

Arc Welding에서의 Bead의 生成機構

中 根 金 作
(早稻田大學·教授)
〈漢陽大 工大; 李啓完 譯〉

1. 序 論

Arc Welding의 경우 arc 熱에 依하여 生成된 熔融池(Molten Pool)가 응고하는 과정은 金型 鑄物의 凝固過程과 비슷하게 생각되나 實은 응고의 제 1 단계에서 兩者間에 큰 차이가 있다.

즉, 金型에 注入된 熔融金屬이 응고하는 경우는 金型和 이에 接한 鑄造金屬과는 凝固後 別途로 分離할 수 있으며, 兩者가 서로 融合해서는 안될 것이다.

이에 反하여 融接의 경우에는 金型속에 있는 熔融金屬과 金型이라고 볼 수 있는 母材熔融部 端面과는 完全히 融合되어야 할 것이다.

金型鑄造部分의 응고에서는 金型에 接한 鑄造金屬이 熱的過冷却(Thermal Supercooling)을 받아 그 內部에 結晶核이 生成되어 이것이 成長하는 과정을 거칠 것이다. 그러나 融接의 경우에는 一般的으로 熔融金屬과 母材와는 同一系統의 材料이므로 熔融金屬에 接한 母材部分 自身이 種子結晶(Seed Crystal)와 같은 役割을 하여 熔融金屬內에 새로히 結晶核을 生成함이 없이 이 위에서 직접 結晶成長이 運行되는 것이다.

이것을 Epitaxial Growth라고 하나 이것이 融接部의 응고에서의 큰 특징인 것이다. 鑄造, 熔接 共히 熱的過冷却에 依한 응고의 초기단계

를 거치면 合金인 경우 이후의 응고과정은 주로 組成的 過冷却(Constitutional Supercooling)에 따르게 될 것이다.

이 機會에 Epitaxy에 관해서 간단히 說明하고자 한다.

2. Epitaxy

Epi=on, Upon, Taxis=Arrangement의 의미인 희랍語이며, Arrangement Upon이라는 뜻이다. 즉 Epitaxial Nucleation는 Nucleation by Arrangement Upon the Existing solid라는 뜻이다.

이 核生成에 뒤이어 進行되는 結晶成長을 Epitaxial growth라고 한다. 지금 同一量의 金屬原子가 응고하는 경우를 생각하면 鑄物과 같이 熔融金屬 內部에 結晶核을 生成하여 이것이 成長하는 경우에는 結晶核을 包圍한 界面自由 Energy가 減少하는 분만큼 작은 過冷却에 依하여 成長할 수 있다.

즉 融液內의 核生成—成長에 앞서서 E.G(Epitaxial Growth)가 일어날 수 있을 것이다.

熔接金屬의 응고에 E.G의 견해를 도입한 것은 Savage¹⁾ 등이다. 또한 熔接 Bond에서의 筆者의 所謂 二次的 熔融域(Savage 등의 所謂 Unmixed zone, 後述)의 응고側 先端쪽이 內部

1) W.F. Savage, C.D. Lundin and A.H. Aronson: Weld metal solidification mechanics, W.J., Apr. 1965, pp.175-s~181-s

□ 解 說

融液內 보다도 熱的過冷却이 크다는 因子도 E.G를 促進시키는데 寄與할 것이다.

Epitaxial Nucleation 이 일어나려면 合金(substrate)과 融液과는 W上에 Cu 또는 Ni上에 Ag 등의 報告가 있듯이 반드시 同材質이 아닌 경우도 적지 않으나 熔接에서는 多少의 成分量的 變化가 있다해도 거의 同一材質이므로 E.G가 가장 잘 일어날 수 있는 Homoeptaxy에 屬해 있으며, 合金의 結晶方位를 계승하여 結晶이 成長하게 된다.

熔接金屬은 一般的으로 合金系이다. (工業用純金屬도 不純物이 있어 合金系라 생각한다.) 이의 熔融狀態에서 응고가 進行되는 過程을 생각하면 우선 上述한 E.G가 開始하면 응고의 進行에 同伴하여 既凝固部로부터 固液界面 前方의 融液中에 熔質을 析出(平衡分配係數 $K < 1$ 인 경우)하게 되며, 組成的過冷却이 發生하게 되는 것이다.

3. Bead의 生成過程에 關與하는 因子

Arc Welding에서의 Bead의 生成過程을 考察하려면

(1) Arc 現象과 이에 따른 母材, 熔加材의 熔融

(2) 熔融池內의 熔融金屬의 流動

이것은 熔接電流에 의한 Arc 柱, Plasma 流의 動的效果 및 熔融金屬內를 通過하는 熔接電流에 의하여 發生하는 電磁壓力效果 등에 基因한다. Submerged Arc Welding의 경우는 Arc 空洞에 들어가는 未熔融溶劑의 落下에 의한 動壓의 大小 熔融金屬의 上部에 接한 熔融溶劑의 流動 등도 關係되는 것이다.

(3) 熔融金屬과 凝固壁 사이의 熱傳導 特別問題視되는 것은 固液界面近處에서의 融液中의 溫度勾配

(4) 凝固壁 또는 母材熔融域에서 發生하는 固體面(Solid Surface)와 熔融金屬과의 Wetting 및 兩者間的 接觸角

(5) 固液界面에 接한 融液中의 溶質 分布

이것과 (3)과 綜合하여 組成的 過冷却이 決定되는 것이다. 凝固組織은 이의 大小에 따라 決定的支配를 받는다.

Bead의 生成은 上述한 要因이 綜合되어 나타나는 것이므로 매우 복잡하여, 多少의 條件의 變動에 依해서도 Bead의 生成에 큰 영향을 받는다.

以下 各項에 따라 몇개의 Bead 生成의 具體的 實例를 들어 上述한 各因子가 Bead 生成에 如何히 關與하는 가를 說明하므로써 이의 基礎的 知識을 提供하고자 하는 바이다.

4. D.C. TIG 熔接(DCSP)에서의 Bead Wave²⁾

두께 13mm의 18-8 Stainless 鋼板上에 3相全波整流型 DCSP 熔接機를 사용하여 용접전류 300A, Arc 電壓 17~18V, 토오치를 固定하고 母材走行方式에 따라 10~40cm/min 범위의 熔接速度로 Bead 놓기 實驗을 하였다.

또한 良好한 Bead를 얻은 27, 30 cm/min의 熔接速度의 경우에 關해서 溶融池面上에 Carbon Arc 光을 照射하면서 熔接中の 溶融池面을 側面에서 高速寫眞 촬영하였다. 촬영 Film으로 부터 溶融池 및 Arc 柱의 舉動을 觀察하는 同時에 Film Motion Analyser를 사용하여 溶融池의 振動數를 解析하였다.

4.1. 實驗結果

表 1은 熔接速度와 Bead Wave의 每秒當의 生成個數와의 關係를 表示한다. 이 表에서 每秒當의 Bead Wave 生成個數는 50, 100, 300의 3種類로 分類된다. 또한 15cm/min 以下の 速度에서는 Wave가 生成되지 않든가 또는 매우 不明確했다. 35cm/min 以上에서는 Bead의 波形이 不整(Irregular)으로 되기 쉬우며 이 경우의 測定은 Bead 모양이 比較的 좋은 個所에서 實施했다. 高速 촬영 Film을 解析하면 Molton Pool 上에 나타나는 Carbon Arc 光의 反射像은 週期

2) 中根・松本(Matsumoto)・小山(Koyama)他: 熔接學會 全國大會講演概要, 第13集, (1973), pp.456~457.

적으로 변화하고 있으므로 이 週期로서 Pool의 振動數로 求했다.

表 2.는 이의 結果이며 Pool에는 50, 300Hz의 振動數가 共存하며, Arc柱는 300Hz의 脹收縮을 反復하고 있음을 알 수 있다.

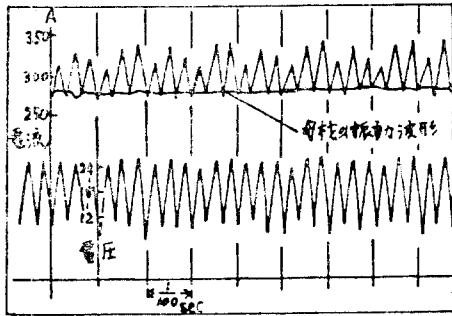


그림 1. 電流電壓動特性和 母材의 振動波形

熔接電流 Arc電壓의 電磁 Oscillograph는 그림 1.에서와 같이 300Hz의 變動이나 熔接電流에서 特히 注目할 점은 3相의 平衡을 얻을 수 없으므로 均一한 整流波形을 表示하지 않은 點이며, 300Hz의 變動以外에 큰 變化만을 생각하면 50Hz, 中間의 작은 變化의 Envelope를 그리면 이의 波形은 100Hz로 된다.

電流의 最大와 最小值의 差는 約 60A이었으나 Arc柱와 Pool내의 電子壓力이 電流의 二乘에 比例함을 생각할 때 이 정도의 電流變動에 따라 상당히 큰 電磁壓力變化가 일어날 것으로 생각된다.

高速촬영 Film의 解析에서 얻은 50, 300Hz의 Pool 振動은 이 電子壓力變動에 의하여 Pool에 強制振動이 생기기 때문이라 생각된다.

이 結果 凝固前線(Solidification front)에 熔融金屬의 週期的變位가 誘起되어 이것이 凝固 固定되어 50, 100, 300個/sec의 Wave가 생겼다고 생각된다.

熔接速度가 增加함에 따라 順次的으로 50,

100, 300個/sec의 Wave가 나타나는 理由는 凝固速度(熔接速度)가 작은 경우 固液界面에서의 熔融金屬의 變位速度(振動數)가 크면 응고가 忠實하게 變位에 따르지 못하기 때문이다.

15cm/min以下에서 Wave가 生成되지 않거나 또는 不明確한 것도 이에 基因하는 것이다.

Bead內部の 응고조직에 Wave에 對應하는 週期的變化가 있는지의 與否를 檢討하고자 Bead의 表面이 平滑하도록 가볍게 研削한 面 또는 Bead의 縱방향 中心斷面을 研磨하여 王水 구리세린(HCl 1, HNO₃ 3, 구리세린 3)으로 부식시켜 응고 조직을 현미경조사 하였으나 wave에 對應하는 組織變化나 偏析線을 볼수가 없었다.

5. A.C. TIG Welding에서의 Bead Wave³⁾

純 Al (JIS A 1050) 2mm 板上에 그림 2.에 표시하는 촬영장치가 있는 試作 TIG Welding 토오치를 사용하여 A.C. TIG Welding Bead를 놓고 同時에 W電極의 直上部에 設置한 高速寫眞 촬영 장치에 의하여 Pool의 後方응고벽近處를 Arc 直上에서 3000 frames/sec로 고속촬영하였으며 또한 Bead Wave 모양, 단면의 현미경조직을 조사하여 綜合的으로 Bead의 生成過程을 考察하였다.

不平衡交流(SP의 電流 : RP의 電流=7 : 3)의 경우 電流 150A의 Bead 놓기에 있어서 熔接速度 90cm/min以下の 경우는 電源周波數에 一致하여 1秒에 50개의 미세한 Wave를 發生하나 90cm/min以上の 高速에서는 電源周波數의 2배인 100개의 Wave를 發生하고 있다.

Garland⁴⁾ 등은 Al 2.5% Mg 合金 3.2mm板上에 AC TIG Bead를 놓았을 때, 電源周波數 50Hz에 一致하는 개수의 Wave가 發生했음을 報告하고 있다.

3) 中根·小山(Koyama) : 熔接學會全國大會講演概要 第15集 1974, pp.176~177.

中根·小山他 : 熔接學會全國大會講演概要 第17集 1975, pp.388~389.

中根·小山·佐山(Sayama)·野上(Nogami) : 熔接學會全國大會講演概要 第19集 1976, pp.34~35.

中根·野上·立石(Tateishi) : 熔接學會全國大會講演概要 第23集 1978, pp.254~255.

4) J.G. Garland and G.J. Davies : Surface rippling and growth perturbations during weld pool solidification. Metal Construction and Brit. W.J., May 1970, pp.171~176.

□ 解 說

이들은 26cm/min의 低速에서 實驗했으며 筆者의 低速에서의 實驗과 一致하고 있으나 高速 實驗이 아니기 때문에 100個/sec의 Wave는 발견하지 못하였다.

筆者의 高速寫眞의 檢討結果로서 明白한 것과 같이 AC TIG에서는 熔接速度의 大小를 不問하고 Wave는 50Hz에서의 SP와 RP와의 反復數 合計 $2 \times 50 = 100$ 個/sec를 發生한다. 그러나 低速熔接의 경우에는 한번 發生한 RP Wave는 다음의 SP에서 電流가 크고 또한 陽極點이 Pool 내의 先端域에 集中하기 때문에 이 SP半波의 最大電流值에 到達한 近處에서 熔融金屬을 後方 凝固壁에 밀어 올리는 힘이 커져서 熔融金屬은 發生한 直後의 RP Wave 위에 Overflow 하여 이것을 消失시킨 것이다.

表 1. 熔接速度外 wave의 生成個數

走行速度 mm/min	每秒當生成個數 個/sec
100	測定不能
150	測定不能
200	50.9
225	52.1
250	50.3
260	96.5
270	100.4
275	95.9
280	96.9
290	100.5
300	100.3; 299.8
325	297.6
350	100.6
375	304.9
400	305.3

表 2. 溶融池의 振動數

撮影 flame 速度 flame/sec	溶融池의 振動數 Hz
500	50
3000	50, 300

그림 3.은 Overflow 한 SP波의 先端의 不規則한 모양을 나타 낸다. 그림 4.는 高速 사진이며 28장(flame)으로 完成한 RP Wave가 SP의 Overflow에 依하여 두모서리 部分에서 消失하

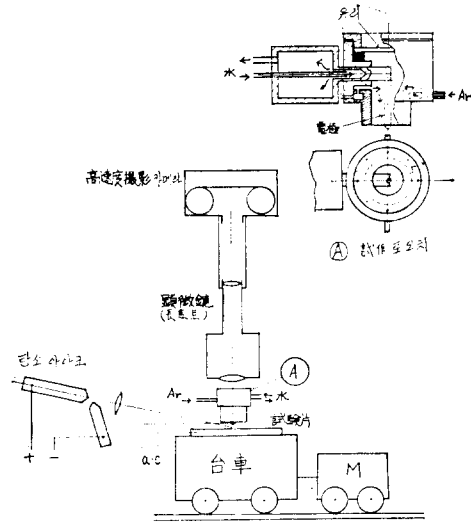


그림 2. 高速度撮影裝置와 TIG 熔接토오치

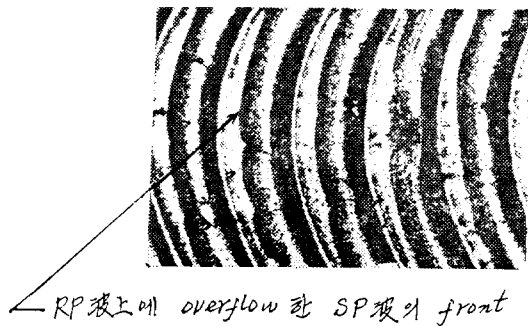


그림 3. RP波上의 overflow 한 SP波

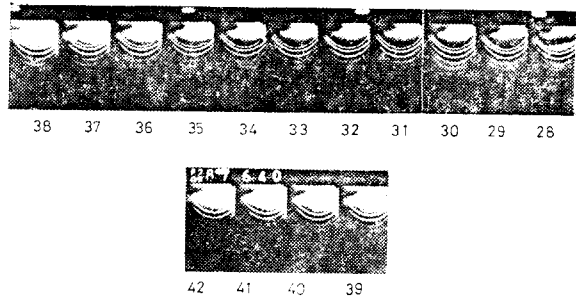


그림 4. SP波의 overflow에 의하여 消滅한 RP波기 시작 41장에서 完全히 消失됨을 나타내고 있다.

5.1. Ripple 偏析線 (以下 偏析線이라 한다)의 存在

Bead 表面이 平滑하도록 板面에 平行으로 研削하고 研磨後에 氏液으로서 부식하면 그림 5. (a)에서와 같이 Wave에 相當하는 位置에 偏析線을 볼 수 있다. 확대하면 (b)와 같으며 偏析線의 熔接進行方向쪽이 黑色으로 보이는 것은 Cell 조직이며, 매우 微細함을 표시하고 있고 熔接進行 反對쪽에 接續하는 部分은 점차 粗大화된 조직인 것이다.

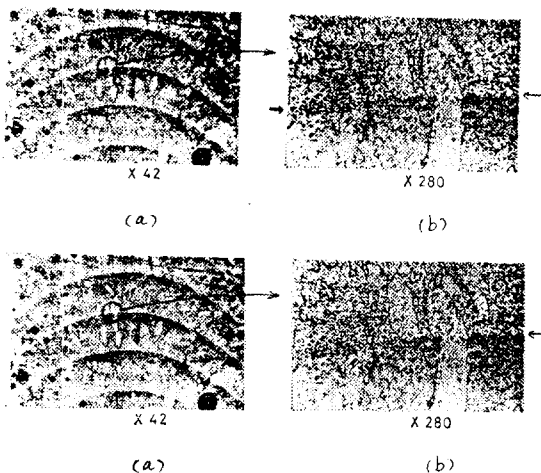


그림 5. Ripple 偏析線近處의 顯微鏡 組織

이것은 熔接의 反對方向에 멀어짐에 따라 細粒化되나 粗大化域의 前方(熔接進行方向)과 後方과의 組織의 細粒과 粗粒의 狀態가 明白히 區別된다.

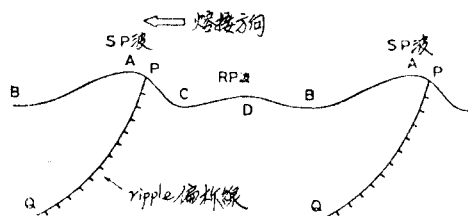


그림 6. 비이드의 縱방향 中心斷面에 나타난 偏析線

다음에 Bead의 縱방향 中心斷面을 부식하면 그림 6.에서 보는 바와 같이 Wave에 對應하는 偏析線이 存在하며 그림에 표시되어 있지 않으나 Bead 底部에서는 Fusion line에 直角으로 되

어 있다. 많은 熔接試料에 關해서 縱방향 斷面上的의 偏析線을 調査하면 다음의 事實을 알 수 있다.

- (i) Wave는 熔接方向에는 완만한 勾配 (AB)를 나타내며, 反射方向에는 急勾配(AC)를 나타낸다.
- (ii) 偏析線은 Wave 頂上에서 出發하지 않고 熔接反對方向의 急勾配쪽의 途中에서 나타난다.
- (iii) RP Wave에 屬하는 偏析線은 SP의 경우 보다는 輕微하여 부식시켜도 確認되지 않은 경우도 있다.

5.2. 偏析線의 生成機構

Bead Wave와 偏析線의 生成機構를 交流의 半波에 關해서 생각하자(그림 7.)

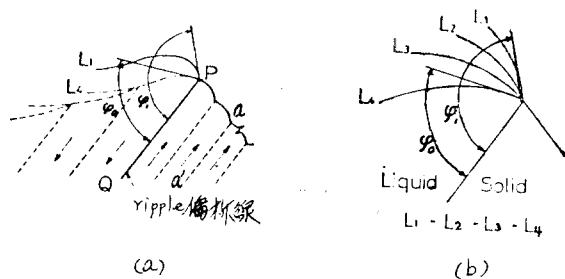


그림 7. 偏析線의 生成機構 說明 그림

電流가 0에서 最大值로 增加하면 Arc 幅도 增大되므로 Arc 直下의 高溫의 熔融金屬은 後方凝固壁에 따라 밀어올리게 된다. 例컨대 그림 (a)의 aa'에 응고벽이 位置하고 있는 경우를 생각하면 上端 a에서는 熔融金屬과 既凝固面 aa'와의 接觸角은 平衡接觸角을 넘어 拘束된채로 熔融金屬은 부풀고 同時に 응고면 aa'에 거의 平行으로 응고가 進行된다.

그러나 이 熔融金屬은 高溫이므로 이 拘束型凝固部의 응고속도는 적으며, 이 때문에 wave 表面은 짧은 急斜面으로 된다. 電流가 最大值를 넘어 減少하기 시작하면 Arc 힘도 減少하고 응고벽 端部에 拘束되어 있던 低溫으로 된 熔融金屬은 前方으로 逆流하며 拘束接觸角은 順次的으로 減少하여 Slip 型응고로 된다. 이때에는 응고속도가 커져서 Wave 表面은 긴 완만한 斜面으로

□ 解 說

된다. 이 응고속도, 응고벽附近에서의 熔融金屬의 溫度的 高低등이 Cell Size 에 영향을 미쳐 그림 5.에서와 같은 偏析線으로 나타나는 것이다.

여기서 現實的으로 溶質의 偏析을 볼 수 있는 것도 응고이론에 따른 것이다.

다음에 偏析線의 發生位置가 Wave의 頂上에서 多少 急斜面쪽으로 이동한 理由는 그림7. (b)에 표시하는 바와 같이 最大電流值에 이르러 熔融金屬의 押上이 停止하면 拘束型凝固가 끝난다.

이때에 熔融金屬의 接觸은 L_1 로서 표시된다. 그림 (a)의 응고면 PQ에 對한 接觸角 φ_1 는 PQ의 平衡接觸角 φ_0 보다 크기때문에 直時로 Slip형 응고로 되지 않고 (b)에서와 같이 $\varphi_1 \rightarrow \varphi_0$ 즉 L_1 의 狀態에서 $L_2 \rightarrow L_3 \rightarrow L_4$ 의 過程을 거쳐서 φ_0 로 되며 그후 Slip형 응고가 시작된다.

이 그림은 간단하게 說明하고저 固定된 一點 (P)에 關해서 破面의 變化를 표시했으나 응고界面은 이 過程中에 時時刻刻으로 進行되는 것이다. 이때문에 Wave의 頂點은 P보다도 높은 位置로 올 것이며 偏析線은 急斜面쪽으로 이동 될 것이다.

AC TIG Bead를 前項의 DC TIG Bead와 比較한 경우 가장 큰 특징은 명확한 偏析線이 존재한다는 것이다.

이는 AC에서는 Arc 힘이 熔融金屬內的 電子 壓力 등에 의하여 高溫의 熔融金屬이 後方 凝固壁에 따라 押上되던 뒤이어 冷却된 熔融金屬이 押下當하는데 큰 원인이 있는 것이다.

DC TIG에서의 整流電源의 Ripple 程度의 電流變化에서는 熔融金屬은 全體적으로 搖動시킬 수는 없으므로 오히려 TIG Arc Spot 熔接部 表面에 發生한 同心圓狀의 Wave의 生成의 경우에 가까운 舉動을 나타낸다고 볼 수 있다.

DC TIG Bead에서도 Arc의 不規則的인 變動으로 인하여 생기는 粗大한 Wave의 部分에서는 偏析線이 나타나나 이는 要件데 熔融金屬 全體를 크게 搖動시키고 있다는 點에 注目하면 理解가 될 것이다.

6. TIG Arc Spot 熔接部の wave⁵⁾

Arc Spot 熔接部の 表面에는 거의 同心圓狀의 Wave가 생기는 것은 잘 아는 바이다. 이는 連續的으로 Arc를 發生시켜서 얻게되는 Bead Wave를 理解하기 위한 基礎라고 생각하기 쉬우나 本質的으로 다른 點이 있음을 알고있을 必要가 있다. 이는 Arc Spot 熔接部에 생기는 Wave 熔接電流를 끈어서 Arc를 消滅시킨 후에 發生한다는 點에 있다.

6.1 TIG Arc Spot 熔接實驗

筆者는 熔接室에서 $\phi 400 \times 910$ mm의 Arc 분위기 제어용기를 사용하여 1 Atm의 Ar 분위기 중에서 Th-W 電極 $\phi 3.2$ 또는 4.8mm를 사용하여 電極母材間거리를 熔接前 3mm로 設定하였다. 供試材로서는 두께 12mm의 軟鋼 및 18-8 Stainless Steel Plate를 사용하였다.

Arc Spot 熔接條件: 電流 300~500A, 電壓 15~20V, 熔接時間 6~10sec.

熔接部表面에 發生한 1群의 Wave가 同心圓狀으로 連續的인가 또는 그 波高가 規則的인 變化를 하는가의 與否를 實體현미경 관찰, 表面粗度 試驗機에 의하여 半徑방향에 따라 波形測定하여 檢討하였다.

이의 結果를 總括的으로 說明하건대 熔接部 表面에 發生하는 Wave는 그림 8.에 표시하는 3種의 型式으로 分類된다.

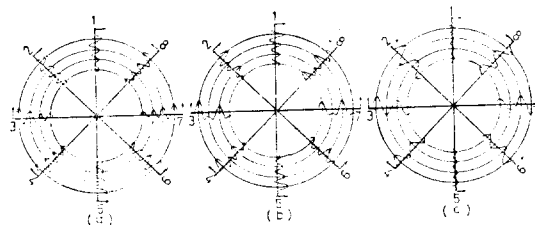


그림 8. Spot 熔接部表面의 實體顯微鏡 觀察結果

5) 中根・曾我(Soga)・松本(Matsumoto)・酒井(Sakai): TIG 아크스팟熔接部の表面に生ずる波について, 熔接學會熔接 아크物理研究 委員會 資料 (1972年 1月)

A種(그림 8. a) : Wave의 振幅에는 큰 變化가 없으며, 各各의 Wave는 熔接部中心에 關해서 點對稱性을 가지며 거의 同心圓狀으로 連續되어 있다.

B種(그림 8. b) : Wave의 振幅이 熔接部가 있는 어떤 하나의 直徑에 關해서 線對稱性을 가지고 變化하고 있으며 또한 各各의 Wave는 거의 同心圓狀으로 連續되어 있다.

C種(그림 8. c) : B種에서와 같이 Wave의 振幅이 熔接部の 어떤 하나의 直徑에 關해서 線對稱性을 가지고 變化하고 있으나 各各의 Wave는 거의 同心圓狀이나 不連續이다.

(圓周의 一部가 消滅).

以上の 3種의 型式中에서 가장 一般的인 것은 B種이었다.

6.2. Arc Spot Pool의 定常波動

TIG Arc Spot Welding에서는 Arc 消失의 순간에서는 Lorentz 힘, Plasma 氣流 등의 作用에 의하여 Pool 表面은 거의 中心이 極小點으로 되는 曲面을 이르고 있다.

따라서 Pool은 이러한 曲面을 初期變位로써 自由振動을 일으켜 이 結果 Pool은 定常波動을 일으킨다.

특히 이 時點에서 Pool의 內部에 存在하는 流動은 無視하고 있다.

等深圓形湖에서의 完全流體의 自由振動의 解析⁶⁾을 기초로하여 생각한다.

Arc Spot 熔接部の 表面에 發生하는 同心圓形의 Wave는 圓形湖에서의 定常波動이 응고수축하여 가는 圓形 Pool의 一部分에서 점차적으로 응고 固定한다고 생각하면 실제의 Pool은 直徑이 적고 表面張力은 크므로 定常波動을 일으키고 있는 pool은 그다지 복잡한 曲面은 아닐것으로 생각한다.

따라서 Pool의 定常波動에 關해서는 가장 간단한 Mode인 圓節線(0.1) 및 直徑節線(1.1)인 Mode(그림 9)가 支配的이라고 예상된다.

이러한 견해에 따라 Arc Spot 熔接部 表面의

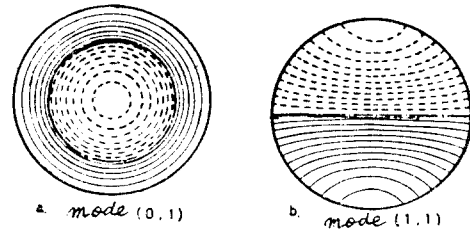


그림 9. 圓形湖 Mode에 있어서 定常波動보오드 Wave 起伏을 定性的으로 說明할 수 있으나 詳細한 것은 생략한다.

또한 上述한 Wave의 考察은 Bead Welding의 Crater 表面의 Wave에도 확대하여 利用할 수 있다.

6.3. Arc Spot 熔接部の Wave에 대한 偏析線의 有無

이 Wave에 對應하는 偏析線은 平滑研磨面을 부식시킨 結果 나타나지 않았다. 이는 Wave가 圓形 pool 表面層의 波動이 응고 고정된 結果로 생긴것이며, 熔融金屬이 全體적으로 搖動한 것은 아니하는 點을 생각하면 理解할 수 있을 것이다.

또한 前述한 AC TIG에 의하여 直線 Bead의 경우, 直線 Bead의 終端의 Crater 部에는 隨圓形의 波群이 생기나 이에 對應하는 偏析線은 볼 수 없으며 이 Crater의 直前까지의 Bead 內에는 既述한 Wave에 對應한 偏析線이 發生한 것과는 明白한 差異가 있다.

Crater도 本質적으로 Arc Spot 熔接部와 同一한 過程을 거쳐서 生成된 것이라고 생각하면 理解가 될 것이다.

7. 熔接 Bond 近方の Macro 偏析

Arc 熔接部の 길이 方向의 中央斷面이나 橫斷面을 부식하면 bond 부근에 때때로 偏析線을 볼 수 있음은 잘 알려진 事實이다.

7.1. 길이 方向斷面에 나타나는 偏析線

6) Lamb : Hydrodynamics, pp.231~273.

□ 解 說

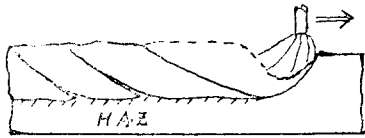


그림 10. 종방향단면에 나타난 偏析帶

그림 10은 鋼材의 Submerged Arc Welding, MIG 또는 CO₂ Arc Welding 에서의 Molten Pool 부근의 熔接部の 종방향 中央斷面을 Alkaline Chromate Etch (이하 AC 부식이라 함) 로서 얻은 一次組織(응고조직)內에서 發見된 Bond 부근의 偏析線의 스케치이다.

熔接狀態가 安定하고 용입이 거이 均一한 範圍內에는 이들은 大體로 平行하게 되어있으며 熔接中에 Shock Decantation 이 依하여 Molten Pool 中の 熔鋼을 飛散시킨 경우의 응고벽과 거이 平行하게 되어있다.

偏析帶는 低電流 高電壓 또는 低速熔接(以下 Mild Arc 의 條件이라 함)의 경우는 一般的으로 輕微하다. 大電流 低電壓 또는 高速熔接(以下 Violent Arc 의 條件이라함)의 경우에는 심하게 나타나기 쉽다.

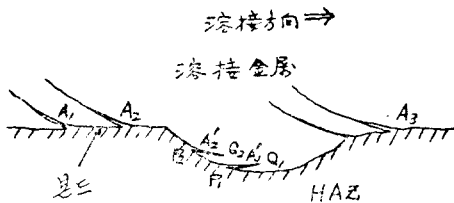


그림 11. 不連續한 深溶込에 있어서의 偏析帶

그림 11에서와 같이 Violent Arc 의 條件下에서는 용입狀態가 不安定하며 局部的으로 深용입으로된 部分에서는 普通 發生하는 偏析帶 A₁, A₂, ... 등과 反對方向으로 A'₁, A'₂, ... 등을 發生할 때가 있다. 또는 Mild Arc 條件에서 特히 深용입을 이르지 않아도 Gas Shield 方式의 熔接에서 短絡移行하는 경우에도 이것을 때로 볼수 있다.

AC 부식면을 觀察하면 熔接金屬은 靑色으로 鮮明하게 着色되며 Cell 조직의 境界線은 다소 白色을 이루며 內部와 區別할 수 있다.

HAZ(熱影響部)는 거이 着色되지 않으며 全體的으로 白色에 가까우며 二次組織(冷却過程

에서 同素變態를 完了하여 現在狀態의 組織)의 Widmannstaetten Structure 가 얇은 茶色으로 나타난다.

따라서 熔接金屬과 HAZ 와의 境界도 Macro 的으로는 明確하다. 偏析帶는 母材와 同一하게 着色되지 않으며 白色을 이르고 있고 bond의 뿌리 부근에서는 母材部와 完全히 連續되어 있는 點에 注目하여야 한다.

偏析帶는 bond 에서 熔接金屬內에 드러감에 따라서 擴散效果 때문에 漸次的으로 熔接金屬에 가까운 색으로 移行되나 bond 表面까지 繼續되어 있다.

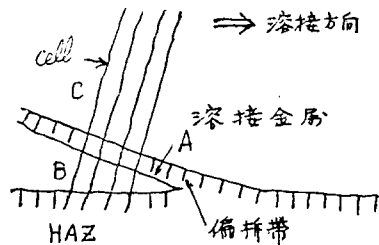


그림 12. 偏析帶의 突入部 부근의 헤어 라인

현미경으로 관찰하면 그림 12에 표시하는 바와 같이 bond 에서 HAZ 內에 수염과 같은 가느다란 靑色에 가까운 線이 약 30~50μm 정도의 길이로 多數 並列되어 있다. 그림 13에서 HAZ 의 範圍內의 點線으로 끊은 bond 쪽의 領域內에 存在하고 있다.



그림 13. 본드近處에 나타난 헤어 라인

特히 注目되는 點은 偏析帶의 熔接金屬에의 突入部의 Substate B 部の HAZ 側에 볼수 있는 수염은 그대로 B內로 드러가 이곳을 貫通하여

偏析帶A를 뚫어서 内部의 熔接部C로 Cell 境界線으로서 똑바로 連結되어있음을 때때로 發見할 수 있다.

7.2. 수염線域의 一次組織 및 二次組織

그림 14는 軟鋼의 MIG 熔接 Bead의 縱斷面의 Bond 近方의 현미경조직의 스케치이다. SS線은 AC 부식의 결과 얻게되는 熔接金屬과 HAZ의 境界를 Macro적으로 표시한 소위 Bond이다.

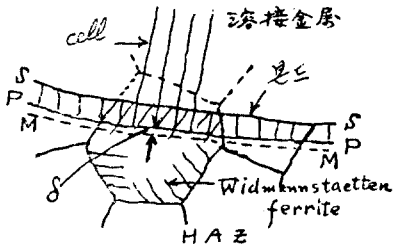


그림 14. HAZ 近方의 一次組織과 二次組織

이보다 上部는 靑色으로 着色된 熔接金屬이며 下部는 거이 부식에 依한 着色을 볼수없으며 약간 엷은 茶色으로 Widmannstaetten Structure를 볼수 있는 HAZ이다.

그러니 여기서 注目할 點은 Bond에서 HAZ 內로 약 30 μ m 程度의 길이의 수염 모양의 靑色線이 並列하고 있으며 또한 이것이 熔接金屬內의 Cell 境界線과 連續되어 있다는 點이다.

다음에 Nital Etch와 AC Etch를 同一試料面에 併用(계속 사용)하면 熔接部の 柱狀組織과 HAZ의 Widmannstaetten Structure와의 境界線 즉 Bond는 AC 부식의 경우의 그것과 거이 一致한다.

이 수염선군의 先端을 連結하는 線을 PP라고 하자.

萬一에 AC 부식면을 “바후” 연마 한 후 Nital Etch 등에 依하여 一次組織을 나타내면 수염線群을 檢出할 수 없다는 點에 注意를 要한다.

Pool 내의 溶鋼은 Arc 열로 過熱되어 있으므로 過熱溶鋼에 依하여 二次적으로 溶融된 용융지의 壁部分이 수염線域에 對應한다.

이 部分에 接續된 内部溶鋼은 底流에 依하여 高速으로 流動하는데 反하여 수염線域은 所謂 Stagnant Layer이며 熔接棒의 流滴, 他部分의 母材接觸部와 기계적인 混合을 하지않고 單純擴散效果만을 받는 部分이다.

嚴密히 말하면 二次溶融域은 이의 응고과정을 考察하면 PP線보다도 더 한층 미소거리인 δ ㎝ HAZ 內에 進入한 MM線까지라고 생각하는 것이 妥當할 것이다. 즉 實際의 二次溶融域의 最先端은 MM이고 응고과정에 들어가면 우선 熱的 過冷에 依한 平面界面成長이 일어나고 응고한 部分으로부터 界面의 融液側에 溶質의 排出이 계속되어 ($K < 1$ 라고 하자) 組成的 過冷이 成立하게 된다.

이에 依하여 PP線以後 Cell 조직이 生成되는 것이다.

따라서 δ 는 Cell 조직의 生成을 이르킬때까지의 成長거리이며 潛伏거리(Incubation Distance)라 呼稱되는 것이다. δ 보다도 더 한층 HAZ 內에 드러가면 所謂 HAZ의 Liquefaction Cracking의 誘因으로 되는 γ 의 粒界域만큼이 局部的으로 溶融하는 領域이 存在하게 될 것이다. 二次溶融部는 Pool 内部의 流動하는 溶鋼과는 달리 單純히 HAZ의 先端域이 溶融한 것 뿐이며, 擴散時間이 매우 짧기 때문에 組成的變化는 無視할 수 있을 것이다.

응고의 경우에는 上述한 바와같이 HAZ의 固體部先端으로부터 Epitaxial Growth가 있기 때문에 δ 의 領域과 수염領域을 합친 二次溶融部는 溶融해서 남은 HAZ의 先端結晶部分과 組成的으로는 勿論 結晶方位도 同一하게 응고하고 兩者는 判別하기 困難하다.

따라서 이들이 $\gamma \rightarrow \alpha$ 變態時에 發生하는 Widmannstaetten Structure가 그림 14에서 볼수 있는 連續性을 保持한다는 點은 理解할 수 있을 것이다.

上述한 바와같이 二次組織 檢査만으로는 識別할 수 없는 수염線域이라고 하는 溶鋼域의 存在는 低合金鋼이나 炭素鋼등의 熔接에서 잘 이려나는 低溫龜裂의 主要原因으로 되는 수소의

□ 解 說

HAZ 中의 擴散을 助長 加速시킨다는 事實과 關連해서 重要視되어야 한다.

7.3. 偏析帶의 發生過程

종방향 中心斷面에서 볼수있는 偏析帶가 Pool 後端의 凝固前線에 거의 平行임은 前述한 바와 같다.

이 偏析帶는 수염線 發生域인 Stagnant layer 가 Pool 內의 強力한 底流의 流動時에 粘性에 依해서 이것에 끌이어서 強制的으로 움직여 응고 벽 또는 其他의 不連續인 突起 등에 依하여 Pool 後端底部에 流入된 것으로 생각된다.

上述한 바와같이 流入端에서는 현미경조직으로 볼때 偏析帶와 수염線 流入域의 母材와는 連續되어 있다는 事實 그리고 後述하는 組成的變化로부터 이와같이 判斷되는 것이다.

調質鋼(80kg 高張力鋼 Wel-con 2 H Ultra, 0.14%C, 0.44%Si, 1.16%Mn, 0.013%P, 0.018%S, 0.26%Cu, 0.90%Ni, 0.49%Cr, 0.29%Mo) 25mm 厚板上에 高炭素鋼線(0.61%C, 0.25%Si, 0.54%Mn, 0.020%P, 0.009%S, 0.01%Cu) ϕ 1.6mm 를 사용하여 MIG Welding Bead 를 놓고 이의 縱방향 斷面內에서 偏析帶와 交錯하는 線에 따라 EPMA(電子微量分析裝置)로서 成分分析한 結果 Cr 量이 偏析帶上에서 不連續的으로 높아지고 있다. 이는 明白히 80HT 母材中의 Cr 量에 原因이 있다고 생각된다.

이것과 同一 傾向의 Data 로서 井川, 新·乾 (ImuI)가 WT-100N 母材上에 25-20stainless 熔接棒으로 熔接한 경우의 偏析帶部分의 EPMA 에 依한 分析結果가 Cr, Ni 成分이 이 部分에서 低值를 표시함을 報告하고 있다.

이들의 偏析帶가 溶融金屬中에 突入하는 것은 勿論 이 部分이 bond 에서 固體 그대로 剝離하여 流入한다는 것은 不可能하며 溶融狀態로 있어야 될것이다. 여기서 수염線領域의 存在가 重要한 意義를 가지는 것이며 수염線領域이 如何히 하여 流入하여 偏析帶를 構成하는 가를 論議하기전에 우선 Arc 下에서의 Pool 內의 溶融의 流動狀態를 檢討할 필요가 있는 것이다.

7.4. Pool 內의 溶鋼의 流動

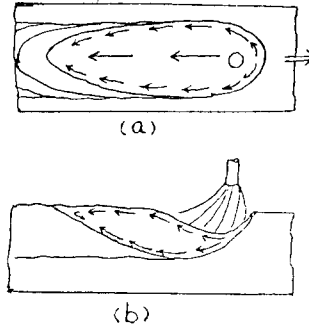


그림 15. 溶融金屬의 流動

그림 15는 Mild arc 조건하에서의 溶鋼의 流動狀態의 推定圖이다. (a)는 bead 의 表面上에서 본 경우이며 (b)는 縱방향中心斷面에서의 推定圖이다.

그림 (a)에서는 Arc 의 直下를 통과하여 後端에 向하는 흐름 以外에 前端的 溶融部의 緣部에 따라 周圍를 回轉하면서 後方에 向하는 흐름이 있다.

그림 (b)는 Pool 의 表面에 따라 後方에 흐르는 表面流와 後部凝固壁에 따라 흐르는 底流가 있는 것이다.

大電流 低電壓 또는 高速熔接의 경우에는 Buried Arc 로 되어 Arc 는 Pool 의 下方에 잠기게 되며 底流는 強烈하게 된다. Pool 의 Arc 끝部分은 arc 힘 및 여기서 溶鋼中에 向하여 흐르는 電流에 依하여 發生하는 電流壓力때문에 表面은 強하게 押壓當하여 凹形으로 된다.

低電流, 高電壓의 경우에는 이것과 反對이며 Arc 끝部分의 凹部는 微弱하게 되어 底流는 弱하고 또한 응고면에서 다소 떠러진 位置를 通過하게 된다.

7.5. 偏析帶의 發生機構

前項에서 說明한 Pool 內의 底流가 強하면 이의 움직임에 依하여 溶鋼의 最外側部分인 수염線域은 粘性에 依하여 움직이게 되고 응고벽에 따라 內部에 進入한다. 이것이 偏析帶이다. 內部에 들어감에 따라 수염線部分은 擴散에 依하여

漸次的으로 母材組成으로 부터 떠러지고 溶鋼의 平均成分에 가깝게 된다.

이 偏析은 Bead 表面까지 到達할 수 있으나 上層部分은 母材의 溶融部分이 到達한 것으로는 생각되지 않는다.

이는 AC TIG Welding Bead의 경우에 說明한 바와 같이 溶鋼의 流動狀態의 急變에 對應하는 응고상의 變化가 後部응고면에 따라 發生한다는 事實과 一致하는 것이다.

7.6. 溶鋼이 逆流하는 경우에 發生하는 偏析帶

이것은 이미 그림 11에 표시한 A_1', A_2' 등이다. 熔接條件에 어떤 急激한 變化가 이어나 局部的으로 不連續的인 深용입이 發生한 경우 Arc 힘 등에 依하여 後方に 多量 押上한 溶鋼은 계속적으로 發生하는 Arc 끝의 不連續移動 또는 短絡에 依한 Arc의 消滅 등에 依하여 發生하는 押上力의 急減으로서 응고면에 따라서 熔接進行方向에 向하여 逆流한다.

이때에 Bond에 接續한 수염線域은 溶鋼의 流動方向에 끌리어 우선 A_1' 가 이 경우의 응고면 P, Q, 위에 올라가서 突入하는 것이다.

이에 계속하여 後續의 偏析帶 A_2' 가 이의 突入하는 時點에서의 응고면 P_2Q_2 에 따라서 溶鋼內에 導入되는 것이다.

이들의 응고면이 溶鋼의 內部까지 完成되어 있지 않아도 單純히 Bond部에서의 Macro的 不連續點이 存在하면 여기서부터 溶鋼이 誘導되어 偏析帶가 形成되는 可能性도 생각할 수 있다.

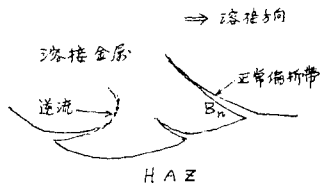


그림 16. 偏析帶의 彎曲

또한 그림 16에서 보는바와 같이 溶鋼의 逆流過程에서 發生한 偏析流가 途中에서 前方의 正常한 流動(B_2 偏析帶의 存在로서 判斷된다)의 影響을 받아서 反轉하여 만족하고 있는점에서

異常 용입域에서의 溶鋼의 逆流의 存在도 判斷할 수 있는 것이다.

7.7. 橫斷面에 나타나는 偏析帶

Welding Bead의 橫斷面을 보면 Bond에서 떠러진 熔接金屬內에 그림 17에 표시하는 바와 같이 底部 Bond Curve에 거의 平行인 曲線狀의 偏析帶를 볼 수 있다.

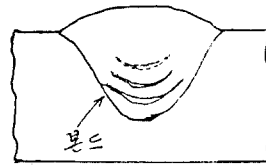


그림 17. 熔接金屬의 橫斷面內에 나타난 偏析帶

一般的으로 bond 의서부터 멀리 떠러져 있는 偏析帶일수록 偏析物質이 溶鋼中에 擴散하므로 鮮明도가 작아지며 幅이 넓어진다.

이러한 事實은 종방향 斷面에 底部 Bond에 接續하여 發生한 偏析帶에 對應하는 것으로 確認된다.

특히 相當히 Bead 表面에 가까운 位置에 比較的 가는게 鮮明한 偏析線도 發見되나 이것은 7.5項에서 說明한 上層部分에서의 偏析에 對應하는 것으로 생각된다. 橫斷面의 一次組織에 關해서는 前述한 熔接金屬內의 平行인 偏析帶群以外에 옆의 Bond부로부터 熔接金屬中에 母材部와 連續된 偏析帶가 突入하는 경우가 있다.

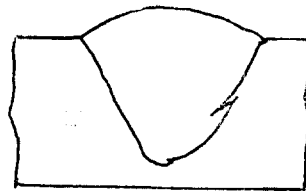


그림 18. 분드側部 上方에서 잘려들어간 偏析帶

이것에는 그림 18에서와 같이 위에서 밑으로 向하여 突入하는 것과 反對로 그림 19에서와 같이 밑에서 위로 向하여 突入하는 것의 두종류가 있다.

이들은 그림 15(a)에 표시하는 바와 같이 옆에서는 종방향 中心斷面의 경우와는 달리 回轉

□ 解 說

流인 同時에 이것이 Arc 힘에 依하여 後方에 押上하든가, 逆流하는 點을 考慮하면 이의 生成理由는 說明할 수 있다고 본다.

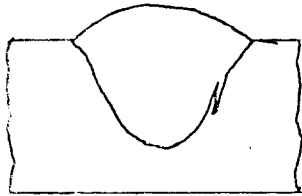


그림 19. 본드근방 하부에서 상부로 잘려들어간 偏折帶

7.8. Savage 등의 熔接 bond 域에 關한 研究에 對하여

Savage 등은 調質低金鋼 (Ni-Cr-Mo 系) HY 80의 試驗材 51×51×127mm 上에 被覆 Arc 熔接棒 E 11018 G, φ4.8mm를 사용하여 길이 100 mm의 Bead를 만들어 熔接 Bond 近方을 綿密히 檢討하였다.

一次 組織檢出에서는 筆者의 Alkoline Chromate Etch와는 달리 Sodium Bisulfite Etch를 사용하고 있다.

一次組織과 二次組織의 二段부식을 사용하고 있는 點은 偶然하게도 筆者의 手法과 一致하고 있어 興味が 크다.

熔接金屬, Bond, HAZ에 對하여 새로운 用語를 提案하고 있다.

筆者가 사용한 二次溶融部에 對한 Unmixed Zone이라는 말을 사용하고 있으나, 無妨하다고 생각된다.

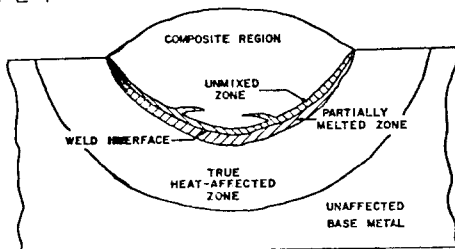


그림 20. Schem, illustration showing the regions of a heterogeneous weld recognized in this estimation and the proposed terminology to identify these regions.

그들은 그림 20에서 Bond 近方을 圖示하고 있으나, 所謂 Unmixed Zone이 完全混合域(Com-

posite Region) 中에 突入하고 있는 部分(筆者가 말하는 偏折帶)의 形狀은 Submerged Arc Welding 自動 Gas Shield Welding 만에 關해서 實驗한 筆者로서는 좀 理解하기 困難한 點이 있다.

추측하건데 手熔接에서는 溶融金屬의 흐름이 單純하지 않기 때문에 發生했는지도 모른다. 縱 방향 斷面에서의 Unmixed Zone의 形態도 圖示했으면 좋았을 것이라고 생각된다.

參 考

Alkoline Chromate Etch

이것은 鋼中의 酸化物 및 酸素의 固溶度를 檢出하는 方法으로서

L. Fine: A new etching reagent for the detection of oxygen segregation in steel.

Metal progress, Jan 1946 pp.108—112에 發表되었음. 부식액의 成分; 증유수: 145cc, 無水 Cr 酸 16gr, NaOH 80gr, 117~120°C의 부식액 中에 연마시료면을 上向으로 하고 侵漬하고 이 面이 靑色으로 될때 까지 數分間 부식한다. α系의 鋼材熔接部에 關한 限 이부식에서 얻어지는 것과 잘 一致한다. 母材는 熔接部에 比하여 부식되기 힘든다.

文 獻

1. 井川, 新, 乾: α系, γ系 異材繼手の 熔接 bond에 關한 研究(第1報) 熔接學會誌 43(1974), 2, pp.162~173.
2. 中根 吉田, 關野 鹽川: Submerged arc welding에 對한 溶融鋼의 流動에 關한 考察. 熔接學會: 熔接 arc 物理研究委員會資料 1967—12
3. W.F. Savage, E.F. Nippes and E. S. Szekeres: A study of weld interface phenomena in a low alloy steel, W.J. Sept. 1976, 260-s—268-s.
4. 中根 金杉: Arc welding의 bond 近方의 巨視的 偏折에 關한 考察. 熔接學會熔接 arc 物理研究委員會資料 No. 74-237 (1974年 5月)
5. Arc welding의 前方 bond 近方에 나타난 偏折線에 關해서. 熔接學會熔接 arc 物理研究委員會資料 No. 74-295 (1974年 8月)