

# 高張力鋼 熔接時의 問題點

金 永 植

<韓國海洋大學·工博>

## 1. 序 言

高張力鋼이란 熔接性を 考慮한 引張強度 50 kg/mm<sup>2</sup> 以上の 低炭素, 低合金의 構造用鋼을 말하는 것으로 HT50, HT60, HT70, HT 80 等 을 보통 使用하나, HT 100 혹은 그 以上の 強度를 갖는 鋼材도 特殊用途로 開發, 使用되고 있다. 이러한 高張力鋼을 使用함으로써 構造物의 重量輕減, 材料의 節約 및 熔接工數의 短縮化를 도모할 수 있으며, 또한 構造物을 經濟的으로 製作할 수 있고, 나아가서 構造物의 使用性能을 向上시킬 수 있는 利點이 있다. 그러나 使用된 鋼材의 強度가 增加하게 되면 一般적으로 熔接성이 問題로 되고, 熔接部의 脆化도가 增加하게 되므로, 高張力鋼材 熔接構造物의 경우, 信賴性和 安全性 確保가 特히 重要한 課題로 되어 있다.

高張力鋼材 熔接時의 問題點으로는 熔接균열, 熔接部의 脆化, 라멜라테어(lamellar tear) 等을 들 수 있다. 이러한 問題點들은 最近들어 構造物의 더욱 加혹한 使用條件에 부응하기 爲해 以前보다 높은 強度의 高張力 鋼材가 出現하게 되고, 構造物의 大型化에 따라 熔接時의 拘束條件이 增大되며, 또한 熔接能率을 向上시키기 爲해 大入熱 熔接法이 널리 使用됨에 따라 더욱 큰 問題點으로 指摘되고 있다.

本稿에서는 이러한 高張力鋼材 熔接時 問題點과 그 對策에 對해 說明하고자 한다.

## 2. 熔接균열

高張力鋼 熔接時 發生되는 熔接균열은 주로 Ms 點 또는 약 300°C 以下에서 일어나는 균열로, 熔接後 數分에서부터 數日後에 이르는 사이에 發生하며, 結晶粒內 및 粒界의 어느 쪽이나 전과한다. 그 形態는 루우트 균열(root crack), 비이드밀균열(under bead crack), 토우균열(toe crack) 等 여러가지로 分類되나<sup>1)</sup>, 그 本質은 水素가 應力集中部의 空孔이나 非金屬性 介在物의 周圍에 集中하여, 應力說 또는 轉位論의 水素脆化 機構에 依해 發生하는, 水素에 依한 遲延균열(delayed cracking) 現象으로 알려져 있다. 이의 基本的인 原因으로서는 (1) 熔接後의 硬化組織, (2) 熔接時에 侵入하는 水素 및 그 擴散, (3) 熔接이음부에서 發生하는 拘束應力의 要因을 들 수 있다. 熔接균열은 熔接時 熔接部에 發生되는 拘束應력이 (1), (2) 항과 같은 要因들의 相關關係에 依해 決定되는 균열 發生에 對한 材料의 抵抗力(균열 發生 限界 應力)보다 클 때에 發生한다고 볼 수 있다. 그러므로 熔接균열을 防止하기 爲해서는 이들 要因에 對한 檢討와 對策이 必要하다.

### 2.1. 熔接熱影響部の 組織

熔接熱影響部の 균열은 經驗적으로 硬化도가 클수록 發生하기 쉽다는 概念下에 熱影響部の 硬度가 熔接균열의 指標로 使用되어 왔다. 이리

한 熱影響部의 硬度는 鋼材의 化學成分과 熔接時의 高溫으로 부터의 冷却速度(540°C에서의 冷却速度나 800°C로부터 500°C까지의 冷却時間을 利用한다)에 依해 決定된다.

鋼材의 化學成分이 硬化에 미치는 영향을 量的으로 나타내는 것으로서 몇개의 炭素當量(Ceq)式이 提案되어 있다. 가장 널리 使用되고 있는 JIS 規格에 規定된 Ceq 式을 表示하면 다음과 같다.

$$Ceq = C + 1/24 Si + 1/6 Mn + 1/40 Ni + 1/5 Cr + 1/40 Mo + 1/14 V (\%)$$

그러나 硬化성이 큰 것은 熔接균열 感受성이 크다는 것이 事實이나, 硬化성과 熔接균열 感受성과는 반드시 一致하지 않는다는 觀點에서 熔接균열 試驗結果로부터 導出한 다음과 같은 熔接균열 感受性組成에 關한 當量式이 提案되어 있다.

$$P_{CM} = C + 1/30 Si + 1/20 Mn + 1/20 Cu + 1/60 Ni + 1/20 Cr + 1/15 Mo + 1/10 V + 5 B (\%)$$

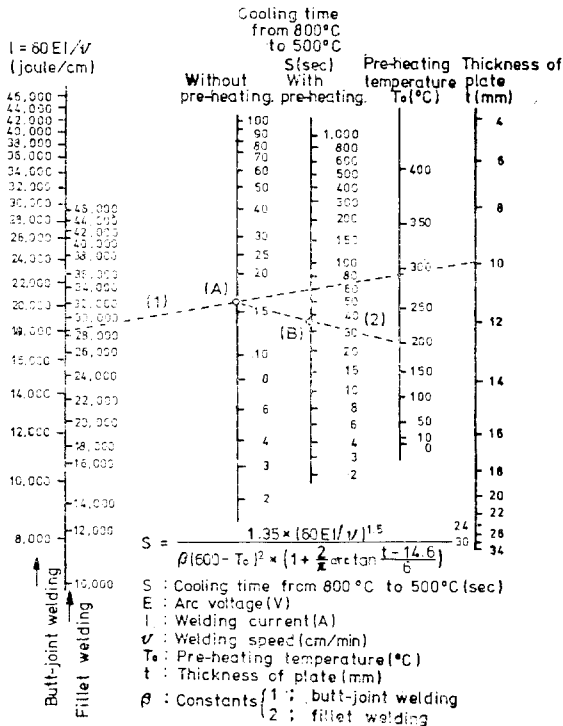


그림 1 피복아아크 용접에 있어서 800°C로부터 500°C까지의 冷却時間을 추정하는 모노그래프 및 추정식.

이 式은 熔接균열 感受性を 잘 나타내는 것으로 利用되어 一部の 規格에 採用되고 있으나 그 適用範圍에 注意할 必要가 있다.

한편 熔接部의 冷却速度에 依해 熔接部의 硬化성은 또한 크게 영향을 받는다. 그러므로 CCT (連續冷却變態) 曲線으로 부터 均열發生 限界冷却曲線을 求하는 것이 檢討되고 있다. 一般적으로 熔接熱影響部의 組織이나 硬度는 800°C로부터 500°C까지의 冷却時間에 依해 推定할 수가 있으므로 各種 熔接施工 條件下에서의 上記의 冷却時間을 推定하는 實驗式 및 모노그래프가 求해져 있다. 따라서 이들을 利用하면 適切한 施工條件을 決定할 수 있다. 피복아아크용접 경우의 例를 그림 1에 보인다<sup>2)</sup>.

以上과 같은 考察에서 熔接균열을 防止하기 爲해서는 熔接熱影響部의 硬度를 낮추는 方法으로 그 材料選擇時는 Ceq 값이나 P<sub>CM</sub> 값이 낮은 것을 選擇해야 되고 또한 豫熱이나 入熱條件을 調整하여 冷却速度를 느리게 하는 것이 必要하다는 것을 알 수 있다.

## 2. 2. 熔接部의 水素量

高張力鋼材의 熔接균열은 熔接時 熔接部에 混入되는 水素量에 依해 크게 影響을 받으므로 이의 適切한 對策이 세워져야 한다. 熔接균열에 미치는 水素영향의 特色은 均열 發生時까지의 潛伏期間을 수반하는 것이다. 그러므로 水素량을 어느 限界值 以下로 減少시켜 潛伏期間을 無限히 길게 하면 均열을 防止할 수 있게 된다. 또한 熔接後 熔接部의 水素를 빨리 放散시킴으로서 水素脆化의 여유를 주지 않도록 하는 것도 熔接균열을 防止하는 한 方法이다.

熔接金屬에 侵入하는 水素源으로서 가장 큰 것은 吸濕에 依한 플럭스(또는 被覆劑)中の 水分과 그리고 熔接분위기인 大氣中の 水分을 들 수 있다. 따라서 初期水素量을 적극적으로 작게 하기 爲해서는 플럭스를 使用하지 않는 가스시일드(gas shield) 熔접이 有力한 手段으로 되어 있고, 實際로 이 경우 熔接部의 水素量은 잘 乾燥된 被覆棒의 경우의 數分の 1 程度이다. 그

러나 모든 이음부를 가스 시일드 熔接法으로 한다는 것은 經濟性, 또다른 缺陷의 存在 可能性, 및 作業能率面에서 困難한 일이므로 被覆棒을 利用한 手動熔接에 있어서의 均열 防止對策이 가장 重要한 問題點으로 되어 있다. 그림 2는 乾燥狀態의 熔接棒을 各種溫度의 大氣中에서 熔接하여 熔着金屬中の 擴散性 水素量을 測定한 것으로, 熔接분위로부터의 水素 侵入 樣相을 보인 것이다<sup>3)</sup>. 이에 依하면 熔接時의 분위기는 擴散性水素에 많은 影響을 미치며 그로 因해 熔接均열 發生에 많은 影響을 미치는 것이 밝혀졌다<sup>4)</sup>.

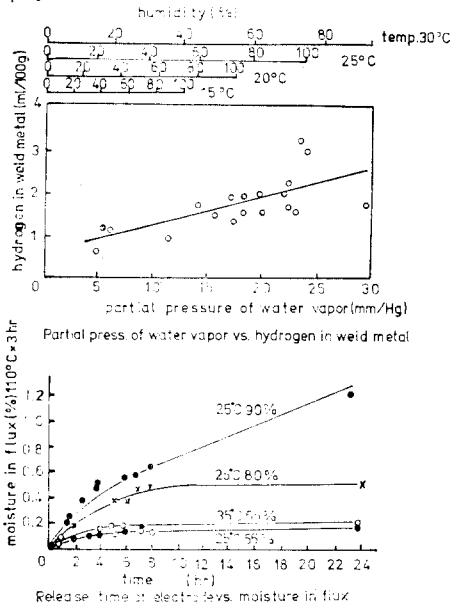


그림 2 HT 80 級 용접 금속의 확산성 수소량과 습도의 關係.

일단 熔接金屬中에 混入된 水素를 빨리 減少시키는 가장 一般的인 方法은 豫熱이다. 豫熱은 母材의 初期溫度를 常溫보다 높게 유지함으로써 熔接後의 冷却을 완만하게 하여, 熔接金屬을 長時間 高溫에 유지하여 水素放散을 도모하는 것으로, 熱影響部의 硬度를 低下시키는 效果도 아울러 나타나서, 熔接均열이 防止된다. 後熱도 또한 水素를 放散시키는 有力한 手段으로 應力除去 풀림의 2次的 效果의 하나로서 水素放散을 들 수 있다. 後熱條件으로서 熔接殘留應力을

緩和시킬만큼 높은 溫度가 아니라도 熔接直後에 熔接部를 加熱하는 것은 熔接金屬中の 水素量減少에 크게 도움이 된다.

### 2.3. 熔接部의 拘束條件

熔接은 局部的으로 加熱 冷却되기 때문에 熔接部에 內部應力和 收縮變形을 가져온다. 또한 一般 構造物에서는 많은 작은간에 變形이 拘束되어 熔접이음매에는 拘束에 依한 拘束應力이 發生한다. 變形을 拘束하는 程度에 따라 熔接部에 크고 작은 拘束應力이 發生하여 熔接性(weldability)이 良好한 材料라도 熔接均열이 發生하는 수가 있다. 따라서 實際로 熔接均열을 防止하기 爲해서는 實構造物에서 發生할 수 있는 應力 또는 스트레인을 豫測하여 熔接部에서의 熔接均열에 對한 抵抗力이 이보다 크도록 材料의 選擇이나 施工條件을 決定하지 않으면 안 된다.

實際構造物에서의 熔접이음부의 拘束度의 例를 表 1에 보인다<sup>5)</sup>.

表 1 實構造物에 있어서 熔接部의 拘束度.

熔접이음의 位置	板두께 h(mm)	拘束度* (kg/mm <sup>2</sup> ·mm)	비 고
船 體 構 造			분할용접 l=80mm
橫 隔 壁	16	1,640	
縱 隔 壁	13.5	1,260	
船 側 外 板	20	890	
船 底 外 板	28	690	
橋 梁			분할용접 l=100mm } 연속용접
角용접(箱形部材)	50~75	900~1980	
다이아플램과 웨브	19~38	200	
다이아플램과 플랜지	25~50	700	
球形탱크	32	830~1200	연속용접

\* 拘束度: 용접이음매의 그루브 간격을 單位 길이로 變化시키는데 필요한 單位 용접 길이當의 힘

熔접이음매에 實際에 가까운 拘束條件을 再現하여 均열 發生 限界 條件을 評價하는 試驗法으로 여러가지 方法이 提案되어 있다. 그 중에서 맞대기이음 熔接均열 試驗法으로 많이 利用되고 있는 y 그루우브슬릿(slit) 拘束均열 試驗과 필렛

熔接균열 試驗法으로 利用되고 있는 CTS(controlled thermal severity)試驗法의 概要를 그림 3에 보인다.

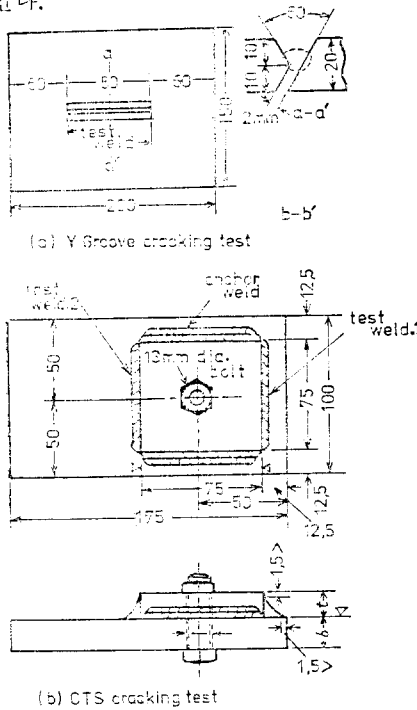


그림 3 自拘束形(self constraint)용접균열 試驗.

以上の 試驗法은 靜的 拘束試驗法이지만, 그 밖에 拘束度를 여러가지로 變化시켜가며 熔接 균열 感受性을 試驗할 수 있는 TRC(tensile restraint cracking)試驗, RRC(rigid restraint cracking)試驗, 또는 最近들어 利用되고 있는 임플란트(implant)試驗 등이 있다<sup>6)</sup>.

이러한 各種 試驗法中 各 國家마다 使用하는 試驗法이 다르기 때문에 IIW(國際熔接學會)에서는 熔接 균열 試驗法을 國際的으로 整理 統一 하려는 움직임이 일고 있다.

#### 2.4. 熔接균열의 防止 對策

熔接균열을 防止하기 爲한 手段으로 熔接균열에 影響을 미치는 上述한 3要因들을 묶어서 하나의 함수로서 나타낼 수 있다면, 이러한 함수를 利用하면 균열 發生의 限界條件을 定量的으로 求할 수 있다. 이러한 目的으로 各種 指數가

提案되어 있으나 널리 使用되고 있는  $P_w$  指數와  $P_{HM}$  指數에 對해서 說明한다.

(1) 루우트 均열 感受性 指數  $P_w$

熔接低溫均열 發生의 主要因인 鋼材의 化學成分, 水素, 拘束條件의 3個 項目을 묶은 다음과 같은 式이 提案되어 있다.

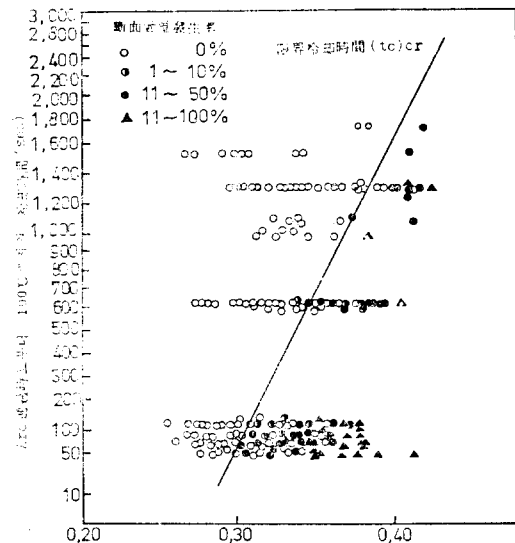
$$P_w = P_{CM} + \frac{t}{600} + \frac{H}{60} = P_{CM} + \frac{K}{40,000} + \frac{H}{60}$$

여기서  $P_{CM}$ : 前述한 熔接均열 感受性 組成 %  
t(mm); 板 두께

H(ml/100g); 熔接棒의 擴散性 水素量

K(kg/mm·mm); 拘束度

熔接均열 發生의 限界條件은 一定한 條件에 依해 주어지는 上記  $P_w$  값과 熔接部의 冷却時間  $t_c$  와의 相關關係에 依해서 實驗的으로 求할 수 있다. 그림 4는 이러한  $P_w$  값과 熔接後의 冷



$$P_w = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} - 52 + \frac{H}{60} + \frac{K}{40 \times 10^3} (\%)$$

그림 4  $P_w$  값과 均열발생 限界냉각시간( $t_c$ )<sub>cr</sub> 과의 관계.

却速度와의 關係로부터 均열 發生 限界冷却時間 ( $t_c$ )<sub>cr</sub> 을 實驗的으로 求한 것이다. 即 均열 發生 限界條件은 여기서는 冷却時間이 되며, 이 冷却時間은 豫熱溫度를 調整함으로써 調整이 可能하며, 따라서 熔接均열을 防止할 수 있다.

이와 같은 實驗에서 다음과 같은 熔接 均열을

防止하기 爲한 限界 豫熱 溫度가 導出된다.

$$\text{限界 豫熱溫度} : T(^{\circ}\text{C}) = 1,440P_w - 392$$

(2) 루우트 균열 感受性 指數  $P_{HM}$

上記  $P_w$  指數는 그루우브 形狀과 熔接位置의 偏心度가 限界豫熱溫度 및 限界應力에 미치는 影響이 考慮되지 않았다. 이러한 것을 補完하여 새로운 指數  $P_{HM}$ 이 提案되어  $P_{HM-tc}$  기준에 依해 熔接균열이 防止됨이 보여져 있다<sup>7)</sup>.

$$P_{HM} = P_{CM} + 0.075 \log H + 0.15 \log (0.017K_t \cdot \sigma_w)$$

여기서 右邊의 第1項, 第2項은 前述한 定義와 같고 第3項은 熔接루우트部의 局部應力에 關한 項으로, 應力集中率( $K_t$ )과 熔接金屬의 平均應力( $\sigma_w$ )과의 積으로 주어진다. 熔接 루우트部의 應力集中率은 그루우브 形狀과 熔接位置의 偏心度에 따라 다르지만, 大略 다음 값을 利用하면 된다.<sup>8)</sup>

$$K_t \approx 5.8 \quad (45^{\circ} \text{ V 그루우브})$$

$$K_t \approx 4 \quad (60^{\circ} \text{ X, Y, Y 그루우브})$$

또한  $\sigma_w$ 는 拘束度  $K$ 와 熔接金屬의 降伏應力  $\sigma_y$ 의 함수로서 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_w = 0.050 K \quad (K \leq 20 \sigma_y)$$

$$\sigma_w = \sigma_y + 0.005(K - 20 \sigma_y) \quad (K > 20 \sigma_y)$$

以上과 같은  $P_{HM}$  指數를 利用하여 루우트 균열 發生 阻止 條件으로  $100^{\circ}\text{C}$ 까지의 限界 冷却時間( $t_{100}$ )<sub>cr</sub>을 다음과 같이 提案하고 있다.

$$(t_{100})_{cr} = 10.5 \times 10^4 (P_{HM} - 0.276)^2$$

따라서 이러한 ( $t_{100}$ )<sub>cr</sub> 값을 초과하도록 豫熱 溫度를 調整해 주면 熔接균열은 防止된다.

### 3. 熔接部의 脆化

一般的으로 熔接部는 局部的으로 매우 짧은 時間동안 急熱, 急冷의 熱 사이클을 받게 되므로 매우 複雜한 變態組織, 結晶粒度 等 冶金學的 要因과 殘留應力과 같은 力學的 要因이 중첩되어 있어 母材에 匹敵할만한 破壞靱性의 確保가 어려운 것으로 되어 있다.

그림 5는 國產 60 kg/mm<sup>2</sup>級 高張力鋼인 SM 58 Q 鋼 母材에 對해 手動熔接과 서브머지드 아아크 熔接을 實施한 경우 熔接部의 破壞靱性值

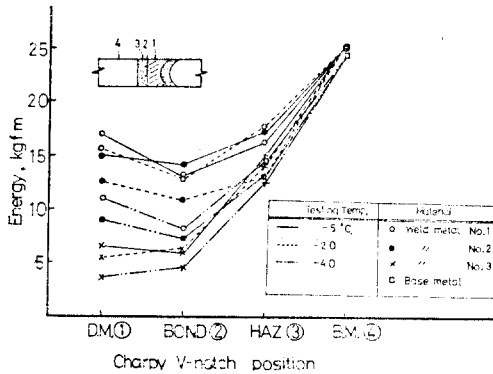


그림 5 手動熔接과 서브머지드 아아크 熔接部의 靱性 變化(國產 SM 58 Q 鋼).

를 나타낸 것이다. 이에 依하면 試驗溫度에 關係없이 본드部가 가장 낮은 靱性值를 보이며 熔着金屬, HAZ, 母材의 順으로 增加함을 보이고 있다.<sup>9)</sup>

이상과 같이 熔接部 中에서도 본드部는 脆化가 가장 심하므로 본드部의 破壞靱性은 곧 熔接部의 特性을 결정짓는다고 볼 수 있다. 一般的으로 熔接본드部는  $1,450^{\circ}\text{C}$  以上으로 加熱된 溶融 凝固된 母材의 一部와 固體상태의 母材가 混在한 부분으로 매우 粗大한 結晶粒의 組織이 發達한 곳이다. 이러한 熔接 본드 근방의 破壞靱性은 母材原質部와 熔着金屬의 경우나 마찬가지로 본드 근방의 結晶粒度 그리고 微視組織 및 炭化物, 窒化物 等의 析出物에 依해 크게 支配된다.

熔接본드 부근의 組織은 熔接熱 사이클 中의  $800^{\circ}\text{C}$ 에서 부터  $500^{\circ}\text{C}$ 까지의 冷却時間이 길어짐에 따라, 또한 같은 冷却時間의 경우는 合金 元素量이 작아짐에 따라 다음과 같이 變化한다.

마르텐사이트 → 微細한 베이나이트 → 粗大한 베이나이트 → 페라이트 · 퍼얼라이트

良好한 破壞靱性은 低炭素의 마르텐사이트와 微細한 베이나이트의 混合組織일 때 얻어지며, 粗大한 베이나이트 組織이 形成되면 靱性은 低下한다. 이와 같은 適正한 靱性의 組織을 얻기 爲해서 小 試驗片에 熔接본드部의 熱 사이클을 再現하여 얻어진 熔接用 連續 冷却 變態線圖(熔接用

SH-CCT 圖 : synthetic heat-affected zone-CCT diagram for welding)를 利用하면 편리하다.

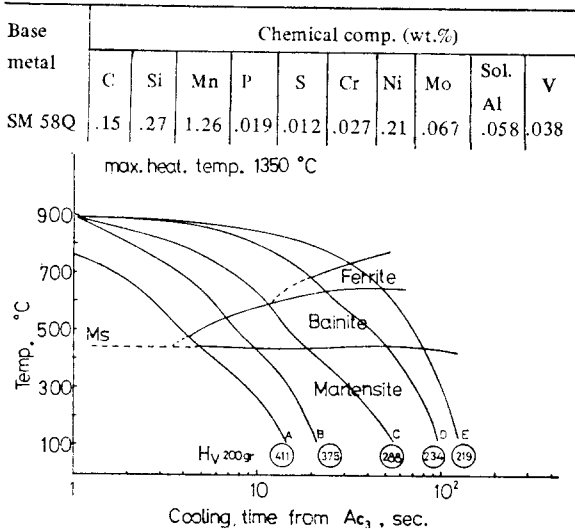


그림 6 國產 60 kg/mm<sup>2</sup> 級(SM58Q)鋼의 SH-CCT 曲線.

그림 6은 國產 SM 58 Q의 SH-CCT 線圖를 表示한 것으로<sup>9)</sup> 800°~500°C까지의 冷却速度가 100°C/sec인 冷却曲線 A는 거의 大部分 마르텐사이트로 變態하지만, 冷却速度가 점차 느려지는 冷却曲線 B(50°C/sec)는 마르텐사이트, 베이나이트의 混合組織이 存在하며 熔接入熱量 2 kJ/mm에 相當하는 曲線 C(30°C/sec)에서는 베이나이트 組織이 大部分을 차지하고 있다. 또한 冷却速度가 더욱 느려지면 (曲線 D,E)初析 페라이트 域이 存在하게 된다. 硬度는 마르텐사이트 變態域으로부터 冷却時間의 增加에 따라 저하하여 페라이트가 析出하게 되는 時期에는 약 Hv 250 程度로 됨을 보이고 있다.

以上과 같은 高張力鋼材의 成分에 따른 各各의 SH-CCT 線圖를 利用하면 熔接時의 施工條件을 調整함으로써 적정한 韌性의 組織을 얻을 수 있다.

熔接入熱量의 制御는 熔接本드部의 脆化를 防止하는 데 매우 重要한 要素이다. 서브머지드 아아크 熔接이나 일렉트로슬랙 熔接과 같은 大入熱 熔接時는 熔接本드部에 粗大한 베이나이트 組織이 形成되기 쉬워 현저한 韌性의 低下를 가

져오기 쉽다. 合金 元素量이 작은 HT50, HT60과 같은 高張力鋼의 경우는 大入熱熔接時 粗大한 베이나이트 組織에 페라이트組織이 混在한 狀態로 나타나서 韌性 低下가 어느 程度 輕減되나, 合金元素量이 많은 HT 80 級 高張力鋼材의 경우는 韌性 低下가 현저하므로<sup>10)</sup> 일렉트로슬랙 熔接이나 일렉트로가스 熔接과 같은 大入熱 熔接은 피하는 것이 좋다. 그러나 最近에는 Ni을 多量 첨가한 大入熱 熔接用 高張力 鋼材도 開發되고 있다.

多層熔接의 경우는 上層비드의 二次熱 사이클에 依해 熔接本드部의 結晶粒이나 組織의 微細化를 가져와서 單層熔接에 比하여 良好한 韌性值를 나타낸다.

이밖에 酸素, 窒素, 인, 유황 등의 不純元素나 介在物의 低減도 破壞韌性의 改善效果가 크므로 이들에 對한 對策도 세워져야 한다.

#### 4. 熔接後熱處理 脆化(SR 脆化)

熔接構造物의 應力 除去 풀림(SR:stress relief annealing)은 熔接 殘留應力의 除去, HAZ(熔接熱影響部)의 軟化, 韌性回復, 水素放出의 촉진 등을 목적으로 보통의 炭素鋼에서는 600~650°C로 再加熱한 후 爐冷시키는 熱處理이다. 軟鋼이나 50 kg/mm<sup>2</sup> 級 鋼의 경우, 炭素量이 많으면 熔接한 상태에서는 HAZ 部의 硬化가 크고 韌性이 떨어지나 SR에 依해 뜨임 效果를 받아 韌性이 크게 向上된다. 한편 低炭素低合金의 高張力鋼에 있어서는 熔接한 그 상태에서는 어느 정도 韌性을 가지나 SR에 依한 熔接熱로 固溶한 元素의 析出 硬化가 일어나서, SR 處理를 行할 경우, 오히려 韌性이 低下하는 現象이 나타나서 이것이 殘留應力과 중첩되면 균열로까지 發展되는 경우도 많다. 이러한 現象을 SR 脆化 또는 균열로까지 발전된 경우는 SR 균열 (또는 再熱 균열)이라고 한다.

SR 脆化 現象의 要因으로서 (1) 炭化物의 粒界凝集, 粗大化 또는 球狀化 등에 依한 析出 (2) Mo<sub>2</sub>C, TiC, NbC, NbN, TiN 等 炭化物,

窒化物의 析出에 의한 硬化 (3) 300~550°C 근방의 온도域에서 가열 후 徐冷한 경우의 뜨임 脆性 (4) C,N 等の 過時効 脆性等을 들 수 있다.

또한 再熱균열 現象은 以上の 要因에 熱處理後 冷却時 熔接部の 應力集中 現象(비이드 잉여 높이 또는 外的 拘束 狀態에 依한)이 중첩될 때에 發生한다.

調質 高張力鋼에서는 高强度를 얻기 爲해 Mo, V, Ti, Nb 等 炭化物의 二次硬化 析出을 利用하고 있으나, 이러한 合金元素가 많을수록 脆化 現象은 현저하게 되므로, 이러한 二次硬化 析出 元素의 첨가를 必要最少限으로 억제할 必要가 있다.

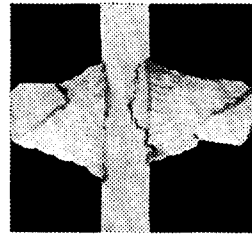
뜨임 脆性은 熱處理後 徐冷 과정에서 結晶 粒界에 불순元素의 편석에 依해 일어나는 것으로 알려져 있으며, 이와 같은 불순元素로서는 極微量의 P, Sb, As, Sn 等を 들 수 있다. 이러한 粒界 편석을 助長하는 元素로서는 Si, Mn, Ni, Cr 等이며 Mo가 0.5% 以下에서는 粒界편석을 억제하는 作用을 하는 것으로 알려져 있다. 또한 이 뜨임 脆性은 組織이나 結晶粒度의 依存性이 크고, 마르텐사이트>微細한 베이나이트>粗大한 베이나이트>페라이트·퍼얼라이트의 順으로 脆化 感受性이 變化하며, 結晶粒度가 클수록 脆化 감수성은 커진다.

以上과 같은 考察에서, 熔接後熱處理에 依한 脆化防止에는 鋼板의 成分 調整 以外에 決定的인 方法이 發見되지 않음을 알 수 있으나 最近 國內에서 프리스트레인(Pre-strain) 狀態下에서 熔接後熱處理를 實施하여 靱性이 向上되고 있음이 보고되어 앞으로 이 方面의 研究가 注目된다.<sup>11)</sup> 또한 最近에 이르러서는 熔接 構造物의 使用目的 및 使用條件에 따라서는 熔接後熱處理를 省略하여도 좋은 高張力 鋼材의 開發이 進行되어 SR 脆化에 依한 문제점을 일으키지 않도록 하는 경우도 많다.

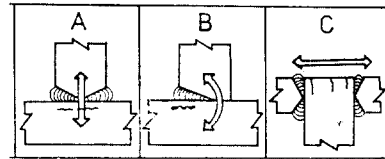
### 5. 라멜라테어(Lamellar Tear)

50 kg/mm<sup>2</sup> 級 以上の 高張力 鋼材를 利用하

여 海洋構造物 等 大形의 複雜한 熔接 構造物을 組立할 경우, HAZ 또는 그 근방에 라멜라테어라고 하는 壓延方向과 平行한 層狀의 균열이 發生하는 경우가 많다. 그림 7에 라멜라테어의 形狀과 라멜라테어가 잘 發生되는 이음매의 形狀을 나타낸다. 이러한 라멜라테어의 發生 機構는 熔接균열과는 또 달리 鋼材의 製造 過程中 壓延에 依해 길게 늘려진 非金屬 介在物과 熔接時 發生된 板 두께 方向의 引張拘束應力이 중첩되어 發生하는 것으로 밝혀지고 있다. 그림 8은 라멜라테어의 發生과 傳播 過程을 나타낸 것으



Shape of Lamellar Tear.



Type of Tearing

그림 7. 라멜라테어의 形狀과 잘발생되는 이음형식

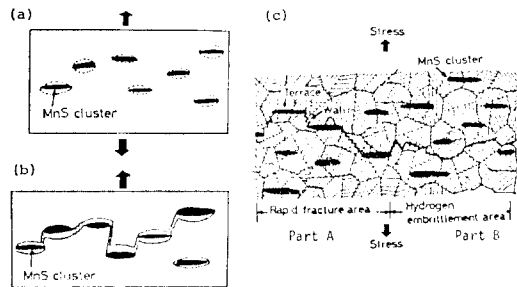


그림 8 라멜라테어의 傳播機構.

로 外部의 引張拘束應力을 받아 同時에 여러 곳에서 介在物과 母材와의 사이에 開口가 일어나고 이들이 相互 連結되어 巨視的인 라멜라테어로 發展되고 있음을 보이고 있다. 以上과 같은 라멜라테어의 發生 機構로 부터 라멜라테어에 관한 對策은 鋼材의 材質的인 면과 熔接 施工

條件의 면에서 세워져야 함을 알 수 있다.

### 5.1. 高張力 鋼材의 材質

라멜라테어의 要因으로 作用하는 非金屬 介在物로서는 MnS系가 가장 큰 要因으로 밝혀졌다. 그 밖에 SiO<sub>2</sub>系나 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系도 要因으로 들 수 있으나 MnS系가 主體인 경우가 대부분이다. MnS系 介在物은 壓延에 依해 편평하게 늘려지기 쉽고 SiO<sub>2</sub>系 等に 比해 超音波를 투과하기 쉽기 때문에 상당히 큰 介在物이라도 超音波探傷으로 檢出하기 어렵다. 따라서 從來의 超音波探傷 試驗만으로는 라멜라테어가 發生되지 않도록 보장하기 어렵다.

以上과 같이 鋼材의 耐라멜라테어性을 非破壞 試驗法으로 確認하기 어렵기 때문에 IIW에서는 平面 方向(Z方向)引張延性試驗의 實施를 提案하고 있다.

鋼材의 S含量은 라멜라테어와의 相關性이 높고 그 化學成分으로부터 直接 評價할 수 있으므로 하나의 指標로서 매우 有用하나 이 경우는 酸化物系 介在物이 고려되지 못한다는 難點이 있다.

두께方向 引張 延性 試驗은 當初 各國에서 여러가지의 方法이 提案되었으나 IIW에서 統一의 試驗法을 檢討한 結果, 現在로서는 Z方向 引張試驗에 依한 斷面收縮率이 採用되고 있다. 그러나 Z方向 引張試驗片의 採取方法 및 그 치수가 斷面收縮率에 影響을 끼치므로 이의 設定이 문제가 된다. 日本에서는 試驗片 直徑은 10~15mm로 함이 바람직하고 特히 板 두께가 60mm 以下인 경우는 10mm로 함이 바람직하다고 되어 있다. 試驗片 直徑을 10mm로 할 경우 板 두께는 아아크 熔接의 경우 25mm 以上, 마찰 熔接의 경우 15mm(但 압접부 直徑 16mm φ) 以上이면 適當한 結果가 얻어진다. 試驗片 採取요령의 例를 그림 9에 보인다<sup>12)</sup>.

以上과 같이 鋼材 評價의 指標로서는 S含量과 Z方向 斷面 收縮率의 두 가지를 同時에 考慮함이 좋으며 보통의 非調質 高張力鋼의 경우 50°C 예열의 被覆 아아크 熔接施工을 行한다던

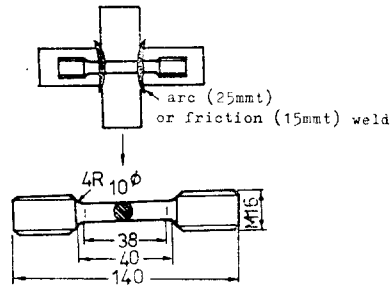
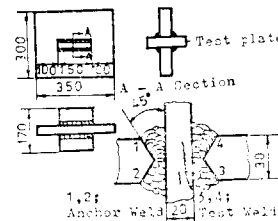
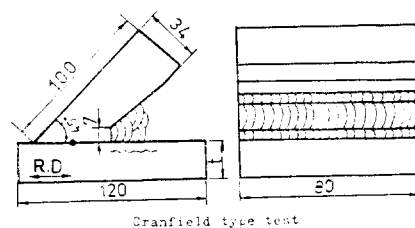


그림 9 두께方向 延性 試驗片採取 方法.

라멜라테어를 방지하기 爲해서는 S含量 0.01% 以下 Z方向 斷面 收縮率 15~20%가 하나의 指標로서 생각되고 있다.<sup>13)</sup>

### 4.2. 實構造의 라멜라테어防止 條件 設定用 試驗

實 構造物에서 發生할 수 있는 拘束條件을 再現하여 주어진 鋼材의 耐라멜라테어性을 評價하는 試驗法으로 Z-型 윈도우 試驗과 크렌필드형(cranfield type) 試驗法이 있다. 이 試驗요령을 그림 10에 보인다<sup>14)</sup>. 實 構造物에 있어서의 主 拘束狀態가 引張拘束인가 굽힘拘束인가를 구분하여 適當한 再現 시험법을 통하여 적절한 鋼材를 선택, 사용할 必要가 있다.



Z-type window test.

그림 10 라멜라테어의 再現 구속시험법.



以上과 같은 各種 試驗法을 통한 鋼材를 利用하여 熔接施工時는 壓延板材의 두께 방향으로 큰 拘束이나 負荷가 걸리지 않도록 구조물을 될수록 간단화하고 隅 이음부의 거리를 넓게 함이 必要하다. 熔接이음부의 形式으로는 T形 片側 필렛 이음부, 코너이음, 貫通이음매를 卽하여 가능한 限 鋼材의 압연面 끼리의 맞대음 이음부로 함이 좋다. 같은 이음부 形式이라도 그루우브 形狀, 積層法等에 依해 拘束의 種類, 程度, 극부적인 용접스트레인 및 殘留應力 분포가 變化하므로 주의할 必要가 있다. 熔接 施工時는 低水素 熔接法 및 熔接材料를 선택하여 적절한 예열 및 後熱 處理를 실시함이 좋다.

### 5. 結 言

以上에서 高張力 鋼材 熔接時の 問題點으로 熔接균열, 熔接部の 脆化, 라멜라테이에 關해 그 發生機構와 對策을 記述했다. 高張力鋼材 熔接 構造物의 信賴性과 安全性을 確保하기 爲해서는 設計, 施工 단계에서 以上の 問題點에 關한 종합적인 評價와 配慮가 이뤄져야 한다.

高張力 鋼材는 그 強度를 높이기 爲해 各種 合金元素를 첨가하거나 調質 熱處理를 行하고 있기 때문에 熔接上에 어려움이 따르고 있다. 따라서 보다 使用性能이 우수한 構造物을 얻기 爲해서는 強度가 높으면서도 熔接性이 우수한 高張力 鋼材의 開發이 先行되어야 한다.

우리나라에서도 現在 60kg/mm<sup>2</sup> 級 高張力 鋼材가 生産되고 있거니와 앞으로 더욱 高强度의 大入熱 熔接用 鋼材의 開發에 많은 努力을 기울여야 할 것이다.

### 參 考 文 獻

- 1) 金永植：熔接균열의 發生機構와 그 防止對策, 大韓機械學會誌. Vol. 20, No. 4, (1980) p.276
- 2) 溶接學會：溶接便覽, (改訂3版)丸善, (1977) p.917
- 3) 稻垣, 伊藤：高張力鋼 低溫用 鋼의 溶接, 産報出版 (1978)p.116
- 4) 辛致教, 金永植, 李載廷：鋼 溶接部의 균열 發生과 그 防止에 關한 研究, 韓國舶用機關學會誌 Vol. 5, No.2 (1981) p.36
- 5) JSSC(日本 鋼構造協會)溶接割れ研究班, 鋼構造物における 溶接割れ 防止のための 豫熱條件の 選定について, JSSC, Vol.8, No.80(1972) p.22
- 6) 金永植：最近 溶接 技術의 發展과 그 問題點, 경북대학교산업개발연구소, 第6回 産學協同 Seminar 資料, (1981) p.85
- 7) 百合岡, 矢竹等：鋼材의 熔接おくれ割れの研究(第一報), 熔接學會誌, Vol.48, No.12 (1979)p.1028
- 8) 佐藤, 寺崎：ルート部の 應力集中率に およぼす 開先形狀, 板厚, ルート角度의 影響, 熔接學會誌 Vol.48, No.5 (1979) p.298
- 9) 金永植, 李鍾鳳；60 kg/mm<sup>2</sup> 級 調質 高張力鋼의 熔接性 研究, 大韓金屬學會誌 Vol.20, No.2(1982) p.106
- 10) 坪井, 平井, 調質鋼熱影響部の 組織と靱性, 熔接學會誌, Vol.50, No.1(1981), p.28
- 11) 林載奎, 鄭世喜；Pre-strain 狀態에서의 熔接後熱 處理가 構造用鋼 熔接熱影響部の 破壞靱性에 미치는 影響, 大韓機械學會 1982年度 春季學術大會 抄錄集, p.53
- 12) 日本熔接協會 鐵鋼部會；熔接用鋼選擇のための 耐ラメラテア性評價に關する研究 1977年度熔接學會 春季 Symposium 資料 p.52
- 13) 金擇, 山戶, 外；鋼板의 耐ラメラテア性について 1977年度 熔接學會春季 Symposium 資料 p.58
- 14) 稻垣；鋼構造의 라メラテア에 關する 現狀と課題, 熔接學會誌 Vol.47, No.1 (1978) p.6