

<論 文>

平面굽힘 疲勞荷重에 의한 鋼熔接부의 모서리균열 傳播特性†

金 永 植* · 趙 相 明**

(1982年 5月 19日 接受)

A Study on the Corner Crack Propagation by Plane Bending Fatigue
in Butt Welded Joints of Steel

Young Sik Kim and Sang Moun Cho

Abstract

The behavior of corner crack propagation by unidirectional plane bending fatigue was investigated in the butt welded joints of SS41 and SM50 steel plates including an edge through-thickness notch.

The properties of fatigue crack propagation were inspected in the weld metal, heat-affected zone, and base metal of the welded joints.

Main results obtained are as follows;

- (1) When a plate with an edge through-thickness notch is loaded by plane bending fatigue in unidirection, the 2 variant corner cracks on the upper and lower edge of the plate are initiated and propagated respectively from the notch.
- (2) In case of a specimen containing a corner crack, it is more reasonable to estimate the crack propagation rate by area of fracture surface than by crack surface length.
- (3) The rate of fatigue crack propagation becomes faster in the following order; weld metal, heat-affected zone, and base metal.
- (4) The specimen including reinforcement shape is rapidly failed throughout bond due to effect of its shape when the repeated load exceeds a certain cycle.

1. 序 論

反復荷重을 받는 대부분의 熔接構造物에는 熔接時 수반된 작은 언더컷트, 氣孔, 冷間 및 熱間균열과 不純物 등을 起點으로 한 微細疲勞균열이 存在한다. 이러한 熔接構造物은 使用壽命中 상당한 부분이 微細疲勞

균열을 包含하고 있는 상태이므로, 熔接構造物의 使用壽命을 評價하기 爲해서는 熔接이음부의 疲勞균열 傳播特性을 考慮할 必要가 있다⁽¹⁾.

균열은 그 形狀에 따라 貫通균열과 非貫通表面 균열로 나눌 수 있으나, 실제 熔接部에서는 대부분의 균열이 非貫通表面균열(以下 表面균열)의 形態로 存在한다. 表面균열은 半圓形, 四分圓形, 半橢圓形, 四分橢圓形 등으로 구분되며(四分圓形이나 四分橢圓形 균열은 모서리균열 혹은 角隅균열(corner crack)이라고도 함) 이들은 거의가 成長함에 따라 그 形狀이 變化한다⁽²⁾⁽³⁾. 따라서 表面균열을 가진 部材의 疲勞균열傳播特性을 究明하기 爲해서는 균열의 形狀變化를 正確히 把握할 必

† 1982년도 大韓機械學會 材料 및 破壞部門學術講演會에서 發表

* 正會員, 韓國海洋大學 船用機械工學科

** 正會員, 少年의집 工業專門大學 機械科

要件 있다.

한편 片側貫通노치를 가진 板材가 平面굽힘疲勞荷중을 片振으로 받을 경우 板의 上面(upper edge)에서는 引張應力の 反復作用으로 四分橢圓形 表面균열(以下 모서리균열)이 發生·傳播할 것이고, 壓縮應力を 反復적으로 받게 되는 下面(lower edge)에서도 별개의 균열이 發生·傳播할 것이 예상된다.

本 研究에서는 上·下面모서리균열의 發生·傳播機構 및 傳播에 따른 形狀變化를 究明하기 爲해서, 片振 平面굽힘疲勞荷중에 의해 片側貫通 노치로부터 發生傳播하는 上·下面모서리균열에 대해 微視的 및 巨視的인 立場에서 連續적으로 관찰·검토하였다. 또한 鋼熔接部를 熔着金屬(WM), 熱影響部(HAZ), 본드部(Bond), 母材(BM) 및 熱影響部와 母材사이(HAZ-BM) 등으로 細分하여, 各部에 設置된 노치로부터 發生·傳播하는 모서리균열의 舉動을 比較·考察하여 鋼熔接부의 굽힘疲勞균열 傳播特性을 究明하였다.

2. 實驗方法

2.1. 試驗材 및 試驗片

本 實驗에 사용한 試驗材는 國產 SS41 軟鋼(4.5t) 및 SM 50 高張力鋼(4.5t) 두 種類로 하였다. SS 41은 高 산화티탄계 被覆아아크 熔接棒 KSE-4313(φ3.2)을 이용하여 手動아아크熔接하고, SM 50은 軟鋼 및 50 kg/mm² 級 高張力鋼 單層熔接用인 AWS EH-14, F-71

와이어(φ3.2) 및 플럭스를 이용하여 自動潛弧熔接해서 맞대기이음 熔接試驗片을 제작하였다. 이들의 化學的 成分과 機械的 性質을 Table 1에 나타내고 있다.

試驗片의 切斷은 熔接線方向과 균열傳播方向이 壓延方向과 같게 하였다.

맞대기이음 熔接의 그루브形狀은 I形이며, 被覆아아크熔接한 SS 41은 루우트간격 3.7 mm로 2層熔接을 行하였고, 潛弧熔接한 SM 50은 루우트간격 없이 뒷판(backing bar)을 附着시킨 狀態에서 單層熔接을 行하였다. 이들은 모두 熔接變形을 防止할 目的으로 拘束 狀態에서 熔接하였고, 被覆熔接棒은 擴散性水素로 인한 균열 發生의 影響을 除去할 目的으로 100°C 乾燥爐에서 1시간 동안 乾燥시킨 後에 즉시 使用하였다. 또한 熔接비이드의 잉여높이에 의한 影響을 검토하기 爲해서는 SS 41 母材板上에 비이드熔接을 하였다.

Table 2에 이들의 熔接條件과 入熱量이 明示되어 있다.

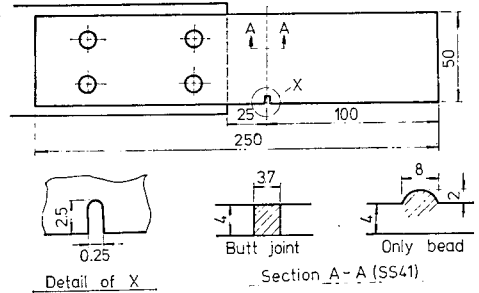


Fig. 1 Configuration and dimension of specimens.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of materials.

Materials	Chemical compositions (wt%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Y.P (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	El. (%)
SS41	0.173	0.044	0.513	0.071	0.0169	26	43	28
KSE-4313	0.06	—	0.45	0.012	0.08	40	49	27
SM50	0.184	0.09	1.18	0.016	0.02	34.5	51	28
AWS. EH-14	0.04	0.55	0.166	0.014	0.011	—	54.5	29

Table 2 Welding conditions.

Welding		Current (A)	Voltage (V)	Speed(cm/min)	Heat input (kj/cm)
Shielded metal-arc	1 st	100	28	15.7	10.7
	2 nd	85	25	16.1	7.9
	Bead	90	26	15	9.4
Submerged-arc		470	30	55	12.3

비이드熔接試驗片을 제외한 나머지 試驗片은 熔接비이드의 잉여높이를 除去하고 Fig. 1과 같은 치수로 機械加工한 後, 양면을 모두 研削하여 최고 #1,000사포까지 사용해서 손研磨을 끝으로 두께 4.0mm로 제작하였다. 비이드熔接試驗片은 미리 두께 4.0mm로 研削加工한 다음 그위에 熔接비이드단을 設置하여 같은 치수로 機械加工하였다. 여기에 Fig. 1과 같이 試驗하고자 하는 各部 즉 母材, 熔着金屬, 熱影響部, 본드部, 그리고 熱影響部와 母材 사이에 各各 두께 0.25mm 슬롯팅커터(slotting cutter)를 이용하여 노치를 加工하였다.

2.2. 實驗裝置 및 實驗方法

實驗에 사용한 試驗機는 本 研究室에서 考案·製作한 片心輪式 定變位 平面굽힘 疲勞試驗機로서 이것의 概略圖를 Fig. 2에 보인다. 板狀試驗片의 一端은 固定

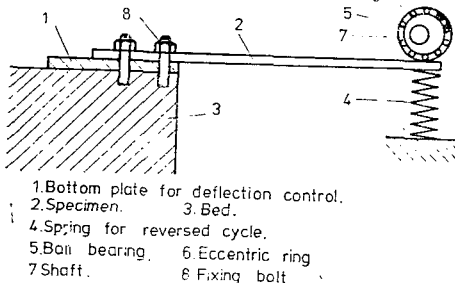


Fig. 2 Schematic diagram of the bending fatigue tester.

볼트로 固定하고, 自由端은 片心輪의 회전에 의하여 反復的으로 平面굽힘 荷重을 받게 하였다. 이 片心輪의 外周에는 볼베어링을 끼워서 試驗片과의 사이에 摩擦을 피할 수 있도록 하였다.

反復荷重의 速度는 9.17Hz이며 횟수는 최고 $10^5 \sim 10^6$

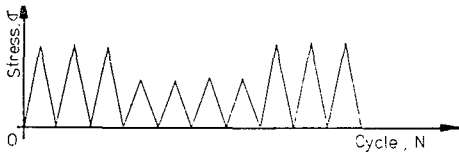


Fig. 3 Stress pattern for observation of fracture surface in fatigue test.

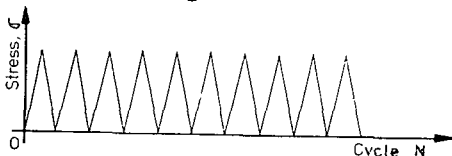


Fig. 4 Stress pattern for measurement of crack propagation rates in fatigue test.

회 까지 加하였다. 또한 應力의 形態는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 두 種類로 하였다. Fig. 3은 試驗片 上面에서 發生·傳播하는 모서리균열의 形狀變化를 連續觀察할 目的으로 加한 2段의 片振平面 굽힘應力의 形態이며 Fig. 4는 熔接部 各部의 疲勞균열 傳播特性을 比較하기 위해 加한 均일한 크기의 片振平面 굽힘應力의 形態이다.

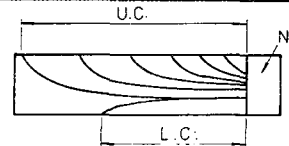
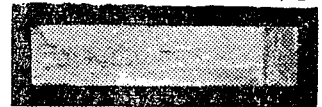
또한 傳播하는 上·下面모서리균열의 길이는 일정한 反復荷重을 加한 後 移送顯微鏡(travelling or reading microscope)을 이용하여 0.01mm까지 測定하였다.

上·下面모서리균열의 疲勞破面은 SS 41 母材試驗片을 대상으로 走査型電子顯微鏡을 이용하여 微視的으로 觀察·比較하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 片振平面 굽힘疲勞荷重에 의한 上·下面 모서리균열의 發生 및 傳播舉動

Fig. 5는 SS 41 母材를 대상으로 2段의 片振平面 굽힘疲勞荷重을 加하여 일정 길이만큼 균열을 傳播시킨 疲勞破面으로서 그 巨視的 樣相을 나타낸 것이다. 여기서 오른



U.C.: Upper corner crack
L.C.: Lower corner crack
N.: Notch

Fig. 5 Macrograph of fracture surface and beach marks.

이 上面의 모서리균열은 Koterazawa,⁽⁵⁾ Kawahara⁽⁶⁾ 등이 보고한 半橢圓形 非貫通균열(表面균열)과 비슷한 樣相으로 傳播하고 있다. 즉 板狀 試驗片이 片側에 '貫通노치'를 갖는 경우라도 片振平面 굽힘荷重을 받으면 上面에서 發生·傳播하는 疲勞균열은 表面에 非貫通노치를 갖는 경우에 生기는 半橢圓形 表面균열과 비슷한 形狀으로 傳播된다. 이것은 노치가 斷面을 貫通한 狀態이지만 引張應力은 노치상부 自由表面에서 最大로 作用하므로 應力集中 効果는 非貫通 表面노치와 비슷하기 때문인 것으로 판단된다.

다음으로 下面모서리균열에 關해서 考察해 보면, 片振荷重이기 때문에 壓縮應力만을 反復的으로 받는 下面의 노치 前方에는 應力集中으로 인해 塑性域(plastic

zone)이 形成된다. 이 塑性域은 Fig. 6과 같이 單一塑性域(monotonic plastic zone)과 交番塑性域(cyclic plastic zone)으로 構成되어 있다⁽⁷⁾. 이 두 塑性域은 荷重을 加하는 동안(負荷 半사이클)에는 모두 降伏點 이상의 壓縮應力을 받지만, 荷重을 除去해서 試驗片이 彈성에 의해서 原狀態로 돌아갈 때(除荷 半사이클)에는 單一塑性域은 降伏點 미만의 引張應力을 받고, 交番塑性域은 降伏點 이상의 引張應力을 받아서 引張塑性變形하게 된다. 따라서 이 交番塑性域內의 높은 引張應力으로 인해서 疲勞균열은 下面노치 先端에서부터 發生·傳播하는 것으로 생각된다. 이상과 같이 壓縮應力만을 받는 경우에도 疲勞균열이 傳播한다고 하는 것은 Hubbard가 行한 軸方向 壓縮疲勞 균열傳播試驗結果에서도 보고되어 있다⁽⁸⁾.

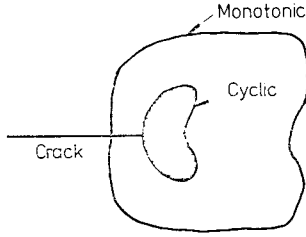


Fig. 6 Schematic diagram of monotonic and cyclic plastic zone.

Fig. 7은 上·下面모서리균열의 傳播狀態를 SM50 母

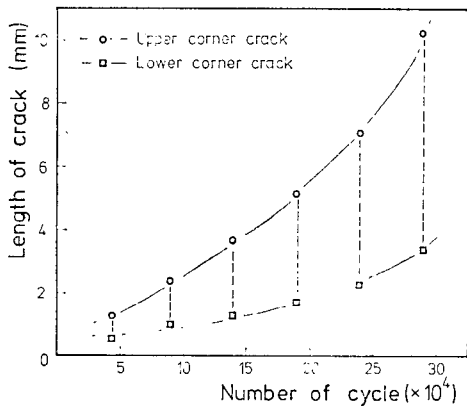


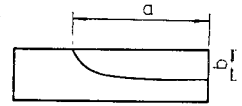
Fig. 7 Relation of upper and lower corner crack of SM 50.

材에 대해서 顯示한 것이다. 이들 上·下面 모서리 균열은 거의 同時에 發生하지만 應力反復回數의 增加와 함께 두 균열의 길이 差가 점차 커짐을 알 수 있다. 즉 下面모서리균열의 傳播速度增加는 上面쪽을 따르지 못함을 보인다. 또한 上面모서리균열의 傳播速度는 下面 모서리 균열의 傳播狀態에 의해 상당히 영향을 받는 것으로 推定된다.

3.2. 四分橢圓形 모서리균열의 形狀變化와 破面成長速度

四分橢圓形으로 傳播하는 上面모서리균열의 形狀變化는 Fig. 5의 疲勞破面上에 나타난 비이치마아크(beach mark)를 관찰하여 究明할 수 있다. 이 비이치마아크는 Fig. 3과 같이 2段의 應力을 加할 때 생긴 것으로서, 2段中 低應力에 의해서 매우 低速으로 傳播한 疲勞破面이다.

균열의 前進方向 길이(以下 길이) a 와 깊이方向 길이(以下 깊이) b 를 Fig. 8과 같이 잡고, 移送顯微鏡을 이용하여 비이치마아크의 形狀



으로 나타난 各 모서리 균열의 길이 a 와 깊이 b 를 測定해서 a 와 b 의 關係를 求한 結果 a 와 b 는 本 實驗에서는 式 (1) 과 같은 關係로 나타났다.

$$b = 1.317 \log a + 1.289 \quad (1)$$

즉 表面에 나타난 균열길이 a 만 測定하면 式 (1)에 의해서 균열깊이 b 를 推定할 수 있다.

또한 傳播하는 上面모서리균열의 破面은 四分橢圓形이므로 a 와 b 의 關係를 이용하면 그 面積 $S(=0.25 \pi ab)$ 가 구해진다. 따라서 任意의 사이클數에 의해서 增加된 破面の 面積 ΔS 를 사이클數로 나누면 破面成長速度(fracture surface growth rate) ds/dn 를 계산할 수 있다.

一般的으로 疲勞균열 傳播特性은 균열길이만의 成長速度(crack propagation rate)인 da/dn 와 應力強度係數範圍(stress intensity factor range) Δk 와의 相關關係에 의해서 評價한다. 그러나 本 實驗의 경우와 같이 균열이 試驗片 斷面을 貫通하면서 傳播하지 않고 試驗片 表面 近處만을 傳播하는 非貫通表面균열에서는 疲勞균열 傳播特性을 評價하기 위해서 길이 a 만의 傳播速度인 da/dn 보다는 破面成長速度인 ds/dn 를 이용하는 것이 더 合理的이라고 생각된다. Fig. 9 (a), (b)는 貫通균열과 非貫通表面균열의 균열傳播에 따른 破面成長을 比較하기 위한 것으로서 하부의 화살표는 균열傳播方向을 나타낸다. 初期에 균열이 길이 C_0 만큼 傳播

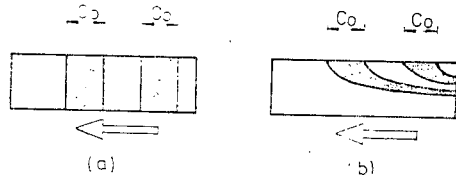


Fig. 9 Comparison of fracture surface growth rate of through and part through crack.

했을 때와, 일정 길이 傳播한 後 같은 길이 C₀만큼 傳播했을 때 增加된 破面의 面積을 比較해 보면, (a)의 貫通균열인 경우는 破面增加가 일정하나, (b)의 모서리균열인 경우는 균열의 成長과 더불어 增加된 破面의 面積은 더욱 커짐을 알 수 있다. 換言하면 初期에는 균열길이 상당히 많이 增加되더라도 새로 생긴 破面의 面積增加는 별로 크지 않고 또한 有效斷面의 減少도 크지 않다. 따라서 da/dn 및 ds/dn 를 有效斷面減少率이나 破面成長率의 見지에서 생각하면 非貫通表面균열을 가진 材料의 疲勞균열 傳播特性을 平價함에 있어서는 Δk 에 대한 破面成長速度 ds/dn 의 關係를 이용하는 것이 타당하다.

Fig. 10은 이들을 比較할 目的으로 SM 50母材에 대해 疲勞균열 傳播試驗을 行하여 Δk 에 대한 da/dn 와 ds/dn 의 關係를 동시에 表示한 것이다. 여기서 Δk 는 式(2)에 의하여 계산하였다⁽⁶⁾⁽⁹⁾.

$$\Delta k = 0.5 \Delta \sigma_b \sqrt{\pi a} \quad (\text{kg/mm}^{3/2}) \quad (2)$$

여기서,
 $\Delta \sigma_b$ = Bending stress range (kg/mm²)
 a = Crack length (mm)

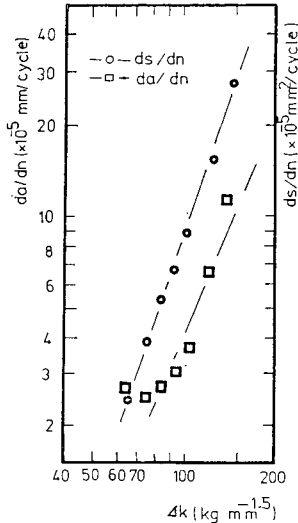


Fig. 10에 의하면 ds/dn 쪽이 da/dn 에 비하여 좋은 直線性을 보이고 있다. 특히 균열傳播 初期에 아주 좋은 直線關係가 이루어진다.

3.3. 上·下面모서리균열의 疲勞破面に 대한 微視的 考察

Fig. 11은 上·下面모서리균열의 疲勞破면에 대하여 微視的으로 觀察·比較하기 위해서 走査型電子顯微鏡을 이용하여 얻은 사진이다. (A)(B)(C)는 모두 노치先端에서 5mm 떨어진 부분의 破面으로서(A)는 上面 모서리균열의 自由表面 近處이고 (B)는 內部이며, (C)는 下面모서리균열의 自由表面 近處이다. 各部에서 共히 疲勞破面의 特徵인 스트라이에이션(striation)이 觀察되고 있으며, 특히 가장 큰 應力을 받아서 제일 빠른 速度로 균열이 傳播한 上面모서리균열의 自由表面

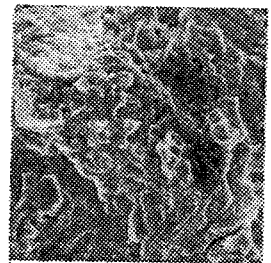
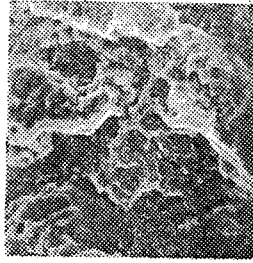
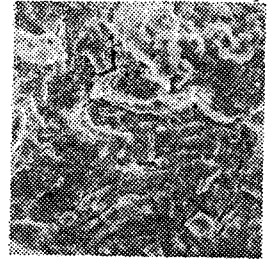
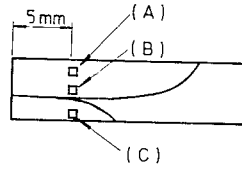


Fig. 11 Fractographs of upper and lower corner crack.

近處의 破面에서는 다른 부분에 비해서 微細균열(micro crack)이 많이 보이고 스트라이에이션간격(striation spacing)도 가장 큰 것을 알 수 있다.

그러나 문지름작용(rubbing action)의 흔적은 內部에서 생긴 (B)破面에서 가장 심하게 나타나고 있다.

3.4. 熔接部 各部의 疲勞균열 傳播特性

Fig. 12는 SS41 및 SM50을 各各 맞대기이음 熔接한 熔接部の 빅커스 硬度를 나타낸다. 양쪽 모두 熔着金

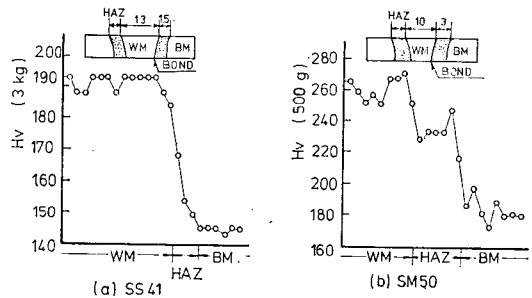


Fig. 12 Distribution of hardness in butt welded joints.

屬의 硬度가 상당히 높지만 熱影響部의 幅은 自動溶弧 熔接한 SM 50쪽이 더 넓게 나타났다.

Fig. 13은 SS41 熔接部 各部의 疲勞균열 傳播速度 da/dn 를 應力強度係數範圍 Δk 에 대해서 圖示한 것이다.

Fig. 14는 같은 條件에서 Δk 와 ds/dn 와의 關係를 圖示한 것으로서 이것이 全般的으로 da/dn 쪽보다 分散이 더 적음을 알 수 있다. 특히 균열傳播 初期에는

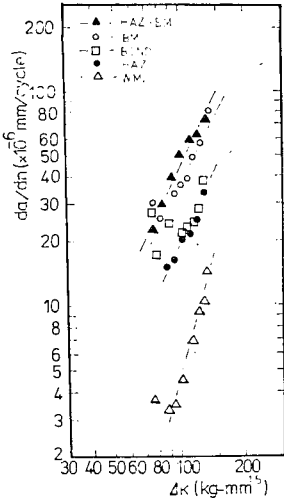


Fig. 13 da/dn vs. Δk in welded joint of SS41.

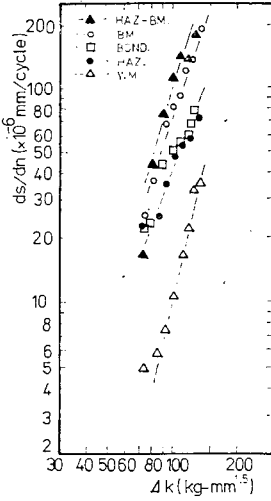


Fig. 14 ds/dn vs. Δk in welded joint of SS41.

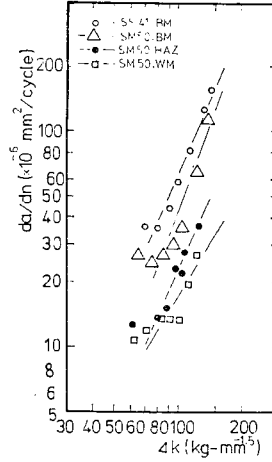


Fig. 15 da/dn vs. Δk in welded joint of SM50.

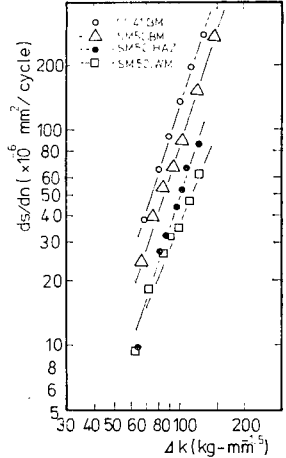


Fig. 16 ds/dn vs. Δk in welded joint of SM50.

ds/dn 쪽이 da/dn 에 비해서 상당히 좋은 直線關係를 보이고 있다. 그러나 各部에서의 疲勞균열 傳播速度의 상대적인 關係는 동일하다. 즉 熔着金屬(WM)에서 균열은 가장 늦게 傳播하고, 熱影響部(HAZ)와 본드部(bond)가 다음으로 비슷하며, 다음이 母材(BM)이고, 熱影響部와 母材사이(HAZ-BM)가 母材보다 약간 빠르게 傳播하고 있다. 이상과 같이 熔接部 各部에 있어서 균열 傳播速度에 差異가 나타나는 것은 다음과 같은 理由로 考察된다.

本 實驗에서와 같이 熔接에 의한 硬化層을 가진 試驗片에 있어서는 母材의 降伏強度를 초과하는 應力을 받는 경우 塑性變形率(plastic strain)은 母材側에 集中되므로 노치나 균열이 熔着金屬에 存在하면 노치 前方의 塑性變形率 集中은 母材만으로 된 균열한 材料의 경우보다 더작게 된다.⁽¹¹⁾ 이러한 塑性變形率 偏重現狀으로 말미암아 熔着金屬에서 疲勞균열이 傳播하는 경우 그 前方에는 塑性域이 아주 작게 形成되므로 疲勞균열 傳播速度도 늦게 나타나는 것으로 推定된다.⁽¹²⁾

Fig. 15 및 Fig. 16은 SM 50 熔接部の 疲勞균열 傳播特性을 da/dn 및 ds/dn 에 관해서 各各 圖示한 것이다. 여기서도 균열 傳播初期에는 ds/dn 로 表示한 것이 훨씬 좋은 直線關係를 보이고 있다. 疲勞균열 傳播速度는 SS41과 비슷한 경향을 나타내고 있다. 즉 熔着金屬이 가장 늦게 傳播하고, 母材가 가장 빠르며, 熱影響部는 熔着金屬보다 다소 빨리 傳播함을 알 수 있다. 그러나 SS41에서는 熔着金屬의 傳播速度가 다른 부분에 비하여 아주 늦지만 SM 50은 큰 차이가 없음을 나타내고 있다.

3.5. 熔接비이드의 잉여높이에 의한 形狀效果

Fig. 17은 熔接비이드의 잉여높이가 균열 傳播에 미치는 效果를 검토하기 위해 母材에 單層 熔接비이드만을 設置한 後 비이드잉여 높이를 削除한 것과 그레로든 試

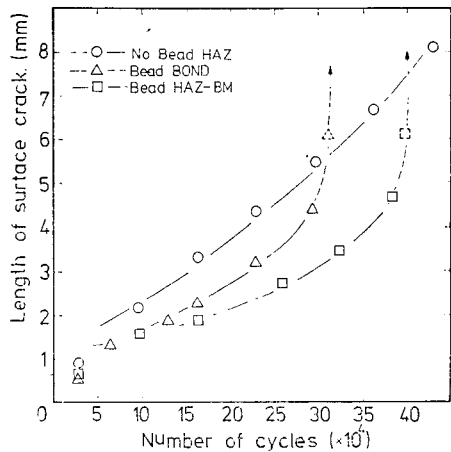


Fig. 17 Effect of reinforcement shape on fatigue crack propagation.

驗片上에서 균열 傳播 狀況을 比較한 것이다.⁽¹³⁾ 잉여 높이를 削除한 試驗片은 노치 先端에서부터 順次的으로 균열이 傳播하여, 成長初期에는 비이드잉여 높이가 가진 것 보다 더 빠르다. 그러나 어느 限界值 이상의 사이클數에서는 비이드잉여높이가 있는 試驗片이 갑자기 破斷에 이르고 있음을 알 수 있다. 이는 비이드잉여 높이가 없는 試驗片에서는 노치 先端에만 應力 集中이 생기거나 비이드잉여높이가 있는 것은 비이드잉여높

이 自體의 形狀, 본드部의 비이드表面 不連續 및 微細한 언더컷트(under cut) 등으로 應力이 노치 先端에만 集中되지 않고 試驗片 全體幅의 본드部에 分散된다. 따라서 노치 前方이 아닌 다른 본드部에서도 微細균열이 發生·成長하여 어느 순간에 하나로 합쳐지면서 全體的인 破斷에 이른다라고 생각된다. 특히 비이드잉여높이 가 있는 試驗片에서 熱影響部와 母材 사이에 노치를 設置한 경우에도 破斷은 노치 前方에서 생기지 않고 結局 본드部에서 생긴다.⁽¹⁴⁾

4. 結 論

片側貫通 노치를 가진 國產 SS 41 및 SM 50 鋼 맞대기이음 熔接試驗片에 대해서 自作한 試驗機를 사용하여 片振平面굽힘疲勞試驗을 行한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

- (1) 片側貫通 노치를 가진 板材가 片振의 平面굽힘 疲勞荷重을 받는 경우 板의 下面에서는 上面과는 別개로 균열이 發生·傳播한다.
- (2) 表面균열을 가진 試驗片에 있어서는 表面에 나타난 균열길이에 의하는 것 보다는 破面面積에 의해 균열傳播速度를 評價하는 것이 合理的이다.
- (3) SS 41 및 SM 50 鋼 熔接部의 片振平面굽힘疲勞 균열 傳播速度는 母材가 가장 빠르고, 다음이 熱影響이고 熔着金屬이 가장 늦다.
- (4) 熔接試驗片의 본드部에 있어서 疲勞균열傳播速度는 비이드잉여높이를 가진 경우가 初期에는 잉여높이를 削除한 경우보다 더 늦지만 일정횟수 이상의 應力을 받으면 試驗片 全體의 본드部에 걸쳐 急速한 破斷이 일어난다.

References

1. Stanley T. Rolfe, John M. Borson, Fracture and Fatigue Control in Structures, Prantice-Hall, New Jersey, 1977 pp. 1~7.
2. 宋智浩, 破壤力學의 現況(Ⅱ), 大韓機械學會誌, Vol.21, No.1, 1981, pp. 10~20.
3. David Broek, Elementary Engineering Fracture Mechanics, Sijthoff & Noordhoff, Netherlands, 1978, pp. 80~86.
4. 二瓶正俊 外 2人, SM 58鋼 突合せ熔接繼手表面切缺材의 疲れき裂의 發生と 傳播舉動, 日本溶接學會誌 Vol.47, No.9, 1978, pp. 22~28.
5. 小寺澤良一, 南坂繁, 繰返し曲げによる非貫通疲勞き裂の進展, 日本材料學會誌, Vol.26, No. 289, 1977, pp. 41~47.
6. 川原正言, 栗原正好, 表面き裂의 疲勞による 傳播成長過程에 關する 豫備的考察, 日本造船學會, 論文集, No.137, 1975, pp. 297~306.
7. T.S. Kang, Fatigue Crack Propagation and Cyclic Deformation at a Crack Tip, Int. Journ. of Fracture, Vol.10, 1974, pp. 201~222.
8. R.P. Hubbard, Crack Growth under Cyclic Compression, J. Basic Eng., Trans. ASME, D.91, 1969, pp. 625~631.
9. K. HAYASHI, H. ABÊ, Stress Intensity Factors a Semi-elliptical Crack in the Surface of a Semi-infinite Solid, Int. Journ. of Fracture, Vol.16, No.3, 1980, pp. 275~285.
10. ASM, Fractography and Atlas of Fractographs, Metals Handbook, Vol.9, 1974, pp. 200~201.
11. R.S. Deny, Moiré Study of Plastic Strain Distribution in Welded Joints Containing a Hard Interlayer., REVUE DELA SOUPURE, LASTIJD-SCHRIFT, pp. 99~109.
12. 金永植, 光干涉法による 進展する 疲勞き裂先端의 はずみ分布의 測定, 日本溶接學會誌, Vol. 48, No. 9, 1979, pp. 731~736.
13. 金澤武, 飯田國廣, 熔手接繼の強度, 溶接全書, 産報出版, 東京, Vol. 17, 1979, pp. 153~156.
14. 金永植, 趙相明, 軟鋼板 熔接部의 굽힘疲勞크랙 傳播特性에 關한 研究, 大韓機械學會 秋季學術大會抄錄集, 1980, pp. 151~156.