

鎔接 鋼構造 部材의 殘留應力 特性에 관한 研究

A Study on the Characteristics of the Residual Stress Distribution of Steel Structural Members

| | | |
|--------|------|------|
| 張 | 東 | 一* |
| Chang, | Dong | Il |
| 金 | 斗 | 煥** |
| Kim, | Doo | Hwan |

Abstract

Residual stresses have remained around welding areas of a steel structure member after welding operation. The major causes to occur these residual stresses are the local heat due to a welding, the heat stresses due to a irregular and rapid cooling condition, the material and rigidity of a steel structure. Ultimately, these residual stresses have been known to decrease a brittle fracture strength, a fatigue strength, a buckling strength, dynamic properties, and the corrosion resistance of the material.

This paper deals with the residual stresses on a steel structure member through experimental studies. SWS 58 plates were welded by the method of X-groove type. These plates were layed on the heat treatment at four different temperatures; 350°C, 500°C, 650°C and 800°C. The resulting residual Stresses were measured by hole drilling method, and the followings were obtained.

The residual stresses on the vicinity of a welding point were relieved most effectively at the temperature of 650°C, and these stresses relieved completly when the ratio of a hole diamenter to a hole depth became unity. Hardness test shows that the higher value of hardness at the heat affected zone dropped to belower as the temperature went up from 350°C to 800°C. The Welding input heats have not influenced the magnitude of residual stresses at the input heat range between above and below one forth than standard.

要 旨

鎔接部에서 殘留應力은 鎔接熱에 의한 局部 加熱과 不規則的이고 比較的 急速한 冷却으로 誘發되는 熱應력과 構造物의 剛性 및 材料 등에 의하여 發生되며, 殘留應力의 存在는 脆性破壞強度, 疲勞強度, 挫屈強度, 振動特性, 腐蝕抵抗 등에 影響을 미치는 窮極的 要因으로 看做됨으로

* 正會員 · 漢陽大學校 工科大学 教授, 土木工學科

** 正會員 · 京畿工業開放大學 助教授, 土木工學科

本 研究는 構造物의 強度를 低下시키고 機能에 惡影響을 끼치는 殘留應力의 機構學의 特性을 把握하기 위하여 SWS 58 鋼板을 X 音 鎔接하여 이것을 4 段階 즉 350°C, 500°C, 650°C, 800°C 로 熱處理하여 hole drilling method 를 使用하여 殘留應力을 測定한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

殘留應力을 除去시키는 가장 效果의인 溫度는 650°C 程度이었고, 구멍의 直徑이 구멍의 깊이와 일치할 때 구멍바로 近處의 塑性變形은 完全히 解放되었으며, 硬度試驗을 通해 熱處理 後 熱影響部의 높은 硬度가 모두 削減되는 것을 알 수 있었으며 또한 殘留應力에 끼치는 鎔接入熱의 影響은 入熱量의 標準보다 1/4 以上, 以下인 경우 殘留應力은 鎔接入熱에 큰 影響이 없음을 알았다.

1. 序 論

鎔接技術의 向上과 더불어 金屬間의 結合에 鎔接을 하는 것이 普遍化 되어있고 橋梁, 船舶, 壓力容器, 發電所 設備 및 原子力 容器 等 構造物이 大形化되고, 厚板 高強度 材料의 利用度가 急増함에 따라 鎔接部에서의 強度解析은 매우 重要視되고 있다.

鎔接에 依해 鎔接部 近處는 溫度 上昇으로 膨脹되고 그 後 冷却되어 收縮이 일어나며 이의 溫度變化는 通常 鎔接部 部近에 생기는 局部的 溫度變化와 함께 膨脹收縮이 拘束되는 경우가 많다. 그러므로 鎔接에 의한 溫度化課程에서 이음부 部近에 複雜한 拘束에 의한 應力變化가 發生되며 冷却 後 應力은 殘留하게 되며 또한 收縮과 蠕에 의한 變形이 생겨진다⁽¹⁾.

鎔接部에서의 強度는 複雜한 要因의 影響을 받으며 그 重要한 要因中の 하나로 殘留應力을 들 수 있으며 이들은 構造材料나 成分에 어떤 作用力이나, 外力의 作用 없이도 內部에 存在하는 應力인데 예를 들면, 材料에 冷間加工, 熱處理, 鎔接을 行하는 경우, 또는 鍛造시킨 材料 等に 存在하며 때때로 架設, 組立課程이나 過荷重에 의한 경우, 또는 地下 構造物의 支點移動 效果 및 構造物에서 窮極의 通合部가 될지 모르는 死荷重이나 構造物의 補修나 修正課程에서 發生되기도 한다⁽²⁾.

殘留應力의 發生課程은 다른 熱處理나 冷間加工에 比하여 單純하지만 實際의 경우, 殘留應力의 發生狀況은 鎔接이 行하여지는 部材의 形狀, 值數, 施行法, 施工, 鎔接法에 따라 달라지며

相當히 複雜하다⁽³⁾.

鎔接構造物의 強度에 대해 殘留應力의 影響은 重要한 問題인데 이것의 크기, 符號, 分配에 의하여 이롭게 혹은 해롭게 作用할 수 있는데, 一般의 殘留應力은 해롭게 作用되며, 이들 應力에 使用應力이 附加될 때는 構造物 혹은 構造要素에 強度를 低下시키며 機能에 惡影響을 끼치는 경우가 許多하다. 따라서 脆性破壞強度, 疲勞強度, 挫屈強度, 振動特性, 腐蝕抵抗 等に 影響을 미치는 窮極的 要因으로 看做되고 있다⁽⁴⁾.

그러므로 本 研究는 鎔接 殘留應力의 影響을 實驗的으로 糾明하고 機構學의 特性을 把握하여 鎔接部 解析에 基礎的 資料를 獲得할 目的으로 遂行하였다.

2. 殘留應力

2.1 殘留應力에 대한 研究 動向

殘留應力을 理論的으로 解析하려는 試圖는 Neumann의 熱彈性方程式의 세워진 後 Timoshenko 및 Goodier⁽⁵⁾ 等に 의하여 그 解를 求하는 方法이 研究되어졌고 塑性變形을 考慮한 경우에 대해서는 溫度分布를 基準으로 한 熱變形과 그것에 의해 생긴 塑性變形을 考慮하고 deformation 理論⁽⁶⁾을 使用하여 應力과의 關係를 求하여 平行方程式의 解를 求하였다. 그러나 이들은 簡單한 경우에 대하여 成立되고 鎔接順序, 鎔接電流 등의 複雜한 問題를 푸는 데는 困難하여 더 깊은 研究가 거듭되어 왔다.

다른 研究는 dislocation 理論⁽⁷⁾으로 알려진 것인데 이것은 數學的으로 mismatch에 의해 일

어난 殘留應力들이 彈性轉位에 의한 應力으로 看做될 수 있다는 것이다. 彈性體에 外力이 作用하지 않을 경우에 應力이 存在할 수도 있음을 數學的으로 研究한 것이다. 外力이 作用하지 않을 경우의 應力을 固有應力이라고 불려지며 彈性體 內의 多連結性을 導入하므로써 이와 같은 應力의 存在가 立證된 것이다⁽⁸⁾.

固有應力은 Klein 을 위시한 많은 사람들에 의해 彈性論으로 또한 機何學的으로 一連의 研究가 行하여졌다. 熱應力을 求하는데 있어서 轉位는 流體力學에 있어서의 circulation 에 對應시킬 수 있는 것이며 流體力學的 推論에 의하여 vorticity 에 對應시킬 수 있다. Moriguchi 는 殘留應力의 理論과 流體力學的 vortex 理論 사이에 類似點을 發見함으로써 基本的인 兩立變形 理論을 開發하였고 또한 銲接에 의한 殘留應力 解析을 Prandtl 의 3次元 날개理論에 類似한 方法으로 取扱할 수 있다는 것을 보여 주었다⁽⁹⁾.

2.2 殘留應力 發生原因

殘留應力의 發生原因을 外部的 作用에 의한 外部的 原因과 物體內의 組織의 不均質性에 의한 內部的 要因으로 分類시킨다면 다음과 같다⁽¹⁰⁾.

(1) 不均一 變形

不均一한 變形狀態나 不均一한 塑性變形을 생기게 하는 경우이다.

外部的 原因; 同一치 못한 作用應力, 例를 들면 軋, 壓延, 引張 等

內部的 原因; 物體內의 各部分에 組織의인 濃度差 혹은 結晶立의 方位差 等에서 各部分이 다른 降伏舉動을 나타내는 경우

(2) 熱에 의한 作用

① 熱應力에 의한 塑性變形

加熱 冷却할 때에 熱應力이 發生하는 경우가 있다. 高温에서는 降伏應力이 減少되며 이 應力下에서 容易하게 塑性變形이 생겨진다.

外部的 原因; 物體의 機何學的 形狀이 不均等하거나 複雜한 경우, 加熱, 冷却될 때 各部分의 熱傳達狀態가 다르면 이 各部分에 溫度差가 나타난다.

內部的 原因; 物體內의 各部에 彈性係數, 熱傳達率, 熱膨脹係數 等이 다르던가, 더우기 그

것들의 溫度係數도 다른 경우

② 變態 혹은 析出에 의한 體積變化

變形 혹은 析出에 의한 體積變化가 物體내에 不均一하게 생기면 이것에 의해 應力이 發生한다.

外部的 原因; 冷却時 各部分의 冷却은 一定하지 않기 때문에 各部分의 冷却速度는 달라진다. 이것의 變態가 完全히 終了된 部分과 變態를 行하고 있는 部分이 생겨지는 경우, 兩者에 體積變化의 差가 나타난다.

內部的 原因; 組織의인 濃度差가 있는 경우, 이 경우 變態나 析出 等에 의해 體積變化의 程度를 달라지게 한다.

(3) 化學的 變化

이것은 거의 外部的인 原因에 의해 發生한다.

2.3 殘留應力의 測定

本 研究에 使用된 殘留應力 測定方法은 殘留應力이 存在하는 板에 작은 구멍을 穿孔하여 구멍 周邊部의 變形으로부터 殘留應力을 求하는 方法으로 구멍을 뚫으면 구멍周邊部의 應力은 弛緩되어 殘留應力은 變化된다. 이때 弛緩變形은 普通 殘留應力에 對應하는 變形에 해당된다. 따라서 完全 解放形의 切斷, 分割 等에 比較하여 이 部分 解放形의 測定法이 使用될 수 있다^(11,12).

測定原理는 板의 斷面에 다른 方向에 殘留應力이 存在하는데 이 應力은 板의 斷面內 各部에서 一定하다. 主應力 方向에 대한 板의 殘留應力을 σ_1, σ_2 라 하고 그림(1)에 表示한 것과 같이 板에 半徑 R 의 구멍이 있는 경우를 考慮하면, σ_1 方向에 대한 角度 φ 의 方向과 구멍 中心으로부터 距離 r 만큼 떨어진 部分의 圓周方向 및 半徑方向의 殘留應力을 σ_t, σ_r 라 한다면 이 應力은 구멍의 뚫림에 의해 變化한다. 구멍을 뚫은 後의 이 部分의 殘留應力을 σ'_t, σ'_r 라 하고 구멍의 뚫음에 의해 이 部分에 附加하는 應力을 σ'_t, σ'_r 라 하면,

$$\sigma'_t = \sigma_t + \sigma'_t, \quad \sigma'_r = \sigma_r + \sigma'_r \quad (1)$$

구멍을 뚫은 後의 殘留應力 σ'_t, σ'_r 의 狀態는 殘留應力의 存在가 없는 板에 半徑 R 의 圓空을 뚫고 外部로부터 힘을 作用시키면 구멍으로부터 어느 정도 멀리 떨어진 分部의 應力을 σ_1, σ_2 에

있도록 하면 同一의 應力狀態가 얻어진다. 이경우 σ_1, σ_2 와 σ'_t, σ'_r 의 關係는 Kirson의 解로부터 구해진다.

$$\sigma'_t = \frac{\sigma_1}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_1}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\varphi + \frac{\sigma_2}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_2}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\varphi \quad (2)$$

$$\sigma'_r = \frac{\sigma_1}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_1}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \cos 2\varphi + \frac{\sigma_2}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_2}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \cos 2\varphi \quad (3)$$

또한 初期의 殘留應力 σ_t, σ_r 과 σ_1, σ_2 에 있어서의 關係는 (4), (5)식과 같다.

$$\sigma_t = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \quad (4)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\varphi \quad (5)$$

(2)~(5)의 式으로부터 구멍을 뚫음에 의해 附加되는 應力 σ'_t, σ'_r 가 求해진다.

$$\sigma'_t = \frac{1}{2} \frac{R^2}{r^2} \sigma_1 - \frac{3}{2} \frac{R^4}{r^4} \sigma_1 \cos 2\varphi + \frac{1}{2} \frac{R^2}{r^2} \sigma_2 + \frac{3}{2} \frac{R^4}{r^4} \sigma_2 \cos 2\varphi \quad (6)$$

$$\sigma'_r = -\frac{1}{2} \frac{R^2}{r^2} \sigma_1 + \frac{3}{2} \frac{R^4}{r^4} \sigma_1 \cos 2\varphi - \frac{2R^2}{r^2} \sigma_2 \cos 2\varphi - \frac{1}{2} \frac{R^2}{r^2} \sigma_2 - \frac{3}{2} \frac{R^4}{r^4} \sigma_2 \cos 2\varphi + \frac{2R^2}{r^2} \sigma_2 \cos 2\varphi \quad (7)$$

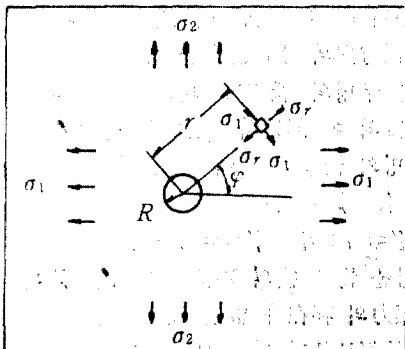


그림 1. 구멍 周邊의 應力

이들 應力 σ'_t, σ'_r 은 구멍 周邊에 있어서 變形에 關係되는 것이다. 이것에 對應하는 變形을 읽어 (6), (7)式을 使用하여 殘留應力 σ_1, σ_2 를 求할 수 있다.

本 研究에서는 殘留應力을 測定키 위해 위의 같은 理論을 背景으로 한 Soete, Vancromburgge 法을 使用하는데, 이것은 Mathar-Soete 法이라고도 말하며 抵抗線-變形計를 利用하여 測定하는 가장 基本的인 方法이다. 殘留應力은 較正實驗을 使用하지 않고 理論적으로 誘導된 式에 의해 求한다. Soete, Vancromburgge 法은 구멍 周邊에 붙인 變形계이지에 대하여 그 계이지에서 얻은 變形率은 平均 變形率이고 그 平均 變形率과 實際 變形率 과의 各部에서 나타나는 變形率과의 關係를 求하여 그것을 利用하여 應力을 計算하는 것이다¹³⁾.

지금 그림 2에 表示한 것과 같이 길이 L인 계이지를 그림처럼 φ 의 方向의 半徑方向에 附着되게끔 한다. 구멍 뚫은 後 계이지의 半徑 r의 部分에 생기는 半徑方向의 變形을 ϵ'_r , 구멍에 있어 그 部分에 附加된 圓周方向 및 半徑方向의 應力을 σ'_t, σ'_r 이라고 하면 이것들은 應力과 變形의 關係에서

$$\epsilon'_r = (\sigma'_r - \nu \sigma'_t) / E \quad (8)$$

계이지에서 나타나는 變形率 ϵ'_m 와 구멍中心에서 계이지의 端部까지의 距離를 r_1, r_2 라 하면

$$\epsilon'_m = \frac{1}{r_2 - r_1} \int_{r_1}^{r_2} \epsilon'_r dr \quad (9)$$

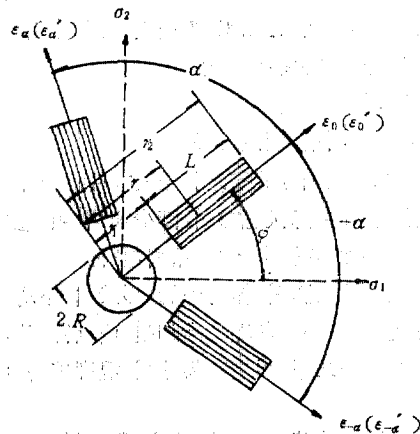


그림 2. 구멍의 周邊의 스트레인 계이지 位置

式(9)에 式(8)과 (6), (7)을 代入하여 積分하면

$$\epsilon'_m = \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\varphi \quad (10)$$

여기서,

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{(1+\nu)}{2} \frac{R^2}{r_1 r_2} \\ B &= \frac{2R^2}{r_1 r_2} \left[-1 + \frac{(1+\nu)}{4} \frac{R^2(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2)}{r_1^2 r_2^2} \right] \end{aligned} \right\} (11)$$

구멍 中心에서 等距離의 3方向, 즉 主應力 σ_1 方向에 대하여 $\varphi, \varphi + \alpha, \varphi - \alpha$ 인 3方向의 $\epsilon'_{m, \varphi}, \epsilon'_{m, \varphi - \alpha}, \epsilon'_{m, \varphi + \alpha}$ 를 求하는 경우를 생각해 본다면

各方向 變形率은 式(10)에 의해

$$\left. \begin{aligned} \epsilon'_{m, \varphi} &= \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\varphi \\ \epsilon'_{m, \varphi - \alpha} &= \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \\ &\quad + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\varphi - \alpha) \\ \epsilon'_{m, \varphi + \alpha} &= \frac{A}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \\ &\quad + \frac{B}{E}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2(\varphi + \alpha) \end{aligned} \right\} (12)$$

$\epsilon'_{m, \varphi}, \epsilon'_{m, \varphi - \alpha}, \epsilon'_{m, \varphi + \alpha}$ 를 편의상 $\epsilon'_0, \epsilon'_{-\alpha}, \epsilon'_{\alpha}$ 라 놓고 殘留應力 σ_1, σ_2 및 方向 φ 을 求하면

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{8} \left[\frac{\epsilon'_0 + \epsilon'_{-\alpha} - 2\epsilon'_0 \cos 2\alpha}{A \sin^2 \alpha} \right] \\ &\quad \pm \frac{\sqrt{(2\epsilon'_0 - \epsilon'_{-\alpha} - \epsilon'_{\alpha})^2 + \tan^2 \varphi (\epsilon'_{-\alpha} - \epsilon'_{\alpha})^2}}{B \sin^2 \alpha} \\ \tan 2\varphi &= \tan \alpha \left(\frac{\epsilon'_{-\alpha} + \epsilon'_{\alpha}}{2\epsilon'_0 - \epsilon'_{-\alpha} - \epsilon'_{\alpha}} \right) \end{aligned} \right\} (13)$$

3. 實 驗

3.1 實驗材料

鎔接 試驗片을 製作하기 위하여 母材로 SWS 58을 使用하였고 그 化學的 成分 및 機械的 性質은 表 1, 2와 같으며 試驗片의 形狀 및 值數는 그림 3과 같다.

鎔接 方法은 arc-welding 의 아래 보기 姿勢로 X-홈 鎔接을 施行하였고 이때 使用한 鎔接棒

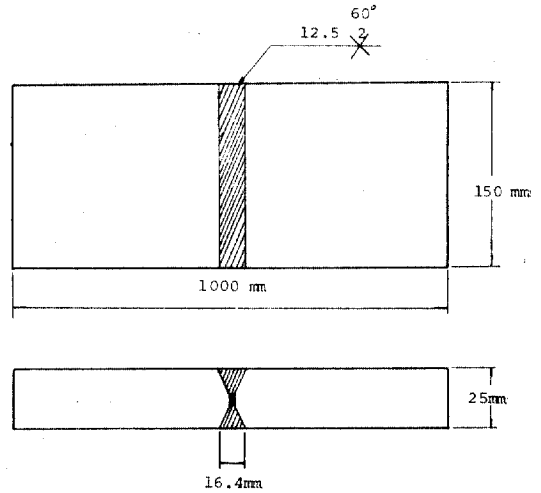


그림 3. 試驗片의 形狀 및 值數

은 高張力鋼 鎔接棒으로 KSE 5016에 의한 S-7016 H로써 그 化學的 成分과 機械的 性質은 表 3과 4에, 鎔接條件은 表 5에 表示하였다.

anneal 溫度에 따른 殘留應力 分布와 機械的 性質을 比較하기 爲하여 試驗片의 熱處理 溫度를 350°C, 500°C, 650°C, 800°C의 네가지 方法으로 熱處理 한 後 한 時間동안 維持시킨 후 爐冷을 하였다.

또한 殘留應力에 미치는 鎔接入熱의 影響을 分析하기 爲하여 鎔接電流를 表 5의 鎔接條件보다 電流를 1/4 以上과 1/4 以下로 준 試驗片을 製作하였다.

3.2 實驗方法

(1) 殘留應力 測定

殘留應力 測定 方法에는 여러가지 方法이 있으나 本 研究에서는 應力弛緩法의 하나인 部分 解放式을 適用하여 Mathar 法인 hole drilling method를 採擇하였다. 鎔接中心線을 基準으로 하여 스트레인 게이지를 로젯트 方向으로 接着 하였으며 接着位置는 그림 4와 같다.

直徑 d 와 구멍 中心에서 게이지 中心까지의 距離 r 과의 比 $\left(\frac{d}{r}\right)$ 는 ASTM 規定⁽¹⁴⁾에 따라 0.27로 하였고 깊이 1mm 마다 殘留變形量을 測定하였다.

(2) 硬度 試驗

표 1. 母材의 化學的 成分

| C | Mn | Si | P | S |
|------|------|------|------|-------|
| 0.15 | 1.37 | 0.31 | 0.02 | 0.008 |

표 2. 母材의 機械的 性質

| Tensile Strength | Yield Point | Elongation | Impact Value |
|-------------------------|-------------------------|------------|--------------|
| 67.6 kg/mm ² | 57.7 kg/mm ² | 28 % | 31.4 kg·m |

표 3. 鎔接棒의 化學的 成分

| C | Si | Mn | P | S |
|------|------|------|-------|-------|
| 0.08 | 0.48 | 0.98 | 0.011 | 0.009 |

표 4. 鎔接棒의 機械的 性質

| 항복점 N/mm ² (kg/mm ²) | 인장강도 N/mm ² (kg/mm ²) | 연신율 (%) | 충격치 J(kg/m) (0°C) | 열처리 |
|--|---|------------|----------------------|-------|
| 490(50) | 570(58) | 32 | 200(20) | 용접그대로 |

표 5. 鎔接條件

| Plate Alloy | Diameter(mm) | No. of Passes | Current(A) | Voltage(V) | Travel Speed (cm/min) |
|-------------|--------------|---------------|------------|------------|--------------------------|
| S-7016 H | 4 | 4 | 100 | 200 | 20 |

표 6. 鎔接試驗片의 殘留應力分布(kg/mm²)

| Hole Depth | A | | B | | C | |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | Stress 1 | Stress 2 | Stress 1 | Stress 2 | Stress 1 | Stress 2 |
| 1 mm | 2.46 | 0.56 | 2.73 | 0.57 | 2.52 | 0.58 |
| 2 mm | 7.32 | 1.23 | 7.68 | 1.11 | 7.55 | 1.20 |
| 3 mm | 12.5 | 2.67 | 12.46 | 1.98 | 12.59 | 2.69 |
| 4 mm | 15.41 | 3.54 | 14.89 | 2.88 | 14.44 | 3.01 |
| 5 mm | 20.98 | 4.98 | 19.4 | 3.62 | 19.78 | 3.88 |
| 6 mm | 22.24 | 6.75 | 20.64 | 5.65 | 20.46 | 6.01 |
| 7 mm | 22.41 | 6.92 | 20.69 | 5.81 | 21.72 | 5.44 |
| 8 mm | 22.23 | 6.88 | 20.21 | 5.64 | 21.64 | 5.21 |
| 9 mm | 22.15 | 6.43 | 20.02 | 5.49 | 21.77 | 5.33 |
| 10 mm | 21.93 | 6.25 | 20.04 | 5.94 | 21.02 | 5.21 |
| 11 mm | 22.27 | 6.22 | 20.03 | 5.96 | 21.74 | 5.49 |
| 12 mm | 22.17 | 6.24 | 20.18 | 9.89 | 22.0 | 5.42 |

鎔接한 部位에는 殘留應力の 發生 및 硬化의 變形外에 硬度가 顯著하게 增加하는 傾向이 있는데, 이 硬度의 增加는 材料의 脆性破壞를 일으키게 하는 要因이 되고 있다.

따라서, 熱處理에 의해 硬度를 減小시키는 것

은 鎔接部의 脆性破壞를 防止하는데 크게 도움을 준다.

熱處理 溫度에 따른 硬度의 變形을 考察하기 위하여 鎔接 中心線으로부터 5mm 間隔으로 rockwell hardness tester 기를 使用하여 測定

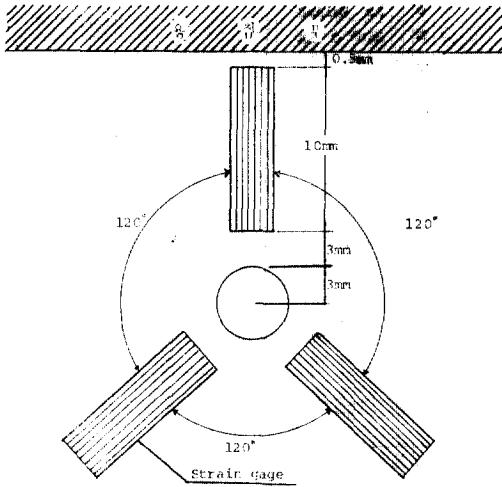


그림 4. 스트레인 게이지 接着位置

하였다(15).

4. 實驗結果 및 考察

鎔接 鋼構造 部材의 殘留應力 特性을 把握하기 위하여 熱處理 溫度를 350°C, 500°C, 650°C 및 800°C로 준 結果를 길이별에 따른 잔류응력 분포를 정리한 것이 그림 5와 같다.

鎔接端에서 16.5 mm 떨어진 位置에서 殘留應力이 거의 一定하게 되는 길이에서의 測定値는 As welded 試驗片은 23 kg/mm² 이었고, 350°C SR 試驗片은 15 kg/mm², 500°C SR 試驗片은 12 kg/mm², 650°C SR 試驗片과 800°C SR 試驗片

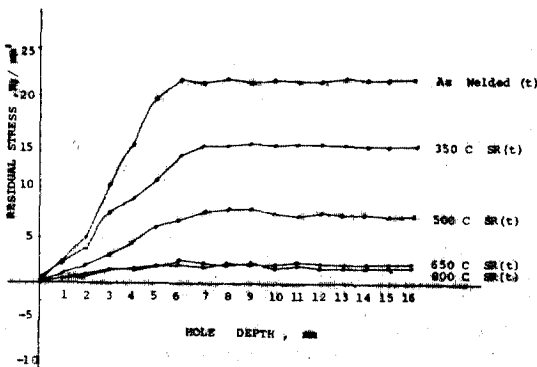


그림 5. 熱處理 溫度別 殘留應力 分布

은 2.5 kg/mm² 程度이었다.

熱處理에 따른 殘留應力의 變化를 考察해 볼 때 鋼材는 一般的으로 高溫에서는 引張強度나 降伏點들이 낮아지므로 內部應力들이 500~600°C 이상으로 되면 전혀 彈性的이 아니고 塑性的으로 되어 內部應力은 局部的으로 塑性變形에 의해 消滅되어지는 데 본 연구의 650°C annealing 정도에서는 거의 塑性變形이 發生되어 殘留應力들이 대부분 減小되었으며 이는 鋼材의 硬度나 抵抗力을 增大시켜주고 組織을 軟한 것으로 變化시켜 加工에 適合한 狀態로 되며 組織을 細分化시켜 方向性을 적게하고 偏析을 적게함으로 均一狀態로 만들어져 構造材의 強度 및 疲勞破壞를 豫防할 수 있게 된다(16, 17).

또한 殘留應力의 경감은 冷間加工의 影響을 除去시키며, macro的 應力을 除去시켜 變形 및 使用中의 破損을 미리 防止시키며, 外部로부터 鋼材中에 擴散 鎔解된 元素들을 除去시켜, 脆化를 막아주고 組織을 安定化하여 腐蝕性을 改善

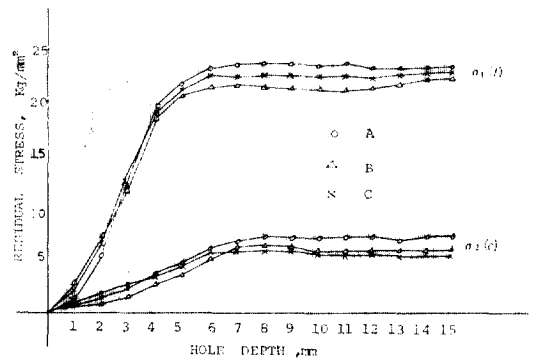


그림 6. 鎔接試驗片의 殘留應力 分布

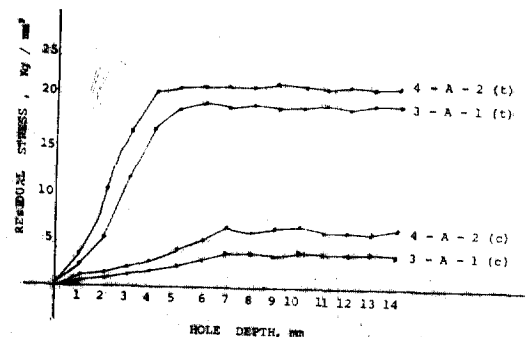


그림 7. 鎔接入熱 條件에 의한 殘留應力 分布

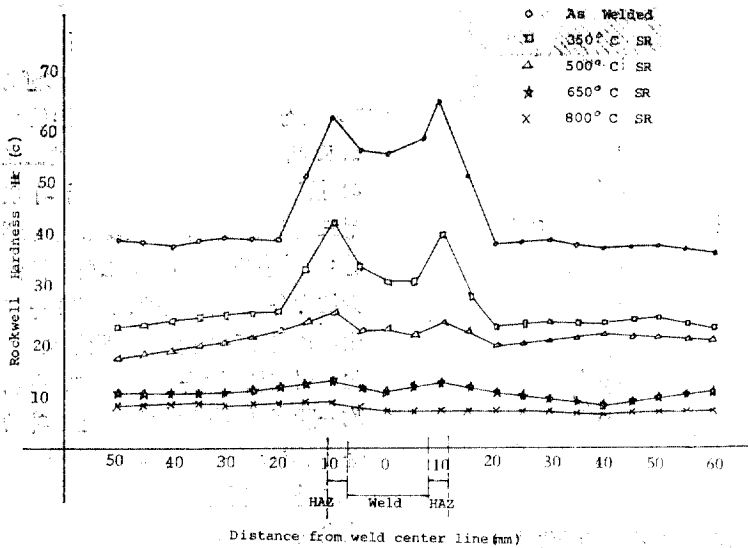


그림 8. 熱處理 溫度別 硬度試驗

함으로 粘性和 靱性を 附與함으로 鋼部材의 使用에 상당히 重要한 役割을 차지하고 있음을 알 수 있다⁽¹⁸⁾.

800°C의 SR(stress relief)은 650°C SR과 거의 비슷하게 나타났는데 이는 annealing 溫度가 650°C까지는 殘留應力의 弛緩하는 樣相이 크고 800°C에 이르러서는 殘留應力의 弛緩하는 量이 그다지 크지 않기 때문에 殘留應力을 除去하기 위한 熱處理 溫度는 A₁ 變態點을 넘지 않는 650°C 程度가 適合함을 알 수 있다⁽¹⁹⁾.

로켓트 스트레인 게이지를 使用하여 hole drilling method로 鎔接中心에서 16.5mm 떨어진 位置에 얻어진 殘留應力은 表 6 및 그림 6과 같다.

이들 應力值 σ_1 은 鎔接 垂直方向에 引張側으로 作用하며, σ_2 는 鎔接 길이方向으로 壓縮側으로 作用하며, 구멍直徑과 구멍 길이의 비가 1.0 이상되는 位置에서는 殘留應力 값이 거의 一定하여 많은 研究結果⁽²⁰⁾들과 一致한다. 一定한 길이 以後에는 殘留應力의 變化가 없음을 알 수 있으며 이때 引張殘留應力의 값은 약 20~23 kg/mm²로 鋼材의 降伏應力에 비해 相當히 작운데, 이는 熱影響部(HAZ)를 벗어난 位置에서 測定하였기 때문이다.

殘留應力에 미치는 鎔接入熱의 影響을 考察하기 위하여 電流를 標準보다 1/4 높은 125 A를 作用시킨 경우와 1/4 적은 75A로 作用시킨 경우, 높은 경우는 電流가 세므로 速度가 빨라져 bead가 작게 形成되어 bead의 層數가 增加되고 낮은 경우는 이에 反對된다. 그러나 殘留應力 測定度는 그림 7과 같으며 標準으로 作用시킨 것에 비해 큰 差異는 갖고 있지 않아 이 경우 殘留應力 値는 鎔接入熱에 큰 影響을 끼치지 않는 것으로 看做된다⁽²¹⁾.

그림 8은 As welded 試驗片 및 SR 試驗片의 硬度分布를 나타낸 것이다. 硬度는 塑性 및 彈性變形에 대한 抵抗能力으로 金屬硬度란 주로 塑性變形에 대한 抵抗能力이며, 母材 및 鎔接金屬의 靜的 強度를 推定할 수 있는데 熱影響部는 가장 큰 것이 典型的인 高張力鋼 鎔接이음의 硬度分布이다.

本 研究에서도 그림과 같이 熱影響部에서 가장 큰 硬度를 나타내며 그 以後에서는 一定한 값을 보였다. 650°C나 800°C SR 試驗片들은 位置에 관계없이 거의 一定한 값을 보이는데 이는 殘留應力이 除去되었기 때문으로 보이며, 硬度 實驗으로 어느 程度의 殘留應力 傾向 및 熱影響部를 分析할 수 있다⁽²²⁾.

5. 結 論

SW S 58 鋼材를 X-용 鎔接한 것과 이것을 熱處理하여 鎔接殘留應力의 力學的 特性을 把握한 結果 얻어진 結論은 다음과 같다.

(1) 殘留應力을 緩和시켜 주기 위해 4段階로 熱處理한 結果 350°C 나 500°C 에서의 熱處理는 크게 緩和되지는 못했으나 650°C 나 800°C 에서의 熱處理는 鋼의 塑性變形으로 거의 除去되었다. 그러나, 800°C 는 650°C 以上の 效果가 거의 없어 650°C 程度의 熱處理가 가장 適合하다.

(2) 鎔接部 近處에 drilling 했을 경우 殘留應力의 크기는 구멍의 直徑이 구멍의 깊이와 같아지는 位置로부터 거의 一定하게 存在하므로 구멍 바로 近處의 變形은 完全히 解放되어졌음을 알 수 있다.

(3) 硬度試驗을 實施한 結果 熱影響部에서 가장 높은 硬度를 가져 硬度試驗으로부터 直接 熱影響部를 探索할 수 있으며 熱處理를 한 結果 熱影響部の 높은 硬度가 모두 減小되어 殘留應力이 除去되었음을 證明한다.

(4) 殘留應力에 끼치는 鎔接入熱의 影響은 標準보다 1/4 以上 혹은 1/4 以下인 경우 큰 影響을 갖지는 않는다.

參 考 文 獻

1. 佐藤邦彦 外 2人 “現代溶接技術大系 ③(溶接變形, 殘留應力), 産報出版, 昭和55年1月 pp.11~20.
2. Technical DATA Bulletin T-403, “Measurement of Residual Stresses by the Blind Hole Drilling Method, Photolastic inc., 1977. pp.1~10.
3. 米谷 茂, “殘留應力の發生と對策” 養賢堂, 1983. pp.115~232.
4. Charlotte Weisman, “Welding Hand Book(Fundamentals of welding)” American Welding Society. 1976. pp.231~237.
5. Goodier, “On the Integration of the Thermo Elastic Equation”, *Phil Mago* Vol.23, 1951.
6. Taylor, G.I., “The Mechanism of Plastic Deformation of Crystals, *Proceedings of the Royal Society London A.* 145, pp.36~387.
7. Kroner E, “Dislocations and Continuum mecha-

nics”, *Applied Mechanics Reviews* 15(8), 1962. pp.599~606.

8. Koichi Masubuchi, “Analysis of Welded Structures”, Pergamon Press, 1980, pp.92~108.
9. Moriguchi, S., “On the analogy between Wing Theory of Residual Welding Stress, Prestened at the 5th National Congress for Applied mechanics of Japan. 1955.
10. E.Hourdremond, H., Scholl, “Z. Metall, 50” pp. 503, 1959.
11. Mathar, J. “Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformations Around Drilled Holes *Trans, ASME, Vol.56, 1934, pp.249~254.*
12. Rendler, N.J and Vigness, “Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses” *Proceeding of the Society for Experimental Stress Analysis* Vol. XXIII No. 2, 1966, pp.577~586.
13. V.Soete., R.Vancromburgge, “*Proc, Exp. Stress Analysis, 8, (1950), 173*
14. ASTM E837-81 “Standard Method for Determining Residual Stress, by the Hole Drilling Strain-Gage Method” pp.841~846.
15. 崔鎔湜外 “材料實驗” 螢雪出版社 pp.151~198.
16. William F.Smith, “Structure and Properties of Engineering Alloys 198, pp.52~67.
17. 太田省三郎 外, “すみ肉溶接継手の疲勞強度に及ぼす溶接部の形狀及び殘留應力の影響” 溶接學會論文集 第4卷(1986) 第4號, pp.68~75.
18. 李榮培, “金屬熱處理技術, 賢文出版社, 1981, pp. 293~296.
19. 菊地洋一 外 5人, “高張力鋼の殘留應力特性に關する研究” 溶接學會誌, 第43卷(1974) 第9號 pp.24~33.
20. R.A. Kelsey, “Measuring non-Uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method”, *Proc. of SESA Vol. XIV No.1, 1956, pp.181~194.*
- 21) 向井喜彦外 2人, “溶接工學” 理工學社, 1981, pp. 71~75.
- 22) 村上理一 外, “溶接殘留應力場での疲勞き裂成長速度の評價” 溶接學會論文集 第2卷, 第4號 1984, pp.144~150.

(接受: 1987. 2. 5)