$$\therefore \{\theta\} = [A]^{-1} \cdot \{T^{(e)}\} \quad (3-11)$$

(3-11)을 (3-10) 式에 代入하면

$$\{T\} = [M][A]^{-1}\{T^{(e)}\} \quad (3-12)$$

(3-12)식을 x, y 에 미분하면

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} [M][A]^{-1}\{T^{(e)}\} = [B_x][A]^{-1}\{T^{(e)}\} \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} [M][A]^{-1}\{T^{(e)}\} = [B_y][A]^{-1}\{T^{(e)}\} \quad (3-13)$$

(3-12), (3-13)식을 (3-9)式에 代入하면

汎函數 χ 의 停留條件은 (3-15)式을 $T^{(e)}$ 에서 편미분하여 $\frac{\partial \chi}{\partial T^{(e)}} = 0$ 로 하여 求解 진다.

$$\begin{aligned} \therefore \frac{\partial \chi}{\partial T^{(e)}} = & \left\{ \lambda \cdot ([A]^{-1})^T \iint ([B_x]^T [B_x] + [B_y]^T [B_y]) dx dy \cdot [A]^{-1} + \frac{2\alpha}{h} \cdot ([A]^{-1})^T \iint [M]^T [M] dx dy \cdot [A]^{-1} \right. \\ & + \alpha \cdot ([A]^{-1})^T \iint [M]^T [M] dS \cdot [A]^{-1} \left. \right\} \cdot \{T^{(e)}\} - q \cdot ([A]^{-1})^T \iint [M]^T \cdot dx dy \\ & + c\rho \cdot ([A]^{-1})^T \iint [M]^T [M] dx dy \cdot [A]^{-1} \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\} = [S] \cdot \{T^{(e)}\} + [F] + [P] \cdot \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3-16)$$

中央差分法에서

$$\begin{aligned} \{T^{(e)}\}_t = & \{T^{(d)}\}_{t-\Delta t} + \frac{1}{2} \left(\left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} + \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\}_t \right) \cdot \Delta t \\ \therefore \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\}_t = & \frac{2}{\Delta t} \cdot \{T^{(e)}\}_t - \frac{2}{\Delta t} \cdot \{T^{(e)}\}_{t-\Delta t} - \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} \end{aligned} \quad (3-17)$$

(3-17)을 (3-16)에 대입하면

$$\begin{aligned} [S] \cdot \{T^{(e)}\} + [F] + [P] \cdot \left(\frac{2}{\Delta t} \cdot \{T^{(e)}\}_t - \frac{2}{\Delta t} \cdot \{T^{(e)}\}_{t-\Delta t} - \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} \right) = 0 \\ \therefore \{T^{(e)}\} = \left([S] + \frac{2}{\Delta t} \cdot [P] \right)^{-1} \cdot \left\{ [P] \left(\frac{2}{\Delta t} \cdot \{T^{(e)}\}_{t-\Delta t} + \left\{ \frac{\partial T^{(e)}}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} \right) - [F] \right\} \end{aligned} \quad (3-18)$$

(3-18)式에 의해 각절점의 온도를 구하고 3각형 요소를 구성하는 3절점의 온도를 평균하여 그 요소의 온도로 하며 시간 변화에 따른 온도증분을 구하며 온도증분으로 인한 요소의 응력증분을 구한다.

3.3. 모델 및 計算

熔接構造物이 反復荷重을 받게 될때 疲勞균열이 應力集中 개소인 루트部나 토우部에서 發生하여 最終破斷에 이르게 되는데 이들 개소에 發生하는 殘留應力の 종류와 크기는 疲勞強度에 크게 영향을 미치게 될것이다 따라서 有限要素法에 의한 모델로는 Fig. 5과 같은 荷重傳達形 필릿熔接이음의 形상에 대하여 不溶着部 延長線上的 荷重方向 殘留應力 分布를 구하기 위하여 對稱性을 고려하여 1/4부분만을 취해 Fig. 5과 같이 3角形要素로 分割하였다.

材料의 機械的性質 溫度依存性은 實驗에 使用한 鋼材의 機械的性質을 고려하여 Suji(6)등이 測定한 값을 약간 수정하여 Fig. 6, Fig. 7과 같이 하였다. 두꺼

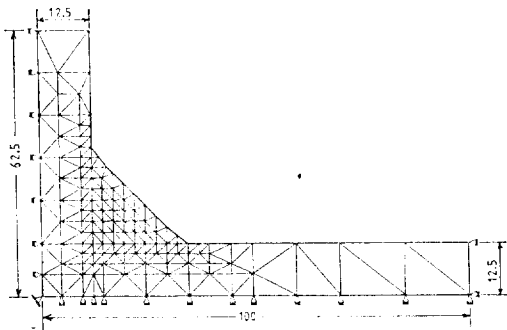


Fig. 5 Finite element model for fillet weld

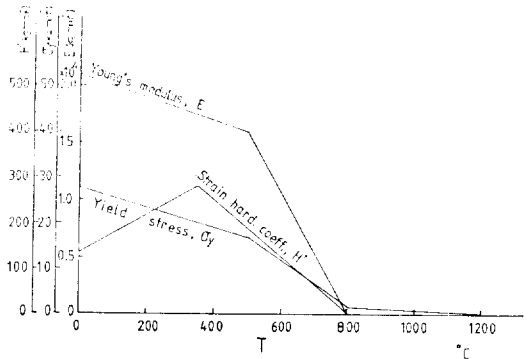


Fig. 6 Temperature dependency of mechanical properties for mild steel

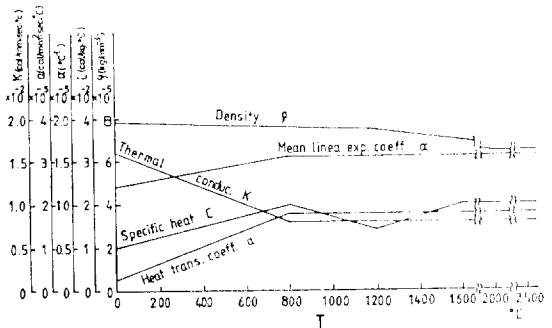


Fig. 7 Temperature dependency of physical properties for mild steel

운板的 필릿熔接에서는 용입깊이에 따라 루트근방의 殘留應力分布가 변화한다는 연구결과(7)가 있으므로 본 研究에 있어서도 용입깊이를 0 mm, 5mm, 10mm의 3가지 경우에 대하여 조사하여 보았다. 용입깊이가

5mm, 10mm인 경우에는 Fig. 5의 모델에서 홈깊이에 해당하는 要素에 入熱시키는 方法에 의하여 계산하였다. 그리고 入熱量은 Fig. 1의 熔接條件에 따라 單位體積當의 熱量으로 환산시켜 各層마다 入熱시켰고 入熱時間도 熔接條件에 따라다. 다음 各層사이의 層間溫度는 第1層에서는 40°C로 하고 다음層에서는 70~90°C로 하였다.

3.4. 計算結果 및 考察

Fig. 8는 용입깊이를 0mm, 5mm, 10mm의 3단계로 변화시켜서 上記의 計算방법에 의하여 계산한 主板方向의 殘留應力分布를 나타낸 것이다. 主板方向의 殘留應力은 전체적으로 용입부쪽 先端에서와 토우부에서 壓縮殘留應力이 남고 있으며 증간部에서는 引張應力이 最大로 되는 分布를 하고 있는 것을 알수 있다. 그러나 용입깊이에 의한 殘留應力의 分布를 상세히 검토하면 몇가지 차이점을 발견할 수 있다. 첫째 引張殘留應力이 最大가 되는 위치가 용입이 깊게됨에 따라 용입방향으로 이동하고 있다. 이것은 용입이 깊게 됨에 따라 용착금속이 용입방향으로 증가하여 이들의 영향이 相對적으로 증가하기 때문이라고 생각된다. 이와 같은 경향은 Otsuka[8]등이 Slab analogy에 의한 해석에서도 같이 결과를 얻고 있다. 다음 루트부의 殘留應力은 용입깊이가 0mm일때는 3kg/mm²의 引張應力이, 5mm와 10mm에서는 각각 8kg/mm² 및 14kg/mm²의 壓縮應力이 殘留하고 있어 용입깊이에 따라 殘留應力의 종류 및 크기에 큰차이가 있음을 알수 있다.

그리고 루트부 근방에 壓縮應力이 殘留하는 범위는

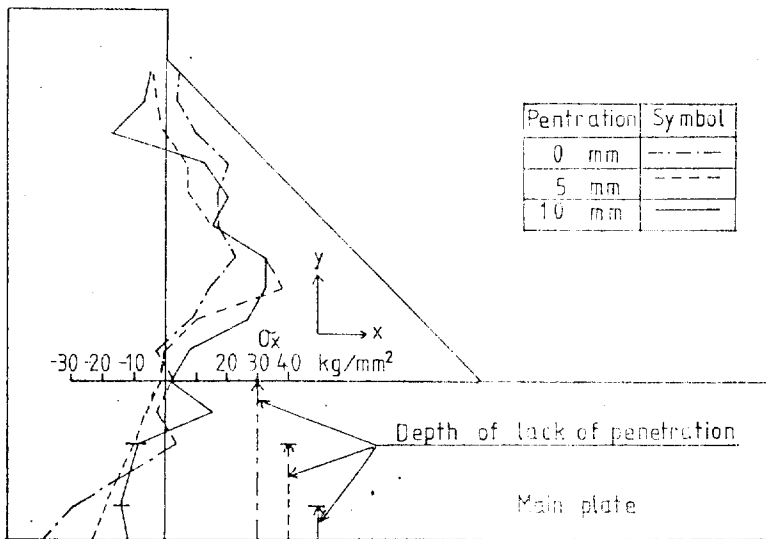


Fig. 8 Calculated results of residual stress by finite element method

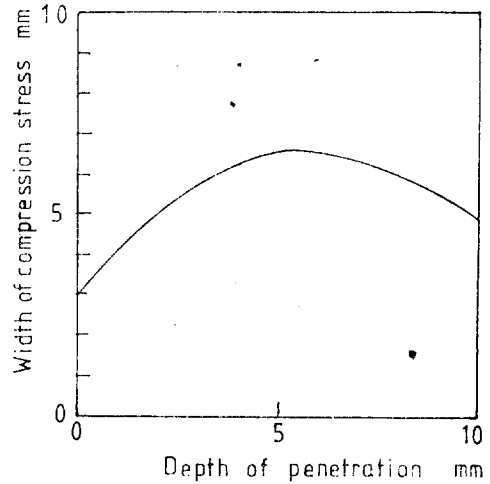


Fig. 9 The relation between the with of compression stress near the lack of penetration and the depth of penetration

용입깊이가 0mm에서는 약 3mm, 5mm에서는 6.5mm, 10mm에서는 5mm정도이며 용입깊이가 5mm일 경우 최대로 되어있음을 알수 있다. Fig. 9에 용입깊이와 압축잔류응력의 분포범위를 나타내었다. Fig. 3과 Fig. 8를 비교해 보면 本實驗에서는 용입이 거의 없는 質驗片에 대해서만 殘留應力을 測定하였으나 實驗値와 有限要素法에 의한 解析結果는 비교적 잘 일치하고 있다 이들 결과에 의하면 용입이 거의 없는 多層필렛용접이음의 루트部 근방에서 약 10kg/mm²정도의 引張應力이

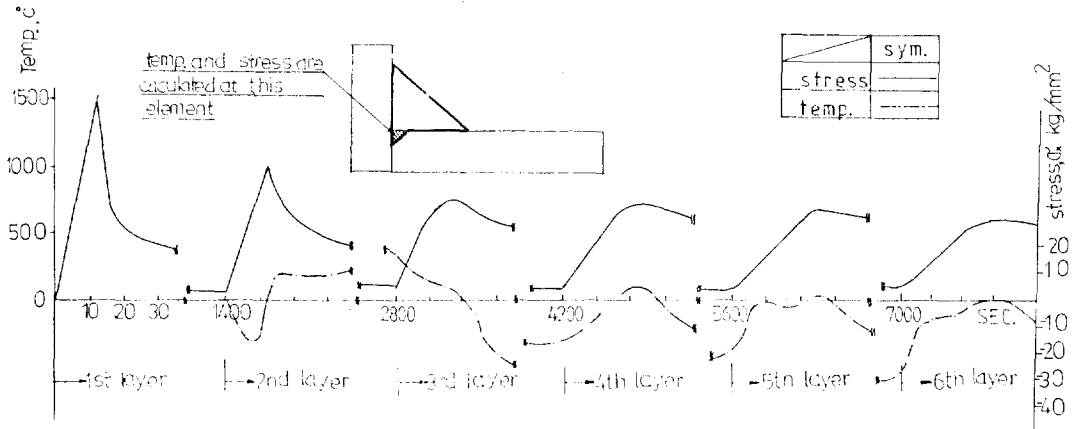


Fig. 10 The relation between time-temp. and time-residual stress (depth of penetration; 5mm)

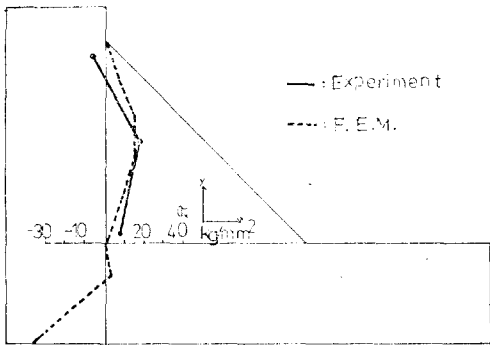


Fig. 11 Compare with experimental measurement and F.E.M. result of residual stress, σ_x

殘留하게 됨을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 熔接이음이 引張疲勞荷重을 받게 되면 疲勞균열의 發生 및 傳播가 母材에서보다 빨라질 것이 예상된다.

Fig. 10은 용입깊이 5mm인 모델에 있어서 熔接부분의 最近방 요소에 있어서 溫度와 應力 σ_x 의 經時變化를 나타낸 것이다. 溫度의 變化는 이 要素에 入熱되는 第一層($t=0\sim1,400\text{sec}$)에 있어서 加熱 冷却이 公히 급격하고 入熱이 종료하는 15秒후에 最高溫度에 도달하고 있다. 그러나 層을 중첩함에 따라서 溫度의 上昇·下降 公히 완만하게 되고 또, 最高溫度에 도달하는 시각은 入熱終了후 10~30秒로 길게 되어있다. 즉, 入熱하는 장소가 對象으로 되어 있는 要素로부터 멀게됨에 따라서 熱에 의한 영향은 차츰 적게 됨을 알 수 있다. 한편 應力의 變化도 第一層에서는 거의 變化가 보이지 않고 熱應力은 0으로 되어 있다. 2層부터 時間의 경과에 따라서 冷却이 진행되어 引張殘留應力이 증

가함을 알 수 있다. 그런데 그 이후 層을 중첩하면 加熱時間內에서 前層에서 發生한 殘留應力이 완화되어 그 이후 冷却이 진행됨에 따라서 熔接金屬의 收縮에 의한 壓縮殘留應力이 증대됨을 알 수 있다. 層을 중첩함에 따라서 그 경향은 현저하게 된다.

Fig. 11는 實驗한 結果와 有限要素法에 의한 計算結果를 비교한 것으로 熔着金屬部에 있어서 殘留應力分布는 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

4. 結 論

大形構造物에 많이 採用되고 있는 두꺼운 軟鋼板의 荷重傳達形 필렛 熔接에 대한 殘留應力 分布를 實物試驗片에 의한 測定과 有限要素法에 의한 熱彈塑性 解析을 통하여 다음과 같은 結論이 要約된다.

- 1) 두께 25mm의 軟鋼板을 사용한 용입이 없는 荷重傳達形 필렛 熔接이음에서는 루트근방에 약 10kg/mm^2 정도의 引張應力이 남게 되지만 應力除去플립치터에 의하여 除去될 수 있다.
- 2) 有限要素法에 의한 解析結果 루트부의 용착급속에는 壓縮殘留應力이, 필렛의 용착급속에는 引張殘留應力이 分布한다.
- 3) 疲勞強度改善에 유익하리라고 예상되는 루트부 근방의 壓縮殘留應力의 分布범위는 용입깊이 5mm인 경우가 最大로 된다.
- 4) 각 層과 더불어 冷却過程에 있어 약 100°C 까지 冷却하는 동안에는 引張, 壓縮應力이 모두 증가 하나, 약 100°C 이하로 되면 應力이 포화되어 그 이상 冷却하여도 거의 應力値는 변화하지 않음을 알았다.

参 考 文 献

- [1] Koichi Masubuchi: "Analysis of Welded Structure," Pergamon Press, 1980.
- [2] 上田幸雄 外；“有限要素法による 熱弾塑性挙動の解析” 日本熔接學會誌 第42巻 6號, 1973.
- [3] 神近亮一外；“有限要素法による 非定常熱弾塑性解析および” 熔接への過用例” 日本 石川島播磨技報, 第4號, 1974.
- [4] 田中道夫；“有限要素法による 残留應力解析” 日本三菱重工技報, Vol. 11, No. 6, 1974.
- [5] 上田幸雄 外；“有限要素法による 熔接應力の解析と残留應力の發生機構” 日本熔接學會誌 第45巻 1號, 1976.
- [6] 辻勇；“帯板の局部加熱による過渡應力ならび” 變形の解析” 日本熔接學會誌 第45巻 1號, 1976.
- [7] 永井欣一外；“軟鋼十字すみ肉熔接継手の 片振り引張疲勞強度の改善について” 日本造船學會論文集 第150號, 1981.
- [8] 大塚昭夫外；“熔接残留應力の 解析への Slab Analogyの 應用” 日本熔接學會誌 第38巻 4號, 1969.