

◎ 論 文

API 5LB鋼管의 高周波電氣抵抗熔接部에 관한 破壞靱性 評價<sup>+</sup>

吳世旭\* · 尹漢基\*\* · 安啓元\*\*\*

Evaluation of Fracture Toughness on High Frequency Electric Resistance Welded API 5LB Steel Pipe

Sae-Wook Oh, Han-Gi Yoon and Kye-Won Ahn

**Key Words;**  $J_{1C}$ (彈塑性破壞靱性值), R-Curve (R曲線), Stretched Zone (스트레치 존); Blunting Line (鈍化直線), Critical Stretched Zone Width(限界 스트레치 존), Heat Affected Zone(熱影響部)

Abstract

The evaluation of the elastic-plastic fracture toughness  $J_{1C}$  was performed on the center of weld metal (CWM), the heat affected zone (HAZ) and the base metal (BM) of API 5LB steel pipes welded by the high frequency electric resistance welding. The  $J_{1C}$  was evaluated by the JSME R-Curve and JSME SZW methods using the smooth and side-grooved specimens.

The results are as follows;

- (1) The  $J_{1C}$  values by the SZW method are overestimated as compared with those by the R-curve method, because the micro-crack is formed as SZW increase with the deformation at SZ after initiation of the ductile crack.
- (2) The average of  $J_{1C}$  values by the R-curve and the SZW methods in side-grooved specimens tended to decrease in comparison with smooth specimens 9.42% at CWM, 4.2% at HAZ, 23.2% at BM, respectively.
- (3) The boundary of the fatigue pre-crack, stretched zone, and dimple regions appeared more clearly in side-grooved specimens, for the slight change of SZW in the direction of the plate thickness, as compared with smooth specimens.

1. 序 論

鋼管은 天然가스, 原油, 물 및 酸性가스 등의 流體輸送과 寒冷地輸送 및 슬러지 輸送에 이르기까지 그 用途 및 使用範圍가 擴大하고 大形化 趨勢에 있다. 또한 고압화로 인한 鋼管의 不安定 延性破壞 事故가 빈번히 發生하고 있으므로 鋼管材料의 高強度 및 強靱性이 要求된다. 最近 鋼管은 Joule과 Thomson에 의하여 考案된 高周波電氣抵抗熔接(high frequency electric resistance welding, HFERW)<sup>1)</sup>에 의하

여 製造되고 있다. HFERW 鋼管의 熔接缺陷方向은 板面에 垂直이며 熔接中の 엇갯(upset)에 의해 平面的인 形狀으로 나타나기 때문에 缺陷의 檢出이 매우 어려우며, 이와 같은 熔接缺陷이 熔接部에 存在하면 破壞에 대한 抵抗은 急激히 減少되고 熔接部의 靱性이 低下된다.<sup>2)</sup> 또한 熔接部는 熔接時 發生된 熱의 影響때문에 脆化되므로 熔接部의 組織 改善을 위해서 後熱處理(post weld heat treatment)<sup>3)</sup>에 의하여 延性, 低溫靱性 및 耐蝕性 등을 向上시키고 있다. 이들 破壞靱性評價에 있어서 Rice<sup>4,5)</sup>에 의한  $J$  積分

<sup>+</sup> 1986年度 韓國海洋工學會 秋季學術大會 發表(1986年 12月)

\* 正會員, 東亞大學校 工科大學 機械工學科

\*\* 正會員, 東義大學校 工科大學 機械設計學科

\*\*\* 正會員, 韓國鋼管

개념은 Begley와 Landes 등<sup>6,7)</sup>에 의하여 彈塑性 破壞 靱性值  $J_{1c}$  개념으로 導入되어 그 有效性이 確立되었다. Ohji<sup>8)</sup> 및 Oh<sup>9)</sup> 등은 ASTM E 813-81<sup>10)</sup> 規定의 R曲線法과 JSME S 001-81<sup>11)</sup> 規定의 R曲線法 및 스트레치 존(stretched zone, SZ)法에 대하여  $J_{1c}$ 值를 比較 評價하였다.

API(American Petroleum Institute)規格에서 規定하고 있는 鋼管의 機械的 性質은 V-노치 衝擊試驗, DWT(T(drop weight tear test) 등에 의해 評價하고 있으나 이것은 단순히 品質管理試驗으로서 遂行되고 있다. 實際적으로 重要的 ことは 破壞에 대한 抵抗值이므로 靱性評價의 必要性이 要求된다.

本 研究에서는 熱間壓延鋼帶를 實用狀態의 HFERW로 製造한 API 5 LB 鋼管의 熔接金屬部, 熱影響部 및 母材部에 대하여 硬度變化와 衝擊 에너지 變化를 實驗 考察하고, 平滑 및 側面홈 CT試驗片을 사용하여 JSME S 001-81 規定의 R曲線法과 스트레치 존法에 따라 破壞靱性值  $J_{1c}$ 을 구하고 그 有效性에 대하여 考察하였다.

## 2. 試驗片 및 實驗方法

### 2.1 試驗片 및 實驗裝置

本 實驗에 使用한 素材는 PLB 2540×12.5t(mm)의 熱間壓延鋼帶를 高周波電氣抵抗熔接한 API 5LB 鋼管으로서 母材 및 熔接材試驗片의 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 1, Table 2와 같다. 高周波電氣抵抗熔接(HFERW) 조건은 Table 3과 같으며 HF-ERW에 있어서 給電用 接觸子(contact tip)를 利用하

고 450kHz 전후의 高周波電流를 直接供給하였으며 熔着面의 接觸抵抗熱에 의한 熔融과 同時に 壓着하였다.

衝擊試驗片과 CTS(compact tension specimen)의 採取는 Fig. 1과 같이 T-L方向으로 選擇하였으며, 熔接方向에 따라 熔接金屬部(CWM), 熱影響部(HAZ) 및 母材部(BM)에 노치를 加工한 形狀과 치수는 ASTM E 813-81 規定에 따라 Fig. 2와 같이 製作하였다.

Fig. 2의 (A)는 平滑 CTS이고 (B)는 側面홈 CTS이다. 母材와 熔接材에 대한 機械的 性質은 반응재

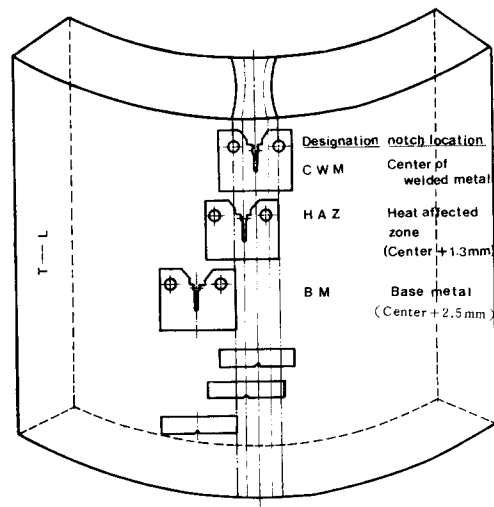


Fig. 1 Various notch locations with respect to weld geometry and their designation

Table 1 Chemical composition ( $W_i$ , %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni
Base metal	0.2161	0.0953	0.823	0.0116	0.0000	0.0963
Welded metal	0.2191	0.0965	0.832	0.0135	0.0005	0.0973

Table 2 Mechanical properties

Material	Tensile strength $\sigma_u$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Flow stress $(\sigma_y + \sigma_u)/2$ , $\sigma_{fs}$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)
Base metal	484.5	414.5	449.5	34.7
Welded metal	581.3	511.0	546.2	34.0

Table 3 Welding condition

Line speed (m/min)	Induction voltage regulation(V)	Plate voltage (kV)	Plate current (A)	Grid current (A)	Welding temperature (°C)	Post annealing temperature (°C)	Heat coefficient	Pipe thickness (mm)
3	2800	10	19	1.8	1200-1300	850	5.07	12.5

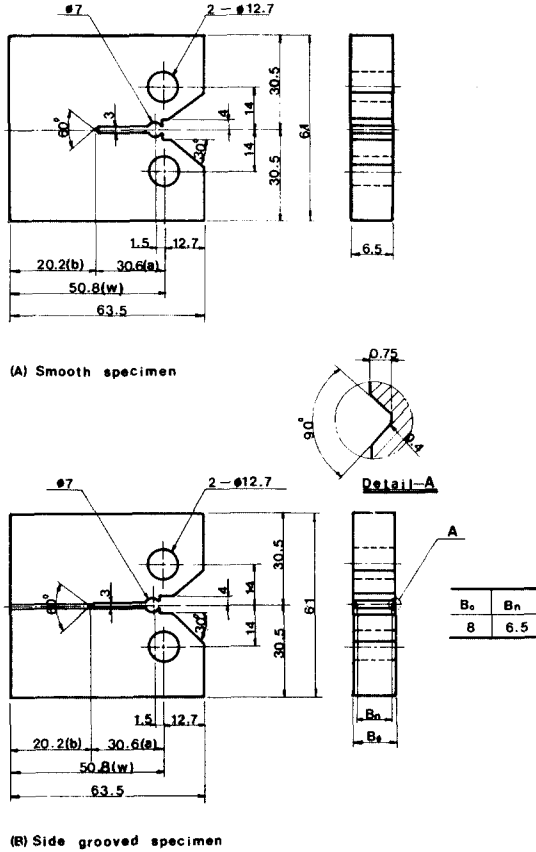


Fig. 2 Configuration and dimensions of compact tension specimen

로 試驗機(Instron model 1137, 15tonf)로 구하였으며 衝擊試驗은 모델 TMT-111을 사용하였다. CTS의 크랙插入과 破壞靱性 試驗은 電氣油壓 서어보식 萬能疲勞試驗機(Tensilon model, 10tonf)를 사용하였다. 크랙길이를 測定하기 위하여 두대의 移動式 望遠顯微鏡(倍率:×25)을 試驗片의 兩側面에 배치하여 表面上的 크랙길이를 測定하였으며 内部 크랙길이는 試驗片破斷後 比較器(倍率:×10)를 사용하여 測定하였다. SZW(stretched zone width)는 走査電子顯微鏡(SEM)으로 測定하였다.



Photo. 1 Change of continuous micro-structure from weld metal to base metal in API 5LB

## 2.2 實驗方法

豫크랙 插入은 大氣中 室溫에서 應力比(R) 0.05, 周波數 20Hz, 荷重波形은 sine波로서 1次的으로 노치先端으로부터 1mm까지 荷重  $P_1=1474N$ 로, 2次로  $P_2=940N$ 로 0.6mm만큼 더 插入하였다. 破壞靱性試驗에서 荷重-荷重線變位는 X-Y記錄計로 기록하였으며 크랙길이 增分  $\Delta a$ 의 마야킹(marking)은 300°C에서 10分間 히트 틴팅(heat tinting)한 후 過荷重으로 破壞하였다. 破壞靱性值  $J$ 값은 Merkle-Corten<sup>11)</sup>의 簡便式을 使用하여 計算하였다.

$$J = (A/B \cdot b) f(a_0/W) \quad (1)$$

$$f(a_0/W) = 2[(1+\alpha)/(1+\alpha^2)]$$

$$\alpha = [(2a_0/b)^2 + 2(2a_0/b) + 2]^{\frac{1}{2}} - (2a_0/b + 1)$$

여기서

A : 荷重-荷重線變位曲線 아래의 面積(KJ)

B : CT試驗片의 두께(mm) (側面홈이 있는 경우는  $B_{net}$ )

b : 리가멘트(ligament)폭,  $W-a_0$ (mm)

W : CT試驗片의 폭(mm)

$a_0$  : 크랙길이(mm)

JSME S 001-81規定에 따라 크랙길이 增分  $\Delta a$ 는 試驗片 두께의 3/8~5/8部分을 3點 測定하여 다음과 같이 平均值를 구하였다.

$$\Delta a = [\Delta a(3/8) + \Delta a(4/8) + \Delta a(5/8)]/3 \quad (2)$$

## 3. 實驗結果 및 考察

### 3.1 熔接部 組織과 硬度變化

Photo. 1은 API 5LB 鋼管의 HFERW 후 850°C에서 熔接後熱處理(post weld heat treatment, PWHT)를 實施한 熔接部의 CWM, HAZ 및 BM에 대한 顯微鏡組織을 나타내었다. Photo. 2는 이 組織을 擴大한 것으로 (a)에서 보던 熔接部 中心에 페라이트가 많이 散在된 본드線(bond line)이 나타나 있으며 오픈 파이프 에지(open pipe edge)端面이 融点까지 加熱되어 壓接된 것을 나타내고 있다.

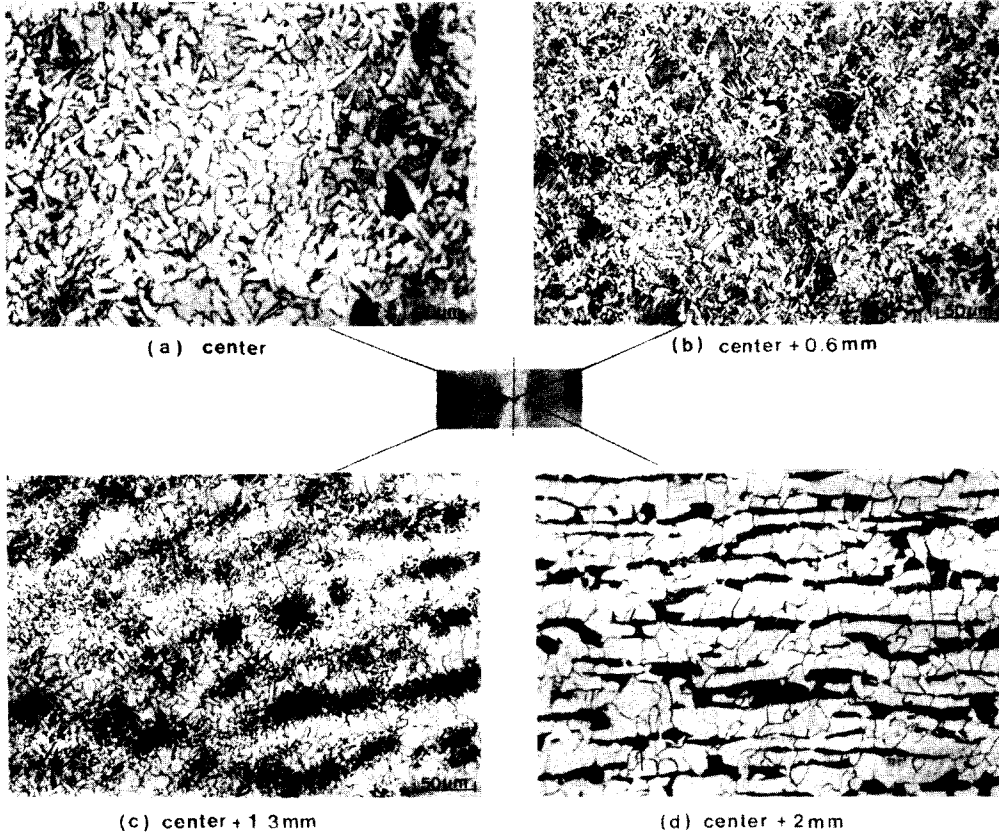


Photo.2 Micro-structure of weld metal in API 5 LB

熔接部の熱影響部는 장구形的 過熱領域을 나타내었으며 이 形狀은 高周波電氣抵抗熔接의 特徵으로서 高周波電流의 近接效果와 表皮效果에 따른 것이다.<sup>12)</sup> (b)는 熔接部 中心에서 0.6mm 떨어진 본드線 (bond line) 근처의 熱影響部로서 針狀 페라이트와 微細 퍼얼라이트로 이루어진 組織이며 高溫에서 加熱된 것을 나타내고 있다. (c)는 熔接部 中心에서 1.3mm 떨어진 熱影響部의 가장자리 部分으로서 高周波抵抗 加熱中 퍼얼라이트가 部分的으로 相變化하였다가 PWHT시에 다시 퍼얼라이트로 變換된 것을 볼 수 있다.<sup>13)</sup> 즉 母材에 가까워 질수록 微細한 組織으로 되어 있다. (d)는 熔接部 中心에서 2mm 이상 떨어진 母材의 組織으로서 熱間壓延鋼帶의 典型的인 組織을 나타내고 있다.

Fig.3은 熔接部의 中心部에서부터 硬度變化를 測定한 結果이다. 硬度測定에서 試驗荷重은 300gf, 作動時間은 20초로 하여 測定한 結果는 CWM의 Hv=159, HAZ의 Hv=175 및 BM의 Hv=168이다. CWM에서 HAZ로 갈수록 硬度는 增加하나 1.4mm 부근에서 硬度値가 떨어져면서 母材의 硬度値에 接近해 가

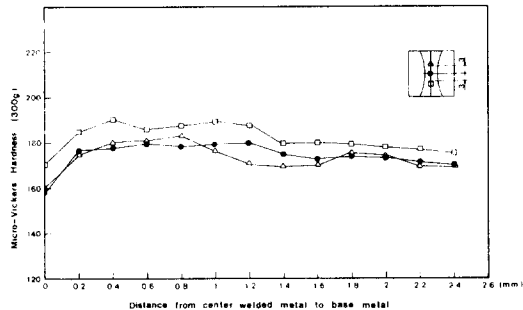


Fig. 3 Distribution of micro-vickers hardness across the weld interface in API 5 LB

는 分布를 보이고 있다.

### 3.2 衝擊에너지의 變化

노치 位置를 熔接部 中心으로부터 變化시킨 試驗片을 常溫에서 衝擊試驗한 結果를 Fig. 4에 表示하였다. 여기서, CWM의 衝擊値  $u=100.94 \text{ Joule}$ 이고 HAZ의  $u=142.1 \text{ Joule}$ , BM의  $u=98.0 \text{ Joule}$ 이다. Photo.3은 熔接部 中心으로부터 0.6, 1.3 및 2mm 떨어진 部分의 衝擊試片 破斷面과 電子顯微鏡 寫眞이다.

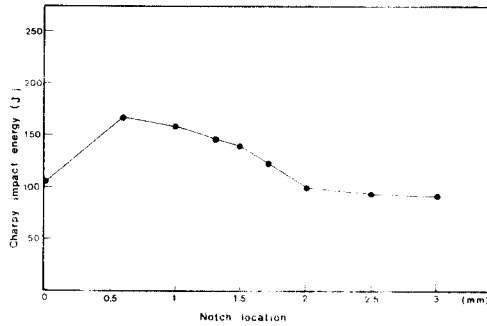


Fig. 4 Variation of Charpy impact values depending on the notch location in API 5LB weld metal

(a)에서 CWM의 組織은 壁開面의 脆性破壞樣相을 보이며, (b)에서의 HAZ 組織도 역시 脆性破壞를 보이나 粒界의 크기가 微細하게 나타났다. (c)에서는 熔接部로부터 1.3mm 떨어진 HAZ의 組織으로서 딴플(dimple)에 의한 延性破壞現象을 나타내었다. (d)에서는 熔接部로부터 2mm 떨어진 BM의 組織으로서 딴플(dimple)은 HAZ 部分에서 보다 粗大하였으며 延性破壞 樣相을 보였다.

### 3.3 R曲線法에 의한 $J_{IC}$ 評價

JSME S 001-81規定에 따른 R曲線法의 鈍化直線은 Landes와 Begley의 式(3)을 使用하였다.

$$J = 2\sigma_{fs}\Delta a \quad (3)$$

여기서  $\sigma_{fs} = (\sigma_y + \sigma_w)/2$  (mean flow stress) MPa

$\Delta a$ : 鈍化過程 때의 크랙길이 増分(mm)

R曲線法은 다음 式(4)를 滿足하도록 實驗하고 R曲線을 구하였다.

$$\Delta a_{max} \leq 1.0mm$$

$$(\Delta a_{max} - \Delta a_{in}) > 3(\Delta a_{min} - \Delta a_{in}) \quad (4)$$

$$(dJ/da)_R \leq 1/2(dJ/da)_B$$

여기서  $\Delta a_{in}$ :  $J_{in}$ 에 對應하는  $\Delta a$ (mm)

$\Delta a_{min}$ : 實驗点  $\Delta a$ 의 最小值(mm)

$\Delta a_{max}$ : 實驗点  $\Delta a$ 의 最大值(mm)

$(dJ/da)_R$ : R曲線의 傾斜

$(dJ/da)_B$ : 鈍化直線의 傾斜

鈍化直線과 R曲線의 交点에서 구한  $J_{in}$ 이  $J_{IC}$ 로서 有效한가의 判定은 다음 式(5)를 使用하였다.

$$B(B_n), b > 25 J_{in}/\sigma_{fs} \quad (5)$$

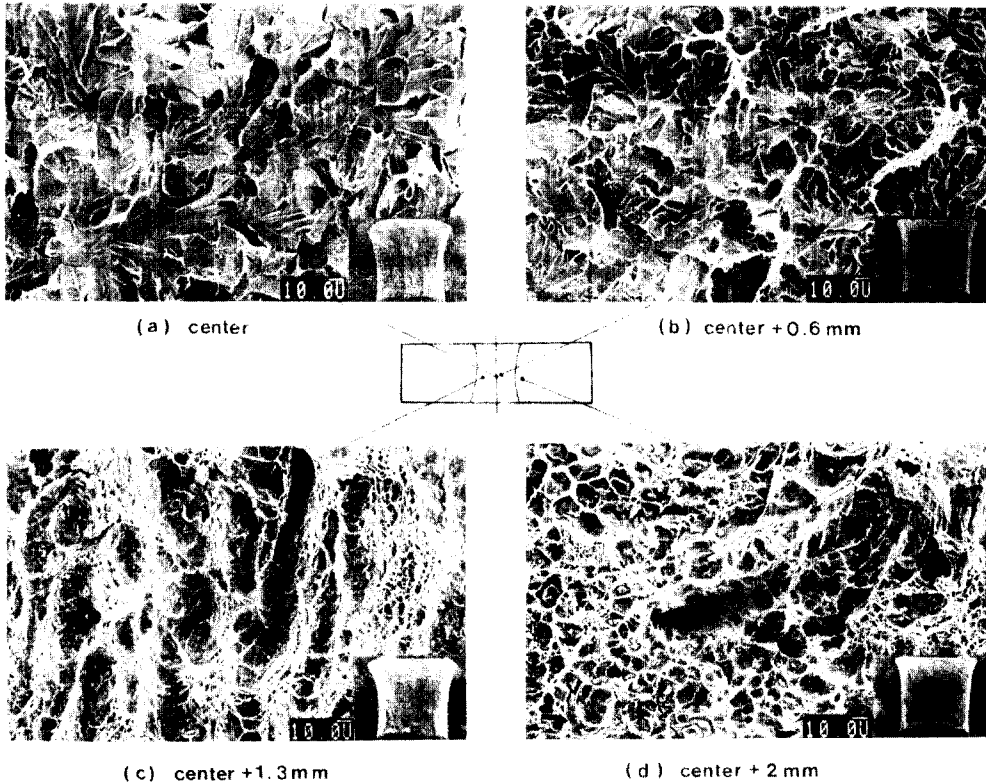


Photo. 3 Micro-structure and fracture appearance of Charpy impact specimens

Fig. 5의 (a), (b) 및 (c)는 平滑CT試驗片의 CWM, HAZ 및 BM에 대한 鈍化直線과 R曲線이다. Fig. 5의 (a)에서 鈍化直線은  $J_B=992.8\Delta a$  이며, R曲線은  $J-\Delta a$  關係를 최소 자승법에 의하여 式(6)과 같이 얻었다.

$$J = 128.7\Delta a + 82.6 \quad (6)$$

여기서 鈍化直線과 R曲線과의 交点  $J_{in}$ 值는  $100\text{ kJ}/\text{m}^2$ 이었다. Fig. 5의 (b)에서 鈍化直線은  $J_B=999.9\Delta a$  이며 R曲線은 式(7)과 같이 얻었다.

$$J = 129.9\Delta a + 64.3 \quad (7)$$

여기서 鈍化直線과 R曲線과의 交点  $J_{in}$ 은  $75.0\text{ kJ}/\text{m}^2$ 이었다. Fig. 5의 (c)에서 鈍化直線은  $J_B=767.8\Delta a$  이며 R曲線은 式(8)과 같이 얻었다.

$$J = 112.2\Delta a + 70.7 \quad (8)$$

여기서  $J_{in}$ 은  $60.5\text{ kJ}/\text{m}^2$ 이었다.

Fig. 6의 (a), (b) 및 (c)는 側面홀 CT 試驗片의 CWM, HAZ, 및 BM部에 대한 鈍化直線과 R曲線이다. Fig. 6의 (a)에서 鈍化直線은  $J_B=1085.0\Delta a$ 이며 R曲線은 Table 4에서  $J-\Delta a$ 關係를 최소자승법에 의하여 式(9)와 같이 얻었다.

$$J = 151.2\Delta a + 67.5 \quad (9)$$

여기서 鈍化直線과 R曲線과의 交点  $J_{in}$ 은  $89.5\text{ kJ}/\text{m}^2$ 이다. Fig. 6의 (b)에서  $J_B=1049.9\Delta a$ 이며 R曲線은 式(10)과 같이 얻었다.

$$J = 146.1\Delta a + 64.6 \quad (10)$$

여기서  $J_{in}$ 은  $70.0\text{ kJ}/\text{m}^2$ 이었다.

Fig. 6의 (c)에서  $J_B=749.9\Delta a$ 이며 R曲線은 式(11)과 같이 얻었다.

$$J = 107.6\Delta a + 36.4 \quad (11)$$

여기서  $J_{in}$ 은  $45.0\text{ kJ}/\text{m}^2$ 이었다.

### 3.4 스트레치 존법에 의한 $J_{IC}$ 評價

크랙길이 増分  $\Delta a$  및 SZW는 SEM을 使用하여 測定하였다. 이들의 測定은 JSME S 001-81 規定에 의

하여 3点法으로 整理하였다. 이들 測定值들로부터 平滑 CT試驗片의  $J_{in}$ 值 決定은 Fig. 7의 (a), (b) 및 (c)에 나타내었고 側面홀 CT試驗片의  $J_{in}$ 值는 Fig. 8의 (a), (b) 및 (c)에 나타내었다. 測定된 SZW는  $SZW < \Delta a$ 를 滿足하거나 또는 各 測定位置에서 SZW와 그것에 隣接하는 延性引裂破壞領域의 境界길이 總合이  $\sum_{i=1}^n l_i$ 의 20% 以上인 것을  $SZW_c$ (critical stretched zone width)로 보았다. 이러한 SZW를 3点 以上을 취하여 平均한 直線과 鈍化直線과의 交点에서  $J_{in}$ 值를 구하였다. 그리고  $SZW = SZW_c$ 의 實驗点이  $\pm 25\%$ 의 範圍에 있음을 確認하였다. Fig. 7의 (a)에서 CWM의  $SZW_c = 83.0\mu\text{m}$ ,  $J_{in} = 90.0\text{ kJ}/\text{m}^2$  였으며 (b)에서 HAZ의  $SZW_c = 70.7\mu\text{m}$ ,  $J_{in} = 76.3\text{ kJ}/\text{m}^2$  이고, (c)에서 BM의  $SZW_c = 71.5\mu\text{m}$ ,  $J_{in} = 60.0\text{ kJ}/\text{m}^2$ 을 얻었다. Fig. 8의 (a)에서 CWM의  $SZW_c = 80.0\mu\text{m}$ ,  $J_{in} = 82.5\text{ kJ}/\text{m}^2$ 였으며 (b)에서 HAZ의  $SZW_c = 71.0\mu\text{m}$ ,  $J_{in} = 75.0\text{ kJ}/\text{m}^2$  이었고, (c)에서 BM의  $SZW_c = 55.0\mu\text{m}$ ,  $J_{in} = 47.5\text{ kJ}/\text{m}^2$ 을 얻었다. 이들 値는 JSME S 001-81規定의 부대조건을 滿足하므로  $J_{in} = J_{IC}$ 로 評價되었다. Table 4와 Table 5에서 보면 R曲線法에 의한 平滑 및 側面홀 CT 試驗片의 破壞靱性値는 CWM이 제일 크며 HAZ, BM順으로 評價되었고 스트레치 존法에서도 같은 傾向을 나타내었으며, R曲線法과 스트레치 존法의 有效靱性値는 側面홀 CT試驗片이 平滑 CT試驗片에 비해 CWM은 9.42% HAZ는 4.2%, BM은 23.2% 減少하는 傾向이 나타났다. 또한 R曲線法에 의한 靱性値는 스트레치 존法에 의한 것과 잘 一致하나 HAZ, BM에서는 다소 過大評價現象을 보였으며, 이것은 延性크랙 發生後에도 스트레치 존에 變形이 加해져 SZW가 增加되어 微小크랙發生 및 그 後의 變形에 起因된 것으로 생각된다.

Table 4 Results of  $J_{IC}$  estimation by the R-curve method and the stretched zone method

	A	B	C	$SZW_c(\mu\text{m})$	$J_{in}(\text{kJ}/\text{m}^2)$	
					R-curve method	SZ method
CWM(S)	128.7	82.6	992.8	83.0	100.0	90.0
HAZ(S)	129.9	64.3	999.9	70.7	75.0	76.3
BM(S)	112.2	70.7	767.8	71.5	60.5	60.0
CWM(S.G)	151.2	67.5	1085.0	80.0	89.5	82.5
HAZ(S.G)	146.1	64.6	1049.9	71.0	70.0	75.0
BM(S.G)	107.6	36.4	749.9	55.0	45.0	47.5

R-curve :  $J = A\Delta a + B$ , Blunting line :  $J = C\Delta a$

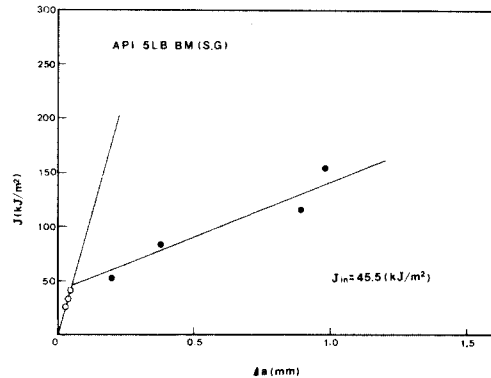
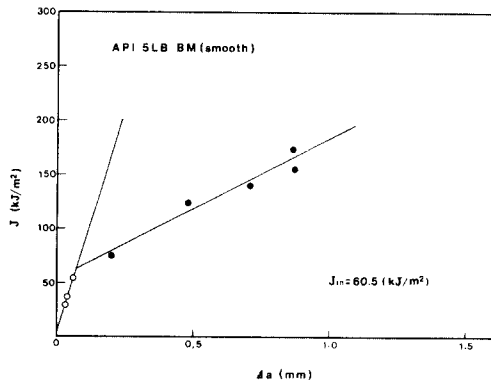
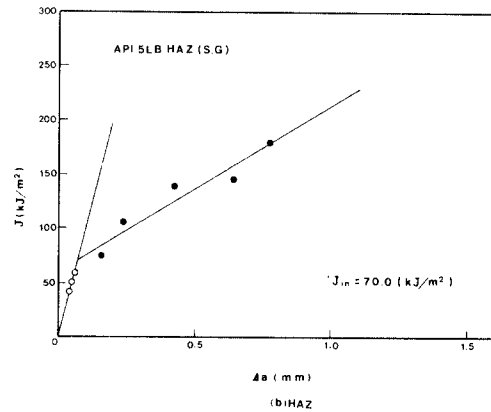
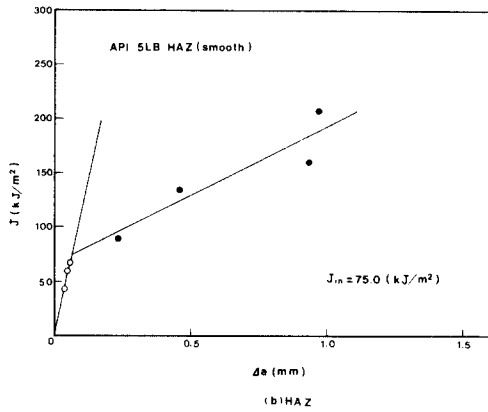
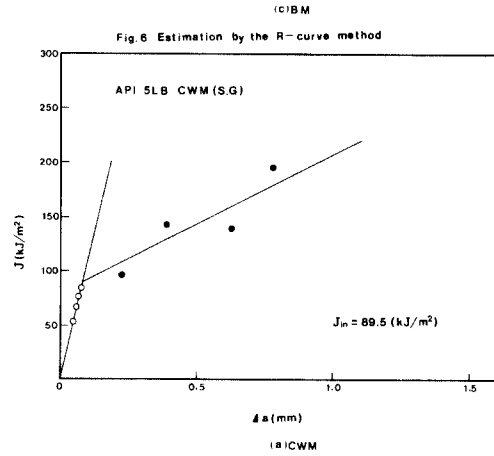
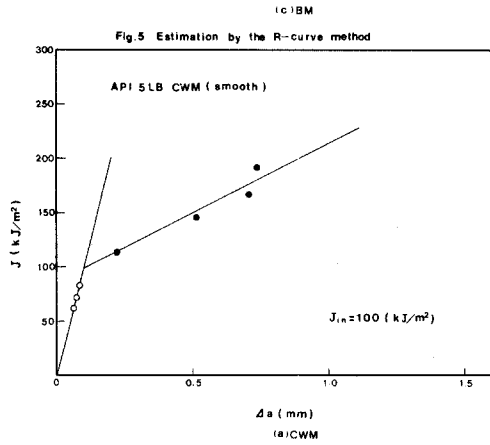


Fig.5  $J_{IC}$  Estimation by the R-curve method

Fig.6  $J_{IC}$  Estimation by the R-curve method

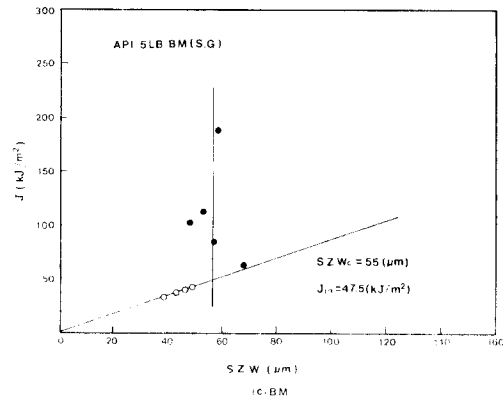
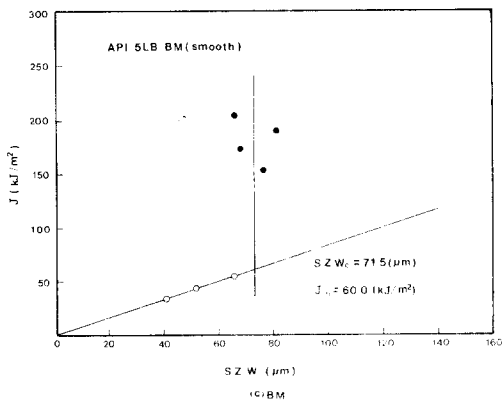
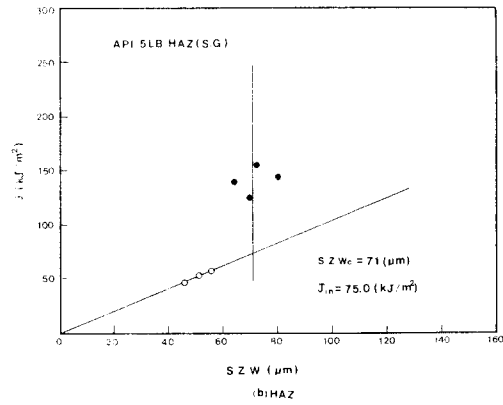
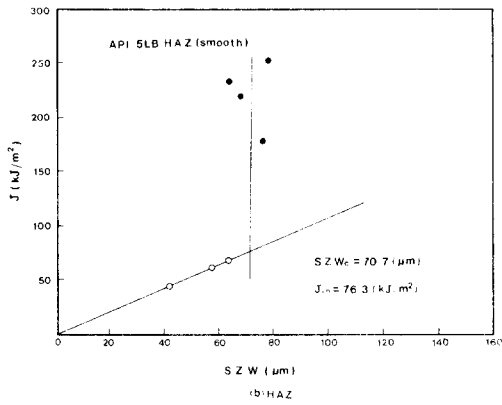
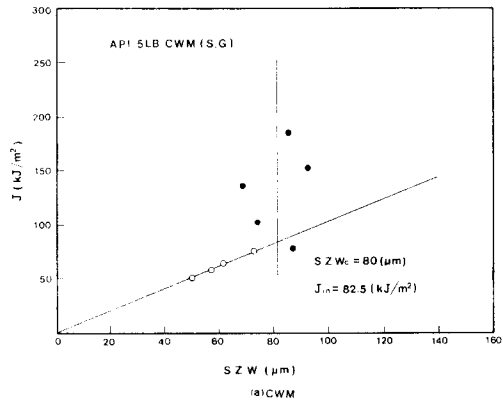
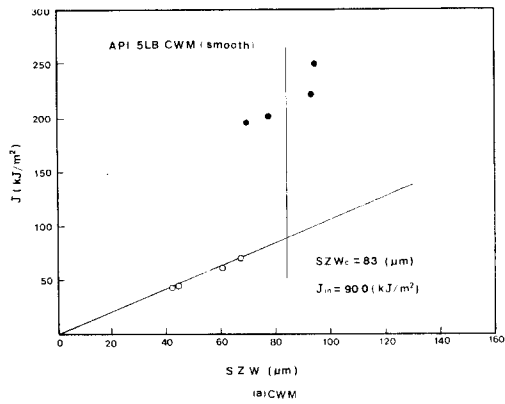


Fig.7 J<sub>1c</sub> estimation by the stretched zone method

Fig.8 J<sub>1c</sub> estimation by the stretched zone method



Table 5 Estimation of valid  $J_{1c}$ (B. Bn,  $b > 25J_{in}/\sigma_{fs}$ )

	B (mm)	B <sub>n</sub> (mm)	b (mm)	$\sigma_{fs}$ (MPa)	Method	$J_{in}$ (kJ/m <sup>2</sup> )	25 $J_{in}/\sigma_{fs}$ (mm)	Remark
CWM(S)	6.5		17.5	546.2	R-curve SZ	100.0 90.0	4.57 4.00	$J_{in} = J_{1c}$ $J_{in} = J_{1c}$
HAZ(S)	6.5		17.5	546.2	R-curve SZ	75.0 76.3	3.43 3.31	$J_{in} = J_{1c}$ $J_{in} = J_{1c}$
BM(S)	6.5		17.5	449.5	R-curve SZ	60.5 60.0	3.36 3.19	$J_{in} = J_{1c}$ $J_{in} = J_{1c}$
CWM(S.G)		6.5	17.5	546.2	R-curve SZ	80.5 82.5	4.09 3.68	$J_{in} = J_{1c}$ $J_{in} = J_{1c}$
HAZ(S.G)		6.5	17.5	546.2	R-curve SZ	70.0 75.0	3.20 3.18	$J_{in} = J_{1c}$ $J_{in} = J_{1c}$
BM(S.G)		6.5	17.5	449.5	R-curve SZ	45.0 47.5	2.53 2.50	$J_{in} = J_{1c}$ $J_{in} = J_{1c}$

B : thickness of smooth specimen. b : ligament width B<sub>n</sub> : thickness of side-grooved specimen  
 $\sigma_{fs}$  : flow stress = (yield strength + tensile strength)/2

3.5 熔接部 斷面 및 破面解析

Photo. 4는 平滑 및 側面홈 CT試驗片의 巨視的 破斷面을 나타내었다. (a)는 平滑 CT試驗片의 CWM, HAZ 및 BM에 대한 것으로 (1)은 機械 노치, (2)는 疲勞 豫크랙 領域이다. (3)은 크랙 増分  $\Delta a$ 를 나타내며 이것은 SZW領域과 딴플(dimple) 領域으로부터 測定되어 平滑 CT試驗片에서 터널(tunnel)現象의 삼각형으로 斷面中心에서 크랙成長이 빠름을 觀察할 수 있었다. (4)는 過荷重에 의한 破斷面을 나타내며 크랙増分  $\Delta a$ 는 마아킹(marking)의 히트 토텝팅(heat

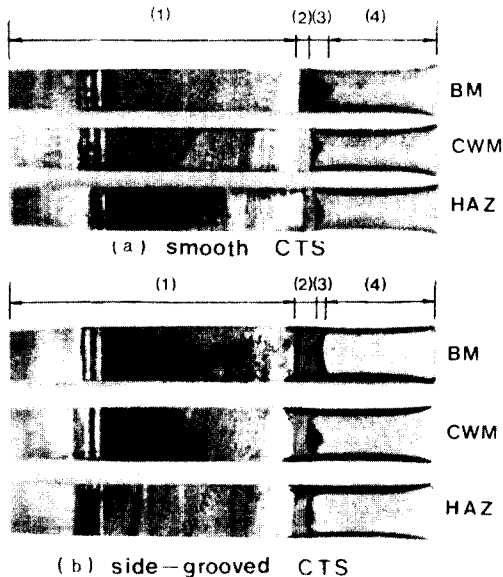
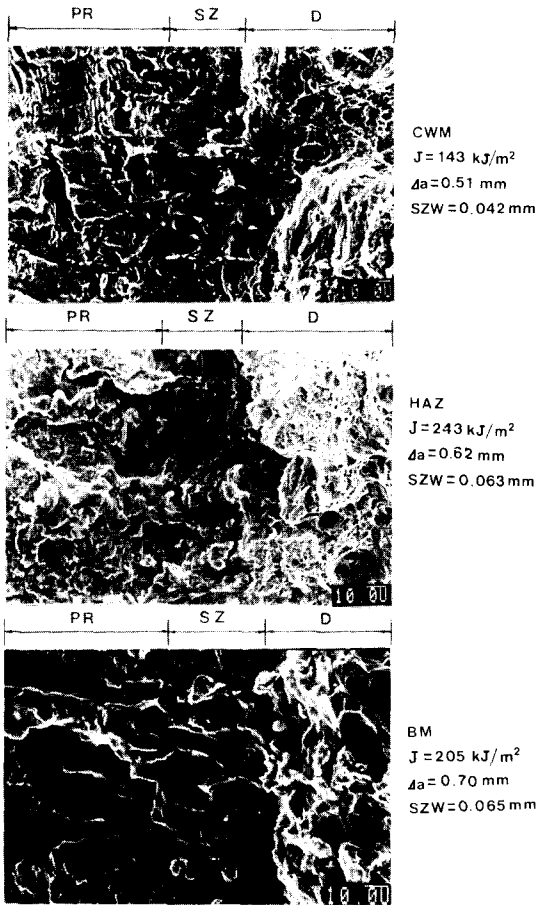


Photo.4 Fracture surface of API 5LB

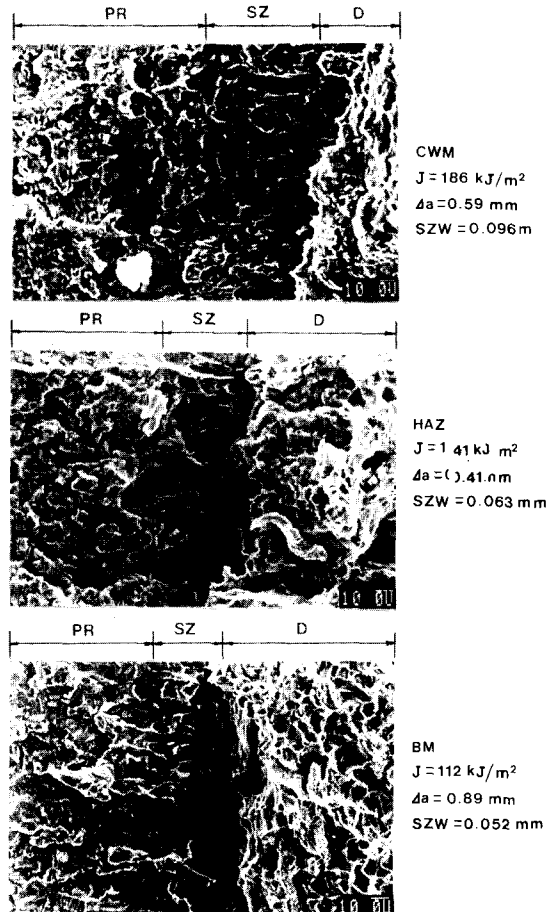
tinting) 때문에 測定이 容易하였고 공구 顯微鏡으로 測定이 可能했으며 SEM에서 測定한 것과 比較 檢討한 結果 잘 一致하였다. Photo. 4의 (b)는 側面홈 CT試驗片 破斷面 形狀을 나타내며 크랙増分  $\Delta a$ 는 터널(tunnel)現象이 緩화된 直線모양이 나타나므로 試驗片 두께 方向에 따라서 SZW의 變動이 적었다. Photo. 5는 平滑 CT試驗片의 CWM, HAZ 및 BM部에 대한 疲勞 豫크랙 領域(PR), 스트레치 존(SZ) 및 딴플(dimple)에 관한 電子顯微鏡 寫眞이다. CWM의  $J = 143 \text{kJ/m}^2$ 일 때  $\Delta a = 0.51 \text{mm}$ , SZW = 0.042mm이며, HAZ의  $J = 243 \text{kJ/m}^2$ 일 때  $\Delta a = 0.62 \text{mm}$ , SZW = 0.063mm, BM의  $J = 205 \text{kJ/m}^2$ 일 때  $\Delta a = 0.70 \text{mm}$ , SZW = 0.065mm이었다. 疲勞 豫크랙 領域(PR)에는 스트라이에이션(striation)이 생겼으며 스트레치 존(SZ)은 SZW領域과 딴플(dimple) 領域 사이의 境界가 비교적 明確하나 部分的으로 SZW領域 속에 딴플(dimple)이 存在하는 領域이 있었으며 딴플(dimple) 領域에서는 微小 보이드(void)의 成長 그리고 合體로서 引裂破壞가 생겼다.<sup>14)</sup>

Photo. 6은 側面홈 CT試驗片의 PR, SZ, 및 딴플(dimple)에 관한 電子顯微鏡 寫眞이며 CWM에서  $J = 186 \text{kJ/m}^2$ 일 때  $\Delta a = 0.59 \text{mm}$ , SZW = 0.096mm, HAZ에서  $J = 141 \text{kJ/m}^2$ ,  $\Delta a = 0.41 \text{mm}$ , SZW = 0.063mm, BM에서  $J = 112 \text{kJ/m}^2$ ,  $\Delta a = 0.89 \text{mm}$ , SZW = 0.52mm이었다. 側面홈 CT試驗片은 平滑 CT試驗片 보다 破壞靱性試驗에서 疲勞 豫크랙 領域(PR)과 스트레치 존(SZ) 및 딴플(dimple) 領域의 境界가 比較的 明確하게 나타났으며 延性破壞後에도 스트레치 존에 變形이 가해져 SZW가 增加하는 것으로 생각된다.



PR: Pre-fatigue Region  
 SZ: Stretched Zone  
 D: Dimple

Photo.5 Fractographs of weld metal(smooth)



PR: Pre-fatigue Region  
 SZ: Stretched Zone  
 D: Dimple

Photo.6 Fractographs of weld metal(side-grooved)

### 3. 結 論

熱間壓延鋼帶 PLB材로써 高周波電氣抵抗熔接된 API 5LB 鋼管의 熔接金屬部, 熱影響部 및 母材部에 대하여 破壞靱性を 評價하였다. 破壞靱性 評價는 JSME S 001-81規定에 의하였고 平滑 및 側面홈 CT 試驗片을 使用하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1) 스트레치 존法에 의한 破壞靱性値는 CWM에서는 R曲線法에 의한 것과 잘 一致하나 HAZ 및 BM에서는 다소 過大評價 現象을 보였으며 이는 延性크랙 發生後에도 스트레치 존의 變形과 微小크랙 發生에 起因된 것으로 생각된다.

2) R曲線法과 스트레치 존法의 破壞靱性値 平均은 側面홈 CT試驗片이 平滑 CT試驗片에 비해 각각 CWM은 9.42%, HAZ는 4.2%, BM은 23.2% 減少

하는 傾向을 나타내었다.

3) 側面홈 CT試驗片은 平滑 CT試驗片 보다 크랙 進展 形態가 線型的으로 되었으며, 疲勞 豫크랙, 스트레치 존, 딤플영역의 境界가 明確하게 나타났다.

### 參 考 文 獻

- 1) Haga, H., K. Aoki and T. Sato, "Welding Phenomena and Welding Mechanism in High Frequency Electric Resistant Welding-1st Report", Weld. J., Vol. 59, No.6, pp.208~212, 1980
- 2) ISIJ, "Welded Steel Pipe", Steel Hand Book, Vol. 3, No.3-2, pp.1076~1077, 1980
- 3) Narita, K, "PWHT", J. of JWS, Vol. 53, No. 6, pp.276~277, 1984

- 4) Rice, J. R., "A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks", Trans. ASME, J. Appl. Mech, Vol. 35, pp.379~386, 1986
- 5) Landes, J.D. and J. A. Begley, "Test Results from J-integral Studies on Attempt to Establish a  $J_{IC}$  Testing Procedure", ASTM STP 560, pp.170~185, 1974
- 6) Begley, J. A., W. A. Logsdon and J. D. Landes, "Ductile Rupture Blunt-Notch Fracture Criterion", ASTM STP 631, pp.112~119, 1977
- 7) Paris, P. C. and J. C. Merkle, "Progress in Flow Growth and Fracture Toughness Testing", ASTM STP 536, pp.231~245, 1973
- 8) Ohji, K. et al., "Effects of Side-Grooved and Thickness of Fracture-Toughness Specimens on Crack Initiation in  $J_{IC}$  Tests of Two Steels", Materials, Vol. 33, No.371, pp.1006~1011, 1984
- 9) Oh, S. W., K. J. Ahn and T. J. Lee, " $J_{IC}$  Evaluation of Smooth and Side-grooved CT Specimens in Submerged Arc-Welded SB41", Journal of KWS, Vol. 4, No. 1, pp.47~57, 1986
- 10) ASTM E 813-81, "Standard Method of Test for  $J_{IC}$ , A Measure of Fracture Toughness", ASTM Annual Standards, Vol.03.01, pp.762~780, 1981
- 11) JSME S 001-81, "Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness  $J_{IC}$ ", JSME Standard, pp.1~88, 1981.
- 12) ISIJ, "Steel Products Making Process", Chiin Press, pp.233~236, 1976
- 13) Na, S. J. and S. D. Kim, "Study on Fracture Toughness and Heat Input in Weld HAZ of Cr-Mo Steel (I)", J. of KWS, Vol.3, No.2, pp. 1~9, 1985
- 14) Broek, D., "The Role of Inclusion in Ductile Fracture Toughness", Engineering Fracture Mechanics, Vol.5, pp.55~66, 1973



◎ 창간호 발행 및 학회 발전 ◎

\* 특별회원사

현대중공업 주식회사 대표 李春林

경남 울산시 중구 전하동 1 (전화 32-1101)

대우조선공업 주식회사 대표 尹永錫

경남 거제군 장승포읍 아주리 1 (전화 4-2151~9)

한국선급협회 대표 崔秉瑋

서울특별시 강남구 서초동 1465-10 (전화 582-6001)

자유건설주식회사 대표 鄭珠永

부산시 동구 초량동 1205-1 (전화 463-9031)

(주) 삼화기술단 대표 金熙正

부산시 동래구 연산4동 586-7 (전화 864-6331)