

<論 文>

SUS 304 鋼 熔接部의 SCC 特性에 관한 研究†

金 永 植* · 林 祐 助**

(1984年 8月 29日 接受)

An Investigation of Stress Corrosion Cracking Characteristics of SUS 304 Stainless Steel Weldments

Young Sik Kim and Uh Joh Lim

Abstract

The characteristics of the stress corrosion cracking of SUS 304 stainless steel weldments were studied with the specimens of the constant displacement type under the environment of 42% MgCl₂ boiled solution ($143 \pm 2^\circ\text{C}$). The susceptibility of initiation and propagation of the stress corrosion crack was quantitatively inspected in the weld metal, heat affected zone and heat affected zone with including the reinforcement shape, respectively. Also, those susceptibility were discussed in connection with the change of mechanical and microstructural characteristics caused by heating cycle of welding. Main results obtained are as follows:

- (1) Stress corrosion cracking is easiest to initiate and propagate in the heat affected zone of weldment.
- (2) The susceptibility of stress corrosion cracking of the weldment is largely improved by eliminating the reinforcement part of the weld bead.
- (3) The dominant factor of the cracking susceptibility of the heat affected zone appeared to be the phenomenon of softening and sensitizing caused by welding heat cycle.
- (4) Under the low loading conditions, the behavior of stress corrosion cracking of the SUS 304 steel weldment is largely influenced by the pitting phenomenon in the front region of the main crack.

† 1984年度 大韓機械學會 春季學術大會(4.28)에서 發表

* 正會員, 韓國海洋大學 機關學科

** 正會員, 釜山水產大學 船用機械工學科

1. 序 論

最近 각종 機械 構造物들은 더욱 輕量化, 高速化를

추구하는 방향으로 發展되고 있으며, 이들 機械 構造物들이 使用되는 環境 또한 급속히 多樣化, 苛酷化하고 있는 추세에 있다. 따라서 각종 機械 構造物이 使用 環境아래서 長期間에 걸쳐 충분한 安全性을 확보하여 그 機能을 발휘하도록 하기 위해서는 材料強度에 미치는 環境 특히 腐蝕性 環境效果의 解明과 環境強度 設計 基準의 확립이 絶실히 要求되고 있다⁽¹⁾.

環境強度를 左右하는 破損은 넓은 意味에서 순수한 化學的 作用에 의해서만 進行하는 破損過程과 化學的 機械的 두 가지 要因의 相互作用에 依해 進行하는 두 過程을 생각할 수 있으나 實際 機械 構造物에 있어서는 應力이 作用하고 있으므로 大部分 後者 즉 應力腐蝕균열(Stress Corrosion Cracking, 以下 SCC로 약칭함) 過程에 의해 그 破損이 進行되는 것이 보통이다^(2,3,4).

最近들어 破壞力學의 進歩와 더불어 以上과 같은 SCC 분야에 있어서도 破壞力學的 취급의 試圖가 활발히 展開되어 各種 데이터의 蓄積이 이루어지고 있다⁽⁵⁾.

本 研究에서는 가장 苛酷한 腐蝕 環境 분위기에서 널리 사용되는 오오스테나이트系 스테인레스 鋼材 熔接部에 대해 비등 염화 마그네슘 溶液 中에서의 SCC 發生 및 傳播特性을 初期 應力強度계수(initial stress intensity factors) K_{II} 값에 대하여 비교, 檢討함으로써 母材, 용접열 영향부, 용착금속 및 비이드 形狀에 따른 熔接部の SCC 感受性を 定量的으로 究明하였다. 또한 以上과 같은 각 부분의 SCC 特性을 熔接部の 組織의 및 機械的 特性 變化和 관련시켜 考察하였다.

2. 實驗方法

2.1. 試驗材料 및 試驗片

本 實驗에서 사용된 試驗材料는 두께 3mm인 市販의 SUS 304 오오스테나이트系 스테인레스 鋼材로 그 化學的 및 機械的 特性을 Table 1에 보인다.

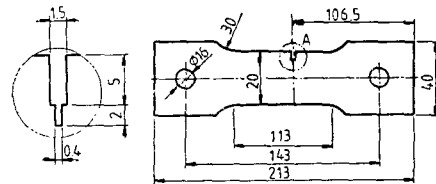
이와 같은 板材를 母材로 하여 이 위에 스테인레스 鋼 熔接用 熔接棒(直徑 1.5mm)을 利用하여 TIG 비이드 熔接(熔接電流 75Amp, 入熱量 9.6kJ/cm)을 實施하였다. 이러한 板으로 부터 채취한 試驗片 및 노치의 形狀을 Fig. 1(a)에 보인다.

여기서 노치의 위치는 母材, 열영향부 및 용착금속으로 하여 各各 別個의 試驗片으로 製作하였으며, 보강부 높이에 따른 용접열 영향부의 SCC 特性을 檢討하기 위해 熔接後 보강부를 삭제한 경우와, 그 높이를

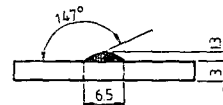
Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of used material

Material	Chemical compositions(%)						
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr
SUS 304	0.05	0.83	0.59	0.027	0.015	8.42	18.56

Temperature	Mechanical properties		
	0.2% proof stress (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation gl=25mm(%)
Room temp'	25.0	60.0	60.0
143°C	14.0	44.7	71.0



(a) Shape of specimen



(b) Shape of reinforcement

Fig. 1 Dimensions of test specimen

그대로 둔 경우의 試驗片을 各各 製作하였다.

여기서 보강부의 形狀은 Fig. 1(b)에 表示한 바와 같은 形狀으로 一定하게 하였다.

또한 試驗片의 表面은 사포(sand paper) 2,000番까지로 研磨한 후, 아세톤으로 脫脂하고, 試驗片 表面으로 부터의 patting에 依한 影響을 除去하기 위하여 노치 先端을 제외한 試驗片 全 表面을 투명한 耐熱 에폭시 樹脂로 被覆하여 絶緣시켰다.

2.2. 實驗裝置 및 實驗方法

本 實驗에 사용한 SCC 試驗機는 自作한 變位 一定 型式의 것으로 그 概要를 Fig. 2에 보인다. 핸들의 조작으로 印의 負荷應力을 調整할 수 있도록 하였으며, 負荷應力은 試驗片 一端에 固定된 load cell을 거쳐 digital strain indicator에 依해 測定하였다.

腐蝕環境은 42%의 비등 염화 마그네슘 溶液(溫度: 143±2°C)이며 증발로 인한 溶液 濃度の 變化를 防止

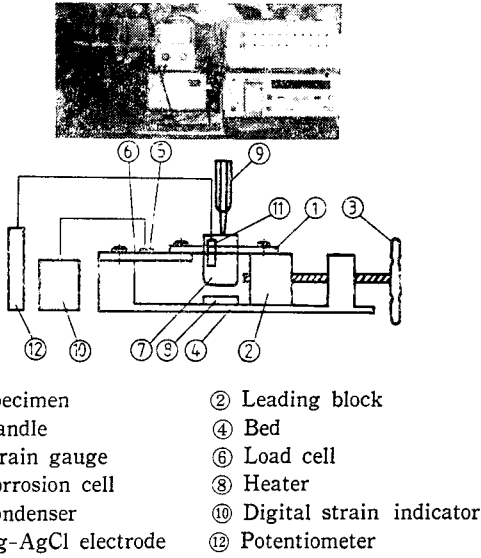


Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus

하기 위해 容器 上部에 응축기(condenser)를 설치하여 腐蝕 溶液의 濃度를 一定하게 유지하였다.

SCC 傳播길이는 以上과 같은 溶液속에 試驗片을 一定 時間 沈漬, 負荷한 後 10 倍의 擴大鏡으로 測定하여 初期 應力強度계수 K_{Ii} 값에 따른 傳播거동을 母材 열영향부 및 용착금속部로 考察하여 各各의 特性을 比較, 檢討하였다.

또한 以上과 같은 結果를 熔接部의 組織的, 機械的 特性變化와 관련하여 考察하였다.

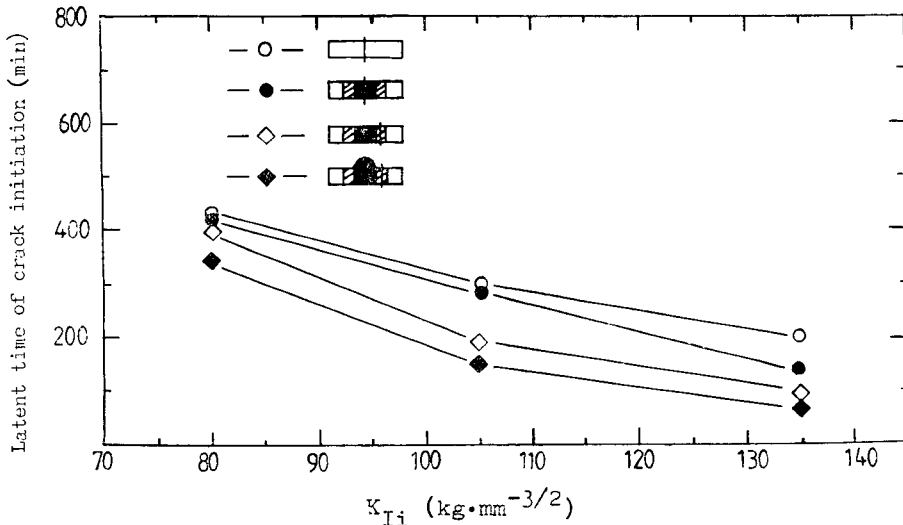


Fig. 3 Latent time of crack initiation vs. various initial K_{Ii} value following notch position

3. 實驗 結果

3.1. 熔接部의 SCC 發生特性

Fig. 3은 熔接部의 細部 부분 즉 母材(BM), 열영향부(HAZ) 및 용착금속부(WM)에 있어서 試驗片을 腐蝕溶液에 沈漬한 후 SCC 發生까지의 潛伏期間을 3 種類의 初期 應力強度계수 K_{Ii} 값에 대하여 정리하여 보인 것이다.

여기서 初期 應力強度계수 K_{Ii} 값은 다음 式에 依해 求하였다^(6,7).

$$K_{Ii} = Y\sigma\sqrt{a} \quad (1)$$

여기서

σ : 負荷應力,

a : 初期노치길이

W : 板幅,

$$Y = 1.99 - 0.41\left(\frac{a}{W}\right) + 18.70\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 38.48\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 53.85\left(\frac{a}{W}\right)^4$$

Fig. 3에는 熔接補強部를 삭제하지 않는 용접열영향부와 熔接補強部를 삭제한 후 같은 용접열영향부에 노치를 加工하여 試驗한 것이 比較되어 있다.

이 結果에 依하면 初期 應力強度계수 K_{Ii} 값이 增加함에 따라 加工된 노치 先端에서 새로운 균열이 發生하기까지의 潛伏期間은 短縮되고 있는 一般의 경향을 잘 나타내고 있으며, 同一한 初期 負荷 條件 下에서는 熔接補強部를 삭제치 않는 열영향부, 熔接補強部를 삭제한 열영향부, 용착금속부 및 모재의 順으로 균열 發

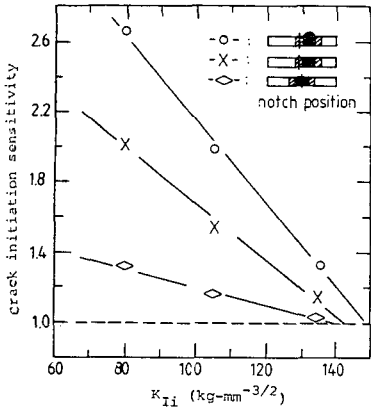


Fig. 4 Crack initiation sensitivity vs. initial K_{Ii} value in various position
 (Crack initiation sensitivity = $\frac{\text{Crack initiation time of base metal}}{\text{Crack initiation time of particular position}}$)

생까지의 潜伏期間이 길어 지는 樣相을 보이고 있다. 여기서 注目되는 것은 熔接後 熔接補強部를 삭제함으로써 均열 發生까지의 潜伏期間이 길어 지는 것이다. 이것은 보강부를 삭제함으로써 보강부로 因한 응력집중 效果가 소멸되고 또한 熔接部 주위에 形成된 殘留應力이 완화되기 때문인 것으로 思慮된다.

Fig. 4는 以上과 같은 現象을 좀더 定量的으로 檢討하기 爲해, 母材에 있어서의 均열 발생 潜伏期間에 對한 熔接部의 細部 部分에 있어서의 SCC 潜伏期間의 比를 計算하여 比較함으로써 熔接部의 細部 部分에서 的 SCC 發生 感受性을 定量的으로 評價하여 보인 것이다. 이에 依하면 初期 應力強度계수 K_{Ii} 값이 增加할 수록, 母材에 對한 熔接部에 있어서의 SCC 發生 感受性은 低下하고 있는 것을 보이고 있다.

따라서 熔接 構造物의 경우, 낮은 負荷 條件일수록 母材에 比해 熔接部 특히 보강부를 삭제하지 않는 열 影響부에서 SCC가 쉽게 發生할 수 있다는 것을 보이고 있다.

또한 Fig. 4에 依하면 初期 應力強度계수 값 $K_{Ii}=80\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 에서 보강부의 形狀效果를 가진 均열 影響부는 母材의 경우 보다 SCC 發生 感受性이 2.6 程度 높게 나타나고 있으며, 보강부를 삭제함으로써 均열 感受性은 2.0 程度로 낮출 수 있음을 보이고 있다.

以上과 같은 結果로부터 熔接部의 SCC 發生 感受性을 母材의 그것과 比較할 때 낮은 負荷狀態에서 더 문제시 되고 있으며 熔接後 熔接補強部 삭제效果는 때

우 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.2. 熔接部의 SCC 傳播特性

Fig. 5은 $K_{Ii}=135\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 과 $K_{Ii}=80\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 조건에서 均열 影響부에서 發生 傳播한 SCC의 巨視的 樣相을 나타낸 것이다. 이에 依하면 Fig. 5(a)의 경우는 notch로부터 發生 傳播한 SCC 周위에 充分한 크기에 塑性域이 觀察되고 있음을 보인다.

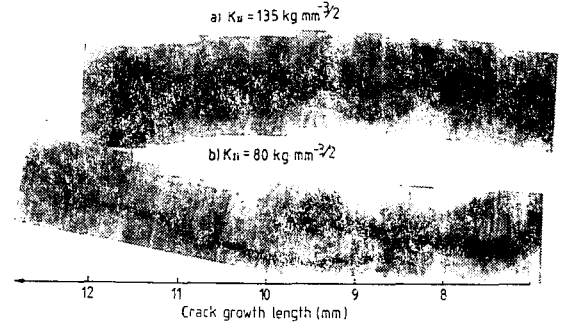


Fig. 5 Appearance of propagation at $K_{Ii}=135\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ and $K_{Ii}=80\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$

따라서 SUC 304 스테인레스 鋼材의 SCC 傳播機構는 均열 進展에 앞서 塑性變形이 發生하며 이러한 塑性領域內를 따라 均열이 傳播하는 一般 延性 均열 進展機構와 同一한 樣相을 보이고 있다. 특히 이러한 塑性變形은 均열 先端領域에서 스테인레스 鋼材의 不動態 皮膜을 파괴시켜 金屬이온의 溶出을 촉진시킴으로써 SCC

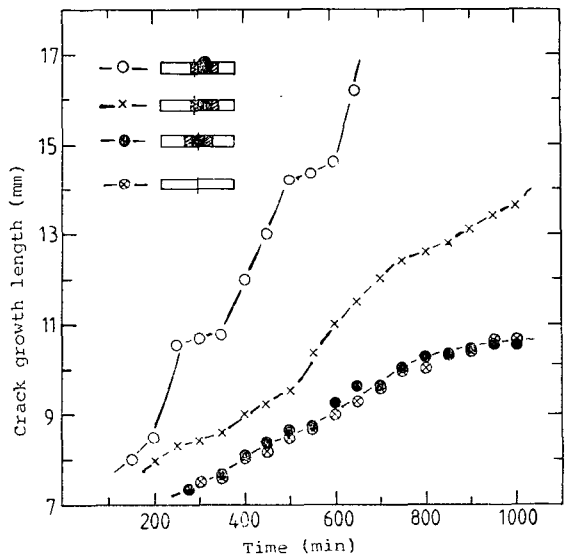


Fig. 6 Crack growth length vs. testing time in various position ($K_{Ii}=105\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$)

傳播에 지배적 역할을 하는 要因으로 思慮된다.

또한 K_{II} 값이 낮은 Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)와는 달리 균열 先端領域에서 發生한 別個의 균열이 主 균열과 合致되어 있는 양상을 보이고 있다. 이것은 K_{II} 값이 낮아지면 主 균열이 進전되기에 앞서 균열 先端領域에 散在되어 있는 介在物이 집중적으로 pitting 현상을 받아 여기서 應力集中 현상이 일어나서 균열이 發生되고 이것이 主 균열과 合致된 結果로 생각된다.

Fig. 6은 初期 應力強度계수 K_{II} 값을 $K_{II}=105\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 으로 一定히 하여 母材, 보강부를 삭제한 열영향부, 보강부를 삭제치 않은 열영향부等 熔接部 細部に 있어서의 時間에 따른 SCC 傳播길이를 定理하여 보인 것이다. 이에 依하면 열영향부에서의 균열 傳播速度가 용착금속부나 母材에 비해 빠르게 나타나 있으며 특히 보강부를 삭제치 않았을 경우 그 傳播速度는 현저히 빨라지고 있음을 보이고 있다.

Fig. 7은 SCC 發生까지의 潛伏期間이 가장 짧으며 또한 傳播速度가 他部分에 비해 가장 빠른 보강부를 갖는 試驗片의 열영향부에 對해, 各種 初期 應力強度계수 K_{II} 값에 있어서, 時間에 따른 SCC 進展 舉動을 比較하여 보인 것이다. 初期 負荷 조건 K_{II} 값이 加함에 따라 加工된 노치 先端에서 SCC 發生까지의 潛伏期間은 短縮되고 있으며 균열전파길이 또한 급격히 增加하는 樣相을 보이고 있다. 여기서 K_{II} 값이 $55\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 인 경우는 負荷 초기에는 SCC 進展이 이루어

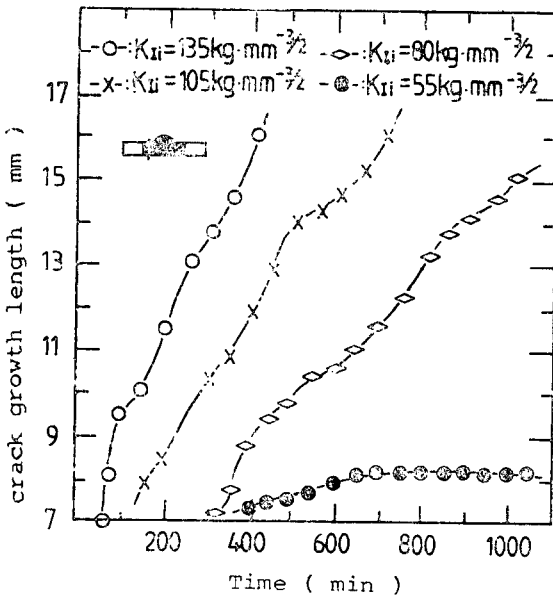


Fig. 7 Crack growth length vs. testing time in several loading conditions

지나 一定時間 경과 後는 균열 進展이 이루어 지지 않고 停止하고 있는 樣相을 보이고 있다.

따라서 $K_{II}=55\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3/2}$ 조건에서는 SUS 304 스테인레스 鋼材 熔接부에 있어서 가장 SCC에 민감한 部位인 열영향부에서도 SCC 進展은 이루어 지지 않으므로 이 값은 SUS 304 스테인레스 鋼材 熔接部の K_{II} SCC threshold 값으로 推定된다.

4. 考 察

以上에서 SUS 304 스테인레스 鋼材 熔接部의 SCC 發生 및 傳播 感受성은 補强部의 형상효과를 제외하면 용접 열영향부가 가장 민감한 것으로 나타났다. 이의 原因을 分析하기 위해 熔接部의 組織의 特性 및 機械的 特性을 調査하여 그 結果를 Fig. 8 및 Fig. 9에 보인다.

Fig. 8은 母材, 열영향부 및 용착금속부의 연속적인 미세조직을 보인 것이다. 용착금속부에서 멀어짐에 따라 結晶粒은 微細化되어가고, 이러한 微細化 領域은 또한 母材 原質부와 區分됨을 알 수 있다. SUS 304 오스테나이트 스테인레스 鋼材는 變態點이 없으므로 熔接熱 사이클로 因한 變態組織은 期待할 수 없으나 母材가 塑性加工되어 있으므로 熔接時의 열영향을 받아 일어나는 再結晶 현상으로 因해 組織의 變化가 일어남을 기대할 수 있다. 따라서 용접 열영향부는 塑性加工에 依해 加工硬化된 母材 原質부가 再結晶됨으로서 軟化될 것으로 기대된다. Fig. 9는 이러한 結果를 나타낸 것으로 일반 탄소강 熔接部와는 달리 열영향부가 母材나 용착금속부에 비해 軟化되어 있음을 實際로 보여 주고 있다.

따라서 용접 열영향부는 이러한 負荷條件下에서 他部分에 비해 塑性變形을 쉽게 하고 이러한 塑性變形은 스테인레스 鋼材의 不動態 皮膜의 빠른 파괴를 초래하여 빠른 SCC 發生 및 傳播에 기여하는 것으로 考察된다.

Fig. 10은 熱影響部를 擴大한 微細組織으로 母材 原質부에 비해 結晶粒界에 多量의 炭化物이 析出되어 있는 樣相을 보이고 있다. 이것은 熔接熱 사이클로 因해 초래되는 銳敏化 현상으로 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ 形態의 炭化物이 粒界에 析出되어 粒界부근의 Cr 결핍층을 가져 온다^(8,9).

따라서 스테인레스 鋼材 特性인 不動態 형성이 粒界에서 어려워지고 또한 電位도 낮아지게 되므로 粒界가 우선적으로 腐蝕되는 상태를 誘發케 된다^(9,10).

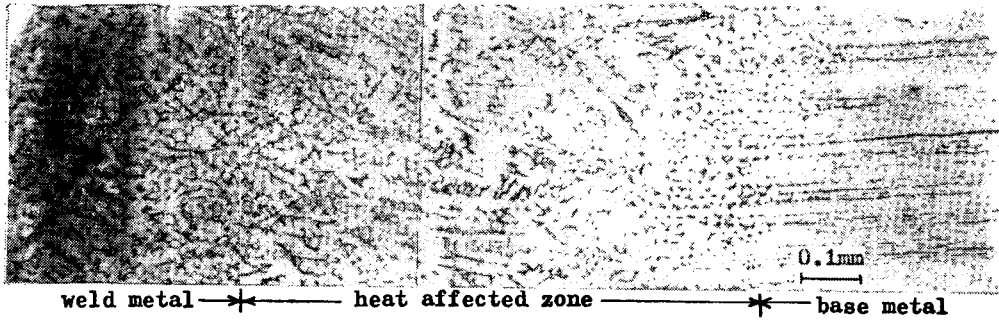


Fig. 8 The Change of microstructures at each distance from weld zone

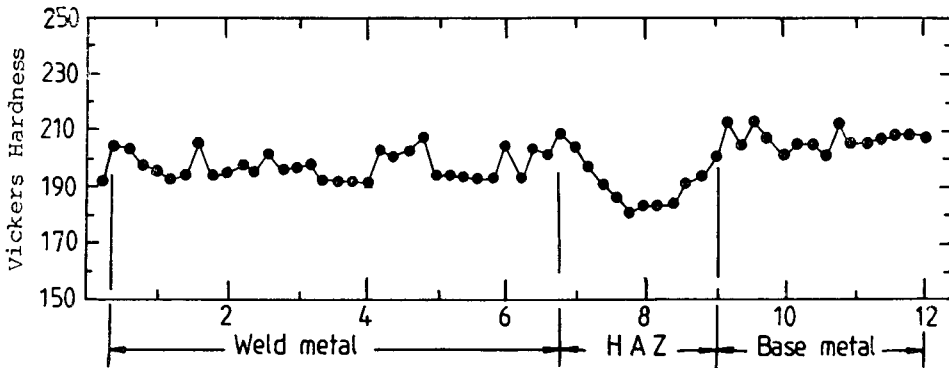


Fig. 9 Vickers hardness on the weld zone

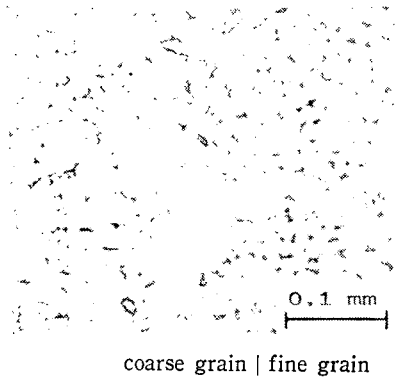


Fig. 10 Microstructure of heat affected zone

이러한 粒界의 우선적 腐蝕 현상은 銳敏化 현상이 현저한 熔接熱 影響部의 SCC 發生 및 傳播 感受性を 他部分에 비해 더욱 높이는 結果를 가져온다.

以上の 考察에서 SUS 304 鋼材 熔接熱 影響部의 SCC 感受性は 熔接熱 사이클로 因한 組織의 軟化 및 Cr 炭화물의 粒界析出 현상이 支配的으로 作用하고 있는 것으로 推定된다. 따라서 熔接部의 軟化 및 銳敏化 현상을 저지 할 수 있는 熔接法 또는 熔接後 溶體化 熱

處理等の 實施로 熔接熱 影響部의 SCC 感受性を 鈍化 시킬 수 있을 것으로 思慮된다.

5. 結 論

定變位 引張試驗機를 利用하여 SUS 304 鋼 熔接部의 42% 비등 염화 마그네슘 溶液(143±2°C) 中에서의 SCC 特性을 研究한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 熔接部의 SCC 感受性は 열영향부가 가장 민감하며, 이러한 感受性は 初期 負荷 條件이 작을수록 母材에 비해 현저하게 커진다.

(2) 熔接部의 보강부를 삭제함으로써 SCC 發生, 傳播 感受性は 크게 鈍化시킬 수 있다.

(3) 熔接熱 影響部의 SCC 感受性は 熔接熱 사이클로 因한 軟化와 銳敏化 현상의 두가지 중첩된 效果에 依해 높아진다.

(4) 初期負荷條件 K_H 값이 낮아지면 主균열 先端 領域에서 pitting 현상에 依해 發生한 별개의 균열이 主 균열과 合致되어 균열 進展 舉動에 重要한 影響을 끼친다.

(5) SUS 304 鋼 熔接部의 경우, 初期 應力強度계수

$K_{II} = 55 \text{ kg-mm}^{-3/2}$ 以下の 負荷 條件에서는 SCC 傳播
가 이루어지지 않고 정체한 상태로 남는다.

參 考 文 獻

- (1) 向井喜彦, 村田雅人, 스텐레스鋼의應力腐食割
れに對する破壞力學의適用について, 日本溶接學
會誌, 第48卷 第11號, p. 5, 1979
- (2) 駒井謙治郎, 應力腐食割れ及び腐食疲勞への破壞
力學의應用, 日本溶接學會誌, 第 52 卷 第 3 號,
p. 22, 1983
- (3) K. Takashima, N.W. Ringshall, Y. Higo, T.
Obinata, T. Nakamura and S. Nunomura, The
effect of Martensite of the Stress Corrosion
Cracking of austenitic stainless steel, Fracture
research, Vol. 2, p.981, 1981
- (4) 渡邊正記, 向井喜彦, 四十方利之, 川方久敬, 繰
返し荷重下におけるステンレス鋼およびその溶接
繼手の應力腐食割れに關する研究(第 1 報), 日本
溶接學會誌, 第39卷 第 6 號, p. 70, 1970
- (5) 向井喜彦, 村田雅人, オーステナイ系ステンレス
鋼ならびにその溶接繼手における應力腐食割れ傳
播特性の破壞力學的評價に關する研究(第 1 報),
日本溶接學會誌 第48卷 第 2 號, p. 64, 1979
- (6) 石田誠, き裂の彈性解析と應力擴大係數, 培風館,
p. 177, 1972
- (7) 向井喜彦, 村田雅人, 福嶋壽文, オースナイト系
ステンレス鋼ならびにその溶接繼手における應力
腐食割れ傳播特性の破壞力學的評價に關する研究
(第 2 報), 日本溶接學會誌, 第48卷 第 2 號, p. 64
1979
- (8) Mars G. Fontana, Norbert D. Greene, Corrosion
Engineering, McGraw-Hill Book Co., pp. 58~
60, 1978
- (9) 藤田輝夫, 스텐레스鋼의熱處理, 日刊工業新聞
社, p. 120, 1981
- (10) 日根文男, 腐食工學の概要, (株)化學同人, pp. 91
~92, p. 120, 1977