

# 鋼熔接部の 균열發生과 그 防止에 關한 研究

李 載 廷

**A Study On the steel Weld cracking and its prevention**

*Lee Jaejeong*

〈目 次〉

- |                |             |
|----------------|-------------|
| 1. 序 論         | 4. 크랙크 傳播速度 |
| 2. 試驗片과 實驗方法   | 5. 結 論      |
| 3. 熔接에 의한 特性變化 | 參考 文獻       |

## Abstract

Weld cracking susceptibility is a most significant problem in utilizing high strength steel in especial. In this paper, the weld cracking susceptibility of domestic SM58 High strength steel was inspected by the slit type restraint cracking test. The initiation and propagation behavior of root crack were also revealed by means of the clip gage method.

Main results obtained are as follows.

1. The root crack which is initiated after a certain incubation period appears to be propagated intermittently. This intermittent propagating action is almost finished within 1 hr after welding performance.
2. The root cracking percentage is variable, prominently exceeds 70% when wet and the time during which the electrode is left alone.
3. When the preheating temperature is higher than 100°C, the root cracking of domestic SM58 High strength steel can be prevented even if the electrode is wet.

## 1. 序 論

熔接技術은 接合工作法으로서 가장 一般化되어 있는 方法으로 自動車, 船舶, 建築, 橋梁, 各種化學플랜트, 海洋構造物, 原子力플랜트, 또는 低溫容器 等に 이르기 까지 거의 모든 構造物의 主 接合技術로서, 産業分野의 重要な 役割을 담당하고 있다. 따라서 이러한 各種 構造物의 使用性能의 向上, 安全性, 信賴性을 確保하여 資源節約과 經濟性을 도모하기 爲해서는 高度의 熔接技術의 蓄積이 必要하다.

鋼構造物의 熔接에 있어서 重要な 問題點의 하나는 熔接균열이다. 一般的으로 熔接部 및 그 근방의 金屬은 局部的으로 매우 높은 溫度까지 急熱된 후, 다시 急冷되므로 그것이 받는 매우 複雜한 熱 履歴 現象으로 因해 變形, 材質의 變化 및 殘留應力을 誘發하고, 또한 凝固直後 또는 熔接後의 一定時間 以內에 熔接部에 균열을 일으키게 한다. 이러한 균열은 構造物 使用中 構造物의 脆性 혹은 疲勞破壞를 일으키게 하는 原因이 되므로, 構造物의 信賴性 및 安全性을 確保하기 爲해서는 균열發生機構의 究明과 아울러 이의 防止對策이 確立되어야 한다.

熔接균열은 發生溫度에 따라 高溫균열(Hot cracking : 熔接時 熔融凝固에 同伴하여 일어나는 균열)과 低溫균열 또는 冷間균열(cold cracking : 熔接後의  $M_s$ 點 또는 약  $300^{\circ}\text{C}$  以下에서 일어나는 균열)로 分類할 수 있으나 一般 構造用 壓延鋼材의 경우는 高溫균열의 發生위험은 비교적 棼문 편이고 低溫균열이 問題視되고 있다.<sup>1)</sup>

熔接이음매에서 發生하는 熔接低溫균열은 루우트균열(Root crack), 토우균열(Toe crack), 비이드 밑균열(Under bead crack) 등의 母材熱影響部 균열과 熔接金屬 균열 등 그 種類가 매우 多樣하지만<sup>2)</sup> 그 本質은 熔接時 熔着金屬部の 冷却에 同伴하여 일어나는 收縮變形에 依한 拘束應力, 鋼材의 化學成分과 熔接熱 cycle로 決定되는 熔接部の 硬化組織 및 아아크 熔接中 高溫아아크 下에서 熔接材料 또는 大氣中の 濕氣의 解離로 因해 鋼中에 浸入된 擴散性 水素量 등이 複合적으로 作用하여 發生하는 지연破壞 現象으로 알려져 있다.<sup>3,4,5,6)</sup>

한편 우리나라에서도 現在  $60\text{kg}/\text{mm}^2$ 級 高張力鋼이 生産되고 있으며 各種 熔接材料들이 各方面에 熔接用 素材로서 널리 使用되고 있으나 이들 材料에 대한 熔接低溫균열의 發生과 그 防止에 對한 研究가 體系의 으로 이루어지지 않고 있는 實情에 있다.

本 研究에서는 國產 鋼材와 國產 熔接材料들을 利用하여 船舶, 橋梁, 建築 등의 構造物을 構築할 경우, 熔接施工者의 立場에서 熔接低溫균열의 發生感受性을 評價하고 또한 이를 防止하는 方法을 確立할 目的으로 一連의 實驗을 行하였다. 即 熔接低溫균열 中에서도 發生頻度가 가장 높은 루우트균열을 對象으로 하여 手動被覆아아크 熔接의 경우에 對하여, 實際 構造物에서 發生할 수 있는 拘束狀態를 再現시켜 균열의 發生 및 傳播機構를 解明하고 熔接材料 및 熔接環境이 균열發生 感受性에 미치는 影響을 定量的으로 究明하며, 나아가서 이러한 結果를 綜合하여 熔接低溫균열을 防止하기 爲한 效果의인 方法을 提示하고자 한다.

2. 實驗 方法

2.1. 供試材料 및 熔接條件

Table 1에 供試材料의 化學組成, 機械的性質, 元素當量  $C_e$ (WIS) 및 溶입 (溶接時相 및 Pcm) 값을 表示한다. 供試材料은 國產 SM58 高張力鋼 14種으로, 20mm 두께로 製成하였으나 實験時 厚さは 20及 22mm인 것을 利用하였고 補助材로서 20mm인 軟鋼材를 使用하였다.

Table 1. Chemical compositions & mechanical properties of base metals.

Material	Chemical compositions(%)						Mech. Prop.			$C_e$ (%)	Pcm
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	T.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	EL. (%)		
SM 58	0.177	0.26	1.28	0.012	0.010	0	53.4	63.5	37	0.40	0.25
SM 58	0.159	0.29	1.28	0.021	0.013	0	51.7	65.7	34	0.38	0.23
SM 58	0.179	0.25	1.28	0.013	0.010	0	51.5	61.1	39	0.40	0.25
SM 58	0.158	0.25	1.10	0.025	0.012	0	59.6	70.5	39	0.37	0.22
SM 58	0.205	0.30	1.18	0.025	0.013	0	46.2	61.1	23	0.42	0.27
SM 58	0.148	0.26	1.26	0.014	0.013	0	53.6	64.1	31	0.37	0.22
SM 58	0.177	0.29	1.20	0.024	0.014	0	52.5	61.5	42	0.41	0.25
SM 58	0.147	0.29	1.40	0.014	0.008	0	53.9	65.7	31	0.39	0.23
A572 50	0.191	0.29	1.25	0.018	0.012	0	43.5	60.0	25	0.41	0.26
A572 50	0.157	1.28	1.21	0.014	0.019	0	49.1	54.6	27	0.37	0.23
A572 50	0.194	0.29	1.18	0.025	0.014	0	43.5	60.5	26	0.40	0.26
A572 50	0.187	0.25	1.13	0.012	0.012	0	43.2	58.1	23	0.40	0.25
A572 50	0.209	0.25	1.16	0.022	0.013	0	38.6	60.1	26	0.41	0.28
LR AH 32	0.158	0.46	1.35	0.017	0.014	0	42.5	55.7	24	0.40	0.24
SS 41	0.160	0.28	0.74	0.021	0.024	0.02	31.8	47.0	28	0.29	0.21

Table 1에 表示된 熔接部의 硬化變를 나타내는 指數인 母材의 元素當量  $C_e$  와 母材의 化學成分으로 決定되는 溶接低溫균열感受性 Pcm은 다음式을 利用하여 求하였다.

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} (\%) \quad (1)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Si}{30} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B (\%) \quad (2)$$

熔接은 手動被覆아크 熔接法으로 行하였으며 熔接材料은 市販의 高張力鋼 熔接用인 低水素系 (Low hydrogen type) 2種을 使用하고 軟鋼에 對해서는 軟鋼用 일리나이트系 (Iminite type) 2種을

Table 2. Chemical compositions & Mechanical properties of electrode.

Type	Chemical compositions(%)							Mech. prop.		
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Y.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	T.S. (kg/mm <sup>2</sup> )	EL. (%)
Iminite	0.08	0.08	0.49	0.014	0.011	0	0	41.2	46.1	22.9
Iron powder Low hydrogen	0.07	0.57	1.06	0.012	0.011	0	0	50.0	59.0	21.0
Low hydrogen	0.05	0.48	0.98	0.012	0.010	0	0	46.2	54.7	33.6
Low hydrogen	0.07	0.42	0.93	0.012	0.009	0.54	0.22	55.3	64.5	30.5

Table 3. Welding condition.

Diameter of electrode $\phi$ (mm)	Current (A)	Voltage (V)	Welding speed (cm/min)	Welding heat input(J/cm)
4	165	25	9.8	25,244

利用했다. Table2는 供試熔接材料의 化學組成 및 機械的 性質을 보인다. Table 3은 熔接條件을 表示한다.

## 2.2. 試驗體의 形狀

熔接균열 試驗體는 Fig. 1에 보이는 바와같이 Slit型 拘束試驗體(自拘束型)로서  $200\text{mm}^L \times 150\text{mm}^W \times 20\text{mm}^T$ 인 鋼板 中央部에 길이 80mm인 V型(Single bevel type) Groove를 加工한 것을 主要로 利用하

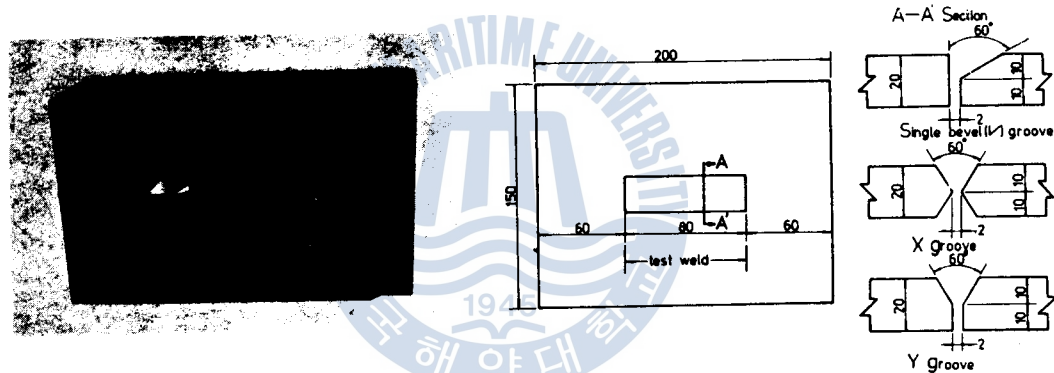


Fig. 1. Slit type cracking test specimen.

고 Groove形狀이 熔接균열에 미치는 影響을 究明하기 爲해 X型, Y型 Groove에 對해서도 實驗을 行하였다.

本 拘束試驗體에 對한 平均拘束度  $K_T$ 는 上田 等의 解析結果를 利用하여 다음과 같이 計算할 수 있다.<sup>9)</sup>

$$K_T = 2(1 - \beta_P) \cdot \frac{E}{\pi} \cdot \frac{h}{l} \quad (3)$$

여기서  $\beta_P = 0.6/(L/l)^n + 0.75/(B/l)^{1.42}$

또한  $n = [5.8/(B/l)^2] + 2.2$

$L$  = 試驗體의 全長(mm).

$l$  = 試驗 熔接長(mm).

$B$  = 試驗體의 幅(mm).

$h$  = 試驗體의 두께(mm).

本 實驗에서는 形狀이 一定한 한 種類의 試驗體에 對해서만 實驗을 行하였으나 試驗體의 두께에 따른 약간의 變化로 拘束度는  $2118\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 에서 부터  $2765\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 인 範圍內에 있다.

2.3 氫氣量의 測定

溶接部의 氫氣發生을 測定하기 위하여 溶接部의 試片에서 擴散된 水素를 測定할 目的으로 Fig. 2와 같이 水素捕集器를 用한데, 水素測定用 試驗片을 試片에서 取出한 後 45°C에



Fig. 2. Schematic diagram of hydrogen measuring apparatus.  
A:Hydrogen B,D:Glycerin C:specimen.

서 48時間 放置한 後 捕集된 水素를 擴散性 水素量으로 測定하였다. 여기서 水素測定用 試驗片은 길이 130mm, 幅 25mm, 두께 13mm인 試驗片을 製作하여 이 試驗片上에 길이 110mm인 비이드溶接을 實施한 後 이것을 水中 急冷시켜 30秒 以內에 水素捕集器內에 넣어 이 試驗片으로 부터 放出되는 水素를 0.01cc까지 測定한 後 이를 다시 標準狀態에서 溶接金屬 100gr 當의 量으로 換算하였다. 捕集된 水素量으로 부터 標準狀態下의 體積으로 換算하는 것은 다음과 같이 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \frac{273.15}{T_1} \cdot P_1 \cdot V_1 \\
 &= \frac{273.15}{T_1} \left( P_A - \frac{\rho_c}{\rho_{Hg}} \cdot \frac{h_1}{760} \right) \cdot V_1
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

- 여기서
- $V_0$  = 標準狀態에서의 體積( $m^3$ )
  - $T_1$  = 回收GAS의 溫度( $^{\circ}K$ )
  - $P_1$  = 回收GAS의 壓力(atm)
  - $V_1$  = 回收GAS의 體積( $cm^3$ )
  - $P_A$  = 液面  $h_0$ 에서의 大氣壓(atm)
  - $\rho_c$  = 捕集液의 密度( $gr/cm^3$ )
  - $\rho_{Hg}$  = 水銀의 密度( $gr/cm^3$ )
  - $h_1$  = 液相 높이(mm)

## 2.4. 冷却速度的測定

熔接後 熔接部の 冷却速度에 依한 均열發生 感受性을 評價할 目的으로 Fig.3과 같은 裝置를 利用하여 熔接直後 부터 常溫에 이르기 까지의 溫度變化를 連續的으로 測定하였다.

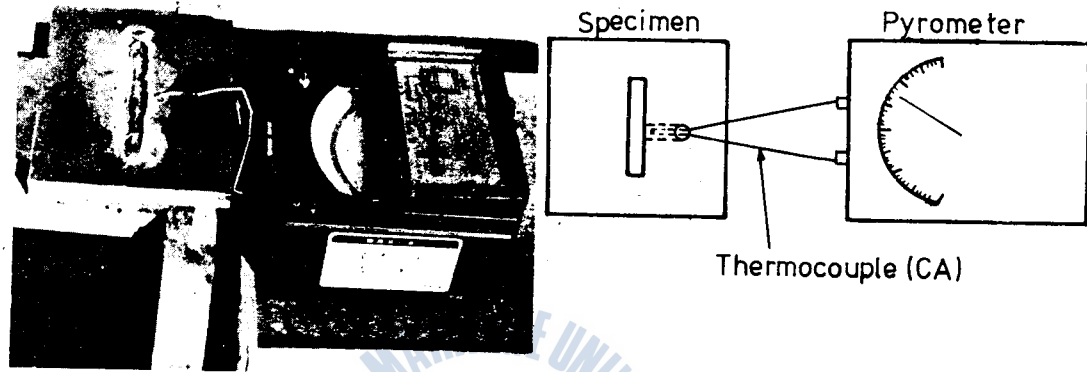


Fig.3. Measuring apparatus of cooling rate.

## 2.5. 均열의 發生率과 傳播狀況 測定

試驗熔接後 Groove의 Root低部로 부터 均열이 發生하여 傳播하는 狀況을 連續的으로 把握하기 爲하여 Fig 4와 같이 Strain gauge를 利用한 clip gauge를 製作하여 Root部에 挿入하였다. Root低部로 부터 低溫均열이 發生하여 傳播하면 Root間격에 變位가 생기게 되므로 이 變位를 clip gauge를 通하

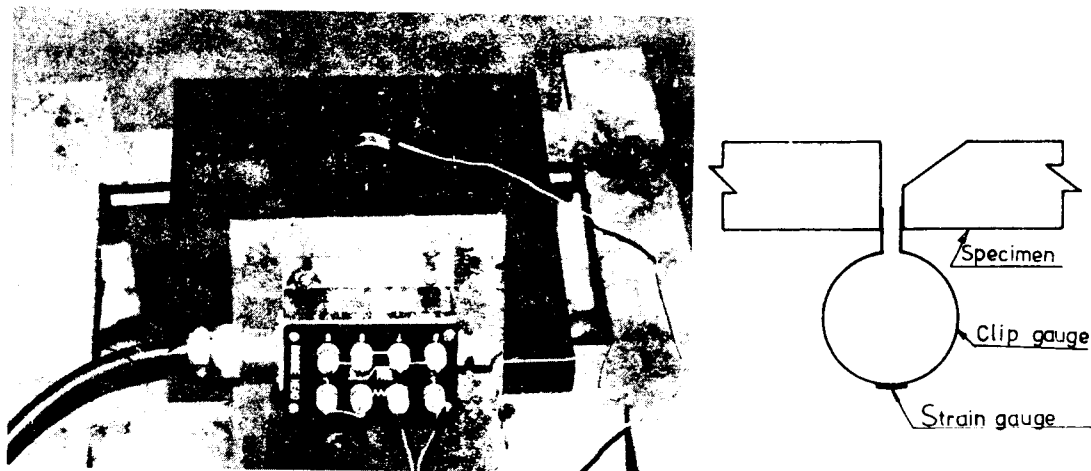


Fig.4. Apparatus of measuring of root cracking behaviour.

여 Recorder에 連續的으로 記錄되도록 함으로서 均열의 發生時期 및 傳播狀況이 把握되도록 하였다.

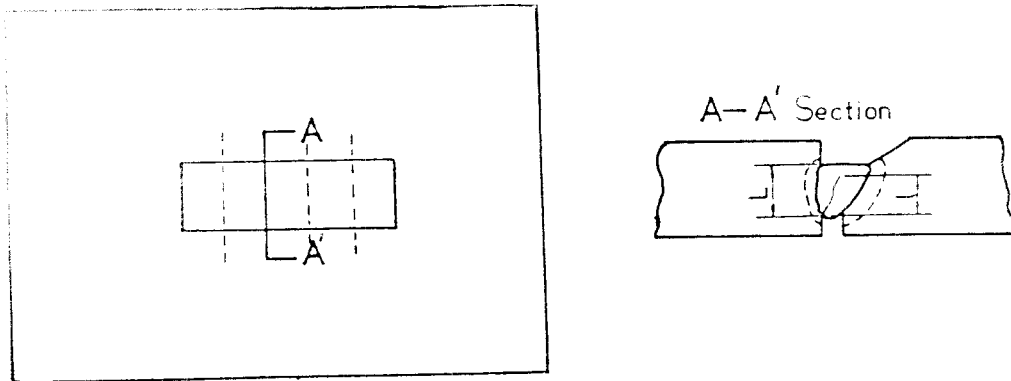


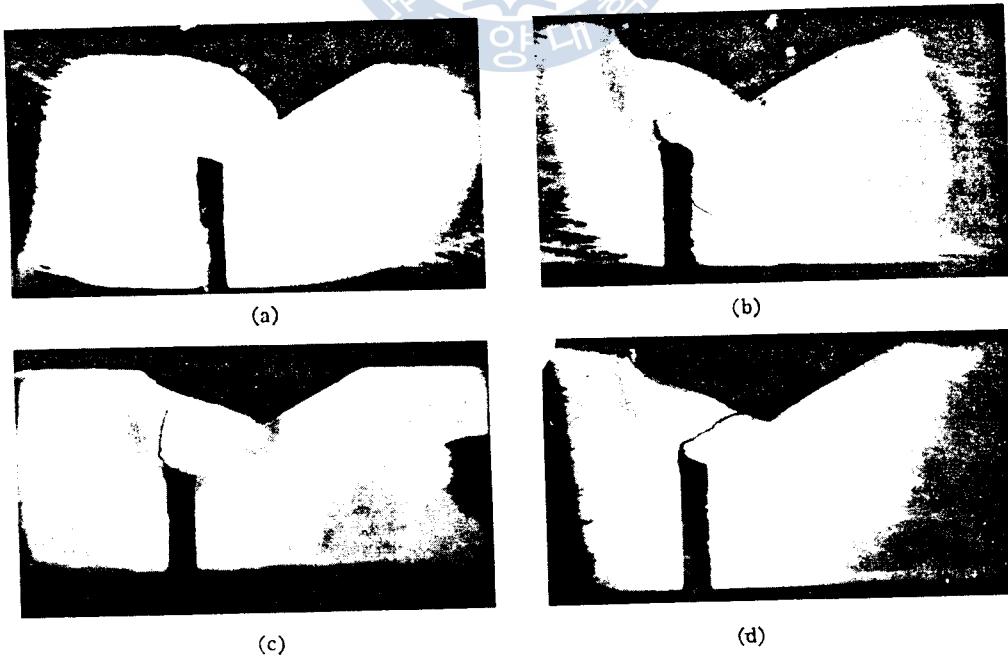
Fig. 5. Measurement of root cracking percentage.

試驗熔接部에 있어서의 熔接균열 發生率(weld cracking percentage)의 測定은 熔接後 48時間 放置한 후에 Fig.5와 같이 熔接部를 5개의 斷面으로 分割하여 各 斷面에 나타난 均열길이  $l$ 을 顯微鏡으로 測定하여 이를 脚長(Leg length)  $L$ 에 對한 100分率로 表示하고 이를 다시 5개의 斷面에 對한 平均値를 計算하여 均열發生率을 求하였다.

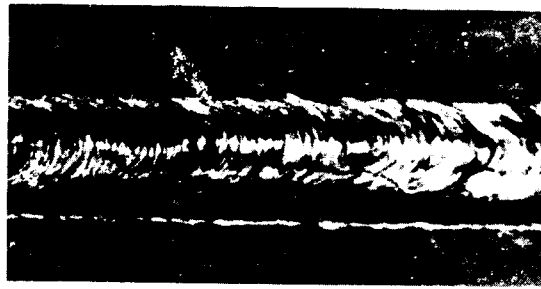
### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1. 熔接균열의 發生傳播舉動

Fig. 6은 SM58高張力鋼의 경우에 對하여 熔接後 48時間경과한 후에 熔接破斷面에 나타난 熔接低



Root crack.

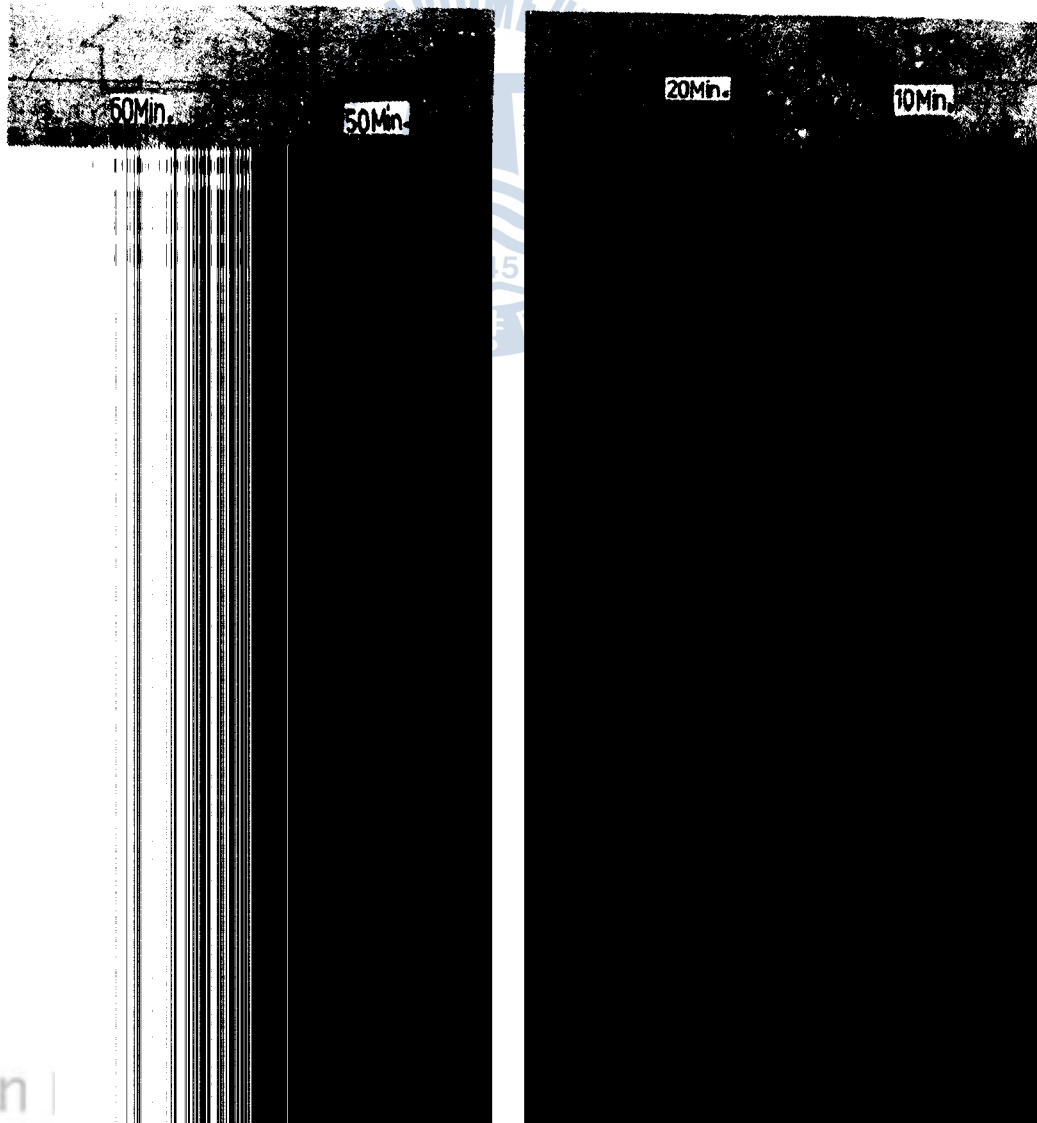


(e) Longitudinal crack.

Fig. 6. Shape of cold crack.

溫균열인 Root균열(a~d)과 Root균열이 더욱 進展하여 용접비이드 表面까지 到達했을때 비이드表面에 나타난 가로균열의 樣相(e)을 보이고 있다. 이 사진으로 부터 Root균열은 최초로 應力集中率이 가장 높은 Root部로 부터 發生하여 熔接本드部, 熔着金屬部로 傳播되고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 7은 SM58 高張力鋼과 SS41 軟鋼에 對하여 各種 熔接棒을 使用하여 試驗熔接後 1分 以





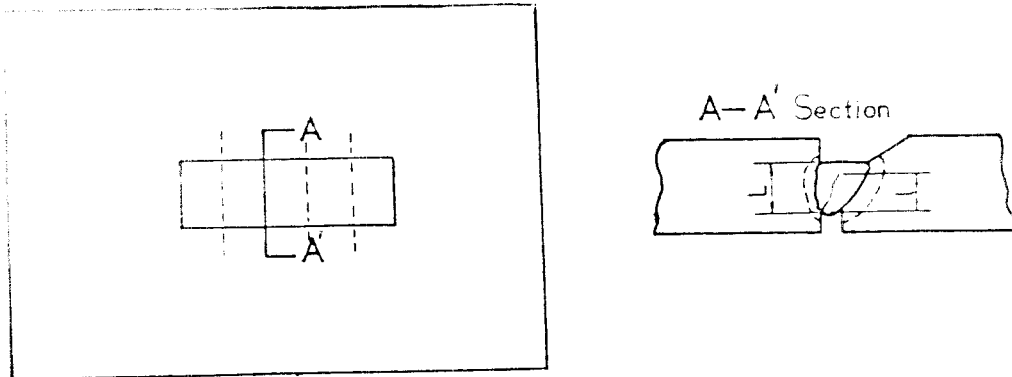


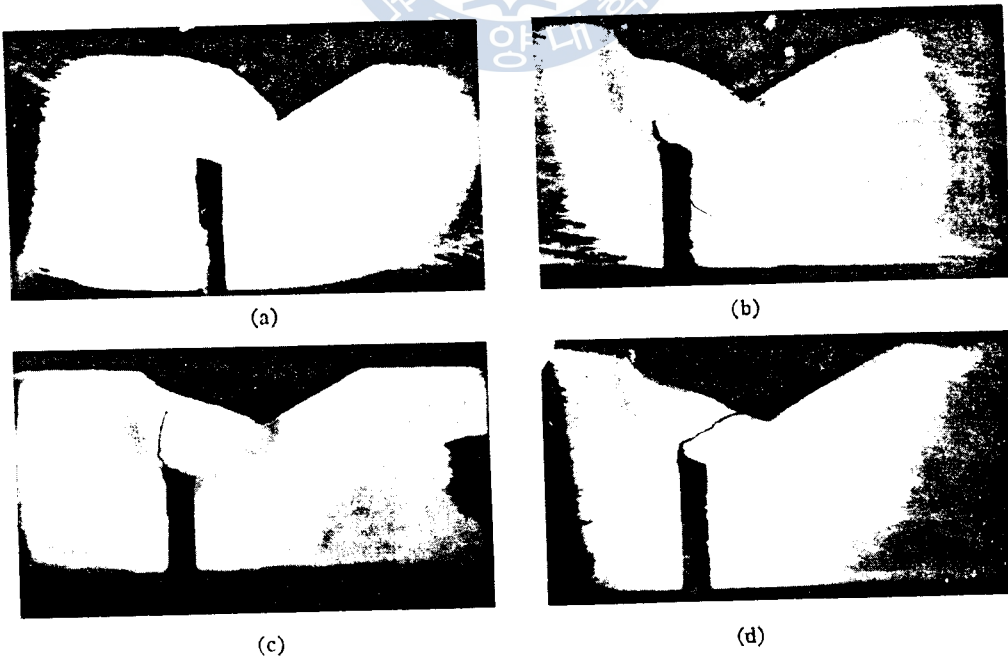
Fig. 5. Measurement of root cracking percentage.

試驗溶接部에 있어서의 溶接균열 發生率(weld cracking percentage)의 測定은 溶接後 48時間 放置한 후에 Fig.5와 같이 溶接部를 5개의 斷面으로 分割하여 各 斷面에 나타난 균열길이  $l$ 을 顯微鏡으로 測定하여 이를 脚長(Leg length)  $L$ 에 對한 100分率로 表示하고 이를 다시 5개의 斷面에 對한 平均値를 計算하여 均열發生率을 求하였다.

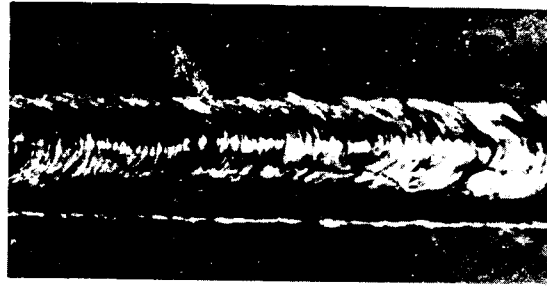
### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1. 溶接균열의 發生傳播舉動

Fig. 6은 SM58高張力鋼의 경우에 對하여 溶接後 48時間경과한 후에 溶接破斷面에 나타난 溶接低



Root crack.



(e) Longitudinal crack.

Fig. 6. Shape of cold crack.

溫균열인 Root균열(a~d)과 Root균열이 더욱 進展하여 용접비이드 表面까지 到達했을때 비이드表面에 나타난 가로균열의 樣相(e)을 보이고 있다. 이 사진으로 부터 Root균열은 최초로 應力集中率이 가장 높은 Root部로 부터 發生하여 熔着金屬部로 傳播되고 있음을 알 수 있다.

또한 Fig. 7은 SM58 高張力鋼과 SS41 軟鋼에 對하여 各種 熔接棒을 使用하여 試驗熔接後 1分 以

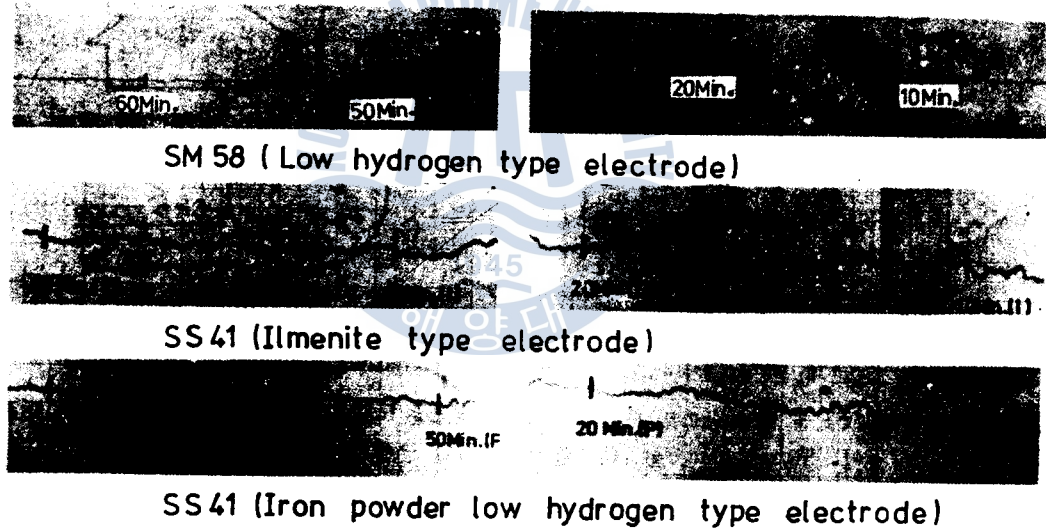


Fig. 7. Recording of root cracking behaviour.

內에 Root部 間격에 clip gauge를 삽입하여 冷却되어 가는 熔接部の Root間隔을 連續的으로 測定한 것이며 그 時間에 따른 間隔의 變化舉動을 보이고 있다. 이 結果에서 Root균열의 進展舉動은 다음과 같이 考察된다. 熔接後 熔着金屬의 凝固收縮은 板厚에 中心部로 부터 上部方向에 偏心되어 일어난다. 即 熔着金屬의 熔着量은 Fig. 6 (a)~(d)에 보이는 바와 같이 板厚에 中心部로 부터 上部表面을 向하여 많아지고 있으므로 이로 因해 熱變形 및 收縮量 또한 上部表面으로 갈수록 많이 發生한다. 따라서 이와같은 收縮變形의 不均衡으로 因해 熔接部에는 冷却過程과 더불어 板中心部の 下方으로 부터 上部表面으로 縮힘모우먼트가 작용하는 結果가 되고 이로 因해 clip gauge의 變位量이 크게 된다. Fig. 7에 있어서 Root間격의 變位曲線이 時間이 지남에 따라 윗쪽으로 치우쳐 가고 있음은 이것을 보이고 있다. 이러한 過程中 試驗熔接部인 Slit는 拘束試驗體의 中央에서 拘束狀態에 있으므로

로 Root부의 自由로운 收縮이 억제된다. 따라서 Root部에는 熔接 후 時間의 경과와 더불어 拘束應力이 發生하고 이러한 拘束應力이 熔着金屬의 引張強度 以上이 될때 均열이 發生한다. 이와같이 Root部에서 均열이 發生하면 前述한 收縮量의 不均衡으로 因해 生기는 板의 上方으로의 굽힘모우먼트 때문에 Root간격은 더욱 벌어지게 되고 그러므로 均열의 發生은 變位曲線에 작은 Peak점이 되어 나타난다. 이때 Peak점이 나타난 후에는 變位曲線은 다시 下降하여 Root간격이 좁아지고 있음을 보이고 있으나 이것은 순간적으로 均열이 發生, 傳播하므로써 板의 拘束力과 上部表面으로 作用하는 굽힘모우먼트間에 平衡關係가 다시 回復 維持되기 때문인 것으로 考察된다. 이와같이 平衡關係가 維持된 후 다시 收縮變形의 增加와 더불어 拘束力이 增加하고 이러한 拘束力이 熔着金屬의 機械的 特性值와 相問하여 一定한 限界值에 達하면 또다시 均열이 成長한다.

여기서 熔着金屬의 機械的 特性值는 熔着金屬의 要素量에 依해 결정되는 硬度 및 擴散性 水素에 따라서 熔着金屬의 脆化度에 依해 影響을 받는다. 따라서 Fig. 7의 Root간격의 變位曲線中에는 均열이 發生할때 마다 Peak점으로 나타나며 이러한 간헐적인 Peak점으로 부터 Root均열의 發生進展舉動을 追蹤할 수 있다.

Fig. 7에 依하면 各種 용접봉의 경우 共히 熔接後 最初의 두드러진 Peak점이 나타나기 까지 一定한 潛伏期間이 存在함을 알 수 있다. 또한 철분低水素系(Iron Powder Low hydrogen) 熔接棒의 경우엔 두드러지게 나타나는 바와같이 熔接後 一定時間이 경과한 후에는 Peak點은 거의 없어지고 安靜狀態를 보이고 있다. 以上과 같은 考察로 부터 熔接棒의 種類에 따라 약간의 差異가 있으나 熔接後 Root均열이 發生하기 까지 약 10分內외의 潛伏期間이 存在하며 일단 發生한 均열은 그 成長이 간헐적으로 이루어지고 이러한 간헐적인 成長운동은 熔接後 약 1時間 以內에 가장 活潑하게 進行되어 그 以後에는 거의 安靜狀態로 됨을 알 수 있다.

### 3.2. 均열先端에서의 水素 脆化 舉動

Fig. 8은 SM58 高張力鋼 熔接部 斷面의 Root均열 周圍에서 觀察된 銀點(Fish eye)으로 推測되는 것의 一部分을 보인 것이다. 이것은 熔接後 48時間 경과한 후에 斷面을 分割한 다음 Nital 腐蝕液에 依해 露出시킨 斷面이다. Fig. 8의 結果 Root均열 주위의 水素에 依한 局部的 脆化領域인 銀點은 均열 周圍에만 觀察되는 것으로 均열先端에서의 水素脆化舉動은 다음과 같이 考察된다. 一般적으로 水素는 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 轉位論的 機構에 입각하여 脆化를 일으킨다는 것은 잘 알려진 事實이다.<sup>9,10</sup> 따라서 拘束試驗熔接部の Root部에는 熔接後 冷却과 더불어 拘束應力이 增加하게 되고 이로 因해 一定한 潛伏期間동안 水素의 集積이 이루어져 脆化된다. 이와같이 脆化된 領域에 拘束應力이 限界值에 達하면 均열이 發生하며 일단 發生한 均열은 脆化된 領域을 쉽게 傳播한 後 정지한다. 그후 다시 一定한 潛伏期間에 걸쳐 水素의 集積이 이루어져 上述한 과정이 返復됨으로써 均열은 간헐적으로 進歩하게 된다.



Fig. 8. Fish eye around the root crack. ( $\times 50$ ).

Fig. 9는 熔接部の 擴散性 水素測定時 時間에 따른 水素擴散 學動을 보인 것이다. 熔接後 40時間 이 경과한 다음에도 水素擴散은 完滿하지만 계속되고 있다. 따라서 간헐적인 水素의 集積 및 脆化 學動은 40時間 以後까지도 계속되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 水素捕集器內에서 熔接後 1時間뒤 試驗片으로 부터 水素가 發生되어 上部로 浮上하고

로 Root부의 자유로운 收縮이 억제된다. 따라서 Root部에는 熔接 후 時間의 경과와 더불어 拘束應力이 發生하고 이러한 拘束應力이 熔着金屬의 引張強度 以上이 될때 均열이 發生한다. 이와같이 Root部에서 均열이 發生하면 前述한 收縮量의 不均衡으로 因해 生기는 板의 上方으로의 굽힘모우먼트 때문에 Root간격은 더욱 벌어지게 되고 그러므로 均열의 發生은 變位曲線에 작은 Peak점이 되어 나타난다. 이때 Peak점이 나타난 후에는 變位曲線은 다시 下降하여 Root간격이 좁아지고 있음을 보이고 있으나 이것은 순간적으로 均열이 發生, 傳播하므로써 板의 拘束力과 上部表面으로 作用하는 굽힘모우먼트間에 平衡關係가 다시 回復 維持되기 때문인 것으로 考察된다. 이와같이 平衡關係가 維持된 후 다시 收縮變形의 增加와 더불어 拘束力이 增加하고 이러한 拘束力이 熔着金屬의 機械的 特性值와 相關하여 一定한 限界值에 達하면 또다시 均열이 成長한다.

여기서 熔着金屬의 機械的 特性值는 熔着金屬의 炭素量에 依해 결정되는 硬度 및 擴散性 水素에 따른 熔着金屬의 脆化度에 依해 影響을 받는다. 따라서 Fig. 7의 Root간격의 變位曲線中에는 均열이 發生할때 마다 Peak점으로 나타나며 이러한 간헐적인 Peak점으로 부터 Root均열의 發生進展舉動을 推察할 수 있다.

Fig. 7에 의하면 各種 용접봉의 경우 共히 熔接後 最初의 두드러진 Peak점이 나타나기 까지 一定한 潜伏期間이 存在함을 알 수 있다. 또한 철분低水素系(Iron Powder Low hydrogen) 熔接棒의 경우엔 두드러지게 나타나는 바와같이 熔接後 一定時間이 경과한 후에는 Peak點은 거의 없어지고 安靜狀態를 보이고 있다. 以上과 같은 考察로 부터 熔接棒의 種類에 따라 약간의 差異가 있으나 熔接後 Root均열이 發生하기 까지 약 10分内外의 潜伏期間이 存在하며 일단 發生한 均열은 그 成長이 간헐적으로 이루어지고 이러한 간헐적인 成長운동은 熔接後 약 1時間 以內에 가장 活潑하게 進行되어 그 以後에는 거의 安靜狀態로 됨을 알 수 있다.

### 3.2. 均열先端에서의 水素 脆化 舉動

Fig. 8은 SM58 高張力鋼 熔接部 斷面의 Root均열 周圍에서 觀察된 銀點(Fish eye)으로 推測되는 것의 一部分을 보여 준 것이다. 이것은 熔接後 48時間 경과한 후에 斷面을 分割한 다음 Nital 腐蝕液에 依해 露出시킨 上面이다. Fig. 8의 結果 Root均열 주위의 水素에 依한 局部的 脆化領域인 銀點은 均열 周圍에 散在 觀察되는 것으로 均열先端에서의 水素脆化舉動은 다음과 같이 考察된다. 一般的으로 水素는 應力集中部의 空孔이나 非金屬性介在物의 周圍에 集中하여 壓力說 또는 轉位論的 機構에 依하여 水素脆화를 일으킨다는 것은 잘 알려진 事實이다.<sup>9,10</sup> 따라서 拘束試驗熔接部の Root部에는 熔接後 冷却과 더불어 拘束應力이 增加하게 되고 이로 因해 一定한 潜伏期間동안 水素의 集積이 이루어져 脆化된다. 이와같이 脆화된 領域에 拘束應力이 限界值에 達하면 均열이 發生하며 일단 發生한 均열은 脆화된 領域을 쉽게 傳播한 後 停止한다. 그후 다시 一定한 潜伏期間에 걸쳐 水素의 集積이 이루어져 上述한 과정이 回復됨으로써 均열은 간헐적으로 進行하게 된다.



Fig. 8. Fish eye around the root crack. ( $\times 50$ ).

Fig. 9는 용접부의 확산성 수소測定時 時間에 따른 수소擴散 舉動을 보인 것이다. 용接後 40時間이 경과한 다음에도 수소擴散은 완만하지만 계속되고 있다. 따라서 간헐적인 수소의 集積 및 脆化 舉動은 40時間 以後까지도 계속되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 수소捕集器內에서 용接後 1時間된 試驗片으로 부터 수소가 發生되어 上部로 浮上하고 있는 모양을 보인 것이다. 本 實驗에 있어서 Root균열 周圍의 Fish eye는 용接後 一定한 時間帶에 限해 觀察되고 있으나 이것은 이 時間帶에 수소의 集積이 이루어져 있다가 時間이 더욱 경과하면 수소가 再溶解하여 外部로 放出되기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 11은 용接低溫균열 周圍의 組織狀態를 보인 것으로 基地는 Bainite組織으로 균열은 粒界. 粒內의 어느 쪽에도 傳播되고 있음을 보이고 있다.



Fig. 10. Behaviour of hydrogen releasing from specimen in accumulator.

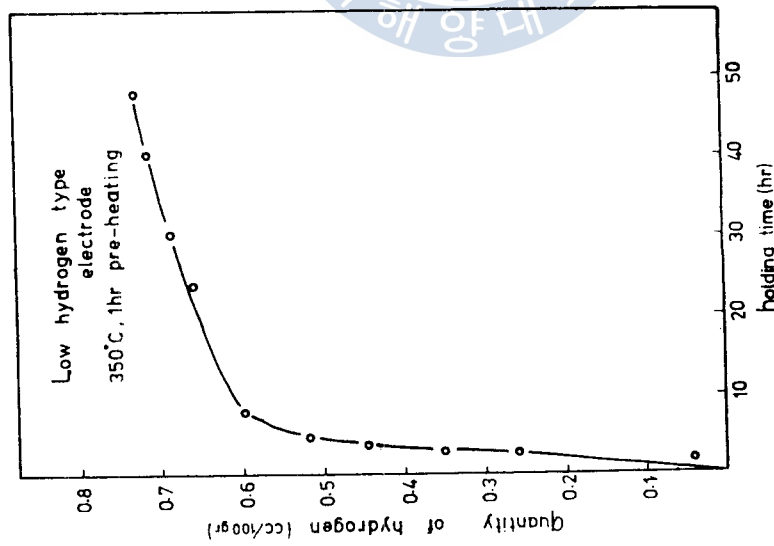
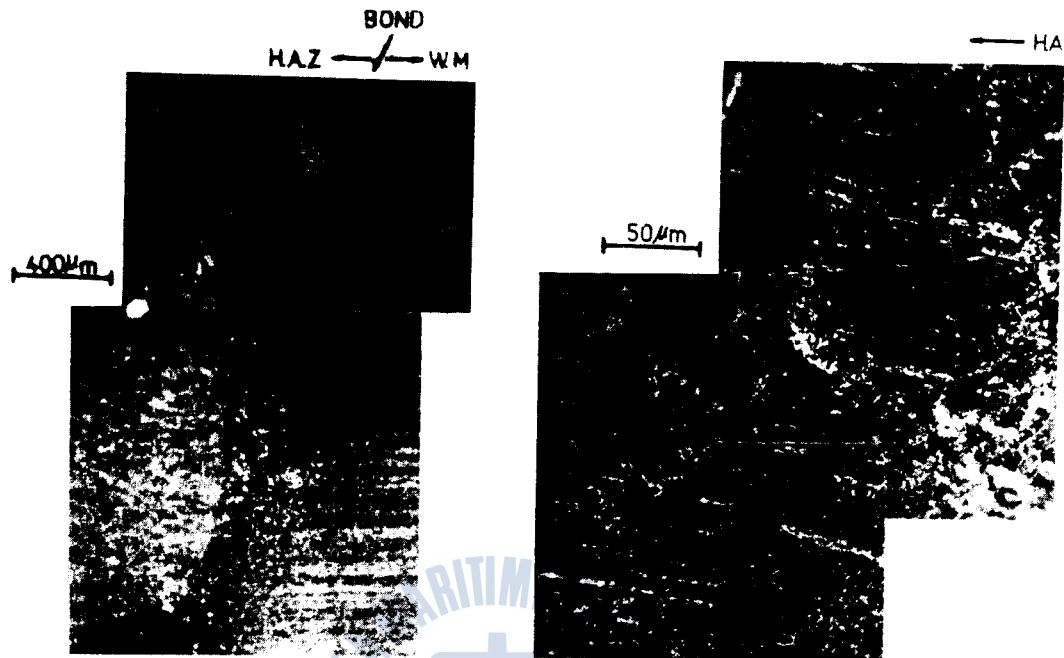


Fig. 9. Quantity of hydrogen VS. holding time in hydrogen accumulator.

Fig.11. Microstructure around root crack( $\times 200$ ).

### 3.3. Root균열에 미치는 Groove形狀의 영향

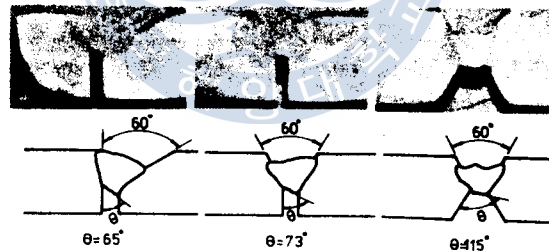


Fig.12. Effect of groove shape on stress concentration.

Fig. 12는 Root部の 應力集中率을 支配하는 溶入角( $\theta$ )이 Groove形狀에 따라 變化하는 模樣을 보인 것이다. 이것은 Groove角이 一定한 Single bevel(Y)型, Y型 및 X型 Groove의 拘束試驗片에 各各 一定한 熔接條件(熔接速度; 9.8cm/min, 熔接入熱; 25KJ/cm)으로 熔接한 후 그 斷面을 比較한 것이다. 이에 의하면 X型, Y型, Single bevel型 順으로 溶入角  $\theta$ 는 작아지고 있음을 나타내고 있다. 따라서 應力集中率은 Single bevel型, Y型, X型 順으로 낮아지며 Root균열의 發生率 또한 그러한 順으로 낮아짐을 推測할 수 있다.

### 3.4. 熔接棒의 管理制御와 균열發生率과의 相關性

Fig. 13과 Fig. 14는 各種 熔接棒을 乾燥爐內에서 規定乾燥條件으로 乾燥後 各各 50%와 80%의 濕



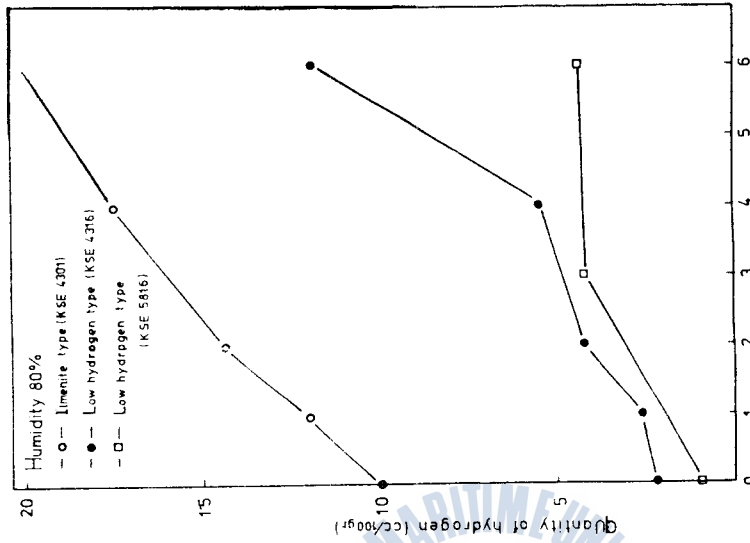


Fig. 14. Quantity of hydrogen VS. leaving time after preheating of electrode.

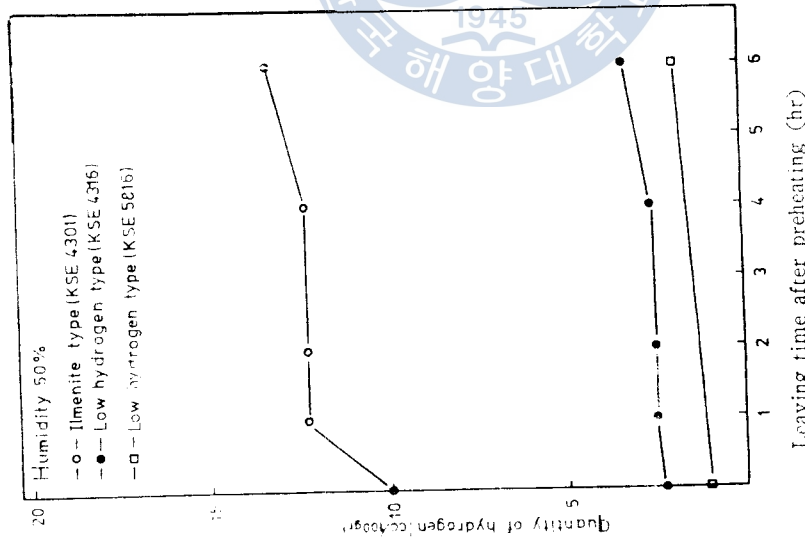


Fig. 13. Quantity of hydrogen VS. leaving time after preheating of electrode.

度霧潤氣에서 放置하여 放置時間에 따르는 熔接金屬中の 擴散性 水素量의 變化를 보인 것이다. 이에 依하면 放置時間 및 放置環境에 따라 熔着金屬中の 擴散性 水素量은 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 即, 低水素系 熔接棒을 使用하는 境遇에도 80% 濕度霧潤氣에서 1時間 以上 放置하면 擴散性水素量은 거의 2倍로, 2時間 以上 放置하면 3倍로, 3時間 以上이면 거의 4倍 정도로 많아짐을 볼 수 있다.

또한 Fig. 15는 SM58 高張力鋼의 경우에 對해 擴散性 水素量의 變化에 따르는 Root균열 發生率의

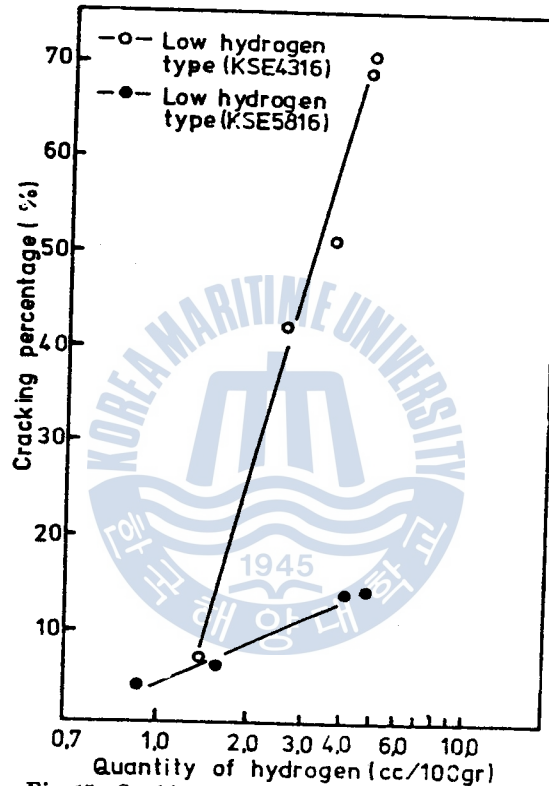


Fig. 15. Cracking percentage VS. quantity of hydrogen.

變化를 보인 것이다, 熔接棒의 種類에 따라 變化가 있으나 擴散性 水素와 Root균열 發生率間의 關係는 直線關係에 있으며 低水素系 高張力鋼用 58kg/mm<sup>2</sup>級 熔接棒을 使用했을 경우 擴散性 水素가 增加함에 따라 균열發生率도 같은 比率로 增加해가고 있음을 알 수가 있다.

이때 軟鋼用 43kg/mm<sup>2</sup>級 熔接棒을 使用하였을 때는 水素量과 균열發生率은 더욱 커진다. 以上과 같은 考察에서 熔接棒의 건조후 放置時間 및 放置環境의 制御는 熔接균열 防止上 매우 重要한 要素임을 알 수 있다.

### 3.5. 균열發生의 防止

Root균열 發生感受性을 나타내는 各種 Parameter들이 提案되어 있으나<sup>11,12,13)</sup> 그 中에서도 百合鋼 등이 提案한 다음과 같은  $P_{HM}$  Parameter가 가장 有力視되고 있다.<sup>13)</sup>

$$P_{HM} = P_{CM} + 0.075 \log H + 0.15 \log (0.017 \cdot \alpha \cdot \sigma_w) \quad (5)$$

여기서  $P_{CM}$  = 熔接 均열 感受性 組成

$H$  = 그리세린법에 의해 포집한 擴散性 水素量(cc/100gr)

$\alpha$  = Root部的 應力集中率로서 Single bevel(V) groove의 경우 應力集中率은 佐藤等の 有限要素法에 의한 解析結果 5.8이다.<sup>14)</sup>

$\sigma_w$  = 拘束度  $K_t$ 와 熔接金屬의 降伏應力  $\sigma_Y$ 의 函數로서 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_w = 0.050 K_t \quad (K_t \leq 20 \sigma_Y)$$

$$\sigma_w = \sigma_Y + 0.005 (K_t - 20 \sigma_Y) \quad (K_t > 20 \sigma_Y)$$

Fig. 16은 國產 SM58 高張力鋼材에 對해 熔接 均열 感受性指數  $P_{HM}$ 과 熔接 均열 發生率과의 關係를

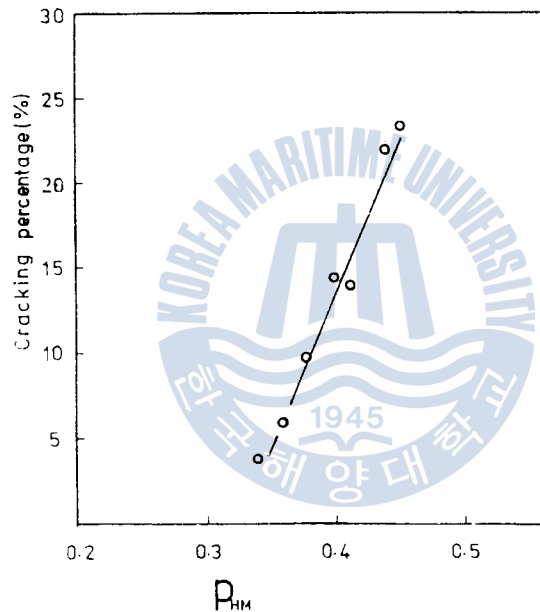


Fig. 16. Cracking percentage VS.  $P_{HM}$ . (SM58).

보인 것이다. 이것은 拘束試驗體의 形狀을 一定하게 함으로써 拘束度  $K_t$ 와 Root部的 應力集中率  $\alpha$ 는 一定하게 하고 母材의 成分에 따르는  $P_{CM}$  및 熔接棒 건조후의 放置時間과 環境에 따르는 擴散性 水素量  $H$ 의 變化에 의해  $P_{HM}$ 을 變化시켜 가며 均열發生率을 調査한 것이다. 本 實驗에서 使用한 拘束試驗體의 拘束度는  $2205 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$ 로 船體, 橋梁, 建築, 鐵骨, 球形tank 등의 實際 熔接構造物 製作時 예상되는 拘束條件<sup>15)</sup>을 充分히 再現하고 있다. 따라서 Fig. 16에 있어서  $P_{HM}$ 의 範圍는 SM58 高張力鋼과 國產 高張力鋼用 低水素系 熔接棒을 利用하여 實際 構造物 製作時 예상되는  $P_{HM}$  範圍에 있다고 볼 수 있다. 이에 反하면  $P_{HM}$ 값과 熔接 均열 發生率과의 關係는 좋은 直線性을 보이고 있으며 따라서  $P_{HM}$ 값에 의해 Root 均열 發生感受性을 評價할 수 있음을 보이고 있다.

Fig. 17은 SM58 高張力鋼의 熔接構造物 製作時 예상되는 가장 가혹한  $P_{HM}$ 값 0.43에 對하여 後熱 溫度와 均열發生率과의 關係를 보인 것으로 後熱을 實施하지 않은 경우에는 均열發生率이 24%이었던 50℃, 100℃로 後熱을 行하였을 때는 各各 均열發生率이 2%, 0%로 減少됨을 보이고 있다.

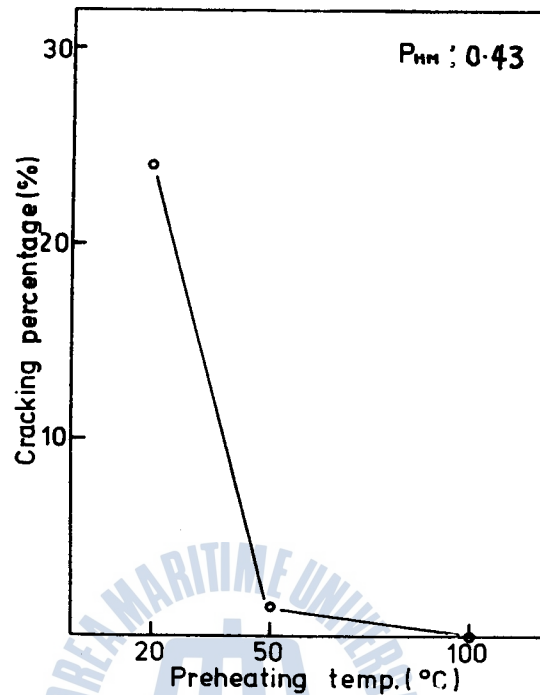


Fig. 17. Preheating temperature for the purpose of prevention of root crack. (SM58)

여기서 豫熱條件은 산소, 아세틸렌 切斷用 토오치를 利用하여 熔接部를 中心으로 幅 100mm 面積內를 均一하게 豫熱되도록 하였으며 토오치를 移動하는 速度를 變化시킴으로써 豫熱溫度를 任意로 變化시켰다.

Fig. 18에서 (a)는 豫熱하지 않고 용접한 후 용접부의 破斷面을 보이며 (b)는 100°C로 豫熱 후 용접한 破斷面을 보인 것이다. 이에 依하면 高張力鋼 熔接構造物 製作時 豫상되는 最大  $P_{HM}$ 값에 對해



(a) Without preheating

(b) Preheating temp. 100°C

Fig. 18. Comparison of root crack with and without preheating. ( $\times 25$ )

어도 100°C 程度의 豫熱溫度로 Root균열이 防止될 수 있다는 것을 보인다.

Fig. 19는 豫熱을 하지 않은 경우와 100°C로 豫熱한 경우의 冷却速度的 差異를 보인 것으로 이에

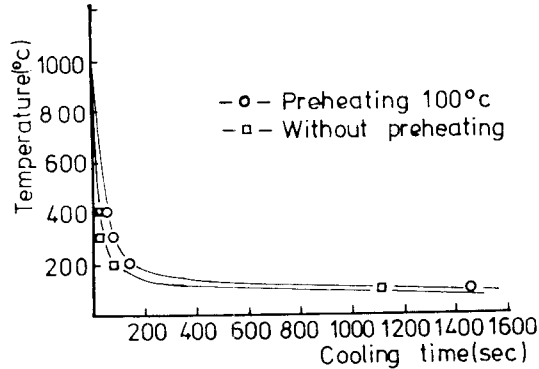


Fig. 19. Comparison of cooling rate of heat affected zone with and without preheating.

依하면 特히 Ms點 附近에서 豫熱效果로 因해 冷却速度가 약간 완만하게 되는 경향을 보이고 있다.

또한 Fig. 20은 熔接部의 硬度 變化에 미치는 豫熱의 影響을 調査하기 爲해 一般의으로 硬度가 가장 높은 部位인 熔接部에 對해 豫熱을 實施한 경우와 豫熱을 實施하지 않은 경우를 微小 硬度試驗機에 依해 比較한 것이다. 이에 依하면 豫熱에 依해 熔接部는 全體的으로 硬度가 낮아짐을 보이고 있다.

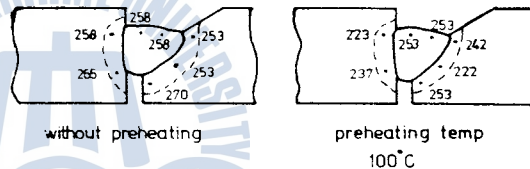


Fig. 20. Comparison of hardness at the welding joint with and without preheating. (SM58)

一般의으로 一定한 熔接균열 發生感受性指數  $P_{HM}$ 값에 對한 熔接金屬 및 熱影響部의 硬化性은 熔接後 冷却速度에 依해 支配된다. 따라서 豫熱效果는 熔接後 冷却速度를 완만하게 하여 熔接部의 硬化性을 低下시켜 이로 因해 Root균열의 發生 阻止效果를 가져오는 것으로 考察된다.

#### 4. 結 論

國產 SM58 高張力鋼을 中心으로 鋼材 熔接時 發生하는 低溫 Root균열의 發生, 傳播機構에 對해 論討하였다. 또한 船舶, 橋梁, 建築 等の 熔接構造物 製作時 熔接施工者의 立場에서 Groove形狀, 熔接棒의 管理制御가 低溫 Root균열發生에 미치는 影響을 定量的으로 分析하였으며, 國產 高張力鋼材와 熔接材料에 對한 實際 構造物 製作時 예상되는 條件을 再現하여 熔接균열 發生感受性을 評價하고 이러한 균열을 阻止하기 爲한 具體的인 豫熱溫度를 提示하였다.

重要한 結果를 整理하면 다음과 같다.

(1) Root部에서 發生되는 低溫균열은 熔接後 一定한 潛伏期間이 지나서 發生하여 간헐적으로 進展되며 이러한 간헐적인 進展舉動은 熔接後 1時間 以內에 가장 活潑하다.

(2) Root균열 周圍의 水素脆化 領域인 銀點은 熔接斷面의 Etching에 依해서도 觀察이 可能하며 이러한 銀點은 擴散性 水素量과 比例해서 많아진다.

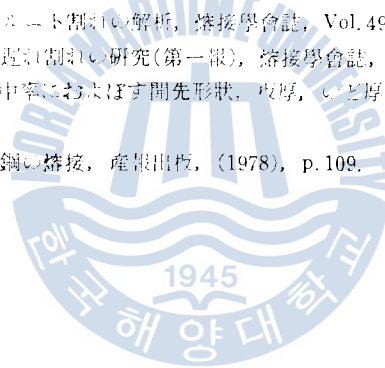
(3) 熔接棒의 건조후 放置時間 및 放置環境의 制御는 熔接균열의 防止上 매우 重要한 要素이며 規定條件으로 熔接棒을 건조한 後 80% 습도 분위기에서 1時間 以上 防置하면 低水素系 熔接棒이라도 균열發生率은 2倍로 높아진다.

(4) 20mm 두께인 SM58 高張力鋼을 利用하여 熔接構造物을 製作할 경우 低溫균열은 100℃程度의 豫熱溫度로 充分히 防止될 수 있다.



## 參 考 文 獻

1. 稻垣, 伊藤: 高張力鋼, 低溫用鋼の熔接, 産報出版(1978), p.120.
2. 稻垣, 伊藤: 高張力鋼, 低溫用鋼の熔接, 産報出版(1978), p.102.
3. 中山, 橋本, 稲垣: 建築鋼構造継手の各種 熔接方法における熔接割れの研究(第一報), 熔接學會誌 Vol. 45, (1974), No.11, p.1163.
4. 幸田, 荒木: 鋼, 鉄鋼(鋼材)の破壊と破壊形態の關係, 熔接學會誌 Vol.45, (1976), No.12, p.985.
5. 稲垣: 熔接試験, 鋼材の構造防止対策, 日本學術會議熔接研究連絡委員會, 熔接Symposium資料(1977), p.1.
6. 鈴木, 百合同: 熔接, 鋼材による延び割れ, 鐵と鋼 Vol.67,(1981), No.10, p.1657.
7. 荒木, 金子, 等: 鐵鋼の熔接, 朝倉書店, (1974), p.151~158.
8. 中山, 橋田, 全: 鋼の熔接継手の拘束度, 熔接學會誌 Vol.48, (1979), No.10, p.851.
9. C.A.Zapffe, C.E.Sims, Hydrogen embrittlement, internal stress and defects in steel Transaction of AIME, Vol.43, (1943).
10. 李在植: 鋼의 熔接 靑銅의 靑銅 靑銅의 靑銅 靑銅의 靑銅, 靑銅靑銅靑銅靑銅, Vol.9(1980), No.3, p.1.
11. 伊藤, 別所: 高張力鋼, 熔接割れ感受性指數について, 熔接學會誌, Vol.37, (1968), No.9, p.983.
12. 鈴木, 新: 靑銅指數Piによるスロット割れの解析, 熔接學會誌, Vol.49, (1980), No.11, p.737.
13. 百合同, 矢野, 等: 鋼材の熔接靑銅割れの研究(第一報), 熔接學會誌, Vol.48, (1979), No.12, p.1028.
14. 佐藤, 寺崎: スロット部, 应力集中率におよぼす開先形狀, 皮厚, Cと厚, スロット角度の影響, 熔接學會誌, Vol.48, (1979), No.5, p.298.
15. 稻垣, 伊藤: 高張力鋼, 低溫用鋼の熔接, 産報出版, (1978), p.109.



# 海洋構造物用 HT50 高張力鋼의 熔接 部位의 環境에 따른 크랙 傳播特性에 관한 研究

金 鎮 京

A Study on the Crack Propagation Characteristics of  
Weldments of High Tensile Steel HT50 for Marine  
Structures under Various Circumstances

*Kim Jingyeong.*

〈目 次〉

- |              |        |
|--------------|--------|
| 1. 序 論       | 4. 結 論 |
| 2. 實驗方法      | 參考 文獻  |
| 3. 實驗結果 및 考察 | 附 錄    |

## Abstract

The fatigue crack propagation rates were investigated on the notched welding specimens under such various circumstances as in air, in sea water and under cathodic protection in sea water for SS41 and SM50A steel with the plane bending fatigue machine,