

論文 8-1-10

變厚 熔接板材에서의 疲勞龜裂成長舉動에 미치는  
殘留應力の 영향에 관한 破壞力學的 研究

A Study on the Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack  
Growth Behaviors in the Weldment Plate with Various Thickness

차 용 훈  
Yong-Hoon Cha

ABSTRACT

The welding implementation used widely in the industrial field is gradually increasing due to weight reduction, unlimited material thickness, simplified structure design, and 1 manufacturing time and cost reduction.

The most significant factor that influences the fatigue crack growth rate is the residual stress generated during the welding process. Many researchers have studied the effect of the residual stress on crack growth behavior.

Through a fatigue test in a various-thickness welded specimen, redistributed residual stress is measured as the crack is developed. Then, by superposing the measured residual stress on the K value obtained by the finite element method.

1. 서 론

熔接에 의한 接合은 단조나 리벳이음 등 다른 接合 方法에 비하여 많은 長點들이 있어 船舶, 航空機, 自動車 등 産業構造物에 熔接이 널리 이용되고 있는 實情이다. 또한 各種 産業에 適用되는 熔接은 均質材料 및 複合材料 또는 補強材 및 두께가 變化하는 부재등

넓은 領域에 걸쳐서 다양하게 使用되고 있다. (1)~(2)

또한 여러가지 熔接法에서 맞대기 熔接 및 T形熔接 등에 대해서는 熔接部位에서의 缺陷問題, 殘留應力의 問題 등에 관하여 破壞力學的인 解析이 상당히 進行되고 있지만, (3)~(7) 船舶 및 各種 産業構造物 등에 廣範圍하게 使用되고 있는 두께가 다른 板材의 熔接(以下 變厚熔接材)에 대한 破壞力學的인 解析, 즉 이

\* 조선대학교 기계공학과

들 接合材 內에 存在하는 Crack의 Stress Intensity Factor(S.I.F) K의 解析에 對해서는 定量的인 結果가 나오고 있지 못한 실정이며, 많은 産業에의 應用에 比추어 이 分野에 關한 研究는 극히 미흡하다고 할 수 있겠다.

破壞強度 및 Crack成長舉動을 評價할때 力學的인 側面에서 제일 먼저 解析되어야 하는 것이 熔接殘留應力(Welding Residual Stress)이 되겠다. 熔接에서의 殘留應力은 다른 어떤 因子들 보다도 波勞龜裂成長舉動에 影響을 주는 중요한 因子라 볼 수 있기 때문이다.

특히 壓縮殘留應力場(Compressive Residual Stress Field)중의 Crack은 反復荷重을 받을때 Crack成長이 지연될 것이다. 引張殘留應力場(Tensile Residual Stress Field)중의 Crack은 成長이 빨라지는 것으로 報告되고 있다.<sup>(8)</sup>

本 研究에서는 板幅이 有限하고 두께가 不連續的으로 變化하는 板材(以下 有限幅 變厚板材)內에 存在하는 Mode I Crack에 對한 S.I.F. K값을 판폭비(Width ratio)  $w$  및 두께비(Thickness ratio)  $\beta$ 와 無次元 Crack길이  $\lambda$ 의 函數로 2次元 및 3次元 有限要素 數值解析을 하고, 그 結果를 比較 檢討하여 K解析의 效用性을 檢討한 뒤에, 疲勞試驗의 結果를 初期熔接殘留應力을 고려한 S.I.F. K로 해석하며, 또한 反復荷重에 따른 疲勞龜裂의 成長으로 再分布된 殘留應力이 疲勞龜裂成長舉動에 미치는 影響을 考察해 보고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 시험편

本 실험에 사용된 재료는 용접구조용 압연강재인 SM58강을 사용하였으며, 재료의 기계적 성질을 파악하기 위해 KS B0801에 따른 제7호 시험편을 제작하여 인장 시험을 행하였다.

인장시험편의 형상 및 치수는 Fig.1에 제시하였으며, SM58강의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 제시하였다.

Table 1 Chemical compositions of SM58 steel (Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	C	Mo
0.13	0.30	1.27	0.02	0.01	0.12	0.01	0.04

Table 2 Mechanical properties of SM58 steel

Yield Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Young's Modulus (kg/mm <sup>2</sup> )
42.1	59.9	34.8	$1.94 \times 10^4$

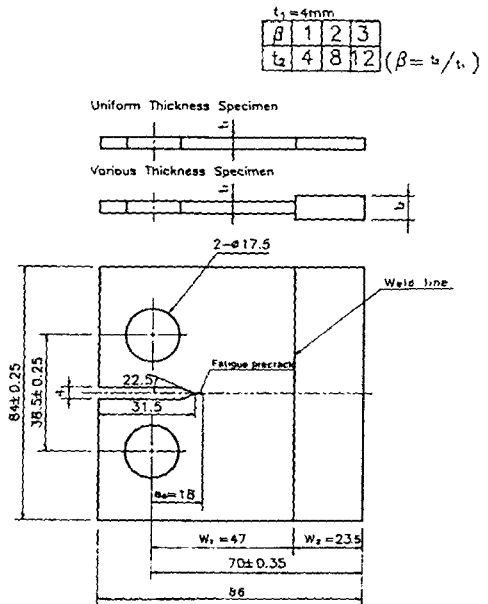


Fig. 1 Geometry of CT specimen(as weld)

피로시험에 사용한 용접시험편은 ASTM Standard E647-83<sup>(9)</sup>에 제시된 CT(Compact Tension)시험편에 준하여 제작하였다. 시험편을 얻기 위하여 4mm의 강판은 70mm×90mm, 8mm 두께의 강판은 40×90mm의 크기로 절단하고 가공한 후에 CO<sub>2</sub> 가스용접기를 사용하여 판재의 전·후면을 각각 1Pass씩 압연방향으로 용접하여 Fig. 2와 같이 용

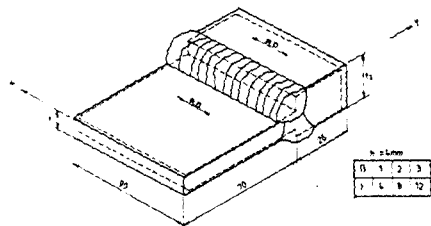


Fig. 2 Welding plate configuration and extraction of specimen

접시험편을 제작하였다. 용접 Wire는 고려용접봉(주)제의 직경 1.2mm인 50kg/mm<sup>2</sup>급 고장력강용 KC-28이었고, 용접 Wire의 화학적 성분은 Table 3과 같다. 용접시 재료의 용접변형을 최소화하기 위하여 구속하여 용접하였다. 모든 시험편은 Table 4에 제시한 조건을 적용하여 제작하였다.

Table 3 Chemical compositions of welding wire (Wt %)

C	Si	Mn	P	S	Fe
0.08	0.50	1.05	0.013	0.01	Remainder

Table 4 Welding procedure

Welding Method	Welding Current (A)	Welding Voltage (V)	Welding Speed (mm/min)	Number of Pass	Gas Flow (l)
Co <sup>2</sup> Gas Welding	150	18	120	1	20

2.2 실험방법

피로시험은 4P-일정 피로시험으로써 ASTM E 647-83에 준하였으며, Load Control은 정현파형(Sine Wave)으로, 하중비(R)를 0.1로 하여 수행하였고, 하중반복수는 20Hz, 실험실 온도는 22℃(실온)로 하였다. 피로시험 조건은 Table 5와 같다.

피로시험시 Pre-Cracking은 본 실험시의 최대하중보다 20% 큰 하중에서 5%씩 감소시키면서, 기계 가공 notch로 부터 약 2mm의 Fatigue Pre-Crack을 넣었다. 전체 초기 균열길이를 하중점으로 부터 18mm로 한 다음 본 실험에 들어갔다. 변후용접 시험편에서의 피로시험은 변후경계까지만 실시하여 data를 구하였다.

Table 5 Experimental conditions of fatigue tests

Type (CT)	kg	kg	kg	Ratio	Freq. (Hz)	Mode	Form	℃
β=1	450	45	407	0.1	20		Sine	22
β=2	800	80	720	0.1	20		Sine	22
β=3	900	90	810	0.1	20		Sine	22

2.3 용접잔류응력 측정

용접시험편의 초기잔류응력의 측정은 Strain

Gage Sectioning Method를 이용하여 Fig.3과 같이 균후·변후시험편 다같이 1mm의 Strain Gage를 Crack진전방향에 따라 5mm간격으로 접촉하고 Strain Gage주변을 절단하여, Strain이 Relax됨에 따라 일어나는 Strain의 변화를 검출해서 여기에 Young's Modulus를 곱하여 용접잔류응력을 구하였다.

실험에는 Gage Factor 2.08, 저항값 120Ω인(Kyowa Co.의 Type KFC-1-C1-11) Gage Length 1mm의 Strain gage를 사용하였다. 그리고 절단시에 Strain gage에 영향을 미치지 않도록 하기 위하여 절단부와 gage 사이의 거리를 2.5mm이상 되게 하였으며, Strain gage를 붙인 다음 브리지 회로로 Calibration 및 평형을 취한 후, 실온에서 Strain을 검출하였다.

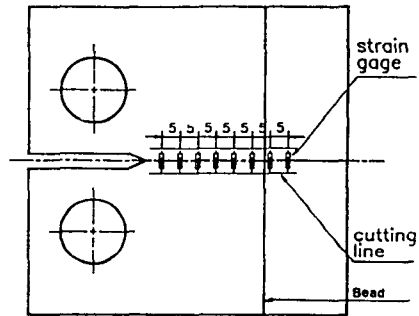


Fig. 3 Strain gage sectioning method for measuring residual stress

그리고 용접잔류응력을 제거하기위한 용접후열처리(PWHT)조건은 650℃에서 1시간 유지시킨 후 노냉시켰다. 냉각속도가 열처리효과에 큰 영향을 미치므로 두께에 따라 실용되고 있는 다음과 같은 냉각속도의 식에 맞추어 노냉시켰다.

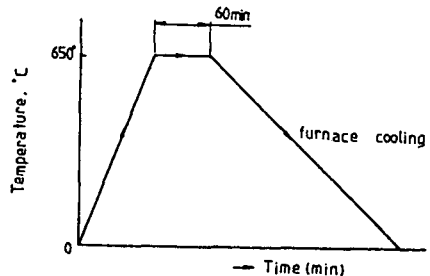


Fig. 4 Schematic explanation of post welded heat treatment

$$R \leq 200 \times (25/t) (\text{°C/hr})$$

t: 시험편의 두께(mm)  
R: 냉각속도(°C/hr)

측정된 냉각속도는 약 120°C/hr로서 위의 식의 냉각속도 범위에 있었다. 이때의 열처리 조건을 Fig. 4에 표시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 잔류응력의 분포 및 경도분포

疲勞龜裂이 熔接線에 直角으로 成長하는 경우의 熔接試驗片과 PWHT試驗片의 殘留應力測定은 Fig. 3과 같이 Strain Gage Sectioning Method(S. G. S. M.)에 의하여 각각의 試驗片에 대한 初期殘留應力을 測定하였으며, 測定한 結果는 Fig. 5와 같다.

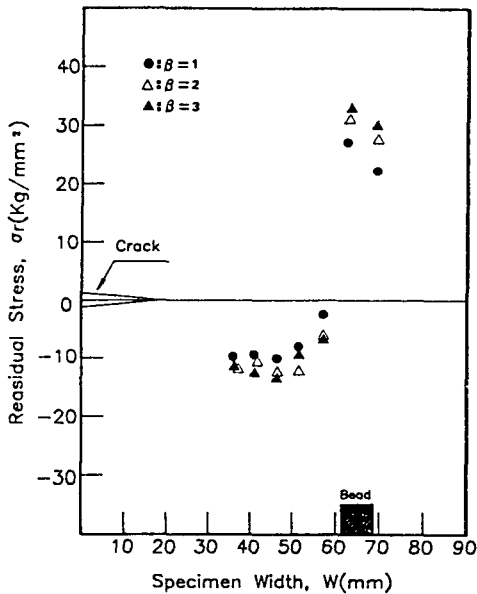


Fig. 5 Initial distribution of residual stress in weld metal specimens

Fig. 5는 變厚熔接試驗片에 대한 初期殘留應力을 測定한 結果로서, 殘留應力의 分布는 一般의 降伏強度에 거의 近接한 값을 나타낸다는 研究結果가 報告되어 있는바 本 實驗의 殘留應力分布의 測定結果

를 살펴보면 두께비 β=1인 경우 29kg/mm², β=2일때 32kg/mm², β=3일때 33.5kg/mm²로서 두께비가 커짐에 따라 引張殘留應力이 약간 커짐을 알 수 있다. 熔接 Bead部에서 약 15mm以上 떨어진 母材部에서는 10~14kg/mm²의 壓縮殘留應力의 값을 유지하고 있고, 두께비의 變化에 따른 殘留應力의 分布는 두께비가 커짐에 따라 壓縮殘留應力의 값이 약간 크게 나타났다.

또한 壓縮殘留應力은 熔接Bead部에서 引張殘留應力으로 變化하였으며, 引張殘留應力값은 두께비(β)의 變化에 따라 큰 差異를 나타내지 않았다.

Fig. 6은 PWHT試驗片의 殘留應力을 測定한 結果를 表示하였다.

變厚 熔接試驗片의 殘留應力은 試驗의 結果, 거의 除去되었다고 보아도 되겠다.

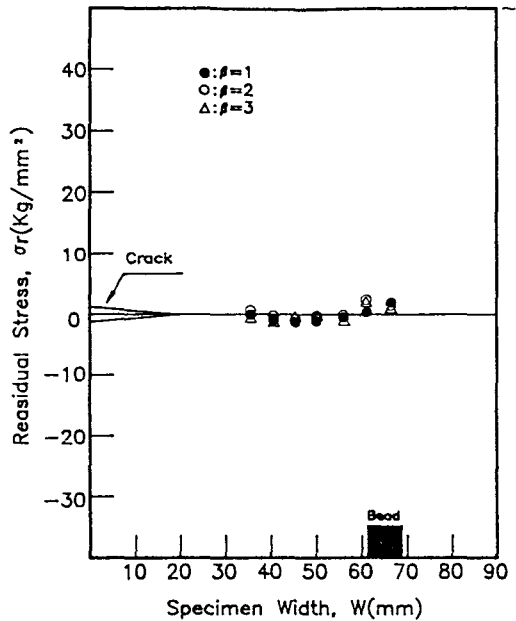


Fig. 6 Initial distribution of residual stress in PWHT specimens

#### 3.2 a-N 관계 고찰

本 研究에서는 一定荷重幅(ΔP=Const)하에 疲勞試驗을 하였다. 여기에서 Crack길이 a는 試驗片 前後에 移動式 顯微鏡을 設置하여 前後面에서 약 0.5mm 간격으로 測定하였고, a와 荷重反復數 N과 관계, 즉 a-N曲線을 母材, As weld材 및 PWHT材의 試驗

片에 대하여 Fig. 7, 8에 나타냈다.

本 解析의 a-N 曲線에서 橫軸의 N은 比較를 위해 Precracking까지의 荷重反復數를 무시하였다.

a-N 曲線의 特性을 살펴보면 같은 板幅比( $\alpha=0.5$ )에서 두께비가 커짐에 따라 變厚境界에 到達하기까지의 荷重反復數가 크게 나타났으며, PWHT試驗片의 경우 母材에 비하여 荷重反復數는 약간 작게 나타났으나, 거의 비슷한 樣相을 보인 반면, As weld試驗片과는 상당히 큰 差異를 나타냈으며, As weld試驗片의 경우  $\beta$ 값이 커짐에 따라 變厚境界에 到達하기까지의 荷重反復數는 크게 나타났다. 또한  $\beta=2$  및 3인 경우 Crack tip이 變厚境界에 到達하기 전에 각 a-N 曲線上에 變曲點이 나타나고 a의 增加率, 즉, Crack成長速度가 급속히 둔화함을 알 수 있었다. 또한 變曲點의 位置는  $\beta$ 값이 클수록 變厚境界에서 먼 지점에 나타났다.

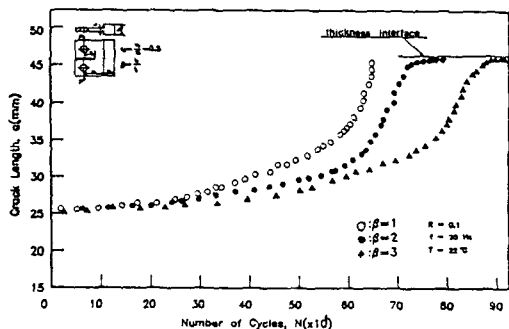


Fig. 7 Experimental a-N curves(as weld state)

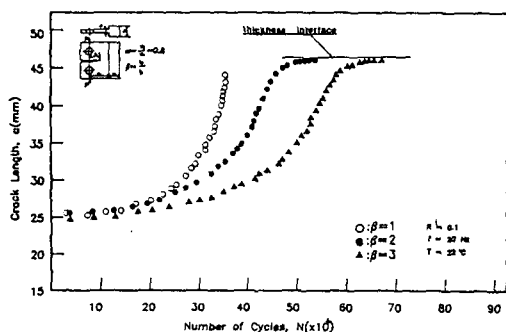


Fig. 8 Experimental a-N curves(PWHT state)

### 3.3 da/dN- $\lambda$ 관계 고찰

As weld材 및 PWHT材 각각에 대하여 無次元 Crack길이( $\lambda=a/W$ )를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 0.95로 變化시켜 da/dN의 關係를 Fig.9 및 Fig.

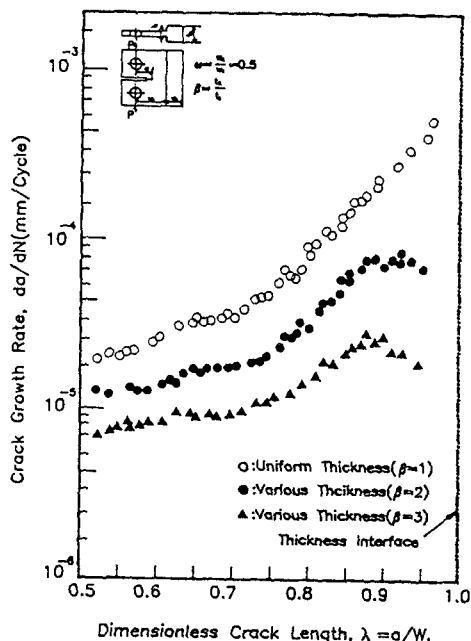


Fig. 9 da/dN- $\lambda$  relationship for weld specimens (as weld)

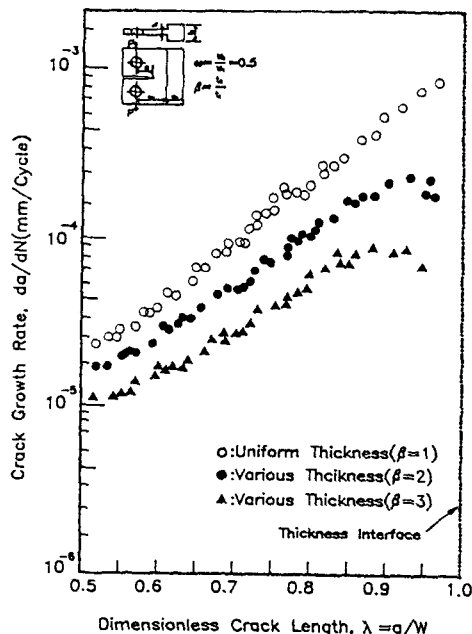


Fig. 10 da/dN- $\lambda$  relationship for PWHT specimens

10에 나타냈다.

Fig.9는 As weld 시험片的 두께비에 따른 Crack 성장 속도( $da/dN$ )와 無次元 Crack 길이  $\lambda(a/W_1)$ 와 관계를 半代數座標로 나타낸 것이다.

여기에서 Crack 성장의 初期엔  $da/dN$ 의 증가가 아주 작거나 혹은 오히려 減少하는 것 같이 나타나고 있는데, 이것은 初期壓縮殘留應力이 Crack 성장 前方에 分布되어 있는데 기인하는 것으로 생각된다. 그러나 Crack이 어느 정도 成長하게 되어서는  $da/dN$ 이 增加하게 된다.

均厚熔接試驗片( $\beta=1$ )인 경우 대략  $\lambda > 0.75$ 에서는 Crack 성장 속도( $da/dN$ )는 다시 直線的인 增加를 보이고 있다. 반면 變厚熔接試驗片( $\beta=2, 3$ )에서는  $\lambda=0.9$ 인 곳에서  $da/dN$ 의 急減이 始作되는데, 成長 初期에  $da/dN$ 이 減少하는 것은 壓縮殘留應力에 기인하는 것으로 생각되나  $\lambda=0.9$ 인 變厚境界 가까이에서 Crack 성장 속도가 急減해 가는 樣相을 볼 수가 있는 것은 變厚境界의 影響을 받는 것으로 생각된다.

Fig.10은 PWHT 시험片的  $da/dN$ - $\lambda$ 의 관계를 나타냈으며, As weld 시험片에서 나타난 Crack 성장 初期의 壓縮殘留應力の 影響으로 인한 Crack 성장 속도( $da/dN$ )의 減少現象은 보이지 않는다. 이는 熱處理에 의하여 壓縮殘留應力の 除去로 인한 影響이라고 생각되며,  $\beta=1.2$  및 3에서 Crack 성장 속도가 거의 直線的으로 成長해 가는 것을 볼 수 있다. 다만  $\beta=2$  및 3인 경우에는 變厚境界에서 두께비의 影響으로 Crack 성장 속도가 急減해 가는 것을 볼 수 있는 것은 As weld 시험片에서와 같다.

### 3.4 $da/dN$ - $\Delta K_{IV, eff. i}$ 관계 고찰

CT形 變厚Model에서 두께비를  $\beta=1, 2$  및 3으로 하고, 無次元 Crack 길이 ( $\lambda=a/W_1$ )를 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 및 0.95로 변화시켜, 이들 각각의 Crack 길이에 대한  $K$ 값을 數值解析하였다. 여기에 變厚熔接板材로 구한 初期殘留應力으로 ABAQUS의 Initial condition option을 使用하여 Kres를 구하고, 均厚 및 變厚熔接 試驗片에서 疲勞試驗을 통하여 구한 a-N 관계 Data로부터 Crack 성장 속도( $da/dN$ )를 구하여 應力擴大係數 變動範圍( $\Delta K$ )에 대한 安定成長 區間에서의  $da/dN$ - $\Delta K_{IV}$ 와 a-N 관계 Data로부터 Crack 성장 속도를 初期殘留應力을 考慮한 應力擴大係數 變動範圍( $\Delta K_{IV, eff. i}$ )에 대한  $da/dN$ - $\Delta K_{IV, eff. i}$ 의 관계를 Plot하였다. 均厚熔

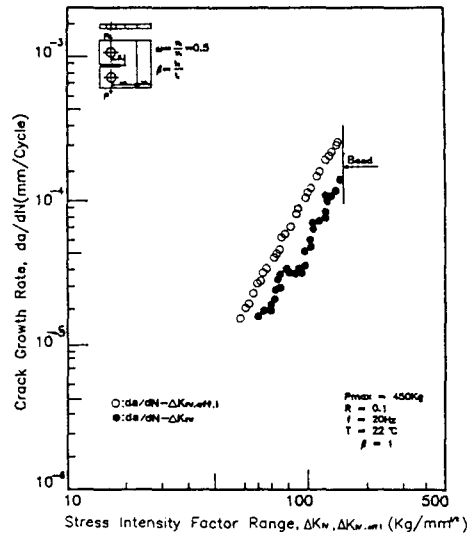


Fig. 11  $da/dN$ - $\Delta K_{IV}$ ,  $da/dN$ - $\Delta K_{IV, eff. i}$  relationship for uniform thickness weld specimens ( $\beta=1, \omega=0.5$ , as weld)

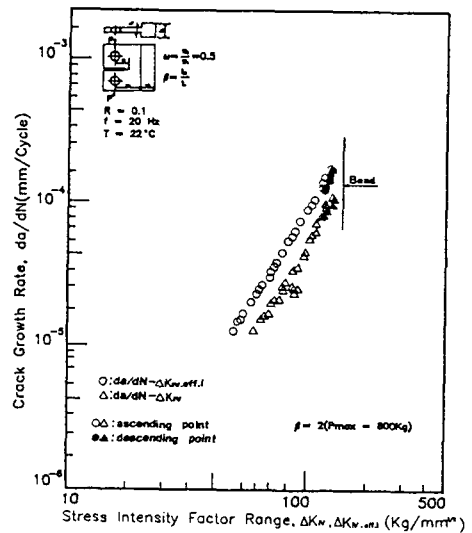


Fig. 12  $da/dN$ - $\Delta K_{IV}$ ,  $da/dN$ - $\Delta K_{IV, eff. i}$  relationship for various thickness weld specimens ( $\beta=1, \omega=0.5$ , as weld)

接試驗片的 것을 Fig.11에 나타냈고, 變厚熔接試驗片的 것을 Fig.12 및 Fig.13에 각각 Log-Log座標로 나타냈다.

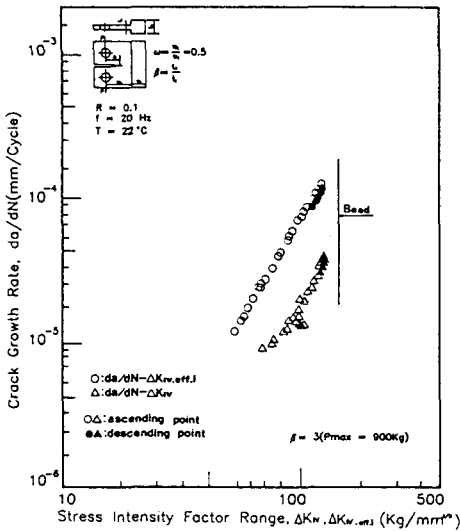


Fig. 13  $da/dN-\Delta K_{IV}$ ,  $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$  relationship for various thickness weld specimens ( $\beta = 1$ ,  $\omega = 0.5$ , as weld)

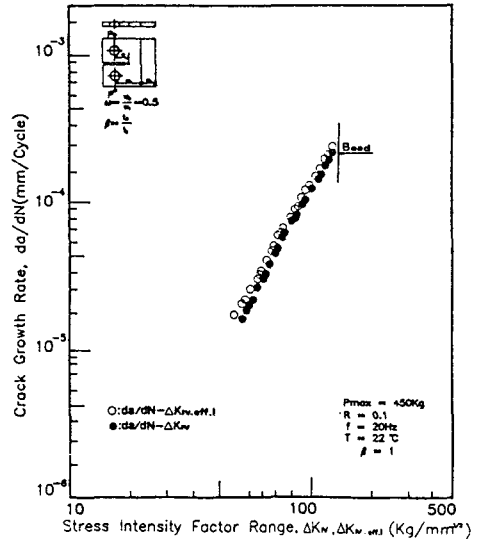


Fig. 14  $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$  relationship for PWHT specimens ( $\beta = 1$ ,  $\omega = 0.5$ )

여기에서 a-N 관계와  $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$  등 疲勞龜裂成長舉動을 變厚境界에 到達한데 까지만 나타냈다. Fig.11에서 보면  $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$ 의 관계에서  $\Delta K_{IV,eff,i}$ 의 增加에 따라 疲勞 Crack成長速度 ( $da/dN$ )는 거의 直線의으로 增加하고 있다. 그러나  $da/dN-\Delta K_{IV}$ 의 관계에서는 Crack成長初期에  $da/dN$ 이 減少하다가 다시금 增加하였다. Fig.12 및 Fig.13의 變厚熔接試驗片의 경우  $90kg/mm^{3/2} < \Delta K_{IV} < 120kg/mm^{3/2}$ 인 範圍에서 同 一한  $\Delta K_{IV}$ 에 대하여 두께비가 커짐에 따라 Crack成長速度가 작게 나타났다. 變厚熔接試驗片의 경우도 初期段階에서는  $\Delta K_{IV}$ 의 增加에 따라 Crack成長速度가 減少하다가 다시금 增加하였다. 이와같은 現象은 熔接板材 두께의 影響에도 관계있지만 龜裂初期에 Crack成長速度가 遲延되는 것은 壓縮殘留應力の 影響을 받다가 龜裂成長과 더불어 壓縮殘留應力이 變化하기 때문이라 사료된다.

Murakami는 壓縮殘留應力場을 通過하여 引張殘留應力場으로 龜裂이 成長할때  $\Delta K$ 의 增加에 따라 疲勞龜裂成長速度가 減少하다가 增加한다고 하였는데, 이는 殘留應力の 再分布 및 熔接材의 不均一性에 기인한 것으로 생각된다. 또한  $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$  관계에서는 두께비 2 및 3에서  $da/dN$ 이 거의 같은 기

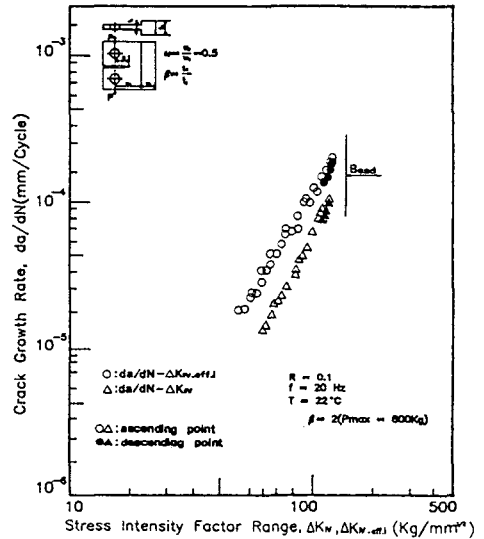


Fig. 15  $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$  relationship for PWHT specimens ( $\beta = 2$ ,  $\omega = 0.5$ )

을기( $\beta=2$ 에서  $m=3.62$ ,  $\beta=3$ 에서  $m=3.50$ )를 가지며, 直線의으로 增加하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 14, Fig. 15 및 Fig. 16은 PWHT試驗片의  $da/dN-\Delta K_{IV}$ 와  $da/dN-\Delta K_{IV,eff,i}$ 의 관계를 나타냈다. 均厚 및 變厚試驗片과 같이  $\Delta K_{IV} > 60kg/mm^{3/2}$ 에

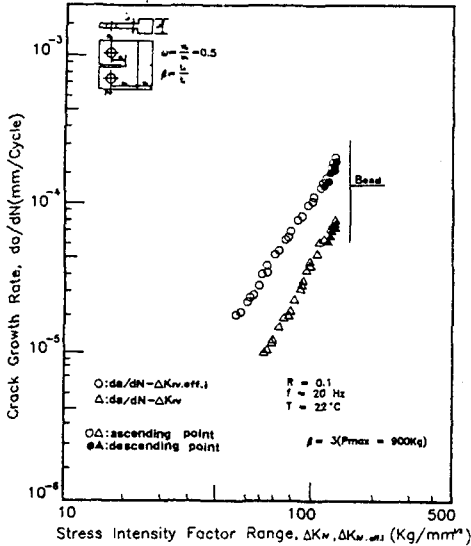


Fig. 16  $da/dN-\Delta K_{IV, eff. i}$  relationship for PWHT specimens ( $\beta=3, \omega=0.5$ )

서의 疲勞 crack 成長 舉動은  $\beta=1$ 에서  $m$ 값은 3.68  $\beta=2$ 에서  $m=3.60$  그리고  $\beta=3$ 에서  $m=3.57$ 로써, 거의 비슷한 값을 보였으며, 다만 同一한  $\Delta K_{IV}$ 에 대하여 두께비가 커짐에 따라 Crack 成長 速度가 작게 나타남을 알 수 있다. 그리고,  $da/dN-\Delta K_{IV, eff. i}$ 의 관계에서  $\Delta K_{IV, eff. i}$ 의 增加에 따라 Crack 成長 速度는 하나의 直線 위에 Data들이 모이는 것을 볼 수 있다.

本 實驗에 使用된 K解析 수정식이 變厚 熔接材에 대체로 適用될 수 있는 것으로 생각되며, 앞으로 계속해서 여러 形態의 變厚 熔接材에 대하여 꾸준히 研究할 必要性이 있다고 사료된다.

다만 母材에서의  $da/dN-\Delta K$  관계와 As Weld 試驗片 및 PWHT 試驗片的  $da/dN-\Delta K_{IV, eff. i}$  관계를 비교하면 As Weld 試驗片 및 PWHT 試驗片에서의 疲勞 龜裂 成長 舉動은  $\Delta K_{IV, eff. i}$ 로 정의하여도 母材에서의 疲勞 龜裂 成長 舉動과는 一致하지 않고 差異가 났다. 이것은 K값의 數值 解析上 誤差와 熔接 殘留 應力의 測定값의 誤差에 기인한 것으로 사료된다.

Table 6 및 7은 本 實驗을 통한 As Weld 試驗片 및 PWHT 試驗片의 두께비에 따른 C와 m값을 나타낸다.

Table 6 C, m values from  $da/dN-\Delta K_{IV}$  relations

Specimen	Thickness Ratio	C	m
As Weld State	$\beta=1$	$6.35 \times 10^{-10}$	4.15
	$\beta=2$	$4.67 \times 10^{-10}$	3.62
	$\beta=3$	$3.52 \times 10^{-11}$	3.50
PWHT State	$\beta=1$	$3.46 \times 10^{-9}$	3.68
	$\beta=2$	$9.25 \times 10^{-10}$	3.60
	$\beta=3$	$5.95 \times 10^{-10}$	3.57

Table 7 C, m values from  $da/dN-\Delta K_{IV, eff. i}$  relations

Specimen	Thickness Ratio	C	m
As Weld State	$\beta=1$	$6.90 \times 10^{-10}$	3.71
	$\beta=2$	$9.36 \times 10^{-10}$	3.58
	$\beta=3$	$9.65 \times 10^{-10}$	3.42
PWHT State	$\beta=1$	$6.58 \times 10^{-9}$	3.68
	$\beta=2$	$9.15 \times 10^{-10}$	3.61
	$\beta=3$	$9.50 \times 10^{-10}$	3.57

#### 4. 결 론

SM58板材를 拘束 맞대기 熔接하여 製作한 CT 試驗片을 使用하여 疲勞 試驗을 실시하고 疲勞 龜裂 成長 舉動에 미치는 初期 殘留 應力의 影響을 破壞力學的으로 考察하였으며, 그 結果를 要約하면 다음과 같다.

- 1) 熔接 試驗片에서 殘留 應力의 分布는 Crack 先端에서의 壓縮 殘留 應力이 매우 크게 나타나는 것을 確認하였다.
- 2) a-N 曲線에서 두께비가 커짐에 따라 變厚 境界에 到達하기까지의 荷重 反復 數가 크게 나타났으며,  $\beta=2$  및 3인 境遇 Crack tip이 變厚 境界에 到達하기 前에 變曲點이 나타났으며, 變曲點 앞에서는  $da/dN$ 의 增加, 뒤에서는  $da/dN$ 의 減少 現狀이 나타나고 變厚 境界 近處에서는  $da/dN \rightarrow 0$ 의 舉動이 나타났다. 變曲點의 위치는  $\beta$  값이 클수록 變厚 境界에서 먼 지점에 나타났다.
- 3)  $\beta=1$ 인 As Weld 試驗片, PWHT 試驗片은  $\log(da/dN)-\lambda$  관계에서 Crack 成長 速度가 直線의 이지만,  $\beta=2$  및 3인 境遇에는 Crack 成長 速度가 變厚 境界가 가까이에서 急減해 가는 樣相을 볼 수 있다. PWHT 試驗片보다 變厚 熔接 試驗片에서  $da/dN-\lambda$  曲線이 아래쪽에 나타나는 것은 壓軸 殘



留應力の 影響으로 事료된다.

- 4) 變厚熔接試驗片에서 同一한  $\Delta K_{IV}$ 에 대하여 두께 비가 커짐에 따라 Crack成長速度는 작게 나타났으며, 初期段階에서는  $\Delta K_{IV}$ 의 增加에 따라 Crack 成長速度가 減少하다가 增加하였는데, 龜裂初期에 Crack成長速度가 遲延되는 것은 壓軸 殘留應力の 影響을 받고 있기 때문이라 事료된다.

### 참고문헌

- (1) 鈴木春義, “改訂 最新熔接工學”, コロナ社, pp.1~3, 1980
- (2) K.Masubuchi, “Analysys of Welded Structures”, International Series on Materials Science and Technology, Vol.33, pp.1~10, 1980
- (3) J.F.Lancaster, “Metallurgy of Welding”, Third Edition, pp.1~5, 1980
- (4) 西田新一, “機械機器 破損の 原因と 對策”, 日刊工業新聞社刊, pp.179~201, 1986.
- (5) H.Liebowitz, “Fracture-An Advanced Treatise”, Vol.4, pp.337~370, 1969.
- (6) J.F.Rudy and E.J.Rupert, “Effects of Porosity on Mechanical Properties of Aluminum Welds”, Welding Journal, Vol.49, No.7~12, pp.322~336, 1970.
- (7) K.Ikeda and H.Kihara, “Brittle Fracture Strength of Welded Joints”, Welding Journal, Vol.49, No.1~6, pp.106~114, 1970.
- (8) K.Masubuchi, “Analysis of Welded Structures”, International Series on Materials Science and Technology Vol.33, pp.189~327, 1980.
- (9) Standard Test Method for Constant-Load Amplitude Fatigue Crack Growth Rate Above  $10^{-9}$ mm/Cycle, ASTM E 647~83, pp.765~783, 1985.