論 文

大 韓 造 船 學 會 誌
第20卷 第2號 1983年 6月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 20, No. 2, June 1983

高 Energy密度熔接에 依한 熔接이음에 있어서의 殘留應力과 疲勞特性에 關한 硏究

——HT80 鋼의 電子 Beam 熔接이음 疲勞強度——

朴 鍾 殷*

Study on the Residual Stress and Fatigue Strength of Welded Joint by High Energy Density Welding

—Fatigue Scrength of Welded Joint of HT80 Steel by Electron Beam Welding—

by

J. E. Park*

Abstract

The versatile practical use of electron beam welding which is very high energy density is still in early stage, but in the special welding field, the welding process is used in manufactured goods.

The investigation for electron beam welding up to the present was almost achieved not for the mechanical properties of welded joint but for the process itself.

On this investigation, the fatigue strength, crack propergation phenomena and hardness of weld metal and heat affected zone of partially penetrated welded joint of HT80 steel by electron beam welding was accomplished.

The tensile fatigue strength in weld line diretion of the joint was about 25kg/mm^2.

There still appeared spikes on the tips of penetration, and the crack initiated at the tips of spikes not from the roots.

The hardness of the weld metal was higher than it of base metal because of production of martensite by rapid cooling.

記 號

a_b : 活性變數
c : 電界 lens의 收差定數
d_b : beam지름
D_F : beam의 實際焦點距離
D_0 : 對物距離
D_w : 熔接距離
e : 電子의 電荷量
f : 電界 lens焦點距離
I_b : beam電流
l : 板間距離
l_b : beam活性域길이
m : 電子의 質量
m_g : 殘留氣가스의 質量

接受日字：1983年 4月 26日, 再接受日字：1983年 5月 27日
* 正 會 員：서울大學校 工科大學 造船工學科

N : 되물이數
n : 1秒間의 電子의 總數
P : 雰圍氣가스의 壓力
r_b : beam 반지름
S : σ_R, 되푸리最大應力
T : 雰圍氣가스의 溫度
v : 電子의 速度
V_b : beam加速電壓
W_b : beam energy
w_b : beam energy密度
ρ : 雰圍氣가스의 密度

1. 序 言

電子 beam熔接의 實用化는 아직까지는 初期段階에 있다고 할 수 있겠다. L.N. Sayer의 評價와 같이 熔接機에 있어서는 汎用的이고 값싼 機械가 生産되어야 하고, 熔接方法에 있어서도 熔接部의 信賴性이 問題되는 등 硏究의 餘地는 많다.〔1, 2〕.

그러나 지금까지의 硏究로서도 다음과 같은 큰 特徵을 發見할 수가 있다. 卽, arc等 지금까지의 다른 熔接熱源과 比較하여 本質的으로 相違하며 優秀한 點은 Table 1.1에 表示하는 바와같이, (1), energy 密度가 極히 높고, 또 이것을 自由로히 制御할 수 있다는 點이다.

뿐만 아니라 (2), 큰 出力을 얻을 수 있다. 現在 世界에서 가장 큰 出力은 300kw나 된다.

이러한 電子 beam이 物體에 照射되면, 그 面에서 瞬間的으로 溶融 沸騰, 飛散의 過程 卽, "穿孔現象"이 일어나서 깊고, 가는 beam孔을 만들고, 그 beam孔은 beam과 같이 移動하며, beam孔 周圍의 溶融層에 의해서 beam孔의 移動領域이 메꾸어진다. 이래서 소위 深溶込熔接이 이루어지며, 現在는 10~20cm 程度의 두꺼운 板도 1 pass로서 熔接할 수 있다.〔3〕.

Table 1.1 Power density of heat sources.

Welding heat source		Power density, W/mm²
Gas flame ($O_2+C_2H_2$)		10
Jet flame (O_2+H_2)		30
Argon arc (200A)		150
Electron beam	Pulse	$>10^5\sim10^6$
	Continuous	$10^4\sim10^7$
Laser beam	Pulse	$10^5\sim10^{11}$
	Continuous	$10^3\sim10^7$

Table 1.2 Heat input and transverse shrinkage in various welding processes.

Welding method	Plate thickness, mm	Heat input, kJ/mm	Transverse shrinkage, mm
EBW	12	0.2~0.5	0.067~0.07
Manual welding	12	3.0~3.2	0.8~0.9
Submerged arc welding	12	5.6~6.0	0.75~0.8
GTAW	12	1.2~1.3	0.38~0.42

이와같이 하여 이루어진 電子 beam熔接으로서의 特徵을 살펴 보면 다음과 같다〔4〕.

(1), I홈 맞대기 이음으로서 깊은 溶込이 얻어지며 이때의 溶融部를 arc熔接때와 比較하면, 5~10%에 지나지 않는다. (2), energy密度가 크고, 熔接入熱이 적어서 arc熔接에 比해서 材質의 變化는 比較가 안될 정도로 작다. (3), 熔接으로 因한 收縮 또는 角變化는 大端히 작고, arc熔接에 의한 것의 10%以下이다. 이래서 精密熔接이라고 불리우기도 한다(Table 1.2 參照)〔4〕. (4), arc熔接과는 判異하며, 電子 beam熔接은 同種 또는 異種을 莫論하고, 모든 金屬의 熔接에 適合하다.

이러한 特性의 電子 beam熔接은, Crooks가 1870年에 電子 beam에 依해서 物體가 加熱된다는 것을 發表함으로써 硏究가 始作되었으며 그後, 電子 beam의 制御技術이 發展함에 따라 電子 beam의 熔接에의 利用硏究는 漸次 活潑해 졌다.

1948年 K.H. Steigerwald는 深度가 깊은 電子銃을 開發하여 金屬의 穿孔 및 切斷加工에 利用하였으며, 1957年에 J.A. Stohr은 最初로 電子 beam熔接機를 使用하여 얻은 熔接結果에 對하여 詳細하게 發表하였다. 이 以後, 電子 beam熔接에 對한 硏究는 더욱 活潑해 졌으며 最近에 이르러서는 Y. Arata 및 M. Tomie등의 水平電子 beam熔接에 對한 硏究〔5〕, 또 Y. Arata 및 Eiji Nabegawa, N. Iwamoto, N. Abe 및 S. Yamamoto등에 依한 tandem electron beam에 依한 여러가지 熔接缺陷防止를 爲한 硏究〔6, 7, 8〕, 또, 勘定의 chamber gas壓의 變化 및 種類의 變化에 對한硏究〔9〕, Dann E. Passoya의 溶込깊이에 對한 硏究등이 있다〔10〕.

이와같이 지금까지의 硏究는 大部分이 熔接法 自體에 對한 것이며 實用되는 材料의 電子 beam熔接이음의 機械的 强度에 關한 硏究는 많지 않다.

그래서 本研究에서는 現在 工業用으로 重要하게 使用되는 材料의 熔接性을 研究할 目的으로, 最近에 와서 巨大한 鋼構造物의 重量輕減을 爲하여 使用되게 된 HT80鋼에 對한 部分溶込 電子 beam熔接이음의 疲勞强度와 이에 關聯되는 機械的 性質에 對하여 硏究하기로 하였다.

2. 電子Beam熔接 因子

實驗에 들어가기에 앞서, 熔接이음의 性能에 影響을 주는 몇가지 重要한 因子에 對해서 記述한다.

2.1. 熔接入熱

電子 beam熔接은 電子 beam中의 電子의 運動 energy를 利用한다. 電子의 質量을 m, 速度를 v라 하면 電子의 運動 energy는 $\frac{1}{2}mv^2$ 이다.

電子를 運動시키는 가장 有效한 方法은 電場內에 電子를 두는일, 即 電位差 V_b volt를 電子에 加해서 이것을 加速하는 일이다. 電子는 1個當 e coulomb의 負電荷를 帶電하고 있으므로 V_b에 依하여 電場으로부터 eV_b joule의 energy를 吸收하여 速度 v로서 運動하게 된다.

電子에 V_b를 加하는 簡單한 裝置는 眞空室內에 있는 2枚의 平行板電極이다. 即, 電子를 發生시키는 陰極과 이것을 吸收하는 陽極과의 사이에 V_b volt를 加하면 電子는 陰極 表面을 떠나서 陽極으로 向하게 된다. 이때 陽極에 吸收되지 않고 이것이 通過하도록 해두면 電子는 各各 1個가

$$eV_b=\frac{1}{2}mv^2 \text{ joule} \tag{2.1}$$

되는 energy를 갖고 陽極을 通過하여 自由空間을 飛行하고 이 電子들이 被熔接物에 衝突하면 그 運動energy는 熱 energy로 變換되어 熔接入熱化 한다.

2.2. Beam特性變數 및 相互關係

1秒間에 陽極을 通過하는 電子의 總數를 n個라고 하면, 이들은 電子群의 흐름, 即 I_b amp.의 beam電流를 갖는 電子 beam이 되어 自由空間을 飛行한다.

여기서 다음式이 成立한다.

$$enV_b=I_bV_b=W_b \text{ watt} \tag{2.2}$$

이들, I_b, V_b, W_b가 各各 電子 beam熔接 parameter인 beam電流, beam加速電壓, beam energy이다.

이 I_b와 V_b는 各各 任意로 選擇되는 것이 아니고 Fig. 2.1에 表示하는 바와 같이 Langmuir의 $\frac{3}{2}$乘法則에 依存한다.

$$I_b=GV_b^{\frac{3}{2}} \quad W_b=GV_b^{\frac{5}{2}} \tag{2.3}$$

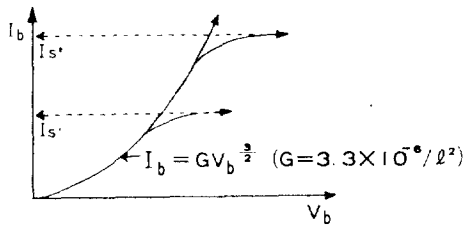


Fig. 2.1 Relation between I_b and V_b.

여기서 G는 板間距離 l만에 依해서 左右되는 定數이다[3].

式(2.3)에서 볼때, 電子 beam의 出力은 適當한 G와 V_b를 選擇하므로서 理論的으로는 얼마든지 크게 얻을 수 있다. 이 點이 電子 beam熱源의, arc電壓이 거의 一定한 arc熱源과는 本質的으로 다른 큰 特徵이다. 그러나 實際에서는 陰極에 熱陰極型을 採用하면 溫度制限에 依하여 式(2.3)은 V_b의 어떤 값 以上에서는 成立하지 않고 I_b는 飽和値에 到達한다. 또 V_b도 實用的으로는 制限이 있으므로 實用的 出力에는 自然히 限界가 있다. 現段階로서 1,000kw程度는 實用的으로 可能할 것으로 보고 있다[3].

이와 같이 電子 beam의 出力은 實用上 自由로히, 또 容易하게 廣範圍한 變化가 可能하다. 電子 beam은 가볍고, 電磁力에 極히 銳敏하므로, 큰 出力의 境遇라도 beam軸, beam照射位置등의 急速한 變動에도 잘 應할 수 있다.

出力이 큰 强力한 beam은 電子集團의 空間電荷力 때문에 energy密度가 적어지므로 空間電荷力에 이겨서 더욱 beam을 조릴 수 있는 電磁力이 必要하다. 熔接用 電子 beam의 境遇에는 特히 磁氣 lens가 使用된다. 電子 beam은 磁界의 作用을 强하게 받고, 收束된 焦點에서 가장 强하게 壓縮되므로 그 energy密度는 極大가 된다. 이와 같이 電子 beam은 磁界에 依한 beam의 收束性, 壓縮性이 대단히 좋고 또 그 energy密度는 自由로히 쉽게 急速히 制御할수가 있어서 超高 energy密度가 얻어지는 것이다.

지금 이 beam焦點에서의 beam지름을 d_b, 이때의 energy密度를 w_b라 하면

$$d_b=K_c\frac{I_b^{1.36}}{V_b^{2.05}}, \quad w_b=K_s\frac{V_b^{5.1}}{I_b^{1.7}} \tag{2.4}$$

이다[3].

여기서 K_c, K_s는 定數이며, 强力한 磁氣 lens에 依하여 beam의 實際의 焦點距離 D_F가 얻어지는, 高眞空中의 境遇로서, ion等에 依한 中和現象이 없는 狀態下에서이다.

이와 같이 energy密度가 높은 電子 beam이라도 被加工材에 充分한 量이 到達하지 않으면 안된다. 電子銃의 nozzle로 부터 射出된 電子 beam은 10^{-4}mmHg로 부터 大氣壓程度까지의 가스壓을 갖는 空間을 飛行하여 被熔接物에 到達한다. 이 거리를 熔接距離라 하고, 또 電子 beam이 飛行可能한 最大距離를 飛程이라 하며, 各各 D_w 및 R_e로 表示하고 있다. 實用上 D_w는 R_e의 1/10以下로 함이 必要하다. 即, 發射 nozzle에서 射出된 電子 beam의 90% 前後의 量이 被加工材에 到達함이 바람직 하다. 지금 5萬 volt 程度까지의 beam에 對한 飛程을 R_e'cm라 하면

$$R_e' \fallingdotseq 2.1\times10^{-12}V_b^2/\rho \qquad (2.5)$$

여기서, ρ는 雰圍氣가스의 密度, g/cm³이다. 또, 大氣中에서는 다음式이 成立한다.

$$R_e' \fallingdotseq 2.8^{-34}\frac{T}{m_g}V_b^2 \qquad (2.6)$$

여기서 m_g 및 T는 各各 大氣의 質量 g, 및 溫度°K를 나타낸다. 10萬 volt前後, 或은 그 以上의 beam에 對해서는 式(2.5) 및 (2.6)은 成立되지 않고, 더욱 複雜한 計算을 必要로 한다[3].

이와 같은 電子 beam이 物質에 照射되면, 이것에吸收되는 것, I_{in}과 吸收되지 않고 飛散하는 I_{out}로 나누어진다. 即

$$\left.\begin{aligned} &I_b = I_{in} + I_{out} && \text{(a)}\\ &\text{여기서, 또}\\ &I_{in} = I_{o.in} + I_{r.in} + I_{s.in} && \text{(b)}\\ &I_{out} = I_r + I_s && \text{(c)} \end{aligned}\right\} \qquad (2.7)$$

式(2.7)에서, $I_{o.in}$은 電子衝擊點에서 直接 熔接物에 吸收되는 beam電流이고, $I_{r.in}$ 및 $I_{s.in}$은 各各 反射 및 第2次放出되면서도 다시 熔接物에 吸收되는 電子流이다. 이에 對하여 I_r 및 I_s는 吸收되지 않고 各各 熔接物로부터 飛散하는 反射電子 및 2次電子이다.

더욱 熔接部의 加熱에 依하여 外部에 飛散하는 熱電子流 I_{th} 및 beam plasma로 부터 流入하는 plasma電子流 I_p를 生覺할 때 熔接物에 吸收되는 全電子流 I_t는

$$I_t = I_b + |I_{th} + I_p| \qquad (2.8)$$

가 된다[3].

I_{th}는 冷却等의 操作에 依하여 溫度上昇을 防止하면 發生하지 않는다. 實際의 熔接의 境遇에는, 이 熱電子의 흐름이 너단히 많아지고 beam電流値를 훨씬 넘는 경우가 있다.

이래서 實際로 試料에 들어가는 beam電流를 測定할 때는 熔接物을 chamber에 對하여 Fig. 2.2에 보는바와 같이 數 volt以上의 正電位를 주어 이 熱電子流를

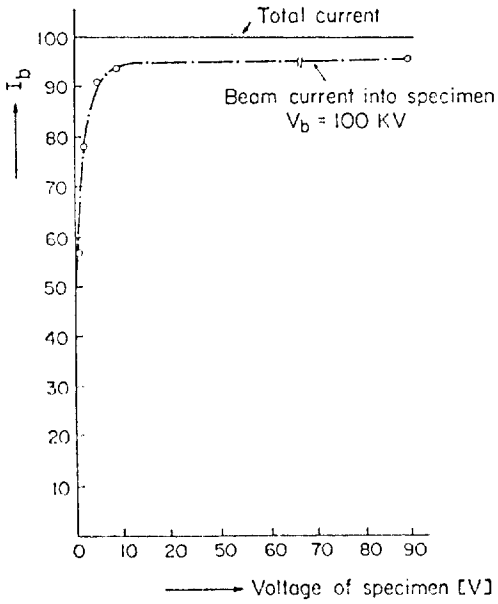


Fig. 2.2 Voltage of specimen and beam current.

抑制할 必要가 있다.

穿孔, 및 熔接作用에서 가장 重要한 것은($I_{o.in}+I_{r.in}$)인데, 特히 穿孔現象을 形成하는 電子 beam의 自己收束作用은 $I_{r.in}$의 機能에 基因한다고 生覺해서 좋다.

3. 電子beam의 活性變數

强力한 電子 beam이 物質에 照射되면 瞬間的으로, 溶融 沸騰에 依한, 甚한 蒸發現象이 수반되고, 穿孔作用이 나타나서 深溶込 熔接을 可能케 한다. 이와 같은 現象은 energy密度가 낮은 arc熱源等에서는 볼수가 없으며, 電子 beam과 같은 超高 energy密度를 갖는 熱源에서만 나타나는 本質的인 것이다.

電子 beam熔接에서는 beam의 形狀, 焦點, energy 密度特性이 重要한 基本的인 因子이다. 이들은 熔接이 음性能을 左右하는 깊이, 形狀, 組織등의 溶込特性을 決定한다. 이 電子 beam의 特性은 Fig. 3.1과 같은 方法에 依하여 求하고 있으며, 그 結果에 依한電子beam의 形狀, 및 그 parameter를 Fig. 3.2와 같이 表示한다. Fig. 3.2에서 보는 바와 같이 集點의 兩側近處에 beam活性域이 存在하고, 이 特性이 溶込깊이, 形狀等을 支配한다. 여기서 溶込特性을 指示하는 重要한 因子인 活性變數 a_b를 다음과 같이 定義한다.

$$a_b = \frac{D_0}{D_F} \qquad (3.1)$$

여기서, D_F : 集點距離

D_o : 對物距離이다.

D_F는 收束 lens 中心으로 부터 焦點位置까지의 距離이며, D_o는 같은 位置로 부터 被加工物까지의 距離이다.

熔接裝置에 依하여 若干式 差異는 있으나 最大溶込깊이는 大體로 $a_b \fallingdotseq 0.85$ 前後의 값일때 얻어진다.

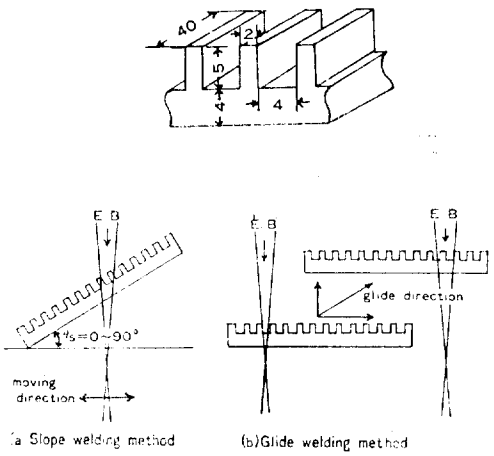
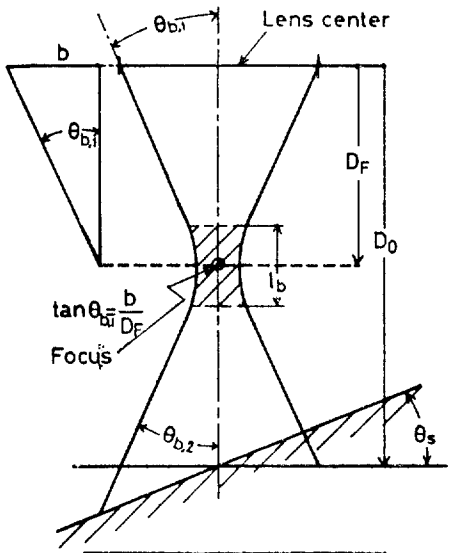


Fig. 3.1 Schematic drawing of beam test methods.



$$\alpha_b = \frac{D_0}{D_F}, \quad f_b = \frac{1}{\tan\theta_{b,1}} = \frac{D_F}{b}$$

$$l_b = 4.46\sigma l \tan\theta_{b,1} = 4.46\sigma f_b$$

Fig. 3.2 Shape of high energy density beam and its parameters.

4. 實驗結果 및 考察

4.1. 概 要

現在까지의 電子 beam熔接에서는 完全溶込이 되지 않을 境遇 Fig. 4.1에서 보는 바와 같이 spike現象이 나타나고 있으며, 이것을 除去하지 못하고 있다. 그러나 實際熔接現場에서는 언제나 完全溶込을 期待할수는 없다. 그래서 本硏究에서는 spike가 發生하는 部分溶込 電子 beam熔接이음의 疲勞特性 및 關聯되는 機械的性質에 對하여 硏究하였다.

實驗材料는 現在 LPG tanker, 橋梁의 重要部, 潛水艦, 잇사일, 戰車, 各種砲等에 使用되는 HT80 高張力鋼을 選擇하였다.

이 材料를 電子 beam으로서, Fig. 4.1에 表示된 斷面과 같이, 部分溶込熔接을 實施하고, 그 熔接이음의 疲勞强度 및 이에 關聯되는 疲勞龜裂의 發生 및 進行, 硬度分布도 아울러 硏究하였다.

4.2. 部分溶込이음의 熔接線方向 疲勞特性

鋼構造部材에 荷重이 反復作用하면 應力이 材料의 引張强度 或은 降伏點以下에서도 破斷하는 수가 많다. 그러나 應力振巾이 어느 限界以下이면, 無限回數反復的으로 作用하여도 破行되지 않으며 이때의 應力振幅

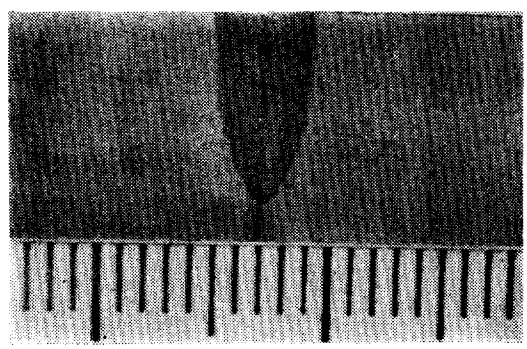


Fig. 4.1 Partial peneration E.B. welding.

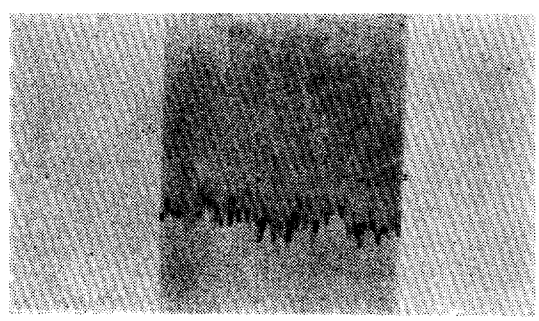


Fig. 4.2 Spikes.

中最大의 것이 疲勞限이다. 本研究에서는 HT80 鋼의 部分溶込 電子 beam熔接이음의 高 cycle 疲勞限을 求하였으며, 同時에 龜裂의 發生點 및 傳播方向도 研究하였다.

4.2.2. 試驗片製作

(1) 試驗材의 化學成分

Table 4.1에 表示한다.

(2) 試驗片熔接

試驗片을 熔接하는데 使用한 電子 beam熔接機는 100KV, 100KW로서 熔接條件은 Table 4.2와 같은며, Fig. 4.3에 同熔接機能의 構造의 略圖를 表示한다. 本熔接機는 大阪大學 熔接工學研究所 所屬裝置이다.

Table 4.1 Chemical composition.

Chemical composition (Wt%)										
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	B (PPM)
0.11	0.24	0.83	0.010	0.003	0.19	0.98	0.49	0.45	0.03	9

Impact value (−15°C)	Ceq(%)	Yield strength (kg/mm²)	Tensile strength (kg/mm²)	Elongation(%)
22	0.50	82	88	36

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

Table 4.2 Welding conditions.

V_b(KV)	I_b(mA)	v_b(cm/min)	D_F(mm)	D_0(mm)	$a_b = D_0/D_F$	Chamber pressure
50	180	40	170	255	1.5	10^{-5}Torr

(3) 試驗片形狀, 치수 및 採取部位

電子 beam熔接機로서 熔接한 試驗板에서 Fig. 4.4와 같은 疲勞試驗片을 Fig. 4.5와 같은 位置에서 採取하

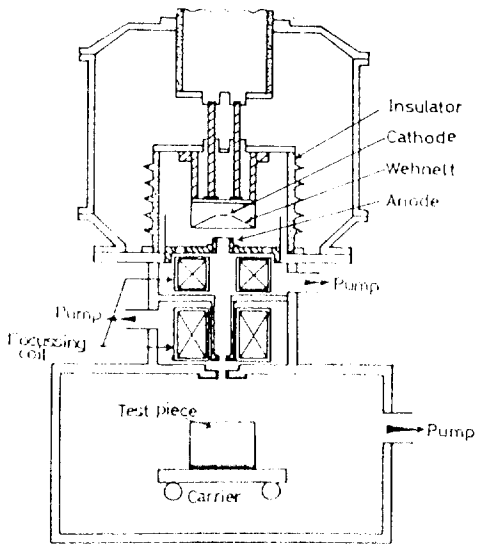


Fig. 4.3 Schematic diagram of 100KV, 100KW E.B. welder.

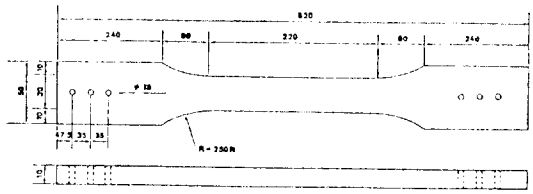


Fig. 4.4 Specimen size.

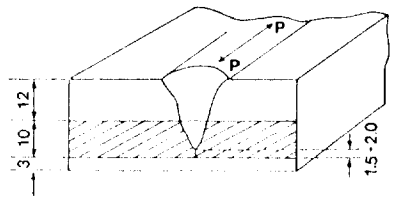


Fig. 4.5 Longitudinal partial welded joint.

었다.

4.2.3. 疲勞試驗

(1) 疲疲勞試驗機: 實驗에 使用한 疲勞試驗機는 島津製作所製의 油壓 servo type로서 static load 30ton, dynamic load 25ton의 2軸疲勞試驗機이다.

(2) 負荷應力 및 加振波形: 本 疲勞試驗에 加한 應力狀態는 Fig. 4.6과 같으며, 負荷應力振幅은 完全片

Table 4.3 Test conditions

(Max. N : 10^6 cycle)

Specimen No.	Stress Kg/mm²	Load (ton)	Speed (H_z)	Cycles of Fracture	Position of Fracture (mm)	Remark
1	0 - 24	1.2	1.8	1323960	Suspension of test because doesn't break	• Position of crack initiation
2	0 - 26	7.8	1.8	855240	85	
3	0 - 28	8.4	1.6	436670	110, 77	
4	0 - 32	9.6	1.6	418450	54	
5	0 - 40	12	1.4	174040	105	
6	0 - 48	14.4	1.2	106960	119	

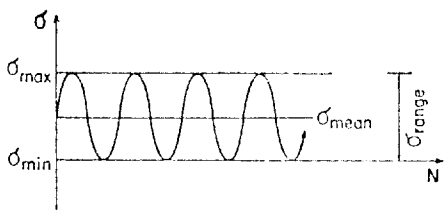


Fig. 4.6 Complete repeated load ($K=0$).

振幅이고, 加振波形은 正弦波이다. 試驗片 各各에 對한 應力, 荷重, 速度, 破斷壽命, 破斷位置等을 Table 4.3에 表示한다.

(3) S-N線圖 : 이와 같이 實施한 實驗 結果를 S-N 線圖로 表示하면 Fig. 4.7과 같다. Fig. 4.7에서는 $S=\sigma_R$이다. 여기서 疲勞限은 25kg/mm²정도임을 알아 내었다. 이 값은 原材料의 降伏點 82kg/mm²와 比較하여 大端이히 작음을 알 수 있다.

4.3. S.E.M.에 依한 破面解析

試驗片 4.5.6의 破斷面에는 電子 beam熔接의 特有한 欠陷인 spike가 있었으므로, 그 原因을 走査型電子顯微鏡으로 調査하였다.

Fig. 4.8에서 보면 spike의 尖端에서 應力集中이 生기고, 거기서부터 crack이 發生하였음을 볼수가 있다(A 部分). 이 部分을 300倍로 더욱 擴大시켜 보면, spike에서 發生한 crack은 root部로 傳播되고 있으며, root部에서는 crack이 發生하지 않았음을 볼 수가 있다.

또, Fig. 4.8의 B,C 및 E部分은 plateau部分이며,

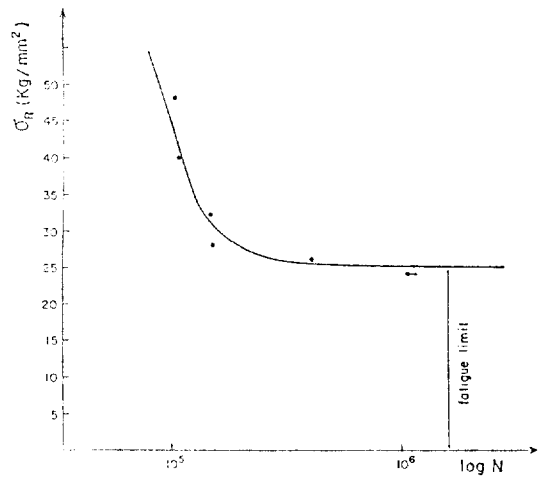


Fig. 4.7 S-N curve.

더욱 擴大된 顯微鏡寫眞에서는 secondary crack을 發見할 수가 있다. D部分을 더욱 擴大시킨 Fig. 4.9에서 보면 striation 模樣과, 亦是 secondary crack을 볼수가 있다[12].

4.4. 熔接部의 硬度

塑性加工에 消費된 energy와 硬度와의 關係에 依하여, 硬度를 測定하므로서 加工의 程度를 定量的으로 알수가 있다. 이 事實은 어떤 材料를 熱處理에 依해서 硬度를 變化시켰을 때도 마찬가지이다[13]. 이때 引張强度 σ_R와 Brinell硬度 H_B와의 사이에는 다음 關係式이 成立한다.

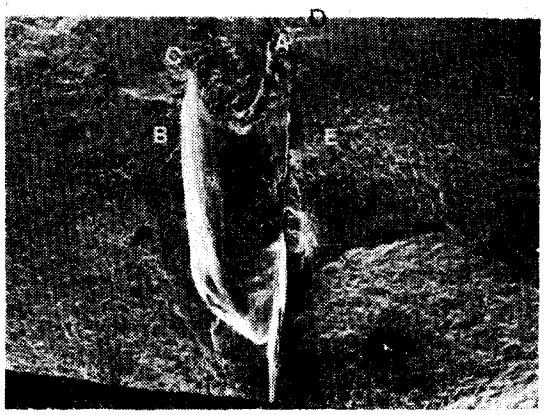


Fig. 4.8 Spike and root.

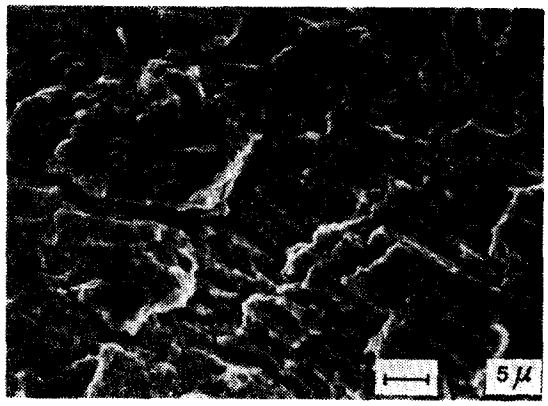


Fig. 4.9 Secondary crack and striation.

$$\sigma_T = CH_B \qquad (4.1)$$

여기서, C는 材料에 依하여 定해지는 定數이다.

本硏究에서는 硬度를 microvickers 硬度計로서 測定하였으며, 測定間隙은 0.25mm이다. 이 結果를 Fig. 4.10에 表示한다. 그림에서 보면 母材의 硬度는 H_v=280~295이며 最高硬度는 熔接中心線上에 있으며 Ⅰ, H_v=470이다.

熔接金屬의 硬度는 Fig. 4.10에서 Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ의 경우 H_v=365~440程度이다. 母材와 熱影響部의 境界에서는 母材보다도 若干 낮은데, 이것은 母材의 熔接熱에 依한 tempering效果에 依해 軟化한 것이라고 生覺된다[11].

또, Ⅳ의 境遇, 熔接中心線의 硬度가 急激히 增加하는 것은, beam先端部의 急冷에 依하여 硬化된 것이라고 본다. 一般的으로 熔接金屬이 母材보다 硬度가 크게 나타나 있는데 이것은 熔接金屬의 急冷에 依한것이라고 思慮된다.

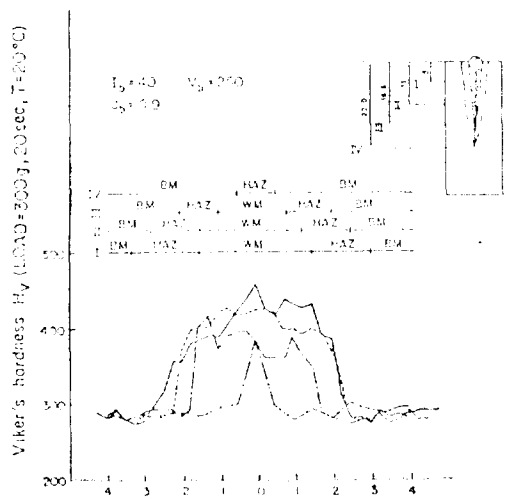


Fig. 4.10 Distribution of hardness.

또 bead의 上部가 下部보다 硬度가 若干 높다.

5. 結 論

以上과 같은 本硏究에서 다음과 같은 結論을 얻을수 있었다.

1. 部分溶込 電子 beam熔接의 斷面 macro 寫眞을 보면 spike가 많이 生 기었는데, 이것은 電子 beam熔接의 하나의 큰 欠陷으로서 앞으로도 繼續 硏究해야할 課題이다. 現在로서는 spike의 完全除去는 不可能하므로, 强度上 重要部에는 完全溶込熔接을 함이 바람직하다.

2. 部分溶込 電子 beam熔接이음의 熔接線方向 引張疲勞試驗의 疲勞限은 25kg/mm²程度이다.

3. 龜裂은 root部보다는 spike에서 發生하여 他部位로 傳播한다.

4. 母材보다도 bead部의 硬度値가 增加하고 있는 것은 熔接金屬의 冷却速度가 빠라서 martensite가 많이 生成된 것이라고 生覺된다.

5. Bead先端部의 硬度는 bead上部보다 오히려 若干 낮다.

謝 辭

本硏究는 著者가 日本 大阪大學 熔接工學硏究所에서 1982. 3. 16~9. 16까지 6個月間 客員敎授로서 滯在하는 동안 同硏究所의 實驗裝置와 材料를 使用하여 遂行되었다. 本硏究를 爲하여 모든 便宜를 提供해 주신 同硏究所의 荒田吉明敎授 및 堀川浩甫敎授를 爲始하여 硏究室 여러분과, 其他 關係硏究室 여러분의 親切한 도움에

對하여 感謝드린다. 特히 本硏究를 爲하여 著者를 招請하여 주신 荒田吉明敎授와, 많은 勞苦를 아끼지 않으시고 實驗을 도와주신 李東郁氏에게는 深甚한 謝意를 表하는 바이다.

參 考 文 獻

〔1〕 L.N. Sayer, "Electron Beam Welding", p. 384-388, *British Welding Journal*, July, 1967.

〔2〕 L.N. Sayer, "Quality in Electron Beam Welding", p. 163-169, *British Welding Journal*, April 1967.

〔3〕 荒田吉明, "電子 beam熔接技術의 現狀과 將來" 日本熔接學會誌, 第41卷 第11號, 1972.

〔4〕 Kiyohide Terai and Hiroyoshi Nagai, "The Applicattion of Electron Beam Welding", *Metal Construction*, November, 1978 part 1.

〔5〕 Y. Arata and M. Tomie,"100kw Class Electron Beam Welding technology (Report Ⅳ), p. 15-23, Vol. 9, No. 2, *Trans. of JWRI*, 1980.

〔6〕 Yoshiaki Arata and Eiji Nabegata, "Tandem Electron Beam Welding (Report I), p. 101-109, Vol. 7, No. 1, *Trans. of JWRI*, 1978.

〔7〕 Yoshiaki Arata, Eiji Nabegata and N. Iwamoto, "Tandem Electron Beam Welding (Report II), p. 85-95, Vol. 7, No. 2, *Trans. of JWRI*, 1980.

〔8〕 Y. Arata, N. Abe and S. Yamamoto, "Tandem Electron Beam Welding (Report III), p. 1-9, Vol. 9, No. 1, *Trans. of JWRI*, 1980.

〔9〕 勘定義弘, "低氣壓電子 beam熔接에 關한 硏究" 大阪大學 大學院硏究報告, Feb. 1982, 修士論文.

〔10〕 Dann E. Passoja, "Penetration of solids by high power Density Electron Beam", p. 13-15, *British Welding Journal*, Jan. 1967.

〔11〕 紫田泰, "構造用高張力鋼의 電子 Beam熔接에 關한 硏究"

〔12〕 松田福久, 中川博二共著, "熔接部의 破壞破面 Fractography集", 1978.

〔13〕 渡邊正紀, 佐藤邦彦, 熔接力學과 그 應用" 朝倉書店 1971.