

<論 文>

欠陷을 갖는 용접材의 疲勞크랙 傳播舉動

宋 森 弘* · 洪 斗 杓**

(1983年 6月 28日 接受)

Behavior of Fatigue Crack Propagation from Flaw of Welding Materials

Sam Hong Song and Do Pyou Hong

Abstract

In order to investigate the behavior of crack propagation at the part through fatigue crack, the properties of fatigue crack propagation as well as stress intensity factor range, ΔK , of welding materials of stainless steel (STS 304) and carbon steel (SM20C) have been investigated by the unidirectional bending stresses. The obtained results can be summarized as follows;

- (1) Fatigue crack propagation velocity of surface and side was fast in the order of mild steel zone, heat affected zone, stainless steel zone and deposited metal zone.
- (2) Part through fatigue crack propagation rates, $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$, are correlated with the stress intensity factor range, ΔK , as follow;

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K_A)^m, \quad \frac{db}{dN} = c(\Delta K_B)^m, \quad m = 2 \sim 3.3.$$

- (3) Crack aspect ratio, $\frac{b}{a}$, is correlated with side crack thickness ratio, $\frac{b}{t}$, as follow;

$$\frac{b}{a} = G \left(\frac{b}{t} \right)^\alpha, \quad \text{for } \frac{b}{t} = 0.2 \sim 0.6.$$

1. 序 論

構造物 또는 機械中에 포함되는 材料欠陷이나 熔接 欠陷등은 疲勞破壞의 發生場所가 되거니와⁽¹⁾, 특히 熔接으로 인한 表面欠陷은 그 欠陷의 寸수가 큰 작은 間に 관계없이 疲勞크랙의 發生源이 될 可能性이 크다. 또 그것을 起點으로 發生한 疲勞크랙은 負荷應力이 反復數에 따라서 傳播하게 되는데 결국 이러한 疲勞크랙은 構造物이나 機械의 破壞를 야기시킬 경우가 많다.

이와같이 反復應力을 받고있는 部材에 發生하는 表面 크랙은 크랙길이 部材의 앞, 뒷면에서 거의같이 傳播한다고 가정하는 貫通크랙⁽²⁾보다는 半橢圓 모양인 表面크랙(surface crack) 및 모서리크랙(corner crack)인 경우가 많다. Fig. 1과 같은 半橢圓 表面크랙은 板

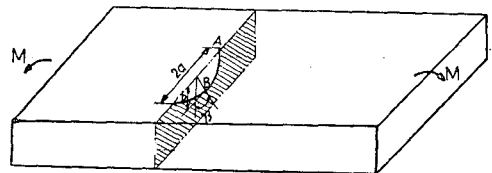


Fig. 1 Configuration of semi-elliptical surface crack⁽³⁾

*正會員, 高麗大學校 工科大學 機械工學科

**高麗大學校 大學院

의 두께가 두꺼운 경우에는 表面 A 點에서는 平面應力, 內部 B 點에서는 平面變形(率)狀態이고, 그 中間點에서는 混合된 應力狀態가 된다. 따라서 크랙先端이 그리는 曲線의 位置에 따라 應力狀態가 變化함으로 應力擴大係數에 대한 嚴密한 解는 存在하지 않으며 近似的으로 그 解를 求하고 있다⁽⁴⁾.

小寺澤⁽⁵⁾는 크랙 傳播速度를 應力擴大係數幅으로 정리할 경우, 應力比가 同一 하더라도 貫通크랙과 非貫通 크랙은 一般적으로 對應하지 않는다고 報告하고 있으며 Nishitani 등⁽⁷⁾은 表面크랙 傳播過程에서의 表面크랙의 모양비 $\left(\frac{b}{a}\right)$ 는 거의 일정하다고 報告하고 있다. 한편 南板⁽⁶⁾는 半橢圓表面크랙을 갖는 板을 굽히는 경우의 應力擴大係數를, Shah 와 Kobayashi 가 제안한 式을 이용하여 考察하고 있다. 또 굽힘應力을 받는 Fig. 1 과 같은 半橢圓表面크랙에 대한 應力擴大係數에 대하여 Shah 와 Kobayashi⁽⁸⁾는 다음과 같은 式을 提案하고 있다. 즉

$$K = M_B \cdot \sigma \sqrt{\frac{\pi b}{Q}} \quad (1)$$

$$Q = \phi^2 - 0.212 \left(\frac{\sigma}{\sigma_s} \right)^2$$

여기에서 K 는 應力擴大係數, M_B 는 β 에 따라 變化하는 수정계수, σ 는 굽힘應力, ϕ 는 제 2종 完全橢圓積分, b 는 β 가 零일때의 크랙길이, σ_s 는 材料의 降伏應力, Q 는 크랙길이에 대한 수정값이다.

일반적으로 疲勞크랙 傳播速度와 應力擴大係數와는 함수관계가 있으므로 疲勞크랙 傳播를 豫測할 수 있다고 하였다. 이와 관련하여 Paris⁽⁹⁾는 다음과 같은 式을 제안하였다. 이미 알려진 바와 같이, $\frac{dl}{dN} = c(\Delta K)^m$ (2) 여기서, dl 은 貫通크랙에서의 크랙길이증분, dN 는 反復應力을 가한 回轉數의 증분, c 와 m 는 材料상수이다. 이 Paris의 式을 고려하면, Fig. 1의 非貫通 크랙인 경우에도 $\beta=0$ 과 $\beta=\frac{\pi}{2}$ 에서 疲勞크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$ 와 應力擴大係數幅 ΔK_A , ΔK_B 와의 사이에는 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 즉 Fig. 1에서

$$\beta=0 \text{인 點(B 點)} - \frac{db}{dN} = c(\Delta K_B)^m \quad (3)$$

$$\beta=\frac{\pi}{2} \text{인 點(A 點)} - \frac{da}{dN} = c(\Delta K_A)^m \quad (4)$$

이다. 여기에서 da 는 疲勞크랙의 表面크랙길이 a 의 증분, db 는 疲勞크랙의 側面크랙길이 b 의 증분, ΔK_A 는 β 가 $\frac{\pi}{2}$ 인 A 點에서의 應力擴大係數幅, ΔK_B 는 β 가 零인 B 點에서의 應力擴大係數幅이다.

가령, Fig. 1에 表示된 欠陷이 試驗片 모서리에 存在할 때의 疲勞크랙 舉動은 어떠한가를 考察하여 보는 것은 매우 興味있는 과제라고 생각된다.

本 研究에서는 以上과 같은 點을 고려하고 欠陷이 存在하기 쉬운 熔接部 表面에 人工的으로 $\frac{1}{4}$ 圓形에 해당하는 表面疲勞크랙을 試驗片 모서리에 넣고 이러한 試驗片에 굽힘應力을 加하여 다음과 같은 事項들을 考察하였다. (1) 疲勞크랙의 表面 및 側面에서의 傳播過程, (2) 疲勞크랙의 모양비 $\left(\frac{b}{a}\right)$ 의 變化, (3) 疲勞크랙의 表面 및 側面的 傳播速度와 크랙길이와의 관계등을 알아 보았다. 여기에서 크랙의 表面길이란 欠陷이 시험편 모서리에 存在할 때 그것을 起點으로 表面에 傳播하는 크랙의 길이를 말하며, 크랙의 側面길이란 그것을 起點으로 側面的 表面에 傳播하는 크랙의 길이를 말한다.

2. 試驗片製作 및 實驗方法

오오스테나이트系 스테인레스鋼과 軟鋼을 V型 맞대기 熔接한 후 그것을 試驗片으로 加工했는데 그것들의 化學成分 및 機械的 性質은 Table 1과 같다. 또 試驗片 加工順序는 다음과 같다. $t=5.5$ mm인 스테인레스鋼板과 軟鋼板을 壓延方向을 기준으로, 壓延方向과 直角方向으로 熔接했다. 熔接時의 두 母材의 간격은 1.5 mm이고 開先角은 60° 이다. 이때의 熔接條件은 Table 2와 같다. 그 후 Fig. 2(a)와 같이 슬릿을 갖는 노치 試驗片으로 일단 加工했다. 즉, 實驗結果를 比較하기 위하여 우선 熱影響部, 熔着金屬部, 母材인 스테인레스部 및 軟鋼部에 각각 人工슬릿을 넣고 4種類의 시

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties

Materials	Chemical condition							Tensile strength (kg/mm ²)	Yield strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hv (100g)	E (kg/mm ²)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr					
SM20C	0.20	0.24	0.38	0.01	0.02	—	—	38.5	29.5	32.2	136	19667
SUS304	0.06	0.85	1.46	0.03	0.02	8.65	18.62	66.0	35.0	65.4	210	19241

Table 2 Coated electrode and welding conditions

(a) Chemical properties and mechanical properties of coated electrode

Material	Chemical composition							Mechanical properties	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
SUS308	0.06	0.31	1.93	0.03	0.01	9.87	19.85	61.4	48.6

(b) Welding conditions

Welding		Current (A)	Voltage (V)	Speed (mm/min)	Diameter of coated electrode(mm)
Manual welding	First pass	120	32	70~80	2.6
	Second pass	120	29	70~80	2.6

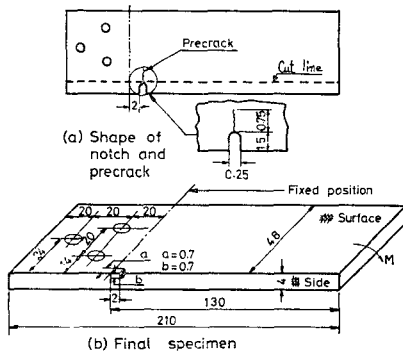


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

험편을 얻었다. 이때 人工슬릿을 넣기위한 熔接部의 各部分의 확인은 表面부식방법과 微小硬度檢査에 의하여 정확히 확인했다.

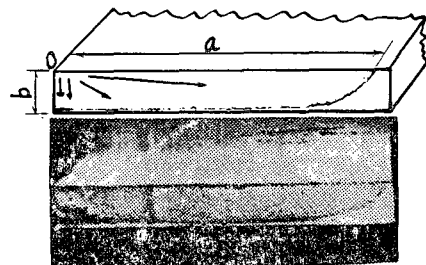
이와같이 준비된 시험편에 表面欠陥을 만들기 위하여 각 슬릿先端으로부터 豫疲勞크랙을 일정한 크기까지 넣은후 點線으로 관통된 슬릿部分을 切斷해버렸다 (Fig. 2(a) 참조). 따라서 일정한 크기를 갖는 豫疲勞크랙을 넣은 試驗片을 얻었다(Fig. 2(b) 참조). 이때 각 슬릿先斷에 일정한 크기의 豫疲勞크랙을 넣기 위한 制限條件은 다음과 같다. 슬릿으로 加工된 貫通노치部分에 非貫通 豫疲勞크랙을 넣기 위한 應力은 시험착오 법에 의해 다음과 같이 선정하였다. 즉 應力은 軟鋼部에는 38 kg/mm², 熱影響部 및 스테인레스部에는 40kg/mm², 熔着部에는 43 kg/mm²이다. 실제로 金屬顯微鏡 觀察에서 測定되는 豫疲勞크랙은 $a \approx b \approx 0.7$ mm 이었다. 따라서 Fig. 2(b)와 같이 시험편 모서리에 非貫通 欠陥이라고 볼 수 있는 $\frac{1}{4}$ 圓形 豫疲勞크랙을 갖는 시험

편을 最終적으로 준비 완료했다. 이상과 같이하여 준비한 各 試驗片에 반복급힘 應力을 負荷시키고 豫疲勞크랙先端에서 傳播하는 疲勞크랙 舉動을 상세히 관찰하였다. 사용한 實驗機는 외팔보형 급힘疲勞試驗機(10 kg-m, 900 r.p.m)를 사용하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 크랙의 表面 및 側面の 傳播舉動

Photo 1은 非貫通 疲勞의 巨視인 破斷面의 일예이고, Fig. 3은 反復數 N 에 대한 熱影響部에서 傳播하는 크랙길이의 變化를 나타낸다. Photo 1 및 Fig. 3 中에 表示된 a 는 크랙의 表面길이, b 는 크랙의 側面길이(또는 측면길이 이라 한다)를 각각 표시한다. 豫疲勞크랙을 起點으로하여 傳播하는 크랙의 表面길이 및 側面길이(또는 측면길이)는, $\sigma = 38$ kg/mm²인 경우는 $N = 5.6 \times 10^5$ 에서, $\sigma = 45$ kg/mm²인 경우는



a = Surface crack length
 b = Side crack length
 o = Pre-crack

Photo 1 Feature of final fracture of part through fatigue crack under unidirectional bending stress amplitude

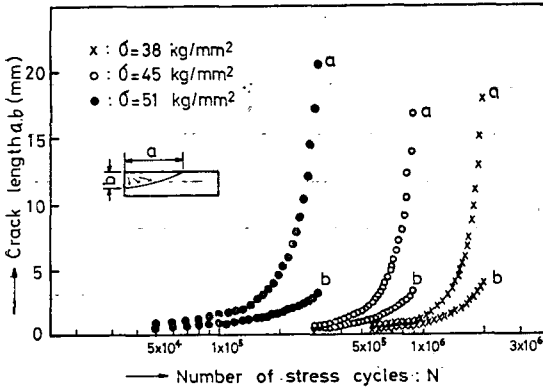


Fig. 3 Relationship between crack propagation and number of stress cycles of heat affected zone (B series)

$N=3.0 \times 10^6$ 에서, 그리고 $\sigma=51 \text{ kg/mm}^2$ 인 경우는 $N=5 \times 10^4$ 에서 각각 그傳播가 시작되는데, 어떤 일정한 크랙길이까지傳播시키는데는應力이 클수록應力反復數 N 는 작아지고應力이 작을수록 그것은 많아진다. 또한同一應力下에서同一試驗片에傳播되는크랙의表面길이 a 및側面길이 b 는前者의傳播가後者の 그것보다 훨씬 빠르고同一反復數에서의 크랙 길이는表面쪽이側面쪽보다 훨씬 길다. 이와같은現象은板材가 급히應力을 받는 경우에 생기는現象으로引張反復荷重을 받는 경우와는 다르다. 또한表面길이 a 및側面길이 b 를 각각 분류하고 다른種類의 시험편의 그것들과 함께比較한結果를 Fig. 4, 5에 나타낸다. Fig. 4, 5에서 Δ 로表示된熱影響部의 크랙의

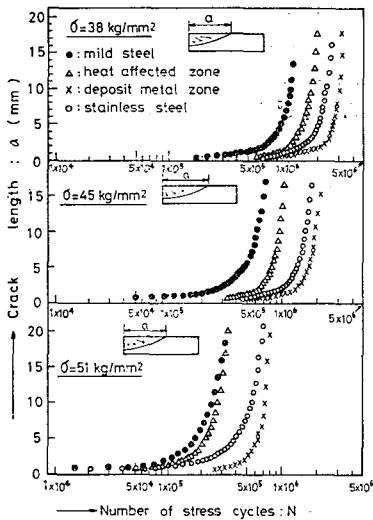


Fig. 4 Relationship between surface crack propagation and number of stress cycles

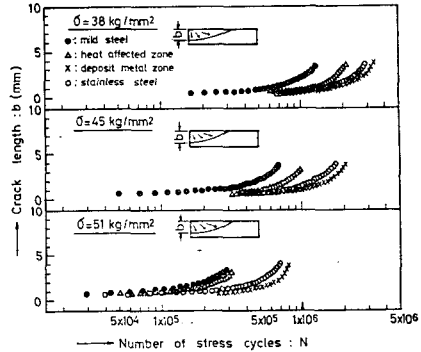


Fig. 5 Relationship between side crack propagation and number of stress cycles

表面傳播曲線은 熔接母材인 軟鋼部 및 스테인레스鋼部の 그것의傳播曲線 사이에 존재하고 이들傳播曲線의形態는 거의同一하며 負荷되는應力이 커질수록曲線은 左側으로 이동하고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서同一시험편이라 하더라도 負荷되는應力의大小에 따라 疲勞크랙傳播時期가 다르다는 것을 알 수 있다. 또한 負荷應力이 큰 경우의 전과곡선은 熔接母材인 연강 시험편의 그것에 접근되어 있는 것으로 보아 熱影響部가 熔着金屬部보다는 크랙傳播에 민감하다는 것을 시사해주는 결과라고 생각된다.

한편 크랙의側面길이 b 의傳播舉動도 전술한 表面 길이 a 의 경우와 마찬가지로의 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다(Fig. 5). 이상과 같은現象은 다른 3種類의 시험편에서도 동일하게 관찰된다. 따라서 연강과 스테인레스鋼을 熔接한 경우의 크랙의 表面 및 側面에서의傳播는 軟鋼部, 熱影響部, 스테인레스部, 熔着金屬部 순으로 빠르다는 것을 알 수 있다.

3.2. 疲勞크랙의 모양比의變化

Fig. 6은 熱影響部の 疲勞크랙의傳播舉動을 負荷應力의大小에 따라 정리한 것인데, 크랙모양比 $\frac{b}{a}$ 를 종축에, 횡축에는 시험편의 두께 t 에 대한 크랙의側面 길이 b 의比 $(\frac{b}{t})$ 를 각각 잡았다. $\frac{b}{a}$ 값은應力이 클수록 작게 나타나고 $\frac{b}{t}$ 값도應力이 클수록 작게 나타난다. 따라서 $\frac{b}{a}$ 값은 크랙이傳播할때마다 변화하고 있음을 알 수 있다. 또 Fig. 6에서 알 수 있듯이 $\frac{b}{a}$ 의 변화는 定常的인 크랙傳播區間에 해당하는 $\frac{b}{t}=0.2 \sim 0.8$ 區間에서는 線形的인 關係를 나타낸다. 따라서 $\frac{b}{t} =$

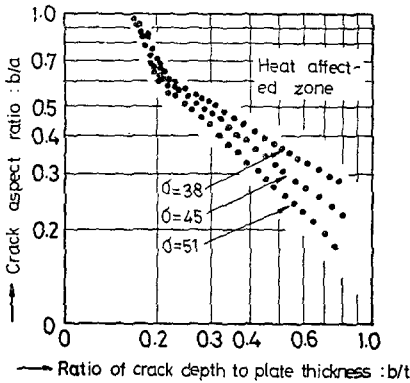


Fig. 6 Relationship between crack aspect ratio $\left(\frac{b}{a}\right)$ and ratio of crack depth to plate thickness $\left(\frac{b}{t}\right)$ in the heat affected zone (B series)

Table 3 Value of α and G in the relation between surface crack aspect ratio and crack depth to plate thickness

Materials	Fatigue stress	α	G
Base metal of mild steel	38	-0.591	0.2754
	45	-0.844	0.1783
	51	-1.119	0.1216
Heat affected zone of mild steel	38	-0.579	0.2637
	45	-0.707	0.2082
	51	-0.904	0.1512
Base metal of stainless steel	38	-0.784	0.2319
	45	-0.879	0.1929
	51	-1.018	0.1263
Deposit metal zone	38	-1.002	0.2320
	45	-1.084	0.2039
	51	-1.152	0.1385

0.2~0.8 區間에서의 $\frac{b}{a}$ 와 $\frac{b}{t}$ 와는 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다. 즉

$$\frac{b}{a} = G \left(\frac{b}{t}\right)^\alpha \quad (5)$$

이 때 $\frac{b}{t} = 0.2 \sim 0.8$

여기서 α 는 陰의 부호(-)를 갖고 各 材料에 따라 변화하고 應力이 클수록 절대값은 增加한다. G 는 상수

로서 各 材料에 따라 변화하고 應力이 클수록 減少한다(Table 3 참조). 따라서 이 式을 변형시키면 部材의 破斷에 影響을 주는 크랙의 側面길이 b 를 예측할 수 있다. 즉, 式(5)에서 b 를 구하고 α 와 G 값을 대입하면(Table 3 참조), 다음과 같은 近似式을 얻을 수 있다

$$b = 1.1^\sigma \sqrt{\frac{G \cdot a}{f^\alpha}}, \quad b = 1.579 \sqrt{0.5884 \times a} \quad (6)$$

이 때의 b 의 값은 열영향부 시험편으로서 $\sigma = 38 \text{ kg/mm}^2$ 인 경우의 일 예이다.

한편 Fig. 7에는 應力을 일정하게 했을때의 $\frac{b}{a}$ 의 거동을 조사한 결과이다. 이 결과는 $\frac{1}{4}$ 圓形 豫疲勞크랙은 전파와 더불어 $\frac{1}{4}$ 橢圓形 크랙으로 그 形態가 變化한다는 것을 암시해주는 결과라고 생각된다. 西岡⁽¹⁰⁾ M. Kurihara⁽¹¹⁾ 등의 실험결과에 의하면 半橢圓 表面크랙을 갖는 板이 反復引張荷重을 받는 경우, $\frac{b}{a}$ 의 값은 처음에는 크랙의 傳播과 더불어 變化하다가 크랙의 傳播가 安定되면 그 값은 定常인 값에 도달하며 또 이러한 板이 反復굽힘을 받는 경우의 $\frac{b}{a}$ 값도 定常이 못되고, 따라서 非貫通 크랙의 傳播速度와 應力擴大係數와의 관계는 貫通 크랙의 그것과 對應되지 않는다고 하였다. 이 결과는 $\frac{b}{a}$ 의 比가 非定常인 경우 ΔK 를 사용할 경우에 한하여 非貫通 크랙의 傳播速度는 貫通 크랙의 그것으로부터 예측할 수 없다는 것을 암시한다고 생각된다.

이와같은 종래의 연구결과를 고려하면, 本 實驗結果도 $\frac{b}{a}$ 값은 一定하지 않고 크랙 傳播와 함께 變化하고 上述한 Kurihara 등의 反復굽힘에 대한 實驗結果와 일치한다. 즉, 本 실험결과에는 貫通 크랙의 크랙開口程度

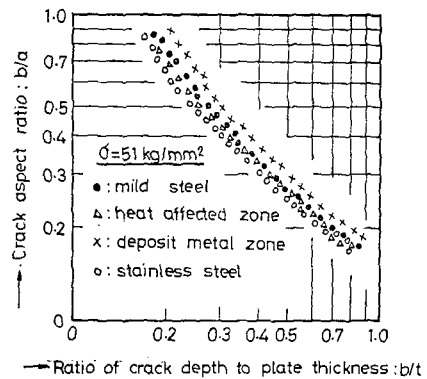


Fig. 7 Relation between aspect ratio $\left(\frac{b}{a}\right)$ of crack depth to plate thickness at the stress level $\sigma = 51 \text{ kg/mm}^2$

와 非貫通크랙의 크랙開口程度가 다르기 때문에 얻어진 것이라고 생각된다⁽⁵⁾. 이점에 대해서는今後 상세한 檢討가 요망된다.

3.3. 疲勞크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$ 와 크랙 길이 a 와 b 의 관계

일례로서 疲勞크랙 傳播速度와 크랙길이와의 관계를 Fig. 8 과 같이 정리하였다. Fig. 8에서 왼쪽에 위치한 곡선들은 크랙의 表面길이 a 의 傳播曲線이고, 오른쪽

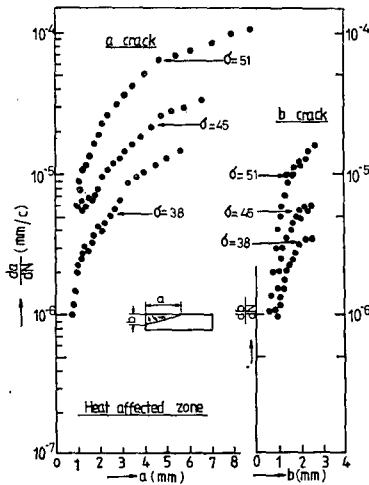


Fig. 8 Crack propagation rate diagram of surface and side cracks under several stress amplitude

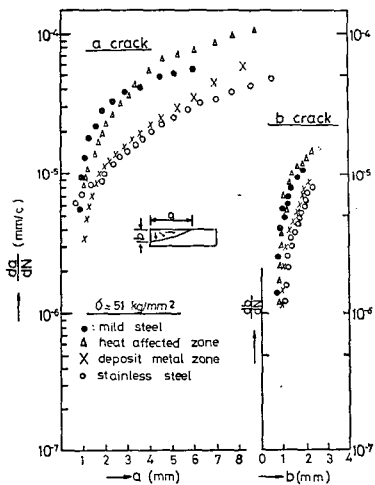


Fig. 9 Crack propagation rate diagram of surface and side cracks under constant stress, $\sigma = 51 \text{ kg/mm}^2$

에 위치한 그것들은 크랙의 側面길이 b 의 전파곡선이다. 크랙의 表面 및 側面の 傳播速度 $\frac{da}{dN}$ 및 $\frac{db}{dN}$ 는 응력반복수 N 가 增加함에 따라 增加하고, 크랙길이 길어질수록 그것은 더욱 增加한다. 또한 크랙의 表面傳播速度는 側面的의 그것보다 훨씬 빠르다는 것을 알 수 있다. 한편, 각 시험편의 크랙傳播舉動을 조사한 結果를 Fig. 9에 제시한다. 각 시험편의 表面 및 側面的의 크랙길이가 一定할 경우, 크랙傳播速度는 材料에 따라서 다르고 또 同一 應力이라 하더라도 크랙길이가 길어질수록 表面에서의 크랙傳播速度는 加速되고 있음을 알 수 있다. 따라서 疲勞크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$ 및 $\frac{db}{dN}$ 는 크랙길이 a, b 의 함수임을 알 수 있다.

3.4. 疲勞크랙 傳播速度 $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$ 와 應力 擴大係數 $\Delta K_A, \Delta K_B$

Fig. 1 및 Photo 1에서 A, B 點에서의 疲勞크랙 傳播速度를 $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$, 應力擴大係數를 $\Delta K_A, \Delta K_B$ 라 했을 때 A, B 點에서의 $\Delta K_A, \Delta K_B$ 는 다음과 같이하여 近似解를 구할 수 있다. 즉, 本 實驗의 應力은 片振굽힘 應力으로서 $\Delta K = K_{max}$ 이기 때문에 굽힘應力을 받을 때의 ΔK 는 Shah와 Kobayashi가 제안한⁽⁸⁾ 式 (1)을 이용할 수 있다. 式에서 Q 의 두번째항은 크랙先端에서 塑性域에 대한 수정항이고 첫번째항 ϕ 는 제2종 完全橢圓 積分으로서 다음과 같다. 즉,

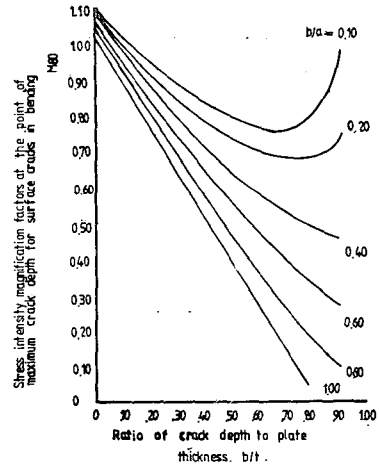


Fig. 10 Estimated elastic stress intensity magnification factors at the point of maximum crack depth for surface cracks in bending^{(3), (8)}

$$\Phi = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[\sin^2 \beta + \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cos^2 \beta \right]^{\frac{1}{2}} d\beta \quad (7)$$

Φ 를 적분하면 無限級數로 되고 본 실험에서는

$$\Phi^2 = 1 + 1.47 \left(\frac{b}{a} \right)^{1.64} \quad (8)$$

를 사용하였다.

가령 크랙의 側面길이 b 가 傳播할 때 Fig. 1에서 β 가 零일때인 B點에서 수정계수를 M_{B0} 라고 하면 이곳에서의 $\Delta K_B = M_{B0} \cdot \sigma \sqrt{\frac{\pi b}{Q}}$ 이고 M_{B0} 는 Fig. 10과 같다.

A點에서의 수정계수 (M_B)를 M_{B30} 이라고 하면 이곳

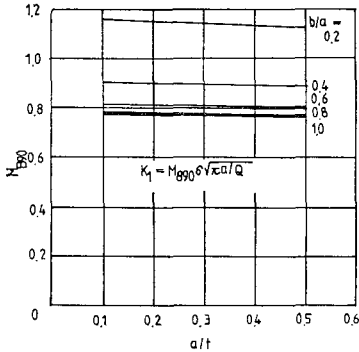


Fig. 11 Present estimate of stress intensity factor for surface cracks in bending($\beta=90$ deg)

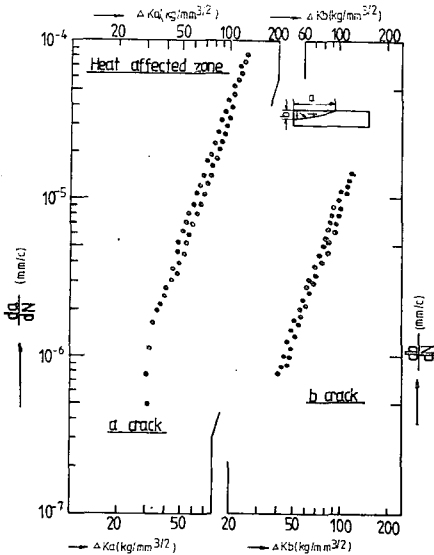


Fig. 12 Crack propagation rate versus stress intensity factor range in the heat affected zone(B series)

에서의 $\Delta K_A = M_{B90} \cdot \sigma \sqrt{\frac{\pi b}{Q}}$ 이고 M_{B90} 은 Fig. 11과 같다. 따라서 Fig. 12, 13, 14, 15는 熱影響部の 시험편을 비롯한 각 시험편의 크랙의 表面 및 側面傳播舉動을 $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$ 와 ΔK_A , ΔK_B 와의 관계로서 整理한 것이다. 각 Fig. 중의 왼쪽부분의 實驗點들은 크랙의 表面傳播舉動을, 오른쪽 부분의 實驗點들은 크랙의 側面傳播舉動을 각각 나타낸 것이다. 각 Fig.에서 알 수 있듯이 ΔK_A , ΔK_B 의 減少에 따라 $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$ 는 減少하고 반대로 ΔK_A , ΔK_B 의 增加에 따라 $\frac{da}{dN}$, $\frac{db}{dN}$ 는 增加한다.

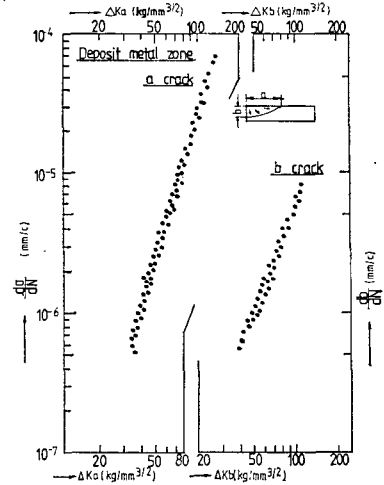


Fig. 13 Crack propagation rate versus stress intensity factor range in the deposit metal zone (C series)

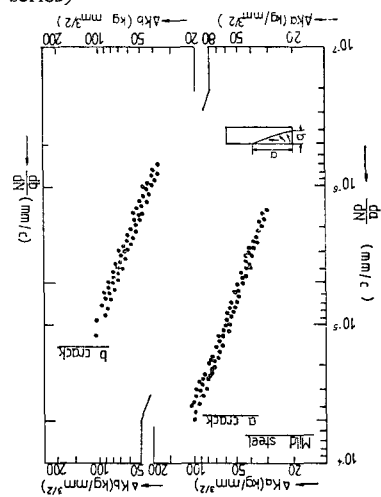


Fig. 14 Crack propagation rate versus stress intensity factor range in the base metal of mild steel(A series)

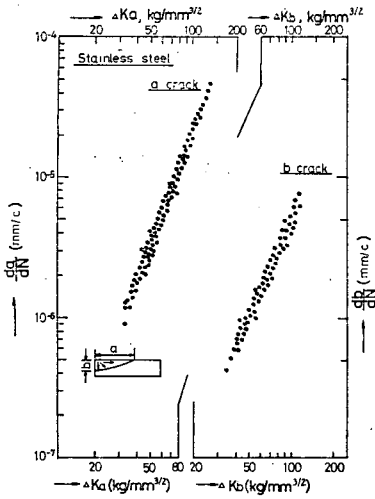


Fig. 15 Crack propagation rate versus stress intensity factor range in the base metal of stainless steel(D series)

最近 板材試驗片의 貫通크랙 혹은 非貫通 크랙을 대상으로한 Paris 式의 有効性에 대해서는 현재까지 많은 研究者에 의하여 논의되고 있고 m 의 값은 Paris가 제안한 2~7 정도라는 것도 널리 알려져 있다. 본 실험에 사용한 異種熔接材인 경우, $\frac{1}{4}$ 圓形 非貫通 크랙에 대한 ΔK_A , ΔK_B 는 轉換한 Shah와 Kobayashi가 제안한 式을 이용하여 정리한 결과 과 Fig.에 제시한 바와 같이 각각 線形的인 관계를 갖는다는 것을 알았고 m 의 값도 2~3.3의 범위에 있음을 알았다(Table 4 참조).

Table 4 m values

Specimen	Cracks	
	a	b
Heat affected zone	3.3	3.0
Deposite metal zone	2.5	2.2
Stainless steel	2.4	2.0
Mild steel	3.0	2.8

4. 結 論

異種金屬熔接材의 非貫通 크랙傳播 舉動을 파악하기 위하여 스테인레스鋼(STS 304)과 軟鋼(SM 20 C)를 熔接하고, 各 熔接部의 選擇된 장소에 豫疲勞크랙을 넣고 이 豫疲勞크랙을 起點으로 傳播하는 크랙舉動을 반복

시험 應力下에서 詳細히 考察하였다. 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 크랙의 表面 및 側面에서의 傳播速度는, 同一 應力인 경우 軟鋼部, 熱影響部, 스테인레스部, 熔着金屬部의 順序로 빠르다. 또한 그것은 應力이 커질수록 빠르다.

(2) 크랙의 表面 및 側面傳播速度는 $\frac{da}{dN} = c(\Delta K_A)^m$, $\frac{db}{dN} = c(\Delta K_B)^m$ 로 정리할 수 있고 이때 m 의 값은 2~3.3이다.

(3) 疲勞크랙 모양比($\frac{b}{a}$)의 값은 $\frac{b}{a} = 0.2 \sim 0.6$ 구간에서는 線形的인 관계를 나타내며, $\frac{b}{a}$ 와 $\frac{b}{l}$ 와는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\frac{b}{a} = G \left(\frac{b}{l} \right)^\alpha$$

여기에서 α 는 指數로서, 陰의 부호를 갖고 이것은 熔接材의 各部位의 材質에 따라 變化하고 應力이 클수록 絕對値는 增加한다. 또한 G 는 常數로서 熔接 各部位의 材質에 따라 變化하고 應力이 클수록 減少한다.

參 考 文 獻

- (1) 鶴田, 熔接構造의 疲れ, 産報 Co. 單行本, p.150, (1973)
- (2) David Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Sijhoff & Noordhoff, pp.128~140, 1978
- (3) A.F. Grandt, "Stress Intensity Factor for Surface Crack in Bending", ASTM STP513, pp. 37 ~58, 1972
- (4) G.R. Marris and C.W. Smith, "A Study of Local Stress Near Surface Flaws in Bending Fields", ASTM STP 513, pp.22~36, 1972
- (5) 小寺澤, 南坂, "線返し曲げによる非貫通疲勞き裂の進展", 日本材料學會誌, 26卷 289號, pp.41~47, 1977
- (6) 南坂, 小寺澤, "半だ圓表面き裂を有する板が曲げを受ける場合の應力擴大係數についで", 日本材料學會誌, 26卷 289號, pp.1~7, 1977
- (7) H. Nishitani and Y. Murakami, "Stress Intensity Factors of an Elliptical Crack or a Semi-Elliptical Crack Subject to Tension", International Journal of Fracture, Vol. 10, No. 3, pp.353~368, 1974

- (8) Shah and Kobayashi, "Stress Intensity Factors for an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Plate in Bending", Proceeding of the 1971 International symposium on fracture mechanics, Part 1, ASTM STP 513, American Society for Testing and Materials, pp.3~21, 1972
- (9) P. Paris, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Transactions of the ASME, Journal of Basic Engineering, pp.528~534, 1963
- (10) 西岡, 平川, "表面き裂の疲勞による進展舉動", 日本鐵と鋼講演論文集, Vol. 60, No. 11, pp.542~547, 1974
- (11) M. Kurihara and M. Kawahara, "Fatigue Crack Growth from a Surface flaw", Proc. 4th International Conf. on Fracture, Waterloo, Vol. 2, pp.1361~1373, 1977