

16. 佐藤, 寺崎, 山下; 單層溶接部の局所集積水素濃度におよぼす溶接諸條件の影響, 溶接學會誌, Vol.48, pp.504~509(1979).
17. H. Granjon; Cold cracking in welding of Steels, International Symposium of Cracking and Fracture in Welds, JWS, (1971).
18. 前掲書(9); pp.62~65.
19. 日本溶接學會; 溶接部組織寫眞集, 黒木出版社, pp.71~72(1984).
20. 飯保熙康, 西島敏; 金屬の疲勞, 丸善株式會社, pp.140(1973).
21. 日本規格協會; 溶接金屬の水素測定方法 JISZ 3113(1975).
22. 大野悟 等; 擴散性水素に關する檢討 - 捕集液と測定器具, 日本溶接學會誌 Vol.40, No.7, pp.37~43 (1977).
23. C.A.Zupffe, C.E.Sims; Hydrogen Embrittlement, Internal stress and Defects in steel, Hydrogen Damage, American Society for Metals, pp.13~59 (1977).
24. 日本溶接學會; 鐵鋼溶接部の破面寫眞集, 黒木出版社, pp.88~90, pp.492~404 (1982).
25. David Broek; Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff & Noordhoff Netherlands, pp.24~66 (1978).
26. 前掲書(20); pp.243~248.
27. Kenneth Easterling; Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, pp.190~191(1983).


熔接施工條件에 따른 高張力鋼材 熔接部の 疲勞龜裂 成長特性에 關한 研究

宋 成 玉

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior
in the Welded Parts of High Tensile Steel
under Various Welding Methods

Song Seong-ok

〈目 次〉

- 
- Abstract
 - 記號說明
 - 1. 序 言
 - 2. 實驗方法
 - 2.1 試驗片 및 熔接條件
 - 2.2 實驗裝置 및 試驗方法
 - 3. 實驗結果 및 考察
 - 3.1 熔接條件에 따른 組織 및 硬度分布 變化
 - 3.2 熔接部位別 龜裂成長舉動 比較
 - 3.3 熔接方法에 따른 龜裂成長舉動 比較
 - 3.4 微視的 疲勞破面 特徵
 - 4. 結 論
 - 5. 參考文獻

A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior in Welded Parts of High Tensile Steel under Various Welding Methods

Song, Sung-Ok

Department of Mechanical Engineering, Graduate School,
Korea Maritime University

Abstract

In this paper, the high tensile steel RA36 plate specimens having a single edge cracked notch were investigated to find out the fatigue crack growth behavior in welded parts under such various welding methods as the shielded metal arc welding, the submerged arc welding and the electro gas welding by 3 point bending test, respectively.

Main results obtained are as follows:

1. Regardless of the kind of welding methods, the fatigue crack growth rates da/dn in welded parts appeared to be equal or lesser behavior than those in base metal at the same stress intensity factor range ΔK .
2. At the same stress intensity factor range ΔK , the fatigue crack growth rates da/dn in heat affected zones appeared to be greater behavior than those in fusion lines of the submerged arc welding and the electro gas welding, however, da/dn in fusion lines appeared to be greater behavior than those in heat affected zones of the shielded metal arc welding.
3. At the same stress intensity factor range ΔK , the fatigue crack growth rates da/dn in heat affected zones or fusion lines of the submerged arc welding and the electro gas welding appeared to be greater behavior than those of the shielded metal arc welding.
4. The correlation data of $da/dn - \Delta CTOD$ showed to be more clear with a narrow scatter band than those of $da/dn - \Delta K$.
5. On the occasion that the fatigue crack growth rates in welded part are discussed, it is necessary to clarify whether these are considered by ΔK value or $\Delta CTOD$ value.

記 號 說 明 (Nomenclature)

P_L	: 限界荷重 (Nominal limit load)	(kg)
B	: 試驗片두께 (Thickness of specimen)	(mm)
W	: 試驗片너비 (Width of specimen)	(mm)
a	: 노치를 포함한 균열길이 (Crack length including notch)	(mm)
b	: 리가먼트너비 (Width of ligament) $W-a$	(mm)
S	: 스패의 길이 (Length of span)	(mm)
σ_{ys}	: 降伏強度 (Yield strength)	(kg/mm ²)
σ_t	: 引張強度 (Tensile strength)	(kg/mm ²)
σ_y	: 有效降伏強度 (Effective yield strength) $\frac{\sigma_{ys} + \sigma_t}{2}$	(kg/mm ²)
E_l	: 伸率 (Elongation)	(%)
ΔK	: 應力強度係數範圍 (Stress intensity factor range)	(kg/mm ^{1.5})
$\Delta CTOD$: 龜裂先端開口變位範圍 (Crack tip opening displacement range)	(mm)
da/dn	: 龜裂成長速度 (Crack growth rate)	(mm/cycle)
E	: 彈性係數 (Young's modulus)	(kg/mm ²)
ν	: 포아손比 (Poisson's ratio)	
BM	: 母材 (Base metal)	
HAZ	: 熱影響部 (Heat affected zone)	
WM	: 熔着金屬 (Welded metal)	
SMAW	: 手動被覆 아아크 熔接 (Shielded metal arc welding)	
SAW	: 서브머지드 아아크 熔接 (Submerged arc welding)	
EGW	: 일렉트로 가스 熔接 (Electro gas welding)	

1. 序 言

最近 工業의 發達과 더불어 鋼構造物의 機能의 向上, 割重의 輕減, 材料의 節約을 目的으로 高張力鋼材의 使用量은 顯著히 增加하고 있고, 또한 그 使用範圍도 擴大되어 船舶, 橋梁등의 大型 構造物 및 各種 機械 또는 電力容器用 材料로 利用되고 있다.

그러나, 高張力鋼材는 그 強度를 높이기 위해 여러가지 合金元素를 添加하거나 鋼質 純處를 通하여 製造되므로 熔接構造用 材料로서 使用時 熔接部 여러가지 問題點이 발생한다.^{1) 2) 3)}

더우기, 實際 構造物이나 各種 機械는 同時 反復荷重을 받고 있으므로 強度水準의 上은 高張力鋼에서 熔接龜裂이나 氣孔(porosity), 介在物(inclusion)등 部材內部的 各種 缺陷은 部材의 形狀不連續部의 應力集中部를 起點으로 疲勞龜裂(fatigue crack)이 發生하기 쉽다. 이따같이 發生한 疲勞龜裂은 降伏點 보다 낮은 使用荷重下에서도 龜裂이 成長하여 臨界龜裂의(critical crack length)에 이르게 되면 순식간에 構造物 全體의 破斷을 起來하게 될 危險性이 커진다.^{4) 5) 6)}

따라서, 高張力鋼材로 製作되는 各種 構造物이나 機械등이 長期間에 걸쳐 充分한 安全性을 確保하여 그 機能을 發揮하도록 하기 위한 設計에 있어서, 가장 重要한 問題는 이들 構造物등의 內外部에 存在하는 各種 應力集中部나 熔接部 缺陷에서 發生하는 疲勞破壞를 如何히 防止하느냐 하는 것이다.

이러한 問題를 解決하기 위하여는 高張力鋼材의 熔接構造物에 存在하는 應力集中部나 熔接部位로부터 發生하는 疲勞龜裂 發生舉動과 일단 發生한 疲勞龜裂 成長舉動을 熔接條件에 따라 正確히 把握하여야 하며, 이를 基礎로 하여 構造物의 形狀이나 使用環境에 따른 使用壽命을 豫測할 수 있어야 할 것이다.

本 研究에서는 以上의 各點에 着眼하여 市販되고 있는 硬座 55kg/mm² 級 RA36의 高張力 鋼材를 對象으로 採用되고 있는 3가지 熔接方法, 即 手動被覆 아크熔接(shielded metal arc welding), 潛入 아크熔接(submerged arc welding) 및 전해 아크熔接(electro gas welding)時 熔接部位에서 이 疲勞龜裂 成長速度를 母材金屬部, 母材部, 熱影響部 및 母材部別로 調査하여 各 熔接部位別 疲勞龜裂 成長舉動 및 各 熔接方法에 따른 疲勞龜裂 成長舉動 特性을 比較 檢討할 目的으로 3점굽힘 試驗片을 製作하여 Instron 荷重 萬能材料試驗機에 依해 疲勞試驗을 行하고 그 結果를 考察 하였다.

2. 實驗方法

2.1 試驗片 및 熔接條件

本 實驗에 使用한 實驗材料는 海上構造物이나 船舶의 強力甲板의 舷側厚板, 強力甲板의 스트링거板 및 彎曲部外板등 造船用으로 使用되는 두께 20 mm의 國產 非調質 高張力鋼材인 韓國船級協會 材料記號 RA 36 으로서 그 化學成分 및 機械的 性質은 Table 1 에 나타내었다.⁷⁾

이 鋼材를 母材로 하여 手動被覆 아아크熔接(Shielded Metal Arc Welding: SMAW), 서브머지드 아아크熔接(Submerged Arc Welding: SAW) 및 일렉트로 가스熔接(Electro Gas Welding: EGW)의 3 가지 熔接方法에 依하여 熔接을 實施하였다. 이때 使用된 各 熔接棒의 化學成分과 機械的 性質은 Table 2 에 나타내었다.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties

	Chemical compositions (wt%)							Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Nb	Sol.	σ_{ys} ² (kg/mm ²)	σ_t ² (kg/mm ²)	El. (%)
RA36	0.15	0.43	1.38	0.24	0.02	0.028	0.043	40	55	27

Table 2. Chemical compositions and mechanical properties of electrode

Welding Methods	Electrode	Chemical compositions (wt%)						Mechanical properties		
		C	Si	Mn	P	S	Mo	σ_{ys} ² (kg/mm ²)	σ_t ² (kg/mm ²)	El. (%)
SMAW	KSE 5016 (Low hydrogen)	0.07	0.53	0.98	0.014	0.01	—	49	57	32
SAW	AWS F72 EH14	0.06	0.26	1.70	0.024	0.013	—	44	56	27
EGW	AWS EG70T2 (CO ₂ Gas)	0.08	0.36	1.72	0.015	0.006	0.12	49	59	31

手動被覆 아아크熔接은 國產 高張力鋼用 低水素系 熔接棒(KSE 5016)을 300 °C에서 1 時間 乾燥後 使用하였고 서브머지드 아아크熔接은 軟鋼 및 高張力鋼用 플럭스(flux)

에 하이이(AWS F 72- EH 14)을 使用하였으며, 電極으로 1스熔接을 탄산가스 熔接용 111이(AWS EG 70 T 2)를 利用하여 탄산가스 保護雰囲気에서 行하였다.

手前長邊 아이크熔接, 저코머이지드 아이크熔接時와 電極으로 1스熔接時 1스 1스부 (groove) 形狀과 노치(notch)位置 및 熔接條件은 Fig. 1, Fig. 2, Table 3에 說明 되어있다.

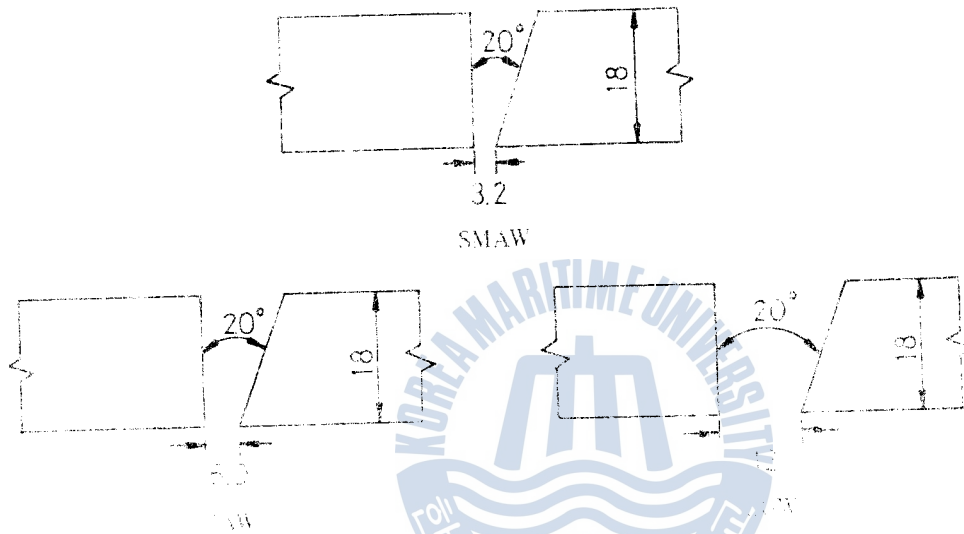


Fig. 1. Shape of groove

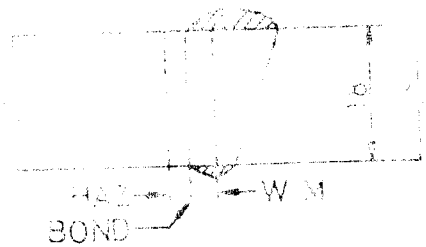


Fig. 2. Notch location of welded joint

Table 3. Welding conditions

Condition Weld	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
SMAW	160	29	13	21.42
SAW	800	36	40	43.20
E GW	620	32.5	9	134.33

手動被覆 아아크 용접 및 서브머지드 아아크 용접의 경우는 多層 용접으로 手動被覆 아아크 용접은 7 패스(pass), 서브머지드 아아크 용접은 4 패스(pass)로 實施하였고 일렉트로 가스 용접은 單層으로 實施하였다. 이와같이 용접된 板材로부터 3점굽힘 試驗片을 採取하여 熔着金屬(Welded Metal : WM), 본드部(Bond), 熱影響部(Heat Affected Zone : HAZ) 및 母材(Base Metal : BM)에 노치를 加工하여 熔接方法別로 各各 別個의 노치 試驗片을 製作하였다.

試驗片의 形狀 및 크기는 熔接構造物, 高壓容器 및 海洋構造物등의 設計時 使用되는 CTOD 試驗規格으로 노치를 除外하고 BS 5762 에 따라 製作하였다. 이와같이 製作한 노치 試驗片을 Fig. 3에 나타내었다.⁸⁾

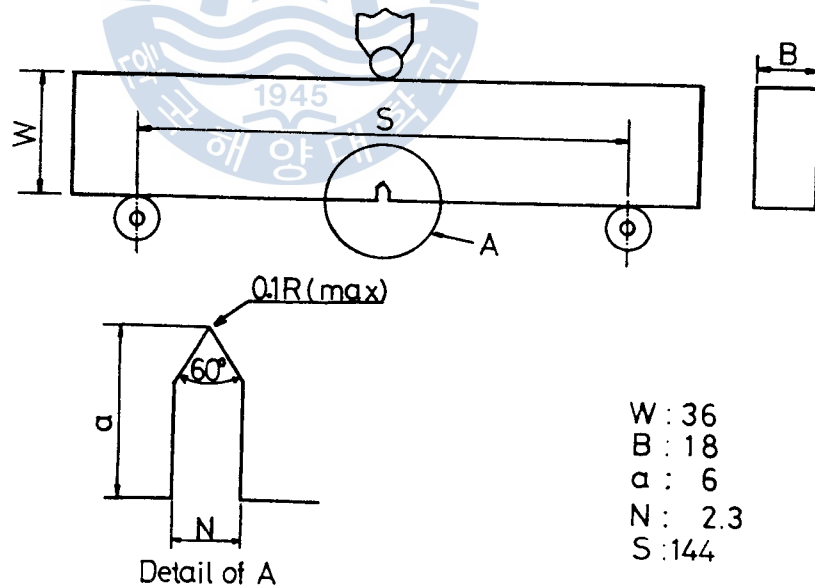


Fig. 3. Shape of specimen

2.2 實驗裝置 및 試驗方法

實驗에 使用한 試驗機는 Instron 社製 萬能材料試驗機 (capacity: 25 ton)이며 疲勞荷重速度 200cpm, 應力比 R (Pmin/Pmax) = 0 인 一定荷重 2,000 kg의 3점굽힘 사인 웨이브 (sine wave) 의 反復荷重이 作用하도록 하였다. Photo. 1 은 이 實驗裝置의 概略을 나타낸다.

疲勞龜裂 成長特性을 正確히 把握하기 위하여 反復荷重을 限界荷重 P_L (nominal limit load) 의 40 %以下인 2,000 kg 으로 定하였으며 P_L 은 式(1)에 依하여 求하였다.⁹⁾

$$P_L = \frac{4}{3} \frac{Bb^2\sigma_y}{S} \dots\dots\dots(1)$$

여기에서, $\sigma_y = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_t}{2}$, B는 試驗片의 두께, b는 리가먼트 너비 (width of ligament) W-a, W는 試驗片의 너비, a는 노치길이, S는 스패의 길이, σ_{ys} 는 材料의 降伏強度이며, σ_t 는 材料의 引張強度이다.

疲勞龜裂成長길이 (fatigue crack growth length)는 一定한 反復荷重 2,000 kg을 加한 후 아세톤 (acetone)과 레프리카 필름 (replica film)을 利用하여 工具顯微鏡에 의하여 龜裂길이 0.001mm까지 測定할 수 있었으며 龜裂成長에 따른 應力強度係數範圍 (stress intensity factor range) ΔK 와 龜裂先端開口變位範圍 (crack tip opening displacement range) $\Delta CTOD$ 로 함께 調査하였다.

한편, 微視的 龜裂成長舉動은 走査型 電子顯微鏡 (scanning electronic microscope)에 依한 破面觀察을 통해 調査하였다.

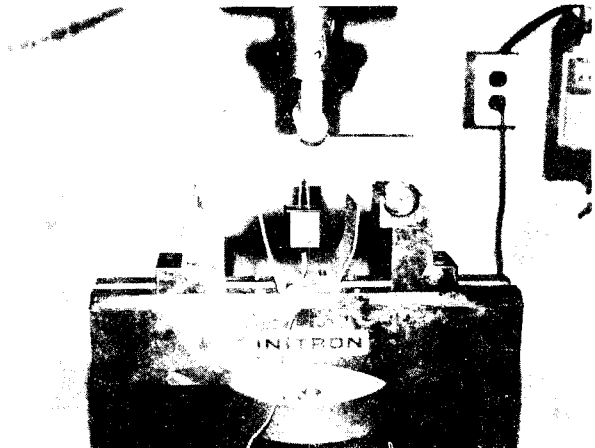


Photo. 1. General view of experimental apparatus

3. 實驗結果 및 考察

3.1 熔接條件에 따른 組織 및 硬度分布 變化

Photo. 2, Photo. 3 및 Photo. 4는 熔接時 熱사이클을 받아 나타난 熔接본드部 近傍의 組織變化를 手動被覆 아아크熔接, 서브머지드 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 各 熔接方法에 對해 比較하여 나타낸 것이다. 여기에서 熔着金屬은 WM, 熱影響部는 HAZ, 母材는 BM으로 나타내었다.

熔着金屬에서는 熔融點 以上の 熱을 받아 熔融凝固하였으므로 樹枝狀(dendrite) 組織이 形成되고 있음을 觀察할 수 있었다. 이 入熱量이 比較的 많은 일렉트로 가스熔接 및 서브머지드 아아크熔接에서는 樹枝狀 組織이 뚜렷하게 나타나는데 反하여 手動被覆 아아크熔接과 같은 低入熱 多層 熔接의 경우는 樹枝狀이 느리게 成長할 뿐만 아니라 後層의 熱處理 效果를 받아 樹枝狀 組織이 뚜렷하게 나타나지 않고 均一하게 分布되어 있음을 觀察할 수 있다.¹⁰⁾

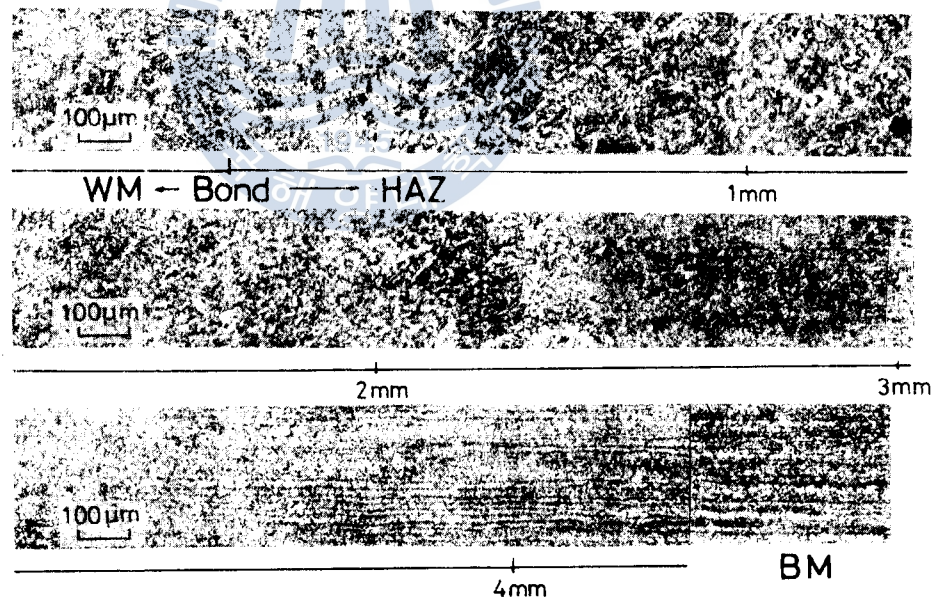


Photo. 2. Change of continuous micro-structure in SMAW

본드部 部近에서는 페라이트(ferrite) 結晶이 析出되어 있는 狀態로부터 알 수 있는 바와 같이 프라이어 오오스테나이트(prior austenite) 結晶의 粗大化 現象은 入熱量이

같은 手動披覆 아아크熔接의 경우에 있어 적게 나타나고 이에 反하여 入熱量이 가장 많은 일렉트로 가스熔接의 경우에 매우 顯著하며 그 領域 또한 大端히 넓게 되므로 본報의 脆化領域이 크게 되어 있음을 알 수 있다.

熱影響部の 組織은 連續적으로 變化하고 있음을 사각을 통하여 알 수 있다. 본報에서 부터 2 mm 떨어진 部位를 熔接條件에 따라 比較하여 보면 일렉트로 가스熔接과 反하여 어지르 아아크熔接時는 方向性이 完全히 消失되 마르텐사이트(martensite) 또는 中溫段 階組織인 베이나이트(bainite) 結晶粒 周圍의 網狀의 페라이트 組織이 發達되어 있고 오스테나이트 結晶粒의 粗大化는 본報部에 비해 작아졌음을 觀察할 수 있다. 또 같은 手動披覆 아아크熔接의 경우는 페라이트 오스테나이트 組織이 微細化되고 高溫組織인 微細한 베이나이트, 페라이트 組織의 混合組織으로 나타나 있음을 알 수 있다.

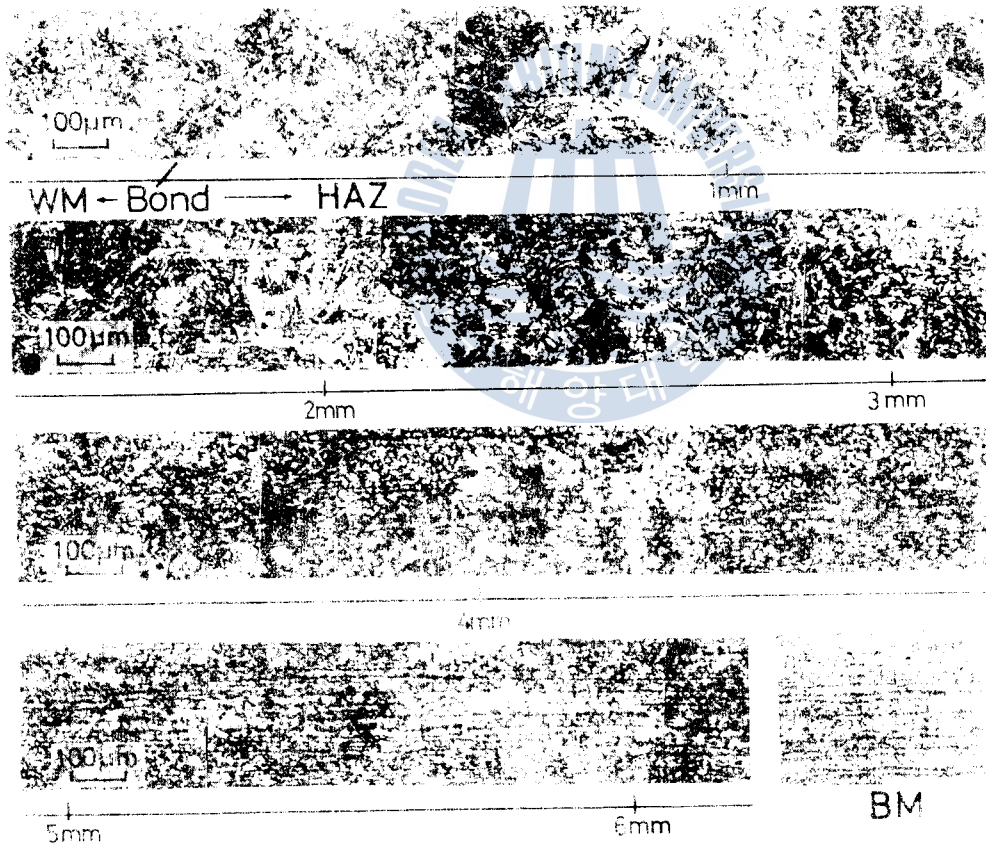


Photo. 3. Change of continuous micro-structure in SAW

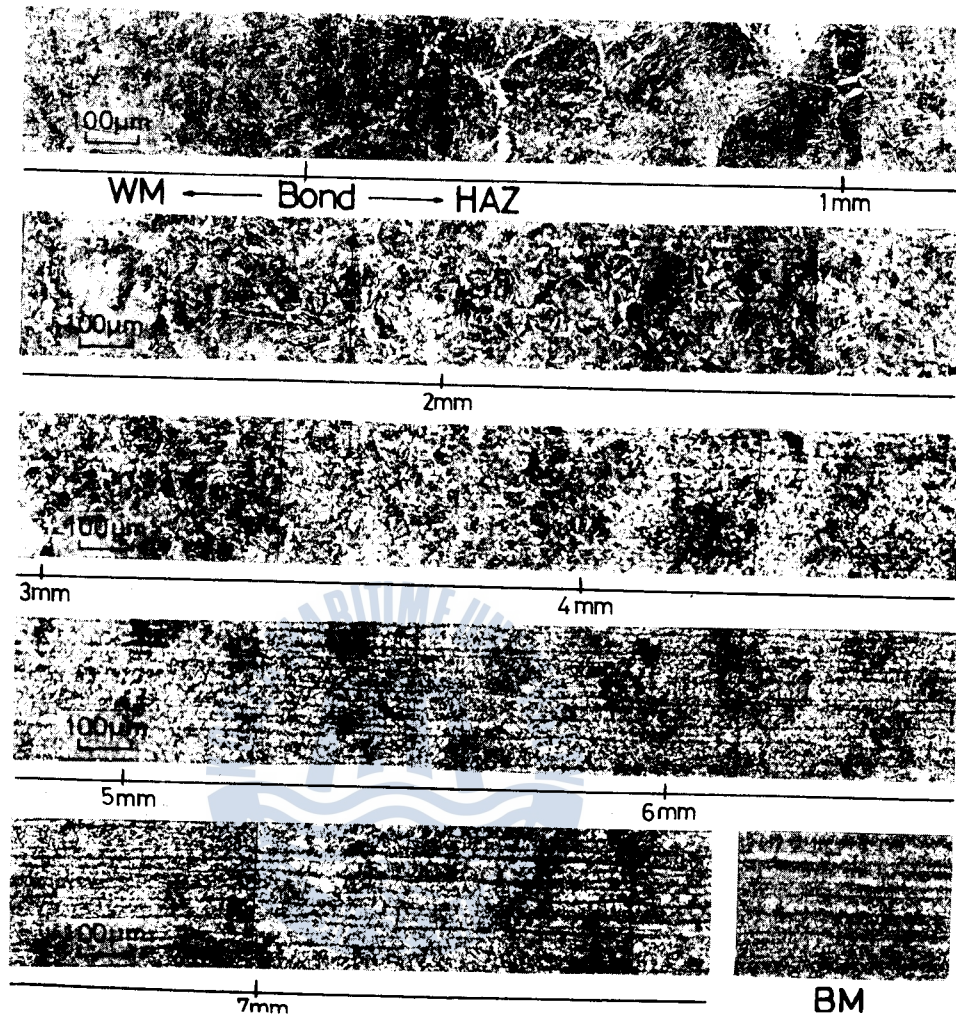


Photo. 4. Change of continuous micro-structure in EGW

또한, 各 熔接方法 다같이 熱影響部의 外側部近에서는 微細한 페라이트와 퍼얼라이트(perlite) 組織으로 되어 壓延材를 노오멀라이징(normalizing) 處理한 效果를 얻을 수 있어 母材보다도 細粒의 結晶領域이 觀察된다. 이것은 熔接時 1100℃~900℃ 程度로 加熱되어 이루어진 領域으로 粗粒域에 比해 相當한 靱性 回復이 豫想된다. 이 領域은 본드部로부터 手動被覆 아아크熔接은 約 2.5mm, 서브머지드 아아크熔接은 約 4.5mm, 일렉트로 가스熔接은 約 5.2mm 떨어진 部位에 存在함은 觀察할 수 있다.^{11), 13)}

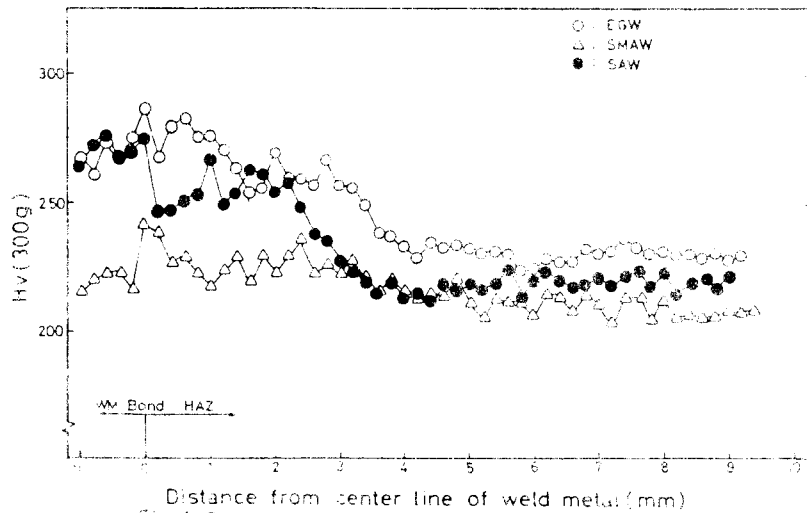


Fig.4. Distribution of micro-Vickers hardness in various welding methods (RA36)

Fig.4는 高張力鋼材 RA36의 斷面에 Table 3의 熔接條件으로 手動被覆 아아크熔接, 서브머저드 아아크熔接과 일렉트로 가스熔接을 實施하여 各 試驗片에서 熔着金屬部, 분브部 및 熱影響部の 硬度變化를 測定한 結果이다.

이에 依하면, 3가지 熔接方法 中의 分브部에서 最大硬度를 나타내며 일렉트로 가스 熔接時 $H_v(300g)$ 287, 서브머저드 아아크熔接時 $H_v(300g)$ 275, 그리고 手動被覆 아아크熔接에서는 $H_v(300g)$ 236으로 最大硬度를 서로 比較하면 큰 差이는 보이지 않 으며, 또한 3가지 熔接方法에 있어서 일렉트로 가스熔接과 서브머저드 아아크熔接의 경우는 比較的 高硬度 領域의 幅이 넓으나 手動被覆 아아크熔接의 경우는 分브部에서 除 外하도록 硬度變化가 거의 없으며 특히 熔着金屬部는 母材部の 거의 같음을 알 수 있다. 分브部로부터 1.7mm位置에서 서브머저드 아아크熔接의 경우가 일렉트로 가스熔接의 硬度보다 높은 硬度值를 나타내고 있다.

手動被覆 아아크熔接의 경우가 다른 熔接方法에 비해 낮은 硬度分佈를 나타내는 것은 多層熔接으로 인한 熱處理效果에 起因한 것으로 思料된다. 또한, 3가지 熔接方法 中의 熔着分브部에 있어서 $H_v(300g)$ 250前後로 50 kg/mm^2 級 高張力鋼材의 選定基準 으로 考慮되고 있는 $H_{max} 325(5-10\text{ kg})$ 에는 充分한 값을 나타내고 있다.¹²⁾

3.2 熔接部位別 龜裂成長舉動 比較

Fig.5는 手動被覆 아아크熔接의 熔着金屬, 분브部, 熱影響部 및 母材에서 各各 發生

成長한 龜裂길이 (crack length) a 와 反復回數 (number of cycle) N 와의 關係를 表示한 것이다. 이에 의하면 一定 反復荷重下에서의 疲勞條件에서는 母材가 反復回數에 對하여 빠른 龜裂成長舉動을 보이고 있으며, 본드部, 熱影響部, 熔着金屬部の 順序로 比較的 느린 龜裂成長舉動을 보이고 있다. 熔着金屬部の 경우는 緩慢한 發生段階를 보이다가 成長段階에서는 다른 部位와 比較的 類似한 龜裂成長舉動을 나타내고 있다.

이러한 結果는 서브머지드 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 경우에도 같은 結果가 確認되었다.

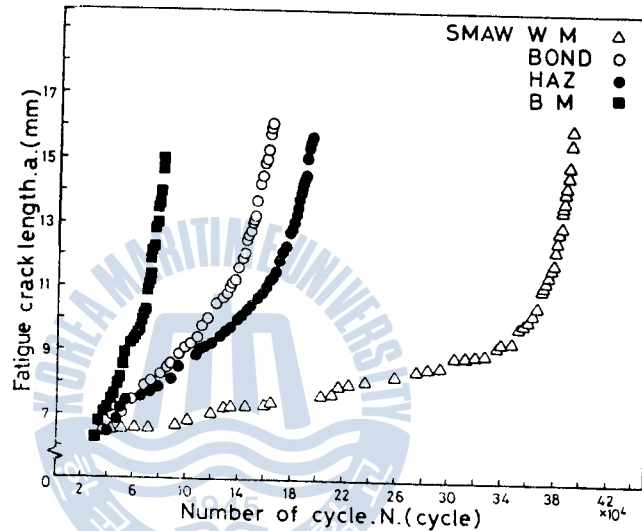


Fig.5. Fatigue crack length vs. number of cycle in shielded metal arc welding

一般的으로 疲勞龜裂 成長特性은 龜裂길이만의 成長速度(crack growth rate)인 da/dn 와 應力強度係數範圍(stress intensity factor range) ΔK 와의 相關關係에 依하여 評價되며 貫通龜裂의 경우 da/dn 와 ΔK 와의 關係는 Paris Rule에 依하여 다음 式(2)와 같이 表示된다.

$$da/dn = C(\Delta K)^n \dots\dots\dots (2)$$

여기에서, C 와 n 은 材料常數이다.

Fig.6, Fig.7, Fig.8은 本 實驗에서 求한 手動被覆 아아크熔接, 서브머지드 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 熔着金屬, 본드部, 熱影響部 및 母材部位에 대한 $da/dn - \Delta K$ 의 關係를 兩對數座標에 表示한 것이며, 應力強度係數範圍 ΔK 는 荷重과 試驗片的

形狀關係에 依해 式(3)을 利用하여 求하였다.^{14) 15) 16)}

$$\Delta K = \frac{3 \cdot \Delta P \cdot S \sqrt{\pi a}}{2B(w-a)^2} \{ 1.09 - 1.735(a/w) + 8.20(a/w)^2 - 14.18(a/w)^3 + 14.57(a/w)^4 \} \dots \dots \dots (3)$$

여기에서, ΔP는 荷重範圍, S는 스패의 길이, a는 노치를 포함한 균열길이, B는 試驗片의 두께이며, w는 試驗片의 너비이다.

da/dn - ΔK 關係를 全體적으로 보면 各 熔接方法 下의 龜裂成長率은 應力強度係數範圍 ΔK가 約 170 kg/mm^{1.5}인 點을 前後로 發生段階와 成長段階로 뚜렷히 區分되며 모든 實驗點은 바로 兩개의 區間(band) 안에 整理되고 있음을 보이고 있다. 各 熔接

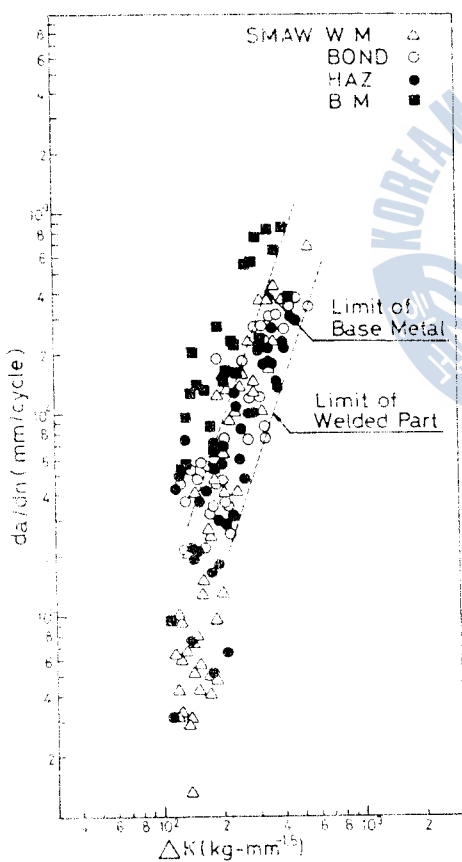


Fig.6 Crack growth rate(da/dn) vs. stress intensity factor range(ΔK) in shielded metal arc welding

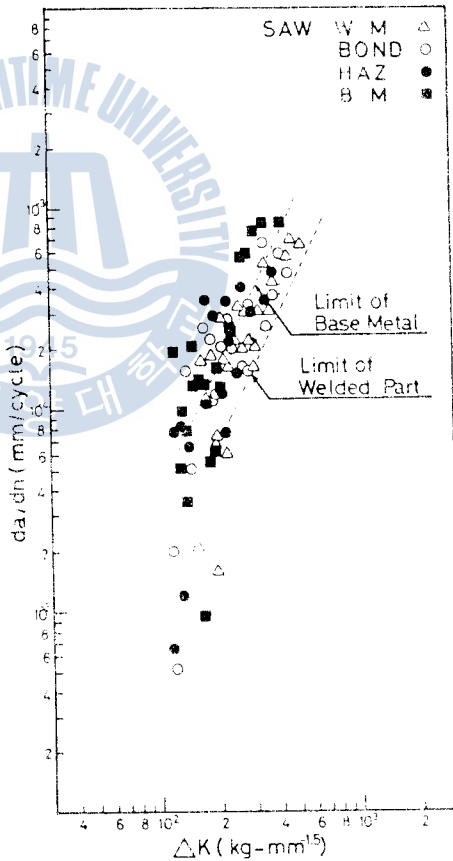


Fig.7 Crack growth rate(da/dn) vs. stress intensity factor range(ΔK) in submerged arc welding

의 實驗點 區間과 본드部, 熱影響部, 熔着金屬部가 部位別 뚜렷한 區別없이 하나의 實驗點 區間안에 整理되고 있다.

이와 같은 結果에서 龜裂成長段階에 있어서의 同一한 ΔK 條件下에서 母材部가 熔接部보다 더 빠른 龜裂成長速度的 舉動을 보이고 있다.^{17), 18)}

또한, 熔接部 중에서는 서브머저드 아아크熔接 및 일렉트로 아아크熔接과 같이 入熱量이 많은 熔接일수록 熱影響部가 본드部보다 더 빠른 龜裂成長速度的 舉動을 나타내는 反面 比較的 入熱量이 적은 手動被覆 아아크熔接의 경우는 본드部가 熱影響部보다도 빠른 龜裂成長速度的 舉動을 나타내고 있다.

熔接部가 全體的으로 母材에 비해 龜裂傳播速度가 低下하는 것은 熔接部の 경우에는

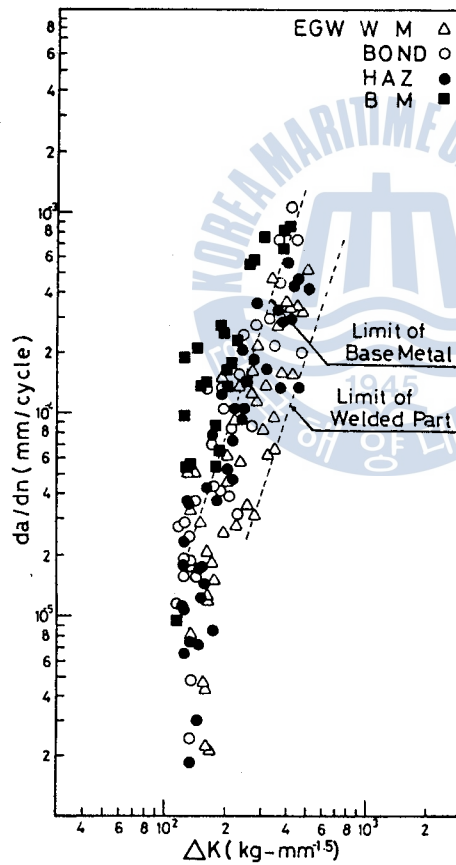


Fig.8. Crack growth rate(da/dn) vs. stress intensity factor range(ΔK) in electro-gas welding

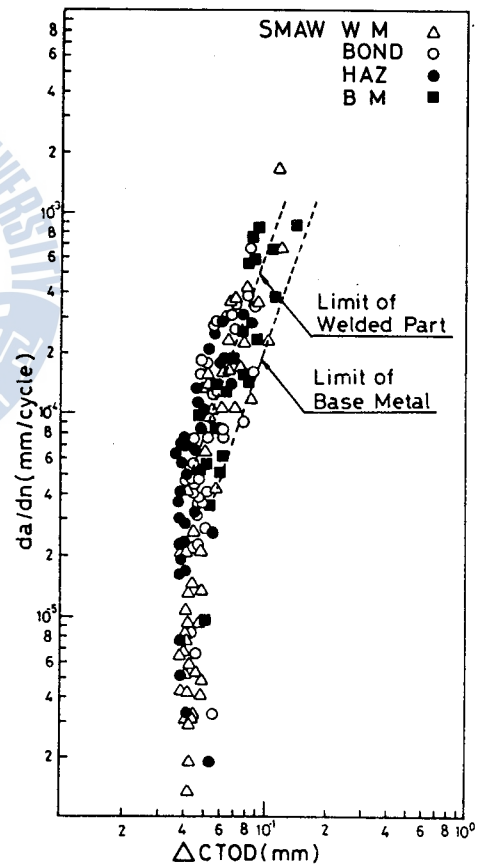


Fig.9 Crack growth rate(da/dn) vs. crack tip opening displacement range($\Delta CTOD$) in shielded metal arc welding

龜裂先端에 恒常 壓縮殘留應力이 作用하며 溶接熱影響에 依한 粒子的 方向性 消失, 龜裂先端의 開口變位의 變化에 起因한 것으로 推測된다.

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 同一한 實驗結果를 가지고 手動被覆 아아크溶接, 100% 아아크溶接 및 일렉트로 가스溶接의 熔着金屬, 母材部, 熱影響部 및 母材部位에 對한 龜裂成長速度 da/dn 의 龜裂先端開口變位範圍(crack tip opening displacement range: $\Delta CTOD$)와의 關係, $da/dn - \Delta CTOD$ 를 兩對數座標에 表示한 것이다. 이 關係의 龜裂先端開口變位範圍 $\Delta CTOD$ 값은 노치先端에 클립게이지(elip gauge)를 設置할 後 開口變位量을 調査하고 式(4)를 利用하여 求하였다. (19, 20)

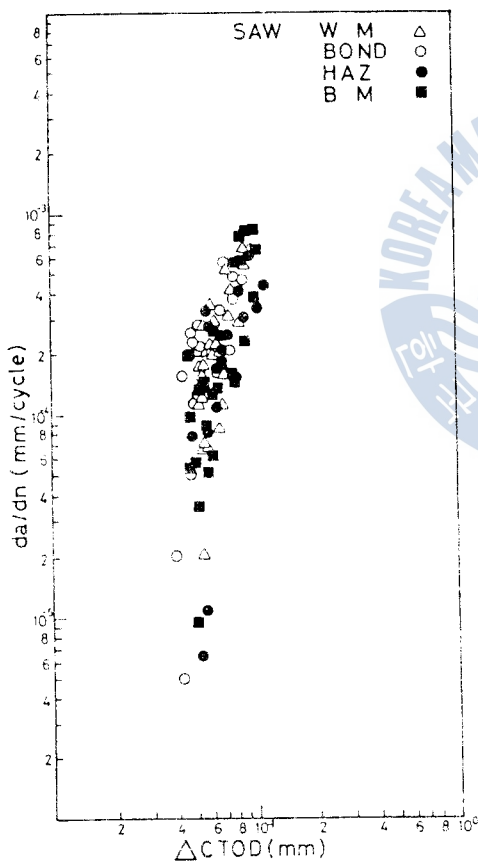


Fig.10 Crack growth rate(da/dn) vs crack tip opening displacement range ($\Delta CTOD$) in submerged-arc welding

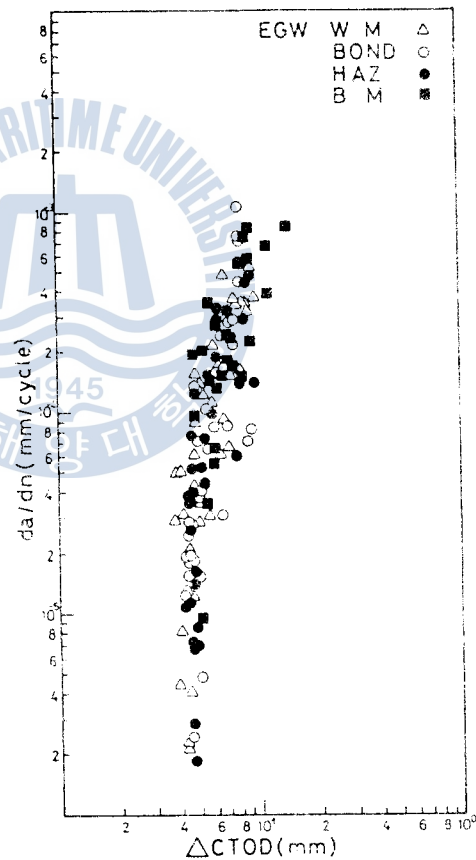


Fig.11 Crack growth rate(da/dn) vs. crack tip opening displacement range ($\Delta CTOD$) in electro-gas welding

$$\left. \begin{aligned} V \geq 2V' \text{인 경우, } \Delta CTOD &= \frac{0.45(w-a)}{0.45w + 0.55a + Z} \cdot (V-V') \\ V < 2V' \text{인 경우, } \Delta CTOD &= \frac{0.45(w-a)}{0.45w + 0.55a + Z} \cdot \frac{V^2}{4V'} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

여기에서, $V' = \frac{r\sigma_{ys}w(1-\nu^2)}{E}$, $r = 4.048(a/w)^4 - 7.026(a/w)^3 + 1.928(a/w)^2 + 3.396(a/w)$ 이며, a 는 노치를 포함한 균열길이, σ_{ys} 는 降伏強度, E 는 탄성계수, Z 는 試驗片 밑면에서부터 클립게이지 附着位置까지 거리, ν 는 포아손比, w 는 試驗片 너비이고, V 는 Z 의 位置에서 開口變位量이다.

da/dn - $\Delta CTOD$ 關係를 보면 各 熔接方法 다같이 龜裂成長舉動은 龜裂先端開口變位 範圍 $\Delta CTOD$ 가 約 0.05 mm인 點을 前後로 發生段階와 成長段階로 區分된다. da/dn - $\Delta CTOD$ 關係는 da/dn - ΔK 의 關係보다 좁은 實驗點 區間을 보이고 있어 da/dn - $\Delta CTOD$ 關係가 더욱 一貫性 있는 相關關係에 있음을 알 수 있다.

手動被覆 아아크熔接의 경우 da/dn - $\Delta CTOD$ 關係는 da/dn - ΔK 關係와는 反對로 同一한 $\Delta CTOD$ 값 하에서는 母材部에서 龜裂成長速度가 熔接部보다 느린 傾向을 나타내 고 있다. 또한, 手動被覆 아아크熔接의 경우에는 모든 實驗點들은 두개의 區間 안에 整理되어 있음을 보이고 있으나, 서브머지드 아아크熔接 및 電氣로 가스熔接의 경우는 뚜렷한 區別없이 하나의 區間 안에 混在되어 있음을 보이고 있다.

Fig. 12는 以上の 關係를 分析하기 위하여 手動被覆 아아크熔接의 경우 各 熔接部位에서의 疲勞龜裂 成長過程中 ΔK 값에 따른 $\Delta CTOD$ 變化를 整理하여 그 結果를 表示한 것이다.

Fig. 12에 依하면 各 熔接部位에서 다같이 ΔK 값의 變化에 따라 $\Delta CTOD$ 값도 比例하여 增加하고 있으나 一定한 ΔK 값 條件下에서 母材의 變位量이 가

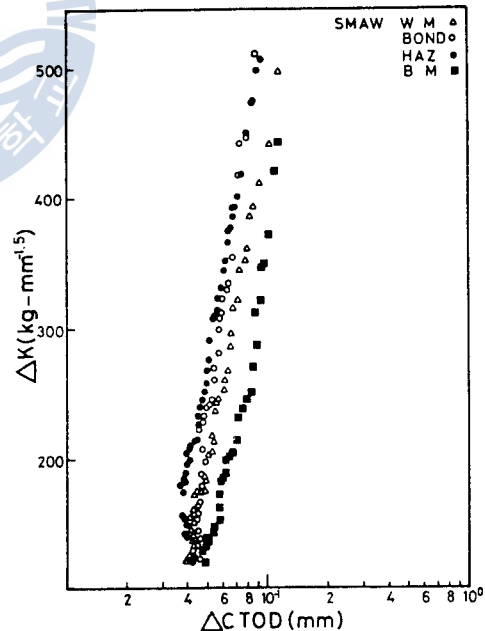


Fig.12 Stress intensity factor range(ΔK) vs. crack tip opening displacement range ($\Delta CTOD$) in shielded metal arc welding

장 크고 熱影響部에서의 變位量이 가장 작게 나타나 있다. 이것은 成長되고 있는 龜裂先端에서 壓縮殘留應力の 存在 有無에 關聯되어 있는 것으로 推測된다. 即 母材부에 있어서는 龜裂先端에 壓縮殘留應力이 存在하지 않고 熱影響部를 비롯한 熔接部位에 있어서는 成長되고 있는 龜裂先端에 壓縮殘留應力이 存在하고 있기 때문에 一定한 ΔK 條件下에서 變位量에 差異가 나타나는 것으로 思料된다.

따라서, $da/dn - \Delta K$ 關係에서 母材部에서의 龜裂成長速度가 가장 빠르게 나타나는 것은 上述한 壓縮殘留應力과의 密接한 關係 때문인 것으로 判斷된다.

3.3 熔接方法에 따른 龜裂成長舉動 比較

Fig.13 은 Table 3의 熔接條件으로 熔接한 手動被覆 아아크熔接, 서보머치드 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 熱影響部에서 發生 成長한 各종의 龜裂길이(crack length) a 와 應力反復回數(number of cycle) N 과의 關係를 表示한 것이다.

이에 依하면, 一定 反復荷重條件下에서는 서보머치드 아아크熔接의 경우가 反復回數에 對하여 가장 빠른 龜裂成長舉動을 보이고 있어 疲勞壽命이 가장 짧고, 手動被覆 아아크熔接의 경우가 比較的 느린 龜裂成長舉動을 보여 疲勞壽命이 가장 긴 것으로 나타나 있다. 한편, 手動被覆 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 경우는 發生段階에서 比較的 緩慢한 龜裂成長舉動을 보이다가 成長段階에서는 빠른 龜裂成長舉動을 보이고 있다.

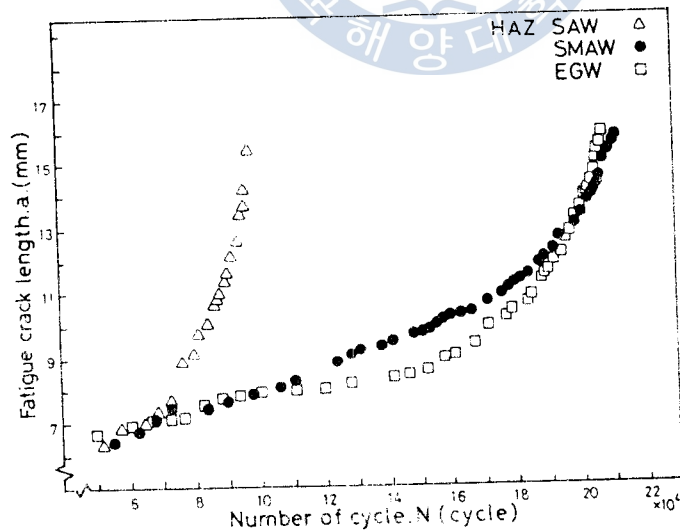


Fig.13 Fatigue crack length vs. number of cycle in heat-affected zone under various welding methods

Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16은 3種類의 熔接方法에 對한 熱影響部, 본드部 및 熔着金屬 部位에 있어서의 疲勞龜裂 成長舉動을 $da/dn - \Delta K$ 의 關係로 整理하여 兩對數座標로 表示한 것이다. 여기서 應力強度係數範圍 ΔK 는 式(3)을 利用하여 求하였다.

全體적으로 보면 各 熔接部位, 即 熱影響部, 본드部 및 熔着金屬 다같이 龜裂發生段階와 成長段階로 뚜렷이 區分할 수 있다.

熱影響部와 본드部에서는 모든 實驗點들은 比較的 넓은 區間 안에 整理되어 있다. 即 서브머지드 아아크熔接과 일렉트로 가스熔接의 實驗點 區間과 手動被覆 아아크熔接의 實驗點 區間으로 整理되고 있음을 알 수 있다. 또한, 龜裂成長段階에 있어서 同一한 應力強度係數範圍 ΔK 條件下에서는 서브머지드 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接方法이 手動被覆 아아크熔接方法보다 빠른 龜裂成長速度的 舉動을 보이고 있다. 한편, 熔着金屬部位

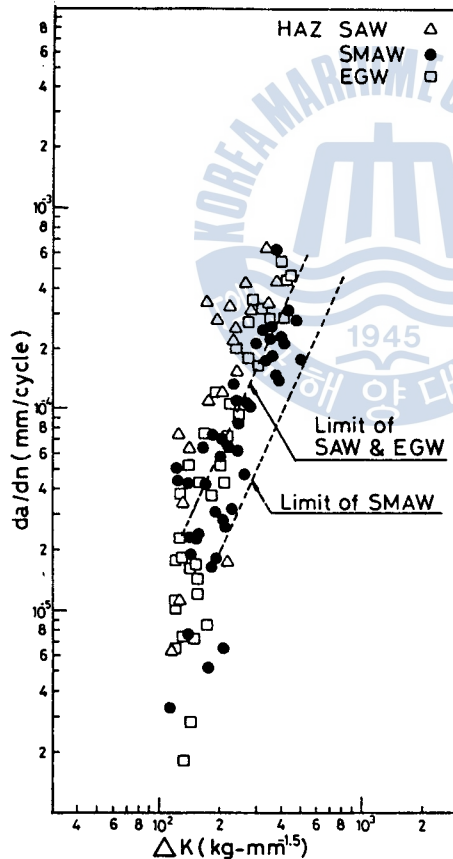


Fig.14 Crack growth rate(da/dn) vs. stress intensity factor range(ΔK) in heat affected zone under various welding methods

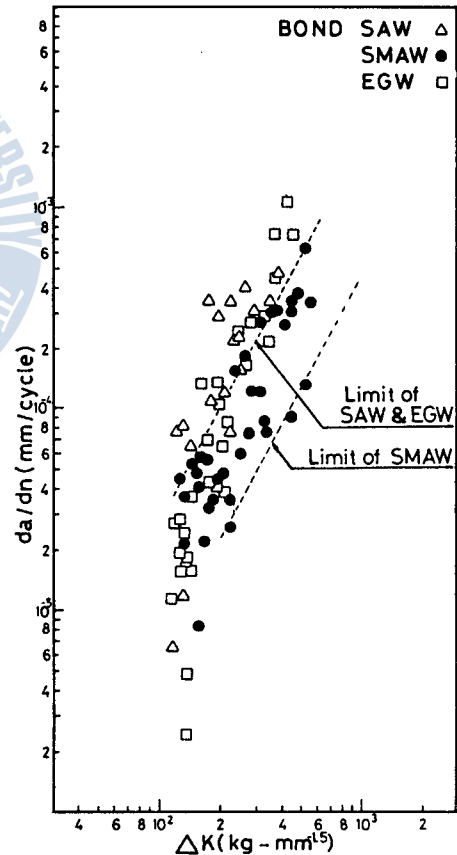


Fig.15 Crack growth rate(da/dn) vs. stress intensity factor range(ΔK) in bond under various welding method

이것은 모든 實驗點들이 하나의 區間 안에 存在되어 있음을 보이고 있다. 즉, 서보머치드 아아크溶接, 일렉트로 가스溶接 및 手動波渡 아아크溶接의 實驗點들이 集중되어 있어 뚜렷하게 區間을 區分할 수 없으나, 서보머치드 아아크溶接의 實驗點들이 比較的 龜裂成長速度가 빠른 區間 안에 整理되어 있음을 보이고 있다.

이것은 서보머치드 아아크溶接 및 일렉트로 가스溶接은 大熱熔接으로 入熱量이 많아 母材 內部的 組織變化를 起來하여 脆化가 甚하여서 Fig. 17에 表示한 比較的 硬度가 높게 되어 靱性이 劣化되었기 때문으로 推測되며, 溶着金屬部位에서는 溶接棒이 熔融凝固된 成分으로 溶接棒의 成分과 入熱量의 效果가 서로 相殺되었기 때문인 것으로 思想된다.

Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19는 同一한 實驗結果를 가지고 3種類의 溶接方法에 있어 熱影

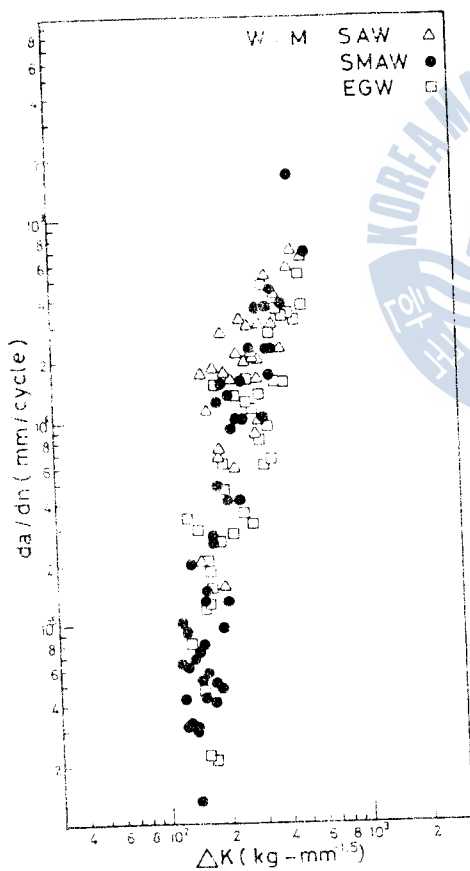


Fig. 16 Crack growth rate(da/dn) vs. stress intensity factor range(ΔK) in weld metal under various welding method

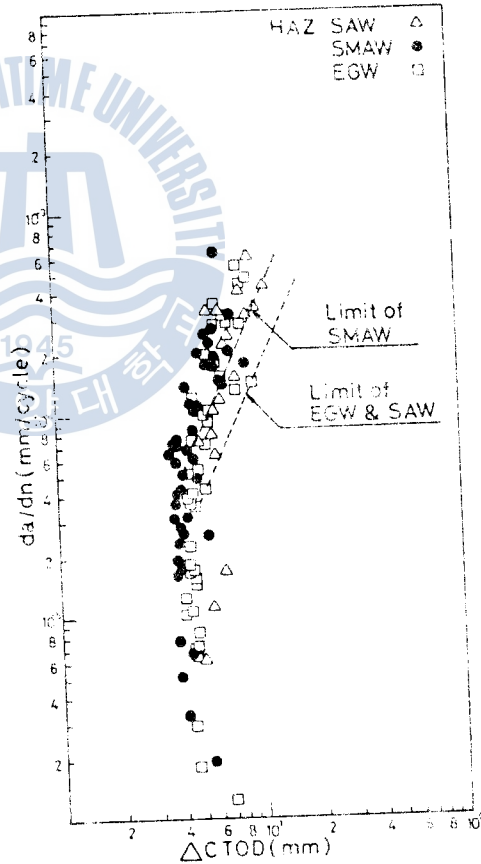


Fig. 17 Crack growth rate(da/dn) vs. crack tip opening displacement range($\Delta CTOD$) in heat affected zone under various welding methods

響部, 본드部 및 熔着金屬部位에 대한 龜裂成長舉動을 $da/dn - \Delta CTOD$ 關係로 整理하여 兩對數座標에 表示한 것이다. 여기서 龜裂先端開口變位範圍 $\Delta CTOD$ 는 式(4)를 利用하여 求하였다.

$da/dn - \Delta CTOD$ 關係를 보면 各 熔接部位別 多같이 龜裂成長舉動은 龜裂先端開口變位範圍 $\Delta CTOD$ 가 約 0.05 mm인 點을 前後로 發生段階와 成長段階로 區分되며, $da/dn - \Delta CTOD$ 關係는 $da/dn - \Delta K$ 關係보다 좁은 區間 안에 整理되어 있음을 알 수 있다.

熱影響部의 경우, $da/dn - \Delta CTOD$ 關係는 $da/dn - \Delta K$ 關係와는 反對로 手動被覆 아아크熔接의 경우가 서브머지드 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 경우보다 빠른 龜裂成長舉動을 보이고 있다. 한편, 본드部와 熔着金屬部位에서 熔接方法別로의 成長舉動에 對한 區分은 分明하지 않고 混在되어 있음을 보이고 있다.

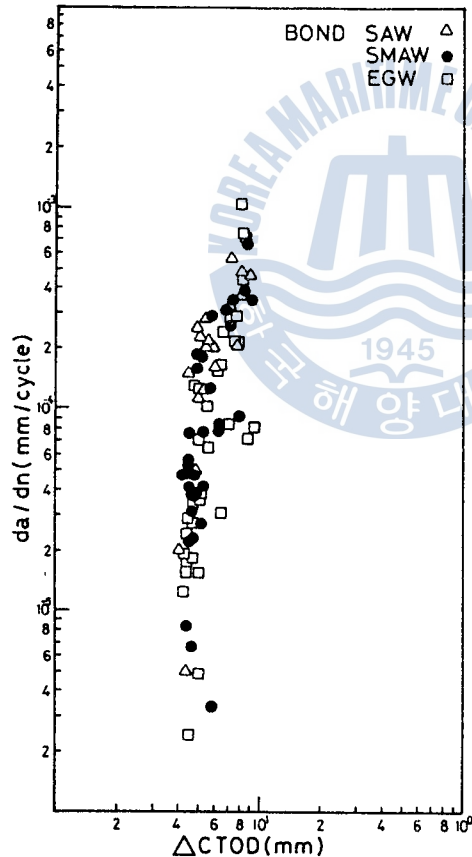


Fig.18 Crack growth rate(da/dn) vs. crack tip opening displacement range($\Delta CTOD$) in bond under various welding method

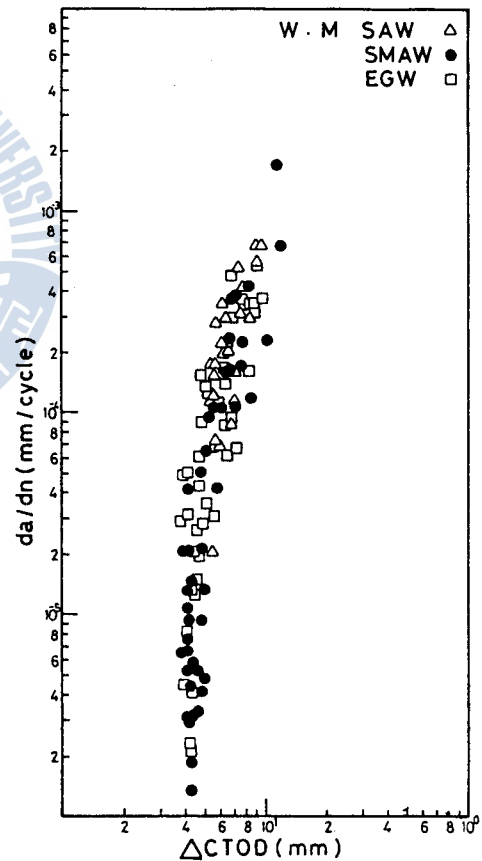


Fig.19 Crack growth rate(da/dn) vs. crack tip opening displacement range($\Delta CTOD$) in weld metal under various welding method

以上の 結果에서 熔接殘留應力이 存在하고 있는 熔接部位의 疲勞龜裂 成長舉動을 論할 때는 應力基準인 ΔK 값에 依하느냐 變位基準인 $\Delta CTOD$ 값에 依하느냐 하는 關係를 明確히 한 必要가 있음을 알 수 있다.

3.4 微視的 疲勞破面 特徵

Photo. 5는 母材 및 手動被覆 아아크熔接의 各 熔接部에서 成長하고 있는 疲勞破面을 走査型 電子顯微鏡을 利用 1,000 倍로 擴大 觀察하여 撮影한 사진이다.

사진 (b), (c), (d)는 熔着金屬, 本드部 및 熱影響部에서 龜裂이 노치先端으로부터 約 3.3 mm 까지 成長하였을 때의 疲勞破面으로 사진 (c)에서 스트라이에이션 (striation)을 觀察할 수 있는 外에는 別다른 特徵을 나타내고 있지 않다. 사진 (a)는 母材에서 發生한 龜裂이 노치先端으로부터 約 4.2 mm 成長하였을 때의 疲勞破面으로 微소한 스트라이에이션이 不規則하게 나타나 있으며 龜裂成長方向과 直角方向으로 2種 龜裂이 同時에 發生되어 있음을 보이고 있다. 이러한 2種 龜裂이 Fig. 6에서 보는 바와 같이 母材와 熔接部 보다 빠른 龜裂成長速度를 나타내게 하는 要因中의 한가지 되는 것으로 推測된다.

Photo. 6은 3 種類 熔接方法의 本드部에서 成長하고 있는 疲勞破面을 同一한 方法으로 觀察한 撮影한 사진으로, 사진 (a), (b), (c)는 手動被覆 아아크熔接, 자코버아자크 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 本드部에서 龜裂이 노치先端으로부터 約 5.5 mm 까지 成長하였을 때의 疲勞破面이다.

사진 (a), (c), 즉 手動被覆 아아크熔接, 일렉트로 가스熔接에서는 疲勞破面의 特徵이 스트라이에이션의 龜裂成長方向과 直角方向으로 比較的 잘 나타나 있으나, 사진 (b), 즉 자코버아자크 아아크熔接의 경우에 있어서는 存在物을 起點으로 한 딩플 (dimple) 이 많이 나타나 있다. 이러한 딩플의 出現으로 因해 Fig. 15에서 보는 바와 같이 本드部에서 자코버아자크 아아크熔接의 龜裂成長速度가 다른 熔接方法에 比해 極히 빠른 것으로 推測된다.¹²⁾

Photo. 7은 3 種類 熔接方法의 熱影響部에서 成長하고 있는 疲勞破面을 觀察한 結果로, 사진 (a), (b), (c)는 手動被覆 아아크熔接, 자코버아자크 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接의 熱影響部에서 龜裂이 노치先端으로부터 約 0.7 mm 까지 成長하였을 때의 疲勞破面이다.

사진 (a), (c), 즉 手動被覆 아아크熔接, 일렉트로 가스熔接에서는 스트라이에이션의 存在이 微細한 龜裂이 보일뿐 別다른 特徵을 나타내고 있지 않으나, 사진 (b), 즉 자

브머어지드 아아크熔接의 경우에 있어서는 매우 큰 破面單位(fracture facet)의 壁開面이 나타나 있어 脆性破壞의 樣相을 보이고 있다. 이러한 壁開面이 脆性破壞의 原因이 되어 Fig. 14 에서 보는 바와 같이 熱影響部에서 서브머어지드 아아크熔接의 龜裂成長速度가 다른 熔接方法에 비해 빠르게 되는 것으로 思料된다.

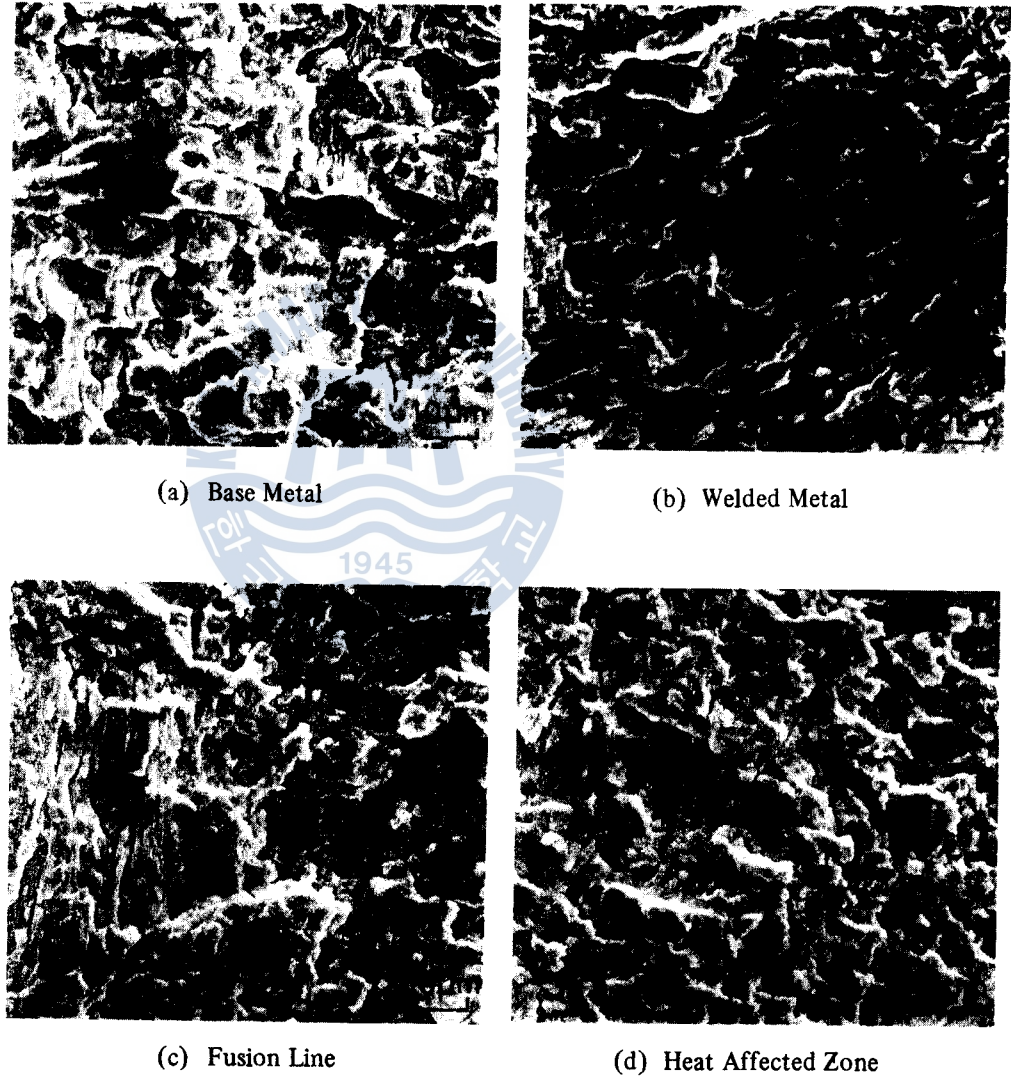
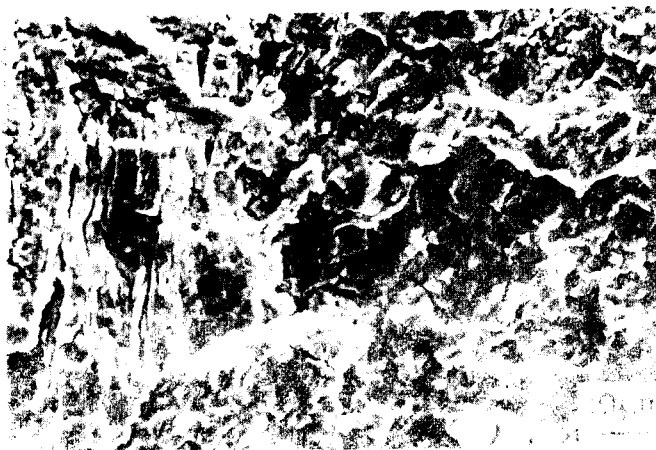
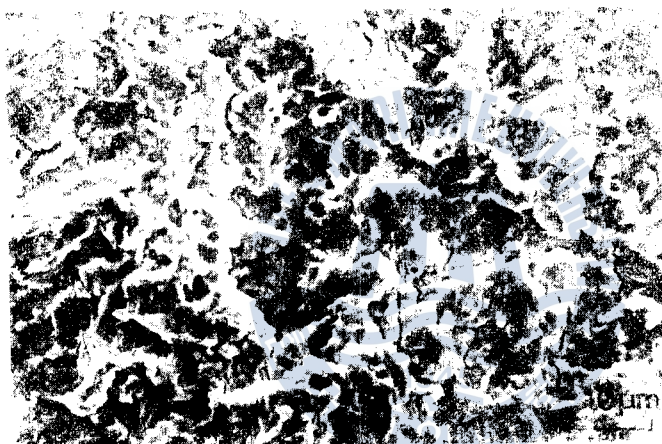


Photo. 5. Fractographs of Fatigue Fracture Surface in Shielded Metal Arc Welding



(a) SACAB



(b) SAW

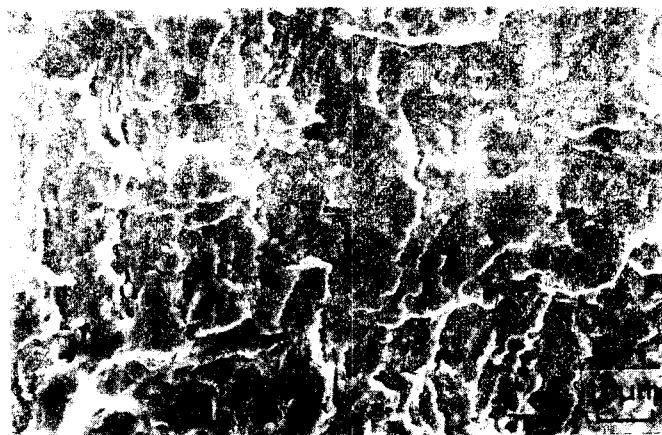
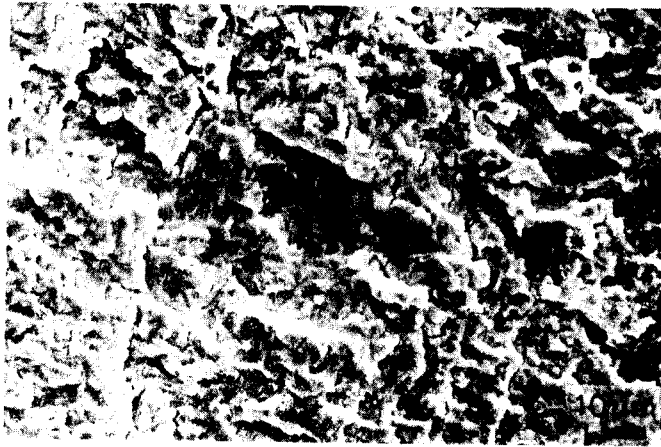
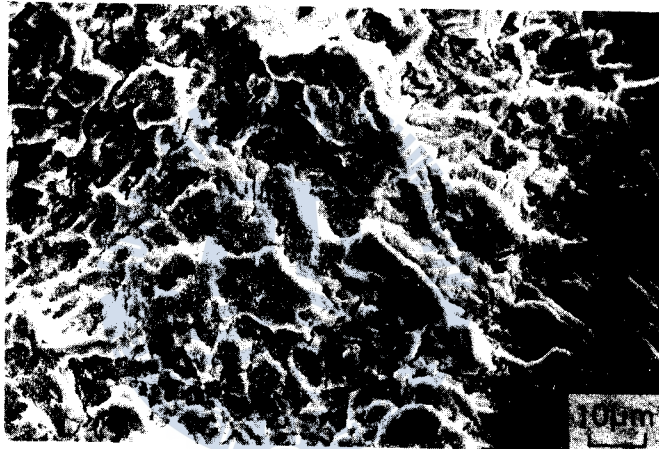


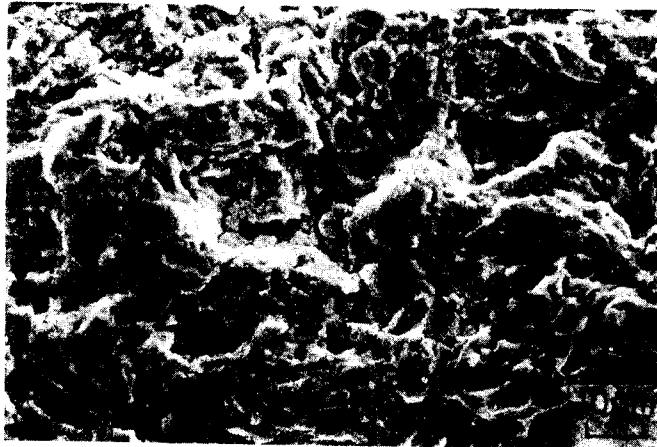
Photo. 6. Fractographs of Fatigue Fracture Surface in Fusion Line



(a) SMAW



(b) SAW



(c) EGW

Photo. 7. Fractographs of Fatigue Fracture Surface in Heat Affected Zone

4. 結 論

本 研究에서는 國産 RA 36 高張力鋼材를 對象으로 일렉트로 가스熔接, 서브머지드 아아크熔接, 手動被覆 아아크熔接을 實施하여 熔着金屬部, 본드部, 熱影響部 및 母材部에서 發生 成長한 龜裂成長舉動을 3 점굽힘 疲勞試驗을 通하여 熔接部位別 및 熔接方法別로 比較 調査한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 同一 應力強度係數範圍 ΔK 條件에서 各 熔接方法 나같이 熔接部가 母材部보다 느린 龜裂成長舉動을 보이고 있다.
2. 同一 應力強度係數範圍 ΔK 條件에서 서브머지드 아아크熔接 및 일렉트로 가스熔接과 같이 大入熱 熔接部位에서는 熱影響部가 본드部보다 빠른 龜裂成長舉動을 나타내고 比較的 入熱量이 적은 手動被覆 아아크熔接의 熔接部位에서는 본드部가 熱影響部보다 빠른 龜裂成長舉動을 보이고 있다.
3. 同一 應力強度係數範圍 ΔK 條件에서 熱影響部和 본드部の 龜裂成長舉動은 서브머지드 아아크熔接과 일렉트로 가스熔接의 경우가 手動被覆 아아크熔接의 경우보다 빠른 成長特性을 나타내고 있다.
4. 龜裂길이 成長速度 da/dn 와 應力強度係數範圍 ΔK 와의 相關關係 $da/dn - \Delta K$ 보다 da/dn 와 龜裂先端開口變位範圍 $\Delta CTOD$ 와의 相關關係 $da/dn - \Delta CTOD$ 가 더욱 一貫性 있게 整理되었다.
5. 熔接部位의 疲勞龜裂 成長舉動을 論할 때는 應力基準인 ΔK 값에 依하느냐 變位基準인 $\Delta CTOD$ 값에 依하느냐 하는 關係를 明確히 할 必要가 있다.

5. 参 考 文 獻

- 1) 金永植：高張力鋼 熔接時の問題點，大韓機械學會誌，Vol. 22, No. 3, 1982, p. 175～183.
- 2) 堀川一男：高張力鋼の機械的性質とその劣化，日本工經連セミナーテキスト，第2部，1970, p. 1～2.
- 3) 内山 郁：鐵鋼・高強度に挑む，日本工業調査會，1981, p. 91～101.
- 4) Kenneth Easterling : Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, p. 156-157.
- 5) 荒木 透：鐵鋼材料學，丸善株式會社，1976, p. 90～91.
- 6) 金永植，裴且憲：高張力鋼材 大入熱 熔接部の機械的 特性變化에 關한 研究，1984, 韓國海洋大學 大學院.
- 7) 韓國船級協會：船級 規 則，1985, p. 41, 42, 184.
- 8) British Standard Institution : Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing BS5762, 1979.
- 9) 日本機械學會：彈塑性 破壊韌性 Jic 試驗方法，1981, p. 10.
- 10) 須藤一外 2人：金屬組織學，丸善株式會社，1977, p. 69～73.
- 11) 鈴木春義，田村博：溶接金屬學，産報出版，1978, p. 62～64.
- 12) 日本規格協會：JIS 鐵鋼，1985, p. 79～80.
- 13) 佐藤，山戸：50～60 キロ非調質鋼 溶接熱影響部の組織とじん性，日本溶接學會誌，Vol. 50, No. 1, 1981, p. 11～19.
- 14) 岡村弘之：線形破壊力學入門，培風館，1976, p. 218.
- 15) 金永植外 2人：光干涉法による進展する疲勞き裂近傍のひずみ分布の測定，日本溶接學會誌，Vol. 48, No. 9, 1979, p. 732.
- 16) G. C. Sih : Handbook of Stress Intensity Factors : Institute of Fracture and Solid Mechanics, Lehigh Univ. p. 1.7.1-1.
- 17) Stanley T. Rolfe, John M. Barson : Fracture and Fatigue Control in Structure, Prentice-Hall Inc., p. 218.
- 18) 向井喜彦，田村新：高張力鋼溶接部での疲勞き裂の傳播舉動，日本溶接學會誌，Vol. 51, No. 10, 1982, p. 833～837.

- 19) 河井喜彦, 田村新: 疲勞きれつ傳播速度に關する研究, 日本溶接學會誌, Vol. 51, No. 1, 1982, p. 52~57.
- 20) 문환규外 2人: 파괴인성시험 및 시험결과응용, 한국표준연구소, 1983, p. 45~52.
- 21) David Broek: Elementary Engineering Fracture Mechanics. Sijthoff & Noordhoff-Netherlands, 1978, p. 217-220.
- 22) 日本溶接學會 溶接冶金研究會: 鐵鋼溶接部の破面寫眞集, 墨本出版社, 1982, p. 394~395.



有限要素法에 의한 多点支持軸系の 聯成自由橫振動 計算에 關한 研究

劉 光 澤

A theoretical calculation of coupled free, transverse vibration of the multi-supported shaft system by the finite element method.

Yoo Kwang-taik

<目 次>

Abstract

記號說明

1. 序 論

2. 基礎理論

2.1 보要素의 剛性매트릭스

2.2 剛性매트릭스를 利用한 運動方程式의 表示

2.3 質量매트릭스

2.4 振動方程式의 解法

3. 模型軸系에 對한 計算 및 實測值와의 比較檢討

3.1 模型軸 및 計算資料

3.2 計算모델과 入力資料

3.3 計算結果

3.4 計算結果와 實測值의 比較檢討

4. 結 論

參考文獻