

熔接크랙의 發生機構와 그 防止對策

金 永 植

〈韓國海洋大學, 助教授 工博〉

1. 序 言

熔接技術은 接合工作法으로서 가장 一般化되어 있는 方法으로, 오늘날 모든 工業分野의 生産技術로서 매우 重要한 役割을 하고 있는 것은 周知의 事實이다. 이러한 熔接技術은 이미 괘할 關한 發展을 이룩했으나, 새로운 材料의 개발이나 새로운 構造物의 出現에 相應하여 새로이 解決되어야 할 問題들이 끊임없이 提起되므로, 앞으로도 계속 研究發展되어 나가야 할 것이다.

熔接技術에 있어서 가장 어려운 問題點의 하나는 熔接缺陷이다.

一般的으로 熔接部 및 그 近傍의 金屬은 局部的으로 매우 높은 溫度에 까지 急熱된 後, 다시 急冷되므로, 材質의 變化, 熔接스트레인 및 殘留應力을 誘發하며 同時에 여러가지 熔接缺陷을 가져 온다. 이러한 熔接缺陷은 그 構造物의 安全性 確保를 爲해 적극 되하지 않으면 안되므로 構造物 製作時는 材料의 선택이나 設計, 施工, 檢査의 各 段階에서 充分한 檢討가 必要하다.

熔接缺陷은 그 形態가 매우 多樣하나 그 中에서도 特히 熔接크랙(weld cracking, crack)은 構造物의 脆性 및 疲勞破壞의 起點이 되므로 이 防止對策은 무엇보다 우선되어야 한다. 熔接크랙은 其 發生機構가 매우 複雜하여, 이에 關한 研究가 多數 行해진 結果, 오늘날은 其 防止對策이 거의 確立되었다고 볼 수 있다.

本稿에서는 熔接缺陷中에서도 熔接균열에 對하여 其 發生機構 및 防止對策에 關한 지금까지의 研究結果를 整理하여 참고가 되도록 하고자 한다.

2. 熔接크랙의 種類

熔接크랙(weld cracking, crack)은 熔接工作中 또는 熔接 완료후 一定時間에 걸쳐 熔接部에 發生하는 여러가지 크랙의 總稱으로 構造物의 使用性能을 해치는 가장 위험한 缺陷의 하나이다.

1977年 現在, 國際적으로 非破壞檢査에서 有害하다고 檢知된 크랙은 重要한 이음매에서는 許容되지 않고 있다.

우선 熔接部에 發生하는 크랙은 다음과 같이 여러가지로 分類할 수 있다.


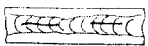
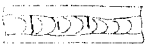




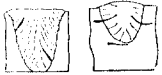
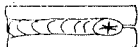

(1) 發生場所에 따라 熔着金屬 크랙과 母材크랙,

(2) 發生溫度에 依해 高溫크랙(hot cracking, 熔接時 熔融凝固에 同伴하여 일어나는 크랙)과 低溫크랙 또는 冷間크랙(cold cracking, 熔接後의 Ms 點 또는 約 300°C 以下에서 일어나는 크랙)

(3) 비이드(bead)에 對한 方向에 따라 가로크랙과 세로크랙,

(4) 發生形態에 따라 루우트크랙(root cracking), 토우크랙(toe cracking), 힐크랙(heel cracking), 비이드밀크랙, 및 라메라티어(la m-

表 1. 용접크랙의 種類와 그 原因

發生溫度	크랙 發生場所	크랙의 形狀例	原 因	一 般 的 對 策
低	부우트크랙 (가로크랙) HAZ WM		① 擴散性水素 ② 鋼材의 硬化性 ③ 拘束度 ④ 應力集中	○豫熱, 後熱施工 ○低水素용접봉의 사용 및 용접봉의 乾燥
	가로크랙 HAZ WM		① 擴散性水素 ② 鋼材의 硬化性 ③ 熔接線에 直角方向의 拘束力	上 同
溫	세로크랙 HAZ WM		① 擴散性水素 ② 鋼材의 硬化性 ③ 拘束度	上 同
	필크랙 HAZ		① 擴散性水素 ② 鋼材의 硬化性	上 同
고	부우트크랙 HAZ		① 擴散性水素 ② 鋼材의 硬化性 ③ 언더컷, 形狀의 不連續에 依한 應力集中	○豫熱, 後熱施工 ○低水素系熔接棒의 사용과 이의 乾燥 ○토우部의 整形
	필크랙 HAZ		① 擴散性水素 ② 鋼材의 硬化性 ③ 熔接금속의 收縮에 依한 角變形	○豫熱, 後熱施工 ○低水素系熔接棒의 사용과 이의 건조 ○熔接비이드길이를 길게 한다. 假熔接에 依해 角變形을 阻止한다.
高	라케크랙 (層狀크랙) BM HAZ WM		① 板두께 방향의 延性低下 ② 板두께 方向으로 作用하는 收縮 應력 ③ 角變形에 依한 스트레인集中 ④ 擴散性水素 ⑤ 鋼材의 硬化性	○鋼中介在物量低減 ○이음매設計의 配慮 ○熔接方法의 선택 ○豫熱, 後熱施工 ○低水素熔接棒의 사용과 이의 乾燥
	粒界크 로크랙 HAZ WM		① 熔接熱에 依해 鋼中의 S,P 等 不純物의 結晶粒界에의 析出 ② 1,000°C 부근에서의 拘束度	○鋼材中의 不純成分의 減少
溫	크레이터 WH		① 크레이터 中心部로 的 不純物의 析出 ② 收縮에 依한 空孔	○크레이터 處理.
	비이드 크랙 WM		① 低融點不純物의 偏析	○熔接條件의 選擇에 依한 비이드斷面形狀調整

mellar tear), 크레이터크랙(crater crack).

이들 용접크랙의 代表的인 것을 그 스킵치 및 原因과 一般의 對策에 對하여 간단히 整理한 것을 表 1에 보인다.

以下에서 以上の 여러가지 용접크랙의 發生機 構와 그 防止對策에 關해 구체적으로 記述한다.

3. 低溫크랙(Cold Cracking)의 發生機 構와 그 防止對策

용접低溫크랙은 主로 水素에 依한 遲滯크랙 (delayed cracking)이다. 이것은 一般의으로 용接後 數分에서 數日後에 이르는 사이에 發生하며 結晶粒內 및 粒界의 어느 쪽이나 전과 한다. 이의 基本的인 原因은 다음과 같은 것으 로 생각되고 있다.

- (1) 용接後의 硬化組織
- (2) 용接部의 擴散性 水素量
- (3) 拘束條件

용接低溫크랙은 以上과 같은 原因의 相關關係에 依해 용接部에 生기는 應力 또는 스트레인이 크랙發生에 對한 材料의 抵抗力(크랙發生 限界應力 또는 스트레인)보다 클 때에 發生한다고 볼수 있다.

또한 上記의 原因은 용接材料의 化學成分, 용接條件等의 支配를 받는다. 그러므로 용接低溫 균열을 防止하기 爲해서는 上記 여러가지 原因에 依한 크랙發生의 限界 條件을 定量的으로 求하여 다시 이들 原因을 支配하는 용接金屬의 化學成分, 용接條件의 개선等을 行할 必要가 있다. 이에 關한 研究는 從來부터 多數 報告되고 있다.

3.1. P_w 값의 概念 및 P_w 값에 依한低溫균열의 防止.

용접크랙을 防止하기 爲한 手段으로 용접크랙에 影響을 미치는 上述한 여러가지 因子를 하나의 함수로서 나타낼 수 있다면 이러한 함수를 利用하면 크랙 發生의 限界條件을 定量的으로 求할 수 있다.

이러한 함수로서 다음과 같이 計算되는 용接 크랙 感受性 指數 P_w 값이 提案되어 있다.^{2),3)}

$$P_w = P_{CM} + \frac{H}{60} + \frac{K}{40 \times 10^3} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 P_{CM} , 鋼板의 용接크랙 感受性 組成(%)

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

H ; 擴散性 水素量(ml/100g)

K ; 이음매의 拘束度($Kgf/mm^2 \cdot mm$)

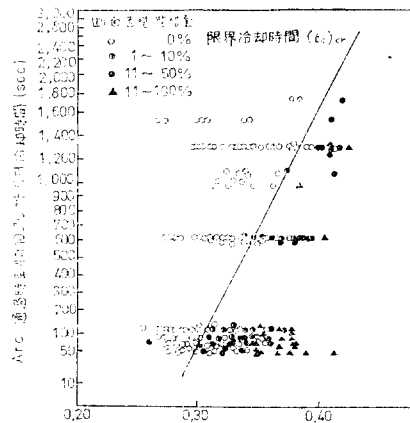


그림 1. P_w 값과 限界冷却時間(t_c)_{cr}과의 關係

(1) 式에 보인 바와 같이 P_w 값은 크랙 發生의 主要因인 ① 鋼材의 化學成分, ② 水素 ③ 拘束條件을 定量的으로 評價한 것이다.

용접크랙 發生의 限界條件은 一定한 條件에 依해 주어지는 上記 P_w 값과 용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.

그림1은 이러한 P_w 값과 용接後의 冷却速度와의 關係로부터 크랙 發生 限界冷却時間(t_c)_{cr}을 實驗的으로 求한 것이다.²⁾ 즉 크랙 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 용接低溫크랙을 防止할 수 있다.

그림 1에서 P_w 값과 크랙 發生 限界冷却時間(t_c)_{cr}과의 關係는 近似的으로 다음과 같이 나타 난다.

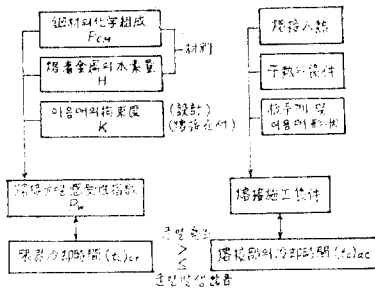


그림 2. 크랙防止對策을 생각하는 順序

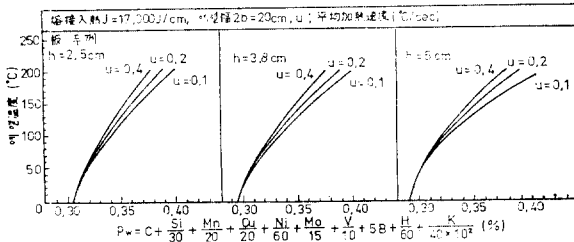


그림 3. Pw 값과 크랙防止를 위한 局部 预热溫度와의 關係(熔接線上에서 測溫)

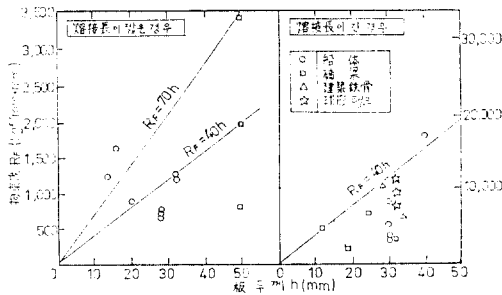


그림 4. 實際構造物에서의 熔接이음매 拘束度

$$(t_c)_{cr} = A(P_w - 0.28)^n \text{ (sec)} \dots\dots (2)$$

여기서 A 는 $(13 \sim 15) \times 10^4$, $n=2$

P_w 값에 입각한 熔接균열 防止의 基本的인 方式을 Flow chart로 整理하면 그림2와 같이 나타낼 수 있다. 4) 即 P_w 값으로부터 求해지는 크랙 發生限界冷却時間 $[(t_c)_{cr}]$ 과 熔接 施工 條件으로부터 決定되는 實際의 熔接部 冷却時間 $[(t_c)_{ac}]$ 와의 差에 依해 크랙發生의 有無가 定해지며, $(t_c)_{cr} \geq (t_c)_{ac}$ 일 때에 크랙이 發生한다.

따라서 熔接이음매의 設計, 熔接條件等을 最適化함으로서 熔接部の 冷却時間을 調整하여 熔接크랙을 防止할 수 있다. 日本 鋼構造協會

(JSSC)의 熔接크랙 研究班에서는 上記 Flow chart에 입각하여 具體的인 熔接크랙 防止對策의 指針을 提示하고 있다. 4) 그 一例로 그림 3에 P_w 값과 所要 豫熱條件과의 關係를 보인다. 또한 P_w 값에 포함되는 拘束度 K 의 값은 보통 그림 4에 보이는 程度이다.

最近 百合岡等⁵⁾은 上述한 P_w 값 代身에 이와 유사한 概念의 拘束力 크랙 感受性 指數 P_{HM} 을 提案하여 軟鋼에서 부터 HT80 까지의 廣範圍한 鋼種에 걸쳐, 크랙 防止를 爲한 合理的인 豫熱溫度의 추정이 可能함을 보이고 있다.

3.2. RRC 試驗, TRC 試驗과 이들에 依한 熔接低溫크랙의 防止

熔接은 局部的으로 加熱 冷却되기 때문에 熔接部에 內部應力과 收縮變形을 가져온다. 또한 一般 構造物에서는 많은 작은간에 變形이 拘束되어 熔接이음매에는 拘束에 依한 應力(拘束應力)이 發生한다. 變形을 拘束하는 程度에 따라,

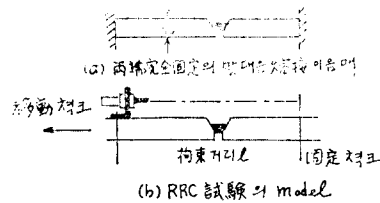


그림 5. RRC 試驗要領

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크랙이 發生하는 수가 있다. 따라서, 實際로 熔接크랙을 防止하기 爲해서는 實 構造物에서 發生할 수 있는 應力 또는 스트레인을 豫測하여 熔接크랙에 對한 抵抗力이 이보다 크도록, 材料의 선택이나 施工條件을 決定하지 않으면 안된다.

熔接이음매에 實際에 가까운 外的拘束을 부여하여 크랙 發生 限界拘束度, 또는 拘束力을 評價하는 手段으로 RRC 試驗(Rigid Restraint Cracking Test; 完全拘束크랙試驗)⁶⁾ 이나, TRC 試驗(Tensile Restraint Cracking Test, 引張拘束試驗)⁷⁾ 이 實施되고 있다. 이들의 試驗은 拘束度 또는 拘束應力을 媒體로 하여 熔接크

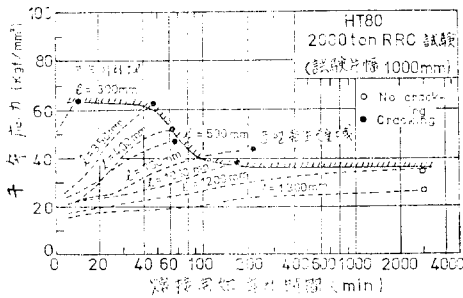


그림 6. RRC 試驗結果의 一例

력에 영향을 미치는 諸 要因을 定量的으로 評價하는 것이다.

RRC 試驗은 그림 5에 보이는 바와 같이 兩端을 任意의 距離에서 완전히 구속시킨 이음매(a)를 想定하여, 引張試驗機를 利用하여(b)에 보이는 바와 같이 그루브(groove)를 끼고 있는 任意의 距離(拘束거리 l) 間의 變位를 熔接中 및 熔接後에도 언제나 0이 되도록 引張한다. 이때 試驗片을 拘束하는 程度—拘束度 [熔接이음매의 그루브 間隔을 單位길이 變化시키는 데 必要한 單位 熔接길이 當의 힘, K (kg/mm·mm)]는 試驗片의 板 厚와 拘束거리를 變化 시킴으로써 變化시킬 수 있다.

RRC 試驗에 있어서 試驗片의 拘束度 K는 다음과 같이 주어진다.⁶⁾

$$K = Eh/l \text{ kg/mm} \cdot \text{mm} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 h : 試驗片의 厚

l : RRC 試驗에 있어서의 拘束거리

E : young 率

그림 6은 RRC 試驗結果의 一例를보인 것이다.⁸⁾ 縱軸은 拘束力을 熔接금속의 母材에

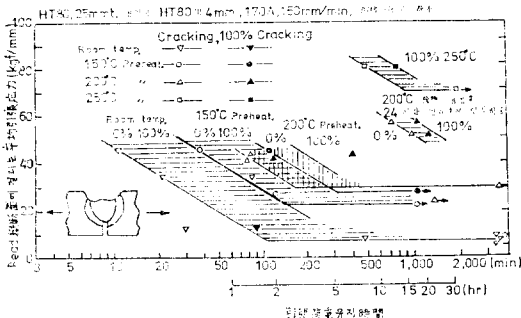


그림 7. HT80 鋼의 TRC 試驗結果

(throat depth)로 나누어서 求한 平均拘束應力이며, 橫軸은 熔接開始 後의 時間이다, 拘束거리 l이 크게 됨에 따라 拘束應力은 작아지고 一定值 以上이 되면 크랙은 發生치 않게 된다. 즉 RRC 試驗에 依하면 주어진 材料 및 熔接條件에 對해서 熔接크랙이 發生할 것인가 또는 發生치 않을 것인가의 限界拘束度 K_{cr} 및 限界拘束應力 $(\sigma_w)_{cr}$ 을 求할 수 있다.

한편 TRC 試驗은 RRC 試驗과 비슷하나 보다 간략한 試驗方法으로 맞대음 熔接한 熔接試驗片에 熔接直後에 拘束力으로 一定 引張荷重을 작용시켜 크랙發生 有無를 調査하는 方法이다. 荷重은 熔接金屬의 平均應力이 降伏應力 以下의 任意의 一定應力이 되도록 調整한다. 그 結果를 그림 7에 보인다. 이 그림으로부터 一定限界(拘束) 應力 以下에서는 크랙이 發生치 않는 것을 알 수 있다.

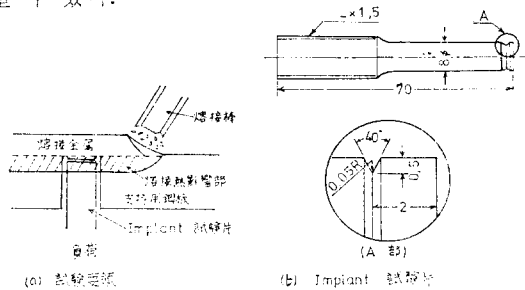


그림 8. Implant 試驗要領 및 그試驗片

3.3. Implant 試驗과 이 試驗에 依한 熔接 크랙의 防止

Implant 試驗은 그림 8에 보이는 바와 같이 6 ~ 10mmφ의 試驗片(이것을 Implant라고 함)을 適當한 厚의 板(母板, Backing plate 또는 Supporting plate라고 함)에 鑿린 구멍에 삽입하여 試驗片의 끝과 母板의 面을 一致시켜 놓고 熔接비이드를 試驗片 上端部에 設置함으로서(그림 8(a) Implant에 母材와 똑 같은 熱싸이클을 부여할 수 있다. 原來는 熔接에 依해 생기는 熱싸이클을 測定하는 手段으로 Granjon^{9,10)}에 依해 開發되어 鋼의 硬化性이나 組織變化等의 研究에 使用되었으나 더욱 改良되어 負荷裝置, 熱電帶, 記錄計等의 機械的, 電氣的 機能을

附加함으로써 CCT 圖의 작성, 熔接低溫크랙 發生의 研究, 再熱사이클크랙(S.R 크랙)의 研究, 熔接결함으로서의 크랙이 이음매의 機械的 性質에 미치는 影響等의 많은 研究 分野에 利用되게 되었다. ^{11,12,13)}

Implant 試驗에 依한 低溫크랙의 調査는 支持用 鋼板에 삽입한, 円周-notch를 設置한 試驗片(그림 8의 A部, 熔接이음매에 存在하는 루우트부 또는 토우部를 考慮하여 円周-notch를 設置한다)의 頂部에 熔接비이드(bead)를 設置하여, 熔接直後 靜的 引張荷重을 加하는 方法이다. 이 方法에 依하면, 小形의 試驗片으로 간편하게 限界拘束應力(σ_{cr})을 求할 수 있으므로 國際적으로 널리 利用되고 있다.

日本 熔接協會에서는 Implant 試驗法에 依한 低溫크랙 評價法을 檢討하여 多數의 共同 研究 結果로부터 熔接크랙 發生 限界應力(σ_{cr})_{imp} 값을 統計적으로 다음 式으로 나타내고 있다.¹²⁾

$$(\sigma_{cr})_{imp} = 86.3 - 211P_{CM} - 28.2 \log([H] + 1) + 27.3 \Delta t_{800 \sim 500} + 9.7 \times 10^{-3} \Delta t_{100} \dots \dots \dots (4)$$

여기서, (σ_{cr})_{imp}: Implant 試驗에 依한 크랙 發生 限界應力 (kgf/mm²)

P_{CM} : 熔接크랙 感受性 指數(%)

$$\left(C + \frac{S_i}{30} + \frac{M_N}{20} + \frac{C_u}{20} + \frac{N_i}{60} + \frac{C_r}{20} + \frac{M_o}{15} + \frac{V}{10} + 5B \right)$$

[H]: 熔接金屬의 擴散性 水素量(ml/100g)

$\Delta t_{800 \sim 500}$: 800~500°C의 冷却時間(sec)

Δt_{100} : arc 通過後 100°C까지의 冷却時間(sec)

以上과 같은 實驗式은 實際의 實驗値와 比較하여 그 信賴性이 確認되었다¹³⁾ 또한 Implant 試驗에 依해 구해진 크랙發生 限界 應力은 傾斜 y 形그루브의 RRC 및 TRC 試驗에서 求해진 크랙 發生 限界 應力値와 거의 等價인 것이 確認되었다.¹⁴⁾



그림 9. T 形多層熔接部의 라메라티어

4. 層狀크랙(Lamellar Tear)과 그 防止

Lamellar Tear는 熔接時 또는 使用中에 壓延 鋼板의 板 두께 方向(Z 方向)으로 커다란 引張 拘束力을 받아 板面에 平行한 非金屬 介在物에 傳播하여 일어나는 階段狀의 크랙이다(그림 9).

이러한 Lamellar Tear는 熔接構造物의 大形化 및 複雜化에 따라 크로즈 얼되고 있는데 特別히 海洋構造物等에서 잘 利用되고 있는 大形이며 拘束이 큰 T 熔接이음매나 코너 熔接이음매에서 發生하기 쉽다.^{15,16)}

Lamellar Tear는 一般的으로 널리 實用되고 있는 軟鋼이나 HT50 鋼 外에 各種 高張力鋼, 低溫用鋼 等の 壓延鋼材에서 일어나며 그 原因이나 現象도 매우 複雜하다.

Lamellar Tear는 그 再現試驗法으로 그 要因 및 發生機構가 여러가지로 檢討된 結果 大別하여 다음과 같은 2개의 型이 있는 것으로 알려져 있다.¹⁷⁾

① 熔接直後에 일어나는 收縮스트레인에 依해 非金屬 介在物과 母相과의 decohesion crack 이 發生하여 그 後 水素 및 拘束力의 影響을 받아 균열이 전파하여 이것이 相互 連結되어 macro crack으로 되는 Lamellar Tear.

② 루우트(root)部 또는 토우(toe)部에서 發生한 熔接 低溫 크랙이 非金屬 介在物을 따라 傳播하는 Lamellar Tear.

또한 Lamellar Tear의 發生要因으로서는 다음과 같이 分析된다.¹⁸⁾

① 壓延에 依해 伸延된 非金屬 介在物; 過去에 經驗한 Lamellar tear의 거의 전부가 壓延에 依해 伸延되기 쉬운 MnS系介在物이 主된 原因이었다. 特別히 S 含有量이 0.01% 以上の 鋼材에서는 MnS가 主要因으로 作用하지만 그 以下の 鋼材에서는 Al₂O₃ 系나 SiO₂ 系 等の 介在物도 影響을 준다. 따라서 材質의 減少 및 調整이 Lamellar Tear의 防止에 重要하다.

② 熔接時의 收縮에 依해 發生하는 板두께 方

□ 解 說

向으로의 應力; 貫通 板이음매, T型 이음매, 코너 이음매 等の 熔接에 있어서는 板 두께 方向으로 높은 殘留應力이 發生하기 때문에 Lamellar Tear의 危險性이 높다.

上記 2個의 要因 外에도 스트레인 時効 및 水

素脆化도 Lamellar Tear의 發生 要因으로 作用한다.

以上과 같은 Lamellar Tear를 分類하여 그 要因을 整理하여 各各에 對應하는 防止對策을 整理하면 表 2와 같다.¹⁹⁾

表 2. Lamellar Tear의 分類와 그 原因 및 對策

分 類	原 因	對 策
① 루우트크랙 等の 低溫크랙을 起點으로하는 Lamellar Tear.	a. 루우트크랙의 原因(硬化組織, 水素量, 拘束) b. 壓延에 依해 늘려진 MnS 介在物 c. 水素脆化 d. 角變形에 依한 熔接스트레인 또는 notch에 依한 應力이나 스트레인 集中	1) 鋼材의 熔接크랙 感受性組成 2) 鋼材의 S 量 또는 介在物의 길이 3) 熔接金屬의 水素量의 低減 4) 角變形의 防止 또는 應力이나 스트레인 集中의 防止
② 介在物의 開口를 起點으로하여 熔接熱影響部를 따라서 傳播하는 Lamellar Tear	a. 壓延에 依해 늘려진 M _n S系 介在物 b. S ₂ O ₃ 系 혹은 Al ₂ O ₃ 系 介在物 c. 外的引張拘束 d. 水素脆化	1) 鋼材의 S, Si, Al, O의 低減 2) 鋼材에 希土類元素의 添加. 3) 鋼材의 壓延條件과 熱處理條件의 改善 4) 外的引張拘束의 緩和. 5) 熔接金屬의 延性向上과 水素量의 低減
③ 熔接熱影響部로부터 상당히 떨어진 板두께 中央부근에서 일어나는 Lamellar Tear	a. 壓延에 依해 늘려진 M _n S系 介在物 b. SiO ₂ 系 또는 Al ₂ O ₃ 系 介在物 c. 굽힘拘束에 依한熔接殘留應力 d. 스트레인時効	1) 耐 Lamellar Tear 鋼의 선택 2) 壓延鋼材端面的 機械加工 3) 굽힘拘束度의 低減 4) 이음매 形式, 구루브形狀의 改善

5. 高温크랙(Hot Cracking)의 發生機構와 그 防止

5.1. 크랙의 形態

高温크랙(Hot Cracking)은 凝固溫度 直下에서 發生하는 凝固크랙(Solidification Cracking)이 大部分으로 鋼의 경우는 300°C 以上の 高温에서 發生하는 크랙을 高温크랙이라고 한다. 이러한 高温크랙은 거의가 熔接金屬內에서 發生하는 크랙이며, 熱影響部에서 發生하는 경우도 더러 있다. 또한 高張力鋼이나 低溫用鋼의 경우에는 S, P 等の 不純物이 많지 않는 以上 高温크랙이 發生하는 경우는 드문 일이지만, 特히 오오스테나이트系 스테인리스 鋼 等에서는 큰 문제점으로 되어있다.²⁰⁾

高温크랙의 大部分은 表面에 露出되어 破面은 酸化되어 나타난다. 表面에 露出된 幅은 約 0.05

~0.6mm로 低溫크랙의 0.001~0.01mm에 比하면 수 십倍 程度 크다.

鋼에 있어서 凝固크랙의 代表例를 表 1에 圖示했다.

5.2. 發生機構

熔接金屬이나 熱影響部에서 發生하는 高温크랙의 發生機構에 對해서는 오래 前부터 많은 理論이 發表되어 왔으나^{21~25} 그 中에서도 Smi-

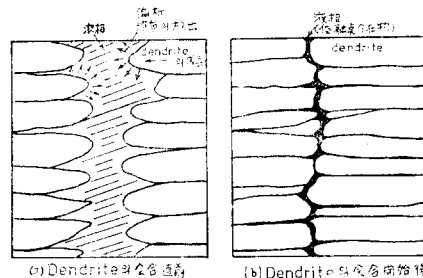


그림 10. 凝固의 最終단계

th²⁴⁾, Borland²⁵⁾의 說이 有力視되고 있다.

먼저 Smith 說을 要約하면 다음과 같다. 凝固時, 熔融液中에 그림 10과 같은 殘留液相에 S, P 와 같은 元素의 濃縮化가 일어나며, 液相의 融點이 低下한다. 이때의 液相과 固相의 分布는 液相組成, 固相組成 및 溫度에 依해 결정된다. 지금 S, P 等の 濃縮化가 일어나면 液相分布는 結晶粒, 全體를 둘러싸게 되어, 液相膜이 粒界에 生成되어 현저히 延性を 低下시키기 때문에 작은 收縮스트레인에도 크랙이 發生한다.

이와 같은 경우에는 液相膜의 生成을 防止할 必要가 있다. 熔接時 이러한 液相膜의 生成을 防止하기 爲해서는 母材의 種類에 따라 熔接棒 材料의 成分을 調整함으로써 可能하다.

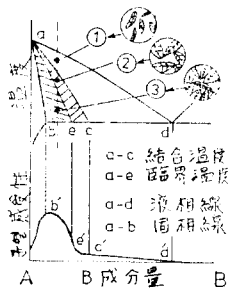


그림 11. 狀態圖上에서의 脆性溫度域

한편 Borland²⁵⁾에 依하면 크랙 感受性和 狀態圖와의 關係는 그림 11과 같다. 二元合金을 例로 들면 領域(1) acda에서는 凝固한 dendrite가 液中에 自由롭게 움직일 수 있다. 溫度가 降下하여 領域(2) aeac로 되면 dendrite의 結合이 始作되며, 이때 dendrite 相互間의 間隔에 液이 補給될 수 있는 狀態에서는 크랙이 發生치 않는다.

다음에 領域(3), abea에서는 dendrite가 相互 隣接하게 結合하여 그 사이에 間隔이 생기더라도 液의 補給이 불가능한 領域에서는 圖面의 下部에 보이는 바와 같이 크랙 感受性이 強한 脆化域으로 된다.

凝固크랙의 發生은 以上 說明한 金屬學의 原因외에 凝固中에 걸리는 力學的 因子가 크게 作用한다. 그림 12는 力學的 要因을 가미한 凝固 크랙의 發生機構를 說明한 것이다.²⁶⁾ 下圖는 液

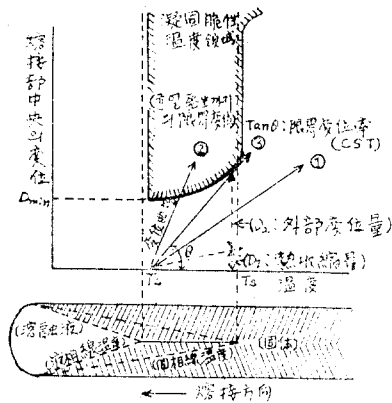


그림 12. 凝固균열의 發生機構

相線 溫度(T_L)과 固相線 溫度(T_S) 사이에 液相과 固相이 共存하는 形態이며, 이 溫度範圍가 그림 11에서 說明한 脆化域으로 外部로부터 引張應力을 받으면 작은 延伸率로 因해 쉽게 크랙이 發生한다. 上圖는 크랙 發生까지의 限界變位 量의 變化를 溫도와 變位와의 關係로 表示한 것이다.

線①②③은 熔接金屬이 받는 引張變位를 3階階의 線으로 나타낸 것이다. 이러한 變位는 熱收縮量 D_1 과 外的變位量 D_2 와의 合計로 나타난다. 이것은 拘束조건이나 熔接조건에 따라 달라진다. 크랙은 變位가 ②와 같이 凝固 脆性溫度 領域과 교차할 때에 생긴다. ③의 線은 限界값을 나타내며 이 때의 角度를 가지고 材料의 高溫크랙의 感受性을 評價한다.

$$\text{즉 } CST = \tan\theta$$

로 주어지는 CST (Critical Strain rate against Temperature drop)가 凝固크랙의 感受性(CST가 클수록 크랙 發生은 어렵다)을 나타내는 合理的인 指數이다.

5.3. 高溫크랙의 防止對策

그림 12에 依해 高溫크랙의 防止對策은 두 가지로 나뉘어 생각할 수 있다. 첫째는 凝固 脆性溫度 領域(B.T.R, Brittle Temperature Range)을 可能的 限 좁히는 手段과 둘째는 熱收縮 및 外部變位를 可能的 限 작게 하는 手段이다.

凝固 脆性溫度 領域은 熔接金屬의 化學組成

□ 解 說

및 加熱, 冷却速度 等に 依해 결정된다. 一般的으로 S, P, C, Ni 等の 감소가 바람직하고 Mn, Cr, Mo, V, Ti 等の 첨가가 바람직하다. 또한 熔接入熱量의 증가에 따라 脆性 溫度領域은 커지므로²⁶⁾ 熔接入熱은 될수록 작게 하며 과도한 豫熱을 피하는 것이 좋다.

다음으로 둘째 手段의 구체적인 方法으로는 電子빔 (Electron Beam) 熔接 等に 依해 비이드 幅을 감소시킴으로서 熱收縮 量의 減소를 가져올 수 있으며, 큰 스트레인이 熔接部에 걸리지 않도록, 스트레인 減소 對策을 강구할 必要가 있다.

구루브形狀도 高溫크랙에 影響을 끼친다. 비이드 깊이 (H)와 비이드의 幅 (w)의 比 $\frac{H}{w}$ 가 클수록 크랙이 發生하기 쉽고, 구루브 角度가 크면 크랙 發生이 어렵다.

以上과 같은 留意事項은 오오스테나이트系 스테인레스 鋼, 超耐熱合金, 高 Ni 合金 等の 熔接時 特히 有効하다.

6. 맺는 말

以上 熔接部에 生기는 熔接크랙에 있어서, 그 形態와 發生機構에 對하여 記述하고 實用的인 面에서 지금까지 確立된 防止對策에 對하여 說明했다. 熔接크랙에 關한 문제는 熔接 施工上 가장 중요한 問題點이므로 지금까지 매우 많은 研究結果가 보고되고 있으며, 現在에는 熔接크랙에 미치는 諸 成分의 影響이 밝혀져, 外國에서는 크랙 防止를 爲해 充分히 배려된 熔接材料들이 生産되고 있다.

그러나 熔接크랙의 發生機構나 그 試驗法의 確立, 또는 熔接크랙 中 有害크랙과 無害크랙의 區分等 앞으로도 더 研究되어야 할 點이 많다.

앞으로 이 分野의 研究가 우리나라에서도 보다 活潑히 進行되어, 보다 安全한 熔接構造物이 만들어 질 수 있으리라 確信한다.

參 考 文 獻

1. 松井, “溶接欠陥の發生機構と防止對策”, 日本學術會議溶接研究連絡委員會, 溶接シンポジウム資料 (1977)
2. 伊藤, 別所, “高張力鋼の溶接割れ感受性指數について,” 溶接學會誌, Vol. 37, 1No.9 (1968)
3. 伊藤, 別所, “高張力鋼の溶接割れ感受性指數について (第2報),” 溶接學會誌, Vol. 38, No. 10 (1969)
4. 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)
5. 百合岡, 矢竹, 外2人, “鋼材の溶接遅れ割れの研究 (第1報),” 溶接學會誌, Vol. 48, No. 12 (1979)
6. 渡邊, 佐藤, 松井, “溶接繼手のルト割れにおよぼす外的拘束の影響,” 溶接學會誌, Vol. 33, No. 6 (1964)
7. 鈴木, 稻垣, 中村, “引張拘束割れ試験 (TRC試験) による高張力鋼溶接部ルト割れにおよぼす拘束外力の影響について,” 溶接學會誌, Vol. 32, No. 1 (1963)
8. K. Satoh, S. Matsui, et al, “Weld Cracking Behaviour of 100kg/mm² High Strength Steel by Large Size Restraint Testing Machine”, Trans. of the JWS, Vol. 2, No. 2 (1971)
9. H. Granjon, “The Implant method for Studying the Weldability of High Strength Steels, Metal Construction,” Nov. 1969.
10. H. Granjon, et al, “Implant method at the Institute de Soudure”, Metal Construction Oct. 1973.
11. 松井, 大熊, “インプラント試験の原理と溶接割れへの應用,” 溶接學會誌, Vol. 44, No. 9 (1975)
12. S. Matsui, M. Inagaki, “Recent Trend of Research on Cold Cracking with the Implant Test in Japan,” IIW. IX-970-76,
13. 菊田, 荒木, 外, “インプラント試験におけるラメラアとその破面形態の解析,” 溶接學會誌, Vol. 46, No. 1 (1977)
14. K. Satoh, S. Matsui, et al, “Correlation of the Implant Test with the RRC and the TRC

- Tests," IIW, IX-884-74.
15. 伊藤, 池田, 外 "라メラ테아의 發生要因とその感受性評價について," 溶接學會誌, Vol. 46, No. 1 (1977).
 16. 田中, 北田, 外, "繼手形狀とラメラテ아의關係," 溶接學會誌, Vol. 46, No. 1 (1977).
 17. 稻垣, 伊藤, 高張力鋼, 低溫田鋼の溶接, 産報出版, (1978) p.126.
 18. 金澤, 山戸, 外3人, "鋼板の耐ラメラテ아性について," 溶接學會誌 Vol. 46, No. 1 (1977).
 19. 稻垣, 伊藤, 高張力鋼, 低溫用鋼の溶接, 産報出版 (1978) p. 130.
 20. 田村, "オステナイトステンレス鋼の溶接割れ," 溶接學會誌 Vol. 41, No. (1972).
 21. J.C. Borland, "Suggested Explanation of Hot Cracking in Mild and Low Alloy Steel weld. Brit. Weld J. Vol. 8, No. 11 (1961).
 22. W.I. Pumphery, P.H. Jemnings, "A Consideration of the Nature of Brittleness at Temperature Above the Solidus in Castings and welds in A uminium Alloys" J. of the Inst of Metals, 75 (1948).
 23. W.S. Pellini, "Strain Theory of Hot Tearing," Foundary, Vol. 80, No. 11 (1952).
 24. C.S. Smith, "Grains, Phases, and Inter-phases; An Interpretation of Microstructure", Trans. AIME. Vol. 175, No. 8 (1960).
 25. J.C. Borland, "Generalized Theory of Super Solidus Cracking in Welds (and Castings)" Brit, Weld, J. Vol. 7, No. 8 (1960).
 26. 松田, "溶接繼手の高温割れと防止對策," 金屬材料 Vol. 17, No. 7 (1977).



(254페이지에서 계속)

- berg, Austria, in July 1976 (Washington D. C.: Pergamon Press, 1977). pp. 873-911.
- (22) Congressional Office of Technology Assessment "Gas Potential from Devonian Shale of the Appalachian Basin" (Washington D.C.: U.S. Government Printing office Nov. 1977)
 - (23) B. Hodgson "Natural Gas: The Search Goes on" National Geographic 145(6) Nov. 1978 pp. 632-651.
- 이 논문은 새로이 발견된 天然가스 유정에 대

한 새로운 정보를 요약해 놓고 있다. 이 문제에 대한 모순되는 점의 하나는 이 가스들을 지질구조로부터 해방시켜 누출 시키려는 초기의 시도였던 지하의 핵폭발 方法이 실패되었다는 점이다.

(이것은 Project Gas Buggy"로서 핵무기를 平和的으로 利用하려는 AEC 노력의 일환이다.) 즉 방사성을 지닌 대단히 적은 量의 가스가 배출되었다. 여기에 묘사된 새로운 方法은 단순히 溶接을 利用한 것으로 원자력보다는 훨씬 적합한 에너지 利用方法이다.

